



développement d'une méthode d'éco-innovation

Wafa Samet Kallel

► To cite this version:

Wafa Samet Kallel. développement d'une méthode d'éco-innovation. Autre. Arts et Métiers Paris-Tech, 2010. Français. NNT : 2010ENAM0058 . pastel-00558488

HAL Id: pastel-00558488

<https://pastel.hal.science/pastel-00558488>

Submitted on 21 Jan 2011

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.

École doctorale n°432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité “ Conception ”

présentée et soutenue publiquement par

Wafa SAMET KALLEL

Le 16 décembre 2010

Développement d'une méthode d'éco-innovation : Eco-MAL'IN

Directeur de thèse : **Jean-Pierre NADEAU**
Co-encadrement de la thèse : **Yann LEDOUX**

Jury

M. Daniel BRISSAUD, Professeur des Universités, G-SCOP, IP Grenoble
M. Denis CAVALLUCCI, Maître de conférences HdR, LGECO, INSA Strasbourg
M. Jean-Marc LELANN, Professeur des Universités, LGC, ENSIACET, Toulouse
Mme. Sylviane LEPRUN, Professeur des Universités, MICA, Université Bordeaux 3
M. Dominique MILLET, Professeur des Universités, LISMMA, Supméca, Toulon

Examineur
Examineur
Rapporteur
Examineur
Rapporteur

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de thèse M. Jean-Pierre NADEAU et mon co-directeur M. Yann LEDOUX pour m'avoir accueilli en thèse et m'avoir encadrée et accompagnée tout au long de ces trois années. Je leur exprime mon extrême reconnaissance pour leurs précieux encadrements, pour leurs disponibilités et les échanges intéressants qui m'ont permis d'acquérir des compétences techniques et d'ouvrir ma vision de designer d'intérieur vers une culture industrielle.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury de thèse : Messieurs BRISSAUD, CAVALLUCI, LELANN, MILLET et Madame LEPRUN. Je tiens à vous exprimer, Madame, Monsieur, toute ma gratitude et je vous remercie vivement pour les précieuses remarques faites sur mes travaux de thèse.

Mes remerciements à tous les membres du laboratoire TREFLE ENSAM, centre Bordeaux : enseignants-chercheurs, doctorants et secrétaires pour l'atmosphère studieuse et chaleureuse du laboratoire. C'est avec beaucoup de plaisir et de chance que j'ai pu réaliser ce travail de doctorat au sein de ce laboratoire exceptionnel. Je souhaite remercier vivement tous ceux avec qui j'ai beaucoup échangé durant ces trois années de thèse et qui m'ont aidé, chacun à sa manière : Muriel, Sylviane, Audrey, Marion, Fred, pour leurs conseils et les discussions qu'on a partagées. Merci à mes collègues : Vanessa, Carolina, Olfa, Rym, Nesrine, Elvire, Cécile, Arnaud, Mario, Essam, Malik, Vladimir, Andrea... Travailler avec vous m'a apporté énormément, qu'ils soient assurés de ma profonde amitié. Une mention toute particulière à Salma et Nada, deux amies Tunisienne, pour leurs précieuses amitiés qui ont su toujours m'apportées et leurs soutiens incomparables.

Merci également aux stagiaires : Julien DUFOUR et Nathalie LALANNE pour leurs participations dans différentes études menées dans le cadre de cette thèse. Les discussions et les échanges ont toujours été enrichissants et m'ont permis d'appréhender d'autres dimensions dans les sciences de l'ingénieur.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance pour mes grands-parents, mes parents : Abdel Hamid et Najoua, mes sœurs : Leila, Lobna et Hana, mes beaux frères et mes neveux. Vous avez toujours été présents pour m'aider et m'encourager depuis le début de mon parcours Universitaire. Soyez assurés de ma plus profonde reconnaissance et de l'amour que je vous porte. Aussi qu'un grand merci à toute ma belle famille, pour leur soutien sans faille qui m'a permis de réaliser ce travail. Leur affection et patience m'ont toujours donné confiance et m'ont été indispensable pour l'aboutissement de ma thèse.

Enfin, à mon cher mari : Mohamed, pour les immenses concessions qu'il a acceptées pendant ces trois années de thèse et qui sans lui rien n'aurait pu être possible. Il a été présent pour moi, m'a fait confiance et m'a apporté tout le soutien et l'amour. Le mot « Merci » ne serait jamais suffisant pour lui exprimer ma gratitude et mon admiration.

« Chaque génération, sans doute, se croit vouée à refaire le monde. La mienne sait pourtant qu'elle ne le refera pas. Mais sa tâche est peut-être plus grande. Elle consiste à empêcher que le monde se défasse. »

Albert Camus © The Nobel Foundation 1957

PREAMBULE

De la conception de produit à l'aménagement de l'habitat

L'univers de l'art, de la création et du design est concerné par la nouvelle ère du développement durable et de l'éco-conception. Ces nouveaux concepts modifient et font évoluer la conscience environnementale citoyenne en vue des problèmes environnementaux de notre société industrielle, économique et dans tous nos modes de vie. En effet, le développement industriel, l'évolution perpétuelle des tendances en conception de produit et dans le domaine de création architecturale, l'augmentation de la production, de la consommation et de l'urbanisation engendrent des impacts environnementaux sur l'environnement de moins en moins réversibles. Ces impacts affectent de plus en plus la qualité de notre environnement et de notre vie quotidienne et provoquent des changements des pensées autour de l'utilité des produits, des fonctions proposées par nos espaces intérieurs en termes de confort et de mobiliers et aussi leurs usages.

Face à cette évolution sociétale, les créateurs d'objets d'art, de produits industriels, les designers d'aménagement d'espaces intérieurs doivent s'interroger sur l'essor de la création et les enjeux actuels de conception face au développement durable et de l'éco-conception. L'urgence de se tourner vers des solutions de développement respectueuses de l'environnement devient essentielle pour valoriser chaque projet de création artistique. *A l'égard de ces nouveaux facteurs sociaux et environnementaux, quelle serait donc la dialectique novatrice qui permettrait de proposer de nouvelles pistes de réflexion d'innovation et de création ? Quel sont les changements nécessaires pour engager une pratique de conception moins nocive pour l'environnement ? Et quel serait l'évolution de nos pratiques artistiques ?*

Afin de tirer profit de cette problématique d'épuisement des ressources de l'environnement, il paraît indispensable aujourd'hui d'élargir nos cadres de réflexion habituelle, de prendre en compte les nouveaux enjeux écologiques dans nos modèles de création et de s'inscrire dans une conscience sociétale des problèmes de l'environnement. L'objet d'art, la création de produit et d'espaces intérieurs doivent refléter l'évolution de notre société et être repenser de telle manière à apporter une harmonie à notre environnement humain. Cette approche de création impose donc d'être attentifs à l'utilisation des matériaux, aux choix des volumes et des proportions, à l'optimisation de nos ressources disponibles dans l'environnement pour des fins d'usage et de confort mais aussi, à la cohérence des couleurs et la composition de chaque projet artistique pour des fins esthétiques et d'estime de chaque usager.

Jusqu'à aujourd'hui, le produit industriel et ses rejets ont très peu été exploités comme matières premières ou réintégrés dans d'autres cycles industriels. Avec les nouvelles orientations écologiques, ces ressources deviennent des opportunités pour de nombreuses activités notamment, celle des disciplines artistiques. J'ai souligné l'intérêt d'intégrer les opportunités liées à l'approche de conception des produits industriels dans notre réflexion de création et d'expression artistique dans un article intitulé « *la création face aux enjeux du développement durable et de l'éco-conception* » (Samet et al, 09). Des orientations possibles pour l'utilisation des ressources de produits industriels (matières, rejets, composants du produit...) sont proposées dans cet article pour illustrer une évolution du processus de création vers une optique de création artistique plus respectueuse de l'environnement. Toutefois, dans toutes les disciplines artistiques (design produit, design textile, design aménagement et design graphique), les besoins de création avec une vision environnementale

sont analogues : créer de la valeur d'usage à l'objet d'art, au produit industriel ou à l'espace intérieur avec une portée esthétique et symbolique tout en respectant l'environnement.

Pour réussir son intégration et assurer sa pérennité et son insertion par rapport à une société plus attentive et sensible aux problèmes environnementaux, l'activité artistique doit mobiliser de nouveaux moyens d'expression, de communication et de nouvelle démarche créative et méthodique permettant d'éveiller la conscience environnementale de la société à travers la création, l'innovation et la conception. Les designers de produits et d'espaces intérieurs ont un rôle essentiel à jouer au cœur de ce processus de création associée à la vision environnementale. Cependant, leurs expériences et compétences nécessitent une ouverture vers une culture environnementale et industrielle. Les designers doivent élargir leurs connaissances environnementales, développer des compétences plus techniques au niveau des matériaux, des agencements, s'adapter aux problèmes de conception existants et insérer leurs démarches de conception dans une logique de design industriel.

En tant que designer d'espaces intérieurs, j'ai proposé une méthode d'éco-innovation permettant d'assister une équipe de conception en séances de créativité et de conduire le groupe vers la recherche de concepts éco-innovants de produits industriels. Mes activités durant cette thèse m'ont permis également de participer à des groupes de créativité pluridisciplinaires, de côtoyer des ingénieurs, d'échanger avec des connaissances largement diversifiées, de prendre conscience des différents problèmes environnementaux, du contexte actuel du développement durable et d'éco-conception. Cette thèse relève d'une expérience unique et riche car les travaux développés apportent une approche complémentaire à ma formation initiale de design. La méthode d'éco-innovation, objet de mes travaux de thèse est aussi applicable au produit architectural, tel que l'habitat et l'aménagement de ses espaces intérieurs. C'est à ce titre que cette thèse permet d'ouvrir de nouvelles voies de recherche et de développement au croisement de la conception environnementale de produit et de l'aménagement de l'habitat.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : ECO-CONCEPTION ET ECO-INNOVATION	5
1 Définition de l'éco-conception.....	5
2 Les enjeux de l'éco-conception pour l'entreprise	6
2.1 Evolution de la responsabilité sociale des entreprises	6
2.2 L'éco-conception : une démarche prometteuse pour l'entreprise.....	7
3 L'éco-conception en démarche de conception de produit.....	9
3.1 La définition de l'objectif environnemental	9
3.2 L'approche du cycle de vie d'un produit.....	10
3.3 L'approche multicritère des impacts environnementaux.....	11
3.4 Plan d'action en éco-conception : démarche exhaustive ou sélective.....	12
4 Les niveaux d'éco-conception	13
5 Les outils d'éco-conception	16
5.1 Approche quantitative	16
5.2 Approche qualitative:	17
5.2.1 Approche matricielle	17
5.2.2 Approche graphique : modèle et diagramme radar.....	19
5.2.3 Approche spécifique : listes, guidelines de conception environnementale, check-lists	22
5.3 Synthèse	32
6 Le contexte industriel	33
7 L'éco-innovation	34
8 Les outils d'éco-innovation.....	35
8.1 L'outil logiciel de résolution de problèmes contradictoires « Eco-design».....	35
8.1.1 Présentation du processus.....	35
8.1.2 Exemple d'illustration pour l'amélioration du roulement des pneus	36
8.1.3 Commentaires	37
8.2 La méthode « LCPlanner version 3.0 »	38
8.2.1 Présentation du processus.....	38
8.2.2 Commentaires	42
8.3 Outil de résolution dans une vision d'éco-innovation basé sur TRIZ.....	42
8.3.1 Présentation de l'outil de résolution dans une vision d'éco-innovation.....	42
8.3.2 Analyse critique de l'outil de résolution proposé par Chen et al.	44
8.3.3 Commentaires	44
9 Conclusion	45
CHAPITRE II : L'OUTIL MAL'IN : CADRE DE RECHERCHE ET D'APPLICATION	47
1 Les méthodes structurées de résolution de problème	47
2 Présentation du gaufrier.....	49
3 Etat de l'existant concernant les méthodes d'analyse d'un problème	50
3.1 Analyse fonctionnelle.....	51
3.2 Mise en place du questionnaire MAL'IN	51
3.3 Vision fonctionnelle du problème	53
3.3.1 Approche organique	54
3.3.2 Approche structurelle	55
3.3.3 Approche physique.....	55
3.4 Loi d'intégralité des parties.....	56
3.5 Phénomènes physiques.....	57
3.6 Couplage des paramètres pertinents	58
4 Etat initial de la connaissance autour de la résolution du problème	59
5 Biais d'attaque du problème	59
5.1 Analyse par les paramètres pertinents	59
5.2 Analyse par le graphe substances/champs	60
6 Résolution	60

6.1	Ressources.....	60
6.2	Outils de résolution	61
6.2.1	Contradiction physique.....	61
6.2.2	Contradiction technique	61
6.2.3	Association insatisfaisante	61
6.2.4	Simplification, élimination de substances	61
6.2.5	Résolution du problème par le groupe de créativité	61
6.2.6	Résolution de la contradiction physique trouvée dans le cadre du gaufrier.....	61
7	MAL'IN, TRIZ et l'éco-innovation	62
8	Conclusion	63
CHAPITRE III : FONDEMENTS D'UNE DEMARCHE D'ECO-INNOVATION.....		65
1	L'ensemble produit.....	66
2	Approche environnementale parcimonieuse: axes d'éco-efficacité et situations de vie	68
2.1	Approche intégrée : axes d'éco-efficacité et situations du cycle de vie du produit	69
2.1.1	Les axes d'éco-efficacité vision produit	69
2.1.2	Les situations de vie impactées lors de la conception du produit	70
2.2	Vision structurée et orientée en phase préliminaire de conception : la matrice « Eco-MAL'IN »	73
2.3	Les 39 actions à réaliser	75
2.3.1	1 ^{er} axe d'éco-efficacité « réduire l'influence matérielle »	75
2.3.2	2 ^{ème} axe d'éco-efficacité « augmenter l'efficacité énergétique »	76
2.3.3	3 ^{ème} axe d'éco-efficacité « réduire les risques de toxicité »	77
2.3.4	4 ^{ème} axe d'éco-efficacité « améliorer la recyclabilité et la réutilisation »	77
2.3.5	5 ^{ème} axe d'éco-efficacité « optimiser l'utilisation des ressources »	78
2.3.6	6 ^{ème} axe d'éco-efficacité « augmenter la durée de vie et la désirabilité des produits »	78
2.3.7	7 ^{ème} axe d'éco-efficacité « augmenter les fonctions et les services »	79
3	Critique des actions à réaliser mises en place.....	80
3.1	Vision critique des règles d'or.....	81
3.1.1	Comparaison des actions à réaliser de la Matrice Eco-MAL'IN et celles de Bombardier	82
3.1.2	Phase « avant utilisation »	82
3.1.3	La phase « utilisation »	83
3.1.4	Phase « fin de vie »	85
3.2	Synthèse	86
3.2.1	La pertinence de l'expression des actions à réaliser	86
3.2.2	La vision parcimonieuse du cadre environnemental	87
3.2.3	La structuration de l'analyse de l'ensemble produit par les actions à réaliser	87
4	Conclusion	87
CHAPITRE IV : METHODE D'ECO-INNOVATION ECO-MAL'IN		89
1	Intégration de la vision environnementale à la méthode MAL'IN	89
2	La phase de pré-analyse et de structuration.....	90
2.1	Déroulement de la phase de pré-analyse	90
2.2	La matrice Eco-MAL'IN.....	92
2.3	Les 6 ressources pertinentes	93
3	La phase d'analyse et de structuration	95
3.1	Analyse fonctionnelle et flux fonctionnels.....	95
3.2	Opportunités du produit	97
3.3	Les fiches de connaissances	97
3.4	Utilisation des opportunités du produit et des fiches de connaissances	99
3.5	Structuration du problème	99
3.5.1	Les 6 types de structuration.....	100
3.5.2	Les tableaux d'analyse	101
4	La formalisation.....	109
4.1	La formalisation actuelle.....	109
4.2	La formalisation par la méthode Eco-MAL'IN	109
5	La résolution.....	110
5.1	La résolution actuelle	110
5.2	La résolution par la Méthode Eco-MAL'IN	110
6	Récapitulatif de la méthode Eco-MAL'IN	110

7	Qualification de l'outil Eco-MAL'IN, application de la méthode sur un produit industriel « le gaufrier »	111
7.1	1 ^{ère} application : problème de conception préalablement défini	111
7.1.1	Phase de pré-analyse	111
7.1.2	Phase d'analyse et de structuration	113
7.1.3	Phase de formalisation	115
7.1.4	Phase de résolution	117
7.1.5	Commentaires	120
7.2	2 ^{ème} application : problème de conception défini par une analyse des ressources de l'ensemble produit	120
7.2.1	Phase de pré-analyse	120
7.2.2	Phase d'analyse et de structuration	122
7.2.3	Phase de formalisation	126
7.2.4	Phase de résolution	127
7.2.5	Commentaires	129
7.3	3 ^{ème} application : comparaison de MAL'IN et d'Eco-MAL'IN	129
7.3.1	Etude par la méthode MAL'IN	129
7.3.2	Etude par la méthode Eco-MAL'IN	131
7.3.3	Phase de pré-analyse	131
7.3.4	Phase d'analyse et de structuration	132
7.3.5	Phase de formalisation	134
7.3.6	Phase de résolution	135
7.3.7	Comparaison des 2 méthodes utilisées	136
8	Conclusion	136
CHAPITRE V : NOUVEL OUTIL D'ECO-INNOVATION : FAST ECO-MAL'IN		139
1	Les matrices Fast Eco-MAL'IN	139
2	Utilisation de la démarche Fast Eco-MAL'IN	149
3	Quatrième application : personnalisation d'un ensemble produit	150
3.1	Recherche de critères de personnalisation : approche de designer	150
3.2	Synthèse : définition de critères de personnalisation	152
4	Application de la démarche Fast Eco MAL'IN au cas du gaufrier	153
4.1	Phase de pré-analyse	154
4.2	Phase de formalisation	154
4.3	Phase de résolution	155
4.3.1	Modèle Pb1 : personnaliser l'ensemble produit sans dégrader la puissance	156
4.3.2	Modèle Pb2 : personnaliser l'ensemble produit sans dégrader la fiabilité	157
4.3.3	Modèle Pb3 : personnaliser l'ensemble produit sans dégrader la productivité	158
4.3.4	Modèle Pb4 : personnaliser l'ensemble produit sans dégrader la facilité d'utilisation	160
5	Synthèse	161
6	Conclusion	162
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		163
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		169
<i>Annexe 1: Elimination des contradictions physiques par séparation des exigences contradictoires</i>		<i>177</i>
<i>Annexe 2 : Paramètres de conception de la théorie TRIZ</i>		<i>178</i>
<i>Annexe 3 : Paramètres de conception et axes d'éco-efficacité</i>		<i>179</i>
<i>Annexe 4 : Matrice des contradictions</i>		<i>180</i>
<i>Annexe 5 : Principes d'Innovation</i>		<i>182</i>
<i>Annexe 6 : Ressources TRIZ et adaptées par MAL'IN</i>		<i>186</i>
<i>Annexe 7 : Ressources TRIZ adaptées par MAL'IN avec une vision développement durable</i>		<i>188</i>
<i>Annexe 8 : Exemples de fiches de connaissances</i>		<i>191</i>

INTRODUCTION GENERALE

Problématique de recherche

Nous assistons aujourd'hui à une évolution de la conscience collective pour la prise en compte de l'environnement en conception de produit industriel. Cette réalité du monde industriel conduit à reconsidérer le développement d'outils classiques de conception et d'innovation pour intégrer la problématique environnementale. L'évolution du processus de conception, dans ce cadre, a conduit à plusieurs méthodes et outils d'éco-conception. L'innovation, paramètre majeur du développement et de la croissance de l'entreprise, doit aussi conduire à des concepts éco-innovants.

Il existe peu de méthodes complètes d'éco-innovation. Il est indispensable de développer une méthode alliant l'analyse du problème dans le sens du développement durable, la formalisation adaptée et la sélection des outils de résolution adéquats.

L'utilisation des outils d'éco-innovation permettra aux entreprises de s'approprier le concept de développement durable à l'échelle de l'émergence de leurs produits. Cette approche intégrée de conception permet d'influencer les modes de production et de consommation, d'anticiper les besoins futurs des utilisateurs et d'assurer la pérennité de la société.

Cadre de recherche

Ces travaux de thèse, réalisés au centre Arts et Métiers ParisTech de Bordeaux, s'inscrit dans le cadre de la mutation de la Méthode d'Aide à l'INnovation (MAL'IN) vers un outil d'éco-innovation.

La démarche actuelle MAL'IN permet d'analyser et structurer un problème de conception de produit, de le formaliser et de le résoudre. Adaptée aux phases préliminaires de conception, la méthodologie est basée sur l'analyse fonctionnelle, l'analyse des phénomènes physiques et sur la définition des biais d'attaque du problème. La résolution fait appel à des outils adaptés de la théorie TRIZ et d'autres outils réalisés dans le groupe de recherche « Systèmes Energétiques et Conception ».

En nous appuyant sur la méthode MAL'IN, nous positionnons notre approche de recherche dans le cadre des phases de recherche de concepts éco-innovants lors de séances de créativité.

Objectifs de recherche

L'enjeu de la thèse concerne l'intégration de la vision développement durable dans la méthode actuelle MAL'IN à travers la structuration et la mise en place de connaissances environnementales nécessaires au stade de la recherche de concepts et ainsi de faire évoluer cet outil vers un outil d'éco-innovation. Ce processus d'éco-innovation doit associer la vision environnementale à l'analyse fonctionnelle de l'ensemble produit et doit intégrer ces données le plus en amont possible dans le processus de développement du produit.

Par conséquent, ces travaux impliquent d'une part, l'intégration de la vision environnementale aux outils existants de la méthode MAL'IN notamment dans la phase d'analyse et de formalisation du problème de conception et, d'autre part, le développement de nouveaux outils d'éco-innovation permettant d'adapter et de structurer la démarche existante en fonction des nouvelles données d'analyse environnementale du produit. L'ensemble des méthodes proposées doit apporter des réponses cohérentes depuis la spécification du besoin jusqu'à la recherche de concepts éco-innovants.

La méthode développée doit convenir à tous les membres du groupe de créativité, en particulier, il faut s'assurer que l'expression des différentes connaissances et des orientations de structuration et de formalisation soit compréhensibles et interprétables par les participants. L'éco-innovation impose, entre autres, la personnalisation du produit, un designer intervient classiquement dans ce cadre. Les outils doivent être conçus pour être interprétés par cet intervenant particulier.

Organisation des travaux proposés

La thèse s'articule autour de cinq chapitres représentés de manières synthétiques sur la figure 1. Les deux premiers chapitres présentent des exemples d'outils et méthodes d'éco-conception et d'éco-innovation ainsi que le cadre de recherche et d'application : la méthode MAL'IN. Les trois derniers chapitres expliquent les fondements de l'approche éco-innovation proposée, adaptée à l'outil MAL'IN. La reconception d'un produit industriel le «gaufrier »va permettre de montrer l'efficacité de la méthode. L'articulation des différents chapitres conduit à la construction de la méthode Eco-MAL'IN et à un outil rapide de résolution, l'outil Fast Eco-MAL'IN.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les outils d'éco-conception et d'éco-innovation. Dans un premier temps, l'analyse des outils d'éco-conception met en évidence la complexité de certains outils et leurs non adaptabilité aux phases préliminaires de conception. De surcroît, on explore les données pertinentes d'analyse et d'évaluation environnementale. Dans un deuxième temps, l'analyse des outils d'éco-innovation conduit à identifier les points clés de l'approche éco-innovation (de la phase de spécification des objectifs environnementaux jusqu'à la recherche de concept). Egalement on évoque les problèmes liés à l'utilisation de ces outils en séances de créativité (manque d'interactivité et de structuration de l'analyse, choix intuitifs...).

A la fin de ce premier chapitre, nous identifions les attentes et les besoins des industriels en termes d'outils d'éco-innovation et ainsi nous spécifions nos objectifs de recherche par rapport à la démarche existante MAL'IN. Ces objectifs seront détaillés dans le deuxième et le troisième chapitre.

Le deuxième chapitre consiste à présenter le cadre de recherche et d'application de la Méthode d'Aide à l'INnovation (MAL'IN). Nous recensons, à partir d'un cadre général d'étude, des exemples d'outils de résolution de problème et de créativité et aussi les problèmes liés à leur intégration au processus industriel de conception et à des supports numériques. Puis, nous décrivons la méthode MAL'IN et nous détaillons son déroulement à travers l'exemple du gaufrier.

Le troisième chapitre présente les fondements d'une démarche d'éco-innovation. Dans ce chapitre, nous définissons une vision parcimonieuse de l'approche globale de la vision environnementale adaptée à la connaissance du produit au stade de la recherche de concept. Cette approche permet de décrire l'interaction environnement/produit par une matrice appelée « matrice Eco-MAL'IN ». Enfin, nous proposons d'orienter la démarche d'éco-innovation à partir d'un ensemble d'actions à réaliser en conception permettant, par l'analyse, de guider le groupe de créativité vers une conception environnementale. Nous exprimons ainsi trente neuf actions à réaliser qui découlent de l'interaction environnement/produit, qui sont associées à 7 axes d'éco-efficacité, et dont l'expression est issue d'une nouvelle description de l'ensemble produit. L'expression de ces actions fait l'objet d'une analyse critique et d'une comparaison avec des directives connues (Bombardier, règles d'or).

Le quatrième chapitre propose l'évolution de la méthodologie globale Eco-MAL'IN et l'application de cette méthode sur le « gaufrier ». Pour cela, nous décrivons chaque étape de la nouvelle méthode avec tous les outils détaillés et commentés. La matrice Eco-MAL'IN est utilisée pour une phase de pré-analyse. Pour assurer l'analyse et la structuration du problème, on prolonge l'analyse fonctionnelle classique avec la matrice Eco-MAL'IN. La matrice Eco-MAL'IN est alors complétée par l'association à chaque action à réaliser d'une analyse des opportunités du produit, de fiches de connaissances dédiées et cohérentes avec l'expression des actions et de propositions de structuration du problème. Les outils de résolution utilisés ensuite sont ceux de MAL'IN. Un synoptique général vient décrire le déroulement de la méthode. Ensuite, nous nous appuyons sur trois exemples d'application sur le gaufrier afin de montrer en détail le déroulement de la nouvelle méthode Eco-MAL'IN. Le dernier exemple permet une comparaison entre la méthode initiale MAL'IN et la nouvelle proposition Eco-MAL'IN.

Le cinquième chapitre présente un outil de résolution rapide orienté éco-innovation : Fast Eco-MAL'IN. L'outil est construit sur des modèles de problème : on veut réaliser chaque action sans dégrader 4 paramètres de conception de la théorie TRIZ. Ces paramètres décrivent les performances attendues d'un produit industriel : la puissance, la fiabilité, la productivité, la facilité d'utilisation. La matrice des contradictions permet de construire les liens entre actions à réaliser, paramètres et principes d'innovation pertinents. L'outil réunit 7 matrices liées à chaque axe d'éco-efficacité.

Cet outil s'utilise directement après la phase de pré-analyse. Les opportunités du produit et les fiches de connaissances peuvent être utilisées mais la qualité de l'outil est qu'il ne demande pas d'analyse approfondie et est rapide et simple à utiliser. Bien sûr, il sera moins efficace que la méthode Eco MAL'IN.

Nous appliquons ce nouvel outil également sur le « gaufrier ». Le problème de conception à résoudre concerne l'augmentation de la durée d'utilisation par l'estime de l'utilisateur pour le produit. On profite de l'action exprimée sur la personnalisation du produit pour montrer comment un designer va interpréter les principes sélectionnés et démontrer que notre outil n'altère pas son imagination mais la stimule.

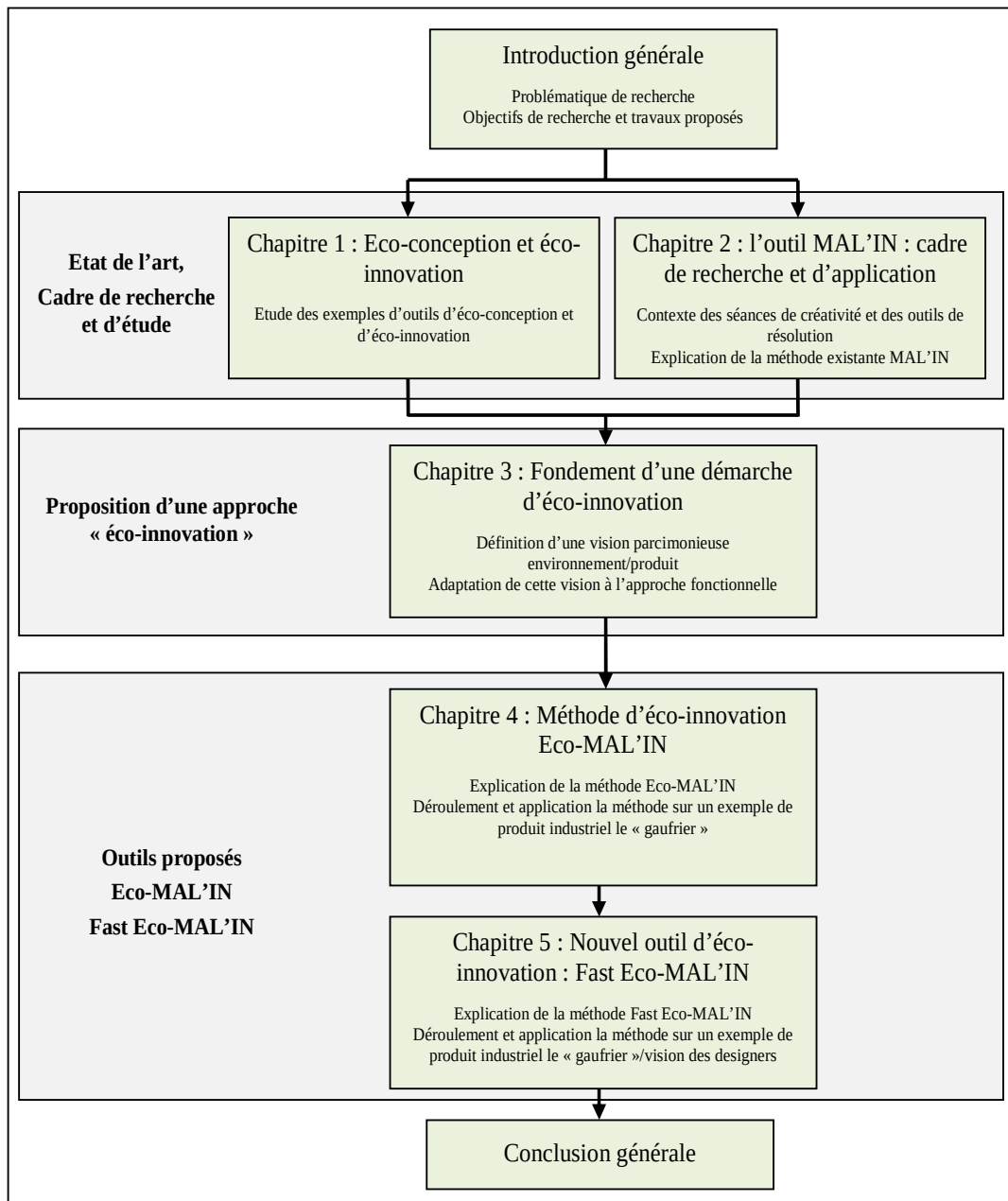


Figure 1 : Synoptique des travaux proposés dans la thèse

CHAPITRE I : ECO-CONCEPTION ET ECO-INNOVATION

L'activité de conception industrielle est un enjeu essentiel pour le développement de l'entreprise et de la société. Les problèmes d'innovation, la problématique environnementale et du développement durable imposent de nouvelles contraintes aux industriels. L'intégration du concept de développement durable dans les démarches actuelles de conception de produit impose l'adaptation et l'évolution des outils et des méthodes existants ainsi que la création d'outils d'éco-innovation.

Dans la littérature, existent différents outils tels que les outils TRIZ, l'éco-compass, le diagramme PIT (Product Idea Tree Diagram), la méthode QFD (Quality Function Deployment), les cartes d'idées du Mind Map, etc. De nombreux auteurs analysent, critiquent et adaptent ces outils, en vue d'élaborer une démarche de conception environnementale et innovante (Jones et al, 00), (Jones et al, 01), (Chen et al, 03). D'autres approches comme celle proposée par (Kobayashi 06) consistent à intégrer les préoccupations d'éco-innovation dès les premières phases de la conception. Ils envisagent de modifier les approches d'analyse du besoin et de définition de modèles de problèmes, de faire évoluer les outils d'aide à l'innovation et de définir des indicateurs d'éco-efficacité utilisables le plutôt possible, comme par exemple au niveau du choix de concept.

1 Définition de l'éco-conception

D'après la norme internationale ISO 14062 intitulé «Management environnemental – Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produits», l'éco-conception est définie comme l'intégration des contraintes environnementales dans la conception et le développement de produits (Afnor 03). La norme ISO 14062 concerne les « produits » mais aussi les services. Dans les paragraphes qui suivent, nous proposons de faire un état des différentes visions proposées autour du concept d'éco-conception.

Dans une vision très globale, Gunilla Ölundh, dans la thèse intitulée « Modernising Ecodesign, Ecodesign for innovative solutions » (Ölundh 06) définit l'éco-conception comme l'intégration systématique des considérations environnementales dans le développement de produit, de services et de systèmes. D'après le Centre Technique des Industries Mécaniques (Cetim) et le bureau d'études Ecoeff, l'éco-conception est définie comme « une démarche de conception de produit (et de son emballage) qui doit permettre, à performances égales, de minimiser les impacts environnementaux, tout au long du cycle de vie du produit conçu, dans un processus d'amélioration continue et à coût maîtrisé ». Cette définition ajoute la notion du cycle de vie à la minimisation des impacts environnementaux (CETIM 03).

L'Ademe définit l'éco-conception comme une démarche préventive qui permet de réduire les impacts négatifs des produits sur l'environnement au travers de l'ensemble de leur cycle de vie, tout en conservant leur qualité d'usage. C'est à dire, intégrer l'environnement dans les phases de conception ou d'amélioration d'un produit, au même titre que le coût, la qualité, la faisabilité technique, les attentes du marché, etc. (Ademe 06). L'Ademe précise que cette nouvelle approche s'applique aux produits et/ou services de tous secteurs : produits électriques et électroniques, ameublements, produits ménagers, emballages, produits de construction, transports, services touristiques, etc. (Ademe 02). Cette vision d'éco-conception reprenant les contraintes industrielles de conception est aussi exprimée dans le fascicule ECODESIGN : Best Practice of ISO/TR 14062, qui définit l'éco-conception comme une activité permettant d'identifier les aspects environnementaux d'un produit de la même manière que les fonctions, le coût, la qualité, les aspects juridiques et techniques, et de les

intégrer dans les stades amont du processus de conception de développement du produit (Kun-Mo Lee et al, 05)

La société Schneider Electric, dans son guide général d'éco-conception, insiste sur la combinaison des considérations économiques et environnementales dans la démarche de conception. Ils définissent l'éco-conception comme une « Conception de produit/services satisfaisant au mieux les besoins des clients et dont l'impact environnemental est moindre sur l'ensemble de leur cycle de vie » (Schneider Electric 01).

La définition de l'éco-conception nous renvoie essentiellement à la conception de produit et/ou de service, mais en réalité elle s'étend aux modes de vie dans l'exploitation de la richesse environnementale et l'influence sur l'environnement à travers tous les impacts environnementaux du produit générés au long du cycle complet du produit. Cette vision a été déjà abordée par Brezet et Van Hemel (Brezet et al, 97), et aussi exprimée par Elisabeth Laville (Laville 04). Cette dernière confirme que l'éco-conception et le développement durable n'impose pas tant de produire et/ou de consommer moins que de produire et/ou de consommer mieux.

À travers ces différentes approches, nous définissons l'éco-conception comme une démarche de conception de produits ou de services permettant de causer le minimum d'impacts environnementaux sur le cycle de vie complet d'un produit, tout en optimisant l'aspect économique et en maximisant l'intérêt fonctionnel et les services. L'objet d'une telle démarche est de considérer, en plus des aspects fonctionnelles et économiques, une valeur environnementale à l'évolution du produit depuis l'extraction des matières premières jusqu'au son élimination en fin de vie.

2 Les enjeux de l'éco-conception pour l'entreprise

2.1 Evolution de la responsabilité sociale des entreprises

Dans l'ouvrage « piloter un développement responsable », Olivier Dubigeon affirme que l'engagement de l'entreprise, dans le cadre du développement durable, dépasse la seule valeur financière. D'après l'auteur, cela apporte aussi une valeur ajoutée au patrimoine commun et contribue incontestablement à créer une valeur globale (Dubigeon 09).

Afin de préciser cette vision, nous allons revenir sur les propos d'Élisabeth Laville qui retracent l'évolution de l'intégration des démarches du développement durable en entreprises, appelée également, la Responsabilité Sociale des Entreprises (RSE) (Laville 09). Elle définit trois grandes phases mais l'approche éco-conception se manifeste réellement dans la troisième phase (RSE 2.0).

- RSE (0.0) : Dans les années 1980 et au milieu des années 1990, les problèmes environnementaux causés par les entreprises commencent à être connus et compréhensibles par les différents acteurs (consommateurs, salariés, fournisseurs, actionnaires, etc.). Par contre, il n'y a eu que des initiatives externes à l'entreprise, comme la participation à des actions d'intérêt général (association de protection de l'environnement, des droits de l'homme, etc.). L'activité de l'entreprise reste donc inchangée.
- RSE (1.0) : Du milieu des années 1990 au milieu des années 2000, les entreprises s'ouvrent d'avantage sur les problèmes sociaux et environnementaux. Les entreprises s'intéressent de plus en plus aux impacts générés par leurs propres activités (production, distribution, achat,...). Cette responsabilité sociale et environnementale, se manifeste par différents engagements de l'entreprise : i. Adhésion à des codes de

conduite sur les pratiques d'entreprise (le pacte mondial des Nations unies de 1999) (Unesco 00), ii. Sensibilisation des salariés en interne pour développer des comportements plus responsable, iii. Formalisation de plans d'actions spécifiques, iv. Publications d'un rapport environnement résumant les initiatives et les actions définis par l'entreprise. Cette approche était avant tout orientée sur la gestion des risques et la préservation de l'image de marque publique.

- RSE (2.0) : A partir de l'année 2000, la responsabilité sociale des entreprises a extrêmement évolué. Il s'agit d'une véritable intégration dans la stratégie de l'entreprise et dans son modèle économique, avec une approche résolument orientée non plus sur la prévention des risques environnementaux et d'image mais sur les opportunités de marché liées à la fourniture de solutions sociétales et environnementales. La prise en compte de l'environnement et des principes du développement durable se manifeste réellement dans l'offre des produits et services. Cette approche volontaire permet aux entreprises d'adapter leurs missions, leurs stratégies et leurs activités à une nouvelle démarche de conception, en ayant considérés les principaux impacts environnementaux liés aux ponctions ou aux rejets sur le milieu naturel.

Ce dernier point est aussi partagé par Millet, dans son livre « *Intégration de l'environnement en conception « l'entreprise et le développement durable* », Appelée également « stratégie volontariste intégrative » (Millet et al, 03).

2.2 L'éco-conception : une démarche prometteuse pour l'entreprise

Comme l'affirme Laville (Laville 04), l'entreprise est une force de changement social, sans doute même la plus puissante de notre époque ; elle a tout à gagner à assurer ce rôle, voire à le revendiquer en se dotant d'un projet visionnaire et d'une mission ambitieuse. Ce propos souligne l'intérêt de repenser la finalité de l'entreprise, en lui intégrant de nouveaux objectifs et de nouvelles valeurs. L'éco-conception présente aujourd'hui un enjeu économique et concurrentiel pour les entreprises. Ceci s'explique d'une part, par les incitations externes : pression sociétale, respect de la réglementation, obtention d'une certification environnementale réclamée par les clients de l'entreprise, pression des fournisseurs... et d'autre part, par les incitations internes : gain d'argent, amélioration de la qualité des produits, motivation des salariés, amélioration de l'image de l'entreprise. Engager l'entreprise dans une démarche de développement durable instaure donc, un projet motivant stimulant et mobilisateur pour ses salariés mais aussi attrayant et différenciateur pour ses clients.

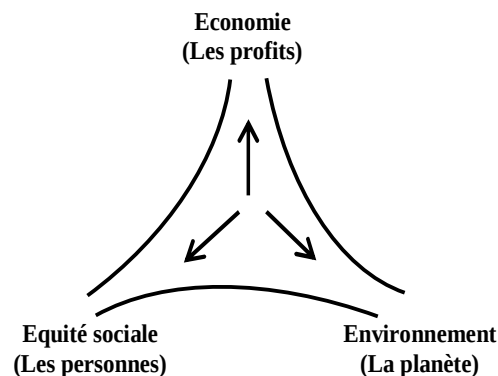


Figure 2 : Objectifs fondateurs du développement durable et du « triple bottom line »

OPPORTUNITES		
	CETIM 03	Dubigeon 09
Interne	Innovation et suivi des évolutions technologiques Continuité dans les démarches de management environnemental (ISO 14001 et EMAS) Économies possibles (matières, énergie, déchets...) et retours sur investissements Anticipation de la réglementation Motivation des salariés Enrichissement métiers	Enrichissement de la réputation de l'entreprise Gain en efficacité Innovation soutenable et vision globale Gain de temps et d'argent Productivité Baisse des incidents et des accidents Réactivité à gérer les risques et les opportunités Soutien des salariés et développement de leurs performances Préservation de l'environnement
Externe	Nouveaux marchés et pérennité du marché actuel Réponses apportées aux demandes des consommateurs et des donneurs d'ordre Nouveaux partenariats Avantage concurrentiel Image de marque (dynamisme, modernité) Intérêt des investisseurs (rentabilité et assurances) Limitation des problèmes juridiques (réduction des risques) Réduction des problèmes environnementaux (notamment en fin de vie)	Fidélisation des investisseurs Amélioration de la qualité des fournisseurs Fidélisation des clients et consommateurs et augmentation du business Performances boursières Capacité de négociation bancaire Economies judiciaires Prévention et anticipation aux nouvelles règles du jeu (sociales et environnementale) Positionnement responsable par rapport à des impacts environnementaux futurs Acquisition d'une gouvernance responsable et collaborative (capacité à arbitrer les contradictions entre business et patrimoine commun) Amélioration de l'approche relationnelle dans le marché (élimination des pratiques corruptrices, bonnes actions au sein des communautés locales, opportunités d'emploi,...) Reconnaissance des entreprises et cotation de celles qui sont responsables selon des indices développement durable
CONSTRAINTES		
	CETIM 03	
Interne	Nouvelle compétence à acquérir Effort de pédagogie, de formation Budget d'investissement Phase d'appropriation (3 à 5 ans) Définition de responsabilités claires pour éviter les conflits techniques en interne entre services (ex. sécurité et environnement) Qualification technique et homologation des solutions	
Externe	Nécessité d'une approche rigoureuse et multicritère avec plusieurs indicateurs à prendre en compte pour identifier les problèmes majeurs. Orientation vers la performance environnementale (gestion d'indicateurs dans le cadre d'une démarche de progrès et d'amélioration continue) Travail sur toute la chaîne du produit (fournisseurs, donneurs d'ordre ...) Effort de communication Critiques possibles (ONG...)	

Tableau 1: Contraintes et opportunités d'une entreprise dans le cadre d'un projet d'éco-conception

D'après ce point de vue, l'éco-conception devient, à la fois, un argument de vente auprès des consommateurs de plus en plus soucieux de l'environnement mais aussi une preuve responsable vis-à-vis de l'Etat amenant régulièrement à de nouvelles réglementations environnementales. Repenser la finalité d'une entreprise, selon une démarche d'éco-conception et un plan d'action global de développement durable (Détrie 05), revient à considérer sa culture, son métier, ses activités et ses compétences, en se basant sur un « triple bottom line ». Ce terme anglo-saxon, proposé par John Elkington, fondateur du cabinet anglais SustainAbility, implique l'évaluation de la performance globale d'une entreprise selon trois dimensions qui sont : « les personnes », « la planète » et « les profits ». En d'autres

termes, l'entreprise doit suivre trois axes fondateurs du développement durable : l'équité sociale, l'environnement et l'économie (Laville 04). La figure 2 montre les trois objectifs fondateurs du développement durable et du « triple bottom line ». D'après Olivier Dubigeon, une entreprise en position d'attente ou de suiveur, (appelée également : attentiste ou palliative (Millet et al, 03) augmente les risques d'exclusion du marché et de dégradation de son image. Alors qu'une entreprise responsable, accroît son attractivité, sa performance et sa pérennité (Dubigeon 09).

Bien que l'éco-conception soit une démarche prometteuse pour l'entreprise, il existe des contraintes interne ou externe qui peuvent freiner son engagement à entreprendre une démarche d'éco-conception. Le tableau 1 présente des exemples de contraintes et d'opportunités pour lesquelles les entreprises s'engagent dans une démarche d'éco-conception.

A partir du précédent tableau, on remarque que la liste des opportunités pour une entreprise souhaitant intégrer et adapter ses activités à une démarche d'éco-conception, est fortement encourageante par rapport à l'ensemble des contraintes associées. En tant qu'acteur dominant de la société, l'entreprise a pour responsabilité de suivre l'évolution de l'offre (les ressources naturelles disponibles, les normes en vigueur, les nouvelles normes...), et de la demande (besoin perpétuel des clients pour de nouveaux produits).

L'éco-conception se présente donc, comme une dimension essentielle qui contribue à faire évoluer l'entreprise en une entreprise responsable, en lui permettant, à travers ses activités de pallier à l'inadéquation de ces produits et procédés au regard des nouvelles contraintes liées au développement durable.

3 L'éco-conception en démarche de conception de produit

Intégrer l'éco-conception dans une démarche de conception de produit nécessite de concilier l'approche environnementale au processus classique de conception. Différents outils et méthodes d'éco-conception ont tenté d'apporter une réponse globale ou particulière pour associer ces deux approches. Cependant, on trouve des principes en communs pour l'ensemble de ces outils. Il s'agit de l'approche cycle de vie et de l'approche multicritère. Ces deux approches permettent de considérer globalement le cycle de vie d'un produit et d'analyser ses différents impacts sur l'environnement. Elles sont essentielles pour aborder une approche d'éco-conception.

Comme toute démarche de conception de produit, l'éco-conception est une démarche qui débute par des objectifs (les objectifs environnementaux), évolue selon un plan d'action (l'analyse du cycle de vie du produit et l'analyse des différents impacts environnementaux) et enfin, prend fin par l'obtention de solutions de conception (pistes d'amélioration de produit par une démarche de conception environnementale).

3.1 La définition de l'objectif environnemental

L'entreprise doit nécessairement commencer par définir des objectifs par rapport à sa capacité d'entreprendre l'intégration de la vision environnementale dans la conception de ses produits. S'engager par exemple sur des actions les plus simples à mettre en place à court terme, comme la réduction de la consommation de certaines ressources naturelles, réduction de masse, de volume, de nombre de pièce du produit ou de gestion de ses déchets en fin de vie, permet d'aider dans une première phase à comprendre et à cerner l'élaboration d'une démarche d'éco-conception. Ces actions auront des effets directs et perceptibles en terme d'économie, de résultats commerciaux, de différenciations sur le marché,...et permettent ainsi

de motiver les équipes conception et l'ensemble des salariés de l'entreprise pour des actions plus élaborées en terme de développement durable.

Dans une étude anglaise élaborée par Emma Dewberry, une classification d'approches associées à des stratégies d'entreprises en matière d'éco-conception, a été proposée (Dewberry 95). Cette classification identifie trois principales approches environnementales dans une démarche de conception de produits : approche process, approche produit et approche système.

Approche process : considéré comme une réponse à l'évolution de la réglementation, cette approche apporte des solutions palliatives aux problèmes environnementaux par des traitements en fin de processus (appelé aussi "end of pipe"). Les applications concernent les procédés de fabrication, les émissions de polluants, le contrôle des eaux usées, les déchets solides... Cela concerne également l'économie des ressources en matériaux (mise en place de circuits de recyclage des déchets) et en énergie d'un produit (utilisation des équipements de production moins énergivores) dans la phase de production (Janin 00). Les terminologies concernant ce type d'approche sont : la prévention de pollution, l'ingénierie environnementale (Dewberry et al. 96) et l'économie domestique (Dewberry 95).

Approche produit : développé suite à une réglementation plus rigoureuse, mais aussi à des pressions du marché et des consommateurs de plus en plus exigeants pour la qualité de leurs produit, l'entreprise doit être préventive et réactive dans la définition de ses objectifs environnementaux de conception. Ce type d'approche peut considérer un seul critère environnemental d'un produit ou l'ensemble de ses impacts tout au long du cycle de vie. Plusieurs terminologies définissent ce type d'approche, on peut citer : Ecodesign ou Eco-conception, Green Design, « Ecological design » ou conception écologique (Ventere 95), Life cycle design (Alting et al. 93), Environmentally Concious Design (ECD) (Mc Aloone et al 95), Eco-effective product design (Johansson 01) ou encore le DfE (Design for Environment) faisant partie des méthodes de conception dites DfX (Bralla 96) (e.g. Design for manufacturing Design for Serviceability, Design for Safety, Design for Disassembly, Design for recyclability, etc.).

Approche globale : appelée aussi "Global Design" ou conception globale. Ce type d'approche se manifeste d'une forte prise en compte des contraintes environnementales par l'entreprise (au niveau de son environnement industriel mais aussi d'un point de vue plus global, l'environnement en général). Cette approche de conception tend vers le développement durable. L'écologie industrielle (Frosh et al. 89) et le développement durable sont deux approches qui s'inscrivent dans ce cadre puisqu'ils dépassent l'échelle du cycle de vie du produit pour un système de conception global intégrant non seulement les valeurs technologiques et économiques classiquement considérées mais aussi les valeurs culturelles et sociales. D'après Janin (Janin 00), l'écologie industrielle ne concerne pas le cycle de vie d'un seul produit en termes d'impacts mais constitue les bases d'une approche système de la gestion des impacts environnementaux dans un écosystème industriel.

3.2 L'approche du cycle de vie d'un produit

L'approche cycle de vie d'un produit, consiste à considérer l'ensemble des impacts environnementaux depuis l'extraction des matières premières entrant dans la composition du produit, jusqu'à sa fin de vie et aux différents traitements nécessaires à son élimination (Le Pochat 05). On parle couramment d'une approche dite « du berceau à la tombe ».

Mener une Analyse complète de Cycle de Vie (appelée ACV) revient à évaluer l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un produit en prenant en compte tous les processus qui leurs sont associés. En termes de développement durable, les concepteurs ont identifié cinq phases du cycle de vie dans lesquelles les impacts environnementaux sont les plus importants (figure 3).

Nous les appellerons dans la suite du manuscrit : « situations de vie pertinentes du produit ». Il s'agit de : l'extraction de matière première, l'industrialisation, la distribution, l'utilisation et la fin de vie.

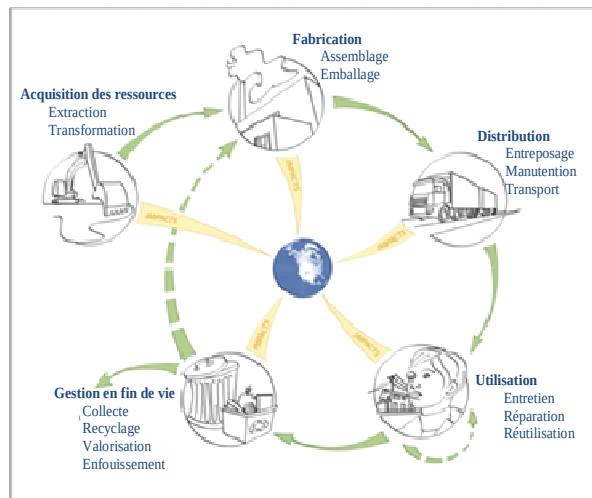


Figure 3: Les 5 situations de vie pertinentes d'un produit industriel extraites de www.ciraiq.org, 2008

Dans un contexte industriel, la prise en compte de l'environnement dépasse les limites du cycle de vie du produit et englobe l'environnement externe à l'entreprise (comme milieux naturels, relations entre les entreprises, cadre sociétal, etc.). Par conséquent, l'évaluation de la qualité environnementale d'un produit dépend des frontières considérées. Dans l'ouvrage « *Intégration de l'environnement en conception* » (Millet et al, 03), Dominique Millet souligne qu'une démarche environnementale s'étend sur l'ensemble des processus qui participent à la conception du produit fini en incluant, nécessairement, tous les processus amont (concernant les fournisseurs : extraction des matériaux et énergie, concernant les sous-traitants : fabrication de composants...) et aussi les processus aval du (distribution, opération de transport, de promotion, valorisation du produit en fin de vie, etc.). En fait cette proposition s'insère tout à fait dans la vision de l'ingénierie collaborative.

L'approche cycle de vie d'un produit, en démarche d'éco-conception, est essentielle pour deux raisons :

- Afin d'identifier les problèmes environnementaux les plus impactants.
- Afin d'évaluer l'influence des choix de conception (réduction de matériaux, substitution d'énergie, augmentation de la durée de vie d'un composant,...) sur toutes les étapes du cycle de vie du produit.

3.3 L'approche multicritère des impacts environnementaux

Un produit industriel est une source d'impacts sur l'environnement. Cela se traduit par la consommation des ressources (matière premières, ressources énergétiques, etc.) et par les rejets de substances dans l'eau, l'air et le sol (eaux usées, gaz d'échappement, etc.) (Ademe 99). L'AFNOR définit l'ensemble des consommations et rejets comme des aspects environnementaux (entrants et sortants) (Afnor 03) :

- Entrants : matériau et/ou consommation d'énergie.
- Sortants : les émissions, les déchets, les effluents, les bruits et les radiations.

Ces aspects environnementaux (entrants et sortants) représentent différentes catégories d'impacts : Épuisement de ressources, pollution, gênes. Afin de considérer l'ensemble de ces

différentes catégories, une approche multicritère est nécessaire. Cette approche consiste donc à identifier les différentes catégories d'impacts environnementaux du produit et à définir des objectifs et des actions prioritaires en fonction de leurs gravités. Cela doit permettre de dégager des choix de conception pour une réduction ou une amélioration d'impacts environnementaux. Cependant, la recherche de solutions optimales pour un ensemble de critères revient à résoudre un problème d'optimisation multi-objectifs (Azapagic et al. 99) (Bertolucci et al, 09). En effet, dans la plupart des cas, une amélioration d'un seul critère environnemental pour un système multicritère peut dégrader ou aggraver un ou plusieurs autres critères environnementaux de l'ensemble du système. On parle alors de phénomène de transfert entre impacts environnementaux (Luttrupp et al. 01). Dans la thèse intitulée « Intégration de l'éco-conception dans les PME : Proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits », Stéphane Le Pochat revient sur le phénomène de transfert entre impacts environnementaux et présente un exemple sur les transferts entre impacts environnementaux (tableau 2).

Produits	Solutions comparées		Aspects environnementaux améliorés	Aspects environnementaux dégradés	Commentaires
	Solution de référence	Nouvelle solution			
Carburants (pour automobiles et bus) [Ecobilan 02]	Carburants pétroliers	Biocarburants	Pollution de l'air, effet de serre, consommation de ressources fossiles, efficacité énergétique	Consommation d'eau, consommation d'engrais et pesticides, surfaces agricoles	Les transferts entre impacts environnementaux ont lieu entre : • d'une part, le système pétrochimique et la combustion de combustibles fossiles, • d'autre part, le système agricole.
Pièces pour l'automobile (aile avant de véhicule)	Tôle acier	Pièce plastique	Consommation de carburant (ressource fossile – pétrole –, pollution de l'air, effet de serre)	Recyclabilité du véhicule (déchets, ressources)	L'allègement du véhicule (dû à l'utilisation de plastique à la place de l'acier) entraîne des réductions de consommation d'essence (donc une réduction des pollutions liées à la combustion de carburant et une économie de ressource fossile). En revanche, les ailes en plastique n'étant pour l'instant pas recyclables, le taux de recyclabilité du véhicule est diminué.

Tableau 2: Exemple de transferts (non exhaustifs) entre impacts environnementaux liés à des choix de conception extrait de la thèse de Le Pochat (Le Pochat 05)

3.4 Plan d'action en éco-conception : démarche exhaustive ou sélective

Dans le module de sensibilisation à l'éco-conception défini par l'Ademe (Ademe 02), on distingue deux types d'approche : une démarche exhaustive et une démarche sélective. Le premier type de démarche présente une approche globale dans l'intégration de la vision environnementale dans la conception du produit et se définit en trois étapes :

1. une évaluation de l'ensemble des impacts environnementaux sur tout le cycle de vie du produit,
2. une recherche d'options de conception pour réduire les impacts environnementaux les plus pertinents,
3. une validation des pistes d'amélioration en s'assurant qu'elles n'aggravent pas d'autres impacts.

A la différence de la démarche exhaustive, la démarche sélective ne considère que certains problèmes environnementaux du produit. Aucune étape d'évaluation de ces impacts environnementaux n'est définie. Cette démarche se résume à deux étapes :

1. une recherche d'options de conception pour un ou plusieurs problèmes environnementaux préalablement identifiés,

2. une validation des pistes d'amélioration en s'assurant qu'elles n'aggravent pas d'autres impacts.

Mener une approche d'éco-conception basée sur une démarche exhaustive ou sélective nécessite l'intégration d'outils particuliers. On en identifie deux grandes familles :

- Les outils d'évaluation qualitatifs ou quantitatifs d'impacts environnementaux des produits, appelés aussi « Méthodes d'investigation » (Ademe 02). Ces outils peuvent concerner à la fois l'approche exhaustive par une prise en compte de tous les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie du produit (ex : ACV, NF X 30-300) (ISO 140 40), mais aussi l'approche sélective par l'évaluation d'un seul critère ou de certains impacts environnementaux (respectivement le contenu énergétique (Afnor 83) et l'Evaluation Simplifiée et Qualitative de Cycle de Vie (ESQCV) (Afnor 98).
- Les outils d'amélioration de la conception environnementale des produits, appelés aussi « Outils synthétiques » (Ademe 02). Ces outils aident les concepteurs à développer une approche d'éco-conception basée sur une démarche sélective. Parmi ces outils, on trouve les normes, les check-lists, les guides généraux et les guides internes à l'entreprise... Avec ce type d'outils, on apporte soit des améliorations ponctuelles sur le produit (e.g. réduction d'impacts environnementaux ou optimisation d'étape particulière du cycle de vie), soit, dans des cas particuliers, ces outils permettent une approche globale et exhaustive d'analyse de la qualité environnementale du produit.

La prise en compte d'une démarche exhaustive ou sélective ne dépendra que de la stratégie de l'entreprise et des ressources et compétences dont elle dispose. Les résultats obtenus seront des changements ponctuels (substitution de matériaux réduction de quantité de matière, optimisation de la durée d'une situation de vie particulière) ou bien des changements radicaux (évolution du produit vers le service).

4 Les niveaux d'éco-conception

L'intégration d'une démarche d'éco-conception exige préalablement la détermination du niveau de remise en cause du produit. Des recherches faites sur les niveaux d'éco-conception au niveau du produit ont montré qu'il existe quatre niveaux d'éco-conception (Brezet 97), (Stevens 97).

La figure 4 illustre les quatre niveaux d'éco-conception en fonction de l'amélioration de l'éco-efficacité du produit :

- Niveau 1 : Amélioration incrémentale du produit.
- Niveau 2 : Re-conception du produit.
- Niveau 3 : Nouveau concept produit.
- Niveau 4 : Innovation du système productif du produit

Dans la thèse intitulée « *Développement d'un système de management intégré de l'éco-conception des appareillages électriques de moyenne tension* », Wassim Daoud note que les niveaux 1 et 4 correspondent à des niveaux de réduction des impacts environnementaux allant de 50 à 95%. Il précise que les niveaux 1 et 2, implique des transformations permettant d'améliorer l'éco-efficacité des produits, tandis que les niveaux 3 et 4 conviennent à des modifications plus importantes et à de produits innovants (Daoud 09).

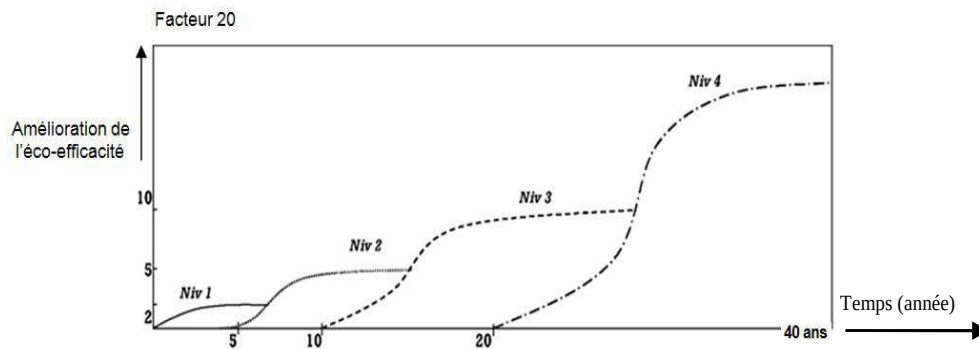


Figure 4: Niveaux d'éco-conception d'après (Brezet 97) et (Stevels 97)

Le niveau 1 « Amélioration incrémentale du produit » : ce premier niveau d'éco-conception correspond à des mesures curatives au niveau du produit. Cette approche est généralement adoptée par l'entreprise suite à des mesures réglementaires. La contrainte environnementale est gérée par des améliorations ponctuelles dans le but d'une évolution progressive et incrémentale du produit. Les actions recommandées à ce niveau d'éco-conception, sont facilement applicables pour divers types de produits (ex : réduire le nombre de pièces et la quantité de matières utilisés, réduire la masse du produit et des produits accessoires, réduire la consommation d'énergie, éliminer les traitements de surface ou les substances toxiques, changer les systèmes de fixation, réduire le temps d'assemblage et de désassemblage, etc.). Ces améliorations portées sur un produit, soulignent le bon sens du concepteur pour des alternatives de conception plus respectueuses de l'environnement.

Le niveau 2 « Re-conception du produit » : ce deuxième niveau d'éco-conception, dépasse le cadre strictement réglementaire. L'environnement devient une composante essentielle dans la stratégie de l'entreprise. Cette approche implique une mobilisation plus importante au niveau de l'équipe de conception ainsi que l'ensemble des acteurs de l'entreprise. La prise en compte de ce deuxième niveau d'éco-conception exige une remise en cause plus profonde du produit au niveau de sa conception. En d'autres termes, les fonctionnalités du produit restent inchangées, mais toute la conception évolue. Cette évolution peut influencer les techniques de fabrication et les relations internes et externes de l'entreprise.

- Au niveau du produit : modifier l'architecture du produit, introduire de nouveaux composants, substituer les matériaux existants par des matériaux à faible impact environnemental, etc.

Ces modifications envisagées sur le produit nécessitent des évolutions tant :

- Au niveau du procédé : faire évoluer les techniques de fabrication, optimiser les temps du processus de fabrication, etc.
- Au niveau de l'entreprise : implication des fournisseurs, des sous-traitants et des filières de valorisation par l'adaptation de leurs activités aux évolutions du produit.

En comparant avec le premier niveau d'éco-conception, on constate que ce niveau présente un objectif à la fois rassurant et prometteur pour les entreprises souhaitant initier une démarche d'éco-conception et saisir des évolutions de conception perceptibles pour leurs produits. Cependant, cette approche nécessite une réelle implication de l'équipe de conception, en développant continuellement leurs connaissances environnementales (réglementation, normes, guides généraux et spécifiques), ainsi que leurs capacités à utiliser des outils et méthodes d'éco-conception.

Le niveau 3 « Nouveau concept de produit » : viser l'évolution du produit avec ce troisième niveau d'éco-conception, c'est chercher à innover et à changer radicalement le produit. Ce

type d'approche implique la remise en question des fonctions techniques offertes par le produit, ainsi que l'évolution du système technique. Pour l'entreprise, il ne s'agit pas simplement d'une évolution de la conception du produit mais d'une nouvelle stratégie dans le développement et la commercialisation du produit, avec une vision long terme du marché. Le niveau 3 d'éco-conception nécessite une forte mobilisation de tous les partenaires de l'entreprise, qui doivent rétablir les objectifs du nouveau produit.

Marc Janin, dans sa thèse intitulée « *Démarche d'éco-conception en entreprise un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus* », (Janin 00), énumère les risques pour une entreprise décidant de faire évoluer ses produits, en adoptant ce niveau d'éco-conception :

- Les alternatives de produit peuvent engendrer de fortes dépenses avec des retours sur investissements incertains,
- Les alternatives de produit peuvent rendre les investissements courants inutiles et obliger certains fournisseurs à modifier entièrement leurs processus, au risque de les condamner,
- Les clients peuvent être réticents à acheter le nouveau produit ou service, si les avantages environnementaux ne vont pas de pair avec d'autres critères estimés indispensables (coût, performance, qualité,...),
- Les infrastructures nécessaires n'existent pas.

Le niveau 4 « Innovation du système productif du produit » : ce dernier niveau d'éco-conception impose à l'entreprise de repenser globalement ses activités, son organisation, ses compétences et à innover l'ensemble de son système industriel. Autrement dit, ce quatrième niveau d'éco-conception dépasse l'innovation de produit et vise plutôt l'innovation au sein de l'activité globale de l'entreprise. Avec ce type d'approche, un changement radical de l'organisation structurelle et fonctionnelle de l'entreprise est donc nécessaire (changement du mode de travail, de communication et de collaboration, etc.). Ces profonds changements sont également nécessaires, au niveau des infrastructures, de l'environnement externe à l'entreprise et du mode de vie du consommateur. On peut alors considérer qu'il s'agit d'une nouvelle entreprise. La figure 5 regroupe l'ensemble des quatre niveaux d'éco-conception.

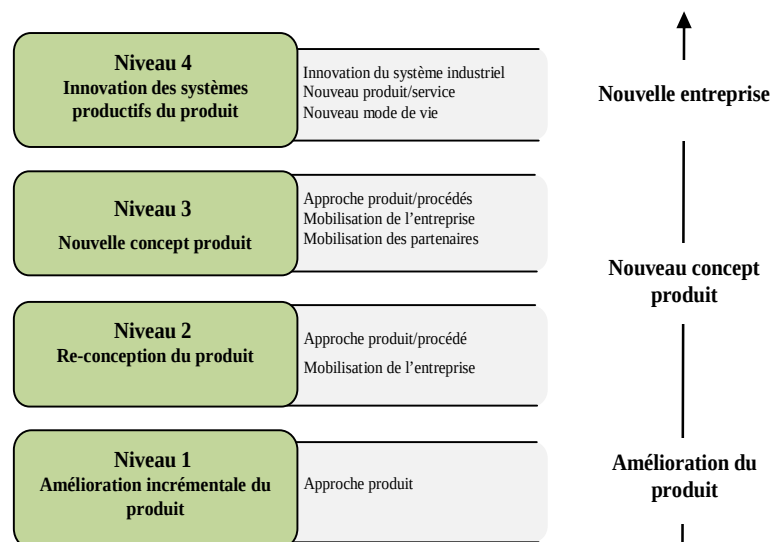


Figure 5: Les différents niveaux d'éco-conception et les approches définies par l'entreprise

A partir de ces quatre niveaux d'éco-conception, on constate que l'évolution du produit vers un produit éco-conçu, un produit innovant, ou même un service, dépend du niveau d'éco-efficacité qu'on souhaite intégrer et des objectifs définis au préalable par l'entreprise. Ces

objectifs, concernent les investissements économiques, la mobilisation des acteurs de l'entreprise par le développement de leurs compétences en démarche de conception environnementale et, enfin, le choix d'étendre ses activités de collaboration avec des partenaires externes (fournisseurs, sous-traitants, etc.). Les clients sont également concernés puisque l'acte d'achat conditionne l'existence même du produit.

5 Les outils d'éco-conception

Afin de supporter une démarche d'éco-conception, différents outils ont été développés. On parle alors d'outils d'éco-conception. Ces outils permettent l'analyse de différents impacts environnementaux générés par un produit sur une phase du cycle de vie, ou sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Certains auteurs parlent alors d'approche globale ou partielle (Millet et al, 03). Les outils d'éco-conception se distinguent selon deux grandes familles : des outils de type quantitatifs ou des outils de type qualitatifs. On note qu'il existe des approches spécifiques pour qualifier ou désigner ces deux types d'outils. Il s'agit d'approches d'évaluation, d'amélioration ou d'organisation de la démarche de conception environnementale du produit.

Nous allons présenter à partir d'une sélection d'outils d'éco-conception, les différentes données pertinentes d'analyse permettant de structurer une étude environnementale quantitative et qualitative d'un produit.

5.1 Approche quantitative

Différents exemples d'outils existent et permettent d'évaluer quantitativement le produit (flux de matière et énergie) à travers des indicateurs de consommation et de pollution (déchet solide, liquide et gazeux ou bien des émissions, radiation, etc.). Nous présentons une liste non exhaustive de certains de ces outils.

Le contenu énergétique : D'après la norme X30 110 (Afnor 83), le contenu énergétique d'un produit est : « la somme des énergies dépensées pour la fabrication d'un produit, en englobant les énergies consommées pour l'élaboration des matériaux et les services associés directement ou indirectement ». Cet outil s'applique généralement pour les produits ayant un impact énergétique important sur l'environnement. Il peut être aussi utile pour réaliser l'optimisation de procédés.

Le bilan déchet : L'outil « bilan déchet » (Alijah et al, 92) incite les industriels à limiter au maximum la production et la toxicité de leurs déchets, et à maximiser leurs valorisations et leurs traitements. L'évaluation des impacts environnementaux d'un produit s'effectue au regard d'un seul critère (déchet) et local (étude limitée au site de production).

L'indicateur de consommation de matière par unité de service MIPS (Material Intensity Per unit of Service) (Schmidt-Bleek 94). Cet outil permet l'évaluation de la qualité environnementale d'un produit à travers un seul indicateur : les matériaux. En d'autre terme, mesurer la consommation et les rejets de matériaux d'un produit tout au long de son cycle de vie. Les données issues de cet outil relient, d'une part le poids du produit (l'ensemble des matériaux contenus dans un produit avec tous les matériaux nécessaires à la fabrication du produit, son utilisation et sa fin de vie), d'autre part à l'unité fonctionnelle ou le service rendu par le produit. Par contre, on peut regretter que cet outil ne considère pas leurs toxicité des matériaux et leurs impacts globaux sur le milieu naturel (atteinte au paysages, la réduction de la biodiversité, etc.)

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) : c'est un outil d'évaluation permettant de prendre en compte la majorité des impacts engendrés par un produit tout au long de son cycle de vie. En plus d'un bilan matière et énergie, l'analyse de cycle de vie, consiste à effectuer un bilan

rejets et déchets. L'ACV fait l'objet de travaux de normalisation internationale : norme ISO 140 40, ISO 140 41, ISO 140 42, ISO 140 43, ISO 140 44. L'ACV comporte 4 étapes : 1. la phase de définition d'objectifs (champs d'application et unité fonctionnelle), 2. l'inventaire, 3. l'évaluation des impacts sur l'environnement et 4. L'interprétation des résultats et proposition des pistes d'amélioration. D'après la norme X 30-300, l'analyse du cycle de vie est aussi un outil d'aide à la décision. Cette prise de décision concerne tous choix liés au développement et la conception de produits ou de services (spécification des améliorations environnementale du produit, évolution de procédés, définition de stratégies pour l'entreprise, etc.).

L'éco-bilan : cet outil est une approche simplifiée de l'Analyse de Cycle de Vie, en se limitant à l'unique étape de l'inventaire. Cette étape concerne la liste de toutes les consommations (flux de matériaux et d'énergie) ainsi que les nuisances d'un produit, depuis l'extraction de matière première jusqu'à sa fin de vie. Cette analyse simplifiée peut concerner un produit (ex : un produit auxiliaire) ou un matériau d'un produit (ex : inventaire de l'ensemble de consommations de matière, énergie, rejets, déchets...pour la production d'un 1kg de matière plastique) (Boustead 93).

Méthode des Eco-indicateur 95 : c'est une méthode hollandaise élaborée dans le cadre du National Reuse of Waste Research Programme par Marc Goedkoop. Comme l'éco-bilan, cette méthode est une approche simplifiée de l'ACV. A partir d'éco-indicateurs préalablement calculés pour des critères d'impacts environnementaux associés à différents matériaux, cette méthode est facilement applicable pour évaluer un produit en connaissant les différents matériaux qui le composent. L'évaluation des impacts environnementaux d'un produit est ensuite définie à travers des notes issues d'une évaluation globale de sa qualité environnementale. Une seule note écologique, est déterminée de l'ensemble des critères (Goedkoop 95 a,b).

5.2 Approche qualitative:

Pour définir une démarche d'éco-conception, ils existent également des outils d'éco-conception qui analysent et évaluent les impacts environnementaux selon des données qualitatives. On identifie ces données selon une échelle de notes, de valeurs, d'appréciations, etc. A travers les données qualitatives requis, une évaluation quantitative pourrait être ensuite envisagée afin d'affiner l'évaluation de certains impacts jugés pertinents par un bilan global d'un produit. Ces outils s'appliquent aussi bien dans la phase d'analyse du besoin que dans les phases de choix et d'hierarchisation des concepts. La plupart de ces outils se présentent sous forme de matrices, de représentations graphiques, de listes, de guidelines et de check-lists. Nous présentons une liste non exhaustive de certains de ces outils.

5.2.1 Approche matricielle

Les méthodes matricielles permettent de considérer un large panel de critères environnementaux dans la phase d'analyse, et ainsi d'apporter une vision globale sur les différents impacts générés par un produit (épuisement de ressources, production de déchets, pollution sonore, etc....).

La matrice ESQCV (Evaluation Simplifiée et Qualitative de Cycle de Vie) : est un exemple d'outil d'évaluation qualitative et d'analyse multicritère d'impacts environnementaux (Afnor 98). Une illustration est proposée en tableau 3. Cette matrice permet d'évaluer qualitativement différentes catégories d'impacts environnementaux générées par le produit à travers cinq étapes du cycle de vie. Quatre niveaux d'évaluation sont définis (défavorable=2, médian=1, favorable=0, absence de données=*). Cet outil permet aussi de prendre en compte des nuisances subjectives difficiles à quantifier (ex. bruit, odeur,

esthétique...). L'ESQCV peut être complétée par un outil d'évaluation quantitatif et permet une analyse plus approfondie de certains impacts environnementaux identifiés lors de la première évaluation.

Impacts environnementaux	Situations de vie					Défavorable=2 Médian=1 Favorable=0 Absence de données=*
	Extraction de matières premières	Production	Distribution	Utilisation	Traitement de fin de vie	
	Pollution et déchets (quantité, toxicité)	*	2	0	0	*
	Épuisement des ressources naturelles (quantité utilisée, origine renouvelable ou non, ressource abondante ou rare)	2	1	1	0	*
	Bruits, odeurs, atteintes à l'esthétique	2	*	1	0	*

Tableau 3: Exemple de matrice ESQCV (Afnor 98)

La matrice MET (Matières, Energie, Toxicité) : donnée en tableau 4, est une matrice d'analyse multicritères (Brezet et al, 97). Cette matrice permet d'analyser et d'évaluer le produit selon les flux entrants et sortants de matériaux et d'énergie. Pour chaque étape du cycle de vie du produit, la toxicité n'est évaluée qu'au travers des flux sortants. L'évaluation de ces flux permet d'identifier la charge environnementale du produit par rapport aux flux fonctionnels nécessaires pour sa conception, son usage et sa fin de vie.

Situations de vie	Flux fonctionnels		
	Matériaux (entrant /sortant)	Energie (entrant /sortant)	Toxicité (sortant)
	Extraction des matériaux		
	Production et autres opérations		
	Distribution du produit		
	Utilisation du produit		
	fonctionnement		
	Maintenance		
Fin de vie du produit	Collecte		
	Disposition		

Tableau 4: La matrice MET (Brezet et al, 97)

Les outils matriciels précédemment décrits présente des données pertinentes d'analyse et d'évaluation du produit. Selon des approches variées et complémentaires, on peut résumer ces données pertinentes par la liste ci-dessous :

La matrice ESQCV

1- situations de vie et **2-** impacts environnementaux

La matrice MET

1- situations de vie et **2-** flux fonctionnels.

5.2.2 Approche graphique : modèle et diagramme radar

S'ajoutant aux outils matriciels, les outils d'évaluation qualitative sous forme de modèle graphique et de diagramme radar ont été développés. Ces outils permettent d'évaluer des solutions d'amélioration d'un produit par rapport à un produit déjà existant appelé « produit de référence ». Les données issues de cette approche comparative permettent d'identifier les meilleures voies d'évolution améliorant la qualité environnementale de leurs futurs produits.

L'Eco-compass (Fussler et al, 96) : la figure 6 donne une illustration de cet outil, il se présente sous forme graphique et permet de positionner et d'évaluer des options et solutions de conception de produit par rapport à six critères de conception sur une échelle de 1 à 5.

- Les axes d'évaluation intensité des matériaux, intensité énergétique et risques de l'environnement et de la santé concernent des impacts environnementaux.
- Les axes d'évaluation extension des fonctions et des services, conservation des ressources et réutilisation et revalorisation des déchets engagent plutôt des orientations de conception.

La note 2 de chaque critère est attribuée au produit de référence. La note d'évaluation des options d'amélioration du produit est attribuée selon le pourcentage d'amélioration ou d'aggravation par rapport au produit de référence. Cet outil est considéré également comme un outil de décision dans les séances de créativité puisque il permet d'évaluer les différentes idées de solutions générées.

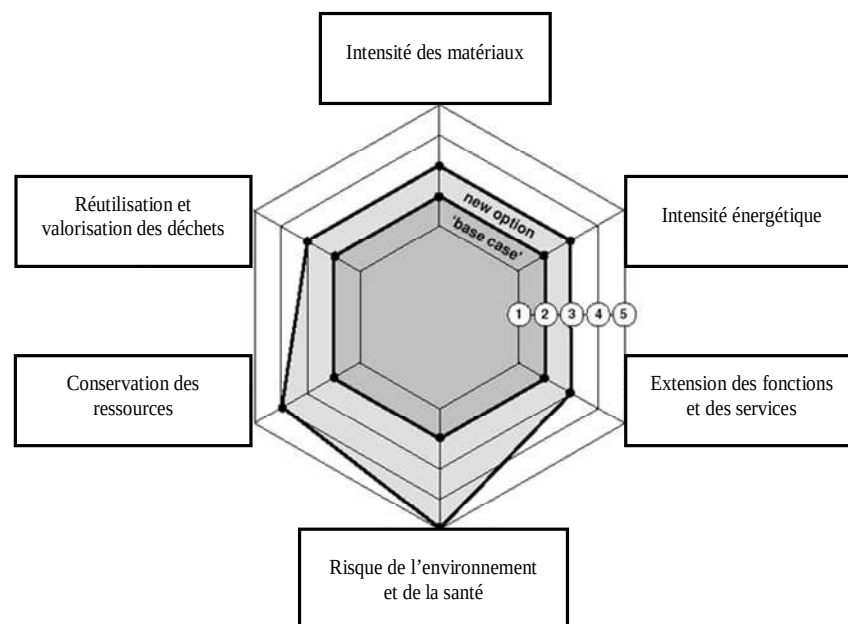


Figure 6: L'Eco-compass (Fussler et al, 96)

Il existe d'autres outils d'évaluation qualitative comme le « **Life-cycle Design Strategy-Wheel** » (Brezet et al 94) (Matbase), traduit en français par la « Roue des stratégies de l'éco-conception ». Cet outil est similaire à l'« Eco-compass ».

Il se présente sous forme d'un diagramme radar (figure 7) et se décline en huit axes stratégiques. Chaque axe présente une option de conception et permet d'orienter la conception du produit vers une démarche environnementale. À travers les huit axes définis par le « Life-cycle Design Strategy-Wheel », on peut retenir trois données pertinentes d'analyse et d'évaluation d'un produit :

- Impacts environnementaux, pour les axes matériaux à faibles impacts environnementaux, réduction de l'emploi des matériaux
- Situations de vie pour les axes optimisation des techniques de production, optimisation du système de distribution, réduction de l'impact environnementale dans la phase d'utilisation, optimisation de la fin de vie
- Orientations de conception pour l'axe optimisation de la durée de vie et de la fiabilité du produit

Le développement d'un nouveau concept du produit ne concerne aucun de ces axes, mais définit plutôt une nouvelle approche du produit (évolution du produit vers le service).

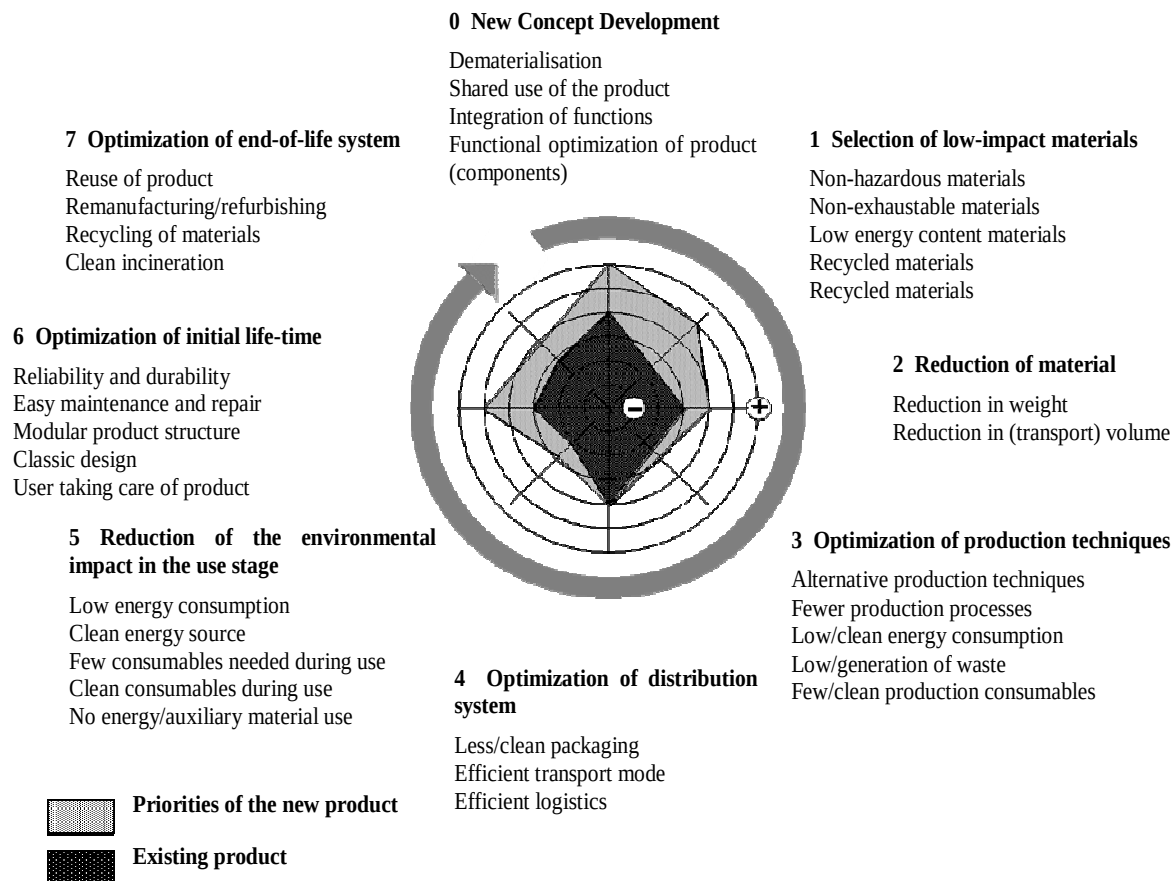


Figure 7: L'outil Life-cycle Design Strategy-Wheel (LiDS-Wheel) (Brezet et al 94)

A la différence des outils matriciels, les modèles graphiques introduisent d'autres données pertinentes d'analyse et d'évaluation du produit. Il s'agit de la conservation des ressources, la réutilisation et la valorisation des déchets, l'optimisation du système de production, etc. Ces axes ajoutent l'évaluation de la démarche de conception. Ainsi nous pouvons déduire :

L'Eco-compass

1- impacts environnementaux et 2- orientations de conception

Life-cycle Design Strategy-Wheel

1- impacts environnementaux, 2- situations de vie et 3- démarche de conception

Principalement, l'outil Life-cycle Design Strategy Wheel (LiDS-Wheel) sert de cadre de référence pour définir une stratégie d'éco-conception, mais d'autres initiatives d'adaptation, d'évolution de cet outil ont été également explorées. A titre d'exemple, la figure 8 illustre la relation entre les stratégies d'éco-conception exprimées par l'outil (LiDS-Wheel) par rapport aux phases du cycle de vie.

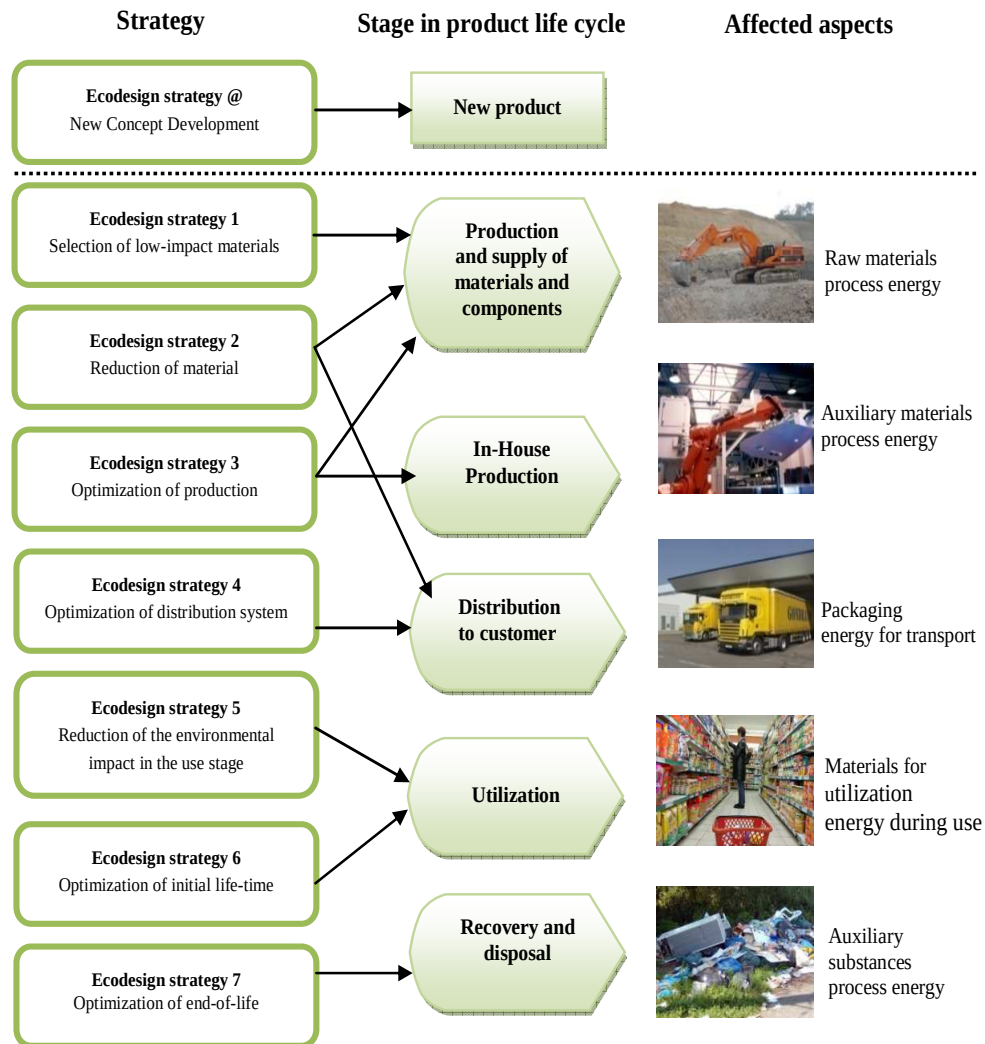
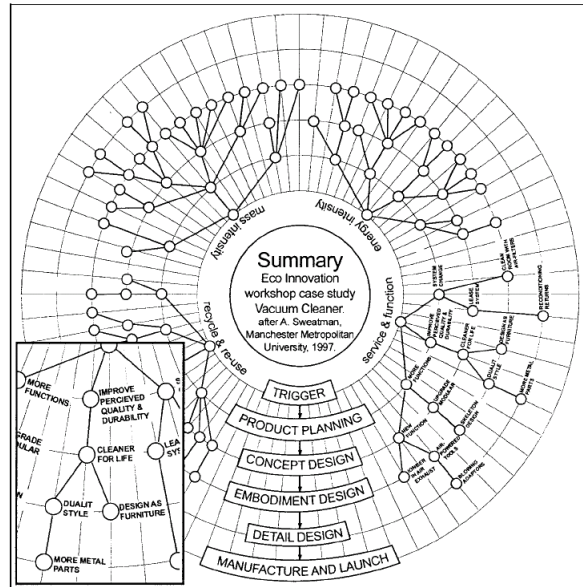


Figure 8: Relation entre les stratégies d'éco-conception et le cycle de vie du produit d'après (Brezet et al, 97)

Le PIT (Product Idea Tree Diagram) est un exemple d'outil d'éco-conception développé et adapté aux séances de créativité (Jones et al, 01). Cet outil (figure 9) reprend la représentation des cartes heuristiques d'un Mind Map (Buzan et al, 95), mais avec un modèle graphique plus orienté. Les idées générées par un groupe de créativité sont hiérarchisées et structurées selon des points clés d'éco-conception et les phases du processus de conception.

Toutefois, cette représentation présente quelques inconvénients. On note que l'ensemble des idées générées par le groupe de créativité est très conditionné par rapport à un thème d'éco-conception et un niveau particulier du processus de conception. Ajoutons à cela, que ce modèle ne permet pas de rebondir sur les premières idées générées, et donc de réduire le champ d'investigation, de recherche et de génération d'idées (division, association d'idée).



SUBSTANCES INTERDITES		SUBSTANCES A UTILISATION LIMITEE	
4-nitrobiphényle	•	Gaz fluorés à effet de serre:	•
Amines aromatiques et leurs sels:	•	HFC (hydrocarbures fluorés)	•
2 Naphthylamine	•	PFC (perfluorocarbones)	•
Benzidine	•	Hexafluorure de soufre (SF6)	•
4 Aminobiphényle	•	Formaldéhyde	•
Amiante	•	Isocyanates	•
CFC - Chlorofluorocarbones	•	Composés organiques volatils (COV)	•
Benzyltoluènes halogénés:	•	Toluène	•
Monométhyl-dibromodiphénylméthane	•	Trichlorobenzène (TCB)	•
(Ugilec 121 ou 21) Monométhyl-dichlorodiphénylméthane	•	Trioxde de dantimoine	▲
(Ugilec 141) Monométhyl-tetrachlorodiphénylméthane	•	Béryllium et ses composés	▲
Halons - bromofluorochlorocarbones	•	Composés de chrome(VI)	▲
HCFC - hydrocarbures partiellement halogénés (valable pour l'Europe; à utilisation limitée pour tous les autres)	•	Chlorure de cobalt(II)	▲
Nonylphénol	•	Décabromodiphényléther (Déca-BDE)	▲
Nonylphénol éthoxylate	•	Fibre minérale artificielle (FMA)	▲
Octabromodiphényléther (Octa-BDE)	•	Paraffines chlorées à chaîne moyenne (PCCM)	▲
PCP - pentachlorophénol et ses sels et esters	•	Nickel	▲
PCT - Polychloroterphényles	•	Tétrachloroéthylène	▲
Pentabromodiphényléther (Penta-BDE)	•	Phtalates, surtout:	▲
Paraffines chlorées à chaîne courte (PCCC)	•	Phtalate de benzyle de Butyl (BBP)	▲
Bois, abattage illégal	•	Dibutyl phtalate (DBP)	▲
Arsenic et ses composés	▲	Di-(2-éthylhexyl) phtalate (DEHP)	▲
Cadmium et ses composés	▲	Diisononyl phtalate (DINP)	▲
Plomb et ses composés	▲	Diisodecyl phtalate (DIDP)	▲
Mercuré et ses composés	▲	Di-n-oktyl phtalate (DNOP)	▲
PBB - Polybromobiphényles	▲	Diisobutyl phtalate	▲
PCB - Polychlorobiphényles	▲	Diméthyle phtalate	▲
		Hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP)	▲
		Polychlorure de vinyl (PVC)	▲
		Talc	▲
		Thirame (TMTD)	▲
		Composés organo-staniques	▲
		Tri phényle phosphate (TPP)	▲
		Tris (2,3 dibromopropyle) phosphate	▲
		Oxyde de tris(1-aziridinyl)phosphine	▲
		Bois, foresterie non durable	▲

- Interdiction absolue • Fondement juridiques
▲ Application précises ▲ Engagement volontaire

Tableau 5: Substances interdites et à utilisation limitée (Bombardier 05)

Guidelines de conception environnementale : outils généraux

Les axes d'éco-efficacité

Les guidelines « Conception pour une meilleure éco-efficacité », développées par le W.B.C.S.D est un exemple de directives générales pour les concepteurs souhaitant développer une démarche de conception environnementale (WBCSD 99) (Desimone et al, 97). Ce guideline détermine sept axes d'éco-efficacité :

- Réduire la quantité de matériaux utilisés pour les biens et les services
- Réduire le contenu énergétique des biens et des services
- Réduire les risques de dispersion de substances toxiques
- Accroître la recyclabilité des matériaux
- Maximiser l'emploi durable de ressources renouvelables

- Accroître la durabilité des produits
- Accroître le service rendu par les biens et les services

L'ensemble des axes d'éco-efficacité font références à des impacts environnementaux. Les principales catégories d'impacts liés aux matériaux, aux énergies et à la toxicité sont identifiées. Les trois premiers axes d'éco-efficacité expriment une définition explicite d'impacts environnementaux provenant d'un aspect direct de consommation de ressources ou de rejets. Par contre, les quatre derniers axes définissent des bonnes actions et orientations de conception permettant d'éviter de manière indirecte certains impacts environnementaux. Cette vision macroscopique d'aspects environnementaux offre une approche globale et exhaustive de l'ensemble des impacts et permet ainsi au concepteur d'évaluer et de faire évoluer la conception environnementale de son produit dans sa globalité.

Les dix règles d'or

Luttropp dans (Luttropp et al, 06) proposent dix règles. Ces règles ont été développées en s'inspirant des nombreux outils simples déjà présents dans la littérature. Bien que ces différents outils aient des approches souvent différentes, ils ont tous d'éléments communs comme la volonté d'éviter les substances dangereuses, la durabilité du produit, le besoin énergétique durant la phase de production et d'utilisation du cycle de vie...

Ces guidelines de conception environnementale permettent aux concepteurs de se poser les bonnes questions d'ordre général et de chercher des réponses spécifiques à leur challenge de conception. Ces règles directrices et génériques, dites d'or s'expriment ainsi :

1. Ne pas utiliser des substances toxiques et utiliser en circuit fermé celles que vous ne pouvez pas éviter.
2. Minimiser, grâce à une bonne gestion, la consommation d'énergies et de ressources en phase de production et de transport.
3. Utiliser des structures adaptées et des matériaux de haute qualité afin de minimiser le poids des produits, sans affecter la souplesse, la puissance ou les priorités fonctionnelles.
4. Minimiser la consommation d'énergies et de ressources en phase d'utilisation, en particulier pour les produits ayant un fort impact environnemental durant cette phase.
5. Favoriser la réparation et la remise en état, en particulier pour les produits avec systèmes intégrés.
6. Optimiser la conception pour la durée de vie, en particulier pour les produits ayant peu d'impacts environnementaux significatifs en phase d'utilisation.
7. Investir dans les matériaux, les traitements de surface ou les agencements pour protéger les produits de l'encrassement, de la corrosion et de l'usure, en maximisant ainsi la durée de vie du produit et en réduisant sa maintenance.
8. Faciliter la récupération, en cas de remise en état, de réparation et de recyclage, grâce à l'accessibilité, l'étiquetage, la modularité, des liaisons fragmentables et l'utilisation de manuels.
9. Faciliter l'entretien, la réparation et le recyclage en utilisant des mono-matériaux, des matériaux recyclés et non des poly-matériaux ou des alliages.
10. Utiliser aussi peu que possible des éléments de jonctions, et proposer selon les situations de vie, des vis, des adhésifs, des soudures, des clips avec des géométries adaptées.

Comme les axes d'éco-efficacité, les dix règles d'or traitent les principales catégories d'impacts environnementaux (matériaux, énergie, toxicité). Chaque règle est exprimée en termes d'objectifs de conception. Elles sont définies, soit par l'interdiction de certains choix de conception, soit par l'optimisation de l'utilisation des ressources environnementale. Cependant, certaines règles d'or sont plus précises que d'autres comme les règles 8, 9 et 10 qui précisent des points ciblés à traiter.

La figure 10 illustre la répartition des dix règles d'or selon le cycle de vie du produit. Le cycle de vie est découpé en 3 phases, avant l'utilisation, durant le fonctionnement et en fin de vie. Si les 2 dernières phases sont ce que les concepteurs appellent des situations de vie, la première regroupe 3 situations de vie pertinentes : l'extraction des matières premières utilisées, l'industrialisation et la distribution. Avec une approche plus étendue et conséquente que celle proposée par les sept axes d'éco-efficacité, l'association entre les règles d'or et trois vision réduite du cycle de vie du produit a permis d'apporter une vision structurée pour les concepteurs souhaitant utiliser ses guidelines et agir sur une des trois phases. Cette structuration apporte également de la clarté et de la facilité dans leurs utilisations par rapport à un problème de conception particulier.

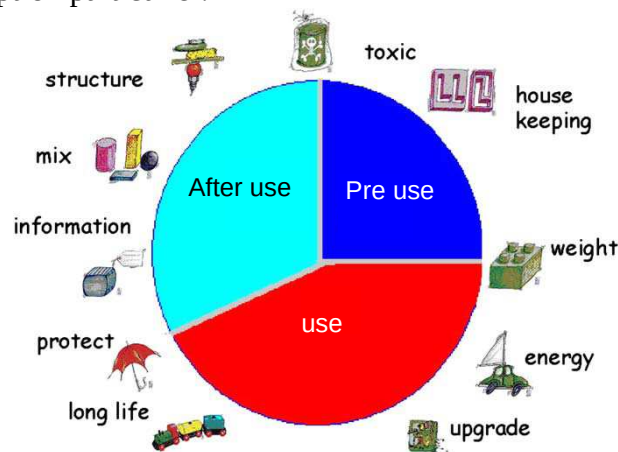


Figure 10 : Répartition des règles d'or selon le cycle de vie du produit (Luttropp et al, 06)

Nous considérons que les dix règles d'or représentent un outil intéressant de spécification et de clarification des objectifs environnementaux. Les connaissances qu'elles proposent sont génériques. Elles doivent être explorés avec les membres des différents services liés à la conception du produit pour en avoir une vision la plus exhaustive possible (experts environnementaux, développeurs de produit, service commercial, service clientèle...).

Par contre, le choix d'association proposé reste à confirmer puisque une même règle d'or peut éventuellement être appliquée pour plus d'une étape du cycle de vie du produit. Elle peut aussi être impliquée pour une phase autre que celle à laquelle elle est associée actuellement. Cependant, la vision environnementale développée par les dix règles d'or est moins complète que celle proposée par les sept axes d'éco-efficacité. La question des ressources renouvelables, l'augmentation des fonctions du produit et aussi le passage du produit vers le service, restent des objectifs non abordés par les dix règles d'or.

Guidelines de conception environnementale : outils particuliers

On trouve également, des guidelines spécifiques à des outils d'éco-conception.

Le logiciel Information/inspiration développé par l'Université de Loughborough (UK) et la société Electrolux (Electrolux 00) (Lofthouse 01) est un outil d'éco-conception qui définit des guidelines de conception adaptés aux designers industriels (Lofthouse 06). L'outil est basé sur deux blocs de données Information et Inspiration qui sont reliés par une page d'accueil.

- Le bloc « inspiration » présente des exemples de produits éco-conçus par des entreprises internationales et décrit six choix d'étude : matériaux, forme, énergie, fonction, parties, emballage.
- Le bloc « information » concerne la partie de l'outil qui regroupe l'ensemble des guidelines selon six objectifs de conception : général, matériaux, distribution, optimisation de la durée de vie, utilisation, fin de vie. On trouve également des liens hypertexte pour des informations plus détaillées.

Le tableau 6 présente des exemples de recommandations associées aux options de conception.

Matériaux → Sélection de matériaux • Suivre la hiérarchie : réduire, réutiliser, recycler, éviter • Utiliser aussi peu que possible différents types de matériaux • Réduire la quantité de matériaux utilisés dans la fabrication d'un produit • Pourriez-vous utiliser un matériau renouvelable? • Sélectionner si possible les matériaux recyclables • Utiliser des matériaux recyclables ou à contenu recyclés • Eviter certains matériaux dans la conception des produits (directive RoHS¹), Fin de vie → Recyclage • Minimiser le nombre de matériaux utilisés (séparation plus facile en fin de vie) • Si l'utilisation de matériaux différents est nécessaire, considérer en phase de conception la possibilité de séparer ces matériaux (optimiser le potentiel de démontage du produit dès la conception : l'étiquetage, les fixations, etc.) • Identifier les problèmes de compatibilité de matériaux lors du recyclage (mono-matériaux, présence de peinture,...résines différentes, adhésifs, ou autres additifs) • Identifier, marquer les pièces en plastique pour faciliter le recyclage (utiliser des symboles d'identification dans le moule de résine du plastique. • Prendre conscience que certains matériaux sont plus facilement recyclables que d'autres (les thermoplastiques,.. l'acier est relativement facile à recycler mais sa recyclabilité est considérablement réduite quand il est mélangé avec le cuivre, il est donc important de s'assurer que les pièces de cuivre sont facilement enlevé) • Favoriser des cycles d'utilisation des matériaux recyclables et recyclés,.... Utilisation → Réduction des déchets • Sensibiliser les utilisateurs sur le gaspillage des ressources • Inclure des fonctions qui permettent aux utilisateurs de réduire la consommation (fonction verso en standard sur les photocopieuses ou option d'impression pour réduire la consommation d'encre) • Limiter les consommables nécessaires au fonctionnement du produit • S'assurer que les consommables sont facilement démontés et recyclés ou réutilisés en étant de nouveaux composants. • Communiquer sur les différents impacts d'un produit pour les utilisateurs • Réutiliser les déchets ou les rejets d'énergie (chaleur) • Faire évoluer les produits en allant vers les services
--

Tableau 6: Exemple de recommandations selon l'Université de Loughborough

¹ **RoHS** (*Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment*).
http://www.rsenews.com/public/dossier_envi/doc/Directiverohs-2002-95-EC.pdf

Les check-lists

Les check-lists (appelées aussi listes de contrôle) se présentent sous forme de listes de questions dont les réponses sont évaluées qualitativement et notées sur une échelle de niveaux. Considérés essentiellement comme un outil d'évaluation, la capacité des check-lists à accompagner et à guider le concepteur dans une démarche de conception environnementale est réelle. Elles peuvent être standards ou spécifiques pour une catégorie de produits ou bien pour une stratégie d'entreprise. On note que les check-lists peuvent être également considérées comme un outil d'amélioration, puisqu'il s'agit d'un ensemble de questions qu'on peut facilement développer, adapter et exploiter dans toutes les phases du processus de conception.

Le manuel « approche prometteuse pour une production et une consommation durables » développée par (Brezet et al, 97) intègre dans son guide une check-list standard associée à l'outil Life-cycle Design Strategy-Wheel (LiDS-Wheel) donnée précédemment dans la figure 7. Cette check-list, donnée en tableau 7 permet d'élaborer une première analyse des besoins et d'orienter le concepteur dans sa démarche d'éco-conception selon huit stratégies d'éco-conception et selon cinq situations du cycle de vie du produit.

ANALYSE DES BESOINS : CHECK-LIST D'ECO-CONCEPTION	
Les fonctions du système produit actuel répondent-elles à des besoins sociaux ? - Quels sont les fonctions principales et les fonctions accessoires? - Le produit remplit-il ces fonctions avec efficacité? - Quels sont les besoins des utilisateurs que le produit ne satisfait pas actuellement? - Les fonctions du produit peuvent-elles être étendues ou améliorées afin de mieux répondre aux besoins des utilisateurs? - Est-ce que ce le produit évolue sur une période de temps? - Pouvons-nous anticiper l'innovation radicale du produit?	Stratégie d'éco-conception : Nouveau concept de produit - Dématérialisation - L'utilisation partagée du produit - L'intégration de nouvelles fonctions - L'optimisation des fonctions du produit (composants)
1^{er} phase du cycle de vie : EXTRACTION DE MATERIAUX ET APPROVISIONNEMENT DE COMPOSANTS	
Quels sont les problèmes d'extraction de matière première et d'approvisionnement de composants ? - Combien et quels types de plastique et en caoutchouc sont utilisés? - Combien et quels types d'additifs sont utilisés? - Combien et quels types de métaux sont utilisés? - Combien et quels sont les autres types de matériaux (verre, céramique, etc.) utilisés? - Combien et quel est le type de traitement de surface utilisée? - Quel est le profil environnemental des composants? - Quelle est la quantité d'énergie nécessaire pour transporter les composants et les matériaux?	1^{er} stratégie d'éco-conception : Sélection des matériaux à faible impact environnemental - Matériaux propres - Matériaux renouvelables - Matériaux à faible contenu énergétique - Matériaux recyclés - Matières recyclables 2^{ème} stratégie d'éco-conception : Réduction de l'utilisation des matériaux - Réduction du poids - Réduction du volume (transport)
2^{ème} phase du cycle de vie : SITE DE PRODUCTION	
Quels sont les problèmes du processus de production de votre propre entreprise ? - Combien et quels sont les types de procédés de production utilisés (raccordements, traitements de surface, impression et l'étiquetage) - Combien et quels sont les types de matières auxiliaires nécessaires (solvants de nettoyage, huile de coupe pour le perçage, etc.)? - Quelle est la consommation d'énergie? - Quelle quantité de déchets générée? - Combien de produits ne répondent pas aux normes de qualité attendue?	3^{ème} stratégie d'éco-conception : Optimisation des techniques de production - Alternative de techniques de production propres - Moins d'étapes de production - Consommation d'énergie (Faible / propre) - Moins de déchets de production - Consommables dans le procédés de production (consommation modéré / propre)
3^{ème} phase du cycle de vie : DISTRIBUTION	
Quels sont les problèmes du processus de distribution du produit au client ? - Quel type d'emballage de transport utilisés, l'emballage de ventes utilisés assure le conditionnement du produit en vrac ou au détail (volumes, les poids, les matériaux, la réutilisation) - Quels est sont les moyens de transport utilisés?	2^{ème} stratégie d'éco-conception : Réduction de l'utilisation des matériaux - Réduction du poids - Réduction du volume (transport) 4^{ème} stratégie d'éco-conception : Optimisation du système de

Est-ce que le transport est organisé ou pas?	distribution Emballages propres, réduits, réutilisables Mode de transport moins énergivore logistique avec une meilleure optimisation d'énergie
4^{ème} phase du cycle de vie : UTILISATION	
Quels sont les problèmes se posent lors de l'utilisation, de l'exploitation, de l'entretien et la réparation du produit ? - Combien et quel sont les types d'énergie nécessaire, en phase d'utilisation? - Combien et quels sont les types de consommables nécessaires? - Quelle est la durée de vie technique du produit? - Existe-il des entretiens et des réparations nécessaires, en phase d'utilisation? - Combien de matières auxiliaires et d'énergie nécessaires pour l'exploitation, l'entretien et la réparation? de quelle nature sont-ils? - Le produit peut être démonté par une personne ne connaissant pas le système? - Les parties nécessitant souvent le remplacement sont-ils facilement séparables? - Quelle est la durée de vie esthétique du produit?	5^{ème} stratégie d'éco-conception : Réduction de l'impact environnemental en phase d'utilisation - Faible consommation d'énergie - Energie propre - Réduction de produits consommables - Consommables propre - Aucun gaspillage d'énergie ou de consommables 6^{ème} stratégie d'éco-conception : Optimisation de la durée de vie La fiabilité et la durabilité Facilité de l'entretien et de la réparation la structure modulaire du produit Conception sobre, habituel, classique Durée de possession du produit par l'utilisateur
5^{ème} phase du cycle de vie : ELIMINATION ET VALORISATION	
Comment le produit est actuellement éliminé ? - Les composants ou les matériaux sont-ils réutilisés? - Quels sont les composants qui peuvent être réutilisés? - Peut-on démonter les composants sans dommage? - Quels sont les matériaux recyclables? - Les matériaux sont-ils identifiables? - Les matériaux peuvent-ils être séparés rapidement? - Existent-ils des encres, des traitements de surface ou autocollants? - Existent-ils des composants dangereux ? sont-ils facilement séparables? - Existent-ils des problèmes lors de l'incinération des pièces du produit non réutilisables?	7^{ème} stratégie d'éco-conception : Optimisation du système produit en fin de vie - La réutilisation du produit (composants) - Remise à neuf / rénovation - Recyclage des matériaux - la sécurité en cas d'incinération

Tableau 7 : Exemple de check-lists, outil (LIDS-Wheel)

Le tableau 8 montre un exemple de check-list standard définie pour l'évaluation de la recyclabilité d'un produit proposée par (Steinhilper 95). La qualification de tous les critères évalués permet au concepteur de définir les différentes possibilités d'amélioration du produit.

Recyclabilité des matériaux	<i>Recyclable</i>			
	<i>Uniquement valorisables</i>			
	<i>Non recyclable</i>			
Variétés des matériaux	<i>Mono-matériau</i>			
	<i>Liés à la fonction</i>			
	<i>Grande variété</i>			
Comptabilité des matériaux	<i>Mono-matériau</i>			
	<i>Compatibles (recyclage)</i>			
	<i>Incompatibles (recyclage)</i>			
Présence de substances dangereuses	<i>Aucune</i>			
	<i>Facilement récupérables et non toxiques</i>			
	<i>Nombreuse et toxiques pour l'environnement</i>			
Marquage	<i>Apte à un tri automatisé</i>			
	<i>Existe</i>			
	<i>Aucun</i>			
Démontage et séparation	<i>Facile</i>			
	<i>complexe</i>			
	<i>Difficile ou impossible</i>			
Conclusion		Idéal	Acceptable	Besoin urgent d'action

Tableau 8: Check-lists : amélioration de la recyclabilité d'un produit

L'Eco-estimator et le Fast-Five sont deux exemples de check-lists développées par Philips. L'Eco-estimator est un questionnaire établi selon quatre options de conception : la vie du produit, l'énergie et matériaux, la recyclabilité et les déchets dangereux. Une liste de questions associées à chaque option permet d'évaluer le produit par rapport à une référence (produit déjà existant) (Meinders 97). Le Fast-Five se définit liste de questions très courtes portant sur les critères d'énergie, de recyclabilité, de toxicité, de durabilité/maintenance et de service rendu. Les réponses à ces questions sont exprimées par oui ou non (Meinders 97)

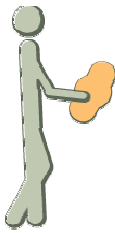
Les check-lists issues de logiciel d'éco-conception

Le guide méthodologique Eco-faire (Ecofaire 08) est un regroupement d'outils permettant d'intégrer le paramètre « environnement » dans l'ensemble des phases de conception et de développement d'un produit.

Des fiches étapes, des présentations pédagogiques des problèmes et impacts environnementaux, des check-lists d'évaluation des enjeux environnementaux du produit et des check-lists de recherche de solutions ont été recensées dans ce guide d'éco-conception. Le tableau 9 est un exemple de check-list d'évaluation des enjeux environnementaux d'un produit défini dans la méthodologie Eco-faire.

En comparant avec la check-list d'évaluation de la recyclabilité présentée plus haut (Steinhilper 95), on constate que cette check-list apporte une vision globale en explorant l'ensemble des phases du cycle de vie du produit. Elle conduit aussi à identifier davantage les risques d'impacts potentiels (couleur rouge-, orange-, couleur verte+) par une évaluation environnementale (précisions et commentaires).

Par contre, on remarque un manque d'exhaustivité par rapport aux enjeux environnementaux du produit décrits dans le tableau 9.

Étapes	Enjeux environnementaux du produit	Risque d'impacts				Vos précisions, commentaires
		-- Mauvais	- Moyen	+ Bon	?	
1 - Matières premières 	La préservation des ressources : Utilisation d'une ressource menacée ou limitée (forêts primaires, pétrole...)					
	Matière d'origine recyclée					
	Provenance des matières (distance et moyens de transport optimisés)					
	...					
2 - Productions - Sous-traitants / fournisseurs - Fabricant 	Procédés polluants					
	Déchets de fabrication dangereux, déchets non recyclables					
	Situation géographique (locale, nationale...) pour les sous-traitants					
	...					
3a – Emballages 	Emballages optimisés en masse ou volume					
	Emballages réutilisables					
	Emballages navettes...					
	Emballages intégrant des filières de collecte pour valorisation					
	...					
3b - Logistique 	Logistique optimisée (distances, remplissage, retours à plein...)					
	Types de transports (combiné rail-route, fluvial, maritime, camions normes Euro V...)					
	Récupération lors de la livraison : produits usagers, emballages...					
	...					
4 – Utilisation 	Consommations d'énergie, d'eau					
	Utilisation de consommables					
	Fonctionnalités adaptées aux besoins des utilisateurs					
	Production de déchets					
	Information et sensibilisation de l'utilisateur					
	Durée de vie adaptée à la réalité d'usage et aux évolutions technologiques					
	Autres (nuisances, émissions...)					
	...					
5 – Fin de vie 	Recyclable (filières existantes ET possibilité de démonter le produit pour le répartir dans les filières)					
	Pas de « dépollution » du produit nécessaire avant sa valorisation					
	...					

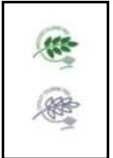
Source : EVEA conseil et SEM régionale des Pays de la Loire



Les risques d'impacts potentiels (couleur rouge --, orange -), à confirmer par une évaluation environnementale si besoin :
Les points forts potentiels (couleur verte +), à confirmer par une évaluation environnementale si besoin

Tableau 9: Exemple de check-lists de l'outil Eco-faire

Le logiciel Eco-design pilot est un outil d'éco-conception, libre d'accès sur internet, développé par l'Université des Technologies de Vienne (Ecodesign Pilot 01) (Wimmer et al, 02). Il se base sur un ensemble de check-lists associées aux différentes phases du cycle de vie d'un produit. Cet outil permet de définir les premières spécifications en termes d'éco-conception du produit. Cependant, il faut noter que l'utilisation de cet outil est orientée selon l'objectif d'évaluation défini par les concepteurs (amélioration d'une situation de vie particulière). Nous présentons dans le tableau 10 quelques exemples de check-lists proposées.

A : Intensif en consommation de matières premières / E : Intensif en impacts lors de l'élimination Choix sélectif des matériaux Est-ce que les matériaux qui entrent dans la composition du produit présentent une évaluation environnementale favorable ? • Quels matériaux entrent dans la fabrication du produit ? • Quelles quantités sont mises en œuvre ? • Quelle méthode est utilisée pour réaliser l'évaluation environnementale et pourquoi ? • Existe-t-il des impacts sur l'environnement qui ne peuvent être appréhendés par la méthode choisie, et dans l'affirmative, quelles sont ils ? Comment les prendre en compte ? L'utilisation de composants toxiques dans le produit est-elle évitée ? Le recours aux matériaux toxiques pouvant poser problème devrait autant que possible être limité voire évité, aussi bien pour des raisons environnementales que de santé. Les substances toxiques peuvent, même à petites doses, engendrer des problèmes graves (dioxines, PCB, PVC ...). Leur utilisation devrait, de ce fait, être évitée. En particulier, lorsqu'elles sont ou pourraient être présentes par exemple dans les pièces détachées et les composants achetés. Il s'agit, par conséquent, d'éviter, dans la mesure du possible, leur utilisation sur l'ensemble du cycle de vie du produit.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>Assessment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PE</td> <td>++</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>+</td> </tr> <tr> <td>PS</td> <td>++</td> </tr> <tr> <td>PUR</td> <td>++</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td>...</td> </tr> <tr> <td>Cast iron</td> <td>+</td> </tr> <tr> <td>Aluminium</td> <td>++</td> </tr> <tr> <td>Copper</td> <td>++</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td>...</td> </tr> </tbody> </table> 	Material	Assessment	PE	++	PP	+	PS	++	PUR	++	...	...	Cast iron	+	Aluminium	++	Copper	++	...	...
Material	Assessment																				
PE	++																				
PP	+																				
PS	++																				
PUR	++																				
...	...																				
Cast iron	+																				
Aluminium	++																				
Copper	++																				
...	...																				
B : Intensif en impacts lors de la production Prévenir la production de déchets en production Ces technologies de fabrication minimisent-elles les déchets et les émissions ? • Utilise-t-on les matériaux mis en œuvre de manière optimale à tous les niveaux de la fabrication ? • Les valeurs limites d'émission sont-elles respectées, même sans recours à des systèmes d'épuration et de filtration ? • La technologie de fabrication des composants correspond-elle au niveau technologique le plus récent (meilleures technologies disponibles) en ce qui concerne l'utilisation économe des matériaux et la minimisation des émissions ? Le risque environnemental est-il, de par les technologies utilisées pour la fabrication du produit et de ses composants, aussi réduit que possible ? • Quels risques écologiques liés aux technologies de fabrication peuvent-ils survenir en cas d'accident ? • Quelles technologies permettent-elles de réduire considérablement ces risques ? • La technologie mise en œuvre pour la fabrication du produit répond-elle au plus récent niveau technologique (meilleures technologies disponibles) au regard du risque environnemental ?	  																				
C : intensif en besoin de transport Réduction des besoins en emballage Est-ce que la distribution du produit peut se passer d'emballage ou se contenter d'une forme réduite ? • Peut-on éviter tout ou partie de l'emballage ? • Comment réduire l'emballage du produit par une optimisation du couple produit-emballage ? • Quel type d'emballage est nécessaire pour le produit ? • Est-ce que cet emballage peut être réutilisé plusieurs fois ?	 																				

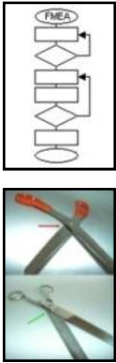
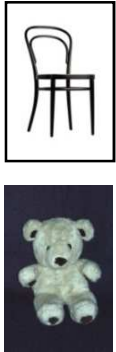
A : Intensif en consommation de matières premières / B : Intensif en impacts lors de la production / D : Intensif en impacts lors de l'utilisation Optimisation du fonctionnement du produit Le produit est-il fiable ? Remplit-il ses fonctions sans défaillance ? • Quelles sont les raisons qui pourraient provoquer un dysfonctionnement du produit ? • Quelles sont les pièces susceptibles de déclencher un dysfonctionnement et où sont-elles situées ? • Quelles mesures peuvent être prises pour améliorer cette fiabilité ? Le produit présente-t-il une qualité de fonctionnement élevée ? Fonctionne-t-il également sans défaillance dans des conditions non optimales ? • Quels dysfonctionnements peuvent survenir durant l'utilisation du produit ? • En quoi et comment le produit en est-il affecté ? • Quelles mesures peuvent être prises pour éviter ces dysfonctionnements ?	
A : Intensif en consommation de matières premières / B : Intensif en impacts lors de la production / E : Intensif en impacts lors de l'élimination Augmentation de la durée de vie du produit Est-ce que le produit est intemporel ou peut-il être adapté à de nouvelles tendances de mode ? • Comment faire en sorte que le produit soit intemporel ? • Existe-t-il des possibilités de séparer l'habillage extérieur du reste du produit ? • L'habillage extérieur est-il conçu pour être interchangeable ? L'utilisation du produit procure-t-il à l'utilisateur des sentiments particuliers d'agrément ou de joie ? • Comment garantir une appréciation élevée de la valeur du produit ? • Qu'est-ce qui rend le produit « particulier » (par rapport à des produits concurrents par exemple) ? • Comment créer un lien privilégié avec l'utilisateur (possibilité de personnaliser le produit) ?	

Tableau 10 : Exemple de check-lists (Eco-design pilot)

En termes d'outils, les check-lists présentent un intérêt majeur pour les industriels, puisqu'elles conduisent à des données pertinentes et faciles à manipuler. Par contre, les diverses réponses possibles aux questions sont souvent considérées comme subjectives et peuvent être remises en cause.

On peut donc conclure que l'efficacité des réponses réside dans la pertinence et la précision des questionnaires.

5.3 Synthèse

A travers l'ensemble des outils d'éco-conception analysés, nous avons souligné l'intérêt que présentent chaque approche (évaluation quantitative et qualitative, check-lists, guidelines de conception environnementale...) dans l'analyse du produit et l'intégration de la vision environnementale dans les processus de conception des entreprises.

Cependant, cette nouvelle dimension d'éco-conception a rapidement exigé l'intérêt d'associer la conception environnementale à l'innovation. Ceci permet aux industriels de satisfaire un double objectif : celui de l'engagement environnemental et de l'innovation. La démarche d'innovation définie par l'Ademe (Ademe 06) est décrite comme la succession d'étapes, allant de l'idée au développement industriel d'un concept ou d'une technologie nouvelle apportant un progrès technique, économique et social.

6 Le contexte industriel

L'innovation représente aujourd'hui une voie de survie pour les entreprises souhaitant affirmer leurs potentiels et compétences dans le développement de produits respectueux de l'environnement, et voulant évoluer et se démarquer par rapport à la concurrence. Développer une démarche d'éco-innovation en conception de produit présente aujourd'hui un intérêt majeur pour la pérennité d'une activité industrielle. Les industriels ont repris la plupart de ces travaux de recherche afin d'élaborer des manuels ou des guidelines. Luttrupp et al. (Luttrupp et al, 06) ont dressé une liste des entreprises ayant entrepris cette démarche en détaillant les documents élaborés.

Bombardier propose un guide pour l'éco-conception « Design for Environment », guide inspiré par les dix règles d'or. Ce guide est à l'usage des ingénieurs tout au long du développement des produits. Ce guide est constitué d'actions à réaliser dans onze directions particulières : les fonctions, les produits dangereux, la bonne gestion, le poids, l'énergie, l'amélioration, la durée de vie, la protection, l'information, le mélange, la structure. On retrouve les 10 domaines définis précédemment dans les dix règles d'or auxquels ils ajoutent l'approche fonctionnelle du produit. A chaque direction sont associés 2 à 6 actions à réaliser qui constituent une check-list proposée aux concepteurs de l'entreprise Bombardier. Ces actions sont liées aux produits particuliers que réalise l'entreprise. Des bases de connaissances sont associées à ces lignes directrices qui concernent les matériaux et les fluides à faibles impacts environnementaux (Bombardier 05). L'ingénieur doit alors définir un plan d'action sans avoir accès à une méthode d'analyse, de structuration et de formalisation du problème environnemental de conception étudié.

Schneider Electric (Schneider 05) a défini un chapeau général en 5 points :

- Préservation et usage efficace des ressources naturelles,
- Minimisation des émissions (effets de serre, bruits,...),
- Minimisation des déchets (fabrication, fin de vie),
- Suppression et minimisation de l'utilisation des substances dangereuses,
- Réduction de la consommation d'énergie.

L'entreprise précise que ces règles ne doivent pas se substituer aux règles classiques de conception. Deux voies sont approfondies sous forme de guide associant des règles de minimisation des besoins et de choix des matériaux ainsi que des directives de bonne conception associées à quatre situations de vie pertinentes : la production, la distribution, l'utilisation et la fin de vie. L'ingénieur a accès au logiciel EIME (Environmental Information and Management Explorer) (EIME 04) qui permet d'évaluer l'impact environnemental du produit au long de sa création.

De Medina (De Medina 06) montre le rôle des outils d'éco-conception, en particulier pour le recyclage dans le cadre de l'entreprise Renault.

Toutes les règles et directives énumérées se réduisent à des check-lists, documentées ou non. Ces check-lists ne sont pas associées à des stratégies de conception incluant le fonctionnement. Sachant que tous les impacts environnementaux résultent de choix de conception, que, comme le précise l'entreprise Schneider Electric (Schneider 05), on doit s'attacher à ce que le produit fonctionne, on peut donc imaginer qu'il est possible, en phase de conception préliminaire, de lier approche environnementale et fonctionnement.

7 L'éco-innovation

La problématique environnementale et l'évolution de la société impose de nouvelles contraintes au contexte industriel, notamment dans la conception des produits. La gestion des ressources environnementale, la maîtrise des déchets, l'innovation dans l'utilisation des matériaux et l'exploitation de nouvelles technologies sont autant de contraintes qui soulèvent une urgence d'action et d'évolution dans la démarche actuelle de conception des produits. L'intégration d'une démarche d'éco-innovation devient nécessaire afin d'associer la vision environnementale à l'innovation de produit et d'assurer le développement durable des produits industriels.

L'éco-innovation concerne « l'ensemble des innovations (techniques, conceptuelles et méthodologiques) qui contribuent directement ou indirectement à une amélioration de l'état de l'environnement. L'environnement est pris au sens large et incluent les ressources naturelles (air, eau, sol, milieux), la biodiversité, le changement climatique, l'éco-efficacité énergétique et les énergies (renouvelables), le cadre de vie et le développement durable de la société » (Ademe 06). Dans le cadre du programme de la veille de l'innovation sectorielle en Europe sur « l'éco-innovation », Reid et Miedzinski (Reid et al, 08) définissent l'éco-innovation comme étant la « *création de nouveaux produits, processus, systèmes, services et procédures à des prix compétitifs, visant à satisfaire les besoins humains, et à fournir une meilleure qualité de vie d'utilisation, avec d'une part, un cycle de vie minimal de ressources naturelles (Quantité de matériaux et énergie) par unité de production et d'autre part, un rejet minimum de substances toxiques* ».

En contexte industriel, notamment en démarche de conception de produit, l'éco-innovation permet de passer d'une approche négative « réduction d'impact » à une approche plus positive de génération de nouvelles idées à travers la créativité et l'innovation (Beard et al, 99). Les différents types d'éco-innovation peuvent généralement être regroupés en trois catégories : process, produits et enfin système (Bleischwitz et al, 09).

- L'innovation process : concerne la mise en œuvre d'un nouveau procédé améliorant le système de production ou le mode de livraison. Cette innovation concerne la mise en œuvre d'une nouvelle méthode organisationnelle dans les pratiques de l'entreprise (organisation du travail ou des relations extérieures) ou concerne aussi l'innovation de procédés. Cette innovation est étroitement liée à l'apprentissage et l'éducation. Un autre aspect de l'innovation process concerne l'innovation dans la commercialisation de produit, l'emballage, la promotion et la communication de produit (l'éco-étiquetage).
- L'innovation produit : concerne toute amélioration ou innovation du produit ou service, qui permet de réduire de façon significative l'impact global du produit sur l'environnement. Toutefois, cela implique des risques pour l'entreprise puisque il est important les clients achètent le nouveau produit. Ce risque est identique dans le cas de l'innovation classique. L'augmentation des fonctions du produit ou l'évolution vers les services fait également partie de ce niveau d'éco-innovation.
- L'innovation système : ce type d'innovation ne se réfère pas seulement à des systèmes technologiques, mais aussi à des évolutions radicales modifiant les conditions du marché, le changement du comportement de l'utilisateur et des modes de vie. Ce niveau d'éco-innovation fait référence à des circuits fermés de matériaux, à des modes de productions et consommations durables, etc.

8 Les outils d'éco-innovation

Du fait de l'attention grandissante concernant les impacts environnementaux dans la production industrielle et la mise à disposition de services en tout genre, de nombreuses méthodes ont vu le jour pour accompagner les concepteurs. En effet, l'environnement est un nouveau facteur, au même titre que des facteurs classiques, à prendre en compte lors du développement d'un produit. L'objectif est d'équilibrer la balance entre le bénéfice apporté à l'utilisateur et l'impact environnemental du produit.

Des outils d'aide à l'innovation existent et intègrent la vision éco-conception dans les procédures de hiérarchisation de solutions (définition de critères environnementaux dans l'évaluation globale des idées de solutions) ou lors du développement de solution fonctionnelle (Li et al, 09). D'autres outils d'éco-innovation existent et proposent une approche plus globale d'intégration de la vision éco-conception dans le processus d'innovation et de conception de produit.

L'étude bibliographique proposée dans ce manuscrit, consiste à présenter un classement particulier de ces méthodes d'éco-innovation en fonction de leurs approches puis, à mettre en évidence la manière dont elles traitent les aspects environnementaux notamment en décrivant les outils sur lesquelles elles reposent.

8.1 L'outil logiciel de résolution de problèmes contradictoires « Eco-design »

8.1.1 Présentation du processus

En terme de processus de conception éco-innovant, Hsiang-Tang Chang et Jahau Lewis Chen (Chang et al, 04), proposent une démarche basée sur des contradictions techniques de la théorie TRIZ, associée à des axes d'éco-efficacité. Cette approche découle de travaux préalables de recherche (Chen et al, 03), définissant une relation entre les paramètres techniques de la théorie TRIZ et les axes d'éco-efficacités (Desimone et al, 97). Le processus de conception éco-innovante proposé en figure 11 (partie gauche) se décline en cinq étapes :

1. Recherche d'axes d'éco-efficacité à améliorer. Le choix d'éléments d'éco-efficacité dépend de trois cas de figures. Ils expliquent qu'un ingénieur d'études peut reconnaître intuitivement, pour un produit donné, le besoin d'améliorer certains éléments d'éco-efficacité. Dans le cas contraire, il peut classer le poids de chaque élément d'éco-efficacité par la matrice d'analyse hiérarchique (AHP : Analytic Hierachy Process) (Saaty et al, 00) ou identifier des opportunités d'amélioration du produit, par l'analyse du cycle de vie (ACV) (Wenzel et al, 97) (Curran 96) du produit.
2. Recherche des paramètres techniques par le tableau 1 (Chen et al, 03). En ayant choisi un axe d'éco-efficacité, le choix des paramètres techniques est déterminé en fonction du poids de l'axe d'éco-efficacité défini par la matrice d'analyse hiérarchique (AHP).
3. Ajout de paramètres techniques nécessaires selon le cas d'étude. Ces paramètres sont associés aux paramètres choisis dans la deuxième étape du processus, en fonction de la contradiction définie par le concepteur.
4. Démarche de résolution par les contradictions
 - 4.1 Si le problème étudié définit une seule contradiction, la résolution du problème ne concerne que les principes d'innovation associés à la contradiction.

4.2 Si le problème étudié définit plusieurs contradictions (paramètres à améliorer et à paramètre ne pas dégrader), le concepteur sélectionne les principes d'innovation en fonction de leur fréquence d'apparition pour toutes les contradictions. La résolution du problème est développée selon les principes d'innovations sélectionnées.

5. Idées de solutions : à cette étape du processus, il s'agit d'interpréter les principes d'innovations relatives au problème de conception étudié.

1. Choix intuitifs du concepteur pour un axe d'éco-efficacité

2. Utilisation de la matrice d'analyse hiérarchique AHP

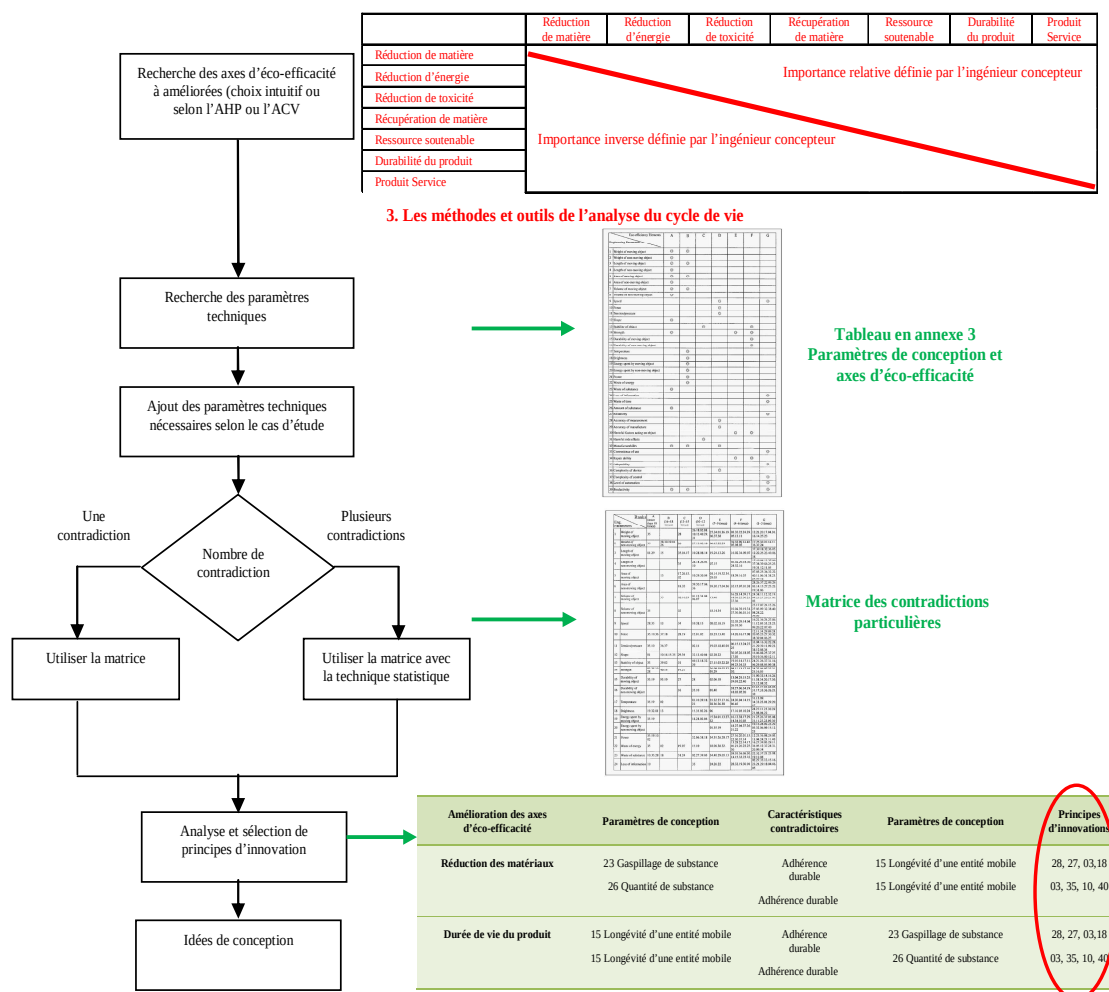


Figure 11 : Synthèse du processus d'éco-innovation proposée par Hsiang-Tang Chang et Jahau Lewis

8.1.2 Exemple d'illustration pour l'amélioration du roulement des pneus

La démarche d'éco-innovation présentée préalablement est intégrée à l'outil logiciel de résolution de problèmes contradictoires CAD « Eco-design » (Chang et al, 04). Une application de cette démarche a été définie pour l'amélioration du roulement des pneus à double couche de Bridgestone Corporation (Bridgestone Corporation). L'objectif étant de gérer la fin de vie des pneus, qui représente la phase la plus polluante du cycle de vie d'un pneu. La réduction des matériaux et la durée de vie du produit sont les axes d'éco-efficacité qui ont été choisis par les concepteurs, en vue d'optimiser la conception des pneus.

En fonction des axes d'éco-efficacité préalablement définis (réduction des matériaux, durée de vie du produit), les paramètres de conception choisis par les concepteurs sont *le gaspillage de substance, la quantité de substance, longévité d'une entité mobile*.

A partir des paramètres de conception sélectionnés (voir annexe 2), les concepteurs associent d'autres paramètres de conception dans le but de définir les contradictions techniques. La phase de résolution du problème consiste à interpréter les principes d'innovations exprimés par les contradictions techniques. Le tableau 11 présente les principes d'innovations de l'exemple d'application concernant l'amélioration du roulement des pneus.

Amélioration des axes d'éco-efficacité	Paramètres de conception	Caractéristiques contradictoires	Paramètres de conception	Principes d'innovations
Réduction des matériaux	23 Gaspillage de substance	Adhérence durable	15 Longévité d'une entité mobile	28, 27, 03, 18
	26 Quantité de substance	Adhérence durable	15 Longévité d'une entité mobile	03, 35, 10, 40
Durée de vie du produit	15 Longévité d'une entité mobile	Adhérence durable	23 Gaspillage de substance	28, 27, 03, 18
	15 Longévité d'une entité mobile	Adhérence durable	26 Quantité de substance	03, 35, 10, 40

Tableau 11: Principes d'innovation exprimés par l'application « amélioration du roulement des pneus »

D'après l'étape 4.2 du déroulement de la démarche, le principe d'innovation sélectionné avec une fréquence d'apparition (4 fois) est le principe 3 (qualité locale). La recherche d'idée de solutions est définie donc par l'interprétation de ce principe d'innovation.

8.1.3 Commentaires

Le processus d'éco-innovation proposé par Hsiang-Tang Chang et Jahau Lewis couvre le processus complet d'innovation (de l'analyse du besoin jusqu'à la phase de recherche de concept). Par contre, plusieurs problèmes sont identifiés dans la manière d'analyser le problème de conception et la définition des contradictions techniques. D'une part, le choix du paramètre de conception à améliorer parmi les 39 paramètres de conception de la théorie TRIZ est défini de manière intuitive par rapport à l'axe d'éco-efficacité sélectionné. D'autre part, les contradictions qui émergent selon les auteurs sont sujettes à discussion. En agissant avec une contrainte « adhérence durable », l'amélioration des paramètres de conception « gaspillage de substance » ou « quantité de substance » conduit nécessairement à l'amélioration de la longévité de l'entité mobile. Il n'y a donc pas de contradiction technique. Les auteurs auraient pu le supposer car, dans ce cas, la matrice est symétrique (mêmes principes sélectionnés quand on inverse la contradiction).

Le point fort de cette méthode est la première étape du processus, c'est-à-dire, le choix de l'axe d'éco-efficacité par rapport au problème de conception étudié. Ce choix est défini selon trois possibilités :

- choix intuitif du concepteur pour développer un axe en particulier
- utilisation de la matrice d'analyse hiérarchique (AHP)
- utilisation des méthodes d'analyse de cycle de vie (ACV).

Cette approche à plusieurs entrées facilite la canalisation du groupe de créativité durant le processus d'éco-innovation. Selon le cas d'étude, elle permet aussi de proposer différentes possibilités d'analyse en fonction des données relatives au produit.

8.2 La méthode « LCPlanner version 3.0 »

8.2.1 Présentation du processus

La méthode « LCPlanner version 3.0 » est proposée par H. Kobayashi dans (Kobayashi 06). La méthodologie développée consiste à quantifier l'éco-efficacité du produit et son « Factor-X » dès les phases de conception préliminaire où :

- l'éco efficacité est définie comme le ratio entre « la valeur du produit » et son « impact environnemental ».
- le Factor-X est l'amélioration de ce rapport

D'autres facteurs peuvent être proposés pour quantifier l'éco-efficacité mais ils se basent sur l'ACV qui n'est utilisable que dans les phases de développement détaillées du produit en fin de processus de conception. Cet outil met la priorité sur l'étude et l'intégration de l'efficacité environnementale et l'innovation en phase amont de conception. Cette méthode est implémentée sous Excel. Ce processus d'éco-innovation se décline en quatre étapes comme l'illustre la figure 12.

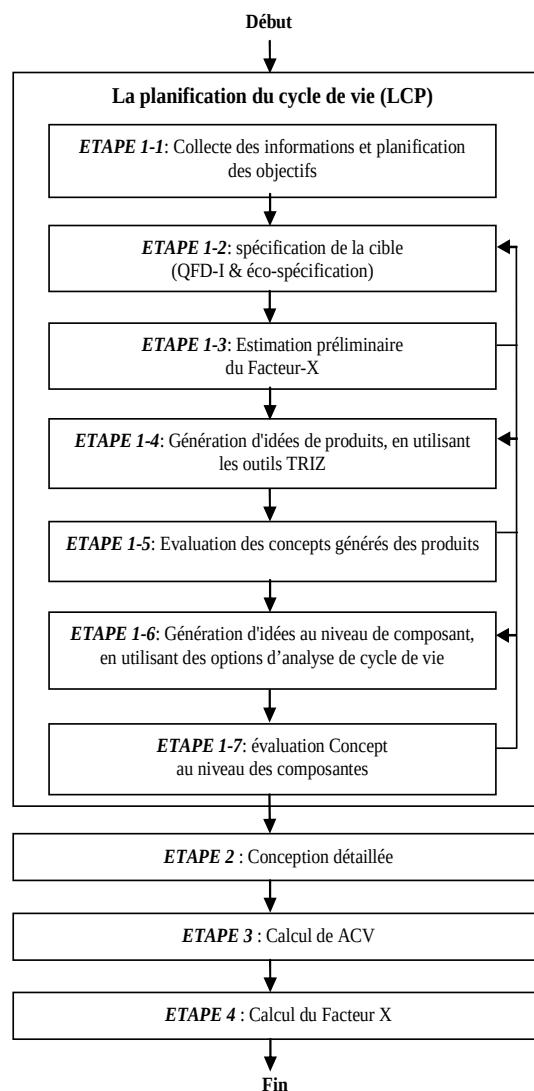


Figure 12 : Synoptique du processus d'éco-innovation proposée par H. KOBAYASHI

Etape 1 : quantifier l'éco-efficacité du produit basée sur les données de la planification du cycle de vie, appelée : LCP (Life Cycle Planning). Puis utilisation de la méthode de la théorie TRIZ pour rechercher des idées.

Etape 2 : Conception détaillée, définition de la configuration et de la forme du produit, détail de la structure (CAO, DfX tool – Design For X avec X=Assembly, disassembly, recyclability...)

Etape 3 : Vérification de l'éco-efficacité en utilisant la méthode de l'ACV.

Etape 4 : Evaluation du facteur X. il faut prendre en compte les incertitudes de conception dans le processus décisionnel, vérification par calcul du facteur X non basé sur les données de l'ACV mais sur l'éco-spécification de la cible (Etape 1-2).

Nous allons voir en détail les outils de l'étape 1. Elle s'articule autour de sept points donnés ci-dessous.

- 1.1 Clarification de l'objectif du produit à concevoir.
- 1.2 Détermination des objectifs environnementaux et du cycle de vie du produit. Pour cela, utilisation des outils **QFD-I** (Figure 13 : Exemple de la matrice QFD-I) et de **matrices d'éco-spécification** (figure 14 : exemple de la matrice d'éco-spécification) pour, respectivement, décrire les aspects qualité et environnementaux. La définition des objectifs de conception considère donc à la fois les besoins des utilisateurs et les priorités des objectifs environnementaux.
- 1.3 Estimation du niveau d'éco innovation. Une **première évaluation du facteur X** est réalisée à ce stade. Cette évaluation est définie par le terme (vouloir, devoir). Elle représente alors la cible à atteindre.

		Caractéristiques de qualité j														
Exigence des consommateurs i	Importance pi	Consommation d'énergie [KWh/année]	Force opérationnelle de la porte [N]	Distribution de la température dans les compartiments [deg]	Changement de la température dans les compartiments [deg]	Humidité des compartiments [°°]	Bruit opérationnelle [dB]	Volume intérieur efficace [L]	Efficacité du volume intérieur [°/°]	Temps de congélation [min]	Temps de réfrigération [min]	Luminosité des compartiments [lux]	Affichage à cristaux liquides (avec ou sans) [-]	Stockage de la glace [pièces]	Durée de la conservation des aliments [jours]	
				3	1	3				1						9
			1					1					3			
		9														
																
Fonction glace automatique	4.9										9			9		
Ouverture facile de porte	4.8		9													
Enveloppe extérieure (jolie)	3.5											1	3			
Somme		61.2	50.2	28.1	12.9	22.8	53.1	21.7	44.1	55.3	49.4	24.5	10.5	44.1	68.4	
Importance relative p*j		11.2°/°	9.2°/°	5.1°/°	2.4°/°	4.2°/°	9.7°/°	4.0°/°	8.1°/°	10.1°/°	9.0°/°	4.5°/°	1.9°/°	8.1°/°	12.5°/°	

Figure 13 : Exemple de la matrice QFD-I

Phase du cycle de vie	Inventaires des catégories	Exigences environnementales	MUST/WANT	Caractéristiques environnementales	Ordre de priorité R_{mi}			EPN i^{*n}	EPN i^{*n} relatif
					Politique de l'entreprise ($i=1$)	Impact du marché ($i=2$)	Impact environnemental ($i=3$)		
Extraction des MP	Matériaux	Optimisation de la masse par rapport à la fonction du produit	W	Masse volumique du produit [Kg/L]	3	2	2	12	6.8 %
		Utilisation de matériaux recyclés	W	Taux des plastiques recyclés utilisés [%]	4	2	1	8	4.5 %
	Energie								
	Substances toxiques	Non utilisation de substances toxiques (HCFC)	M	Quantité de substances toxiques (HCFC) [g]	-	-	-	-	-
		...	...	...	...	...	...	...	...

Fin de vie	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Déchets solides	Recyclage des matériaux	M	Taux de recyclabilité [%]	-	-	-	-	-
		Produit durable	W	Durée de vie [année]	4	3	1	12	6.8 %
		Organisation d'un service après-vente	W	Période de maintenance [année]	4	3	1	12	6.8 %
		Marquage des matériaux au-delà de 25 g	M	Traçabilité des matériaux [-]	-	-	-	-	-
	Emission dans l'air								
	Emission dans l'eau								

Figure 14 : Exemple de la matrice d'éco-spécification

- 1.4 Utilisation de TRIZ pour la résolution de problème de conception (voir Figure 15 : Matrice des contradictions : matrice QFD-I X matrice d'éco-spécification). Cette matrice est générée par le logiciel « LCPlanner version 3.0 »

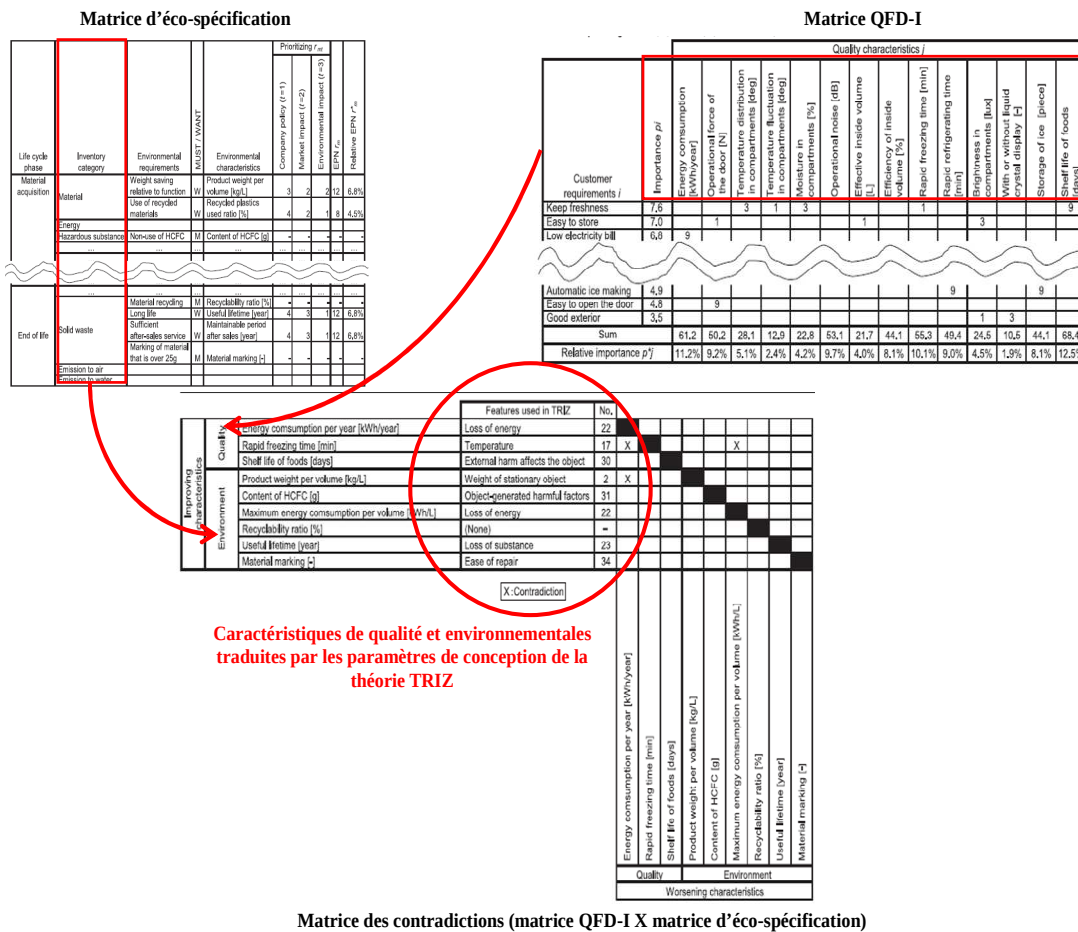


Figure 15 : Matrice des contradictions : matrice QFD-I X matrice d'éco-spécification

Le tableau 12 illustre le détail de la Figure 15 : Matrice des contradictions : matrice QFD-I X matrice d'éco-spécification, c'est-à-dire, la concordance entre les caractéristiques de qualité et environnementale définies par la matrice QFD-I et la matrice d'éco-spécification et les paramètres de conception de la théorie TRIZ. Les contradictions sont définies par le croisement des caractéristiques de qualité et les caractéristiques environnementales, conduisant en conséquence à des contradictions des paramètres de conception de la théorie TRIZ.

Caractéristiques améliorées	Qualité	Consommation d'énergie [KWh/an]	Gaspillage d'énergie	N°.
		Temps de congélation [min]	Température	17
		Durée de la conservation des aliments [jours]	Facteurs nuisibles agissant sur l'entité	30
	Environnementale	Masse volumique du produit (kg/L),	Masse d'une entité immobile	2
		Quantité de substances toxiques, HCFC (g)	Facteurs nuisibles induits	31
		Energie maximale consommée par volume (kWh/L)	Gaspillage d'énergie	22
		Taux de recyclabilité (%)	Aucun paramètre	
		Durée de vie (année)	Gaspillage de substances	23
		Traçabilité des matériaux	Aptitude à la réparation	34

Tableau 12 : Détail des caractéristiques de qualité et environnementales traduites par les paramètres de conception de la théorie TRIZ

- 1.5 Confrontation des solutions générées par les contradictions, en considérant le coût, la qualité et les aspects environnementaux. L'évaluation des solutions est effectuée sans tenir compte des incertitudes de la méthode d'évaluation. L'outil monte carlo est utilisé pour l'évaluation des risques de conception. Finalement, la sélection des idées de conception en fonction des résultats de l'évaluation est réalisée.
- 1.6 Etape basée sur l'outil QFD et les données relatives à l'ACV afin d'analyser les idées de conception, en vue de leurs réalisations, face aux différents matériaux en jeu dans les différentes phases du produit : amélioration, maintenance, réutilisation et recyclage.
- 1.7 De la même manière qu'à l'étape 5, les choix de conception sont décrits et évalués avec et sans les incertitudes. A la fin de cette étape, le processus LCP est terminé.

8.2.2 Commentaires

Nous constatons que cette méthode est complète et prend en compte de manière structurée la vision environnementale dès les phases préliminaires de conception. De plus, elle est particulièrement intéressante car elle propose de quantifier l'amélioration apportée sur certains paramètres environnementaux et de considérer aussi les aspects fonctionnels du produit. Par contre, il semble regrettable que les auteurs proposent une association d'un seul paramètre de conception de la théorie TRIZ par paramètre d'éco-spécification (tableau 12). De plus, la corrélation entre les paramètres d'éco-spécification et les paramètres de conception de la théorie TRIZ ne nous semble pas justifiée (par exemple, la température associée au temps de congélation).

Nous pouvons aussi constater que dans l'exemple énoncé, une des éco-spécifications n'a pu être traduite. Un travail supplémentaire d'adaptation à TRIZ serait donc envisageable. Une autre observation est aussi faite concernant le manque de structuration des outils proposés pour orienter la réflexion du groupe de créativité dans la recherche d'idée de solutions environnementale de conception. Une approche d'aide à la structuration des connaissances serait également avantageuse afin de conduire la réflexion du groupe vers des idées de solutions environnementales pertinentes.

8.3 Outil de résolution dans une vision d'éco-innovation basé sur TRIZ

8.3.1 Présentation de l'outil de résolution dans une vision d'éco-innovation

Basé exclusivement sur les outils TRIZ (paramètres de conception et la matrice des contradictions), l'outil de résolution dans une vision d'éco-innovation proposé par Chen et al, repose sur la matrice des paramètres de conception et la matrice de contradiction pour la résolution (Chen et al, 03). La figure 16 détaille le processus d'éco-innovation proposé par Chen et al.

La première matrice représentée par le tableau 13, Chen et al ont recherché l'adéquation entre les paramètres pertinents de l'éco-efficacité (WBCSD 99) (Desimone et al, 97) et les paramètres de conception de la théorie TRIZ. Les auteurs ont compté le nombre de fois qu'un même principe était associé au même paramètre de conception dans la matrice des contradictions de TRIZ, aussi bien en tant que paramètre à améliorer que paramètre à ne pas

dégrader. Ils en déduisent le tableau 14 qui regroupe les principes d'innovation les plus employés. La méthode de résolution du problème consiste alors à choisir un axe d'éco-efficacité et un paramètre de conception puis d'organiser un brainstorming sur les principes les plus utilisés. Les 3 premières colonnes du tableau 14 concernent les principes utilisés plus de douze fois.

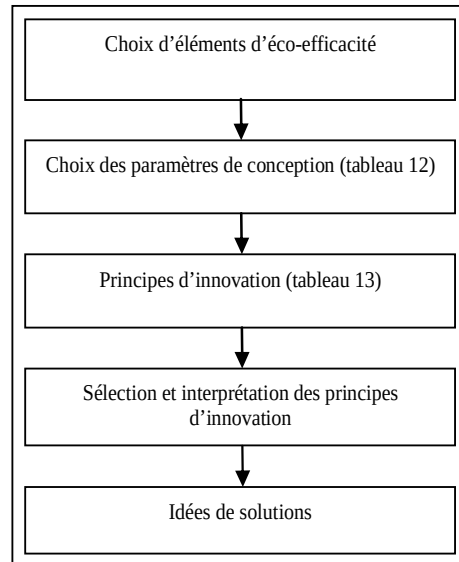


Figure 16 : Synoptique du processus d'éco-innovation proposée par Chen et al

Eco-efficiency Elements	A	B	C	D	E	F	G
Engineering Parameters							
1. Weight of moving object	35	28,10,1					
2. Weight of non-moving object	35	9,01,26					
3. Length of moving object	01,29		35,04,17				
4. Length of non-moving object				35			
5. Area of moving object					10,29,30,04		
6. Area of non-moving object						18,39,16,35	
7. Volume of moving object							07,05,25,36,33,2
8. Volume of non-moving object							2,40,11,06,31,38,23,24,09,12
9. Speed							28,26,37,22,09,2
10. Force							9,03,14,13,27,25,23,19,31,06
11. Tension/pressure							24,38,11,12,32,1
12. Shape							9,09,23,27,20,21,05,03
13. Stability of object							25,17,07,24,15,2
14. Strength							6,27,03,09,32,38,40,08,28,22,36,05
15. Durability of moving object							16,21,36,24,27,0
16. Durability of non-moving object							6,11,12,05,33,23,25,09,20,22,07,40
17. Temperature							12,11,34,29,09,2
18. Brightness							4,20,05,23,27,30,32,08,39,04,06,25
19. Energy spent by moving object							33,04,16,32,22,2
20. Energy spent by non-moving object							8,21,29,39,11,09,23,38,12,08,34
21. Power							
22. Waste of energy							
23. Waste of substance							
24. Loss of information							
25. Waste of time							
26. Amount of substance							
27. Reliability							
28. Accuracy of measurement							
29. Accuracy of manufacture							
30. Harmful factors acting on object							
31. Harmful side effects							
32. Manufacturability							
33. Convenience of use							
34. Repair ability							
35. Adaptability							
36. Complexity of device							
37. Complexity of control							
38. Level of automation							
39. Productivity							

	A (more than 10 times)	B (16-18 times)	C (13-15 times)	D (10-12 times)	E (7-9 times)	F (4-6 times)	G (1-3 times)
1 Weight of moving object	35		28	26,18,02,0,11,0,15,40,29,31	27,34,01,36,1,9,06,37,38	03,32,22,24,3,9,05,13,11	12,21,20,17,04,3,0,16,14,25,23
2 Weight of non-moving object	35	28,10,1,9,01,26	26	27,13,02,8	06,15,22,29	39,32,09,14,4,0,05,08,03	17,25,30,20,16,1,1,36,37,24
3 Length of moving object	01,29		35,04,17	10,28,08,14	19,24,13,26	16,02,34,09,0,7	37,39,18,32,36,0,5,12,22,25,23,40,06,38
4 Length of non-moving object				35	28,14,26,0,11,0,24,32,16	03,02,29,18,3,0,24,32,16	17,40,08,13,27,0,9,37,38,39,06,25,23,19,31,12,11,05
5 Area of moving object			15	17,26,13,02	10,29,30,04	01,14,19,32,3,4,28,03	18,39,16,35
6 Area of non-moving object				18,35	39,30,17,0,3,6	39,30,17,04,3,6	32,15,07,01,3,8
7 Volume of moving object		35	02,10,29	01,15,34,0,0,6,07	13,40	16,28,14,39,1,7,18,26,22,30,25,37,36	24,38,11,12,32,1,9,09,23,27,20,21,05,03
8 Volume of non-moving object	35		2		18,14,34	1,37,30,06,01,16	25,17,07,24,15,2,6,27,03,09,32,38,40,08,28,22,36,05
9 Speed	28,35	13	34	10,38,15	08,02,18,19	32,03,29,14,0,4,26,01,30	16,21,36,24,27,0,6,11,12,05,33,23,25,09,20,22,07,40
10 Force	35,10,36	37,18	28,19	15,01,02	03,21,13,40	14,26,16,17,0,8	12,11,34,29,09,2,4,20,05,23,27,30,32,08,39,04,06,25
11 Tension/pressure	35,10	36,37		02,14	19,03,18,40,0,1	06,15,13,24,2,7,25	33,04,16,32,22,2,8,21,29,39,11,09,23,38,12,08,34

Tableau 14: Association paramètres de conception et principes d'innovation (extrait des 11 premières lignes) selon (Chen et al, 03)

Tableau 13: Association paramètres de conception et éco-efficacité selon (Chen et al, 03)

8.3.2 Analyse critique de l'outil de résolution proposé par Chen et al.

La corrélation entre les 39 paramètres de conception et les axes d'éco-efficacité proposée dans le tableau 13 ne nous semble pas justifiée. Nous ne pensons pas que cette corrélation soit exhaustive, c'est-à-dire que tous les paramètres de conception doivent avoir, sans analyse particulière du système, une action générale sur l'éco-efficacité. Par exemple, le choix des paramètres 9 (vitesse), 10 (force), 11 (pression) pour modifier un concept dans l'axe D (recyclabilité) n'est pas justifié et ne semble pas évident de prime abord. De surcroît, on s'aperçoit, en analysant les 3 premières colonnes du tableau 14 que certains paramètres de conception sont peu discriminants (principes d'innovation en nombre insuffisant).

L'analyse du tableau 14, en ne considérant que les principes utilisés plus de 12 fois, montre que le principe 35, le changement de propriétés, est impliqué pour 32 paramètres. C'est un principe que l'on pourrait qualifier de systématique voire même d'universel. Seuls 3 autres principes dépassent les 10 implications : le 10 (18 fois), le 28 (17 fois) et le 1 (13 fois). 10 principes ne sont jamais présents. Parmi ceux-là, on s'aperçoit que les principes 12 (l'équipotentialité : économie d'énergie) et 25 (le self-service : utilisation des ressources) ont une notion particulièrement écologique. A contrario, le principe 1 (la segmentation) parle de fragmentation durant le cycle de vie, il faudra le faire évoluer pour l'exprimer de façon plus éco-efficace (comme la récupération ou le recyclage). On retrouve la liste des principes évoqués dans le tableau 15.

Principe	Titre	Expression du principe
35	Le changement de propriétés	a) Modifier l'état de phase d'une entité. b) Modifier sa concentration ou sa consistance. c) Modifier le degré de flexibilité.
10	L'anticipation	a) Accomplir l'action requise à l'avance (entièrement ou au moins partiellement). b) Positionner les entités à l'avance pour que l'action soit réalisée immédiatement, dans les conditions les plus favorables.
28	L'évolution du système mécanique	a) Remplacer un champ mécanique par un champ optique, acoustique, thermique, chimique (MATHem). b) Utiliser un champ magnétique, électrique ou électromagnétique pour agir sur l'entité (mathEM). c) Faire évoluer les champs : - de stationnaire à dynamique - de constant à variable - d'aléatoire à structuré d) Utiliser des champs en association avec des particules activées par ces champs.
01	La segmentation	a) Diviser une entité en parties indépendantes. b) Réaliser une entité démontable. c) Réaliser une entité modulaire. d) Réaliser une entité fragmentable (fragmentation au cours du cycle de vie)
12	L'équipotentialité	a) Changer les conditions de travail de manière à minimiser la consommation d'énergie. b) Limiter les déplacements verticaux
25	Le self service	a) Utiliser les ressources d'une entité pour assurer son autonomie en créant des fonctions auxiliaires. b) Durant le cycle de vie de l'entité, donner à l'entité des fonctionnalités correctrices ou préventives.

Tableau 15 : Principes d'innovation 35, 10, 28, 1, 12, 25.

8.3.3 Commentaires

La qualification de l'utilisation de l'outil proposé par *Chen et al* est intimement liée à la cohérence du choix des paramètres de conception associés à l'éco-efficacité et à la fréquence de leur liaison aux principes d'innovation. Cette fréquence n'a rien à voir avec leur utilisation en éco-innovation. Cela vient du fait que ces travaux sont issus d'une matrice qui est bâtie sur une logique particulière, la résolution de contradictions techniques.

Une logique de spécification et de structuration du problème de conception dans une vision d'éco-innovation, en fonction des axes d'éco-efficacité, consisterait à cibler de manière pertinente les principes d'innovation. En effet, nous considérons qu'en réduisant le nombre des paramètres de conception associés aux axes d'éco-efficacité et en exprimant des problèmes généraux en terme de contradiction technique associée au fonctionnement du produit, la phase de résolution du problème conduira à des principes d'innovation pertinents et adaptés au problème posé. Cependant, le point fort de cet outil de résolution reste la facilité de son utilisation par un groupe de créativité, avec une approche à plusieurs entrées. Cette initiative de proposer un outil de résolution rapide est intéressante, pour deux raisons :

- La première concerne le contexte industriel et les contraintes des entreprises qui doivent innover et agir souvent dans l'urgence par rapport aux perpétuelles évolutions de la société.
- La deuxième concerne la pluri-culturalité d'un groupe de créativité, qui parfois à cause d'approches d'analyse longues et compliquées, peut compromettre un bon déroulement d'une séance de créativité.

Par contre, il faut rappeler que ce type d'outil, développé dans une vision de résolution ne peut pas mettre en évidence certains problèmes de conception, qui ne sont déterminés que par une démarche d'analyse approfondie et détaillée.

9 Conclusion

Ce chapitre présente les méthodes et les outils d'éco-conception et d'éco-innovation existants dont peuvent disposer les concepteurs dans les démarches de conception environnementale de produits ou lors des séances de créativité. Nous avons souligné l'intérêt que présentent les outils d'éco-conception dans l'analyse environnementale du produit et par la suite, nous avons présenté de nouveaux outils dédiés à l'éco-innovation qui désormais représente un point fort vers une nouvelle ère d'outils industriels. Ce chapitre fait ressortir l'analyse de l'approche proposée par les outils d'éco-conception et d'éco-innovation.

La première approche définit les enjeux stratégiques de l'éco-conception pour une entreprise, aborde l'approche globale nécessaire à intégrer cette notion dans la démarche de conception et analyse des exemples d'outils d'éco-conception. Cette partie a permis de mettre en évidence la complexité des données environnementales exprimées par ces outils et la nécessité d'avoir des fiches de connaissances pour des concepteurs souhaitant entreprendre une démarche de conception environnementale. L'analyse des outils d'éco-conception permet de dégager les données pertinentes d'analyse et d'évaluation environnementale d'un produit. Cette démarche d'analyse a été abordée pour l'ensemble des outils analysés. Nous avons constaté des similarités mais aussi des différences entre les outils. Cependant, la prise en compte des impacts environnementaux à travers le cycle de vie du produit reste l'approche principale pour mener une démarche d'éco-conception.

La deuxième partie correspond à l'analyse des outils d'éco-innovation. Cette partie bibliographique trace et cerne les attentes des industriels envers ces outils d'éco-innovation. L'analyse des deux premiers outils (l'outil logiciel de résolution de problèmes contradictoires CAD « Eco-design » et l'outil « LCPlanner version 3.0) montrent des initiatives intéressantes dans l'intégration de la vision environnementale au niveau de la phase d'analyse du besoin et de spécification des objectifs environnementaux. Par contre, la prise en compte des contraintes environnementales au niveau de la structuration du problème, de la formalisation et de sa résolution n'a pas été totalement définie. On peut aussi regretter le manque d'interactivité et d'exhaustivité par rapport aux données environnementales considérées. On

note également un manque de représentativité pour des corrélations exprimées entre certaines caractéristiques environnementales et des paramètres de la théorie TRIZ. L'analyse du troisième outil d'éco-innovation a permis de soulever un point intéressant au niveau de la facilité de l'utilisation de l'outil.

En effet, on conclut qu'un outil d'éco-innovation doit conduire l'analyse environnementale du produit depuis la phase d'analyse du besoin et de la spécification de l'objectif environnementale, jusqu'à la phase de résolution et de recherche d'idées. Il doit être également un outil interactif, facile à utiliser par un groupe de créativité, et efficace.

On peut en final de cette analyse déduire les travaux à faire et les verrous scientifiques associés à lever :

- Mise en place d'une analyse en termes de développement durable en phase de recherche de solutions, donc en phase de connaissance imprécise du produit,
- Structuration de l'analyse pour permettre la formalisation du problème et la sélection des outils de résolution,
- Evolution des outils de résolution dans la vision développement durable,
- Mise au point d'un outil de résolution rapide.

Les chapitres qui suivent proposent des solutions pour chaque des quatre points.

CHAPITRE II : L'OUTIL MAL'IN : CADRE DE RECHERCHE ET D'APPLICATION

Les méthodologies de conception préliminaire permettent d'analyser et de structurer un problème de conception de produit, de le formaliser, de le résoudre et enfin de faire des choix de concept. Cette approche de qualification et de résolution d'un problème particulier dans la phase de recherche de concept s'avère une tâche complexe, puisque les paramètres de conception ne sont pas encore définis à ce stade.

Adapté aux phases préliminaires de conception, la Méthode d'Aide à L'INnovation (MAL'IN) est une méthode d'analyse et d'aide à l'innovation, basée sur une approche fonctionnelle. La démarche actuelle de MAL'IN permet, à partir de l'analyse d'un produit existant, d'imaginer des concepts innovants. La méthode est implémentée dans un logiciel de conduite d'étude MAL'IN.

Plusieurs choix ont piloté la mise au point de la méthode et le développement du logiciel, on peut lister :

- Utiliser le vocabulaire et les outils de l'analyse fonctionnelle
- Simplifier et adapter les outils TRIZ
- Intégrer des outils d'analyse des graphes
- Proposer des exemples ciblés pour les bureaux d'études
- Réaliser un logiciel de conduite d'étude

Notre objectif d'étude et de recherche est d'intégrer la vision environnementale et de faire évoluer la méthode actuelle vers un outil d'éco-innovation.

1 Les méthodes structurées de résolution de problème

Les problèmes d'innovation deviennent de plus en plus cruciaux dans un monde industriel très concurrentiel. Depuis quelques années, de nombreux travaux sur les méthodes de créativité ont été développés avec pour objectifs de rationaliser et d'améliorer cette phase du processus de conception de produits. La difficulté majeure de cette tâche préliminaire est que le problème rencontré est de nature multi-culturelle et multi-physique (Massey et al, 1993).

Des outils génériques sont alors nécessaires, afin de pouvoir prendre en compte la diversité des problèmes rencontrés. Les travaux menés par Alshuller, avec l'introduction de la méthode TRIZ, ont ouvert de nombreuses perspectives dans cette direction (Altshuller 84) Cette approche est basée sur l'identification de situations où des comportements opposés sont souhaités. La résolution de ces contradictions définit les bases des pistes d'innovation possibles. Différents auteurs ont présenté les outils de base utilisés dans cette théorie. On peut citer les principes d'innovation et la matrice des contradictions (Domb 97a), les lois d'évolution (Petrov 02), la modélisation et l'analyse par le graphe substances-champs (Terninko 00), le résultat idéal final (Domb 97b, (Domb 97c), les effets scientifiques (Frenklach 98) et ARIZ (acronyme russe de algorithme de résolution de problèmes inventifs) (Zlotin et al, 99). Des travaux récents proposent de compléter l'approche initiale, en introduisant l'effet de modifications des paramètres pour identifier les contradictions. Ce travail sur les paramètres s'appuie sur l'expérience d'experts des domaines concernés (Cavallucci et al, 07). Afin de faciliter l'acquisition de cette connaissance pour mettre en œuvre les outils TRIZ, d'autres auteurs proposent une ontologie supportée par un outil logiciel (Zanni-Merk et al, 09). De nombreuses applications industrielles de la théorie TRIZ

sont disponibles dans la littérature (Liu et al, 01, Jung et al, 06, Mao 00, Tompkins et al, 06). Cette théorie est aussi utilisée pour l'analyse de brevets où 7 classes sont définies en correspondance avec 20 des 40 principes d'innovation (Cong et al, 09).

Un problème crucial pour les méthodes de créativité est leur intégration d'une part aux processus industriels de conception et d'autre part leur intégration à des outils et supports numériques facilitant leur utilisation et garantissant leur traçabilité. On peut remarquer que beaucoup d'efforts portent sur le couplage des méthodes de créativité avec les méthodes et outils déjà existants dans le milieu industriel. Chang et al Chang et al, 04) propose de coupler la théorie TRIZ à une démarche d'éco-conception afin de prendre en compte dans la résolution des problèmes la dimension écologique. Li a développé une approche permettant de coupler la méthode TRIZ à un support d'aide à la décision basé sur l'AHP (Analytic Hierarchy Process). La composante économique est intégrée aux choix de solutions et une approche multicritère est alors mise en place. Cette démarche est appliquée pour la conception de systèmes manufacturés automatisés (Li et al, 09). Shimomura propose d'adapter le modèle fonctionnel FBS (Function Behaviour Structure) afin de gérer les relations entre les différents niveaux fonctionnels et permettre l'évolution du modèle au cours de l'avancement du processus de conception (Shimomura et al, 98). Dans le même objectif de coupler des modèles fonctionnels, leur qualité et la méthode TRIZ, divers auteurs ont proposé d'utiliser la méthode QFD (Quality Function Deployment) (Terninko 97, Yamashina et al, 02, Tan et al, 02). Afin de maîtriser la qualité et l'efficacité des processus de conception, Kai (Kai et al, .03) propose de coupler les outils d'innovation à la méthode six sigma (Design For Six Sigma DFSS). Une intégration des outils de la théorie TRIZ dans un système de management de la connaissance en analyse de la valeur (value engineering knowledge management system VE-KMS) est développée et permet d'intégrer directement de la créativité dans le processus d'analyse de la valeur. Cette intégration permet de réaliser des phases de créativité de manière plus systématique, plus organisée et mieux centrée sur les problèmes rencontrés (Zhang et al, 09).

Les outils de créativité sont très peu intégrés aux outils informatiques conventionnels des concepteurs (Cascini 04). Aussi une nouvelle catégorie d'outils est en train d'apparaître dénommée Computer-Aided Innovation tools (CAI). Ils interviennent aussi bien aux stades les plus précoces du processus de conception qu'au moment de la prise de décision en intégrant les attentes utilisateurs et des contraintes commerciales. Ces outils sont en fait l'aboutissement des différents développements présentés dans le paragraphe précédent (Leon 09). De nombreux outils de type CAI sont apparus basés sur les travaux de la communauté russe initiale issue de la TRIZ. Ces outils se sont avérés très difficiles à utiliser, car ils nécessitaient, à chaque étape de leur utilisation, une connaissance approfondie de la méthodologie et une formation lourde (Khomenko et al, 07). Le développement et le déploiement de ces méthodologies passent donc par leur intégration aux processus de conception et leur utilisation via un support informatique performant. Mais les outils de CAO classiques ne sont pas adaptés aux phases de recherche de solutions car les dimensions des produits sont mal connues, et les résultats des méthodes de créativité se présentent sous forme de concepts qui sont difficilement supportés par ces outils (Cugini et al, 09). Des premiers outils répondant à ces attentes apparaissent mais doivent être développés pour être utilisables dans un cadre industriel Chang et al, 04, Albers et al, 09). Albers propose de coupler des méthodes d'optimisation de type algorithmes génétiques avec des outils de créativité pour l'identification de conflits et améliorer la phase de conception préliminaire (Albers et al, 09). Afin de pouvoir utiliser ces outils d'innovation dans un outil plus global de gestion de projets, un consortium d'universités italiennes ont développé un projet dénommé PROSIT « From

Systematic Innovation to Integrated Product Development ». L'objectif est de lier les méthodologies et les outils d'innovation à un outil de management du cycle de vie du produit Product Lifecycle Management (PLM). Ce projet repose sur différentes tâches ; formuler précisément la bonne question, définir une réponse architecturale la plus pertinente possible, finaliser la solution en prenant en compte l'ensemble des contraintes techniques. Le concepteur a, à sa disposition, un ensemble d'outils et méthodes. Des outils de Design Optimization (DO) sont employés, et les outils de la théorie TRIZ permettent de résoudre rapidement les conflits dans la phase de Conceptual design (Cugini et al, 09, Cugini et al, 07).

Il est bien admis que la phase préliminaire d'analyse du problème à résoudre est cruciale. Il est intéressant d'utiliser la pluri culturalité d'un groupe pour affiner la définition et les causes du problème industriel. A cette fin, l'équipe de recherche « Systèmes énergétiques et conception » du TREFLE a élaboré une méthodologie et un outil logiciel de conduite d'études de créativité technique et d'innovation (MAL'IN, Méthodes d'Aide à L'Innovation (Nadeau et al, 04, MAL'IN 04). Cet outil est intégré au processus de conception présent dans les entreprises car il reprend tous les standards de l'analyse fonctionnelle qui est la tâche initiale des concepteurs. Il est supporté par un outil logiciel qui garantit la traçabilité et permet de structurer les séances de créativité. Son interfaçage avec l'analyse fonctionnelle permet une utilisation rapide et ne nécessite qu'une formation relativement légère. Ce logiciel est bâti autour d'un questionnaire permettant tour à tour, d'analyser, de formuler et de résoudre un problème industriel. Il utilise en partie des outils de la méthode TRIZ. Ainsi le questionnaire comporte 4 parties : analyse, formulation, résolution et hiérarchisation des solutions. Il est nécessairement redondant, les phrases utilisées sont telles que chaque participant peut retrouver sa propre sémantique. La redondance permet aussi de lutter contre les réticences d'information, voulues ou non. Ainsi, au bout de la phase d'analyse et de structuration, nous possédons une vision très complète du problème, vision qui intègre les différents points de vue des participants. Notre démarche est basée sur l'analyse des flux physiques présents dans le système. Pour identifier les paramètres pertinents du problème de conception nous proposons d'utiliser des décompositions organique, structurelle et temporelle. Ces décompositions conduisent à une description fine et précise de l'ensemble des phénomènes physiques influençant la conception du produit étudié. Les flux fonctionnels sont liés à l'évolution des flux énergétiques, de matière ou de signal. Pour les exprimer, il est nécessaire d'écrire les trois lois de conservation de l'énergie, de la matière et de la quantité de mouvement. La partie « formulation » propose, à partir des différents paramètres physiques pertinents, d'établir des contradictions techniques ou physiques. L'étude de l'évolution de ces paramètres au cours des situations de vie et des moments significatifs génèrent de manière méthodologique les différents biais d'attaque du problème.

La hiérarchisation et la résolution du problème est alors possible à l'aide du logiciel. Il permet de mettre en œuvre les différents outils de résolution et de hiérarchiser les biais d'attaque du problème.

Nous montrons l'application de l'analyse à l'évolution d'un gaufrier.

2 Présentation du gaufrier

Le gaufrier est un appareil électrique uni-fonction dont la fonction globale est « faire des gaufres ». Cet appareil se compose de deux unités de chauffe réunies par une articulation. Chaque unité de chauffe comprend une plaque de cuisson en aluminium couverte d'un revêtement anti-adhérent. Chaque plaque est chauffée par une résistance électrique de contact. Deux corps isolent les plaques de l'extérieur. Notre objectif est de faire évoluer la conception existante de ce gaufrier en déroulant la nouvelle démarche d'éco-innovation adaptée à l'outil MAL'IN.

Comme tout produit, un gaufrier est constitué par un ensemble de composants, de composants d'interaction et de milieux extérieurs.

- Les composants du gaufrier : résistance 1 et 2, plaque 1 et 2, corps 1 et 2, composants ouverture/fermeture (corps 1 et corps 2)
- Les composants d'interaction du gaufrier : protège de température 1 et 2, cordon, 4 supports pieds déformables, plaques de mica 1 et 2, sonde de température, fil électriques
- Les milieux extérieurs du gaufrier : source d'énergie, pâte à gaufre, utilisateur, air extérieur

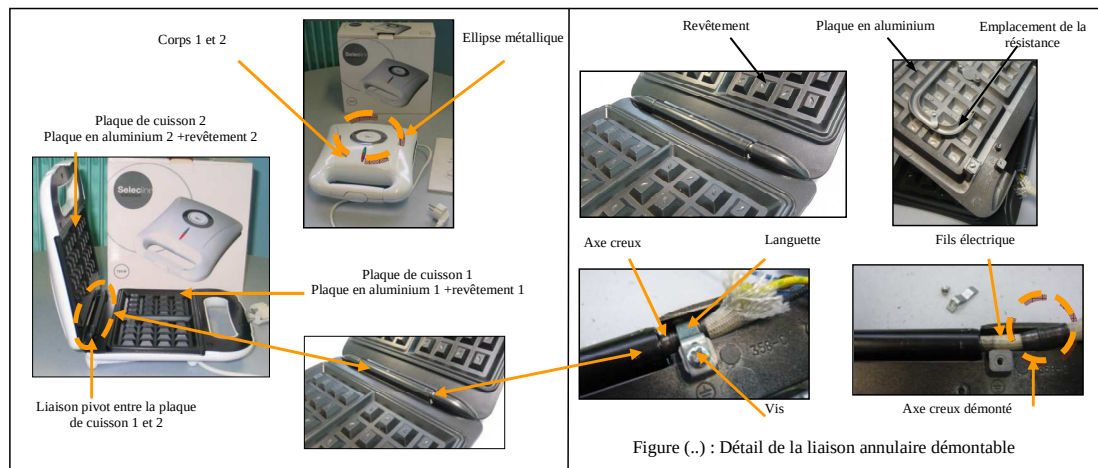


Figure 17 : Présentation de l'ensemble du gaufrier

3 Etat de l'existant concernant les méthodes d'analyse d'un problème

De nombreuses méthodes permettent de faire travailler un groupe ou des personnes individuellement afin de cerner un problème, de décrire un dysfonctionnement et d'en rechercher les causes, elles sont souvent basées sur un questionnaire.

La démarche **QQQOCP** est utilisable quel que soit la thématique concernée elle fait partie des méthodes utilisées en qualité (Lyonnet 97). Elle consiste à interroger le groupe afin de délimiter le problème :

- Qui ? qui est concerné,
- Quoi ? quel est le problème,
- Quand ? à quel moment,
- Où ? dans quel environnement, quel contexte,
- Comment ? quelles sont les circonstances,
- Pourquoi ? pour quelle raison.

Certains auteurs qualifient cette méthode de systématique car on pose toujours les mêmes questions. Elles ne sont pas assez directives et précises pour s'assurer de la rapidité et de la pertinence de l'analyse.

Les méthodes construites autour de la qualité peuvent aussi être utilisées. On peut citer en particulier l'analyse causes/effets de K. Ishikawa (Ishikawa 07). Elles consistent à rechercher les causes dans différents domaines selon les 5M ou pour certains les 7M : Matériel, Main d'œuvre, Milieu, Machines, Méthodes, Management et Moyens financiers. Chaque cause découverte est étudiée précisément et redéfinie en causes élémentaires. Le diagramme en arête de poisson est une représentation didactique intéressante.

Beaucoup de questionnaires systématiques plus précis existent comme le souligne (Eberle 90), dédiés ou non à des thématiques sous forme de « check list ».

Parmi les logiciels d'aide à l'innovation, Innovation WorkBench (IWB) de la société américaine Ideation propose un questionnaire (Innovation Situation Questionnaire) conduisant à une analyse intéressante. Cependant, il manque dans cette analyse, une partie fonctionnelle en adéquation avec les acquis industriels issus de la certification ISO 9000.

3.1 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle est apparue avec l'analyse de la valeur (NF X50-151) . Elle est maintenant intégrée dans les normes ISO 9001. Une fonction décrit l'action attendue ou réalisée par un système, un bloc fonctionnel ou un composant. Un bloc fonctionnel est une entité qui a sa fonction propre et qui peut être intégrée dans un système global. Une fonction est décrite par un verbe d'action et un complément. Il existe des bases de verbes et de compléments comme celles réalisées par Hirtz (Hirtz et al 02) ou par Sallaou (Pailhes et al, 10) et complétée par Ammar (Ammar 10). Des outils de description fonctionnelle ont été construits et seront décrits par la suite.

En conception préliminaire, l'approche fonctionnelle présente un intérêt majeur pour les concepteurs. Elle permet de déterminer des éléments structurants d'un processus de conception de produit (Scaravetti et al, 05) comme identifier un besoin, déterminer un Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF), définir une première architecture du produit et qualifier ensuite les flux fonctionnels liés à la réalisation des fonctions. Pour un produit existant, l'approche fonctionnelle présente également un intérêt considérable. Elle permet d'analyser et de structurer un problème donné par rapport à une situation de vie particulière, de formaliser le problème et de proposer des solutions d'évolution du produit.

Certains points de vue sont primordiaux en analyse fonctionnelle. En premier lieu, la notion de situation de vie. Le produit, tout au long de son cycle de vie, va rencontrer des milieux extérieurs environnants qui vont le contraindre et imposer des fonctionnalités particulières : les fonctions contraintes. Ces fonctions sont liées aux relations entre chaque milieu extérieur et le produit. Les fonctions de service, fonctions voulues par le futur utilisateur, relient deux milieux extérieurs environnants via le produit. L'ensemble des fonctions de service et des fonctions contraintes et, leurs critères d'appréciation constituent le CdCF. Le CdCF est le document de description fonctionnelle du produit en fonction des vœux du client utilisateur.

La réalisation de ces fonctions va se faire par l'intermédiaire de la réalisation d'autres fonctions en parallèle ou en séquentiel. On peut ainsi définir une architecture fonctionnelle du produit. De même on peut avoir une vision organique du produit en partant de l'architecture fonctionnelle et en déterminant les composants permettant la réalisation des fonctions. On a alors une vision organique du produit qui va inclure des composants, des composants d'interaction et des milieux extérieurs environnants. Les composants d'interaction relient les composants et permettent le passage des flux fonctionnels.

3.2 Mise en place du questionnaire MAL'IN

Le questionnaire reprend les méthodes existantes et l'analyse fonctionnelle afin que l'on puisse récupérer toute la connaissance des participants au groupe pluriculturel de créativité et ainsi tendre vers une vision exhaustive des causes identifiées d'un problème. De surcroît, pour être en phase avec les habitudes industrielles et pour récupérer les travaux déjà réalisés, la

sémantique et les outils de l'analyse fonctionnelle sont intégrés. Ce questionnaire (partie 1 : analyse et structuration) est structuré de la façon suivante (figure 18) :

<u>A1-Expression du problème industriel</u>
<u>B1-Description de l'entité étudiée</u>
<u>C1-Analyse fonctionnelle de l'entité étudiée</u>
<u>D1- Cause et formulation du problème</u>
<u>E1-Etat d'avancement de la résolution du problème</u>
<u>F1-Contraintes de résolution du problème</u>

Figure 18 : Etapes de la partie analyse et structuration de la méthode MAL'IN

La redondance du questionnaire et la manière de poser les questions vont permettre une analyse correcte. La redondance intervient par exemple en demandant d'exprimer le problème de plusieurs manières différentes (figure 19) :

- intuitivement au début du questionnaire (phase A1-1),
- par une phrase d'action en utilisant la notion classique de fonction soit un verbe plus un complément (phase A1-2),
- sous la forme d'une relation cause/effet (que l'on retrouve dans la phase D1 du questionnaire).

Les questions sont posées à différents stades du déroulement du questionnaire. Leur expression est volontairement dépouillée et compréhensible par quiconque, même si elle concerne des éléments scientifiques ou technologiques.

<u>A1-Expression du problème industriel</u>
1/ Exprimez synthétiquement la situation initiale du problème industriel à résoudre.
2/ Exprimez sous la forme d'un verbe + complément ce que l'on souhaite réaliser.
<u>B1-Description de l'entité étudiée</u>
1/ Nommez l'entité pour laquelle il y a un problème.
2/ Exprimez la fonction globale de cette entité.
3/ Décrivez son fonctionnement.

Figure 19 : Questionnaire MAL'IN partie A1 et B1

Maintenant que nous avons à notre disposition l'analyse du problème réalisée par le groupe et/ou les experts industriels, il s'agit de situer le problème dans le temps, c'est-à-dire d'exprimer quand il se produit, soit, si on reprend les termes de l'analyse fonctionnelle, dans quelle situation de vie (Bretesche 00) se produit l'évènement. Cette phase est cruciale car elle conditionne l'étendue du travail à réaliser.

Cette notion correspond à ce que l'on dénomme le temps opératoire dans la théorie TRIZ (Savransky 00). Notons ici que l'on peut rencontrer un dysfonctionnement dans une situation de vie lié à une action dans une autre situation (figure 20). Le questionnaire et le travail du groupe doit conduire à cette analyse.

<u>C1-Analyse fonctionnelle de l'entité étudiée</u>
1/ Dans quelle situation de vie le problème se pose-t-il ? Pour quelle(s) fonction(s) de service (fonction principale) ou fonction(s) contrainte ?

Figure 20 : Questionnaire MAL'IN partie C1

La notion de situation de vie a un défaut, elle décrit une phase statique, la dynamique est ensuite le fruit de l'expression des fonctions. Cela ne suffit pas car, le plus souvent, le problème est le fruit de successions d'événements élémentaires.

A l'instar de l'analyse sensorielle, ces événements sont appelés : moments significatifs (Doré et al, 05). Le GRAFCET est un outil facile d'utilisation pour représenter la séquentialité de ces moments (figure 21). Il permet à la fois d'exprimer la succession des moments et de définir les paramètres qui conditionnent les passages de l'un à l'autre. Ces paramètres de commande devront se retrouver dans l'écriture des lois physiques que nous prônerons ci-après.

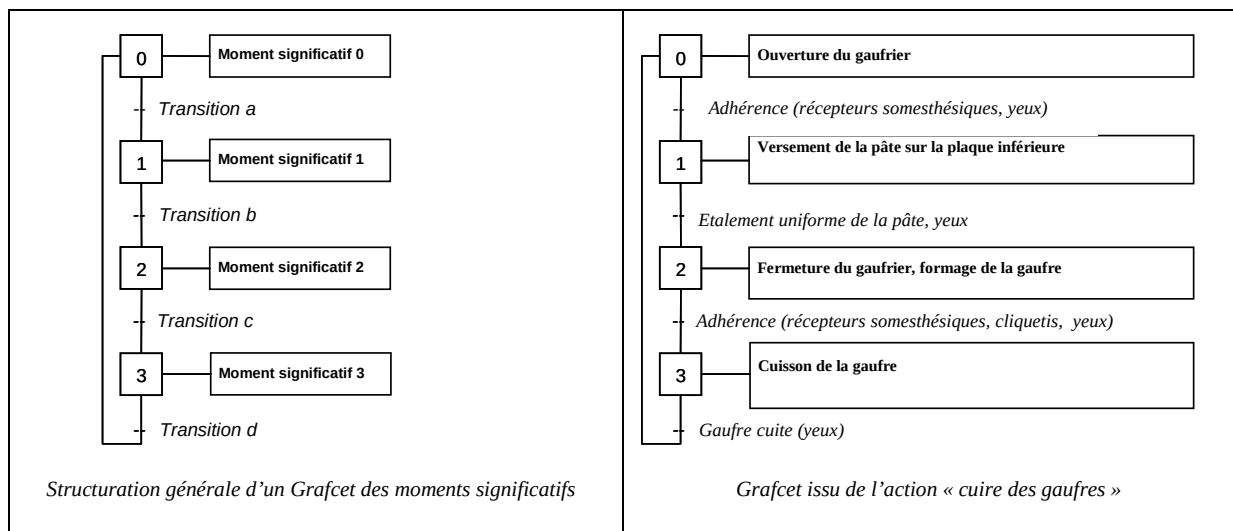


Figure 21 : GRAFCET des moments significatifs : a) structuration générale, b) grafcet issu de l'action « cuire des gaufres »

La succession des moments significatifs pour notre exemple sont : ouverture du gaufrier, versement de la pâte sur la plaque inférieure, fermeture du gaufrier et formage de la gaufre, cuisson de la gaufre puis à nouveau ouverture du gaufrier afin de sortir la gaufre cuite. Les sensations qu'éprouve l'utilisateur d'un produit font appel aux cinq sens et à la somesthésie (Doré et al, 05). La somesthésie est associée au retour d'effort et correspond à la sensibilité aux diverses excitations subies par le corps, à l'exception de celles provenant des organes sensoriels. Elle comprend les sensations extéroceptives (tact, pression, chaud, froid), les sensations proprioceptives (musculaires et tendineuses) et les sensations douloureuses.

Ces sensations sont liées en partie au contrôle que l'utilisateur peut effectuer sur l'accomplissement de la fonction désirée. A chaque étape, le contrôle et la transition sont assurés par l'utilisateur qui récupère des sensations somesthésiques, visuelles et auditives. Les sensations somesthésiques sont directement liées au transfert d'effort donc à la saisie du carter pour ouvrir ou fermer. Le contrôle du remplissage et de la cuisson est assuré par la vue.

3.3 Vision fonctionnelle du problème

Pour pouvoir identifier les paramètres pertinents du problème de conception, présents dans les lois physiques, nous proposons d'utiliser des décompositions organique et structurelle. Ces décompositions assurent une description fine et précise de l'ensemble des phénomènes physiques influençant la conception du produit étudié. Cette analyse va permettre d'analyser et de structurer la connaissance pour comprendre comment s'effectue la cuisson de la gaufre et la protection de l'utilisateur lorsqu'il manipule le gaufrier chaud. A cette fin, on va analyser la fonction « cuire la gaufre ».

3.3.1 Approche organique

L'approche organique a pour but de définir une hiérarchie, soit dans les fonctions, soit dans les composants.

Cette première analyse permet ensuite, à partir de l'expression de la fonction, de structurer le problème vers une vision fonctionnelle. Cette façon de faire va permettre, d'une part, de situer le dysfonctionnement dans un niveau hiérarchique systémique et, d'autre part, de lier la fonction incriminée à un flux fonctionnel.

L'analyse FAST (Tassinari 03) est utilisée pour décrire la réalisation des fonctions de premier niveau. Elle conduit à une succession de fonctions hiérarchisées (selon une syntaxe bien précise) depuis des Fonctions internes indispensables au concept analysé dites Techniques (FT) jusqu'à des Fonctions de base dites Elémentaires (FE) (Cavaillès 91).

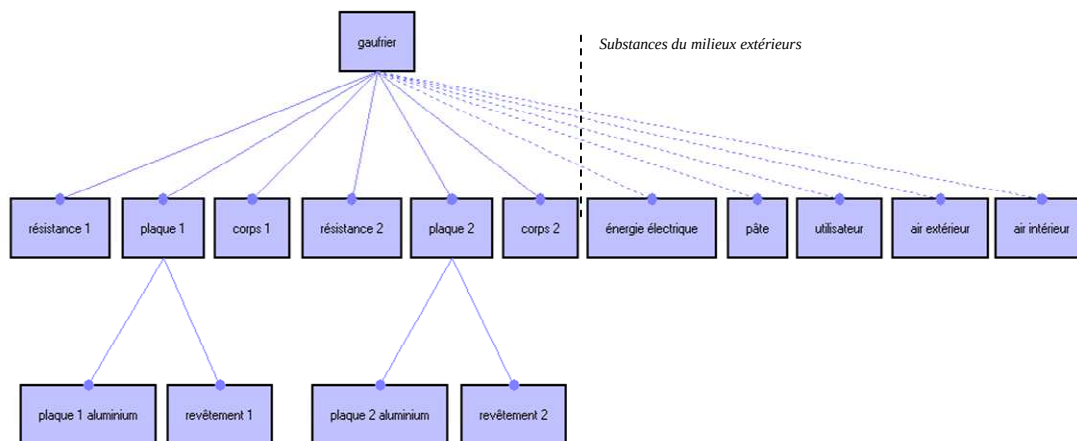


Figure 22 : Organigramme technique étendu aux milieux extérieurs (copie d'écran MAL'IN)

La position hiérarchique de la fonction se voit sur l'architecture fonctionnelle du produit mais cet outil ne nous est d'aucun secours car il ne permet pas de définir la globalité de la zone d'étude autour des composants incriminés, cette notion correspond à la zone opératoire (TRIZ (Savransky 00)). Il est judicieux, dans ce cas, d'utiliser l'organigramme technique (figure 22) qui permet non seulement de positionner les éléments dans un niveau hiérarchique mais aussi on le verra plus loin de définir le niveau d'analyse du problème (Scaravetti et al, 05).

Les fonctions à réétudier peuvent être des fonctions de service ou des fonctions contraintes, il est alors indispensable d'étendre l'organigramme technique aux milieux extérieurs. Les milieux extérieurs au gaufrier, dans la situation de vie « réalisation d'une gaufre » sont la pâte, l'utilisateur, l'énergie électrique, l'air extérieur au gaufrier et l'air intérieur qui est compris entre les plaques et les corps.

L'analyse organique situe les éléments en conflit dans un niveau hiérarchique, en remontant les niveaux systémiques, il est alors facile de trouver le bloc fonctionnel commun aux composants incriminés. Ce niveau constitue le niveau d'analyse du problème présenté en figure 23.

C1-Analyse fonctionnelle de l'entité étudiée

2/ Peut-on séparer l'entité en blocs fonctionnels ?

3/ Construisez l'organigramme technique et déterminez les milieux extérieurs.

4/ A quel niveau systémique se pose le problème ?

Figure 23 : Questionnaire MAL'IN partie C1bis

3.3.2 Approche structurale

Le bloc-diagramme fonctionnel décrit le fonctionnement d'un bloc fonctionnel et ses liaisons à son environnement, le bloc fonctionnel correspond au niveau systémique mis en cause dans le moment significatif pertinent. A cette fin, un graphe constitué des composants et des liens représentant les surfaces de contact est réalisé (figure 24). Les flux fonctionnels associés aux fonctions de service et aux fonctions contraintes sont alors superposés aux liens de contact (Doré et al, 05). Ces flux fonctionnels sont initiés par des entités extérieures au bloc fonctionnel étudié, ces entités sont des milieux extérieurs et/ou certains blocs fonctionnels de même niveau (on peut ne préciser que leurs éléments limitrophes, on est alors au niveau juste inférieur). Ils aboutissent aussi aux entités extérieures concernées par le flux étudié.

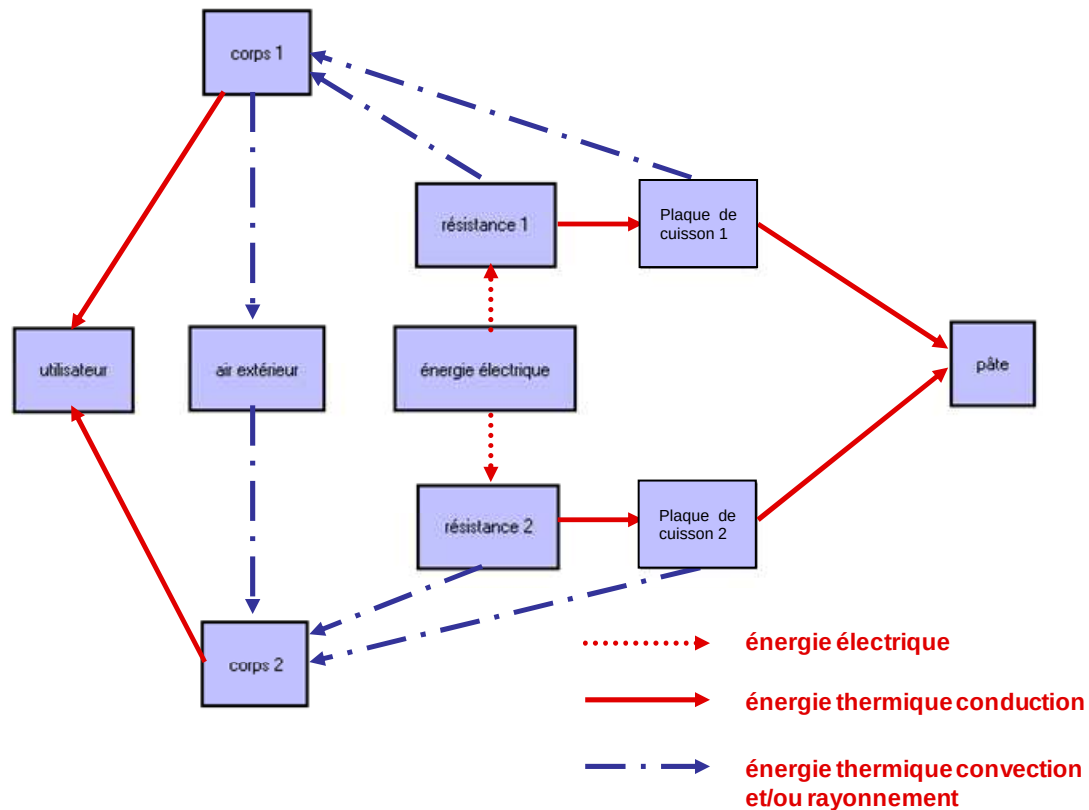


Figure 24 : Bloc diagramme fonctionnel (copie écran MAL'IN)

La construction de ce diagramme va aboutir à la définition des flux fonctionnels incriminés dans le problème à résoudre. Il s'agit maintenant de pouvoir exprimer les paramètres pertinents non seulement de l'évolution de ces flux mais aussi des effets induits utiles ou nuisibles dans ce cas.

3.3.3 Approche physique

Les flux fonctionnels sont liés à l'évolution des flux énergétiques, de matière ou de signal. Pour pouvoir les exprimer, il est nécessaire d'écrire les trois lois de conservation de l'énergie, de la matière et de la quantité de mouvement. Lorsque les lois sont écrites, une étude de sensibilité doit être menée pour discerner les paramètres ou variables concernés que nous appelons paramètres pertinents du problème.

Afin d'écrire proprement ces lois, il est indispensable d'énumérer les effets induits par les flux fonctionnels au travers de l'évolution des variables d'état concernées (Nadeau et al, 06). Par exemple, le flux fonctionnel d'énergie thermique, effet utile, produit un chauffage du corps donc une variation de sa température et une sensation de chaleur ou une brûlure pour l'utilisateur lors du contact entre le corps et la main de l'utilisateur (tableau 16).

Paramètres	Effet produit	Caractérisation	Nom de la loi
Température	Flux de chaleur conductif	Solides en contact	Fourier
	Flux de chaleur convectif	Interface solide/fluide	Newton
	Flux de chaleur rayonnant	Solides en regard, milieu intermédiaire transparent	Stéphan-Boltzmann
	Flux d'électrons	Soudure/Solides conducteur	Seebeck
Pression	Débit de fluide	Dans un fluide	
	Migration de fluide dans le solide : Fluide continu Capillarité	Dans un solide dit capillaroporeux	Darcy
Pression partielle ou Concentration	Diffusion d'un composant dans l'autre (et inversement)	Dans un mélange de fluides	Fick
Potentiel Electrique	Flux d'électrons	Dans les fluides ou solides conducteurs	Ohm
	Champ magnétique	Dans les fluides ou solides	Biot Savart
Champ magnétique	Flux d'électrons	Dans les fluide ou solides conducteurs	Faraday
Potentiel chimique	Flux de matière (électrolyse)	Entre solides, milieu conducteur	

Tableau 16 : Exemples d'effets produits par des gradients de variables d'état

Les effets produits vont générer des effets induits. Pour aider l'analyse à ce stade nous avons mis au point des tables qui servent d'aide à la réflexion du groupe. Ces tables succinctes (pour que le groupe ne perde pas le fil de la réflexion globale) sont une aide à la formulation des modèles (tableau 17).

Variables d'état	Variables temporelles	Effets produits	Effets induits
Force (F)	Vitesse (V)	Déformation	Jeu/Bridge/Contraintes/Vibrations
		Frottements	Usure/Transferts de chaleur /Dilatation/Rétraction /Bridge/Contraintes /Fluage
Pression (P)	Débit volumique (q_v)	Déformation	Fuites/Contraintes
		Frottements	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridge/Contraintes Pollution/Encrassement
Température T	Débit de capacité ($q.C_p$)	Flux de chaleur	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridge /Contraintes /Fluage/Givrage/Prise en glace
		Frottements	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridge/Contraintes Pollution/Encrassement

Tableau 17 : Exemples d'effets produits et effets induits

3.4 Loi d'intégralité des parties

La loi d'intégralité des parties permet d'affiner la vision fonctionnelle et les composants en jeu dans la réalisation de l'action (Nadeau et al, 05). A cette fin, une énergie doit être fournie, transmise et utilisée. La loi d'intégralité des parties identifie une entité (convertisseur) qui

convertit de l'énergie (souvent appelée motrice), une entité qui la transmet (transmetteur), une entité qui l'utilise pour réaliser l'action (opérateur ou effecteur) et une entité de contrôle (figure 25). Il est quelquefois difficile d'exprimer cette loi, nous recommandons d'identifier des moments significatifs, de suivre le flux fonctionnel lié à la réalisation de l'action (Pailhes et al, 05) et de s'aider de la réalisation d'un bloc diagramme fonctionnel. Les moments significatifs permettent d'identifier les composants convertisseur, transmetteur et opérateur, ceux qui font intervenir des effets utiles.

L'énergie initiale est l'énergie électrique et le convertisseur est la résistance. Le transmetteur est la plaque. L'opérateur est l'interface entre la plaque et la pâte. Le contrôle semble être réalisé par l'utilisateur lorsqu'il regarde les voyants, en réalité, le contrôle est assuré par le contrôle de la température de la plaque et par une temporisation.

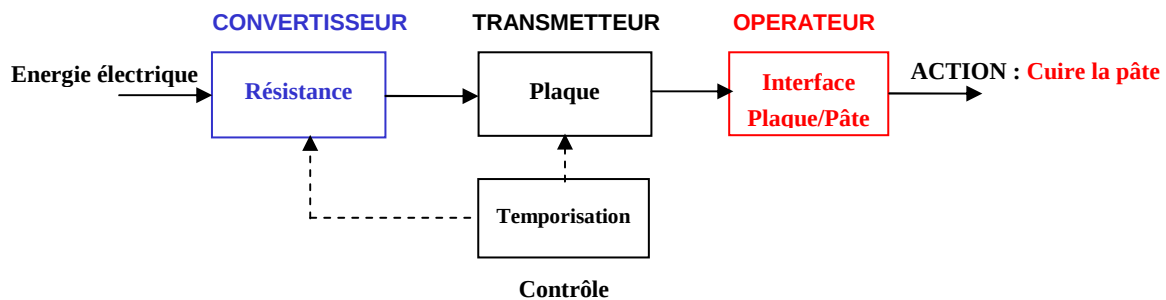


Figure 25 : Loi d'intégralité des parties

3.5 Phénomènes physiques

Les phénomènes physiques permettent de trouver les paramètres pertinents du problème posé. Ce sont les paramètres qui interviennent dans les modèles physiques. En étudiant les trajets des différents flux fonctionnels d'un système, il est possible d'identifier suivant la nature de ces flux les phénomènes physiques associés. On peut mettre en évidence facilement des phénomènes physiques par des gradients de variables d'état (tableau 18) ou par des variations temporelles des variables d'état (régime transitoire).

On peut différencier le comportement des composants, et le comportement au niveau des interactions entre composants qui font apparaître de nouveaux phénomènes physiques. Le tableau 18 illustre des phénomènes physiques pertinents de contact solide/solide, des tableaux similaires pour d'autres types d'interface (par exemple solide/liquide) ont été également réalisés.

Le logiciel permet aussi d'analyser les actions à distance qu'elles soient liées aux mouvements des solides ou des fluides (inertie) ou qu'elles soient dues à des champs immatériels ou à des composants voisins (attractions, sons, ultrasons, optique, électriques, rayonnements, magnétiques,...).

Dans le cadre de notre exemple, nous suivons simplement le flux fonctionnel depuis le convertisseur jusqu'à l'opérateur. Les phénomènes physiques mis en jeu et les paramètres pertinents associés sont récapitulés dans le tableau 18. La loi d'intégralité des parties a permis de réduire les composants à étudier. Dans notre cas, nous isolons la résistance (convertisseur) et la plaque (transmetteur). L'opérateur étant l'interface plaque/pâte intervient dans l'analyse de la plaque.

<u>1) Phénomènes physiques concernant la résistance (convertisseur)</u> Flux fonctionnel - Flux créé par le passage du courant dans la résistance : UI Flux transmis à la plaque par la résistance - Transfert par conduction, résistance au transfert au niveau du contact Pertes vers le corps - Transfert par rayonnement Pertes vers l'air intérieur - Transfert par convection naturelle	<u>Paramètres pertinents</u> U, I Surface de contact $A_{R/P}$ Résistance au transfert, $R_{R/P}$ Etats de surface, forme Facteur de forme Rés/Corps $F_{R/C}$ Emissivités, formes, surfaces $A_{R/C}$ Surface résistance en contact avec l'air $A_{R/AI}$
<u>2) Phénomènes physiques concernant la plaque (transmetteur)</u> Flux fonctionnel : flux transmis à la plaque par la résistance - Transfert par conduction, résistance au transfert au niveau du contact Flux transmis à la pâte (gaufre) par la plaque - Transfert par conduction, résistance au transfert au niveau du contact Chauffe hétérogène de la plaque - Diffusion de la chaleur dans la plaque : comportement de type ailette Pertes vers le corps - Transfert par rayonnement Pertes vers l'air intérieur - Transfert par convection naturelle	Surface de contact $A_{R/P}$ Résistance au transfert, $R_{R/P}$ Etats de surface, forme Surface de contact $A_{P/G}$ Résistance au transfert, $R_{P/G}$ Etats de surface, forme Forme, épaisseur, conductivité Facteur de forme Plaque/Corps FP/C Emissivités, formes, surfaces AP/C Surface plaque en contact avec l'air $A_{P/AI}$

Tableau 18 : Phénomènes physiques concernant le convertisseur et le transmetteur

Des fiches succinctes en aide dans le logiciel donnent les modèles et les variables pertinentes dans des cas de comportements non classiques (par exemple fluides thixotropes ou rhéofluidifiants, fluides rhéopectiques ou rhéoépaississants, fluides à l'état supercritique,...). Ces fiches sont complétées, pour la résolution des problèmes, par des schémas explicatifs, par des utilisations industrielles et par 3 à 4 sites de laboratoires de recherche reconnus pour leur compétence dans le domaine.

A la fin de cette phase d'analyse des phénomènes physiques concernés, le groupe possède une très bonne vision du problème et des paramètres pertinents du dysfonctionnement. Les travaux d'analyse doivent être ensuite qualifiés par le groupe et par les experts industriels du domaine (figure 26).

<u>D1- Cause et formulation du problème</u> 1/ Est-ce possible d'exprimer le problème sous forme d'une relation cause à effet ? Si oui, l'exprimer suivant la manière suivante : ▪ l'élément A agit sur l'élément B. 2/ Exprimez quel(s) phénomène(s) physique(s) est (sont) à l'origine du problème. (listez les paramètres pertinents pour chaque phénomène). 3/ Ce dysfonctionnement est-il validé par un expert ? Sinon remettre en cause la formulation ci-dessus (cf. D1 question 1/).
--

Figure 26 : Questionnaire MAL'IN partie D1

3.6 Couplage des paramètres pertinents

La loi d'intégralité des parties permet de réduire le nombre de composants à observer. L'écriture des lois de conservation concernant le convertisseur, le transmetteur et l'opérateur

vont permettre de définir l'implication de ces paramètres dans le fonctionnement du produit inhérent à chaque situation de vie. Nous allons alors disposer d'équations de liaisons entre paramètres qui vont permettre ensuite de soulever des contradictions.

Le tableau 3 permet d'écrire l'équilibre énergétique de la résistance et de la plaque

$$UI = R_{R/P} A_{R/P} + F_{R/C} A_{R/C} (T_R^4 - T_C^4) + h_{R/AI} A_{R/AI} (T_R - T_{AI}) \quad (1)$$

$$R_{R/P} A_{R/P} = R_{P/G} A_{P/G} + F_{P/C} A_{P/C} (T_P^4 - T_C^4) + h_{P/AI} A_{P/AI} (T_P - T_{AI}) \quad (2)$$

Avec T_R la température de la résistance, T_C température du corps, T_{AI} , température de l'air intérieur et T_P , température de la plaque.

4 Etat initial de la connaissance autour de la résolution du problème

Le questionnaire s'achève ensuite par une revue de l'état de la connaissance autour de la résolution du problème. Successivement des questions sont posées sur les solutions interdites, sur les idées évidentes et les raisons pour lesquelles elles ne sont pas utilisées, sur la connaissance des solutions des concurrents ou dans des secteurs industriels ayant des problèmes équivalents. Puis on termine sur les contraintes de résolution imposées par l'industriel (économique, sociétales et technologiques) (figure 27).

<u>E1-Etat d'avancement de la résolution du problème</u> 1/ Si vous avez des idées pour résoudre le problème, inventoriez les. Pourquoi ne sont-elles pas utilisées ou ne peuvent-elles être utilisées ? 2/ Vos concurrents ont-ils ce problème ? 3/ Connaissez-vous des situations similaires dans d'autres secteurs d'activités? Quelles solutions sont employées ? 4/ Quelles solutions sont interdites ? Pourquoi ? <u>F1-Contraintes de résolution du problème</u> 1/ Quels sont les blocs fonctionnels ou composants à conserver (cf. C1) et pourquoi ? 2/ Quels sont les critères technologiques et critères économiques d'évaluation et de hiérarchisation des solutions ?
--

Figure 27 : Questionnaire MAL'IN partie E1 et F1

5 Biais d'attaque du problème

5.1 Analyse par les paramètres pertinents

Cette méthode consiste à analyser les valeurs désirées pour chaque paramètre dans le moment significatif « cuisson de la pâte » de la situation de vie « fabrication de la gaufre » et regarder les valeurs requises dans d'autres situations de vie ou pour éliminer un effet produit.

Par exemple dans notre cas, on veut bien cuire la pâte en limitant les pertes pour améliorer l'efficacité du gaufrier et surtout éviter de chauffer le corps et de fournir des sensations de chaud à l'utilisateur.

L'analyse des équations 1 et 2 montre qu'un des paramètres pertinents est la surface de chauffe de la plaque qui doit être grande pour assurer la meilleure cuisson (terme $R_{P/G} A_{P/G}$ de l'équation 2). Mais la forme de la plaque est quasi identique côté air intérieur et corps pour assurer une bonne diffusion de la chaleur (faible épaisseur) ce qui donne des surfaces de

transfert équivalentes ($A_{P/G} \approx A_{P/C} \approx A_{P/AI}$) et qui occasionne des pertes par rayonnement et convection importantes. La diminution de ces pertes impose une faible surface de plaque (termes $F_{P/C} A_{P/C} (T_P^4 - T_C^4) + h_{P/AI} A_{P/AI} (T_P - T_{AI})$ de l'équation 2).

On doit donc avoir une surface de plaque grande pour cuire la gaufre et petite pour limiter les pertes. Nous avons exprimé là une contradiction physique que nous allons résoudre dans la partie résolution de problème.

5.2 Analyse par le graphe substances/champs

L'analyse faite permet de définir le graphe fonctionnel dit « graphe substance/champ ». La construction du graphe substances/champs se nourrit du bloc diagramme fonctionnel s'il existe (par exemple ici figure 28), des moments significatifs, de la loi d'intégralité des parties. Puis, par une vision systématique, on va installer les différents effets produits et induits qui permettront de décrire les dysfonctionnements à pallier. Les substances sont les éléments du niveau 1 de l'organigramme technique étendu. Les champs sont définis par des verbes et sont issus des flux fonctionnels et des effets produits et induits. La figure 28 présente le graphe substances/champs selon notre syntaxe MAL'IN et produit par le logiciel. On procède à l'analyse systématique du graphe selon une procédure définie dans le logiciel.

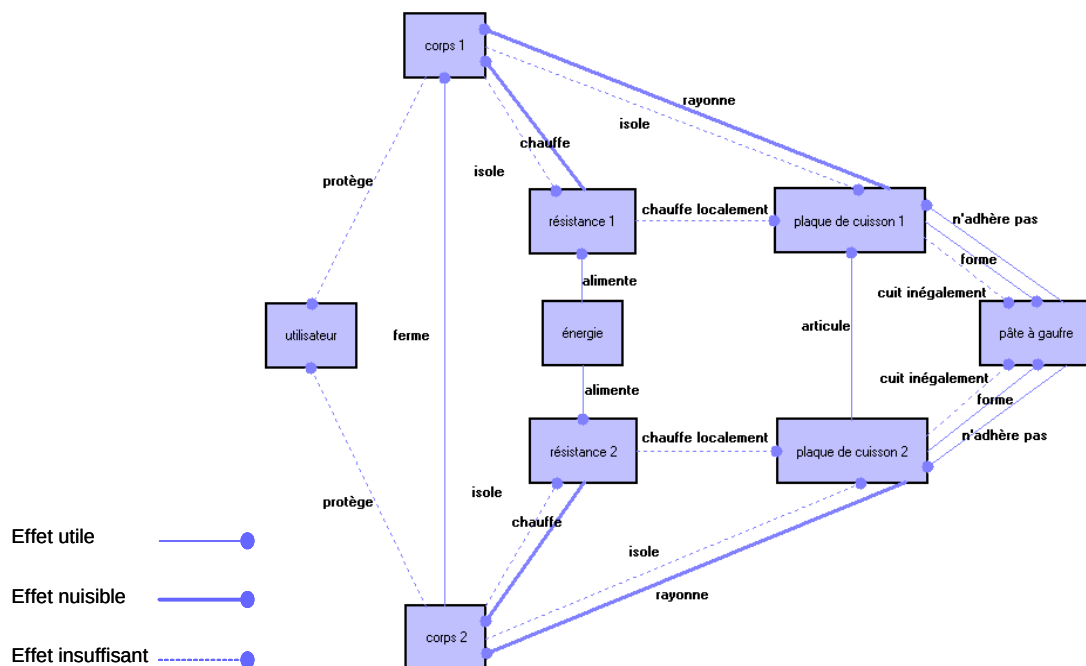


Figure 28 : Graphe substances/champs (copie écran MAL'IN)

6 Résolution

6.1 Ressources

Les ressources concernent tout ce que l'on peut utiliser dans le produit, les produits accessoires et les milieux extérieurs environnants. Une liste en 12 points a été réalisée à partir des travaux de (Savransky 00) qui est donnée en annexe 6.

Les ressources sont à lister dans chaque situation de vie. Elles constituent un gisement à la disposition du concepteur. Leur utilisation peut être instantanée ou décalée (notion de stockage ou d'accumulation).

6.2 Outils de résolution

6.2.1 Contradiction physique

Une contradiction physique est l'opposition de deux requêtes formulées par le système. Une substance ou un champ doivent présenter des caractéristiques opposées. Ces caractéristiques opposées sont perceptibles facilement lors de l'analyse physique.

Dans ce cas, la résolution consiste à séparer les exigences contradictoires selon la matrice des séparations MAL'IN (annexe 1).

6.2.2 Contradiction technique

Une contradiction technique est une situation dans laquelle l'amélioration d'un paramètre de conception en dégrade un autre.

Dans ce cas, la résolution consiste à reporter sur la matrice des contradictions de TRIZ en abscisse, le paramètre de conception à améliorer et, en ordonnée, le paramètre à ne pas dégrader. A l'intersection ligne/colonne, on accède aux principes d'innovation les plus employés pour résoudre le problème.

6.2.3 Association insatisfaisante

Nous cherchons dans ce cas à améliorer l'association entre substances et champs en suivant les solutions standards proposées dans la théorie TRIZ. La complexité des phrases a été réduite pour les rendre plus accessibles. MAL'IN propose un logigramme pour le choix de solutions standards (Savransky 00), qui permet d'aller rapidement vers des classes ou sous classes de solutions standards en répondant aux questions posées.

6.2.4 Simplification, élimination de substances

Le but est d'éliminer une substance dont la fonction est redondante ou qui concentre trop d'effets nuisibles tout en assurant ses autres fonctions utiles par d'autres substances.

L'élimination de substances rend l'association incomplète donc insatisfaisante. On cherche alors à la reconstruire en faisant réaliser les actions utiles par d'autres composants ou substances, par la substance source ou réceptrice elle-même, par des ressources existantes ou par l'environnement (milieux extérieurs, super système).

Un nouveau graphe est alors réalisé et peut conduire aux 3 méthodes de résolution. Le logigramme peut être utilisé directement.

6.2.5 Résolution du problème par le groupe de créativité

Le groupe va faire un brainstorming organisé à partir des principes d'innovation ou des solutions standards sélectionnés. On rappelle que ces principes et ces solutions sont ceux de la théorie TRIZ.

6.2.6 Résolution de la contradiction physique trouvée dans le cadre du gaufrier

Nous avons amélioré l'outil de résolution d'une contradiction physique en exprimant une matrice de séparation des exigences contradictoires (annexe 1).

Pour résoudre la contradiction physique, nous allons séparer les exigences contradictoires dans l'espace, car la surface doit être petite et grande dans la même situation de vie. Nous

trouvons, à partir de la matrice MAL'IN, trois choix possibles qui sélectionnent des principes d'innovation.

Principes d'innovation

- Agir sur une substance 1, 2, 3.
- Agir sur la géométrie 4, 7, 17.
- Agir sur un champ 24, 26, 30.

Le deuxième choix, agir sur la géométrie, correspond à notre contradiction qui propose d'agir sur les surfaces et aussi de manière intrinsèque sur le facteur de forme (qui dépend des surfaces).

Si nous interprétons le principe 4 (l'asymétrie), nous trouvons les sous principes et les solutions associées :

- a) Remplacer une forme symétrique par une forme asymétrique.
- b) Si l'entité est déjà asymétrique, accroître son asymétrie.

⇒ Utiliser des formes asymétriques pour diminuer le facteur de forme et limiter le rayonnement entre la plaque et le corps

Si nous interprétons le principe 7 (les poupées gigognes), nous trouvons les sous principes et les solutions associées :

- a) Placer les entités les unes dans les autres.
- b) Faire passer une entité au travers d'une autre par ses cavités ou porosités

⇒ Une solution découle immédiatement combler les cavités de la plaque par des isolants.

Si nous interprétons le principe 17 (le changement de dimension), nous trouvons les sous principes et les solutions associées :

- a) Passer d'un déplacement rectiligne (1D) à un mouvement plan (2D) ou dans l'espace (3D).
- b) Décomposer l'entité en différentes entités à différents niveaux (monocouche vers multicouche).
- c) Changer l'orientation de l'entité (horizontale, verticale, inclinée, mise sur le côté). Utiliser la face opposée.
- d) Utiliser des flux optiques (optiques ou autres) dirigés sur une surface voisine ou sur la face opposée de la surface donnée.

⇒ Le sous principe b nous amène par exemple à décomposer la plaque en rajoutant une peinture qui limitera son émissivité, une couche qui fera isolant, une feuille de mica.

⇒ Les sous principes c et d conduisent à des concepts de solutions modifiant la forme du corps et de la plaque minorant le facteur de forme.

7 MAL'IN, TRIZ et l'éco-innovation

Certaines idées de solution émises ne sont acceptables en termes de développement durable. Par exemple, intégrer des isolants dans les cavités de la plaque conduit à l'élaboration d'un poly-matériaux difficilement recyclable. Cela vient du fait que l'analyse, la structuration, la formulation du problème ne sont pas orientés vers une recherche d'idées éco-innovantes.

Si nous voulons une réelle méthode d'éco-innovation, il faut mettre en place une phase d'analyse du produit en termes d'impacts sur son environnement. Cette phase doit permettre un interfaçage direct avec la méthode MAL'IN. Conduire une ACV est longue et rédhibitoire dans le cadre de l'innovation à cause de la vision exhaustive des phénomènes à traiter. Ainsi, le point crucial dans la réussite d'une séance d'innovation est de mettre à disposition du groupe de créativité une quantité suffisante d'outils et d'informations afin d'être suffisamment performant et de limiter autant que possible la durée nécessaire à la phase d'analyse. C'est pour cette raison que nous préconisons une approche d'analyse sélective (Ademe 02), permettant à partir d'une analyse ciblée et structurée de remédier à un ensemble de problèmes environnementaux particuliers et ainsi prolonger les temps de résolution du problème.

En partant de ces constats, plusieurs objectifs sont retenus :

- définir une vision parcimonieuse de la vision environnementale et de l'ensemble produit en phase préliminaire de conception.
- développer une base de connaissances environnementales, exploitables en phase préliminaires de conception et adaptables à la méthode existante MAL'IN.
- guider le concepteur dans sa démarche et orienter sa réflexion d'analyse vers l'éco-innovation

La finalité du travail consiste à définir un ensemble d'actions permettant l'innovation du produit en intégrant l'environnement tout en garantissant son fonctionnement et ses performances.

8 Conclusion

Nous proposons, une démarche performante (MAL'IN, Méthodes d'Aide à L'Innovation) pour structurer l'analyse de problème industriel de recherche de solution qui s'appuie sur un outil logiciel (figure 29).

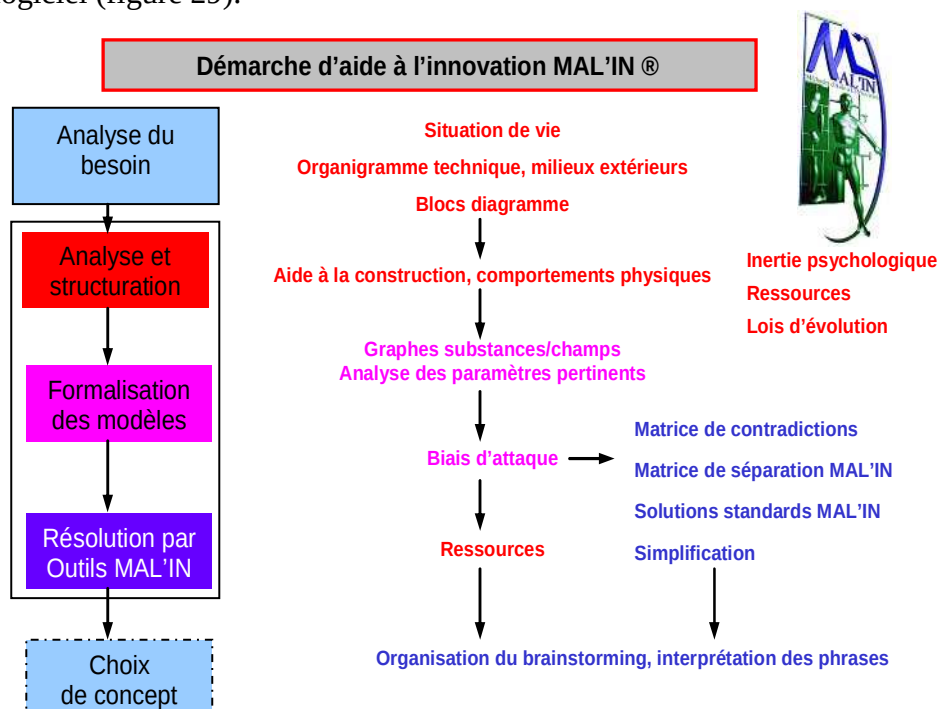


Figure 29 : Synoptique de la méthode MAL'IN

Elle permet la structuration et la gestion d'une séance de créativité. Le logiciel est bâti autour d'un questionnaire permettant tour à tour, d'analyser, de formuler et de résoudre un problème industriel. Le questionnaire comporte 4 parties : analyse, formulation, résolution et hiérarchisation des solutions. Nous avons montré dans ce chapitre comment utiliser cet outil.

La partie « analyse du problème » du questionnaire permet de récolter et de structurer les informations disponibles dans le groupe de créativité. Une vision fonctionnelle du problème du gaufrier est définie et structurée en adéquation avec les acquis industriels. Les paramètres pertinents du problème de conception sont identifiés en utilisant des décompositions organique, structurelle et temporelle et sont aussi exprimés par les trois lois de conservation de l'énergie, de la matière et de la quantité de mouvement. Dans la partie « formulation » nous avons montré, à partir des différents paramètres physiques pertinents, comment définir des contradictions techniques ou physiques qui conduisent aux outils de résolution du problème. Le logiciel est conçu pour guider et structurer la démarche du groupe lors de séances de créativité. Il offre une traçabilité qui permet à chacun des intervenants de disposer à la fin de la séance, d'une version informatique du travail réalisé. Cette méthode doit évoluer pour devenir une réelle méthode d'éco-innovation, c'est l'enjeu de cette thèse.

CHAPITRE III : FONDEMENTS D'UNE DEMARCHE D'ECO-INNOVATION

La démarche d'éco-innovation consiste à faire évoluer un produit existant en intégrant, en plus des contraintes fonctionnelles et techniques, des contraintes environnementales. Cette démarche d'innovation doit permettre de réduire de manière significative l'impact global du produit sur l'environnement.

Une démarche de créativité technique s'appuie sur des méthodes et outils d'analyse, de structuration et de formalisation d'un problème de conception et permet à un groupe de créativité de générer des idées de solutions et de concepts innovants. Ces méthodes et outils de créativité s'inscrivent dans les phases préliminaires de conception. Intégrer des contraintes environnementales à ces outils n'est pas une chose évidente, étant donné que le produit est en cours d'évolution et que les nouveaux paramètres de conception ne sont pas déterminés à ce stade du processus de conception. La deuxième difficulté concerne les temps consacrés à l'analyse et à la structuration d'un problème de conception dans une séance de créativité, qui restent relativement courts par rapport à la phase de résolution et de recherche de concept. La pluridisciplinarité d'un groupe de créativité implique aussi une approche particulière au niveau de la représentation et l'utilisation des outils de créativité afin d'assurer une communication constructive d'analyse et d'interaction entre les différents membres du groupe. Ces deux contraintes supposent la définition d'une vision simplifiée, explicite de la vision environnementale pour faciliter l'analyse du produit et adaptée la communication et la génération d'idée au groupe pluridisciplinaire.

Cette vision doit être également parcimonieuse et orientée selon l'approche fonctionnelle du produit. Nous exprimons par le terme « parcimonieuse » une vision simplifiée de l'approche globale et complexe des contraintes environnementales. Elle doit inclure certaines situations de vie du produit mais aussi une approche multicritère des impacts environnementaux. La maîtrise du temps nécessaire à la phase d'analyse du produit par un groupe de créativité est un critère déterminant pour la pérennité de la méthode.

En général, lors de la conception de produit industriel, l'activité ne se limite pas au produit délivré au consommateur ou à l'utilisateur final mais il est nécessaire d'englober d'autre produit comme les emballages....on parle alors de produits accessoires. Ces produits accessoires sont associés au produit, en particulier dans les situations de vie utilisation et distribution et assurent des fonctions contraintes particulières comme par exemple : protéger le produit pendant le transport, supporter les informations de ventes et de communication du produit. En réduisant notre approche à l'analyse du produit et produits accessoires, les procédés ne sont pas considérés. On limite ainsi la complexité de l'étude.

En résumé, la vision parcimonieuse sera l'expression de l'interaction environnement/produit basée sur les connaissances disponibles en phase de conception préliminaire ciblée sur les possibilités d'évolution du produit et s'adressant à un groupe pluriculturel.

Face aux contraintes que nous avons exprimées, nous proposons une matrice simplifiée de la vision environnementale en phase préliminaire de conception. Il s'agit d'une approche intégrée des axes d'éco-efficacité et de situations pertinentes du cycle de vie du produit. Cette matrice accompagne et oriente les concepteurs vers des objectifs de conception environnementale, à travers des actions à réaliser définies par le croisement entre axes d'éco-

efficacité et situations de vie. Ces actions à réaliser tiennent compte de la description de l'ensemble produit en composants, composants d'interaction et milieux extérieurs. Avant d'expliquer en détail cette matrice, nous allons définir « l'ensemble produit ».

1 L'ensemble produit

Selon nous, le produit industriel n'est pas défini en tant qu'entité isolée, mais considéré comme un ensemble produit formé par le produit lui-même et ses produits accessoires.

Le produit est constitué par un ensemble de composants, de composants d'interaction et de milieux extérieurs.

- Les composants réalisent les fonctions de service et les fonctions contraintes définies par le cahier des charges fonctionnel du produit.
- Les composants d'interaction servent à relier les composants entre eux, à lier les composants à une référence et aussi à assurer le passage des flux fonctionnels.
- Les milieux extérieurs concernent l'environnement du produit. Cela peut être des fluides, le fournisseur d'énergie, l'utilisateur, le milieu ambiant, etc.

Des éléments de l'ensemble produit peuvent être qualifiés de consommables s'ils ont une durée de vie inférieure à la durée de vie requise par le produit. Ils peuvent être des composants ou des composants d'interaction liés à la sûreté de fonctionnement du produit (cartouches, filtres, piles, lames, etc.) ou des milieux extérieurs (fluides, sources d'énergie, signal, etc.). Ces consommables sont vendus avec le produit ou séparément. Ils sont standards ou adaptables et peuvent être à utilisation unique ou réutilisables.

Les produits accessoires concernent les emballages de protection, de transport, de vente, de promotion, de commercialisation, d'information, ainsi que le suremballage de produits (produits ou composants emballés séparément), les documents réglementaires, les notices d'emploi, les documents publicitaires, les documents de livraison, le support logiciel d'accompagnement du produit.

L'ensemble du produit et des produits accessoires influence la consommation des ressources par l'épuisement des réserves naturelles en matériaux et en énergie. Cette diminution des réserves naturelles influencera en conséquence le développement durable de l'activité industrielle. La figure 30 montre la relation entre l'ensemble produit et les ressources (matériaux et énergies).

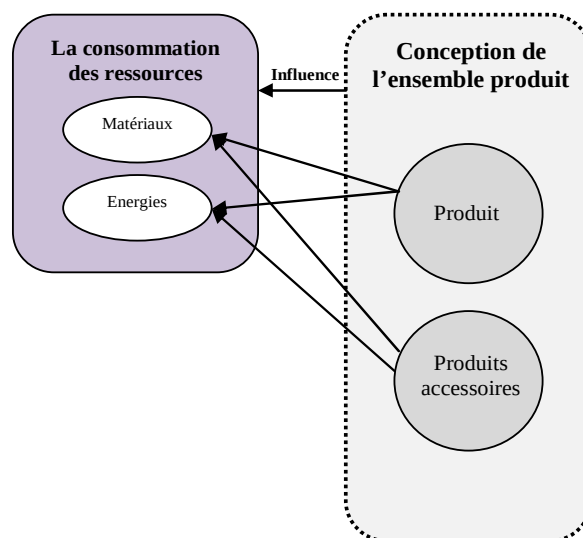


Figure 30: Relation entre un ensemble produit et les consommations de ressources

Comme un produit, un produit accessoire comporte des composants, des composants d'interaction et des milieux extérieurs et assure une ou plusieurs fonctions. Il s'agit de fonctions contraintes particulières liées à l'évolution du produit à travers son cycle de vie.

L'utilisation d'un produit accessoire peut être temporaire ou ponctuelle. Les différents produits accessoires sont liés à trois fonctions contraintes particulières :

- Protéger des agressions extérieures,
- Faciliter le transport,
- Supporter l'information : documents papiers (documents publicitaires, mode d'emploi, etc.) et supports informatiques (logiciel d'accompagnement).

Une représentation schématique structurale de l'ensemble produit est proposée dans la figure 31.

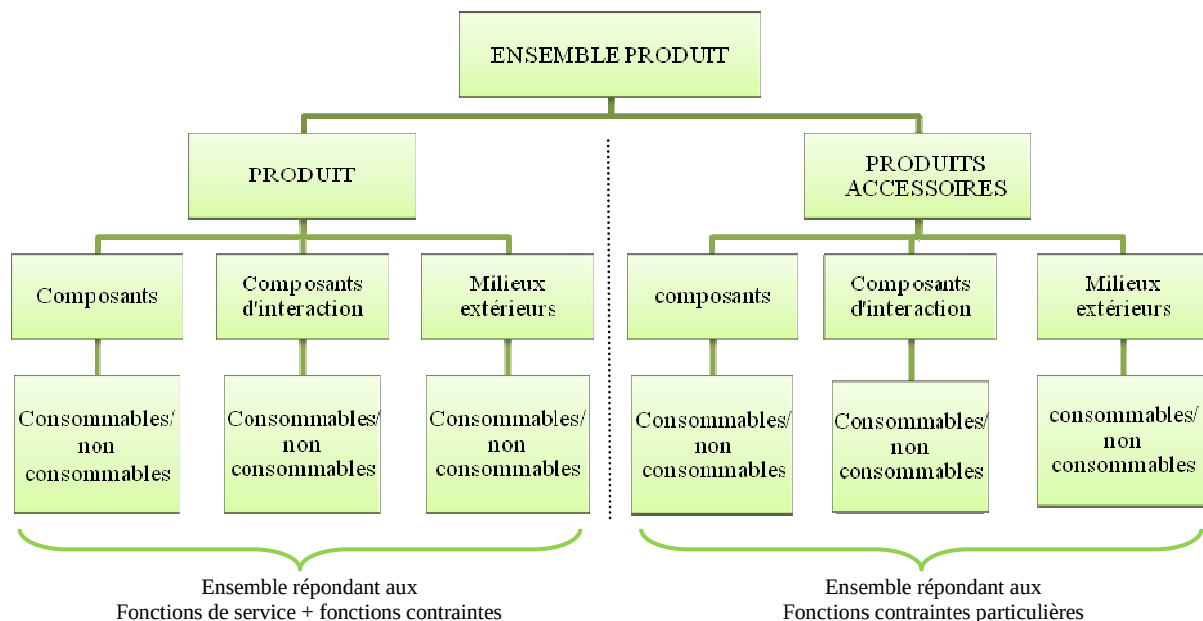


Figure 31: Représentation schématique structurale de l'ensemble produit: détail des constituants

L'évolution de l'ensemble produit sur un cycle de vie génère inévitablement des rejets. Ces rejets sont des flux de matériaux et d'énergie ayant ou pas des propriétés dangereuses. Ils proviennent de fragmentations totales ou partielles de composants ou sont créés par l'ensemble produit au cours de son cycle de vie. Les rejets se déclinent en déchets solides, flux énergétiques et flux de matière.

A travers un cycle de vie d'un produit, ces rejets peuvent être des composants ou des parties de composants (consommables/non consommables), des fluides de fonctionnement, des effluents, des nuisances sonores, ou dans certains cas, l'ensemble du produit.

Ces rejets résultent de l'évolution de l'état d'un fluide, de l'altération d'un composant, de la perte d'un effluent, etc. Ils sont issus d'interactions entre composants, composants d'interaction et les milieux extérieurs. La figure 32 met en évidence la relation entre l'ensemble produit et les rejets générés.

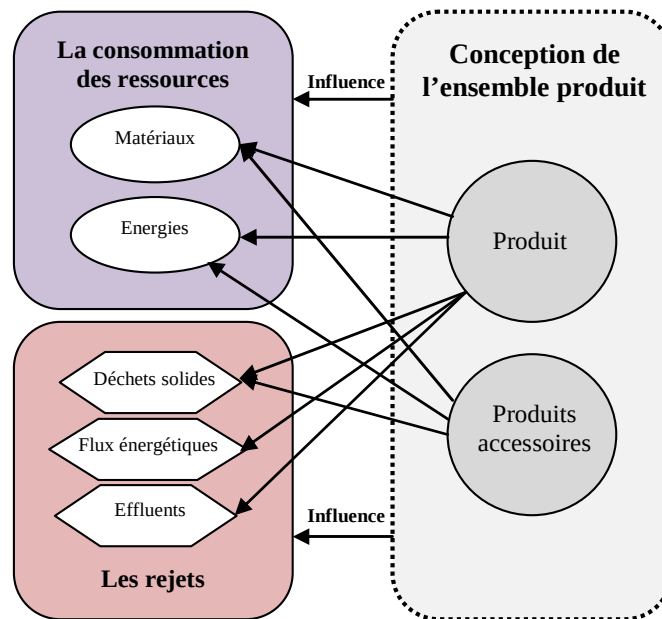


Figure 32: Relation entre un ensemble produit et les rejets

Les produits accessoires deviennent des rejets de l'ensemble produit lorsqu'ils ont rempli leurs fonctions contraintes particulières. Cela peut être des emballages, des supports d'information, des logiciels d'accompagnement, des flux énergétiques et des effluents. Les rejets des produits accessoires sont associés aux situations de vie distribution et utilisation.

2 Approche environnementale parcimonieuse: axes d'éco-efficacité et situations de vie

Dans le chapitre 1, nous avons montré qu'ils existent de nombreux outils d'éco-conception (Afnor 03), (Johansson 01), (Brezet 97), (Matbase), et d'éco-innovation (Chen et al, 03), (Chang et al, 04). D'après cette étude, nous avons montré que la complexité des outils est définie par l'ensemble des critères mis en jeu dans l'analyse et l'évaluation du produit. Par exemple, une démarche globale d'éco-conception s'accompagne de l'analyse des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie du produit (ACV).

En phase préliminaire de conception, la réalisation d'une ACV n'est pas envisageable sachant que l'ensemble des paramètres du produit n'est pas encore défini. D'autres alternatives d'analyse et d'évaluation sont possibles. A cette fin, nous avons explorés différents outils d'analyse, d'évaluation environnementale et de créativité afin de déterminer une vision parcimonieuse liée à l'approche proposée par ces outils.

- les outils d'éco-innovation, pour analyser et définir la cohérence et la logique de ces méthodes pour innover en conception de produit, en intégrant la vision environnementale
- les méthodes et outils d'éco-conception, pour identifier les données pertinentes nécessaires à l'analyse environnementale d'un produit.
- le contexte du déroulement d'un atelier d'éco-innovation, pour analyser les paramètres permettant de mettre un groupe de participants en situation d'éco-innover.

En se basant sur ses axes d'analyse, développés préalablement, nous avons défini une approche globale et simplifiée de la vision environnementale. Cette vision allie les axes d'éco-efficacité aux cinq situations pertinentes du cycle de vie du produit.

2.1 Approche intégrée : axes d'éco-efficacité et situations du cycle de vie du produit

La vision environnementale présentée préalablement par le concept d'éco-efficacité et les dix règles d'or est pertinente mais reste insuffisante pour exprimer une approche environnementale globale et simplifiée permettant d'assister le concepteur dans les phases préliminaires de conception. Afin de proposer une approche plus élaborée et adaptée, nous avons retenu : les axes d'éco-efficacité, et les phases du cycle de vie du produit, comme données clés d'étude et d'analyse environnementale. Avec une vision orientée produit, une nouvelle approche développée et affinée des axes d'éco-efficacité et des phases du cycle de vie du produit est également définie.

2.1.1 Les axes d'éco-efficacité vision produit

Nous proposons de faire évoluer la sémantique des axes d'éco-efficacité (donnés dans le tableau 19 colonne gauche) pour distinguer plus précisément les impacts environnementaux mis en jeu et pour les adapter, au mieux, aux outils de la méthode MAL'IN. Ainsi, les différents thèmes sont conservés mais exprimés de manière plus concise pour favoriser la créativité. L'évolution MAL'IN des sept axes d'éco-efficacité sont présentés dans la partie droite du tableau 19. La logique globale de la nouvelle terminologie consiste à préciser les axes d'éco-efficacité dans une vision re-conception de produit. Les phrases modifiées augmentent en précision et s'inscrivent dans les terminologies utilisées lors de l'établissement du CdCF (Cahier des Charges fonctionnel).

Concernant l'axe A, la terminologie employée initialement par World Business Council for Sustainable Design (WBCSD) concerne uniquement l'impact des matériaux. Réduire l'influence matérielle (axe A) implique la conception des composants et le choix des matériaux utilisés ainsi que l'ensemble des rejets générés par l'ensemble produit.

La réduction du contenu énergétique des biens et des services doit s'envisager dans une vision plus globale d'augmentation de l'efficacité énergétique.

L'axe C, lui aussi, doit être vu dans sa globalité et impliquer dans le terme de réduction à la fois la réduction de la production, de l'innocuité et de la dispersion des substances toxiques.

Nous éliminons l'exclusivité de la contrainte de recyclabilité des matériaux en associant la réutilisation des composants à l'axe D.

Le point E doit concerner l'optimisation des ressources utilisables dans le produit et dans son environnement et ne pas se cantonner exclusivement aux ressources renouvelables. En effet, il existe dans les produits, des ressources non utilisées et donc potentiellement exploitables.

Il nous semble judicieux d'intégrer la notion d'estime du produit à la durée de vie pour exprimer l'axe F. En effet, l'accroissement des fonctions d'estime va agir sur l'affectif de l'utilisateur vis-à-vis du produit et ainsi augmenter la durée de possession.

L'accroissement des fonctionnalités vient se juxtaposer à l'accroissement des services. Dans l'évolution naturelle des produits, l'accroissement des fonctionnalités précède le passage au service.

Terminologies existantes d'axe d'éco-efficacité (WBCSD)	Nouvelle terminologie d'axes d'éco-efficacité (Eco-MAL'IN)
A) Réduire la quantité de matériaux utilisés pour les biens et les services.	A) Réduire l'influence matérielle
B) Réduire le contenu énergétique des biens et des services.	B) Augmenter l'efficacité énergétique
C) Réduire les risques de dispersion de substances toxiques.	C) Réduire les risques de toxicité
D) Accroître la recyclabilité des matériaux.	D) Accroître la recyclabilité et la réutilisation
E) Maximiser l'emploi durable de ressources renouvelables.	E) Optimiser l'utilisation des ressources
F) Accroître la durabilité des produits.	F) Augmenter la durée de vie et l'estime de l'ensemble produit.
G) Accroître le service rendu par les biens et les services.	G) Augmenter les fonctionnalités et les services.

Tableau 19: Axes d'éco-efficacité: évolution de la terminologie existante

2.1.2 Les situations de vie impactées lors de la conception du produit

Le cycle de vie d'un produit concerne « l'ensemble des activités associées à un produit, ou à un service, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination des déchets » (NF X 30-300), (ISO 140 40).

En démarche d'éco-innovation, la réalisation d'une ACV n'est pas envisageable sachant que l'ensemble des paramètres du produit est difficilement identifiable en phase préliminaires de conception. Nous proposons, à ce stade de ne considérer que cinq étapes du cycle de vie du produit, appelés aussi situations de vies du produit. Ces situations de vie génériques sont :

- L'extraction des matières premières
- L'industrialisation
- La distribution
- L'utilisation
- La fin de vie

Elles vont se décliner ensuite en situation de vie particulière. L'industrialisation englobe les différentes fabrications, la logistique associée, les assemblages partiels ou finaux. La distribution regroupe les différents transports du produit et la logistique associée. L'utilisation se découpe bien sûr ensuite en différentes situations de fonctionnement ou de repos, elles-mêmes incluant des moments significatifs particuliers. Enfin, la fin de vie va se répartir suivant le recyclage, la réutilisation partielle ou totale de l'ensemble produit et la valorisation.

Nous avons considéré qu'à chaque situation de vie, le produit évolue selon différentes formes et configurations. Il se construit (du matériau au produit), se complexifie (produit+produits accessoires), se dissocie (produit) et enfin re-complexifie en fin de vie (produit+produits accessoires). La figure 33 illustre l'évolution de l'ensemble produit selon les cinq situations de vie du produit.

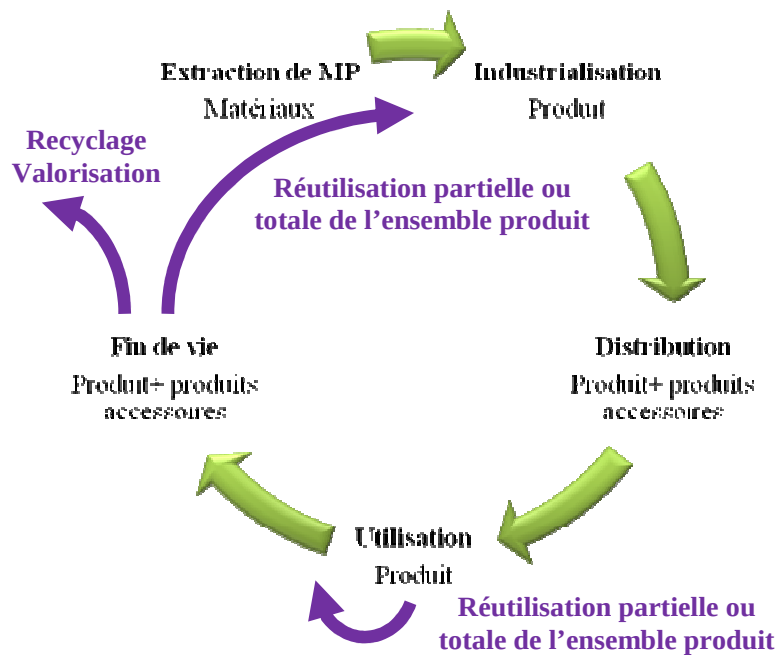


Figure 33: Evolution de l'ensemble produit selon les cinq situations de vie du produit

La fin de vie d'un ensemble produit est différente selon ses fonctionnalités, son usage et son utilisateur. Souvent, l'ensemble produit (produit+produits accessoires) est mis au rebut à des fins de recyclage ou de valorisation mais d'autres scénarios de fin de vie existent également. En effet, un ensemble produit peut être réutilisé partiellement lors de la réutilisation de composants ou de composants d'interaction ou de milieux extérieurs, ou encore totalement. La réutilisation partielle ou totale de l'ensemble produit va impacter deux situations de vie qui sont l'industrialisation et l'utilisation

Tout d'abord, en phase d'industrialisation, la réutilisation partielle ou totale de l'ensemble produit va concerner soit :

- la réutilisation directe de composants et de composants d'interaction ou de milieux extérieurs (huile, ..) selon un contexte industriel semblable,
- la réutilisation de composants et composants d'interaction après transformation. Ils pourront ainsi être inclus dans une application industrielle différente.

Tandis que la réutilisation partielle ou totale de l'ensemble produit en phase d'utilisation va concerner plutôt la réutilisation de composants, de composants d'interaction ou de milieux extérieurs acquérant le potentiel de réaliser à nouveau la même fonction ou une fonction différente.

L'évolution d'un ensemble produit implique des interactions avec les milieux extérieurs et impacte chaque situation de vie par la consommation des ressources et la génération des rejets. Les impacts associés à ces situations de vie sont ceux générés par les choix de conception. La figure 34 illustre la relation entre l'ensemble produit et les situations de vie qui sont impactés directement par la conception.

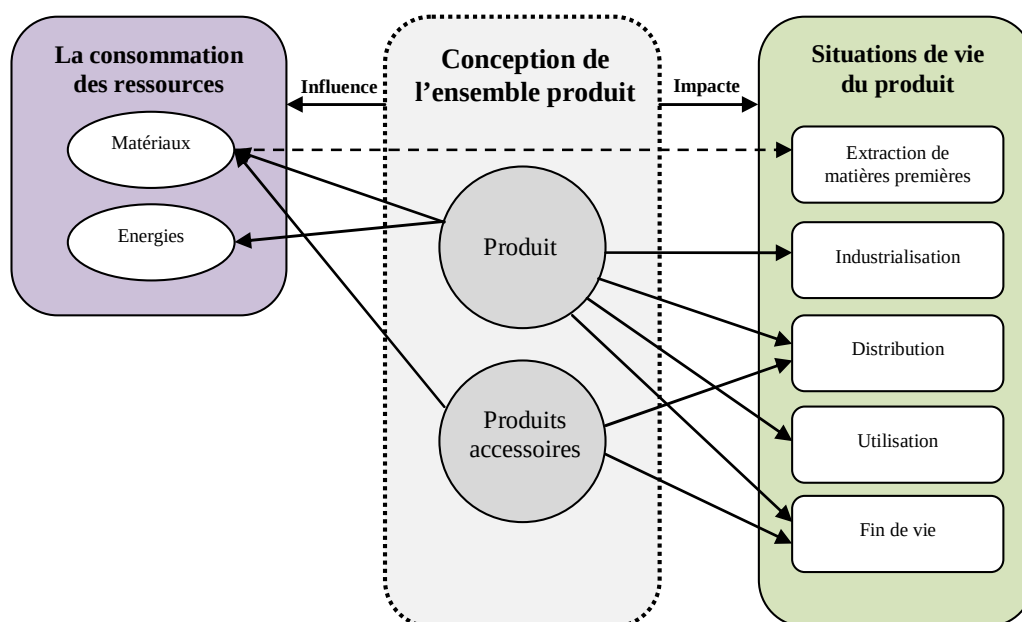


Figure 34: Relation entre un ensemble produit et les cinq situations de vie pertinentes

L'amélioration de la conception de l'ensemble produit permet donc d'une part, de limiter et de réduire la consommation des ressources (matériaux, énergies), d'autre part, d'éliminer, de transformer, et de minimiser les rejets engendrés à chaque situation de vie.

Dans une démarche de conception environnementale, il s'agit de définir les actions de conception qui, de façon intrinsèque, permettront la maîtrise des impacts environnementaux et l'amélioration de situations de vie. La causalité entre les impacts et les possibilités d'action par la conception de l'ensemble produit est représentée en figure 35.

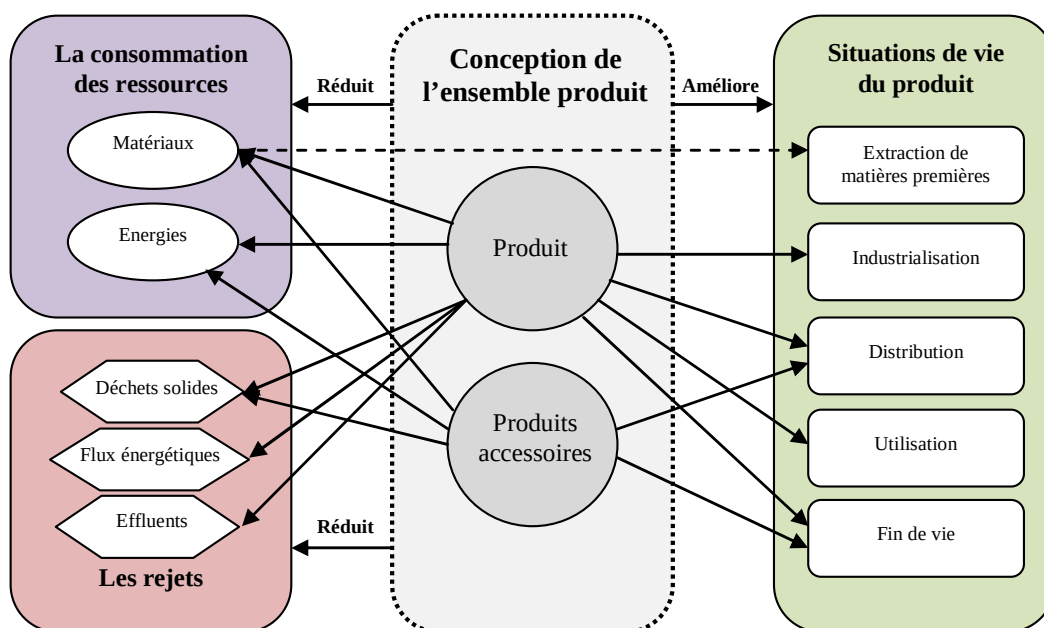


Figure 35: Possibilités d'action, par la conception de l'ensemble produit, sur l'impact global sur l'environnement

2.2 Vision structurée et orientée en phase préliminaire de conception : la matrice « Eco-MAL'IN »

La matrice Eco-MAL'IN (tableau 20) est construite par le croisement des axes d'éco-efficacité et les cinq situations pertinentes de vie du produit. Les axes d'éco-efficacité exprimés précédemment désignent un ensemble d'impacts environnementaux. La portée de ces impacts sur les cinq situations de vie est différente. Nous exprimons leurs liaisons avec les situations de vie. Il faut savoir que nous regardons chaque axe séparément. Par exemple si nous travaillons sur l'axe G, on va rajouter des composants mais leurs influences matérielle sera prise en compte par l'axe A.

	Extraction de matière première	Industrialisation	Distribution	Utilisation	Fin de vie
A) Réduire l'influence matérielle	X	X	X	X	X
B) Augmenter l'efficacité énergétique				X	X
C) Eliminer les risques de toxicité		X	X	X	X
D) Améliorer la recyclabilité et la réutilisation				X	X
E) Optimiser l'utilisation des ressources				X	X
F) augmenter la durée de vie et la désirabilité des produits				X	
G) Augmenter les fonctionnalités et les services			X	X	

Tableau 20: La matrice Eco-MAL'IN : relation entre les phases du cycle de vie et les éléments d'éco-efficacité

Par le croisement des axes d'éco-efficacité et des situations pertinentes du cycle de vie du produit, on a défini des actions à réaliser permettant d'orienter les concepteurs souhaitant entreprendre une démarche de conception environnementale sur un produit existant. Il ne s'agit pas d'une analyse globale de tous les problèmes environnementaux existants, mais d'une approche sélective basée sur l'identification des paramètres les plus pertinents relatifs à un problème bien déterminé. A partir de cette matrice, différentes possibilités d'analyse et de choix d'objectifs et de démarches environnementales sont suggérés. Le concepteur aura à définir ses priorités d'action, en choisissant d'agir sur un ou plusieurs axes d'éco-efficacité (impacts environnementaux) ou focaliser ses actions sur une situation de vie. Avant d'expliquer en détail les trente neuf actions à réaliser de la matrice Eco-MAL'IN, nous allons clarifier les choix ciblés d'analyse.

Le travail sur l'impact « l'influence matérielle » (Axe A) d'un ensemble produit concerne les cinq situations de vie. Il faut extraire les matières premières, il faut réaliser les composants à partir de ces matières premières, il faudra distribuer le produit et les produits accessoires et envisager leur fin de vie. A travers ce cycle d'évolution du produit des matériaux à la fin de vie, différentes actions à réaliser permettent d'influencer la consommation des ressources et de limiter ou d'éviter la génération des rejets d'un ensemble produit sur les cinq situations de vie. Les choix de matériaux, du nombre de composants et composants d'interactions, ainsi

que l'architecture du produit, etc.....sont des choix définis en phase conception, mais qui au niveau de l'évolution d'un ensemble produit impactent les cinq situations de vie.

Augmenter par exemple « l'efficacité énergétique » (Axe B) de l'ensemble produit n'impactera pas la phase d'extraction de matière première, de production ou de distribution, puisque on parle ici d'efficacité énergétique liée au fonctionnement du produit. La notion d'efficacité énergétique concerne aussi la phase de fin de vie à cause de la récupération des énergies accumulées (fluide frigorigène dans les réfrigérateurs, gaz rares utilisés dans les ampoules...).

Le travail sur l'élimination des risques de toxicité (Axe C) concerne les situations de vie (industrialisation, distribution, utilisation et fin de vie), puisque en démarche de conception, on peut rajouter des contraintes permettant d'éliminer, d'éviter, de contrôler ou de récupérer le ou les flux toxiques (matériaux, énergies) d'un ensemble produit. Ces contraintes sont clairement définies à chaque situation de vie du produit, à l'exclusion de l'extraction des matières premières où les problèmes de toxicité impliquent les procédés d'extraction et pas le produit.

L'amélioration de « la recyclabilité et la réutilisation de l'ensemble produit » (Axe D), influence deux situations de vie du produit, l'utilisation et la fin de vie. La recyclabilité impacte directement la phase de fin de vie. La phase d'utilisation est également impactée, si on rajoute des actions à réaliser permettant de faciliter la recyclabilité au cours du fonctionnement du produit. La réutilisation n'est effective que si la conception du produit le permet en autorisant la réutilisation d'une partie de l'ensemble produit ou de l'ensemble produit lors de la situation de vie utilisation.

Les ressources (Axe E) sont les ressources propres à l'ensemble produit définies par MAL'IN et celles récupérées dans l'environnement (Milieux extérieurs). Les ressources utilisées seront renouvelables. Elles correspondent aux deux dernières situations de vie (Utilisation et fin de vie) puisque on ne s'intéresse qu'aux ressources internes et externes à l'ensemble produit existant.

Augmenter la durée de vie et l'estime de l'ensemble produit (Axe F) permet de limiter la phase de renouvellement de produit et donc la phase d'utilisation sera d'autant augmentée. On parle dans ce cadre, de durée de possession de l'ensemble produit par l'utilisateur, et toutes les actions à réaliser en conception seront définis dans le but d'augmenter la durée de possession dans la phase d'utilisation.

L'augmentation des fonctionnalités et des services de l'ensemble produit (Axe G) ne va influencer que les phases de distribution et d'utilisation, puisque dans les phases d'extraction de matière première et d'industrialisation, l'ensemble produit n'exprime pas encore ces fonctionnalités et dans la phase de fin de vie, les fonctions de l'ensemble produit ne sont plus considérées.

On remarque que la situation de vie « utilisation » concerne tous les axes d'éco-efficacité. Cela s'explique par la présence de l'utilisateur dans l'environnement du produit. En effet, l'utilisateur entre en interaction avec le produit, qui lui à travers ses milieux extérieurs, va développer différentes catégories d'impacts environnementaux (consommation de matières, d'énergies, et des rejets). Ces impacts environnementaux sont liés essentiellement au fonctionnement du produit mais peuvent aussi dépendre du comportement de l'utilisateur face à son produit (estime, expérience, culture, etc.).

2.3 Les 39 actions à réaliser

Nous avons expliqué précédemment que chaque action à réaliser en conception, selon un axe d'éco-efficacité particulier, va impacter une situation de vie.

Nous définissons les actions à réaliser sur le système étudié à partir d'une vision fonctionnelle ainsi nous les exprimons par un verbe et un complément. Comme il est classique en analyse fonctionnelle, un système peut être défini par une architecture fonctionnelle qui regroupe toutes les fonctions réalisées par le produit ou par un organigramme technique qui regroupe les composants du système. L'organigramme technique peut être complété par les milieux extérieurs présents dans la situation de vie étudiée, on parle alors d'organigramme technique étendu (Pailhes et al, 07). Nous proposons d'agir sur les fonctions ou sur les composants et les éléments qui les relient (appelés composants d'interaction). Ces composants permettent de faire passer les flux fonctionnels (énergie, matière, signal) d'un composant à un autre. Éliminer une interaction revient à empêcher un flux de passer. Ainsi on peut définir des biais afin de maîtriser les flux et les effluents.

Les actions que nous proposons tiennent compte de la description de l'ensemble produit en composants, composants d'interaction et milieux extérieurs. L'ensemble des actions résulte d'une vision environnementale de conception de produit. Ces actions sont listées de manière systématique pour chaque axe d'éco-efficacité et situation de vie impactée. Nous les structurons par rapport à un axe d'éco-efficacité et une situation de vie, puis les hiérarchisons selon la logique des règles d'analyse des produits (action sur les flux ou champs, sur les composants et les composants d'interaction, optimisation de l'ensemble produit), ou selon des critères de faisabilité ou de rentabilité (action avantageuse, action favorable ou action souhaitable). Cette hiérarchisation permet d'apporter une cohérence par rapport à chaque situation de vie.

2.3.1 1^{er} axe d'éco-efficacité « réduire l'influence matérielle »

La première action implique la réduction, la restriction et l'élimination de composants et de composants d'interaction de l'ensemble produit. Elle agit sur les matériaux et diminue naturellement l'extraction de matières premières.

La conception des composants doit se faire en adéquation avec des moyens de fabrication économes pour réduire les pertes de matière lors de l'industrialisation.

La conception de l'ensemble produit doit permettre d'éviter les pertes et les besoins de conditionnement (température, pression, humidité) lors qu'il sera transporté et distribué. La conception du produit doit permettre d'éviter, lors de l'utilisation, de contribuer à la pollution et aux pertes de matière par l'utilisation de composants non perdables, par la réduction des consommables et par la maîtrise des rejets.

Enfin, la conception de produit doit étudier la mise en rebut de l'ensemble produit en situation de fin de vie, et donc maîtriser la quantité ou la qualité de ces rejets.

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception
Extraction de MP	Réduire le nombre, la masse, le volume des composants, des composants d'interaction du produit
Industrialisation	Optimiser la conception de l'ensemble produit pour réduire, éliminer les chutes de fabrication
Distribution	Optimiser l'ensemble produit pour minimiser les rejets lors de la distribution
Utilisation	Favoriser l'utilisation de composants et de composants d'interactions non perdables
	Modifier les composants et les composants d'interaction afin de minimiser l'utilisation de consommables
	Réduire, éliminer, réutiliser (circuit fermé) les rejets du produit
Fin de vie	Simplifier, optimiser, ajuster ou éliminer les produits accessoires
	Favoriser l'utilisation des matériaux auto-biodégradable, biodégradables, renouvelables

Tableau 21: Actions à réaliser pour réduire l'influence matérielle

2.3.2 2^{ème} axe d'éco-efficacité « augmenter l'efficacité énergétique »

Dans la situation de vie utilisation, les actions à réaliser en conception sont classées selon la pertinence d'analyse des flux d'énergie. L'évolution de ces flux d'énergie est liée aux champs entre les composants. Ces champs doivent aller des champs matériels aux champs immatériels et tendre vers une meilleure contrôlabilité (Nadeau et al, 05).

Éliminer une interaction revient à empêcher un flux de passer, on peut donc avoir une implication directe sur l'énergie en modifiant les liaisons entre composants, leurs surfaces en contact et leurs agencements.

On doit concevoir les systèmes afin qu'ils fonctionnent en autarcie et qu'ils stockent les matières énergétiques qui ne sont plus utilisées.

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception
Utilisation	Faire évoluer des champs, substituer des champs, améliorer leur contrôlabilité
	Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements
	Réduire, maîtriser les interactions entre les composants et les composants d'interaction, afin de minimiser les pertes d'énergie
	Réutiliser (circuit fermé) les énergies rejetées ou perdues au cours du fonctionnement
Fin de vie	Permettre la récupération des énergies accumulées

Tableau 22: Actions à réaliser pour augmenter l'efficacité énergétique

2.3.3 3^{ème} axe d'éco-efficacité « réduire les risques de toxicité »

Les risques de toxicité concernent les rejets, les matériaux et leurs interférences éventuelles.

La conception doit permettre d'éviter les risques de toxicité lors de l'industrialisation en éliminant la possibilité de rejet ou d'interférence.

Il s'agit aussi d'assurer un ensemble produit stable lors de la distribution et bien sûr de l'utilisation.

La conception doit permettre d'éliminer les matériaux interdits, les flux énergétiques toxiques et les possibilités d'interférences. Les rejets restants doivent être rendus inertes.

Enfin, on doit concevoir pour éviter tout risque de toxicité (contact, exposition, etc.) lors de la fin de vie

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception
Industrialisation	Permettre par la conception d'éliminer les rejets toxiques de l'ensemble produit, ainsi que leurs interférences
Distribution	Permettre la stabilité ou la contrôlabilité des flux de matériaux et énergie toxiques et de leurs interférences
Utilisation	Éliminer les matériaux interdits
	Éliminer ou réduire la quantité des flux énergétiques toxiques du produit et leurs interférences
	Rendre inertes, passifs tous les rejets toxiques du produit
	Permettre la stabilité ou la contrôlabilité des flux de matériaux et énergie toxiques et de leurs interférences
Fin de vie	Permettre la rétention, la localisation et l'identification des composants toxiques pour la récupération

Tableau 23: Actions à réaliser pour réduire les risques de toxicité

2.3.4 4^{ème} axe d'éco-efficacité « améliorer la recyclabilité et la réutilisation »

A travers les actions à réaliser en conception que nous proposons, on identifie un ordre logique d'action. On privilégie en phase d'utilisation l'état des composants et composants d'interaction pour permettre la réutilisation et ensuite l'évolution des consommables du produit au cours de son fonctionnement pour faciliter la recyclabilité en fin de vie. En fin de vie, on agit sur l'ensemble produit, la géométrie, le volume et l'agencement des composants et des composants d'interactions.

On s'intéresse ensuite aux caractéristiques intrinsèques de ses composants et composants d'interactions, en considérant leurs aptitudes au recyclage, à la réutilisation et à la valorisation. Ainsi, les actions sur les composants impactant la fin de vie pour une meilleure recyclabilité vont de la diminution des volumes en agissant sur la géométrie, sur l'élimination des composants non recyclable, non réutilisables et sur l'élimination des poly-matériaux. Enfin, pour faciliter et optimiser la réutilisation et le recyclage, on doit concevoir pour désassembler.

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception
Utilisation	Protéger et rendre les composants et les composants d'interaction réutilisables
	Permettre la rétention, le stockage et l'accessibilité des consommables du produit
Fin de vie	Agir sur la géométrie des composants et des composants d'interactions de l'ensemble produit pour diminuer les volumes à recycler
	Utiliser des composants et des composants d'interaction recyclables, valorisables et réutilisables
	Éliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux
	Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction

Tableau 24: Actions à réaliser pour améliorer la recyclabilité et la réutilisation

2.3.5 5^{ème} axe d'éco-efficacité « optimiser l'utilisation des ressources »

L'expression de ces ressources place déjà le concepteur en situation d'utilisation de ressources durables. Les énergies renouvelables sont sélectionnées ainsi que toutes les ressources durables exprimées dans les douze points de la fiche « ressource » (Annexe 6). Le point numéro 3 concerne les informations qui seront utilisées pour identifier les composants récupérables en fin de vie.

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception
Utilisation	Favoriser l'utilisation des énergies renouvelables
	Optimiser l'utilisation des ressources du produit et de son milieu extérieur, en favorisant les ressources durables
Fin de vie	Optimiser l'utilisation des ressources de l'ensemble produit par la rétention, la localisation et l'identification des composants pour la récupération

Tableau 25: Actions à réaliser pour optimiser l'utilisation des ressources

2.3.6 6^{ème} axe d'éco-efficacité « augmenter la durée de vie et la désirabilité des produits »

Bien sûr, seule la situation de vie « utilisation » est impactée par les actions sur la durée de vie et la désirabilité des produits car la situation de vie « achat » n'est pas concerné par les impacts environnementaux.

La durée de vie implique trois niveaux, agir sur la structure du produit, travailler sur les caractéristiques des matériaux constituant les composants et maîtriser l'agencement, c'est-à-dire la localisation des composants et leurs composants d'interaction induits.

Globalement, l'amélioration de la durée de vie implique une sûreté de fonctionnement que l'on maîtrisera par l'optimisation de la maintenance.

L'évolution dans le temps de la personnalisation du produit sera gage de la pérennité de sa désirabilité.

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception
Utilisation	Améliorer la pérennité des composants par l'évolution de leurs structures
	Améliorer la pérennité des composants par l'évolution des caractéristiques des matériaux
	Maîtriser l'état et l'agencement des composants et des composants d'interaction du produit au cours de son fonctionnement
	Optimiser la maintenance
	Permettre l'évolution dans le temps de la personnalisation de l'ensemble produit

Tableau 26: Actions à réaliser pour augmenter la durée de vie et l'estime de l'ensemble produit

2.3.7 7^{ème} axe d'éco-efficacité « augmenter les fonctions et les services »

La première action à réaliser consiste à déléguer des fonctions nécessaires en phase de distribution à une partie ou à l'ensemble produit.

En phase d'utilisation, les actions à réaliser en conception sont organisées selon la logique d'évolution d'un produit vers les services. Cette logique identifie plusieurs situations de développements et de transformations : le produit se complexifie puis se simplifie jusqu'à son intégration dans les milieux extérieurs.

Dans ce contexte, la première action à réaliser concerne l'ajout de nouvelles fonctions qui conduit à une segmentation, puis à une réagrégation pour éviter la complexification du produit. Le produit ayant évolué, la deuxième action propose d'agir sur l'interface du produit/utilisateur. Ensuite, l'utilisation par plusieurs utilisateurs qui, en induisant nécessairement des risques de pannes supplémentaires, impose l'amélioration de la sûreté de fonctionnement. Enfin, la dernière action engage directement l'évolution du produit vers le service par son intégration totale ou partielle dans les milieux extérieurs.

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception
Distribution	Intégrer à l'ensemble produit des fonctions améliorant la phase distribution
Utilisation	Intégrer à l'ensemble produit des fonctions améliorant la phase d'utilisation
	Agir sur l'interface produit / utilisateur
	Augmenter la sûreté de fonctionnement (maintenabilité, fiabilité, sécurité, disponibilité) et l'adaptabilité pour rendre le produit accessible à plusieurs utilisateurs
	Intégrer tout ou partie des fonctions du produit dans les milieux environnants

Tableau 27: Actions à réaliser pour augmenter les fonctions et les services

L'ensemble des trente neuf actions à réaliser défini par la matrice Eco-MAL'IN apportent une vision parcimonieuse de l'interaction environnement/produit. Cette matrice est construite d'une part, selon une vision simplifiée de la vision éco-conception et d'autre part, une vision simplifiée l'approche globale d'analyse du produit. La figure 36 illustre la construction de la vision parcimonieuse de l'interaction environnement/produit.

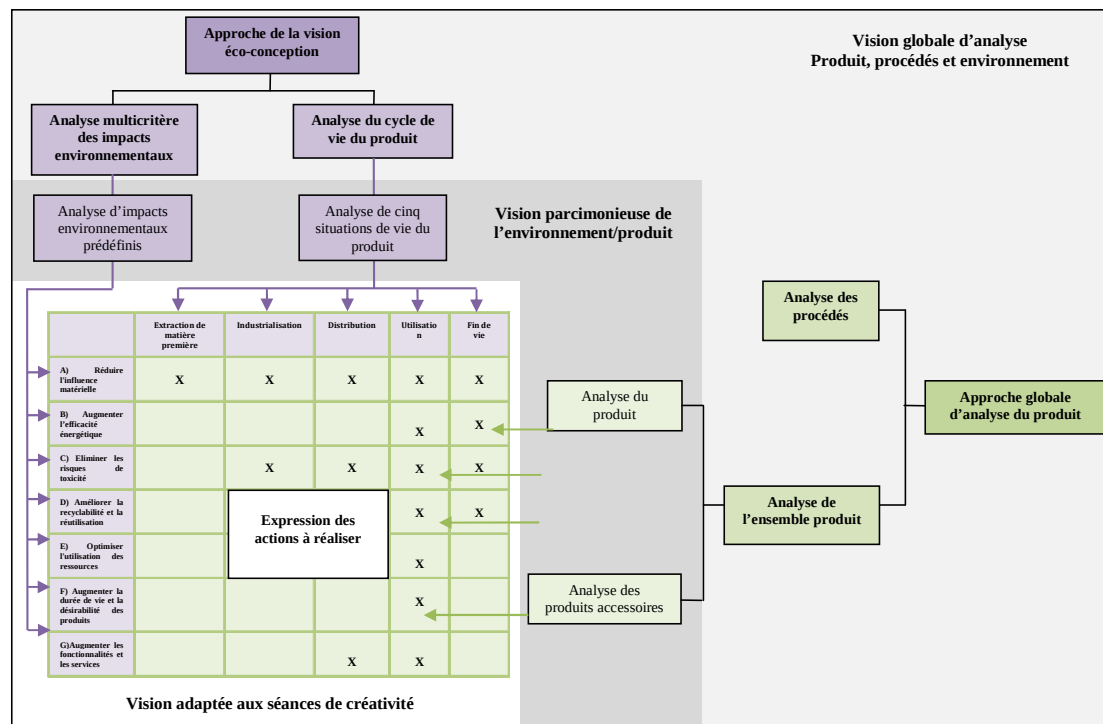


Figure 36 : Définition de la vision parcimonieuse de l'interaction environnement/produit

3 Critique des actions à réaliser mises en place

Nous comparons nos actions à réaliser au développement des 10 règles d'or définie par Bombardier dans son guide « Design for Environment » (DfE). Ce guide replace les activités de conception dans une vision fonctionnelle, il précise en préambule de :

- Spécifier les fonctions et doubles fonctions principales de votre produit
- Considérer la façon dont le produit interagit avec l'environnement tout au long de son cycle
- Identifier les activités de votre travail quotidien relativement au guide « Design for Environment »
- Sélectionner et combiner les actions du guide « Design for Environment », qui vous paraissent les plus significatives et qui correspondent le mieux à vos besoins
- Adaptez-les à vos besoins et écrivez votre propre plan d'action.

Dans ce guide, onze directions de conception ont été recensées. Cela concerne :

- les fonctions,
- les produits dangereux,
- la bonne gestion,
- le poids,
- l'énergie,
- l'amélioration,
- la durée de vie,
- la protection,
- les informations,
- le mélange
- et la structure.

Ces directions sont désignées comme des activités de « Design for Environment ». A chacune de ces activités est associée des actions particulières. Dans un premier temps, nous allons analyser la vision globale des dix règles d'or. Puis, nous allons comparer les actions à réaliser que nous avons défini par la matrice « Eco-MAL'IN » aux actions à réaliser développées par Bombardier, à partir des dix règles d'or.

3.1 Vision critique des règles d'or

Les objectifs environnementaux de conception exprimés par les règles d'or sont à la fois généraux et ciblés. Certaines règles d'or conduisent à des objectifs similaires et peuvent être combinées. D'autres règles d'or expriment plus qu'un objectif environnemental.

D'après le guide de Bombardier, chaque règle d'or est associée à une activité (Bombardier 05). Nous constatons que parmi les dix activités proposées, on ne distingue que cinq activités principales : produits dangereux, énergie, poids, durée de vie, mélange/recyclabilité. Les autres activités tel que la bonne gestion, l'amélioration, la protection, l'information, la structure, ne désignent pas nécessairement un objectif environnemental de conception mais font partie du développement des cinq activités cités précédemment. Le tableau 28 propose une association entre les règles d'or et les activités de Bombardier.

Activités DFE	Les dix règles d'or
Produits dangereux	Ne pas utiliser des substances toxiques et utiliser en circuit fermé celles que vous ne pouvez pas éviter.
Energie	Minimiser, grâce à une bonne gestion, la consommation d'énergies et de ressources en phase de production et de transport.
Poids	Utiliser des structures adaptées et des matériaux de haute qualité afin de minimiser le poids des produits, sans affecter la souplesse, la puissance ou les priorités fonctionnelles.
Energie	Minimiser la consommation d'énergies et de ressources en phase d'utilisation, en particulier pour les produits ayant un fort impact environnemental durant cette phase
Durée de vie	Favoriser la réparation et la remise en état, en particulier pour les produits avec systèmes intégrés.
Durée de vie	Optimiser la conception pour la durée de vie, en particulier pour les produits ayant peu d'impacts environnementaux significatifs en phase d'utilisation.
Durée de vie	Investir dans les matériaux, les traitements de surface ou les agencements pour protéger les produits de l'encrassement, de la corrosion et de l'usure, en maximisant ainsi la durée de vie du produit et en réduisant sa maintenance.
Durée de vie Mélange Recyclabilité	Faciliter la récupération, en cas de remise en état, de réparation et de recyclage, grâce à l'accessibilité, l'étiquetage, la modularité, des liaisons fragmentables et l'utilisation de manuels.
Durée de vie Mélange Recyclabilité	Faciliter l'entretien, la réparation et le recyclage en utilisant des mono-matériaux, des matériaux recyclés et non des poly-matériaux ou des alliages.
Recyclabilité Mélange	Utiliser aussi peu que possible des éléments de jonctions, et proposer selon les situations de vie, des vis, des adhésifs, des soudures, des clips avec des géométries adaptées.

Tableau 28: Association entre les règles d'or et les activités définis par Bombardier

Cette analyse globale des règles d'or a permis de mettre l'accent sur deux points :

- Le premier point concerne la non-clarté des objectifs environnementaux définis par les dix règles d'or, ainsi que les terminologies décrivant les activités DFE,
- Le deuxième point retient l'absence de certains objectifs environnementaux, comme l'évolution des fonctions du produit vers les services.

3.1.1 Comparaison des actions à réaliser de la Matrice Eco-MAL'IN et celles de Bombardier

Notre vision fonctionnelle s'appuie sur l'analyse fonctionnelle classique et un découpage organique précis du produit qui permet l'expression systématique des actions par une préconisation de l'évolution des composants, des composants d'interaction, des champs entre composants et des produits accessoires en adéquation avec le développement durable. L'expression des actions à réaliser s'intègre dans une méthodologie globale MAL'IN.

Les actions à réaliser « Eco-MAL'IN » couvrent toutes les situations de vie affectées directement par l'activité de conception de l'ensemble produit. Elles permettent de lever les ambiguïtés du découpage en trois situations de vie proposées par les règles d'or : avant utilisation, utilisation et fin de vie.

Afin d'analyser, comparer et critiquer les actions à réaliser associés aux dix règles d'or (Bombardier) à celle proposés par la matrice « Eco-MAL'IN », les phases du cycle de vie du produit seront considérées comme paramètre d'étude et de comparaison. A partir des mêmes phases du cycle de vie du produit, nous allons comparer les actions à réaliser conduisant à un même objectif de conception.

3.1.2 Phase « avant utilisation »

Les règles d'or regroupent dans cette phase du cycle de vie trois activités de conception environnementale (les produits dangereux, la bonne gestion et le poids). La matrice « Eco-MAL'IN » retient pour cette même phase trois axes d'éco-efficacité (réduire l'influence matérielle, éliminer les risques de toxicité et augmenter les fonctionnalités et les services).

En comparant les actions à réaliser associés aux produits dangereux, et les actions à réaliser associées à l'axe d'éco-efficacité « éliminer les risques de toxicité », on constate que sur un niveau global d'analyse, les actions à réaliser associés aux produits dangereux (Bombardier, règles d'or) abordent de manière générale le problème de la toxicité. Ces actions traitent de la toxicité des matériaux et ne précisent pas les actions nécessaires pour éliminer, éviter, ou pallier les flux de matériaux toxiques. L'expression de ces actions ne fournit pas au concepteur de réelles directives en démarche de conception. A titre d'exemple, nous allons comparer deux actions à réaliser définis par les règles d'or et la matrice Eco-MAL'IN données dans le tableau 29.

- Action 3 (Bombardier, règle d'or) : Si une substance dangereuse ne peut pas être remplacée, imaginer une réutilisation possible du produit, c'est-à-dire une façon de le recycler et d'y prêter attention en fin de cycle.
- Action 7 (Matrice Eco-MAL'IN) : Permettre la rétention, la localisation et l'identification des composants toxiques pour la récupération.

L'action à réaliser (3) engage la réflexion sur les problèmes de toxicité du produit en phase de fin de vie. Les objectifs attendus du concepteur en approche de conception, reste mal défini.

Tandis que l'expression de l'action à réaliser (7) permet d'assister et de guider le concepteur selon des possibilités d'évolution de composants et de composants d'interaction de son produit. Cette approche orientée conception produit en phase préliminaire apporte une vision claire des objectifs attendus et permet donc d'être constructifs et productifs en phase de créativité.

Le tableau 29 présente les actions à réaliser (produit dangereux) associés aux règles d'or et les actions à réaliser (éliminer les risques de toxicité) définies par la matrice « Eco-MAL'IN ». Ces actions sont classées selon les phases du cycle de vie du produit et des entités fonctionnelles ont été associées à chacune des actions pour permettre une comparaison.

	Produits dangereux (Bombardier, règles d'or)	Eliminer les risques de toxicité (Matrice « Eco-MAL'IN »)
Avant utilisation	Ne pas utiliser les matériaux indiqués sur la liste des substances interdites et à utilisation limitée par BT / <i>Matériaux interdits</i> Essayer de trouver des solutions n'utilisant pas de substances dangereuses et ne compromettant pas la fonctionnalité et le coût du produit / <i>Interaction entre substances dangereuses</i> Si une substance dangereuse ne peut pas être remplacée, imaginer une réutilisation possible du produit, c'est-à-dire une façon de le recycler et d'y prêter attention en fin de cycle / <i>Problèmes de toxicité en fin de vie du produit</i>	Industrialisation Permettre par la conception d'éliminer les rejets toxiques de l'ensemble produit, ainsi que leurs interférences Distribution Permettre la stabilité ou la contrôlabilité des flux de matériaux et énergie toxiques et de leurs interférences
Utilisation		Eliminer les matériaux interdits Eliminer ou réduire la quantité des flux énergétiques toxiques du produit et leurs interférences Rendre inertes, passifs tous les rejets toxiques du produit Permettre la stabilité ou la contrôlabilité des flux de matériaux et énergie toxiques et de leurs interférences
Fin de vie		Permettre la rétention, la localisation et l'identification des composants toxiques pour la récupération

Tableau 29: Comparaison d'actions à réaliser (règles d'or et matrice "Eco-MAL'IN") en phase d'avant utilisation

On remarque que les actions à réaliser de la colonne de gauche correspondent, d'après l'outil de Bombardier, à la phase d'avant utilisation. L'action à réaliser (3) exprimant les problèmes de toxicité en fin de vie du produit est donc non cohérente par rapport à cette phase. Par contre, les actions à réaliser de la matrice Eco-MAL'IN listées dans la colonne de droite découlent d'une vision fonctionnelle de conception de produit. Ces actions à réaliser expriment une vision particulière d'évolution de composants, de composants d'interaction ou de milieux extérieurs permettant d'éliminer, d'éviter, de réduire ou de pallier à un flux toxique (matériaux interdits ou flux énergétique toxique) et sont structurés par rapport aux situations de vie qu'ils impactent. Les procédés d'extraction, d'industrialisation, de distribution et de démantèlement en fin de vie, ne sont pas pris en compte. Ces actions à réaliser concernent uniquement l'évolution de la conception de l'ensemble produit.

3.1.3 La phase « utilisation »

Le tableau 30 permet également de préciser les différences entre les actions à réaliser définies par (Bombardier, règles d'or) et (la matrice Eco-MAL'IN) sur l'approche énergétique. Bombardier exprime des préconisations très dédiées à leurs systèmes de transport impliquant les énergies permettant le déplacement, le contrôle (mise en veille, meilleure conduite), la réduction (traînée, efficacité des composants) et la récupération des énergies perdues.

Dans le tableau 30, ces actions à réaliser expriment des recommandations permettant de mieux gérer la consommation en énergie ou bien des solutions particulières de conception.

Les actions à réaliser Eco-MAL'IN sont générales et donc plus adaptés à tous secteurs industriels. La situation de fin de vie est également explorée par la matrice Eco-MAL'IN, puisque pour certains produits, la récupération énergétique peut présenter une réelle démarche de conception environnementale. Cette généralité favorise aussi la créativité technique.

	Energie (Bombardier, règle d'or)	Augmenter l'efficacité énergétique (Matrice « Eco-MAL'IN »)
Utilisation	B.1 Sélectionner des sources d'énergie durables, par exemple les carburants renouvelables comme panneaux et batteries solaires / <i>Type d'énergie</i> B.2 Réduire la traînée aérodynamique / <i>Composants et composants d'interaction</i> B.3 Choisir des composants électroniques de haut rendement / <i>Puissance de composants</i> B.4 Installer des fonctions de mise en veille si possible / <i>Contrôlabilité des champs</i> B.5 Faciliter une conduite économe en énergie, par exemple en installant des compteurs de consommation / <i>Contrôlabilité des champs</i> B.6 Utiliser les pertes d'énergie des équipements de traction par exemple / <i>Energie perdue</i>	E.1 Faire évoluer des champs, substituer des champs, améliorer leur contrôlabilité / <i>Type d'énergie, Contrôlabilité des champs</i> E.2 Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements / <i>Composants et composants d'interaction</i> E.3 Réduire, maîtriser les interactions entre les composants, afin de minimiser les pertes d'énergie / <i>Composants et composants d'interaction</i> E.4 Réutiliser (circuit fermé) les énergies rejetées ou perdues au cours du fonctionnement / <i>Energie rejetée ou perdue</i>
Fin de vie		E.5 Permettre la récupération des énergies accumulées

Tableau 30: Comparaison d'actions à réaliser (règles d'or et matrice "Eco-MAL'IN") en phase d'utilisation

Afin de simplifier la dénomination des actions, nous avons choisi d'utiliser la lettre (B) pour les actions introduite par Bombardier et (E) pour celle de la matrice Eco-MAL'IN. La comparaison entre les actions à réaliser définies par Bombardier et celle de la matrice Eco-MAL'IN ayant un même objectif environnemental de conception va permettre d'expliquer plus précisément l'intérêt de l'expression de nos des actions à réaliser (matrice Eco-MAL'IN). La liste est donnée ci-dessous :

B.2 Réduire la traînée aérodynamique

E.3 Réduire, maîtriser les interactions entre les composants, afin de minimiser les pertes d'énergie

B.6 Utiliser les pertes d'énergie des équipements de traction par exemple

E.4 Réutiliser (circuit fermé) les énergies rejetées ou perdues au cours du fonctionnement

Pour les deux premières actions à réaliser, on constate que l'action réduire la traînée aérodynamique, n'inclut que les problèmes liés au frottement. Alors que la 3^{ème} action à réaliser définie par la matrice Eco-MAL'IN préconise l'analyse de toutes les interactions entre les composants, composants d'interaction et milieux extérieurs causant des pertes d'énergie. Cette généralité va permettre de considérer également les interactions entre le produit et les milieux extérieurs et donc élargir d'avantage les possibilités d'action en conception. La maîtrise des interactions renvoie également à l'évolution des interactions entre composants et composants d'interaction, pour améliorer la contrôlabilité.

Pour les deux dernières actions, on remarque que la B. 6 se limite aux pertes d'énergie liée à des équipements en traction. Par contre, l'action M.4 englobe toutes énergies rejetées ou perdues du produit au cours de son fonctionnement. Cette vision globale et exhaustive permet d'apporter aux concepteurs des moyens plus larges pour agir en phase de re-conception de produit.

3.1.4 Phase «fin de vie »

Dans cette dernière phase du cycle de vie, les actions à réaliser proposée par Bombardier regroupent trois activités du DfE (information, mélange et structure). Chaque activité permet d'apporter une vision particulière d'évolution des composants et des composants d'interaction du produit, mais l'ensemble des actions oriente les concepteurs vers un seul objectif de conception, à savoir : l'amélioration de la recyclabilité d'un produit. Certaines de ces actions sont similaires et peuvent être combinées. Elles expriment également des solutions de conception et non des moyens permettant à un groupe de créativité de définir une démarche d'analyse environnementale du produit.

En revanche, les actions à réaliser de la matrice Eco-MAL'IN visent différents objectifs environnementaux. Ces actions vont permettre la réduction de l'influence matérielle, la réduction et la récupération des flux énergétiques, la maîtrise de la toxicité, l'amélioration de la recyclabilité, de la réutilisation, l'optimisation dans l'utilisation des ressources et l'augmentation des fonctions de l'ensemble produit.

Cette structuration des actions à réaliser permet d'orienter les concepteurs vers des objectifs environnementaux clairement définis dans un cahier des charges fonctionnel et permet de conduire le groupe vers des possibilités d'évolution de l'ensemble produit.

	Fin de vie (Bombardier, règle d'or)	Fin de vie (Matrice « Eco-MAL'IN »)
Fin de vie	Information Mettre au point une identification rapide des pièces qui seront recyclées, particulièrement les pièces contenant des substances dangereuses (étiquette, marquages) / <i>Identification des composants et composants d'interaction du produit</i> Incorporer des repères / informations de démontage à la conception / <i>désassemblage des composants et composants d'interaction du produit</i> Marquer les polymères selon la norme ISO 11469 / Identification des composants et composants d'interaction du produit S'assurer que les descriptions du recyclage sont incluses dans les manuels de maintenances / <i>Facilité d'application</i> Mélange Utiliser aussi peu de matériaux différents que possible / <i>Quantité de matériaux</i> Choisir des matériaux homogènes / <i>diversification de matériaux</i> Ne pas utiliser de peintures et de traitement de surface si cela n'est absolument pas nécessaire / <i>Composition de matériaux</i> Garder les polymères « propres », c'est-à-dire éviter de les peindre, de les coller et éviter les polymères contenant des adhésifs / <i>Composition de matériaux</i> Sélectionner des matériaux renouvelables / <i>Nature de matériaux</i> Structure Réduire le nombre d'attaches et de joints et de points de séparation / <i>Composants d'interaction.</i> Standardiser les points de séparation (par exemple pour que cela soit facile de repérer où se situent les séparations) / <i>Normes liées aux composants d'interaction.</i> Eviter de coller / Agencement des composants et composants d'interaction du produit Pour réutiliser des pièces et composants, utiliser des structures qui permettent un démontage non destructeur / <i>Architecture du produit</i> Utiliser vis, soudure, attaches rapides et emboîtement / <i>Types de composants d'interaction.</i>	Influence matérielle Simplifier, optimiser, ajuster ou éliminer les produits accessoires Favoriser l'utilisation des matériaux auto- biodégradable, biodégradables, renouvelables Energie Permettre la récupération des énergies accumulées Toxicité Permettre la rétention, la localisation et l'identification des composants toxiques pour la récupération Recyclabilité et réutilisation Agir sur la géométrie des composants et des composants d'interactions de l'ensemble produit pour diminuer les volumes à recycler Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction Utiliser des composants et des composants d'interaction recyclables, valorisables et réutilisables Éliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux Optimisation dans l'utilisation des ressources Optimiser l'utilisation des ressources de l'ensemble produit par la rétention, la localisation et l'identification des composants pour la récupération

Tableau 31: Comparaison d'actions à réaliser (règles d'or et matrice "Eco-MAL'IN") en phase de fin de vie

3.2 Synthèse

L'analyse comparative et détaillée des actions à réaliser proposées par la matrice Eco-MAL'IN et l'outil Bombardier, nous a conduit à déduire trois données pertinentes pour le fondement d'une démarche d'éco-innovation, notamment dans l'expression des actions à réaliser en conception.

3.2.1 La pertinence de l'expression des actions à réaliser

Les actions à réaliser de l'outil Bombardier découlent des règles d'or. Par conséquent, ces actions expriment des problèmes de conception généraux ou spécifiques et ce, pour différents niveaux d'analyse (processus de distribution, composants du produit, attitude de l'utilisateur). Les préconisations des actions à réaliser de l'outil (Bombardier, règle d'or) ne permettent pas l'analyse du produit. Elles décrivent en effet, des orientations de conception pour élaborer une démarche environnementale. Dans une vision orientée produit, les actions à réaliser de la

matrice Eco-MAL'IN sont définies comme des fonctions (verbes + complément) et tiennent compte de la description de l'ensemble produit en composants, composants d'interaction et milieux extérieurs. Pour cette raison, ces actions sont adaptées aux démarches classiques de conceptions utilisées par les industriels, à savoir, l'analyse fonctionnelle du produit.

3.2.2 La vision parcimonieuse du cadre environnemental

La vision parcimonieuse de l'interaction environnement/produit donnée par la matrice Eco-MAL'IN (approche intégrée : axes d'éco-efficacité et cinq situations de vie du produit) permet de considérer les impacts environnementaux selon les situations de vie impactées et donc déduire des actions à réaliser en conception considérant à la fois un impact environnemental et une situation de vie.

A contrario, l'analyse environnementale proposée par l'outil (Bombardier, règles d'or) est définie par un cycle de vie découpé en trois phases (avant utilisation, utilisation et en fin de vie) et dix activités de conception. Comme il a été expliqué précédemment, ces activités n'apportent pas une vision parcimonieuse en termes d'impacts environnementaux et leurs associations par rapport aux trois situations de vie ne nous semblent pas totalement justifiées.

3.2.3 La structuration de l'analyse de l'ensemble produit par les actions à réaliser

La matrice Eco-MAL'IN et l'expression des actions à réaliser permettent de structurer l'analyse du produit en proposant des orientations particulières de conception environnementale. Dans le contexte de séance de créativité, cette approche permet à un groupe de créativité, à partir d'actions prédéfinies, de définir une approche fonctionnelle et environnementale structurée d'analyse du produit.

L'outil (Bombardier, règles d'or) propose une structuration en associant les actions à réaliser à des activités de conception. En revanche, cette structuration ne permet pas de définir une analyse environnementale et fonctionnelle de l'ensemble produit.

4 Conclusion

A travers l'outil «Eco-MAL'IN», nous avons défini une vision parcimonieuse de l'approche environnementale en phases préliminaires de conception. Notre démarche s'est basée sur trois volets : dans le premier volet nous nous sommes intéressés au contexte des phases préliminaires de conception, des séances de créativité et de la description d'un ensemble produit. Dans le deuxième volet, nous avons considéré l'approche globale de l'environnement avec la définition d'une vision parcimonieuse basée sur les axes d'éco-efficacité et les cinq situations du cycle de vie du produit. Dans le troisième volet, nous avons expliqué de manière détaillée l'expression des trente neuf actions à réaliser. Nous avons déterminé ces actions à réaliser à partir de l'analyse de l'ensemble produit. Ces actions proposent des possibilités d'actions en démarche de conception de produit, qui, de façon intrinsèque, permettront d'agir sur l'impact global sur l'environnement.

Une vision critique des actions à réaliser exprimées par la matrice Eco-MAL'IN et celle définie par l'outil (Bombardier, règles d'or) a permis d'appuyer l'approche parcimonieuse proposée.

L'hiérarchisation des actions à réaliser permet de construire une vision exhaustive sur les possibilités de re-conception environnementale du produit et apporte à l'entreprise une vision stratégique (agir sur une situation de vie ou un axe d'éco-efficacité).

CHAPITRE IV : METHODE D'ECO-INNOVATION ECO-MAL'IN

Nous avons montré dans le chapitre 2 qu'il était indispensable de faire évoluer la méthodologie MAL'IN pour orienter les idées de conception générées lors de la phase de recherche de concept et intégrer les contraintes liés au développement durable.

Nous avons structuré, dans le chapitre 3, une vision parcimonieuse de l'approche globale environnementale et de l'ensemble produit permettant au concepteur de faire une pré-analyse environnementale de son produit et qui est aussi exploitable pour amorcer la phase d'analyse, de formalisation d'un problème de conception.

Ce quatrième chapitre est structuré en deux parties :

Dans la première partie, nous allons présenter la mutation de la méthodologie MAL'IN, outil d'aide à l'innovation en un outil d'éco-innovation. L'ensemble des étapes de la méthode Eco-MAL'IN et les outils associés sont aussi commentés et détaillés.

Dans la deuxième partie, nous allons dérouler l'ensemble de la démarche Eco-MAL'IN, en prenant un exemple de produit industriel « le gaufrier ».

À travers trois exemples d'application, nous allons montrer comment utiliser les actions à réaliser de la matrice Eco-MAL'IN pour conduire une démarche d'analyse environnementale d'un produit et accompagner un groupe de créativité dans la structuration, la formalisation et la résolution du problème de conception, jusqu'à la recherche d'idées et concepts éco-innovants.

1 Intégration de la vision environnementale à la méthode MAL'IN

La méthodologie existante développée dans MAL'IN, composée de 4 étapes permet d'analyser et structurer un problème de conception de produit, de le formaliser, de le résoudre et enfin de faire des choix de concept.

La démarche actuelle de MAL'IN permet à partir de l'analyse d'un produit existant d'identifier des concepts innovants de produit. Notre objectif d'étude est d'intégrer la vision environnementale dans la démarche actuelle de MAL'IN et de le faire évoluer vers un outil d'éco-innovation.

L'enjeu est d'enrichir les outils de la méthode sans pour autant allonger le temps nécessaire pour résoudre le problème étudié. Le contenu des outils existants de MAL'IN est évolué en conséquence. Une évolution de la méthodologie MAL'IN, intégrant la vision éco-conception est proposée dans le tableau 32. On peut remarquer que les quatre phases de la méthode sont conservées et que seule une étape préliminaire de pré-analyse est ajoutée. Il s'agit de la matrice Eco-MAL'IN.

Démarche existante MAL'IN	Nouveau outils de la démarche Eco- MAL'IN
0. Pré-analyse	
	La Matrice Eco-MAL'IN : vision simplifiée, structurée et orientée de l'impact environnemental (croisement entre axes d'éco-efficacité et situations de vie du produit)
1. Analyse et structuration du problème	
Analyse fonctionnelle Organigramme technique Moments significatifs Flux fonctionnels Paramètres physiques pertinents	Analyse de trente neuf actions à réaliser Considération des impacts environnementaux Exploration de cinq situations pertinentes du cycle de vie Etude des opportunités du produit (ressources) Fiche de connaissances Structuration du problème de conception
2. Formalisation du problème	
Graphes substance/champs Paramètres pertinents Biais d'attaque	Biais d'attaque à partir de la structuration
3. Résolution du problème	
Les ressources de la théorie TRIZ adaptés par MAL'IN Matrice des contradictions Matrice de séparation Solutions standards Simplification	Ré-écriture des ressources avec la vision développement durable Sélection de paramètres de conception pour certains modèles de problème (action à réaliser)
4. Choix de concepts	
Hybridation et hiérarchisation	Bénéfices environnementaux, court/long terme

Tableau 32: Principales étapes de la méthode MAL'IN et évolutions envisagées pour l'intégration de l'éco-innovation

Dans ce chapitre, nous décrivons l'ensemble des étapes de la méthode Eco-MAL'IN et détaillons tous les outils qui ont été proposés avec l'intégration de la vision environnementale. Nous allons illustrer également l'évolution de cette méthode avec une application sur un produit industriel : « le gaufrier ».

2 La phase de pré-analyse et de structuration

2.1 Déroulement de la phase de pré-analyse

Comme toute phase d'avant projet, une phase préparatoire est essentielle pour étudier, investiguer, diagnostiquer mais aussi cadrer et délimiter les champs d'études et les objectifs d'un projet. Cette étape est importante car elle permet d'orienter la démarche d'innovation vers une vision environnementale de conception et de développement durable.

En phase de pré-analyse, nous proposons de réduire la vision exhaustive de l'approche environnementale et ainsi, définir une vision parcimonieuse de l'environnement et du produit adaptée aux séances de créativité.

Des travaux de recherches (Jones et al, 00) (Jones et al, 01) ont montré qu'il était nécessaire qu'un groupe de créativité puisse s'imprégner d'une vision environnementale globale avant d'entamer une démarche d'éco-innovation. Cette étape est importante, car elle permet de mettre en condition le groupe de créativité pour éco-concevoir. Il est donc impératif d'ajouter

une étape supplémentaire précédant la phase d'analyse du déroulement de la méthodologie d'innovation MAL'IN permettant ainsi d'introduire la vision éco-conception au début de séances de créativité. Cette étape de pré-analyse doit être courte mais efficace sans engendrer des freins psychologiques (ex. présentation d'exemples précis et trop appliqués).

L'enjeu est d'enrichir la méthode existante de MAL'IN sans allonger le temps nécessaire pour la résolution du problème.

D'après nous, la phase de pré-analyse doit exprimer une vision environnementale mais aussi occuper un rôle fédérateur du groupe dans le déroulement de la méthode. Elle doit répondre à deux objectifs :

- Présenter au groupe de créativité une vision parcimonieuse de l'approche environnementale et de l'analyse du produit, afin d'avoir à la fois une vision exhaustive et simplifiée,
- Inscrire cette phase de pré-analyse dans la logique de la méthode MAL'IN, en lien avec la phase d'analyse et de structuration, la phase de formalisation et de résolution de la méthode MAL'IN.
- Afin d'affiner notre approche, nous nous sommes imposés d'autres objectifs :
- Permettre à un groupe de créativité de cibler rapidement des objectifs environnementaux de conception par une vision stratégique, préalablement définis par l'entreprise,
- Pouvoir orienter le groupe vers certains impacts environnementaux par une analyse rapide des ressources de l'ensemble produit,
- Permettre aux concepteurs d'allier les choix de réduire tel ou tel impact environnemental aux répercussions potentielles sur les situations de vie.

A partir de l'ensemble de ces objectifs, la phase de pré-analyse doit :

- D'une part, permettre la structuration de la vision environnementale d'analyse et la définition d'un périmètre d'étude restreint,
- D'autre part, les outils de la phase de pré-analyse doivent s'appuyer sur une vision fonctionnelle facilement exploitable en phase préliminaires de conception.
- Et enfin, ces outils doivent amorcer la phase d'analyse et de structuration d'un problème de conception et faciliter la conduite d'une démarche de conception environnementale pour un groupe de créativité pluridisciplinaire.

La figure 37 illustre la vision des contraintes nécessaires à prendre en compte pour le développement de pré-analyse.

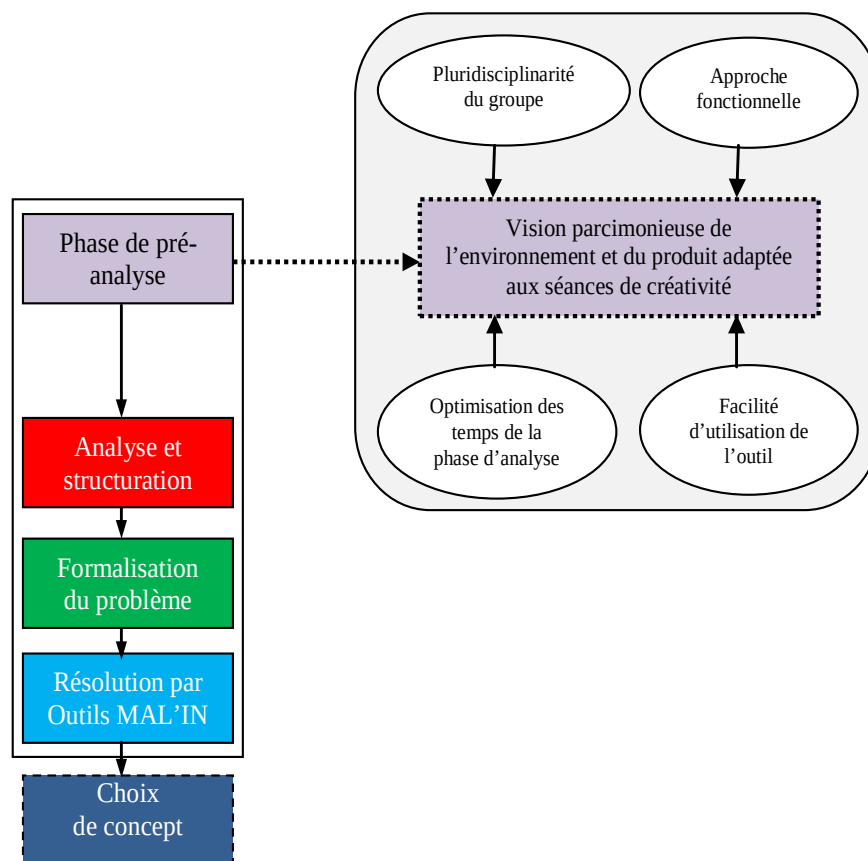


Figure 37: contraintes nécessaires à prendre en compte pour la phase de pré-analyse

2.2 La matrice Eco-MAL'IN

Dans le chapitre 3, nous avons défini une approche parcimonieuse de la vision environnementale et du produit en phase préliminaire de conception. Exprimée par la matrice Eco-MAL'IN et l'ensemble des actions à réaliser, cette approche permet d'apporter une vision simplifiée et structurée de la problématique environnementale complexe et difficile à appréhender dans les projets d'éco-innovation.

La définition de l'ensemble produit a permis aussi de présenter une vision détaillée de ce que représente un produit et tous les flux de consommations et rejets associés à son cycle de vie complet.

Comme il a été expliqué précédemment, la matrice Eco-MAL'IN (tableau 33) à entrées multiples, propose différents objectifs de conception environnementale. Ces objectifs permettent d'agir sur un axe d'éco-efficacité ou d'améliorer une situation particulière de vie du produit.

	Extraction de matière première	Industrialisation	Distribution	Utilisation	Fin de vie
A) Réduire l'influence matérielle	X	X	X	X	X
B) Augmenter l'efficacité énergétique				X	X
C) Eliminer les risques de toxicité		X	X	X	X
D) Améliorer la recyclabilité et la réutilisation				X	X
E) Optimiser l'utilisation des ressources				X	X
F) Augmenter la durée de vie et la désirabilité des produits				X	
G) Augmenter les fonctionnalités et les services			X	X	

Tableau 33 : Relation entre les phases du cycle de vie et les éléments d'éco-efficacité

Le choix d'une ou de plusieurs actions à réaliser est déterminé par les décideurs de l'entreprise ou par le groupe de créativité suite à une analyse rapide de l'ensemble produit. Cette analyse rapide est basée sur six ressources du produit. Nous les considérons comme ressources pertinentes car elles permettent selon le type produit, de cerner et d'élucider les pistes les plus avantageuses de re-conception. Pour ces deux cas, on identifie deux cas distincts:

- Soit l'entreprise a une vision stratégique prédéfinie par rapport à une étude de faisabilité économique, organisationnelle, technique ou des choix de communication sur l'image publique et de la responsabilité sociale.
- Soit l'entreprise souhaite s'engager dans une démarche de conception environnementale, mais sans une orientation préalablement arrêté. Dans ce cas, l'entreprise est en quête d'originalité et de challenge.

Pour la première situation, la démarche de conception est prédéfinie par la stratégie de l'entreprise (réduire un impact environnemental ou améliorer une situation de vie du produit). Il suffit de choisir une ou plusieurs actions à réaliser et d'adapter l'analyse de l'ensemble du produit aux recommandations décrites par l'action.

Pour la deuxième situation, la vision stratégique de l'entreprise est non définie. Il est donc nécessaire de trouver les meilleures orientations environnementales pour la re-conception du produit en question. A cette fin, nous avons sélectionnés six ressources pertinentes pour une analyse rapide de l'ensemble produit.

Ces ressources font partie de la liste de 12 points donnés en annexe 6. Ces ressources sont à analyser rapidement par le groupe en début de la séance de créativité, en vue d'identification des pistes de re-conception du produit les plus profitables pour l'entreprise.

2.3 Les 6 ressources pertinentes

Parmi les 12 points de la liste ressource de la méthode MAL'IN, il nous semble pertinent d'en retenir six : substances, énergies, informations, ressources d'interaction, ressources antérieures et rejets. Le tableau 34 liste ces ressources avec la vision développement durable d'analyse.

Ensemble produit	Expression	Vision développement durable
Substances	Tous les éléments composant le système (produit et produits accessoires) et son environnement : composants, composants d'interaction, milieux extérieurs. Les milieux extérieurs sont donc des ressources.	Nombre de composants, Composants non perdables, fonctionnels, non redondants, non jetables, non toxiques, fragmentables, réutilisables et des composants avec des matériaux recyclables Milieux extérieurs (consommables)
Energies	Tous champs ou flux d'énergie qui existent ou qui sont produits par le système (produit et produits accessoires) et son environnement. <u>Externe à chaque substance</u> Contact (musculaire, mécanique, thermique,...) A distance (gravité, inertie, attractions, sons, induction, rayonnement, lumière, magnétisme,...) <u>Interne à chaque substance</u> Possibilités d'accumulation selon tous les types d'énergie (MATHEM)	Circuit ouvert Circuit fermé : accumulation Energies renouvelables et propres Energies non toxiques
Informations	Toutes les informations existant ou pouvant être produites dans le système (produit et produits accessoires) et son environnement. Toute caractéristique ou changement de caractéristique permettant d'identifier l'évolution d'un phénomène physique pertinent du fonctionnement.	Marquage, aspect, couleur des matériaux Matériau pérenne, biodégradable, renouvelable, recyclable, valorisable, résilient, non énergivore, non corrosif, non toxique Types de fabrication, brut Vieillessement, pérennité de composants Rejets : Odeur, ouïe, vue, couleur, agression, chaleur,...
Ressources d'interaction	Toutes les nouvelles fonctions ou propriétés qui peuvent être obtenues par modification des liaisons entre les composants ou, par modification des composants d'interaction.	Standardisation des composants d'interaction, Composants poly-matériaux vers composants multi-matériaux puis composants dissociables, Composant dissociables, De statique à dynamique pour un meilleur contrôle et un accroissement de l'efficacité, Amélioration des pertes par la maîtrise des interactions, Libre passage de l'énergie.
Ressources antérieures	Toutes les nouvelles propriétés ou caractéristiques du système (produit et produits accessoires) dues à des évolutions antérieures et restées inexploitées	Elimination des surplus de matière, de composants Maîtrise et réduction des flux d'énergie, de matière et de signal
Environnement de l'ensemble produit	Expression	Vision développement durable
Rejets	Tous les rejets du système (produit et produits accessoires) et de son environnement qui peuvent être éliminés, réduites ou employés.	Récupération et élimination des rejets Du circuit ouvert au circuit fermé

Tableau 34 : Les 6 ressources pertinentes

L'analyse des six ressources permet d'identifier les problèmes liés aux matériaux utilisés dans le produit, les énergies existantes ou produites par l'ensemble produit, les interactions entre composants et composants d'interaction, l'architecture du produit, les ressources inexploitées dans l'ensemble produit et les rejets.

La démarche d'analyse de ces ressources peut être qualitative. C'est pour cette raison, en termes d'une analyse rapide, on peut avoir une vision globale sur les potentialités d'évolution de conception de l'ensemble produit étudié.

On a classé ces ressources en deux catégories ; les ressources de l'ensemble produit et celles de l'environnement externes (les rejets) (voir figure 38).

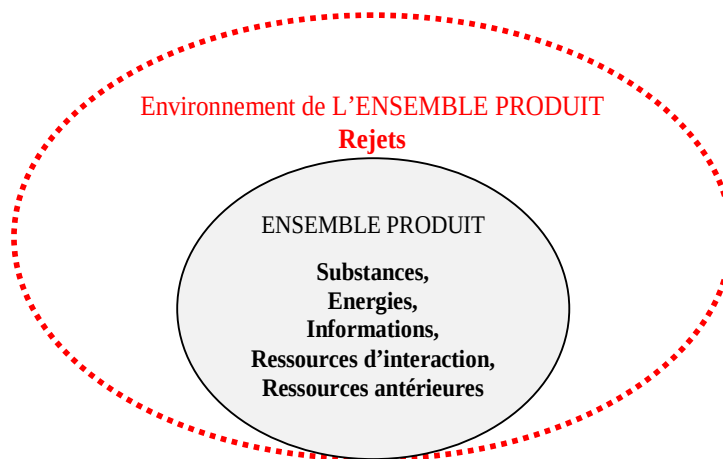


Figure 38 : Les six ressources pertinentes aux choix de pré-analyse

Considérés comme pertinentes pour une analyse rapide de l'ensemble produit, ces ressources permettent d'examiner les points opportuns du produit en vue de sa re-conception. Pour le groupe de créativité, cette première approche d'analyse permet de définir le besoin par rapport à l'ensemble produit étudié et de cibler ensuite la démarche de conception environnementale la plus adaptée.

Dans la phase d'analyse, nous expliquons notre logique pour allier la phase de pré-analyse à la phase d'analyse et de structuration.

3 La phase d'analyse et de structuration

3.1 Analyse fonctionnelle et flux fonctionnels

La phase d'analyse de la méthode est une étape cruciale, il semble évident qu'une mauvaise compréhension du problème à résoudre conduit à une mauvaise formalisation du problème et donc une résolution et des solutions peu appropriés. Les données d'analyse sont d'ordres quantitatifs et/ou qualitatifs.

Dans la méthode MAL'IN, la démarche d'analyse est basée sur une approche organique et structurelle du produit comme le propose les blocs-diagramme fonctionnels. Des paramètres de conception ou des paramètres physiques sont ensuite exprimés afin de structurer le problème et de cerner la zone d'étude par le dysfonctionnement du produit. Les paramètres de conception et les paramètres physiques permettent de caractériser l'évolution des flux fonctionnels du produit et la description des effets produits et des effets induits. L'expression de ces données est nécessaire à la formalisation du modèle de problème étudié ainsi qu'à la phase de résolution et de recherche de concept.

En intégrant la vision environnementale à la méthode MAL'IN, les phases analyse et structuration du problème doivent s'appliquer à l'identification des impacts environnementaux générés par l'ensemble produit. Cette identification est guidée par l'analyse des flux fonctionnels à travers les situations pertinentes du cycle de vie du produit.

La phase d'analyse et de structuration d'un problème de conception nécessite donc une approche particulière et une vision d'analyse préalablement définie et structurée, afin de pallier à l'absence de données claires et identifiées pour le produit.

Les paramètres clés de l'étape d'analyse proposés dans la méthode Eco-MAL'IN sont :

L'étude de l'ensemble produit. Cette étude concerne l'analyse des composants, composants d'interaction et milieux extérieurs du produit et des produits accessoires. Les matériaux, les formes et les agencements des composants et des composants d'interaction sont aussi analysés.

Les flux fonctionnels. On retient trois natures de flux : matière, énergie et signal. L'analyse des flux fonctionnels permet de mettre l'accent sur la consommation de ressources ou les rejets (pertes de matières, d'énergies) causés par le fonctionnement du produit à travers les situations pertinentes du cycle de vie. La caractérisation de ces flux permet d'identifier les solutions adaptées à leur gestion.

Les tableaux d'analyse et de structuration systématique liés aux actions à réaliser. Ces tableaux regroupent les actions à réaliser de la matrice Eco-MAL'IN, les opportunités du produit, des fiches de connaissances et des orientations pour la structuration du problème.

Ces paramètres clés d'analyse sont donc pris en compte par les trente neuf actions à réaliser que nous avons défini dans la matrice Eco-MAL'IN.

En choisissant une action à réaliser parmi les trente neuf de la phase de pré-analyse, l'analyse de l'ensemble produit est conduite par l'étude des opportunités du produit et les fiches de connaissance qui lui sont associées.

La figure 39 illustre la vision de la phase d'analyse et les données résultantes des outils associés à cette phase.

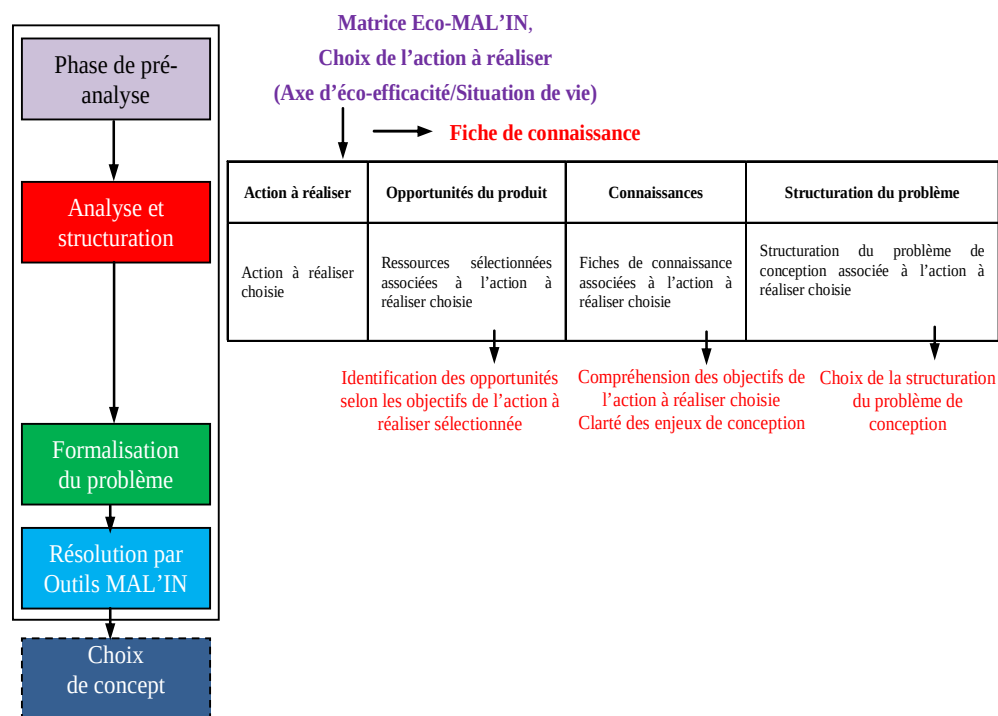


Figure 39 : Données résultantes des outils de la phase d'analyse

A l'issue de cette démarche d'analyse, une structuration du problème de conception adaptée à chaque action à réaliser, est également définie. L'objectif étant d'assister le groupe de créativité dans sa démarche d'analyse depuis le choix de l'action à réaliser jusqu'à la structuration du problème de conception.

3.2 Opportunités du produit

Les opportunités du produit sont des ressources sélectionnées à partir de la fiche ressource MAL'IN. Ces ressources sont spécifiques à chaque action. La sélection de ressources est définie selon les objectifs de conception exprimés par ces actions (efficacité énergétique, rejets de matières, toxicité, etc.). Nous nommons les ressources sélectionnées pour chaque action à réaliser « opportunités du produit », puisque l'on considère que ces ressources sélectionnées sont les plus pertinentes à étudier dans l'analyse de l'ensemble produit, pour une action à réaliser particulière.

A la différence du rôle de la pré-analyse affectée aux six ressources, les ressources sélectionnées pour les opportunités du produit sont exploitées dans la démarche d'analyse et de structuration du problème de conception.

En choisissant une action à réaliser, le groupe de créativité sélectionne les ressources associées à cette action et identifie des opportunités du produit. La définition d'opportunités revient à rechercher dans le produit des capacités internes ou externes, permettant de le faire évoluer selon l'action à réaliser choisie.

3.3 Les fiches de connaissances

Les fiches de connaissances sont aussi associées à chaque action à réaliser. Ces fiches permettent au groupe de créativité de comprendre les objectifs environnementaux définis par chaque action et donc clarifier les besoins d'analyse pour l'ensemble produit. Ces fiches de connaissances sont de types généraux ou particuliers.

Les fiches de connaissances générales : ces fiches présentent des définitions de termes techniques ou de terminologies nouvelles de l'ensemble produit. On trouve aussi des fiches définissant les caractéristiques et propriétés générales de matériaux, de fluides.

D'autres fiches recensant des classes et types de matériaux (matériaux biodégradables, matériaux renouvelables, matériaux interdits, matériaux résilients, etc.) ou des fiches expliquant l'intérêt de la modularité pour la maintenance, le recyclage ou la réutilisation de composants. La figure 40 et la figure 41 est un exemple de fiche de connaissance, de type général. Cette fiche est une description des produits accessoires.



Figure 40 : Fiche de connaissance, description des produits accessoires

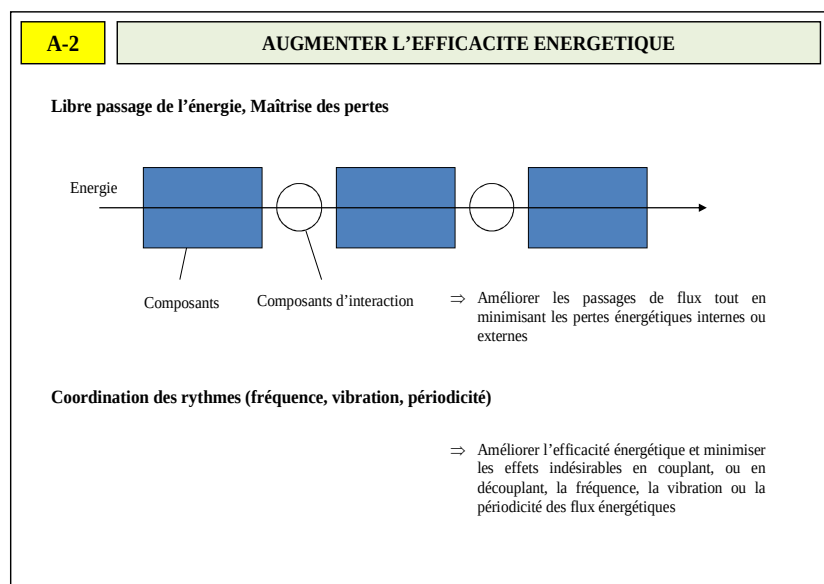


Figure 41 : Fiche de connaissance « Augmenter l'efficacité énergétique ».

Les fiches de connaissances particulières : ces fiches sont adaptées aux objectifs environnementaux exprimés par chaque action à réaliser (figure 42), (figure 43). Ces fiches de connaissances formulent des lignes d'évolution pour une conception des produits peu adaptées à la vision développement durable vers une conception nouvelle de produits, considérant les problèmes de recyclage (ex : le désassemblage de composants et de composants d'interaction, la séparation de matériaux, etc.) et les problèmes de conception liés à l'influence matérielle (ex : le nombre et la masse de composants, les types de consommables ou des rejets, etc.).

On a défini également des fiches de connaissances exprimant des orientations de conception pour pallier aux problèmes énergétiques du produit ou aux risques toxicité pour l'environnement.

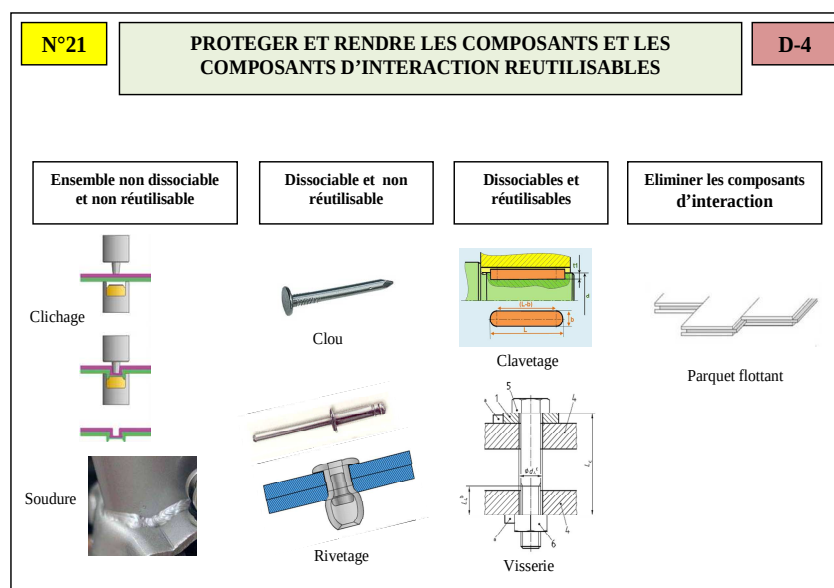


Figure 42 : fiche de connaissance « protéger et rendre les composants d'interaction réutilisables »

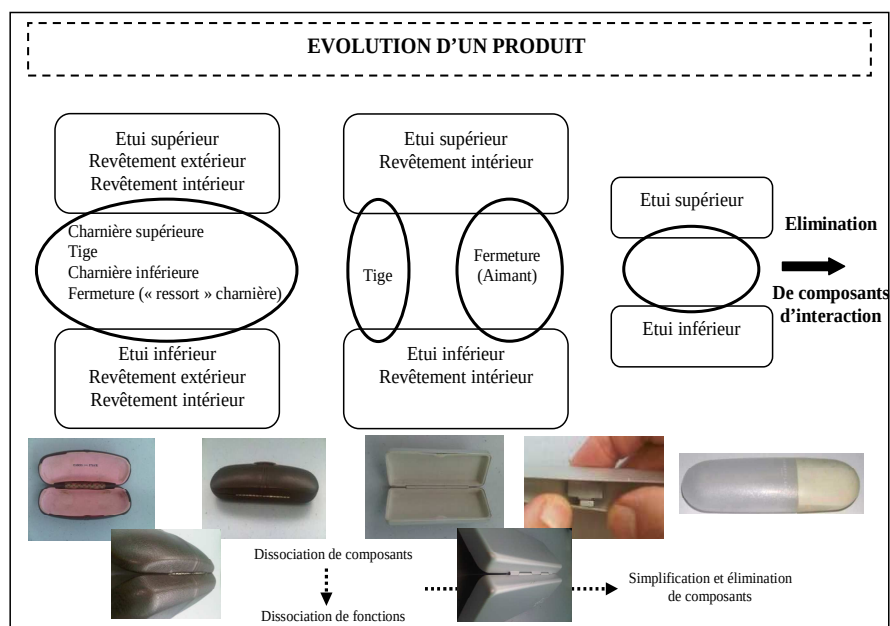


Figure 43 : fiche de connaissance : Evolution d'un produit

Bien d'autres fiches existent et expriment des connaissances particulières. A titre d'exemple, nous avons défini des fiches de connaissances expliquant l'utilisation des ressources du produit en phase d'utilisation et fin de vie et des fiches énumérant les contraintes de conception nécessaires pour un produit utilisé par plusieurs usagers.

Les fiches de connaissances aident le groupe de créativité dans l'analyse de l'ensemble produit et la structuration et la formalisation du problème de conception et peuvent être considérées comme une aide à la créativité dans certains cas de séance de créativité.

3.4 Utilisation des opportunités du produit et des fiches de connaissances

La démarche d'analyse de l'action à réaliser est construite par l'analyse des opportunités du produit et des fiches de connaissances. En associant les opportunités du produit et les fiches de connaissances aux trente neuf actions à réaliser, la réflexion du groupe de créativité sera d'autant enrichie et complétée. Cette approche permet d'affiner le raisonnement du groupe pour l'étude de l'ensemble produit et ainsi, conduire tous le groupe à une même logique d'analyse. Cette démarche prépare et oriente la structuration du problème à résoudre.

L'accompagnement du groupe dans sa démarche d'éco-innovation garantit le bon déroulement de la séance de créativité et limite les risques d'écart par rapport à l'objectif de conception initial. La combinaison et l'intégration du débat du groupe de créativité est privilégiée dans la phase de résolution et de recherche d'idée.

3.5 Structuration du problème

A l'issue de la démarche d'analyse proposée pour chaque action à réaliser (Analyse fonctionnelle de l'ensemble produit, définition des opportunités et fiches de connaissances), nous avons défini une structuration du problème de conception.

Cette structuration tient compte de la description de l'ensemble produit, c'est-à-dire l'analyse de composants, composants d'interaction et milieux extérieurs ainsi que l'analyse des flux fonctionnels, c'est-à-dire l'analyse des champs.

L'analyse des ressources associées à l'action à réaliser et l'utilisation des fiches de connaissances vont conduire le groupe vers la structuration du problème à résoudre.

3.5.1 Les 6 types de structuration

On propose six possibilités de structuration du problème :

- Suppression totale ou partielle de composants
- Suppression totale ou partielle de champs
- Segmentation de composants
- Segmentation de champs
- Ajustement des espaces et évolution des agencements
- Sélection des paramètres de conception

Le choix du groupe de créativité pour une structuration particulière du problème de conception dépend de l'analyse de l'ensemble produit. Pour les cinq premières structurations, le groupe de créativité formalisent son problème par la modification du graphe substances-champs. Par contre, la dernière structuration (la sélection de paramètres de conception) conduit le groupe de créativité à utiliser la matrice des contradictions techniques (TRIZ) ou la matrice des séparations des exigences contradictoires MAL'IN.

Suppression totale ou partielle de composants

La suppression totale ou partielle d'un composant va supprimer toutes les fonctionnalités liées à ce composant ou cette partie du composant. Le graphe substances/champs va donc être modifié. Il va falloir rechercher ensuite comment réaliser les fonctions manquantes. Un ou plusieurs composants du graphe substances/champs pourra satisfaire ou agréer les fonctions manquantes.

Suppression totale ou partielle de champs

La suppression totale ou partielle d'un champ va modifier la réalisation d'une fonction. Il va falloir rechercher ensuite comment réaliser cette fonction. Un ou plusieurs composants du graphe substances/champs pourra satisfaire ou agréer les fonctions non réalisées.

Segmentation de composants

La segmentation d'un composant va affecter toutes les fonctionnalités liées à ce composant. Le graphe substances/champs va donc être modifié. Il va falloir rechercher ensuite comment mieux réaliser les fonctions affectées. Un ou plusieurs composants du graphe substances/champs pourra satisfaire ou agréer les fonctions affectées.

Segmentation de champs

La segmentation d'un champ va modifier la réalisation d'une fonction. Cela consiste à rechercher ensuite comment mieux réaliser cette fonction. Un ou plusieurs composants du graphe substances/champs pourra satisfaire ou agréer les fonctions non réalisées.

Ajustement des espaces et évolution des agencements de composants

L'ajustement des espaces peut modifier des fonctionnalités liées aux espaces ajustés (volumes réduits, emboîtés). Le graphe substances/champs va donc évoluer. Il est nécessaire de rechercher ensuite comment mieux réaliser les fonctions affectées. Un ou plusieurs composants du graphe substances/champs pourra satisfaire ou agréer les fonctions affectées. Le changement de position des composants va induire de nouvelles interactions. Les champs induits qui en résultent vont modifier le graphe substances/champs. Des contradictions peuvent en résulter.

Sélection des paramètres de conception

Les paramètres de conception proposés sont sélectionnés en fonction de l'action à réaliser. Leur évolution va générer des dysfonctionnements que l'on va observer à partir de l'évolution des flux fonctionnels. L'écriture des lois de conservation va permettre d'identifier des contradictions liées à cette évolution.

3.5.2 Les tableaux d'analyse

Dans le but d'apporter une représentation cohérente, nous avons déterminés sept tableaux d'analyse. Chaque tableau représente un axe d'éco-efficacité. La première colonne du tableau regroupe les situations de vie impactées. La deuxième colonne définit les actions à réaliser associés à ces situations de vie. La troisième et la quatrième colonne associent chaque action à réaliser à des opportunités du produit et des fiches de connaissances.

Ces quatre premières colonnes définissent la démarche d'analyse d'un problème de conception. La dernière colonne résulte des objectifs environnementaux proposés pour chaque action et précise des structurations possibles du problème.

• 1er axe d'éco-efficacité « Réduire l'influence matérielle »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Opportunités du produit	Connaissances	Structuration du problème
Extraction de MP	1) Réduire le nombre, la masse, le volume des composants, des composants d'interaction du produit	Substances, espace, self-service, ressources d'interaction, ressources organisationnelles, ressources antérieures		Suppression totale ou partielle de composants Ajustement des espaces et évolution des agencements
Industrialisation	2) Optimiser la conception de l'ensemble produit pour réduire, éliminer les chutes de fabrication	Espace, temps, ressources interaction, ressources organisationnelles	Fiche de procédés d'industrialisation causant moins de chute de fabrication (échelle de qualification des procédés)	Sélection des paramètres de conception (masse, volume, surface, longueur, quantité de substance, précision de l'usinage, usinabilité.)
Distribution	3) Optimiser l'ensemble produit pour minimiser les rejets lors de la distribution	Substances, temps, rejets	Fiche énumérant les rejets et les consommables imposés par l'ensemble produit dans la phase de distribution.	Segmentation de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements
Utilisation	4) Favoriser l'utilisation de composants et de composants d'interactions non perdables	Substances, information		Suppression totale ou partielle de composants Ajustement des espaces et évolution des agencements
	5) Modifier les composants et les composants d'interaction afin de minimiser l'utilisation de consommables	Substances, espace, temps, ressources interactions, ressources organisationnelles, ressources antérieures	Fiche de consommables du produit dans la phase d'utilisation (consommables nécessaires ou induits par le fonctionnement)	Segmentation de composants Ajustement des espaces et évolution des agencements Sélection des paramètres de conception (surface, contrainte, pression, gaspillage de substances, pertes de temps.)
	6) Réduire, éliminer, réutiliser (circuit fermé) les rejets du produit	Espace, temps, ressources interaction, ressources organisationnelles	Fiche énumérant les rejets du produit dans la phase utilisation	Suppression totale ou partielle de champs Segmentation de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements Sélection des paramètres de conception (gaspillage de substances, pertes d'informations)
Fin de vie	7) Simplifier, optimiser, ajuster ou éliminer les produits accessoires	Substances, espace, self-service, ressources d'interaction, ressources organisationnelles, ressources antérieures	Fiche illustrant les types de produits accessoires selon les SDV : • complexe (nombre/quantité de matière, volume) • ou simple (mono-matériau, forme minimaliste, ajusté au produit)	Suppression totale ou partielle de composants Ajustement des espaces et évolution des agencements Sélection des paramètres de conception (masse, volume, surface, longueur.)
	8) Favoriser l'utilisation des matériaux auto-biodégradable, biodégradables, renouvelables	Substances, information	Fiche de matériaux auto-biodégradables, biodégradables, renouvelables	Suppression totale ou partielle de composants

Tableau 35: Réduire l'influence matérielle : analyse et structuration des actions à réaliser

• 2^{ème} axe d'éco-efficacité « Augmenter l'efficacité énergétique »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Opportunités du produit	Connaissances	Structuration du problème
Utilisation	9) Faire évoluer des champs, substituer des champs, améliorer leur contrôlabilité	Energie, ressources d'interaction, ressources organisationnelles, ressources différentielles	Fiche illustrant l'évolution des champs (MATHEM), loi 7	Segmentation de champs Sélection des paramètres de conception (énergie dépensée par l'entité mobile, énergie dépensé par l'entité immobile, gaspillage d'énergie, force, température, contrainte, pression)
	10) Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements	Substances, énergie, ressources d'interaction, ressources organisationnelles, ressources différentielles	Fiche expliquant les facteurs agissant sur l'efficacité énergétique d'un flux fonctionnels (énergie de déformation, pertes de transfert, rétention de fluides, réutilisation de flux d'énergie, état du système, etc.)	Segmentation de composants Ajustement des espaces et évolution des agencements Sélection des paramètres de conception (volume, surface, longueur, force, contrainte, pression)
	11) Réduire, maîtriser les interactions entre les composants et composants d'interaction, afin de minimiser les pertes d'énergie	Temps, ressources d'interaction	Fiche expliquant les facteurs de pertes d'énergie en phase d'utilisation (changement de milieux et état du système, les paramètres (variables d'état) et la vitesse, la cadence et l'évolution d'une action) • Interaction entre les composants du système (ex : frottement) • Interaction entre le système et le ME (ex : déperdition de chaleur)	Segmentation de composants Suppression totale ou partielle de composants Ajustement des espaces et évolution des agencements Sélection des paramètres de conception volume, surface, longueur, force, contrainte, pression, gaspillage d'énergie.)
	12) Réutiliser (circuit fermé) les énergies rejetées ou perdues au cours du fonctionnement	Energie, ressources fonctionnelles, self-service, ressources organisationnelles, ressources différentielles, rejets	Fiche de différents milieux, de paramètres (variables d'état) illustrant des exemples d'accumulation, de transfert et de transformation d'énergie dans le temps ou dans l'espace	Segmentation de champs Sélection des paramètres de conception (énergie dépensée par l'entité mobile, énergie dépensé par l'entité immobile, gaspillage d'énergie, force, température, contrainte, pression)
Fin de vie	13) Permettre la récupération des énergies accumulées	Energie, espace	Fiche illustrant les types d'énergies accumulées (PCI, Energie rayonnement, Energie électrique) dans un produit en fin de vie	Segmentation de composants Segmentation de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements

Tableau 36 : Augmenter l'efficacité énergétique : analyse et structuration des actions à réaliser

• 3^{ème} axe d'éco-efficacité « Réduire les risques de toxicité »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Opportunités du produit	Connaissances	Structuration du problème
Industrialisation	14) Permettre par la conception d'éliminer les rejets toxiques de l'ensemble produit, ainsi que leurs interférences	Self-service, ressources interactions, ressources organisationnelles	Fiche énumérant les risques de toxicité dans la phase industrialisation	Suppression totale ou partielle de champs
Distribution	15) Permettre la stabilité ou la contrôlabilité des flux de matériaux et énergie toxiques et de leurs interférences	Ressources interactions, ressources organisationnelles, ressources différentielles	Fiche énumérant les risques de toxicité dans la phase de distribution	Suppression totale ou partielle de champs Segmentation de champs Sélection des paramètres de conception (contrainte, pression, température, stabilité de l'entité)
Utilisation	16) Eliminer les matériaux interdits	self-service, ressources interactions, ressources organisationnelles	Liste de matériaux interdits, ou cas de toxicité causé par l'interférence entre matériaux en particulier	Suppression totale ou partielle de composants Ajustement des espaces et évolution des agencements
	17) Eliminer ou réduire la quantité des flux énergétiques toxiques du produit et leurs interférences	Energie, espace, ressources interactions, ressources organisationnelles, ressources différentielles	Fiche de flux énergétiques toxiques (rayonnement radioactif, etc.), ou cas de toxicité causé par l'interférence entre flux énergétiques en particulier Fiche illustrant l'évolution d'un flux toxique (contamination, transfert, amplification de la toxicité du flux)	Suppression totale ou partielle de champs Segmentation de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements
	18) Rendre inertes, passifs tous les rejets toxiques du produit	Temps, self-service, ressources fonctionnelles, ressources différentielles	Fiche qualifiant les rejets toxiques (rejets quantifiés, dispersés, dissipés, non quantifiés) Fiche de matériaux ou énergies capable de stabiliser, éliminer ou neutraliser des flux de matériaux ou énergies toxiques	Suppression totale ou partielle de champs Segmentation de champs Sélection des paramètres de conception (gaspillage de substances, gaspillage d'énergie, facteurs nuisibles induits)
	19) Permettre la stabilité ou la contrôlabilité des flux de matériaux et énergie toxiques et de leurs interférences	Ressources interactions, ressources organisationnelles, ressources différentielles	Fiche énumérant les risques de toxicité dans la phase d'utilisation	Suppression totale ou partielle de champs Segmentation de champs Sélection des paramètres de conception (gaspillage de substances, gaspillage d'énergie, facteurs nuisibles induits, degré d'automatisation)
Fin de vie	20) Permettre la rétention, la localisation et l'identification des composants toxiques pour la récupération	Substance, énergie, espace, ressources fonctionnelles, self-service, ressources organisationnelles	Fiche de marquage de matériaux toxiques Fiche sur les écoulements et le comportement des fluides (gaz, liquide) dans différents milieux (solide, liquide, gaz)	Segmentation de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements

Tableau 37 : Réduire les risques de toxicité : analyse et structuration des actions à réaliser

• 4^{ème} axe d'éco-efficacité « Améliorer la recyclabilité et la réutilisation »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Opportunités du produit	Connaissances	Structuration du problème
Utilisation	21) Protéger et rendre les composants et les composants d'interaction réutilisables	Informations, espace, self-service, ressources d'interaction, ressources organisationnelles	Fiche listant les effets produits et induits selon des exemples d'interactions de composants et de composants d'interaction	Suppression totale ou partielle de composants Suppression totale ou partielle de champs Sélection des paramètres de conception (volume, surface, longueur, force, contrainte, pression)
	22) Permettre la rétention, le stockage et l'accessibilité des consommables du produit	Espace, self-service, ressources d'interaction, ressources organisationnelles, ressources différentielles	Fiche de consommables dans la phase d'utilisation (consommables nécessaires ou induits par le fonctionnement) Fiche sur les écoulements et le comportement des fluides (gaz, liquide) dans différents milieux (solide, liquide, gaz) Milieux capillaroporeux	Segmentation de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements
Fin de vie	23) Agir sur la géométrie des composants et des composants d'interactions de l'ensemble produit pour diminuer les volumes à recycler	Self-service, espace, ressources fonctionnelles, ressources interactions, ressources organisationnelles, ressources différentielles	Fiche expliquant l'intérêt de la rétraction du volume de l'ensemble produit pour le recyclage (manipulation, transport, stockage, etc....) et les facteurs à considérer pour favoriser le changement d'état du système du produit (matériau, forme, Ro)	Suppression totale ou partielle de composants Segmentation de composants Ajustement des espaces et évolution des agencements
	24) Utiliser des composants et des composants d'interaction recyclables, valorisables et réutilisables	Substances, self-service informations	Fiche de matériaux recyclables, valorisables	Suppression totale ou partielle de composants
	25) Eliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux	Substances, self-service, ressources d'interaction, ressources organisationnelles	Intérêt des multi-matériaux dissociables (mono-matériaux)	Segmentation de composants Suppression totale ou partielle de composants
	26) Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction	Informations, ressources interactions, ressources organisationnelles, ressources différentielles	Fiche de composants d'interaction standard	Suppression totale ou partielle de composants Sélection des paramètres de conception (volume, surface, longueur, force, contrainte, pression, stabilité de l'entité)

Tableau 38 : Améliorer la recyclabilité et la réutilisation : analyse et structuration des actions à réaliser

- 5^{ème} axe d'éco-efficacité « Optimiser l'utilisation des ressources »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Opportunités du produit	Connaissances	Structuration du problème
Utilisation	27) Favoriser l'utilisation des énergies renouvelables	Energie, ressources fonctionnelles	Fiche des énergies renouvelables	Suppression totale ou partielle de champs
	28) Optimiser l'utilisation des ressources du produit et de son milieu extérieur, en favorisant les ressources durables	Substances, énergie, informations, espace, temps, ressources fonctionnement, self-service, ressources d'interaction, ressources organisationnelles, ressources différentielles, ressources antérieures, rejets	Qualification des ressources du produit dans une vision développement durable	Segmentation de composants Segmentation de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements
Fin de vie	29) Optimiser l'utilisation des ressources de l'ensemble produit par la rétention, la localisation et l'identification des composants pour la récupération	Substance, information, espace, self-service, ressources organisationnelles, ressources différentielles	Qualification des ressources de l'ensemble produit dans une vision de recyclabilité (identification, démontage, etc.) Fiche illustrant les types d'énergies accumulées (PCI, Energie rayonnement, Energie électrique) dans un produit en fin de vie	Segmentation de composants Segmentation de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements Sélection des paramètres de conception (volume, surface, longueur)

Tableau 39 : Optimiser l'utilisation des ressources : analyse et structuration des actions à réaliser

- 6^{ème} axe d'éco-efficacité « Augmenter la durée de vie et l'estime de l'ensemble produit »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Opportunités du produit	Connaissances	Structuration du problème
Utilisation	30) Améliorer la pérennité des composants par l'évolution de leurs structures	Substances, informations, ressources interactions, ressources organisationnelles	Fiche expliquant l'intérêt de la flexibilité des interactions dans la pérennité des composants et composants d'interactions, ainsi, que les facteurs à considérer (matériau, RI, Ro)	Segmentation de composants Ajustement des espaces et évolution des agencements Sélection des paramètres de conception (surface, volume, forme, contrainte, pression, résistance, stabilité de l'entité)
	31) Améliorer la pérennité des composants par l'évolution des caractéristiques des matériaux	Substances, informations, self-service	Fiche de matériaux résilients, anti-corrosion	Segmentation de composants Suppression totale ou partielle de champs Sélection des paramètres de conception (surface, résistance, stabilité de l'entité, facteurs nuisibles agissant sur l'entité)
	32) Maîtriser l'état et l'agencement des composants et des composants d'interaction du produit au cours de son fonctionnement	Informations, espace, self-service, ressources d'interaction, ressources organisationnelles, ressources différentielles	Fiche illustrant les types d'interactions entre composants, composants d'interaction et le ME • Interaction entre les composants du système (ex : frottement, usure) • Interaction entre le système et le ME (ex : corrosion)	Segmentation de composants Suppression totale ou partielle de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements Sélection des paramètres de conception (contrainte, pression, résistance, longévité d'une entité mobile, longévité d'une entité immobile, stabilité de l'entité)
	33) Optimiser la maintenance	Substances, informations, temps, ressources fonctionnelles, ressources organisationnelles	Fiche expliquant l'intérêt de la modularité pour la maintenance Fiche listant les types de consommables dans la phase utilisation, en expliquant leurs intérêts dans la durée de vie d'un produit	Segmentation de composants Ajustement des espaces et évolution des agencements Sélection des paramètres de conception (résistance, longévité d'une entité mobile, longévité d'une entité immobile, stabilité de l'entité, aptitude à la réparation, facteurs nuisibles agissant sur l'entité)
	34) Permettre la personnalisation de l'ensemble produit	Information, espace, temps, ressources interactions, ressources organisationnelles, rejets	Fiche expliquant l'intérêt de la personnalisation du produit (fonction d'estime, cadre sociétale) • Personnalisation du produit pour l'utilisateur (évolution dans le temps ou selon le ME) • Adaptation de l'interface au cadre sociétale	Segmentation de composants Ajustement des espaces et évolution des agencements

Tableau 40 : Augmenter la durée de vie et l'estime de l'ensemble produit : analyse et structuration des actions à réaliser

- 7^{ème} axe d'éco-efficacité « Augmenter les fonctions et les services »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Opportunités du produit	Connaissances	Structuration du problème
Distribution	35) Intégrer à l'ensemble produit des fonctions améliorant la phase distribution	Substances, énergie, espace, temps, self-service, ressources différentielles	Qualification des ressources de l'ensemble produit dans une vision d'augmentation de fonction (fonctions liées aux variables d'état de l'environnement)	Segmentation de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements
Utilisation	36) Intégrer à l'ensemble produit des fonctions améliorant la phase d'utilisation	Energie, informations, espace, ressources fonctionnement, ressources interactions, ressources organisationnelle, ressources antérieures	Fiche illustrant les possibilités d'évolution des fonctions d'un ensemble de produit - Evolution du service rendu par le produit (fonctions interne ou externe au système du produit) - Evolution de fonctions du produit dans le temps et/ou dans l'espace	Segmentation de composants Segmentation de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements
	37) Agir sur l'interface produit / utilisateur	Substances, énergie, informations, self-service, ressources différentielles		Segmentation de composants Segmentation de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements
	38) Augmenter la sûreté de fonctionnement (maintenabilité, fiabilité, sécurité, disponibilité) et l'adaptabilité pour rendre le produit accessible à plusieurs utilisateurs	Substances, temps, ressources fonctionnement, ressources organisationnelle	Fiche expliquant la sûreté de fonctionnement (cours JPN) Liste de contraintes de conception pour un ensemble de produit partagé par plusieurs utilisateurs (durée de vie, élimination des risques de toxicité, maîtrise de la consommation d'énergie, aptitude à la réparation, facile d'utilisation, etc.)	Suppression totale ou partielle de champs Suppression totale ou partielle de composants Segmentation de composants Segmentation de champs Ajustement des espaces et évolution des agencements
	39) Intégrer tout ou partie des fonctions du produit dans les milieux environnants	Substances, énergie, informations, espace, temps, ressources fonctionnement, self-service, ressources d'interaction, ressources organisationnelles, ressources différentielles, ressources antérieures, rejets	Fiche expliquant le diagramme Pieuvre (fonctions de service, fonctions de contraintes), et la possibilité de migration du produit vers les milieux extérieurs	Suppression totale ou partielle de champs

Tableau 41 : Augmenter les fonctions et les services : analyse et structuration des actions à réaliser

4 La formalisation

4.1 La formalisation actuelle

La formalisation est une étape importante dans la méthodologie MAL'IN. Elle fait émerger les différents biais d'attaques du problème. Ces biais proviennent de deux structurations initiales du problème :

- les phénomènes physiques pertinents du problème, l'expression des lois de conservation de l'énergie et leur analyse en fonction des attentes selon les situations de vie,
- les graphes substances/champs et leurs interprétations

L'analyse de ces deux structurations conduit à l'expression des biais d'attaque résolubles avec les outils de résolution TRIZ ou ceux adaptés par la méthode MAL'IN.

4.2 La formalisation par la méthode Eco-MAL'IN

La formalisation Eco-MAL'IN se fait à partir du choix de structuration effectué dans la phase précédente. Elle va conduire aux biais d'attaque définis ci-après. Ces biais d'attaque vont permettre ensuite la sélection des outils de résolution.

Biais d'attaque : Suppression totale ou partielle de composants

Le composant ou la partie du composant supprimé ne va plus apparaître dans le graphe substances/champs. C'est un cas classique qui correspond à la logique de simplification du graphe. Il va falloir rechercher comment réaliser les champs utiles liés à ce composant ou à cette partie de composant supprimé. La meilleure solution est qu'un composant existant (ressource substance) assure la ou les fonctions disparues. Si ce ne peut être le cas, alors on va résoudre le problème par les solutions standard et utiliser le logigramme MAL'IN.

Biais d'attaque : Suppression totale ou partielle de champs

Le champ ou la partie du champ supprimé ne va plus apparaître dans le graphe substances/champs. Il va falloir rechercher comment réaliser la fonction liée au champ ou à cette partie de champ supprimé. La meilleure solution est qu'un composant existant (ressource substance) assure la ou les fonctions disparues par le champ supprimé. Si ce ne peut être le cas, alors on va résoudre le problème par les solutions standard et utiliser le logigramme MAL'IN.

Biais d'attaque : Segmentation de composants

La segmentation d'un composant va rajouter des substances au graphe substances/champs. Des champs vont changer, soit ils vont devenir insuffisants soit il va y avoir de nouveaux champs. La présence de champs insuffisants peut conduire, par leur traitement, à l'expression de contradictions techniques ou physiques. Si ce n'est pas le cas, alors on recherchera l'amélioration par les solutions standard et l'utilisation du logigramme MAL'IN.

Biais d'attaque : Segmentation de champs

La segmentation de champs va rajouter des champs au graphe substances/champs. Les champs vont changer, soit ils vont devenir insuffisants soit il va y avoir de nouveaux champs. La présence de champs insuffisants peut conduire, par leur traitement, à l'expression de contradictions techniques ou physiques. Si ce n'est pas le cas, alors on recherchera l'amélioration par les solutions standard et l'utilisation du logigramme MAL'IN.

Biais d'attaque : Ajustement des espaces et évolution des agencements

Les nouvelles interactions liées à l'ajustement des espaces choisies ou aux changements de position des composants génèrent des champs induits. Ces champs peuvent avoir des effets nuisibles. Le traitement de ces effets va permettre d'exprimer des biais d'attaque sous forme de contradictions.

Biais d'attaque : Sélection des paramètres de conception

Nous proposons des paramètres de conception pertinents de l'action à réaliser. Ceux-ci seront directement ou indirectement présents dans les modèles issus des phénomènes physiques associés à la description du nouveau dysfonctionnement. On pourra alors exprimer des contradictions physiques ou des contradictions techniques par l'analyse de l'influence des paramètres pertinents à partir des modèles physiques.

5 La résolution

5.1 La résolution actuelle

La résolution fait appel aux outils de résolution TRIZ ou ceux adaptés par la méthode MAL'IN. La résolution d'un problème de conception découle d'outils de résolution distincts :

- L'outil « ressources » permet de générer des idées de solutions innovantes en rapport avec ces ressources disponibles dans l'ensemble produit.
- La matrice des contradictions techniques (TRIZ) ou la matrice des séparations des exigences contradictoires MAL'IN (annexe 1).
- Le logigramme de choix de solutions standards.
- La simplification et l'élimination de substances.

Tous ces outils abordent différemment la démarche de résolution du problème et permettent de générer des concepts innovants de produit. L'expression de biais d'attaque par la formulation de contradictions nous dirige vers les principes d'innovation de la théorie TRIZ. Tandis que le logigramme de choix de solutions standards consiste à orienter le problème de conception vers des classes ou sous classes de solutions standards. La résolution du problème par la simplification et l'élimination de substances suppose la reconstruction des associations incomplètes ou insatisfaisantes entre substances.

5.2 La résolution par la Méthode Eco-MAL'IN

L'adaptation des outils de résolution à la vision développement durable, ne concerne que l'outil « Ressources ». Déjà adaptée par MAL'IN, ces ressources, sont revues dans une vision d'éco-innovation (annexe 7). Les autres outils de résolution restent inchangés. Seule l'interprétation des biais d'attaque ou des solutions standards par le groupe de créativité est orientée vers des idées de solutions de conception environnementale.

6 Récapitulatif de la méthode Eco-MAL'IN

Notre approche d'étude concerne l'intégration de la vision environnementale dans la démarche actuelle de MAL'IN, et l'évolution de l'outil existant vers un outil d'éco-innovation. La méthodologie nouvelle proposée dans Eco-MAL'IN, est composée de cinq étapes : une phase de pré-analyse, une phase d'analyse et de structuration du problème, une phase de formalisation, une phase de résolution du problème et une phase pour le choix de concept. La figure 44 présente le synoptique proposé de la méthode « Eco-MAL'IN » avec le détail des outils mis en place.

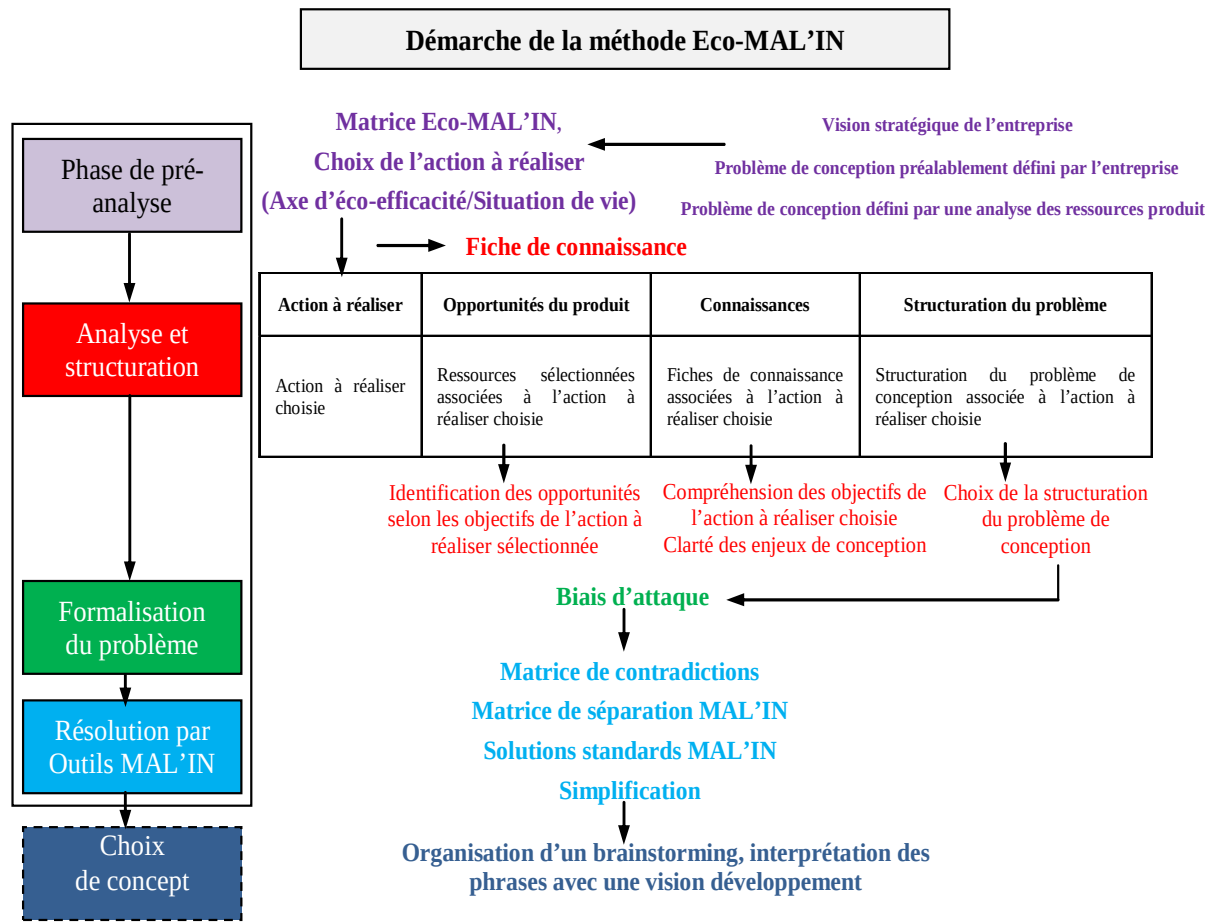


Figure 44 : Synoptique Eco-MAL'IN

7 Qualification de l'outil Eco-MAL'IN, application de la méthode sur un produit industriel « le gaufrier »

L'analyse conduite sur le gaufrier, amorcée dans le chapitre 2, montre qu'il est impératif de le faire évoluer selon deux axes préférentiels :

- l'axe D : Améliorer la recyclabilité et la réutilisation. Pour cet axe, deux évolutions du gaufrier sont proposées. La première s'attèle à la re-conception des composants poly-matériaux des plaques de cuisson. La seconde concerne le démontage qui représente une phase complexe et doit donc être repensé pour faciliter le recyclage en fin de vie.
- et l'axe B : Augmenter l'efficacité énergétique. Pour cet axe, nous allons poursuivre l'étude des pertes énergétiques du gaufrier amorcée dans le chapitre 2. Cette évolution permettra de comparer la méthode MAL'IN et la méthode Eco-MAL'IN.

7.1 1^{ère} application : problème de conception préalablement défini

7.1.1 Phase de pré-analyse

Par une simple recherche du terme « composant poly-matériaux » dans la matrice Eco-MAL'IN, on trouve l'action à réaliser concernée par l'analyse des composants poly-matériaux. Il s'agit de l'action : « *Éliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux* ». Cette action fait partie de l'axe d'éco-efficacité : « Améliorer la recyclabilité et la réutilisation ». Elle impacte la situation de vie « fin de vie ».

En considérant les objectifs décrits par cette action, il est nécessaire en premier abord d'apporter de la connaissance générale sur les composants poly-matériaux, multi-matériaux et mono-matériau donné en figure 45.

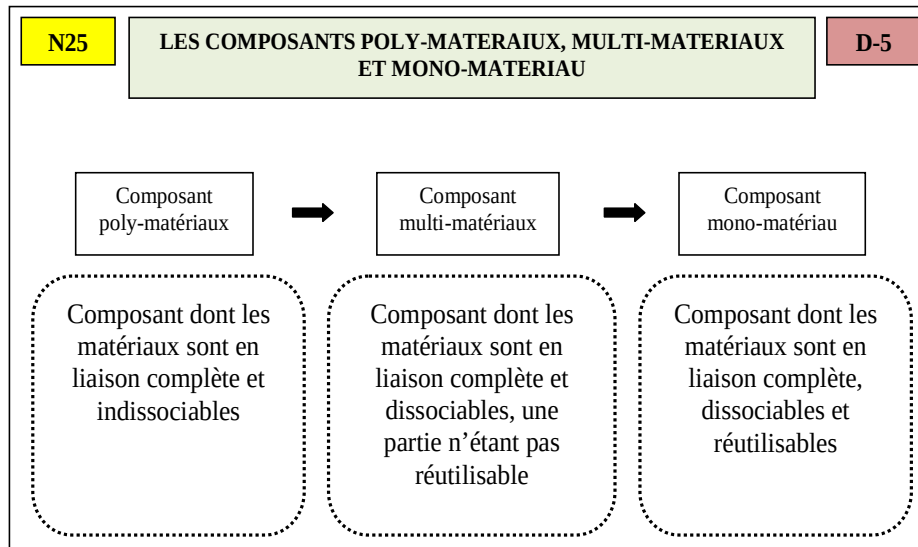


Figure 45 : Fiche de connaissance particulière 1, action à réaliser «éliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux»

Nous présentons le synoptique du déroulement de la méthode Eco-MAL'IN correspondant à cette première application donnée en figure 46.

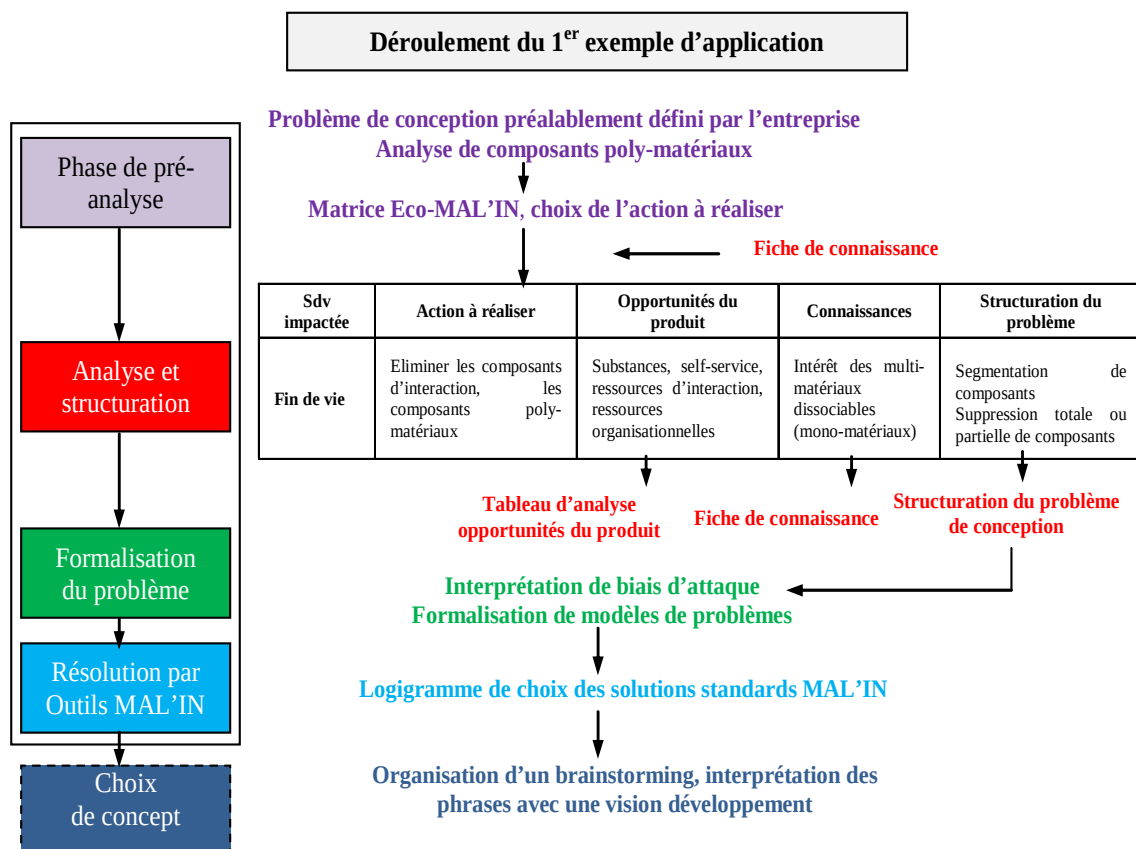


Figure 46 : Déroulement de la première application avec le détail des outils utilisés

Notre démarche d'analyse s'appuie directement sur le tableau d'analyse et structuration du problème associé à l'action « *Éliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux* ».

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Opportunités du produit	Connaissances	Structuration du problème
Fin de vie	Éliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux	Substances, self-service, ressources d'interaction, ressources organisationnelles	Intérêt des multi-matériaux dissociables (mono-matériaux)	Segmentation de composants Suppression totale ou partielle de composants

Tableau 42 : « *Éliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux* » : démarche d'analyse et de structuration

Cette démarche d'analyse structurée fait émerger des opportunités de conception à travers l'analyse des ressources disponibles dans l'ensemble produit et présentées dans le tableau ci-dessus. A travers les fiches de connaissances, le groupe de créativité définit des possibilités d'évolution du produit et identifie aussi des limites de re-conception. Enfin, la structuration du problème conduit le groupe de créativité vers une formalisation de son problème de conception.

7.1.2 Phase d'analyse et de structuration

La plaque de cuisson 1 et 2 sont deux composants poly-matériaux. Chaque plaque de cuisson est formée par une plaque en aluminium et un revêtement anti-adhérent. La figure 47 représente les flux fonctionnels associés à la plaque de cuisson. Cette figure correspond à une partie du graphe substances-champs présenté dans le chapitre 2.



Figure 47 : Graphe substances-champs initial

La recyclabilité de la plaque de cuisson n'est pas possible, sachant que la plaque en aluminium et le revêtement anti-adhérent sont en liaison complète et indissociables. La figure 48 donne une vue en détail de la plaque de cuisson. Le passage d'un composant poly-matériaux à un composant mono-matériau suppose la séparation et la dissociation des matériaux. Afin de pouvoir considérer les fonctions de ces matériaux séparément, l'approche fonctionnelle est nécessaire dans la phase d'analyse.



Figure 48 : Vue de détail de la plaque de cuisson

Opportunités du produit

La recherche d'opportunités du produit est fondée sur l'analyse des ressources disponibles. Pour l'action à réaliser « *Eliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux* », on retient les substances, le self-service, les ressources d'interaction et les ressources organisationnelles.

La vision développement durable de ces ressources sélectionnées (Annexe 7) intègre la logique environnementale à la démarche d'analyse de l'ensemble produit. Le tableau 43 liste les ressources sélectionnées, la vision développement durable qui lui sont associés ainsi que les opportunités du produit exprimées par le groupe de créativité.

Ressources sélectionnées par l'action à réaliser	Vision développement durable des ressources sélectionnées	Opportunités du produit
Substances Tous les éléments composant le système (produit et produits accessoires) et son environnement : composants, composants d'interaction, milieux extérieurs. Les milieux extérieurs sont donc des ressources	Nombre de composants, Composants non perdables, fonctionnels, non redondants, non jetables, non toxiques, fragmentables, réutilisables et des composants avec des matériaux recyclables. Milieux extérieurs (consommables)	Plaque de cuisson : aluminium + revêtement Milieu extérieur pâte
Self-service Toutes les propriétés ou caractéristiques non exploitées : Propriétés physiques des matériaux et de leurs interactions Propriétés chimiques des matériaux et de leurs interactions Propriétés géométriques des composants et de leurs interactions.	Formation de rejets ou pertes d'énergie, Flottabilité (matériau et forme) pour le recyclage, Densité de fluides pour le recyclage, Thermoplasticité pour le recyclage, Rétention de fluides (porosité, perméabilité, granulométrie), Mélanges miscibles, non miscibles. Opacité et transparence (confinement de composants) Possibilité de réutilisation.	<u>Physiques :</u> Plaque aluminium : ductilité, conduction de l'électricité, conduction thermique Revêtement : isolation thermique, surface non poreuse <u>Géométrique :</u> Formes démoulables <u>Chimique :</u> Pâte non adhérente
Ressources interactions Toutes les nouvelles fonctions ou propriétés qui peuvent être obtenues par modification des liaisons entre les composants ou, par modification des composants d'interaction.	Standardisation des composants d'interaction, Composants poly-matériaux vers composants multi-matériaux puis composants dissociables, Composant dissociables, De statique à dynamique pour un meilleur contrôle et un accroissement de l'efficacité, Amélioration des pertes par la maîtrise des interactions, Libre passage de l'énergie.	Composants poly-matériaux vers composants multi-matériaux puis composants dissociables, Composant dissociables : modification liaison plaque/revêtement, liaison revêtement/pâte
Ressources organisationnelles Tous les nouveaux agencements des composants ou des blocs fonctionnels permettant de nouvelles fonctions, de nouveaux comportements ou l'utilisation des ressources du système (produit et produits accessoires) et de son environnement.	Optimisation des ressources, de la compacité, Maîtrise et réduction des flux d'énergie, de matière et de signal Confinement du système (sécurité, autarcie, innocuité) Modularité du système pour le recyclage	Revêtement dans pâte Séparation des fonctions cuire, former et empêcher d'adhérer qui conduit à la séparation des composants plaque aluminium et revêtement

Tableau 43 : Tableau d'analyse des opportunités du produit de l'action à réaliser « *Eliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux* »

Les fiches de connaissances

Les fiches de connaissances rendent explicite les objectifs environnementaux définis par ces actions. Elles permettent également d'assister le groupe de créativité dans sa démarche d'analyse et de structuration du problème.

Pour l'action à réaliser « *Éliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux* », on a deux fiches de connaissance.

La première fiche (figure 45) définit le composant poly-matériaux, le composant multi-matériau et le composant mono-matériau. Cette fiche de type connaissance générale permet de construire une vision précise du terme « poly-matériaux » exprimés.

La deuxième fiche (figure 49) détaille et explique par des sous-actions à réaliser, le passage d'un composant poly-matériaux vers un composant mono-matériau. L'adaptation à la « plaque de cuisson » de ces sous-actions à réaliser conduit le groupe de créativité à la segmentation du composant « plaque de cuisson » en deux matériaux séparément recyclables.

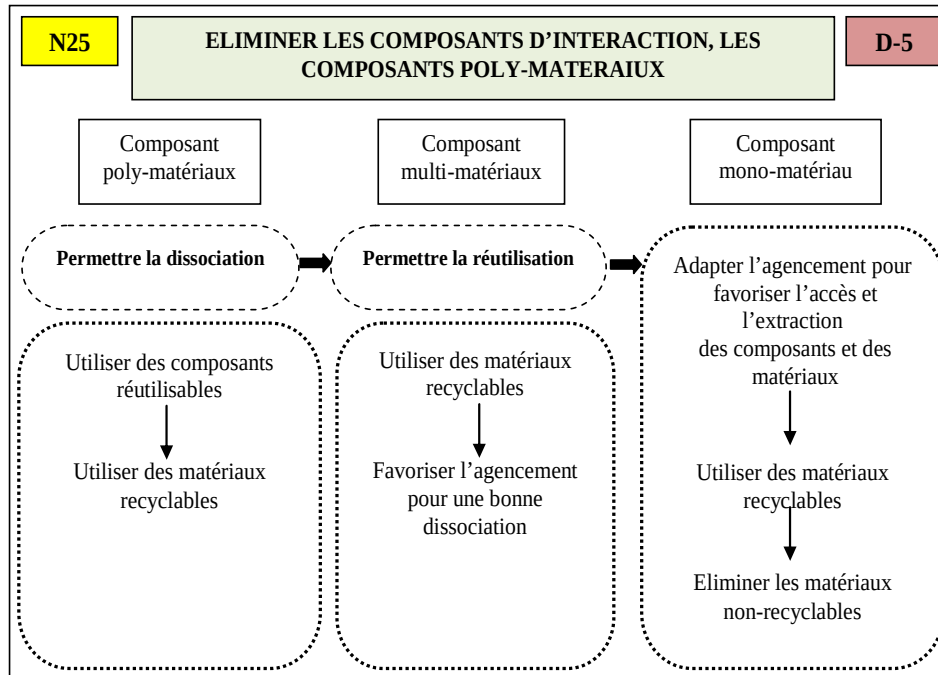


Figure 49 : Fiche de connaissance particulière 2, action à réaliser «éliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux»

Structuration du problème

D'après le tableau 42, l'action à réaliser « *Éliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux* » formule deux structurations possibles du problème.

- Segmentation de composants
- Suppression totale ou partielle de composants

Les opportunités du produit conduisent à la séparation des fonctions cuire et empêcher d'adhérer, cela permet d'envisager d'utiliser deux composants indépendants. Le choix de la structuration est donc : Segmentation de composants.

7.1.3 Phase de formalisation

La formalisation du problème de conception découle de la structuration du problème dans la phase d'analyse. A chaque structuration correspond des biais d'attaque. L'interprétation de ces biais d'attaque conduit à la définition des modèles de problèmes.

Les biais d'attaque associés à la structuration du problème « Segmentation de composants » sont formulés ainsi :

Biais d'attaque : La segmentation d'un composant va rajouter des substances au graphe substances/champs. Des champs vont changer, soit ils vont devenir insuffisants soit il va y

avoir de nouveaux champs. La présence de champs insuffisants peut conduire, par leur traitement, à l'expression de contradictions techniques ou physiques. Si ce n'est pas le cas, alors on recherchera l'amélioration par les solutions standard et l'utilisation du logigramme MAL'IN.

En adaptant ces biais d'attaque à notre problème de plaque de cuisson, on constate que la segmentation du composant poly-matériaux (plaque en aluminium + revêtement) entraîne la séparation des fonctions des matériaux de ce composant. D'une part, on a les fonctions « cuit » et « forme » réalisées par la plaque en aluminium et d'autre part, on a la fonction « empêche d'adhérer » effectuée par le revêtement. Une fois les fonctions séparées, la suppression d'un ou de plusieurs composants va générer des champs insuffisants. Par cette approche, trois modèles de problème de conception sont identifiés.

Problème de conception n°1 : On garde la plaque en aluminium et on supprime le revêtement. Notre objectif est de pallier aux champs insuffisants liés à la suppression du revêtement. La plaque en aluminium ou la pâte doivent évoluer afin de satisfaire la fonction « empêche d'adhérer ».

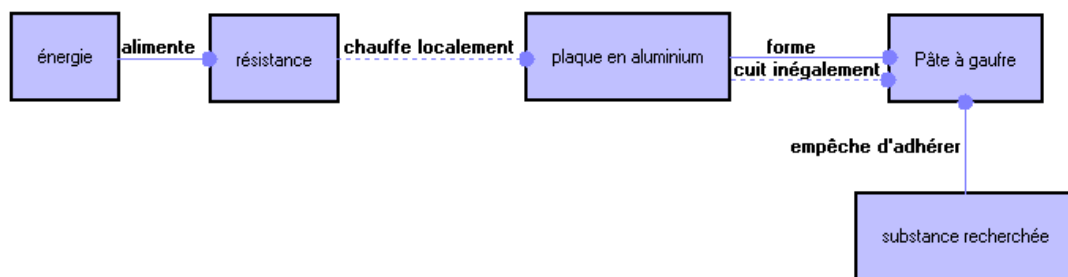


Figure 50 : Premier graphe substances/champs

Problème de conception n°2 : On garde le revêtement et on supprime la plaque en aluminium. Notre objectif est de pallier aux champs insuffisants liés à la suppression de la plaque en aluminium. Le revêtement ou la pâte doivent évoluer afin de satisfaire les fonctions «cuit » et « forme ».

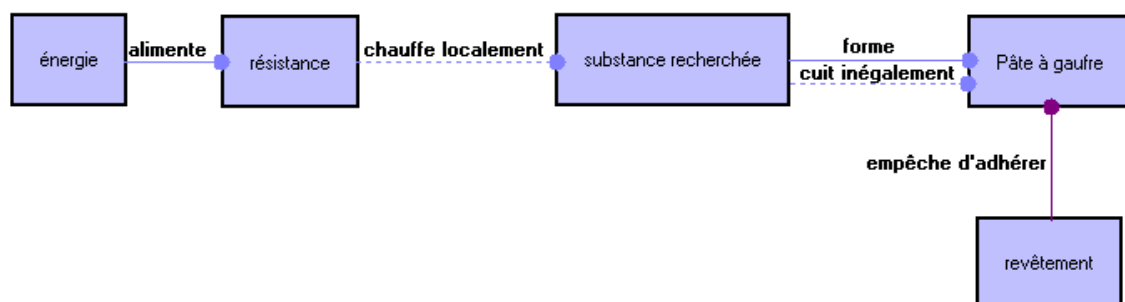


Figure 51 : Deuxième graphe substances/champs

Problème de conception n°3 : On supprime le revêtement et la plaque en aluminium. Notre objectif est de pallier aux champs insuffisants liés à la suppression du revêtement et de la plaque en aluminium. Ce modèle de problème remet en cause les interactions entre l'ensemble des composants et nécessite d'imaginer de nouveaux flux fonctionnels permettant de réaliser les fonctions « cuit », « forme » et « empêche d'adhérer ».

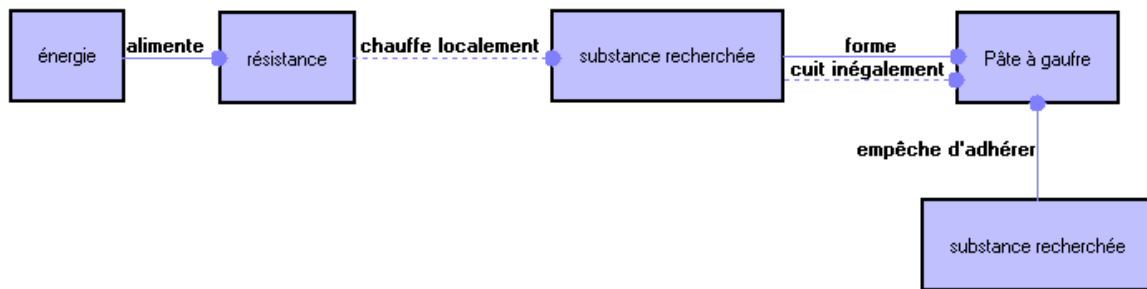


Figure 52 : Troisième graphe substances/champs

Chaque modèle de problème exprimé précédemment décrit une association insatisfaisante. La segmentation du composant poly-matériaux (plaque de cuisson) et les champs insuffisants liés à la suppression soit du revêtement, soit de la plaque en aluminium, soit de l'ensemble du composant (plaque en aluminium + revêtement) conduit notre démarche de résolution vers les solutions standards et l'utilisation du logigramme MAL'IN.

7.1.4 Phase de résolution

Les solutions standards est un outil de résolution TRIZ (Zlotin 1997) et (Savransky 00). Le logigramme de choix des solutions standards est un outil adapté par la méthode MAL'IN. Cet outil permet de rechercher la nouvelle substance qui va réaliser l'action « empêche d'adhérer ».

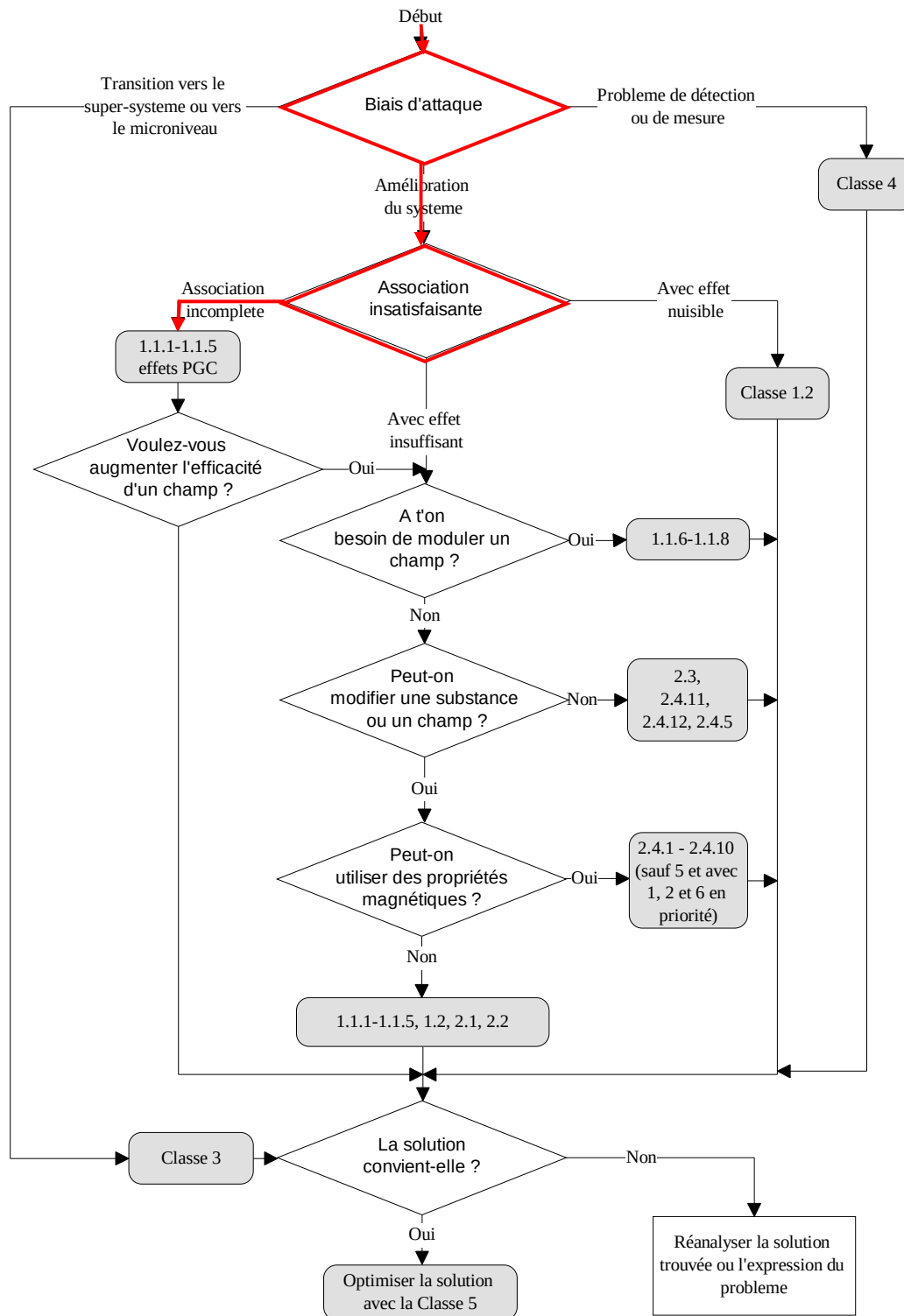


Figure 53 : Logigramme MAL'IN

Dans notre exemple d'application, les trois modèles de problème définis une association insatisfaisante et incomplète. Le logigramme de choix des standards nous conduit aux solutions standards de la classe 1.1.1 à 1.1.5. La classe 1 : complétude des associations et la sous-classe 1.1 : construction des associations (Construction par l'introduction de substances ou de champs disponibles dans les ressources).

Standards 1.1.1 : construction d'une association.

Introduire des substances et /ou des champs pour compléter l'association.

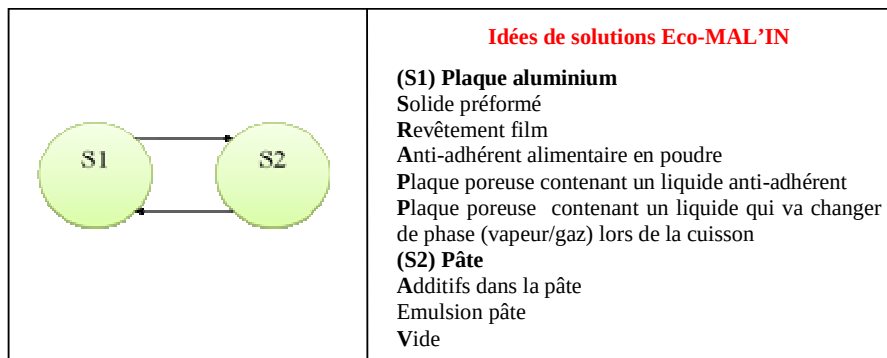
S'aider des listes et bases de données (effets, substances, état de l'art).

Les idées de solutions découlent de l'analyse des ressources des substances (tableau 43). Les substances : tous les éléments composant le système (produit et produits accessoires) et son environnement : composants, composants d'interaction, milieux extérieurs. Les milieux extérieurs sont donc des ressources.

Si S1 est la plaque et S2 est la pâte, elle conduit à la première solution standard :

Standards 1.1.2 : Association multiple intérieure.

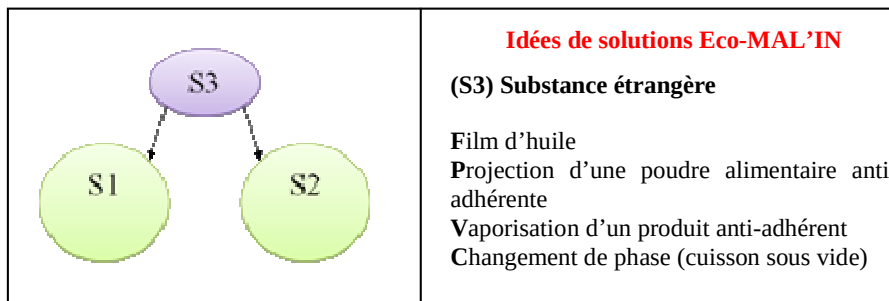
Introduire dans S1 et/ou S2 des additifs qui augmentent la contrôlabilité ou qui donnent à l'association les propriétés nécessaires. Cette introduction peut être définitive ou provisoire.



La seconde solution standard à utiliser s'exprime :

Standards 1.1.3 : Association multiple extérieure.

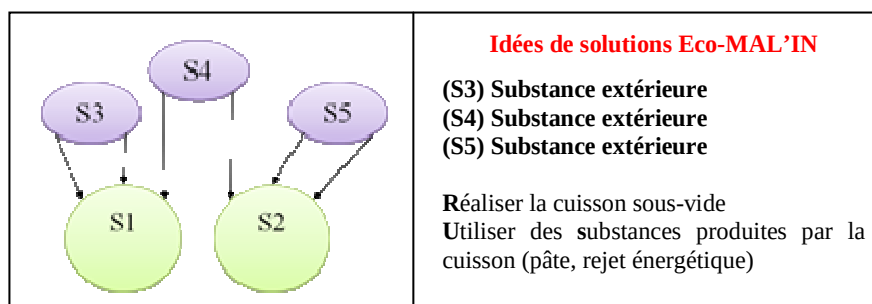
Ajouter à S1 ou à S2 une substance étrangère S3 qui augmente la contrôlabilité ou qui donne à l'association les propriétés nécessaires. Cet ajout peut être définitif ou provisoire.



Enfin les solutions standards proposent d'utiliser les ressources des milieux extérieurs pour réaliser l'additif S3 :

Standard 1.1.4 : Association basée sur l'environnement.

Compléter l'association en utilisant l'environnement en tant que substance à introduire.



Les idées de solutions exprimées par l'interprétation des solutions standards de la classe 1 et des sous-classes 1.1.1 à 1.1.5 résultent des échanges d'idées du groupe de créativité autour du problème de conception concernant la séparation des fonctions du composant poly-matériaux (plaque en aluminium+revêtement) et l'interaction revêtement-pâte. Ces idées de solutions doivent être ensuite qualifiées et hiérarchisées selon le contexte de l'étude.

7.1.5 Commentaires

Cette première application découle d'une analyse et d'une résolution d'un problème de conception conduit au préalable. L'objectif d'étude défini concerne l'amélioration de la recyclabilité et la réutilisation de l'ensemble produit, notamment la recyclabilité du composant poly-matériaux utilisé dans la réalisation des plaques de cuisson 1 et 2.

L'action à réaliser choisie par la matrice Eco-MAL'IN est : « Eliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux ».

Le déroulement de la démarche Eco-MAL'IN proposé dans cette première application relève d'une approche continue, cohérente et facilement appliqué par un groupe de créativité.

Etape par étape, les fiches de connaissances de types générales (définition des composants poly-matériaux), les fiches de connaissances de types particulières (sous-actions à réaliser pour la réalisation de l'action choisie), l'identification des opportunités du produit, la structuration du problème amène le groupe de créativité à décrire ses besoins de conception à l'égard de l'action à réaliser étudiée, à formaliser des modèle de problème et enfin, à résoudre le problème de conception.

Les aspects environnementaux restent une priorité tout au long de l'étude puisque l'identification des opportunités est définie à partir de l'analyse des ressources associées à une vision du développement durable. La structuration du problème découle aussi de l'analyse de ces opportunités. Cependant, le travail d'hiérarchisation des idées et solutions générées n'a pas été proposé pour cet exemple.

Nous pouvons constater que certaines idées de solutions peuvent présenter des problèmes de conception ou d'usage. Par exemple, la solution d'une plaque poreuse va résoudre le problème si le produit anti-adhérent est vaporisable mais va introduire un problème d'usage, concernant le mode de recharge de la plaque en produit.

7.2 2^{ème} application : problème de conception défini par une analyse des ressources de l'ensemble produit

L'analyse des composants, composants d'interaction et milieux extérieurs de l'ensemble produit « gaufrier » souligne plusieurs problèmes de recyclage et de réutilisation. La conception actuelle du gaufrier n'est pas adaptée ni à une réutilisation de composants ou de composants d'interaction ni à un processus de recyclage (identification de matériaux, désassemblage de composants, séparation de matériaux...).

7.2.1 Phase de pré-analyse

On choisit de travailler sur le problème de recyclage et de réutilisation des deux unités de chauffe 1 et 2. Notre approche de re-conception concerne le désassemblage de l'articulation entre les plaques de cuisson de chaque unité de chauffe, puisque en vue de recyclage ou de réutilisation, on doit pouvoir les désassembler facilement. Cette articulation est une liaison pivot.

La figure 54 montre le détail de la liaison pivot entre les deux plaques de cuisson. Cette articulation est constituée de plusieurs composants d'interaction (vis, languette, axe creux) et le désassemblage nécessite différentes manipulations devant être améliorées.

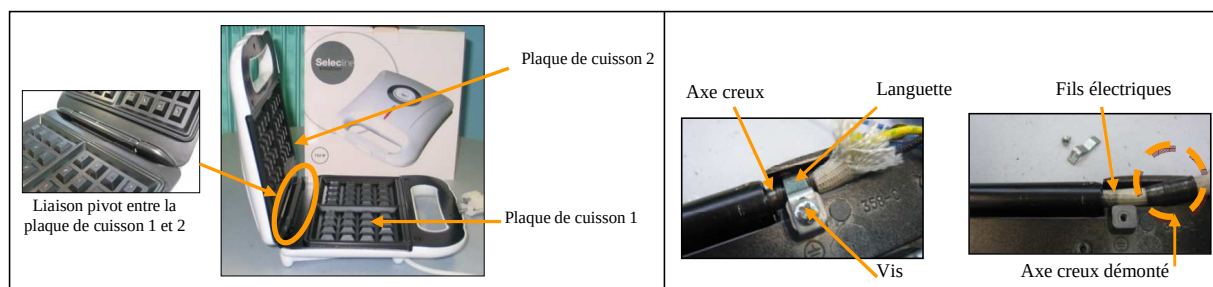


Figure 54 : Détail de l'articulation gaufrier (liaison annulaire démontable)

Cette analyse nous conduit dans la matrice Eco-MAL'IN à l'axe D (améliorer la recyclabilité et la réutilisation) et la situation fin de vie.

	Extraction de matière première	Industrialisation	Distribution	Utilisation	Fin de vie
A) Réduire l'influence matérielle	X	X	X	X	X
B) Augmenter l'efficacité énergétique				X	X
C) Eliminer les risques de toxicité		X	X	X	X
D) Améliorer la recyclabilité et la réutilisation				X	X
E) Optimiser l'utilisation des ressources				X	X
F) augmenter la durée de vie et la désirabilité des produits				X	
G) Augmenter les fonctionnalités et les services			X	X	

Tableau 2 : Relation entre les phases du cycle de vie et les éléments d'éco-efficacité.

Associés à cet axe d'éco-efficacité et cette situation de vie, on a quatre actions à réaliser. Au regard de notre objectif d'étude, nous choisissons de travailler sur l'action à réaliser « Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction ».

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception
Fin de vie	Agir sur la géométrie des composants et des composants d'interactions de l'ensemble produit pour diminuer les volumes à recycler
	Utiliser des composants et des composants d'interaction recyclables, valorisables et réutilisables
	Eliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux
	Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction

Tableau 44: Actions à réaliser pour améliorer la recyclabilité et la réutilisation

7.2.2 Phase d'analyse et de structuration

L'action à réaliser « *Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction* » propose, en premier lieu, d'améliorer le désassemblage et de simplifier l'assemblage.

La solution actuelle implique les deux plaques de chauffe en interaction directe par une liaison linéaire annulaire conséquence d'un centrage court.

Le graphe substances/champs (Savransky 00) de la figure 55 présente les liens fonctionnels entre les composants impliqués dans la liaison pivot. Un axe creux inséré dans une plaque et bloqué sur l'autre par une languette vissée assure la seconde liaison linéaire annulaire. L'arrêt axial se réalise par les contacts entre les deux plaques. On remarque que l'axe est creux pour laisser passer les fils électriques permettant d'alimenter les résistances de chauffe des plaques. Le désassemblage impose de retirer les fils électriques et de dévisser la vis pour libérer l'axe creux. Ces plaques peuvent être ensuite séparées.

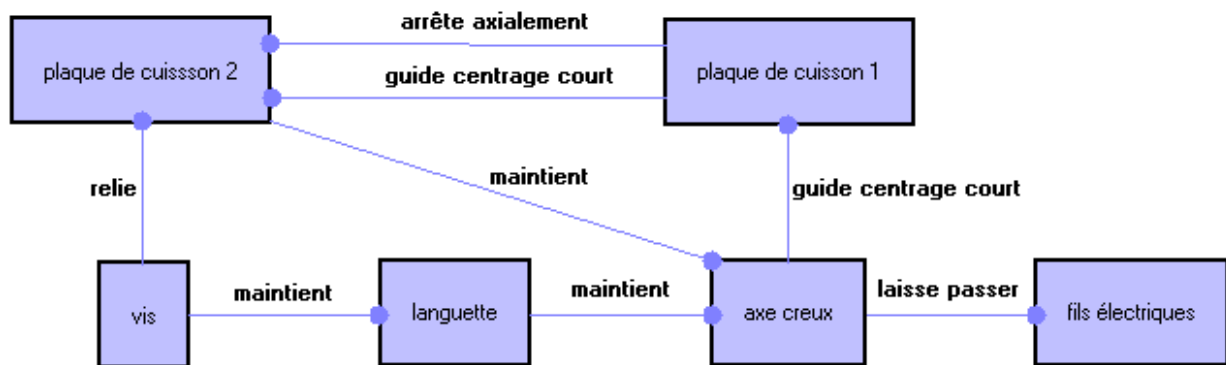


Figure 55 : Graphe substances/champs de la solution actuelle

Nous proposons de reconcevoir l'articulation entre les deux plaques de chauffe avec l'action à réaliser : « *Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction* ».

Afin de déployer tous les moyens et outils qu'on propose pour cette deuxième application, nous présentons une nouvelle synoptique du déroulement de la méthode Eco-MAL'IN donné en figure 56.

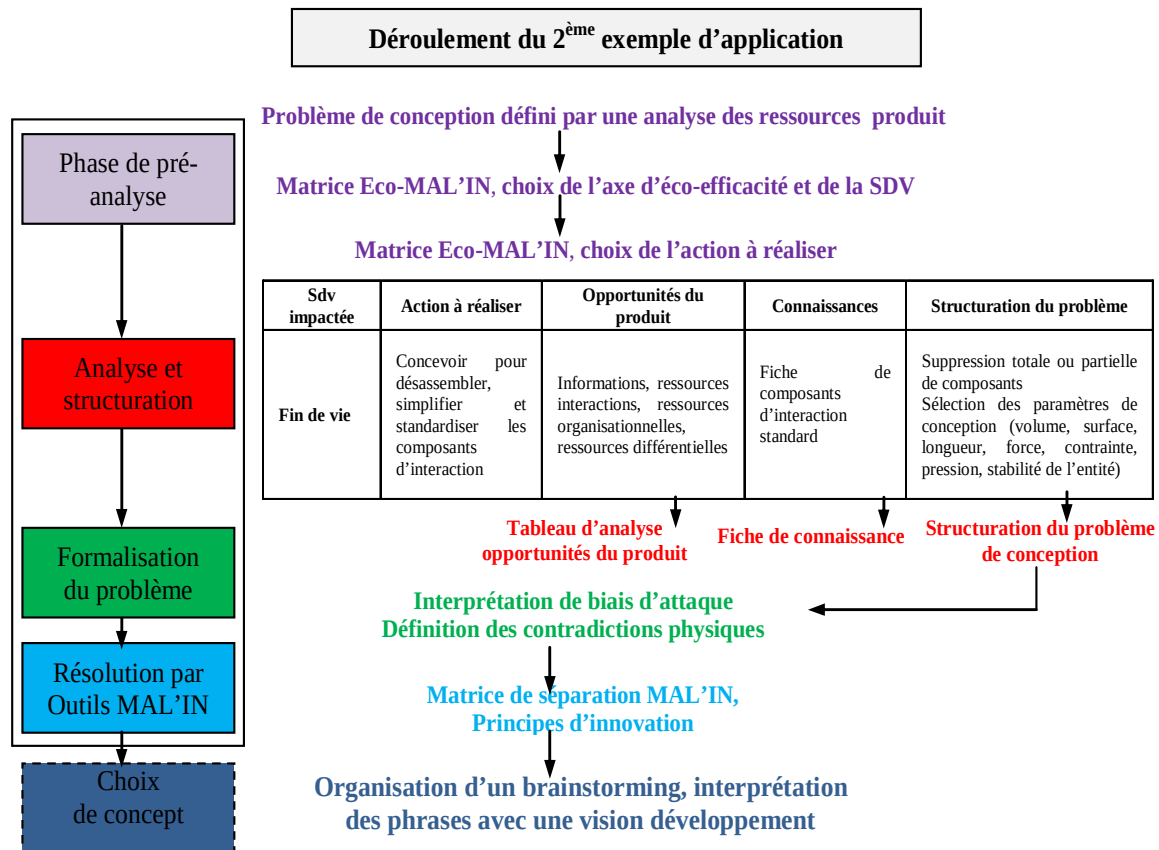


Figure 56 : Déroulement de la deuxième application avec le détail des outils utilisés

Notre approche d'analyse est reconduite par l'identification des opportunités du produit et l'étude de fiches de connaissances. Au regard de ces données d'analyse, une structuration du problème est également déterminée. Le déroulement de cette démarche est défini par le tableau 45. Ce tableau présente la démarche d'analyse et structuration du problème de conception pour l'action à réaliser « *Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction* ».

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Opportunités du produit	Connaissances	Structuration du problème
Fin de vie	26. Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction	Informations, interactions, ressources organisationnelles, ressources différentielles	Fiche de composants d'interaction standard	Suppression totale ou partielle de composants Sélection des paramètres de conception (résistance, contrainte, pression, stabilité de l'entité)

Tableau 45 : « *Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction* » : démarche d'analyse et de structuration

Opportunités du produit

Pour l'action à réaliser « *Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction* », nous avons sélectionnées quatre ressources du produit. Nous avons également associé une vision développement durable à ces ressources. La vision analytique du groupe de créativité pour les ressources permet d'identifier les opportunités du produit.

Le tableau 46 reprend les ressources sélectionnées pour l'action « *Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction* » avec la vision développement durable qui lui sont associés. A partir de cette vision développement durable, une vision analytique (des opportunités du produit) est exprimé par le groupe de créativité.

Ressources sélectionnées par l'action à réaliser	Vision développement durable des ressources sélectionnées	Opportunités du produit
Informations Toutes les informations existant ou pouvant être produites dans le système (produit et produits accessoires) et son environnement. Toute caractéristique ou changement de caractéristique permettant d'identifier l'évolution d'un phénomène physique pertinent du fonctionnement.	Marquage, aspect, couleur des matériaux Matériau pérenne, biodégradable, renouvelable, recyclable, valorisable, résilient, non énergivore, non corrosif, non toxique Types de fabrication, brut Vieillessement, pérennité de composants Rejets : Odeur, ouïe, vue, couleur, agression, chaleur,...	Formes connues Formes repérables Flèches de déplacement Couleurs différentes
Ressources interactions Toutes les nouvelles fonctions ou propriétés qui peuvent être obtenues par modification des liaisons entre les composants ou, par modification des composants d'interaction.	Standardisation des composants d'interaction, Composants poly-matériaux vers composants multi-matériaux puis composants dissociables, Composant dissociables, De statique à dynamique pour un meilleur contrôle et un accroissement de l'efficacité, Amélioration des pertes par la maîtrise des interactions, Libre passage de l'énergie.	Standardisation des composants d'interaction, Composant dissociables, matériaux séparables et recyclables. Composants identiques
Ressources organisationnelles Tous les nouveaux agencements des composants ou des blocs fonctionnels permettant de nouvelles fonctions, de nouveaux comportements ou l'utilisation des ressources du système (produit et produits accessoires) et de son environnement.	Optimisation des ressources, de la compacité, Maîtrise et réduction des flux d'énergie, de matière et de signal Confinement du système (sécurité, autarcie, innocuité) Modularité du système pour le recyclage	Optimisation des ressources, de la compacité, Modularité du système pour le recyclage Composants modulaires, dissociables, avec des matériaux séparables Symétrie des plaques, symétrie des composants d'interaction
Ressources différentielles Tous les gradients utilisables pour créer un flux ou générer de nouvelles fonctions pouvant exister entre certains paramètres. <u>En substances</u> Anisotropie Variations de propriété au sein d'un matériau <u>En champs</u> Gradient de variables d'état ou de variables pertinentes Champ non-homogène dans l'espace	Maîtrise et réduction des flux d'énergie, de matière et de signal	Variation de propriété au sein d'un composant d'interaction, possibilité de dissociation de composants d'interaction sous condition (milieu extérieur) Anisotropie : composant d'interaction fragmentable Gradient de contraintes, possibilité de désassemblage sous condition : Outil Angle d'ouverture > 180°

Tableau 46 : Tableau d'analyse des opportunités du produit de l'action à réaliser «*Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction*»

Les fiches de connaissances

Pour l'action à réaliser « *Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction* », on a deux fiches de connaissances. La première fiche (figure 57) définit ce qu'est un ensemble de composants non dissociables et non réutilisables, un ensemble de composants dissociables et non réutilisables et un ensemble de composants dissociables et réutilisables. Ces définitions associent les problèmes de désassemblage et de

réutilisation à la nature des composants d'interaction (non démontables, démontables par destruction ou démontables).

La deuxième fiche donnée en figure 58 explique par des sous-actions à réaliser le passage d'un ensemble de composants non dissociables et non réutilisables à un ensemble de composants dissociables et réutilisables. Au regard du problème analysé, les deux plaques de cuisson + les composants d'interaction (vis, languette, axe creux) représentent un ensemble de composants dissociables et non réutilisables. L'interprétation du groupe de créativité pour les sous-actions à réaliser sur le problème du composant d'interaction entre les deux plaques conduit l'approche d'analyse vers la modification des composants d'interaction et l'évolution du désassemblage de composants en vue de leurs réutilisations.

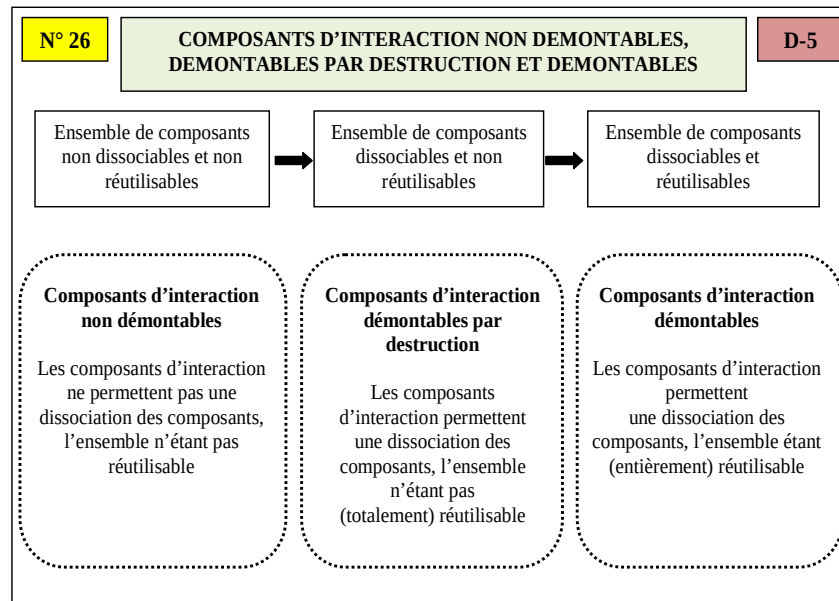


Figure 57 : Fiche de connaissance particulière 1, action à réaliser « concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction »

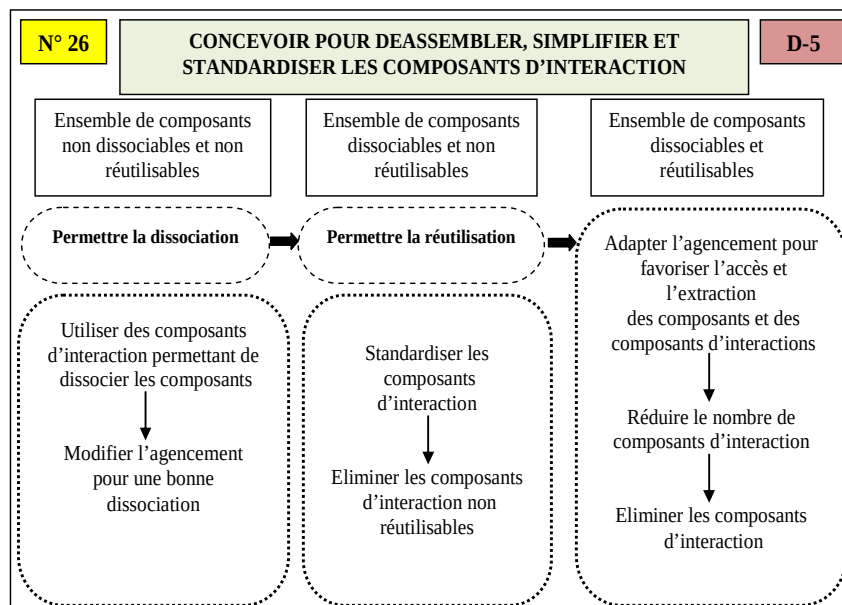


Figure 58 : Fiche de connaissance particulière 2, action à réaliser « concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction »

D'après le tableau 45, l'action à réaliser « *Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction* » formule deux structurations possibles du problème.

- Suppression totale ou partielle de composants
- Sélection des paramètres de conception (résistance, contrainte, pression, stabilité de l'entité)

Notre approche d'analyse conduit la structuration du problème vers la simplification qui impose d'éliminer la languette et la vis. L'expression des opportunités du produit et les fiches de connaissances oriente notre approche d'analyse vers l'amélioration des interactions et la définition de nouvelle organisation de composants et de composants d'interaction.

Pour ce cas en particulier, notre choix est porté sur la suppression totale ou partielle de composants.

7.2.3 Phase de formalisation

Les biais d'attaque associés à la structuration du problème « Suppression totale ou partielle de composants » sont formulés ainsi :

Biais d'attaque : Le composant ou la partie du composant supprimée ne va plus apparaître dans le graphe substances/champs. Ce cas correspond à la logique de simplification du graphe. Il va falloir rechercher comment réaliser les champs utiles liés à ce composant ou à cette partie de composant supprimé. La meilleure solution est qu'un composant existant (ressource substance) assure la ou les fonctions disparues. Si ce ne peut être le cas, alors on va résoudre le problème par les solutions standard et utiliser le logigramme MAL'IN.

L'adaptation du biais d'attaque implique la suppression de composants et donc la simplification du graphe substance-champs (figure 60). Les composants d'interaction actuels sont l'axe creux, la languette et la vis utilisées pour bloquer l'axe sur la plaque. L'axe creux est indispensable (guidage et passage des fils), la simplification impose d'éliminer la languette et la vis. Les deux plaques sont différentes et la simplification de l'assemblage dans une vision réutilisation conduit à imaginer une nouvelle solution à deux plaque identiques.

Une architecture possible, selon les opportunités du produit (symétrie des plaques) donné en tableau 46, est alors constituée par les deux plaques placées têtes bèches (figure 59) pour permettre la constitution d'un alésage en deux parties pour réaliser un guidage long. L'arbre creux traverse cet alésage et permet la constitution d'une liaison pivot glissant. Il s'agit maintenant de réaliser les arrêts axiaux assurant la complétude de la liaison pivot. Cette réalisation doit se faire sans complexifier l'assemblage ou le désassemblage.

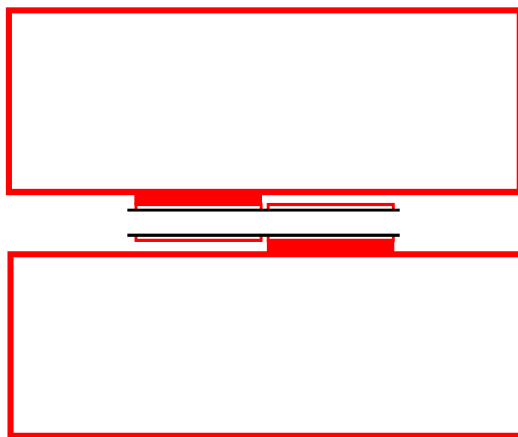


Figure 59 : Agencement des plaques têtes bèches et axe creux traversant

Un premier arrêt axial est constitué par la position tête bêche des plaques. Nous disposons de 2 ressources pour réaliser le second arrêt axial soit par contact entre les deux plaques, soit par contact entre l'axe creux et chaque plaque. Nous envisageons de présenter cette dernière solution. La réduction de l'assemblage à trois composants modifie le graphe substances/champs selon la figure 60 et permet de structurer le problème. Les actions « arrêter axialement » et « être montable et démontable » sont des champs à rechercher.

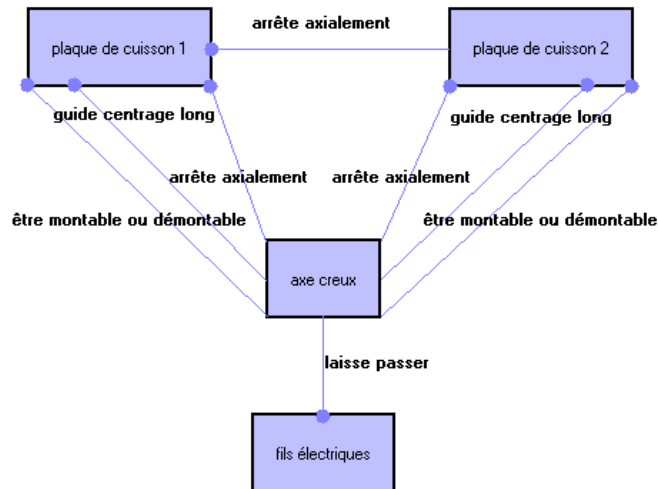


Figure 60 : Graphe substances/champs de la solution recherchée

Le problème est alors structuré et on peut interpréter le graphe selon la méthodologie MAL'IN adaptée de la théorie TRIZ. La réalisation des deux arrêts axiaux impose d'avoir un axe rigide, par contre, la possibilité de monter et démonter impose que l'axe soit déformable. On peut alors exprimer une contradiction physique (CP).

CP: L'axe doit être rigide pour assurer le guidage et déformable pour permettre le montage ou le démontage.

7.2.4 Phase de résolution

Cette contradiction dite physique peut être levée en séparant les exigences contradictoires. Dans ce cas précis, la séparation doit se faire dans l'espace car les exigences contradictoires sont dans la même situation de vie par exemple « désassemblage ».

Pour résoudre la contradiction physique, nous utilisons la matrice de résolution des exigences contradictoires MAL'IN (Pailhes et al, 10) qui conduit à la sélection des principes d'innovation TRIZ (Altshuller 84). Les principes sélectionnés dépendent de ce que veut faire le concepteur soit :

- | | |
|---------------------------|-------------|
| a) Agir sur une substance | 1, 2, 3, |
| b) Agir sur la géométrie | 4, 7, 17, |
| c) Agir sur un champ | 24, 26, 30. |

Le premier choix, agir sur une substance, correspond à notre contradiction qui propose d'agir sur l'axe creux. Le principe 1 (la segmentation), s'exprime :

- Diviser une entité en parties indépendantes.
- Réaliser une entité démontable ou modulaire.
- Réaliser une entité fragmentable (fragmentation au cours du cycle de vie).

Le principe 1a nous propose de réaliser l'axe en deux parties et le principe 1b nous suggère que l'ensemble soit démontable. Pour pouvoir réaliser cela, il faut agir sur la géométrie et nous sélectionnons le principe 7 (les poupées gigognes)

- a) Placer les entités les unes dans les autres.
- b) Faire passer une entité au travers d'une autre par ses cavités ou porosités.

Le principe 7b permet d'imaginer une solution d'interpénétration de deux axes tels qu'ils soit identiques. Chaque axe comporte des dentelures d'angle au sommet inférieur à 12 degré pour assurer un blocage par coincement (figure 61). Le montage se fait par simple pression axiale et le démontage par un effet levier sur l'épaulement ou mieux par des rampes sur les plaques actives lorsque l'on ouvre à plus de 180° (opportunité du produit).

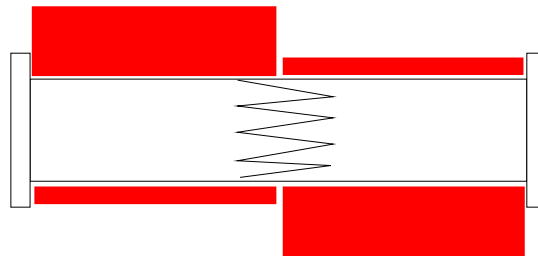


Figure 61 : Deux axes creux reliés par coincement

On peut aussi imaginer un autre concept de solution car, même si les deux axes sont identiques, nous avons deux composants. Il est donc intéressant de rechercher un concept qui ne segmenterait pas l'axe. Le principe 30 (le déformable) va conduire à une solution à un seul axe. Il s'exprime :

- a) Changer une entité rigide par une entité déformable.
- b) Remplacer une structure par une enveloppe déformable.
- c) Isoler une entité de son environnement par une enveloppe déformable.

L'axe va comporter un clip (snap) qui va s'escamoter lors du montage et se dégager lorsque l'axe va déboucher et ainsi assurer un arrêt axial. Le second arrêt est réalisé par une collerette rigide comme le montre la figure 62.

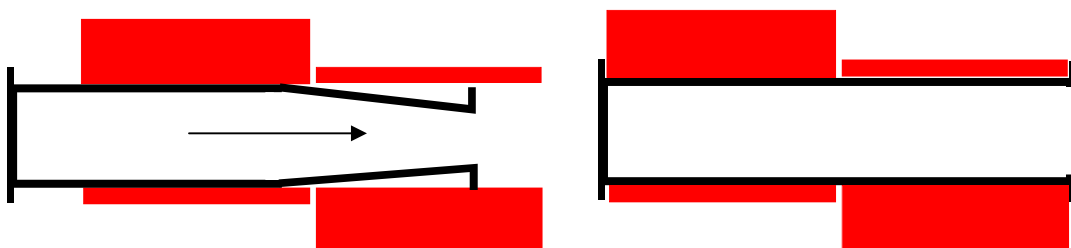


Figure 62 : Axe creux déformable type clip

Les idées de conception présentées précédemment expriment différents concepts de solutions pour faire évoluer un produit commercial, le gaufrier, en améliorant le critère de recyclage et de réutilisation, notamment par désassemblage des composants et des composants d'interactions. Comme il a été expliqué pour la première application, ces idées de solutions doivent être ensuite qualifiées dans le contexte de l'étude et hiérarchisées, suivant les bénéfices environnementaux, les attentes d'utilisateurs, les enjeux stratégiques et des ressources de l'entreprise.

7.2.5 Commentaires

L'analyse du produit en fonction de ses propres ressources (liste des ressources de MAL'IN, associée à une vision de développement durable) permet de vérifier si l'action est réalisable ou non. Le groupe de créativité est ainsi orientés vers les objectifs environnementaux prioritaires pour un ensemble produit donnée. Pour cette deuxième application, l'analyse des ressources a montré qu'il existe des problèmes de recyclabilité et de réutilisation. L'action à réaliser choisie par la matrice Eco-MAL'IN est : « *Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction* ».

L'utilisation des fiches de connaissances et l'analyse des opportunités du produit ont conduit la structuration du problème vers la simplification et la suppression de composants et donc, à la solution de deux plaques symétriques. Cette solution a amené à la reformulation du modèle du problème fonctionnel en redéfinissant les caractéristiques de l'axe reliant les deux plaques (axe réalisant à la fois l'action « arrêter axialement » et « être montable et démontable »).

Afin de résoudre ce problème, nous avons exprimé une contradiction physique (CP) et nous avons proposé des idées de solutions en utilisant la matrice des contradictions technique (TRIZ). Appuyé sur la méthodologie Eco-MAL'IN, cette approche d'analyse, de structuration et de formalisation du problème sur la recyclabilité et la réutilisation des plaques de cuisson a permis de montrer le déroulement et l'efficacité de l'outil. L'agrégation des données d'analyse et la structuration du problème de conception guide le groupe de créativité dans la phase de résolution et de recherche d'idées de solutions.

Il faut également noter la capacité de l'outil à identifier et structurer un problème de conception de manière rapide et à améliorer la phase de résolution du problème, c'est-à-dire, la phase de créativité et de recherche de concept éco-innovants.

7.3 3^{ème} application : comparaison de MAL'IN et d'Eco-MAL'IN

Dans le chapitre 2, nous avons imaginé des solutions pour réduire les pertes énergétiques. Nous continuons l'étude du gaufrier dans le sens de l'amélioration énergétique. Nous profitons de cette étude pour comparer l'analyse du point de vue MAL'IN et la nouvelle méthode proposée, Eco-MAL'IN.

Nous proposons de résoudre le problème de mauvaise transmission d'énergie entre les deux résistances et les plaques de cuisson 1 et 2. En effet, la transmission de chaleur entre la résistance et la plaque se fait par un contact linéique, puis la chaleur diffuse dans la plaque ce qui génère un gradient de température dans la plaque et par conséquent une cuisson plus lente et non uniforme.

7.3.1 Etude par la méthode MAL'IN

Nous avons conduit l'analyse fonctionnelle et l'analyse physique dans le chapitre 2. Le graphe substances/champs complet qui en découle est présenté dans la figure 63.

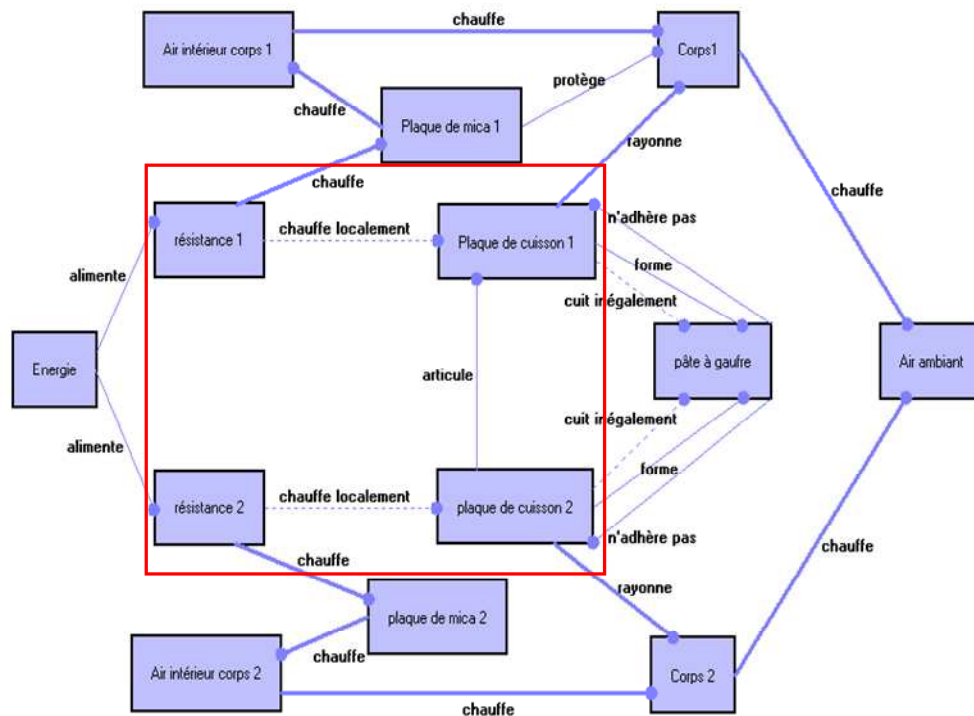


Figure 63 : Graphe substances/champs du gaufrier de la solution existante

Les champs insuffisants que l'on doit traiter sont la chauffe locale et la cuisson non uniforme. L'amélioration de la chauffe et de la cuisson est liée à la maîtrise de la température de la plaque. On doit veiller à ne pas dégrader la forme de la gaufre.

On peut donc exprimer la contradiction technique (CT) :

- CT : On veut améliorer la chauffe, soit la température de la plaque sans dégrader la forme de la plaque qui induit la forme de la gaufre.

On résout cette contradiction en sélectionnant les principes d'innovation à partir de la matrice des contradictions TRIZ :

Améliorer la température (17) sans dégrader la forme (12)

Principe d'innovation : 14 (la courbure), 22 (la transformation d'un effet nuisible en un effet utile), 19 (l'action périodique), 32 (le changement de couleur).

Une séance de créativité à partir des principes d'innovation proposés a donné les pistes de solutions suivantes :

14 : La courbure :

- Utiliser des résistances ramifiées
- Utiliser des résistances épousant les formes
- Utiliser des résistances circulaires
- Utiliser des plaques chauffantes
- Utiliser des résistances ponctuelles disséminées

19 : L'action périodique :

- Utiliser des résistances ponctuelles disséminées et une régulation appropriée.

7.3.2 Etude par la méthode Eco-MAL'IN

Le problème posé correspond à l'axe B (Augmenter l'efficacité énergétique) à la situation d'utilisation.

7.3.3 Phase de pré-analyse

La fonction « cuire la gaufre » implique un bon transfert d'énergie du convertisseur à l'opérateur. L'analyse du diagramme CTO (figure 25) en termes de transfert d'énergie impose l'analyse des composants d'interaction et les composants d'interaction. Les actions à réaliser proposent plusieurs pistes.

	Extraction de matière première	Industrialisation	Distribution	Utilisation	Fin de vie
A) Réduire l'influence matérielle	X	X	X	X	X
B) Augmenter l'efficacité énergétique				X	X
C) Eliminer les risques de toxicité		X	X	X	X
D) Améliorer la recyclabilité et la réutilisation				X	X
E) Optimiser l'utilisation des ressources				X	X
F) augmenter la durée de vie et la désirabilité des produits				X	
G) Augmenter les fonctionnalités et les services			X	X	

Tableau 47 : Relation entre les phases du cycle de vie et les éléments d'éco-efficacité

Nous proposons de travailler sur les composants d'interaction. La première interaction concerne le contact entre la résistance et la plaque. Ce contact est linéique, le flux de chaleur pénètre dans la plaque par une ligne et l'évolution de la chaleur dans la plaque se fait comme dans une ailette. C'est-à-dire que le résultat des transferts impose une température non uniforme dans la plaque ce qui va rendre la cuisson hétérogène. La proposition d'action à réaliser «Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements» va dans le sens de l'amélioration recherchée.

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception
Utilisation	Faire évoluer des champs, substituer des champs, améliorer leur contrôlabilité
	Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements
	Réduire, maîtriser les interactions entre les composants et les composants d'interaction, afin de minimiser les pertes d'énergie
	Réutiliser (circuit fermé) les énergies rejetées ou perdues au cours du fonctionnement

Tableau 48 : Actions à réaliser pour augmenter l'efficacité énergétique

Nous présentons le synoptique du déroulement de la méthode Eco-MAL'IN correspondant à la troisième application donné en figure 64.

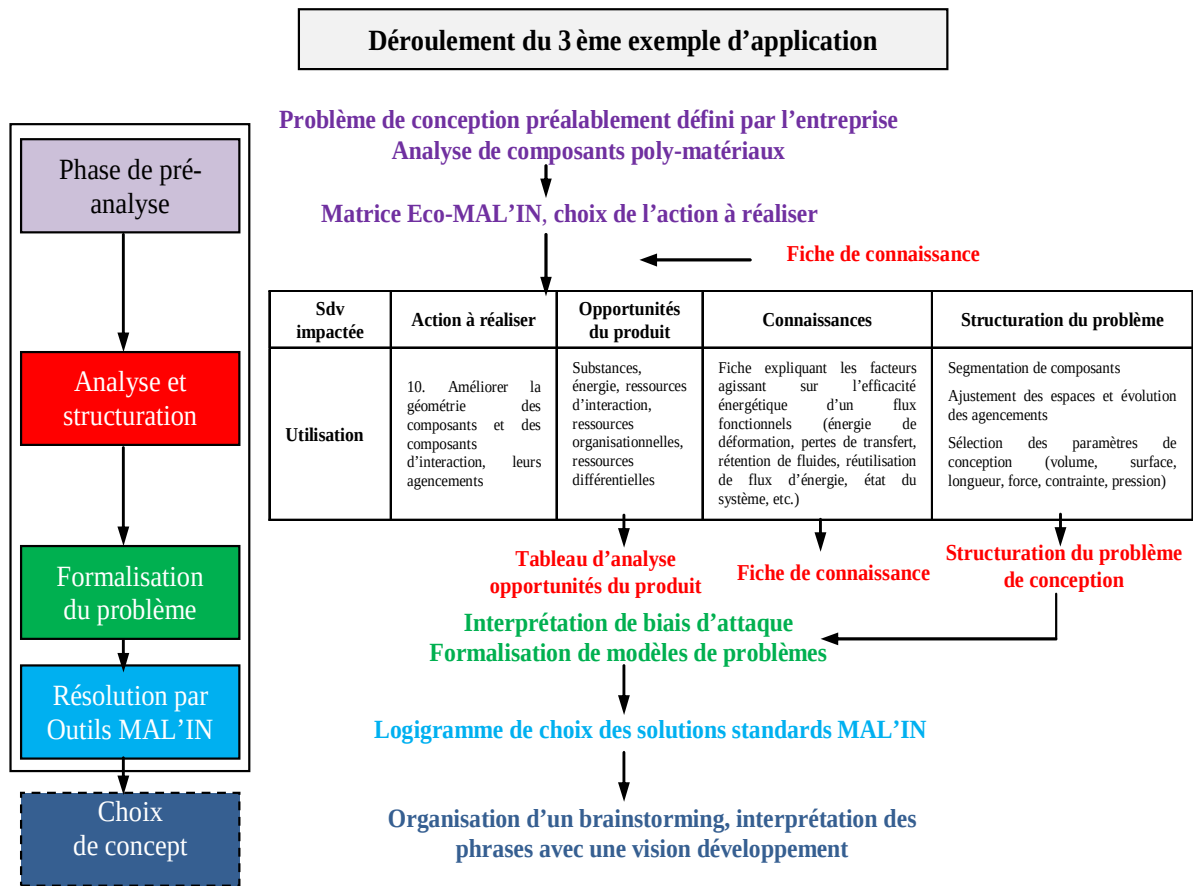


Figure 64 : Déroulement de la troisième application avec le détail des outils utilisés

Notre démarche d'analyse s'appuie directement sur le tableau d'analyse et structuration du problème associé à l'action à réaliser « *Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements* ».

7.3.4 Phase d'analyse et de structuration

L'analyse fonctionnelle déjà faite est complétée par l'analyse des opportunités du produit et l'étude des fiches de connaissances. Le tableau 48 illustre la démarche d'analyse associée à l'action à réaliser « *Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements* ».

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Opportunités du produit	Connaissances	Structuration du problème
Utilisation	10. Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements	Substances, énergie, ressources d'interaction, ressources organisationnelles, ressources différentielles	Fiche expliquant les facteurs agissant sur l'efficacité énergétique d'un flux fonctionnels (énergie de déformation, pertes de transfert, rétention de fluides, réutilisation de flux d'énergie, état du système, etc.)	Segmentation de composants Ajustement des espaces et évolution des agencements Sélection des paramètres de conception (volume, surface, longueur, force, contrainte, pression)

Tableau 49 : «Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements» : démarche d'analyse et de structuration

Opportunités du produit

Pour l'action à réaliser « *Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements* », nous avons sélectionnés cinq ressources du produit. L'analyse des ressources par le groupe de créativité permet d'identifier les opportunités du produit. Le tableau 50 reprend les ressources sélectionnées avec la vision développement durable qui lui est associée ainsi que les opportunités du produit.

Ressources sélectionnées par l'action à réaliser	Vision développement durable des ressources sélectionnées	Opportunités du produit
Substances Tous les éléments composant le système (produit et produits accessoires) et son environnement : composants, composants d'interaction, milieux extérieurs. Les milieux extérieurs sont donc des ressources	Nombre de composants, Composants non perdables, fonctionnels, non redondants, non jetables, non toxiques, fragmentables, réutilisables et des composants avec des matériaux recyclables. Milieux extérieurs (consommables)	Augmenter la surface de contact Système de chauffe de la taille de la plaque
Energies Tous champs ou flux d'énergie qui existent ou qui sont produits par le système (produit et produits accessoires) et son environnement. <u>Externe à chaque substance</u> Contact (musculaire, mécanique, thermique,...) A distance (gravité, inertie, attractions, sons, induction, rayonnement, lumière, magnétisme,...) <u>Interne à chaque substance</u> Possibilités d'accumulation selon tous les types d'énergie (MATHEM)	Circuit ouvert Circuit fermé : accumulation Energies renouvelables et propres Energies non toxiques	Intégrer des énergies accumulables Energies à distance Induction
Ressources interactions Toutes les nouvelles fonctions ou propriétés qui peuvent être obtenues par modification des liaisons entre les composants ou, par modification des composants d'interaction.	Standardisation des composants d'interaction, Composants poly-matériaux vers composants multi-matériaux puis composants dissociables, Composant dissociables, De statique à dynamique pour un meilleur contrôle et un accroissement de l'efficacité, Amélioration des pertes par la maîtrise des interactions, Libre passage de l'énergie.	Contact surfacique Eliminer les transferts par contact
Ressources organisationnelles Tous les nouveaux agencements des composants ou des blocs fonctionnels permettant de nouvelles fonctions, de nouveaux comportements ou l'utilisation des ressources du système (produit et produits accessoires) et de son environnement.	Optimisation des ressources, de la compacité, Maîtrise et réduction des flux d'énergie, de matière et de signal Confinement du système (sécurité, autarcie, innocuité) Modularité du système pour le recyclage	Repositionner résistance et plaque Utiliser l'espace entre corps et plaque
Ressources différentielles Tous les gradients utilisables pour créer un flux ou générer de nouvelles fonctions pouvant exister entre certains paramètres. En substances Anisotropie Variations de propriété au sein d'un matériau En champs Gradient de variables d'état ou de variables pertinentes Champ non-homogène dans l'espace	Maîtrise et réduction des flux d'énergie, de matière et de signal	Variation de propriétés au sein de la plaque (changement de phase)

Tableau 50 : Tableau d'analyse des opportunités du produit de l'action à réaliser « *Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements* »

Les fiches de connaissances

Pour l'action à réaliser «Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements».

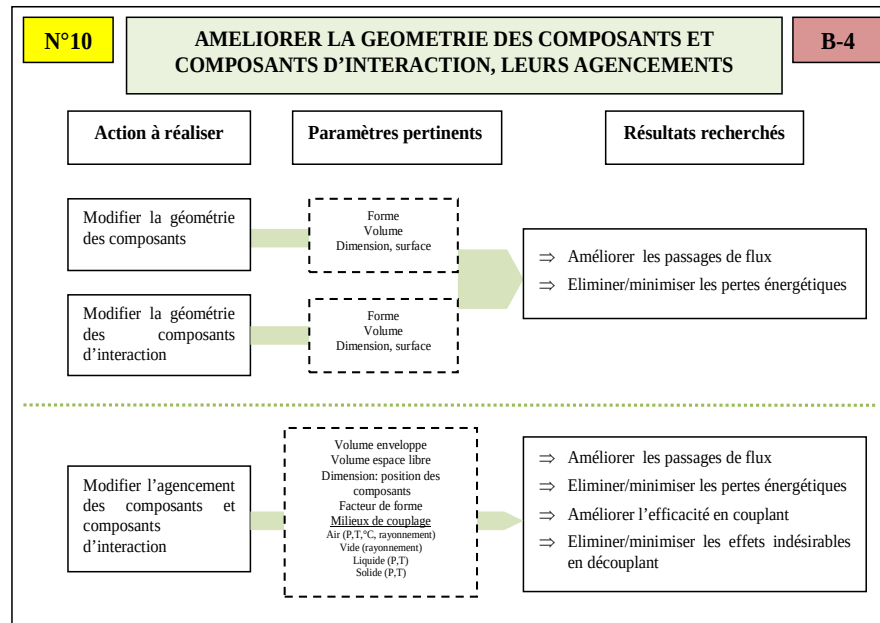


Figure 65 : Fiche de connaissance, action à réaliser «Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements»

L'action à réaliser « Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements » exprime trois structurations possibles pour la résolution du problème.

- Segmentation de composants
- Ajustement des espaces et évolution des agencements
- Sélection des paramètres de conception (volume, surface, longueur, force, contrainte, pression)

On choisit l'ajustement des espaces et l'évolution des agencements car l'analyse porte sur une chauffe locale alors que l'on veut une chauffe globale sur la plaque de cuisson. On va résoudre ce problème par l'ajustement entre une substance de chauffe et la plaque de cuisson. Ainsi la solution recherchée est déjà orientée par la structuration.

7.3.5 Phase de formalisation

Le graphe substances/champs qui découle de la structuration est présenté sur la figure 66.

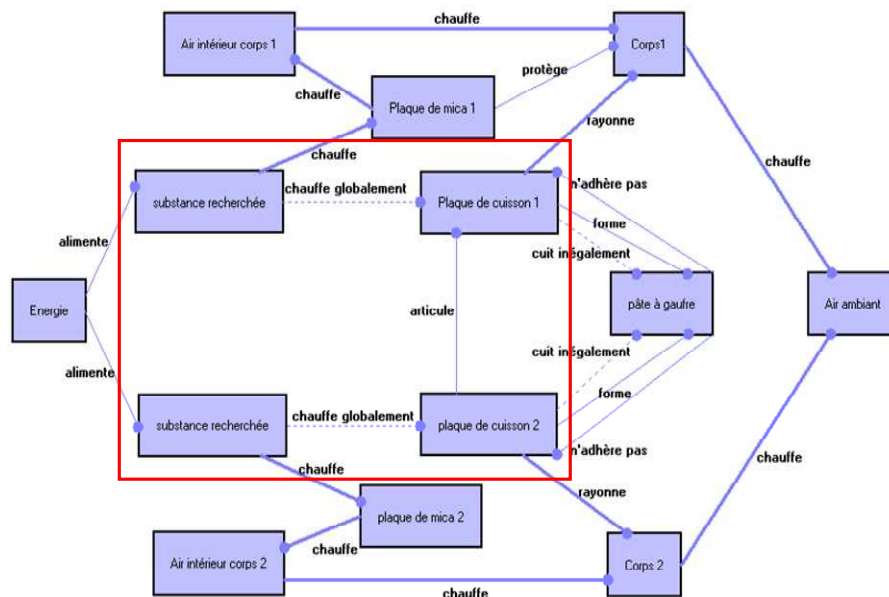


Figure 66 : Graphe substances/champs du gaufrier de la solution recherchée

On recherche donc cette nouvelle substance qui permette une chauffe globale. Pour cela, la résolution se fait par les solutions standards et l'utilisation du logigramme MAL'IN.

7.3.6 Phase de résolution

Standards 1.1.1 : construction d'une association.

Introduire des substances et /ou des champs pour compléter l'association.

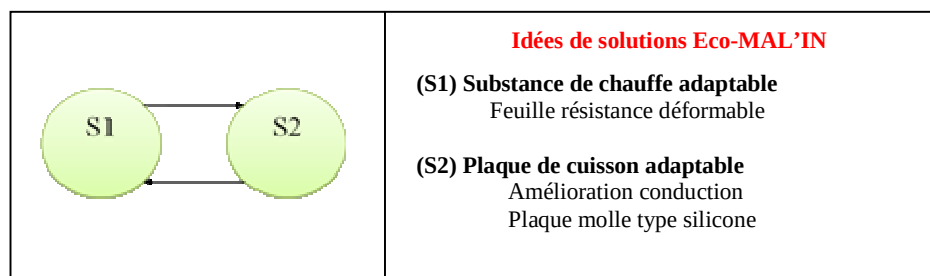
S'aider des listes et bases de données (effets, substances, état de l'art).

Les idées de solutions découlent de l'analyse des ressources des substances (tableau 50). Dans notre exemple d'application, la substance recherchée est un système de chauffe surfacique.

S1 est la substance de chauffe et S2 est la plaque de cuisson.

Standards 1.1.2 : Association multiple intérieure.

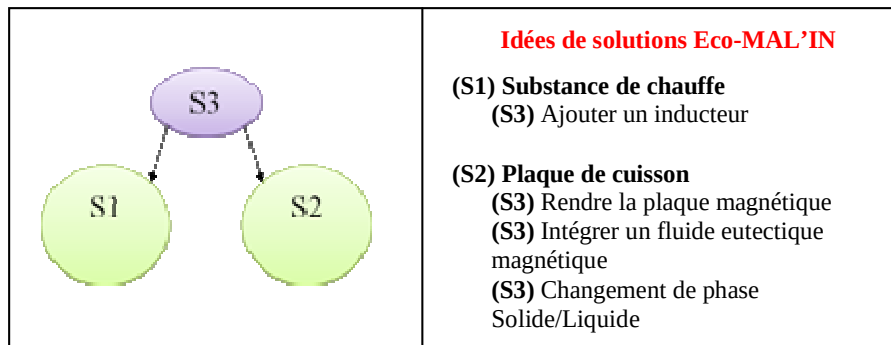
Introduire dans S1 et/ou S2 des additifs qui augmentent la contrôlabilité ou qui donnent à l'association les propriétés nécessaires. Cette introduction peut être définitive ou provisoire.



La seconde solution standard à utiliser s'exprime :

Standards 1.1.3 : Association multiple extérieure.

Ajouter à S1 ou à S2 une substance étrangère S3 qui augmente la contrôlabilité ou qui donne à l'association les propriétés nécessaires. Cet ajout peut être définitif ou provisoire.



Ces idées de solutions doivent être ensuite qualifiées dans le contexte de l'étude et hiérarchisées. Une solution intéressante pourrait être un système d'induction qui chauffe un fluide eutectique magnétique placé dans des alvéoles de la plaque de cuisson. Cependant, cette solution est à explorer davantage, comme tous concepts générés dans une séance de créativité. Les solutions qui en résultent peuvent introduire de nouveaux problèmes. Par exemple, la solution d'un système de chauffe par induction d'un fluide eutectique magnétique va résoudre le problème de la température de la plaque et va favoriser une meilleure diffusion uniforme de la chaleur. Par contre, il faudra prendre soin de réfléchir à la toxicité et à la récupération du fluide en fin de vie. Outre les bénéfices environnementaux apportés pour un produit, les attentes d'utilisateurs, les enjeux stratégiques de l'entreprise sont également des contraintes à considérer dans le choix d'idées de solutions innovantes.

7.3.7 Comparaison des 2 méthodes utilisées

La méthode MAL'IN conduit directement à l'expression d'une contradiction technique qui permet de sélectionner 4 principes d'innovation. Ces principes induisent la qualité des idées de solutions trouvées.

La méthode Eco-MAL'IN par l'étude rapide des opportunités du produit et par la structuration à partir de l'ajustement de l'agencement oriente le groupe de créativité vers une solution surfacique. Cet ajustement de l'agencement va modifier le graphe substances/champs en conséquence et imposer l'utilisation du logigramme. On retrouve ici l'intérêt de l'analyse à partir de l'action à réaliser qui place le groupe de créativité dans une direction de recherche.

8 Conclusion

Nous proposons dans ce chapitre, un outil d'éco-innovation Eco-MAL'IN (figure 44), à partir d'une mutation d'une méthode existante MAL'IN (MAL'IN, Méthodes d'Aide à L'Innovation). La méthodologie de ce nouvel outil intègre la vision environnementale, le développement durable à la démarche d'analyse et d'innovation de produits industriels.

Dans la première partie du chapitre, nous avons décrit l'évolution de la méthode Eco-MAL'IN, en expliquant l'ensemble des étapes et en détaillant les outils que nous avons fait évolués et développés pour la méthode Eco-MAL'IN. La matrice Eco-MAL'IN concerne l'une des évolutions apportés à la méthodologie existante. Adaptée aux phases préliminaires de conception, cette matrice définit trente neuf actions à réaliser. Chaque action permet, à partir d'un choix particulier de conception environnementale, d'orienter un groupe de créativité dans l'analyse de l'ensemble produit étudié. La démarche d'analyse est appuyée sur l'analyse des opportunités existantes du produit et les fiches de connaissances.

A l'issue des données d'analyse retenue, nous avons aussi défini des structurations de problème, spécifiques à chaque action. Des biais d'attaque associés à chaque structuration conduisent à la formalisation du problème de conception. Cette formalisation va permettre de sélectionner les outils de résolution appropriés au problème de conception analysé. L'utilisation de l'outil de résolution permet au groupe de créativité de générer des idées de solutions éco-innovantes.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous avons appliqué la démarche d'éco-innovation sur un exemple de produit industriel « le gaufrier ». Les applications ont été menées à partir de trois actions consistant à :

- Eliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux
- Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction
- Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements

Chaque action oriente l'approche d'analyse, de structuration et de formalisation du problème vers une démarche de conception environnementale du gaufrier et des idées de solutions éco-innovantes.

Le troisième exemple offre une comparaison entre les deux démarches MAL'IN et Eco-MAL'IN. Il montre l'évolution de l'analyse et permet de remarquer l'intérêt principal de la nouvelle méthode, c'est-à-dire l'aide à la structuration et à la formalisation du problème.

CHAPITRE V : NOUVEL OUTIL D'ECO-INNOVATION : FAST ECO-MAL'IN

Des travaux préliminaires ont été réalisés pour faire évoluer l'outil MAL'IN en un outil d'éco-innovation. Il a été montré qu'il était nécessaire d'inclure une phase de pré-analyse, afin d'apporter au groupe de créativité une vision parcimonieuse de l'approche environnementale et du produit en phase préliminaire de conception. Cette vision est définie par la matrice Eco-MAL'IN et les trente-neufs actions à réaliser.

Les travaux de ce chapitre concernent un outil de résolution dérivé de la méthode Eco-MAL'IN appelé Fast Eco-MAL'IN. Cet outil d'éco-innovation est un outil matriciel rapide, facile d'accès et efficace limitant la phase d'analyse préalable du produit.

1 Les matrices Fast Eco-MAL'IN

L'outil dérivé de la méthode Eco-MAL'IN est basé sur la résolution de modèles de problèmes de conception posés en termes de contradictions techniques et associés au fonctionnement du produit (des paramètres de conception à améliorer et un fonctionnement non dégradé). Les modèles de problèmes sont définis pour les trente-neuf actions à réaliser de la matrice Eco-MAL'IN et sont donc associés aux sept axes d'éco-efficacité.

Nous avons associé des paramètres de conception à chaque action à réaliser. Le choix des paramètres de conception a été défini à partir d'une étude globale des 39 paramètres de conception de la théorie TRIZ (annexe 2). Ces paramètres sont considérés comme des paramètres à améliorer pertinents de l'action choisie. A titre d'exemple, le tableau 51 présente les paramètres de conception sélectionnés pour l'action à réaliser « réduire le nombre, la masse, le volume des composants, des composants d'interaction ». Dans ce cas précis, la masse et le volume sont directement des paramètres de conception TRIZ. Nous ajoutons le paramètre 26, quantité de substances, qui va mener à la réduction de masse ou de volume escompté.

Une sélection de paramètres de conception à améliorer a été déterminée de la même manière pour les trente-neuf actions à réaliser.

Actions à réaliser en conception	Paramètres de conception
Réduire le nombre, la masse, le volume des composants, des composants d'interaction	Masse d'une entité (mobile/immobile) (1,2), volume d'une entité (mobile/immobile) (7,8), quantité de substance (26).

Tableau 51 : Paramètres de conception (à améliorer), action à réaliser « réduire le nombre, la masse, le volume des composants, des composants d'interaction »

Pour une même action à réaliser, le groupe de créativité peut choisir entre des biais d'attaque de problème. La différence entre les modèles réside dans le choix du paramètre de conception à ne pas dégrader. Ces paramètres désignent des paramètres de conception liés au fonctionnement du produit. Il s'agit de :

- **la puissance** : la puissance est pertinente des possibilités de fonctionnement du système. Toute évolution de ce système ne doit pas affecter le fonctionnement donc ne pas dégrader la puissance. La puissance s'exprime par la dérivée de l'énergie par rapport au temps. Une vision parcimonieuse a été donnée par Sallaou et Pailhes (Pailhes et al, 10) à partir de la notion de variables conjuguées, la puissance est alors le produit de la variable d'état et de la variable temporelle. Ces variables sont des variables de conception,

- **la fiabilité** : c'est la probabilité que le produit remplisse sa mission, sans avoir aucune défaillance à la durée spécifiée dans le cahier des charges. L'étude de fiabilité touche à la qualité, aux questions de sécurité, à la tolérance aux fautes et concerne également la sûreté de fonctionnement et les problèmes liés à la maintenabilité,
- **la productivité** : est le rapport entre une production de biens ou de services et la quantité de facteurs de production utilisés pour réaliser cette production (énergie, matières premières, humains, etc.),
- **la facilité d'utilisation** : est la facilité avec laquelle un ensemble de tâches peut être accompli par un utilisateur. Pour un produit industriel, cela correspond à la facilité d'apprentissage et à la manipulation du produit en situation d'utilisation. L'approche de facilité d'utilisation est perçue différemment par l'utilisateur selon le produit en question (exemple : un petit ou un grand électroménager). Plusieurs notions lui sont associées. On retient: l'adaptabilité, la facilité au déplacement, l'ergonomie, le côté pratique, commode et intuitif.

Ces quatre paramètres de conception (à ne pas dégrader) sont sélectionnés parmi les 39 paramètres TRIZ (annexe 2). La figure 67 montre la démarche de définition du modèle de problème que nous appelons Fast Eco-MAL'IN pour bien préciser qu'elle peut être utilisée avec une analyse préalable sommaire.

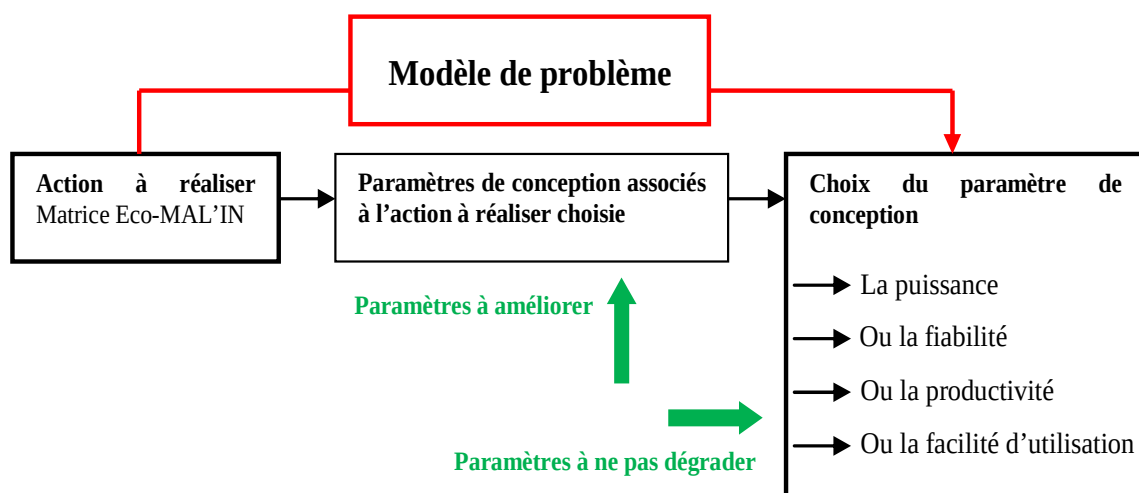


Figure 67 : Démarche Fast Eco-MAL'IN, définition de modèle de problème

A chaque modèle de problème correspond des principes d'innovation. Ces principes découlent de la contradiction technique choisie pour une action à réaliser, c'est-à-dire, les paramètres de conception à améliorer associés à l'action choisie et le paramètre de conception à ne pas dégrader (la puissance/ la fiabilité/ la productivité/ la facilité d'utilisation).

Afin d'expliquer l'ensemble des modèles de problème de chaque action à réaliser, la construction des matrices de résolution proposées et les principes d'innovation qui en découlent, nous présentons en détail la démarche suivie pour la première action à réaliser :
« Réduire le nombre, la masse, le volume des composants, des composants d'interaction »

Le tableau 52 détaille la liste de tous les principes d'innovation relevés par les contradictions technique de l'action à réaliser : une contradiction basée sur chaque paramètre de conception à améliorer (Masse d'une entité (mobile/immobile) (1,2), volume d'une entité (mobile/immobile) (7,8), quantité de substance (26)) et chaque paramètre de conception à ne

pas dégrader (la puissance/ la fiabilité/ la productivité/ la facilité d'utilisation). La dernière ligne correspond aux principes d'innovation évoqués au moins 2 fois à travers les différentes contradictions techniques exprimées. Les premiers principes d'innovation sont ceux qui sont les plus cités pour chaque modèle de problème. Cependant, concernant l'action à réaliser n°39 nous ne pouvons associer que le paramètre de conception « adaptabilité ». Par conséquent, les principes d'innovation sont directement ceux données par la matrice des contradictions.

Actions à réaliser en conception	Paramètres de conception	Puissance Non dégradée	Fiabilité Non dégradée	Productivité Non dégradée	Facilité d'util. Non dégradée
Réduire le nombre, la masse, le volume des composants, des composants d'interaction	Masse d'une entité mobile (1)	12 Equipotentialité 36 Trans. de phase 18 Vibration méca 31 Mat. poreux	1 Segmentation 3 Qualité locale 11 Prévention 27 Ephémère	35 Chgt Propriétés 3 Qualité locale 24 Intermédiaire 37 Expansion th	35 Chgt Propriétés 3 Qualité locale 2 Extraction 24 Intermédiaire
	Masse d'une entité immobile (2)	15 Adaptabilité 19 Action périod. 18 Vibration méca 22 Trans effet nuisible/utile	10 Anticipation 28 Evol Syst méca 8 Contre poids 3 Qualité locale	1 Segmentation 28 Evol Syst méca 15 Adaptabilité 35 Chgt Propriétés	6 Universalité 13 Alternative 1 Segmentation 32 Chgt couleur
	Volume d'une entité mobile (7)	35 Chgt Propriétés 6 Universalité 13 Alternative 18 Vibration méca	14 Courbure 1 Segmentation 40 Mat Composite 11 Prévention	10 Anticipation 6 Universalité 2 Extraction 34 Rejet, régénér	15 Adaptabilité 13 Alternative 30 Déformable 12 Equipotentialité
	Volume d'une entité immobile (8)	30 Déformable 6 Universalité	2 Extraction 35 Chgt Propriétés 16 Action réduite	35 Chgt Propriétés 37 Expansion th 10 Anticipation 2 Extraction	
	Quantité de substance (26).	35 Chgt Propriétés	18 Vibration méca 3 Qualité locale 28 Evol Syst méca 40 Mat Composite	13 Alternative 29 Les fluides 3 Qualité locale 27 Ephémère	35 Chgt Propriétés 29 Les fluides 25 Self service 10 Anticipation
Les principes d'innovation communs aux contradictions techniques ➔		18 Vibration méca (3 fois) 35 Chgt Propriétés (2 fois) 6 Universalité (2 fois)	3 Qualité locale (3 fois) 1 Segmentation (2 fois) 11 Prévention (2 fois)	35 Chgt Propriétés (3 fois) 3 Qualité locale (2 fois) 10 Anticipation (2 fois) 2 Extraction (2 fois) 37 Expansion th (2 fois)	35 Chgt Propriétés (2 fois) 13 Alternative (2 fois)

Tableau 52 : Vision détaillée de l'ensemble des principes d'innovation à l'action à réaliser « réduire le nombre, la masse, le volume des composants, des composants d'interaction »

La résolution du problème de conception consiste alors, pour une action à réaliser, à organiser un brainstorming sur les principes d'innovation agrégés au modèle de problème choisi. Les idées de solutions générées par l'interprétation des principes d'innovation peuvent être orientées par l'utilisation des fiches de connaissances associées à l'action à réaliser et la fiche ressource MAL'IN adaptée à la vision développement durable (annexe 7).

En termes d'outil, comme il a été expliqué préalablement, les modèles de problèmes proposés sont classés selon sept tableaux représentant chacun un axe d'éco-efficacité (tableaux de 53 à 59). La première et la deuxième colonne des sept tableaux reprend les situations de vie de chaque axe d'éco-efficacité et les actions à réaliser qui lui sont associées. La troisième colonne correspond aux paramètres de conception à améliorer pour chaque action à réaliser.

Les paramètres de conception à ne pas dégrader sont définis dans les quatre dernières colonnes de chaque tableau (puissance/fiabilité/productivité et facilité d'utilisation).

Les paramètres de conception à améliorer (colonnes 3) seront ensuite éliminés pour laisser place à un outil final ne comportant que les actions à réaliser et les principes d'innovation sélectionnés.

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Paramètres de conception	Puissance Non dégradée	Fiabilité Non dégradée	Productivité Non dégradée	Facilité d'util. Non dégradée
Extraction de MP	1. Réduire le nombre, la masse, le volume des composants, des composants d'interaction	Masse d'une entité (mobile/immobile) (1,2), volume d'une entité (mobile/immobile) (7,8), quantité de substance (26).	18 Vibration méca 35 Chgt Propriétés 6 Universalité	3 Qualité locale 1 Segmentation 11 Prévention	35 Chgt Propriétés 3 Qualité locale 10 Anticipation 2 Extraction 37 Expansion th	35 Chgt Propriétés 13 Alternative
Industrialisation	2. Optimiser la conception de l'ensemble produit pour réduire, éliminer les chutes de fabrication	Surface d'une entité (mobile /immobile) (5,6), volume d'une entité (mobile/immobile), forme (12), précision de l'usinage (29), usinabilité (32), complexité de l'appareil (37)	32 Chgt couleur 18 Vibration méca 2 Extraction 6 Universalité 19 Action périod. 30 Le déformable	11 Prévention 40 Mat Composite 35 Chgt Propriétés 32 Chgt couleur 16 Action réduite 1 Segmentation	10 Anticipation 34 Rejet, régénér. 2 Extraction 26 La copie 35 Chgt Propriétés 17 Chgt dimension 28 Evol Syst méca	15 Adaptabilité 16 Action réduite 32 Chgt couleur 13 Alternative 26 La copie
Distribution	3. Optimiser l'ensemble produit pour minimiser les rejets lors de la distribution	Stabilité de l'entité (13), gaspillage d'énergie (22), gaspillage de substance (23), facteurs nuisibles agissant sur l'entité (30), facteurs nuisibles induits (31).	31 Mat. poreux 35 Chgt Propriétés 38 Oxydation 18 Vibration méca 2 Extraction	40 Mat Composite 10 Anticipation 24 Intermédiaire 2 Extraction 39 Env. inerte	35 Chgt Propriétés 38 Oxydation 10 Anticipation 23 Asservissement 22 Trans effet nuisible/utile	35 Chgt Propriétés 32 Chgt couleur 2 Extraction
Utilisation	4. Favoriser l'utilisation de composants et de composants d'interactions non perdables	Gaspillage de substance (23), quantité de substance (26), stabilité de l'entité (13).	27 Ephémère 35 Chgt Propriétés	40 Mat Composite	23 Asservissement 35 Chgt Propriétés 3 Qualité locale	35 Chgt Propriétés 32 Chgt couleur
	5. Modifier les composants et les composants d'interaction afin de minimiser l'utilisation de consommables	Masse d'une entité (immobile) (2), longueur d'une entité (immobile) (4), surface (immobile) (6), volume d'une entité (immobile) (8), vitesse (9), force (10), gaspillage d'énergie (22), gaspillage de substance (23), facteurs nuisibles induits (31).	38 Oxydation 18 Vibration méca	28 Evol Syst méca 35 Chgt Propriétés 40 Mat Composite 10 Anticipation 2 Extraction 16 Action réduite	35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 28 Evol Syst méca 16 Action réduite 15 Adaptabilité 7 Poup. Gigognes	32 Chgt couleur 2 Extraction 1 Segmentation
	6. Réduire, éliminer, réutiliser (circuit fermé) les rejets du produit	Stabilité de l'entité (13), gaspillage d'énergie (22), gaspillage de substance (23), facteurs nuisibles agissant sur l'entité (30), facteurs nuisibles induits (31).	31 Mat. poreux 35 Chgt Propriétés 38 Oxydation 18 Vibration méca 2 Extraction	40 Mat Composite 10 Anticipation 24 Intermédiaire 2 Extraction 39 Env. inerte	35 Chgt Propriétés 38 Oxydation 10 Anticipation 23 Asservissement 22 Trans effet nuisible/utile	35 Chgt Propriétés 32 Chgt couleur 2 Extraction
Fin de vie	7. Simplifier, optimiser, ajuster ou éliminer les produits auxiliaires	Masse d'une entité (immobile) (2), longueur d'une entité (immobile) (4), surface d'une entité (immobile) (6), volume d'une entité (immobile) (8), forme (12), quantité de substance (26).		28 Evol Syst méca 16 Action réduite 40 Mat Composite 35 Chgt Propriétés	10 Anticipation 35 Chgt Propriétés 15 Adaptabilité 7 Poup. Gigognes	35 Chgt Propriété 25 Self service
	8. Favoriser l'utilisation des matériaux auto-biodégradable, biodégradables, renouvelables	Stabilité de l'entité (13), facteurs nuisibles agissant sur l'entité (30), facteurs nuisibles induits (31).	2 Extraction 31 Mat. poreux 35 Chgt Propriétés	40 Mat Composite 2 Extraction 24 Intermédiaire	35 Chgt Propriétés 22 Trans effet nuisible/utile	

Tableau 53 : Matrices de résolution Fast Eco-MAL'IN, « Réduire l'influence matérielle »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Paramètres de conception	Puissance Non dégradée	Fiabilité Non dégradée	Productivité Non dégradée	Facilité d'util. Non dégradée
Utilisation	9. Faire évoluer des champs, substituer des champs, améliorer leur contrôlabilité	Force (10), énergie dépensée par l'entité (mobile/immobile) (19,20), pertes d'information (24), précision de la mesure (28), complexité de contrôle (37), degré d'automatisation (38).	19 Act. périodique 10 Anticipation 18 Vibration méca 37 Expansion th. 6 Universalité	27 Ephémère 23 Asservissement 11 Prévention 10 Anticipation 28 Evol Syst méca 21 Act. Rap Séc	35 Chgt Propriétés 28 Evol Syst méca 12 Equipotentialité	1 Segmentation 34 Rejet, régénér 3 la qualité locale
	10. Améliorer la géométrie des composants et des composants d'interaction, leurs agencements	Surface (mobile, immobile) (5,6), volume (mobile, immobile) (7,8), forme (12).	6 Universalité 18 Vibration méca 32 Chgt. couleur	40 Mat Composite 30 Déformable	2 Extraction 10 Anticipation 26 Copie 34 Rejet, régénér. 17 Chgt dimension	15 Adaptabilité 16 Action réduite 13 Alternative
	11. Réduire, maîtriser les interactions entre les composants et composants d'interaction, afin de minimiser les pertes d'énergie	Surface (mobile, immobile) (5,6), force (10), contrainte, pression (11), énergie dépensée par l'entité (mobile/immobile) (19,20), gaspillage d'énergie (22), facteurs nuisibles induits (31), degré d'automatisation (38).	35 Chgt Propriétés 18 Vibration méca 19 Action périod. 10 Anticipation 2 Extraction 32 Chgt. Couleur 10 Anticipation	35 Chgt Propriétés 13 Alternative 10 Anticipation 40 Mat Composite 11 Prévention 19 Action périod. 21 Act. Rap Séc.	35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 28 Evol Syst méca 37 Expansion th 12 Equipotentialité	1 Segmentation 16 Action réduite 35 Chgt Propriétés
	12. Réutiliser (circuit fermé) les énergies rejetées ou perdues au cours du fonctionnement	Energie dépensée par l'entité (mobile/immobile) (19,20), stabilité de l'entité (13), gaspillage d'énergie (22).	6 Universalité 19 Action périod. 37 Expansion th 18 Vibration méca 22 Transf. Effet nuisible/utile 35 Chgt Propriétés 27 Ephémère 31 Mat. poreux 3 la qualité locale 38 Oxydation	11 Prévention	35 Chgt Propriétés 28 Evol Syst méca	35 Chgt Propriétés 32 Chgt. couleur
Fin de vie	13. Permettre la récupération des énergies accumulées	Masse d'une entité (immobile) (2), surface d'une entité (immobile) (6), volume d'une entité (immobile) (8), forme (12), stabilité de l'entité (13), adaptabilité (35).	19 Act. périodique 6 Universalité 32 Chgt. couleur	35 Chgt Propriétés 40 Mat Composite 10 Anticipation 8 Contre poids	35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 37 Expansion th. 28 Evol Syst méca 15 Adaptabilité 17 Chgt dimension	32 Chgt. Couleur 15 Adaptabilité 1 Segmentation 16 Action réduite

Tableau 54 : Matrices de résolution Fast Eco-MAL'IN, « Augmenter l'efficacité énergétique »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Paramètres de conception	Puissance Non dégradée	Fiabilité Non dégradée	Productivité Non dégradée	Facilité d'util. Non dégradée
Industrialisation	14. Permettre par la conception d'éliminer les rejets toxiques de l'ensemble produit, ainsi que leurs interférences	Surface d'une entité (mobile/immobile) (5,6), stabilité de l'entité (13), gaspillage d'énergie (22), gaspillage de substance (23), facteurs nuisibles induits (31).	32 Chgt couleur 18 Vibration méca 27 Ephémère 35 Chgt Propriétés 38 Oxydation	35 Chgt Propriétés 29 Fluides 40 Mat Composite 10 Anticipation 39 Envir. inerte	35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 28 Evol Syst méca 23 Asservissement	32 Chgt couleur 35 Chgt Propriétés 16 Action réduite
Distribution	15. Permettre la stabilité ou la contrôlabilité des flux de matériaux et énergie toxiques et de leurs interférences	Stabilité de l'entité (13), précision de la mesure (28), facteurs nuisibles agissant sur l'entité (30), facteurs nuisibles induits (31), complexité de l'appareil (36), complexité de contrôle (37).	32 Chgt couleur 35 Chgt Propriétés 19 Action périod 2 Extraction 31 Mat Poreux	40 Mat Composite 1 Segmentation 24 Intermédiaire 2 Extraction 27 Ephémère	35 Chgt Propriétés 28 Evol Syst méca 18 Vib. Méca 22 Transf. Effet nuisible/utile	2 Extraction
Utilisation	16. Eliminer les matériaux interdits	Stabilité de l'entité (13), résistance (14), longévité d'une entité (mobile/immobile) (15,16), fiabilité (27), usinabilité (32).	35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 27 Ephémère 31 Mat Poreux 26 La copie	11 Prévention	35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 14 Courbure 29 Les fluides 28 Evol Syst méca 1 Segmentation	32 Chgt couleur 40 Mat Composite 2 Extraction 27 Ephémère
	17. Eliminer ou réduire la quantité des flux énergétiques toxiques du produit et leurs interférences	Surface d'une entité (mobile/immobile) (5,6), Gaspillage d'énergie (22), facteurs nuisibles induits (31).	32 Chgt couleur 18 Vibration méca	35 Chgt Propriétés 40 Mat Composite	10 Anticipation 35 Chgt Propriétés	16 Action réduite
	18. Rendre inertes, passifs tous les rejets toxiques du produit	Stabilité de l'entité (13), gaspillage d'énergie (22), gaspillage de substance (23), facteurs nuisibles induits (31).	18 Vibration méca 35 Chgt Propriétés 27 Ephémère 38 Oxydation	39 Envir. inerte 35 Chgt Propriétés 10 Anticipation	35 Chgt Propriétés 28 Evol Syst méca 10 Anticipation	32 Chgt couleur 35 Chgt Propriétés
	19. Permettre la stabilité ou la contrôlabilité des flux de matériaux et énergie toxiques et de leurs interférences	Stabilité de l'entité (13), précision de la mesure (28), facteurs nuisibles agissant sur l'entité (30), facteurs nuisibles induits (31), complexité de l'appareil (36), complexité de contrôle (37).	32 Chgt couleur 35 Chgt Propriétés 19 Action périod 2 Extraction 31 Mat Poreux	40 Mat Composite 1 Segmentation 24 Intermédiaire 2 Extraction 27 Ephémère	35 Chgt Propriétés 28 Evol Syst méca 18 Vib. Méca 22 Transf. Effet nuisible/utile	2 Extraction
Fin de vie	20. Permettre la rétention, la localisation et l'identification des composants toxiques pour la récupération	Masse d'une entité (immobile) (2), longueur d'une entité immobile (4), surface d'une entité (immobile) (6), volume d'une entité (immobile) (8), Forme (12), pertes d'informations (24)	19 Action périod. 6 Universalité	10 Anticipation 40 Mat Composite 35 Chgt Propriétés 16 Action réduite 28 Evol Syst méca	10 Anticipation 35 Chgt Propriétés 15 Adaptabilité 17 Chgt dimension 7 Poupée gigogne 26 Copie	32 Chgt couleur

Tableau 55 : Matrices de résolution Fast Eco-MAL'IN, « Eliminer les risques de toxicité »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Paramètres de conception	Puissance Non dégradée	Fiabilité Non dégradée	Productivité Non dégradée	Facilité d'util. Non dégradée
Utilisation	21. Protéger et rendre les composants et les composants d'interaction réutilisables	Surface d'une entité (mobile/immobile) (5,6), stabilité de l'entité (13), résistance (14), longévité d'une entité (mobile/immobile) (15,16), précision de l'usinage (29), facteurs nuisibles agissant sur l'entité (30), aptitude à la réparation (34).	32 Chgt. Couleur 19 Act. périodique 10 Anticipation 35 Chgt Propriétés 2 Extraction.	11 Prévention 40 Mat Composite 2 Extraction 1 Segmentation 27 Ephémère 32 Chgt. Couleur	10 Anticipation 35 Chgt Propriétés 17 Chgt dimension 14 Courbure 32 Chgt. Couleur	32 Chgt. Couleur 15 Adaptabilité 1 Segmentation 35 Chgt Propriétés 16 Action réduite 12 Equipotentialité
	22. Permettre la rétention, le stockage et l'accessibilité des consommables du produit	Masse d'une entité (immobile) (2), longueur d'une entité immobile (4), surface d'une entité (immobile) (6), volume d'une entité (immobile) (8), Forme (12), pertes d'informations (24)	19 Action périod. 6 Universalité	10 Anticipation 40 Mat Composite 35 Chgt Propriétés 16 Action réduite 28 Evol Syst méca	10 Anticipation 35 Chgt Propriétés 15 Adaptabilité 17 Chgt dimension 7 Poupée gigogne 26 Copie	32 Chgt couleur
Fin de vie	23. Agir sur la géométrie des composants et des composants d'interactions de l'ensemble produit pour diminuer les volumes à recycler	Volume d'une entité (mobile/immobile) (7,8), forme (12), adaptabilité (35).	6 Universalité	40 Mat Composite 35 Chgt Propriétés 16 Action réduite	10 Anticipation 35 Chgt Propriétés 6 Universalité 37 Expansion th. 34 Rejet, régénér 2 Extraction	15 Adaptabilité
	24. Utiliser des composants et des composants d'interaction recyclables, valorisables et réutilisables	Précision de l'usinage (29), aptitude à la réparation (34), adaptabilité (35).	2 Extraction. 32 Chgt couleur	11 Prévention 1 Segmentation	32 Chgt couleur 10 Anticipation	1 Segmentation 15 Adaptabilité
	25. Eliminer les composants d'interaction, les composants poly-matériaux	Surface d'une entité (immobile) (6), force (10), forme (12), stabilité de l'entité (13), quantité de substance (26).	35 Chgt Propriétés 32 Chgt. Couleur	40 Mat Composite 35 Chgt Propriétés 3 Qualité locale	3 Qualité locale 35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 17 Chgt dimension	32 Chgt. Couleur 35 Chgt Propriétés 25 Self service
	26. Concevoir pour désassembler, simplifier et standardiser les composants d'interaction	Surface d'une entité (immobile) (6), force (10), forme (12), stabilité de l'entité (13), quantité de substance (26), adaptabilité (35).	35 Chgt Propriétés 32 Chgt. Couleur 19 Act. périodique	40 Mat Composite 35 Chgt Propriétés 3 Qualité locale 13 Alternative	3 Qualité locale 35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 37 Expansion th. 28 Evol Syst méca 17 Chgt dimension	32 Chgt. Couleur 35 Chgt Propriétés 25 Self service 15 Adaptabilité 16 Action réduite 1 Segmentation

Tableau 56 : Matrices de résolution Fast Eco-MAL'IN, « Améliorer la recyclabilité et la réutilisation »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Paramètres de conception	Puissance Non dégradée	Fiabilité Non dégradée	Productivité Non dégradée	Facilité d'util. Non dégradée
Utilisation	27. Favoriser l'utilisation des énergies renouvelables	Température (17), gaspillage d'énergie (22), adaptabilité (35).		35 Chgt Propriétés 10 Anticipation	28 Evol Syst méca 35 Chgt Propriétés	1 Segmentation
	28. Optimiser l'utilisation des ressources du produit et de son milieu extérieur, en favorisant les ressources durables	Masse d'une entité (mobile/immobile) (1,2), volume d'une entité (mobile/immobile) (7,8), gaspillage d'énergie (22), gaspillage de substance (23), pertes de temps (25), quantité de substance (26).	18 Vibration méca 35 Chgt Propriétés 6 Universalité 38 Oxydation	10 Anticipation 11 Prévention 35 Chgt Propriétés 40 Mat Composite 3 Qualité locale 28 Evol Syst méca 1 Segmentation	35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 28 Evol Syst méca 37 Expansion th. 3 Qualité locale 29 Les fluides	35 Chgt Propriétés 32 Chgt couleur 2 Extraction 28 Evol Syst méca 13 Alternative 1 Segmentation 10 Anticipation 24 Intermédiaire
Fin de vie	29. Optimiser l'utilisation des ressources de l'ensemble produit par la rétention, la localisation et l'identification des composants pour la récupération	Masse d'une entité (immobile) (2), longueur d'une entité immobile (4), surface d'une entité (immobile) (6), volume d'une entité (immobile) (8), Forme (12), pertes d'informations (24)	19 Action périod. 6 Universalité	10 Anticipation 40 Mat Composite 35 Chgt Propriétés 16 Action réduite 28 Evol Syst méca	10 Anticipation 35 Chgt Propriétés 15 Adaptabilité 17 Chgt dimension 7 Poupée gigogne 26 Copie	32 Chgt couleur

Tableau 57 : Matrices de résolution Fast Eco-MAL'IN, « Optimiser l'utilisation des ressources »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Paramètres de conception	Puissance Non dégradée	Fiabilité Non dégradée	Productivité Non dégradée	Facilité d'util. Non dégradée
Utilisation	30. Améliorer la pérennité des composants par l'évolution de leurs structures	Force (10), contrainte, pression (11), forme (12), stabilité de l'entité (13), résistance (14).	35 Chgt Propriétés 10 Anticipation	35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 3 Qualité locale 13 Alternative	35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 3 Qualité locale 37 Expansion th. 14 Courbure	32 Chgt couleur 28 Evol Syst méca
	31. Améliorer la pérennité des composants par l'évolution des caractéristiques des matériaux	Stabilité de l'entité (13), résistance (14), brillance (18), facteurs nuisibles agissant sur l'entité (30).	32 Chgt couleur 35 Chgt Propriétés 31 Mat. poreux		35 Chgt Propriétés	28 Evol Syst méca 32 Chgt couleur 2 Extraction
	32. Maîtriser l'état et l'agencement des composants et des composants d'interaction du produit au cours de son fonctionnement	Surface d'une entité (mobile/immobile) (5,6), force (10), stabilité de l'entité (13), résistance (14), facteurs nuisibles agissant sur l'entité (30).	19 Action périod. 32 Chgt couleur 35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 18 Vibration méca 31 Mat. poreux	40 Mat Composite 3 Qualité locale 35 Chgt Propriétés	35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 3 Qualité locale	28 Evol Syst méca 32 Chgt couleur 16 Action réduite 2 Extraction 25 Self service
	33. Optimiser la maintenance	Forme (12), stabilité de l'entité (13), résistance (14), longévité d'une entité (mobile/immobile) (15,16), facteurs nuisibles agissant sur l'entité (30), facteurs nuisibles induits (31), aptitude à la réparation (34).	2 Extraction 35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 32 Chgt couleur 19 Action périod.	40 Mat Composite 2 Extraction 11 Prévention 10 Anticipation 16 Action réduite 24 Intermédiaire 27 Ephémère	10 Anticipation 35 Chgt Propriétés 14 Courbure 17 Chgt dimension 22 Transf. Effet nuisible/utile	32 Chgt couleur 1 Segmentation 28 Evol Syst méca 26 La copie 12 Equipotentialité 15 Adaptabilité 2 Extraction
	34. Permettre la personnalisation de l'ensemble produit	Masse d'une entité (2), forme (12), longévité d'une entité (mobile/immobile) (15,16), brillance (18), facilité d'utilisation (33), adaptabilité (35).	19 Action périod. 35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 2 Extraction	40 Mat Composite 8 Contre poids 27 Ephémère 13 Alternative 10 Anticipation	28 Evol Syst méca 35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 1 Segmentation 16 Action réduite 17 Chgt dimension 15 Adaptabilité	1 Segmentation 32 Chgt couleur 15 Adaptabilité 26 La copie

Tableau 58 : Matrices de résolution Fast Eco-MAL'IN, « Augmenter la durée de vie et l'estime du produit »

Sdv impactée	Actions à réaliser en conception	Paramètres de conception	Puissance Non dégradée	Fiabilité Non dégradée	Productivité Non dégradée	Facilité d'util. Non dégradée
Distribution	35. Intégrer à l'ensemble produit des fonctions améliorant la phase distribution	Fiabilité (27), facteurs nuisibles agissant sur l'entité (30), facteurs nuisibles induits (31), facilité d'utilisation (33), adaptabilité (35), complexité de l'appareil (36), complexité de contrôle (37)	19 Action period. 2 Extraction 35 Chgt Propriétés 34 Rejet 31 Mat Poreux 10 Anticipation 1 Segmentation	27 Ephémère 24 Intermédiaire 2 Extraction 35 Chgt Propriétés 13 Alternative 40 Mat Composite 8 Contre Poids	1 Segmentation 35 Chgt Propriétés 22 Transf. Effet nuisible/utile 28 Evol Syst méca 18 Vibration méca	27 Ephémère 2 Extraction
Utilisation	36. Intégrer à l'ensemble produit des fonctions améliorant la phase d'utilisation	Fiabilité (27), facteurs nuisibles agissant sur l'entité (30), facteurs nuisibles induits (31), facilité d'utilisation (33), adaptabilité (35), complexité de l'appareil (36), complexité de contrôle (37)	19 Action period. 2 Extraction 35 Chgt Propriétés 34 Rejet 31 Mat Poreux 10 Anticipation 1 Segmentation	27 Ephémère 24 Intermédiaire 2 Extraction 35 Chgt Propriétés 13 Alternative 40 Mat Composite 8 Contre Poids	1 Segmentation 35 Chgt Propriétés 22 Transf. Effet nuisible/utile 28 Evol Syst méca 18 Vibration méca	27 Ephémère 2 Extraction
	37. Agir sur l'interface produit / utilisateur	Surface d'une entité (mobile/immobile) (5,6), force (10), forme (12), facilité d'utilisation (33), adaptabilité (35).	19 Action period. 10 Anticipation 32 Chgt couleur 2 Extraction 18 Vibration méca 35 Chgt Propriétés	35 Chgt Propriétés 40 Mat Composite 8 Contre Poids 13 Alternative	10 Anticipation 26 Copie 28 Evol Syst méca 34 Rejet 15 Adaptabilité 35 Chgt Propriétés 17 Chgt dimension 37 Expansion th	16 Action réduite 15 Adaptabilité 1 Segmentation
	38. Augmenter la sûreté de fonctionnement (maintenabilité, fiabilité, sécurité, disponibilité) et l'adaptabilité pour rendre le produit accessible à plusieurs utilisateurs	Longévité d'une entité (mobile/immobile) (15,16), fiabilité (27), facilité d'utilisation (33), aptitude à la réparation (34), adaptabilité (35), complexité de contrôle (37), degré d'automatisation (38).	10 Anticipation 2 Extraction 19 Act. Périodique 35 Chgt Propriétés 16 Action réduite 1 Segmentation	8 Contre Poids 27 Ephémère 11 Prévention 40 Mat Composite 13 Alternative	35 Chgt Propriétés 28 Evol Syst méca 1 Segmentation 10 Anticipation	1 Segmentation 12 Equipotentialité 27 Ephémère 34 Rejet
	39. Intégrer tout ou partie des fonctions du produit dans les milieux environnants	Adaptabilité (35).	19 Act. Périodique 1 Segmentation 29 Les fluides	35 Chgt Propriétés 13 Alternative 8 Contre Poids 24 Intermédiaire	35 Chgt Propriétés 28 Evol Syst méca 6 Universalité 37 Expansion th	15 Adaptabilité 34 Rejet 1 Segmentation 16 Action réduite

Tableau 59 : Matrices de résolution Fast Eco-MAL'IN, « Augmenter les fonctionnalités et les services »

2 Utilisation de la démarche Fast Eco-MAL'IN

La définition d'un modèle de problème repose sur le choix de l'action à réaliser. Ce choix est défini par une vision stratégique prédéfinie de l'entreprise ou par une volonté de démarche environnementale non clairement identifiée (entreprises recherchant l'originalité et le challenge).

A partir d'une action à réaliser, le groupe de créativité définit son modèle de problème de conception en choisissant un paramètre de conception à ne pas dégrader (la puissance/ la fiabilité/ la productivité/ la facilité d'utilisation). Le choix du paramètre de conception à ne pas dégrader oriente la phase de résolution du modèle problème vers l'optimisation du fonctionnement du produit selon le paramètre sélectionné. La résolution du problème utilise directement les principes d'innovation associés au paramètre choisi. La figure 68 montre le synoptique de la démarche Fast Eco-MAL'IN.

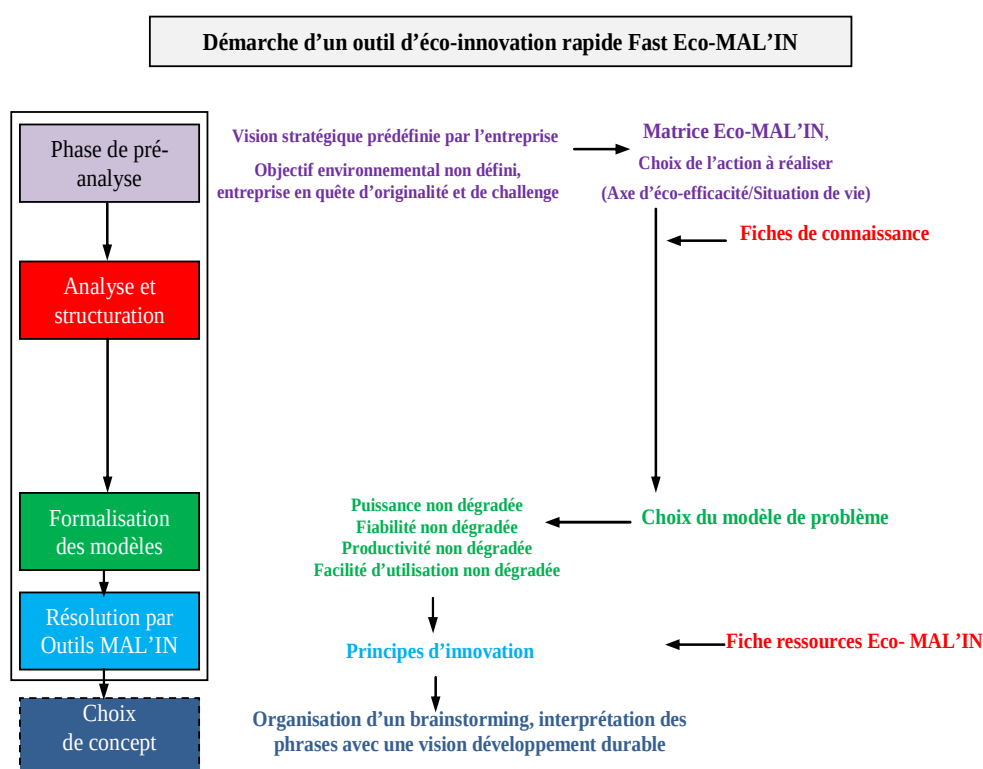


Figure 68 : Synoptique de la démarche Fast Eco-MAL'IN

Si nous voulons, par exemple, travailler sur l'action à réaliser (N°1) « Réduire le nombre, la masse, le volume des composants, des composants d'interaction ». Le tableau 60 regroupe les quatre modèles de problème possibles. La résolution du problème dépend du choix sur le fonctionnement qu'ils souhaitent ne pas dégrader dans la re-conception de l'ensemble produit.

Actions à réaliser en conception	Puissance Non dégradée	Fiabilité Non dégradée	Productivité Non dégradée	Facilité d'util. Non dégradée
Réduire le nombre, la masse, le volume des composants, des composants d'interaction	18 Vibration méca 35 Chgt Propriétés 6 Universalité	3 Qualité locale 1 Segmentation 11 Prévention	35 Chgt Propriétés 3 Qualité locale 10 Anticipation 2 Extraction 37 Expansion th	35 Chgt Propriétés 13 Alternative

Tableau 60 : Les 4 modèles de problème, action à réaliser « réduire le nombre, la masse, le volume des composants, des composants d'interaction »

Le choix d'un modèle de problème dépend du produit et des objectifs de l'entreprise. Un groupe de créativité peut choisir aussi de travailler sur deux ou plusieurs modèles de problème. Dans ce cas, le groupe de créativité élargit sa démarche de résolution vers les principes d'innovation associés au fonctionnement non dégradé choisi.

3 Quatrième application : personnalisation d'un ensemble produit

Nous proposons, à travers la quatrième application, d'utiliser la démarche Fast Eco-MAL'IN pour l'action à réaliser «*Permettre la personnalisation de l'ensemble produit*». Cette action n°34 fait partie de la Matrice de résolution «*Augmenter la durée de vie et l'estime du produit*».

A la différence des trois premières applications concernant une démarche de conception environnementale basée sur la réduction d'impacts ou l'amélioration de situations de vie, l'objectif de cette action consiste à re-concevoir le gaufrier en considérant des critères d'estime de l'utilisateur.

L'enjeu de cette application est d'illustrer l'utilisation de notre outil Fast Eco-MAL'IN par un designer et de montrer son apport en démarche de créativité technique, et notamment dans la génération de concepts éco-innovants.

3.1 Recherche de critères de personnalisation : approche de designer

Le designer est défini selon (ENSCI-DPI 98) comme étant un professionnel de la création au service de l'entreprise. C'est aussi un généraliste aux spécialités multiples qui allie intuition et expérience pour innover et formuler des solutions concrètes.

A l'instar du rôle clairement formalisé du concepteur dans la conception et l'innovation de produits industriels (anticiper les besoins des utilisateurs et développer de nouvelles fonctions), le designer a des compétences certes moins formulés, mais qui permettent de créer le marketing et l'identité du produit. D'après Jean-Charles Lebahar (Lebahar 94), le rôle du designer consiste à intégrer pour d'autres, leur propre environnement, en le « vivant » lui-même à leurs places. Le designer s'approprie aussi la dimension symbolique qu'est la mode et en fait un moyen original d'expression à travers la conception de produits. Pour Bruno Danese (Danese 90), le designer donne les moyens de rêver à travers une recherche d'esthétique associant son imaginaire à lui, son expérience au respect du matériau et de la fonction du produit. Ainsi, il aboutit à faire du consommateur un « être participant ».

Dans l'ouvrage design industriel de A à Z, Charlotte et Peter Fiell (Charlotte et al, 06), souligne que le rôle de designers industriels s'est démocratisé vers la fin du 19^{ème} siècle. En effet, les spécialistes des techniques, des matériaux et de la production qui avant concevaient les produits industriels, commencent à comprendre qu'ils peuvent creuser l'écart avec leurs concurrents en améliorant l'intégrité fonctionnelle et l'aspect esthétique de leurs produits.

En partant de ce constat, on note que le rôle du designer est capital puisque dans la plupart des cas, l'estime de l'utilisateur pour un produit appuie l'acte d'achat et la durée de possession d'un produit. La fonction d'estime qui a pour but de séduire l'utilisateur concerne tous critères personnels liés aux goûts des utilisateurs (forme, couleur, usage, mode). La fonction d'estime est considérée aussi comme un lien affectif qui peut s'établir entre l'utilisateur et le produit. On choisit l'objet pour des raisons personnelles, culturelles et émotionnelles. L'objet lui-même peut avoir une charge symbolique.

Concevoir un produit personnalisé (fonction d'estime) relève d'un processus de conception et de design assez complexe dépendant d'influences et de facteurs divers : l'environnement de l'utilisateur, sa culture, sa religion, ses valeurs.... Ces critères sont des critères variables, qui ensemble contribuent à construire un produit adapté à un utilisateur. Nous nommons ces critères « critères de personnalisation de l'ensemble produit ». Outre ces critères externes, Norman (Norman 04) ajoute la dimension cognitive et émotionnelle dans la perception du produit qui est propre à chaque utilisateur. Trois niveaux sont identifiés :

- La dimension instinctive : elle concerne le premier contact visuel (apparence du produit, caractéristiques au toucher, premières impressions).
- La dimension comportementale : elle touche à l'utilisation du produit (efficacité d'utilisation, facilité de l'utilisation et d'adaptabilité, expérience personnel).
- La dimension de réflexion : elle englobe à la fois l'émotion et l'expérience en exploitant l'interprétation, la compréhension et le raisonnement.

Intégrer ces trois niveaux en démarche de conception signifie qu'un produit unique et standard ne peut pas satisfaire tous les utilisateurs.

Dans l'ouvrage « *design/designer* », Terence Conran et Max Fraser (Conran et al, 05) engagent la question sur la nouvelle société de consommation, l'accélération du progrès technique et technologique au cours du 20ème siècle et soulèvent la problématique de l'évolution de l'interface entre le produit et le consommateur : interface numérique, reconnaissance vocale, l'intégration des puces RFID.... Toute la sophistication des technologies de communication devient la référence d'un produit en phase avec notre époque et sont considérés comme les nouvelles attentes des utilisateurs et donc comme des critères de personnalisation de produit.

Terence Conran et Max Fraser soulignent aussi que face à la problématique environnementale actuelle, de nombreux designers se sont engagés à mettre en œuvre des solutions intelligentes pour pallier aux problèmes écologiques par le biais d'une transformation de notre environnement matériel. En accord avec cette réflexion, Stéphane Villard (Villard 09) explique que les contraintes environnementales actuelles représentent un cadre ouvert à l'innovation et une mutation de la pratique même de la conception. Dans ces propos, il parle aussi de l'intégration de la vision environnementale en design qu'il nomme « *conception écologique du design* ». Selon lui, la conception écologique du design devient un critère essentiel dans notre société actuelle et aussi un critère de personnalisation de produit.

Dans l'ouvrage « *éléments de design industriel* » (Quarante 94), Danielle Quarante, critique la croyance répandue des produits personnalisés qui consiste à intégrer une dimension esthétique au produit, en tant que « quelque chose en plus », « quelque chose de spécial », classé « à part », apparenté à « un habillage », l'esthétique comme une « valeur ajoutée ». En d'autre terme, rendre le produit plus attractif pour mieux le vendre. Cette approche a aussi été critiquée par Dubuisson et Hennion dans l'ouvrage « *le design : l'objet dans l'usage* » (Dubuisson et al, 96). Ils expliquent que le design ne doit pas être perçu comme une action venant achever la conception du produit industriel en lui accordant un droit à l'esthétisme. Ils soulignent par contre l'importance du designer dans la représentation de l'utilisateur et de l'environnement externe dans un processus de conception et donc à la personnalisation du produit.

A l'encontre de cette vision rudimentaire de l'approche esthétique du produit, Danielle Quarante aborde la notion de l'esthétique du produit comme une approche à la fois globale et relative et la considère aussi comme partie intégrante du produit. La figure 69 présente les principaux facteurs relatifs à l'esthétique des produits (les facteurs harmoniques, les facteurs

fonctionnels, les facteurs historiques et technologiques, les facteurs culturels et les facteurs sociaux). Danielle Quarante ajoute que dans un système complexe et interactif, l'esthétique des produits est la résultante de l'ensemble de ces principaux facteurs.

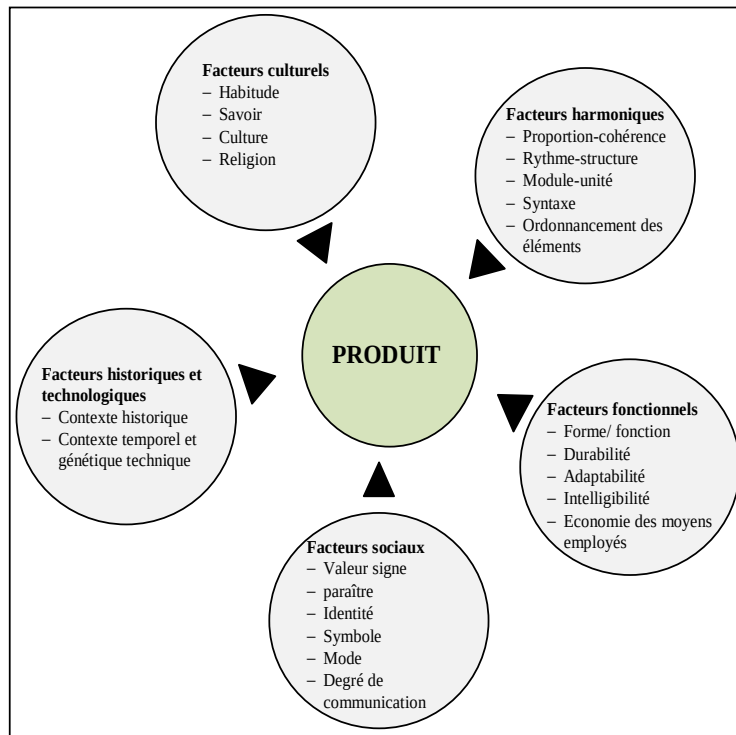


Figure 69 : Composantes esthétiques du produit (Quarante 94)

3.2 Synthèse : définition de critères de personnalisation

En démarche de conception et d'innovation produits, inclure tous ces facteurs (harmoniques, fonctionnels, historiques, technologiques, culturels et sociaux) est une tâche complexe. Il faut adapter ces facteurs aux contraintes classiques de définition du cahier des charges fonctionnels, et apporter au groupe de créativité des facteurs déterminants permettant de créer des solutions satisfaisant les besoins et les désirs des consommateurs tout en obéissant à des contraintes techniques et sociales données.

L'approche de re-conception et de personnalisation de l'ensemble produit qu'on propose repose sur l'analyse des composants, des composants d'interaction et des milieux extérieurs. Cette analyse est conduite selon quatre critères :

- les critères d'usage,
- les critères esthétiques,
- les critères personnels,
- et les critères environnementaux.

Nous considérons ces critères comme déterminants de la démarche de personnalisation de l'ensemble produit. Le caractère dynamique des tendances socio-culturelles, les évolutions technologiques et la religion sont des facteurs qui contraignent l'évolution de ces critères et par conséquent, la perception de l'utilisateur pour un produit personnalisé. Outre les critères d'usages, les critères esthétiques et les critères personnels du produit, le critère environnemental est aujourd'hui indispensable dans la considération des objectifs de conception et d'innovation, notamment dans sa personnalisation. La figure 70 illustre les critères déterminants que nous retenons dans la démarche de personnalisation pour un ensemble produit.

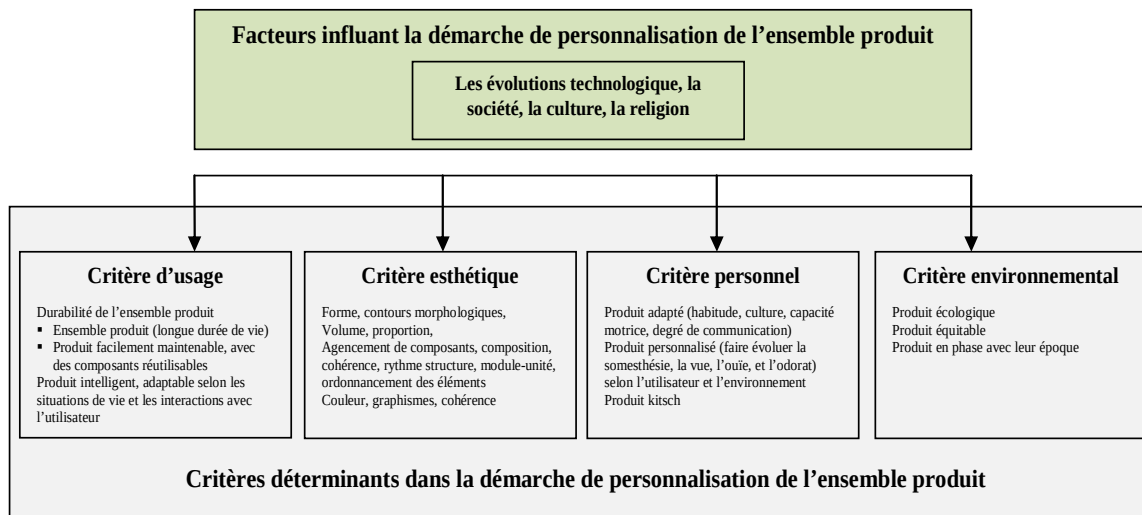


Figure 70 : Critères déterminants dans la démarche de personnalisation de l'ensemble produit

Comme il a été expliqué précédemment, les critères de personnalisation d'un ensemble produit sont variables. Toutefois, ils résultent des évolutions technologiques et sociales, des exigences de consommateurs toujours à la recherche d'innovation, de qualité ergonomique, d'adaptabilité du produit, de solutions performantes d'usages et de solutions palliatives à des problèmes écologiques.

4 Application de la démarche Fast Eco MAL'IN au cas du gaufrier

La conception actuelle du gaufrier n'est réellement adaptée aux critères exprimés préalablement (critère d'usage, critère esthétique critère personnel, critère environnemental).

L'utilisation du gaufrier est aussi non appropriée à différents utilisateurs (produit intelligent, produit évolutif en fonction des utilisateurs et des situations de vie, produit avec des valeurs sensibles, certifiés et authentiques). L'ensemble de ces constats souligne des problèmes majeurs liés à l'adaptabilité du produit « gaufrier » et les besoins d'estime de chaque utilisateur. La figure 71 rappelle l'aspect existant de l'ensemble produit « gaufrier ».

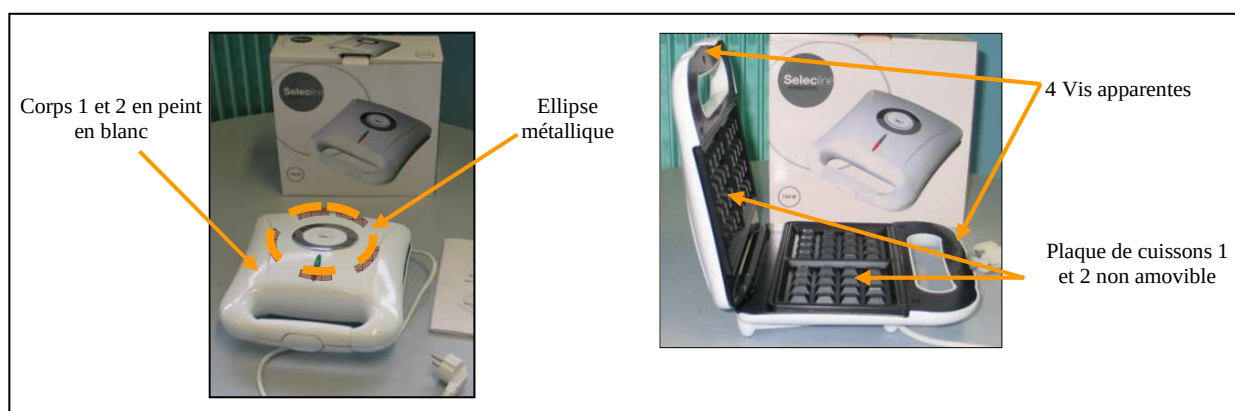


Figure 71 : Présentation de l'ensemble du gaufrier

4.1 Phase de pré-analyse

L'action à réaliser retenue de la matrice Eco-MAL'IN est la suivante : « *Permettre la personnalisation de l'ensemble produit* ». Cette action fait partie des actions à réaliser de l'axe d'éco-efficacité : « *Augmenter la durée de vie et l'estime de l'ensemble produit* » et impacte la situation de vie « *utilisation* ».

Comme il a été expliqué précédemment, la personnalisation de l'ensemble produit nécessite la prise en compte des critères d'usage, des critères esthétiques, des critères personnels et des critères environnementaux dans la démarche de conception. Afin d'apporter de la connaissance pour le groupe de créativité, nous avons défini en figure 72 une fiche de connaissance qui explique les notions liées à « la fonction d'estime » et souligne les sous-critères à considérer, en vue de la personnalisation d'un ensemble produit.

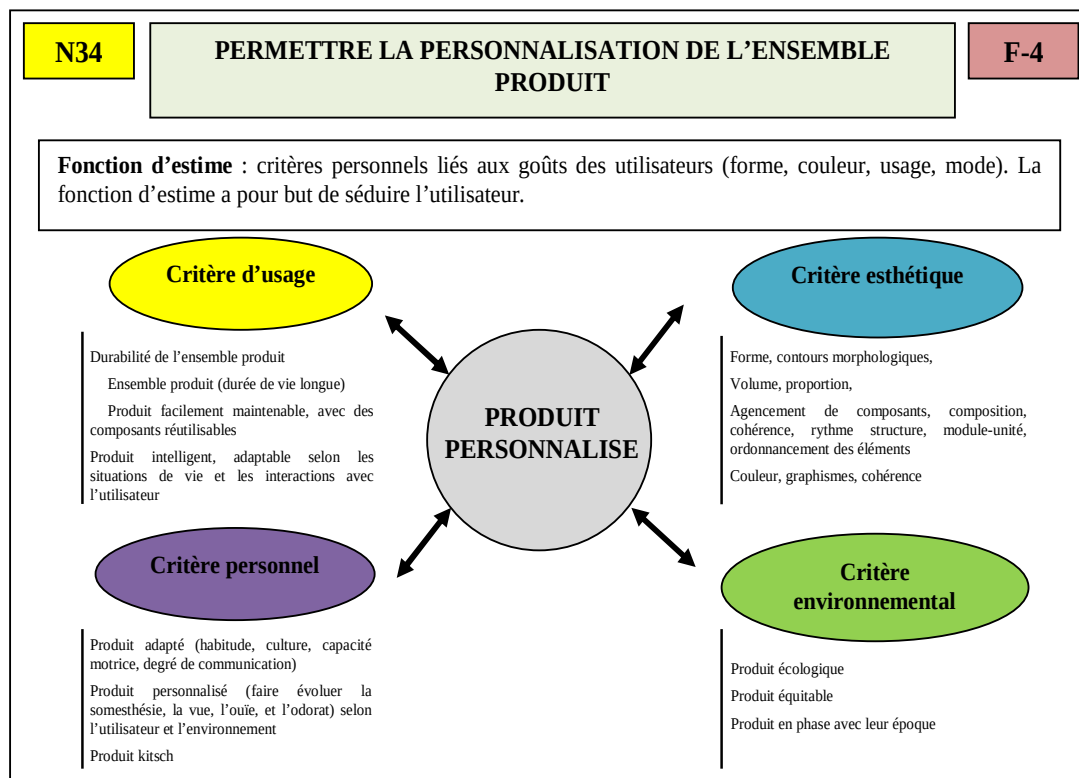


Figure 72 : Fiche de connaissance, action à réaliser «permettre la personnalisation de l'ensemble produit»

4.2 Phase de formalisation

Selon l'action à réaliser « *Permettre la personnalisation de l'ensemble produit* », les différents principes d'innovation à considérer pour chaque fonctionnement non dégradé (la puissance/la fiabilité/la productivité/la facilité d'utilisation) sont donnés dans le tableau 61.

Actions à réaliser en conception	Puissance Non dégradée	Fiabilité Non dégradée	Productivité Non dégradée	Facilité d'util. Non dégradée
Permettre la personnalisation de l'ensemble produit	19 Action périod. 35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 2 Extraction	40 Mat Composite 8 Contre poids 27 Ephémère 13 Alternative 10 Anticipation	28 Evol Syst méca 35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 1 Segmentation 16 Action réduite 17 Chgt dimension 15 Adaptabilité	1 Segmentation 32 Chgt couleur 15 Adaptabilité 26 La copie

Tableau 61 : les quatre modèles de problème, action à réaliser « permettre la personnalisation de l'ensemble produit »

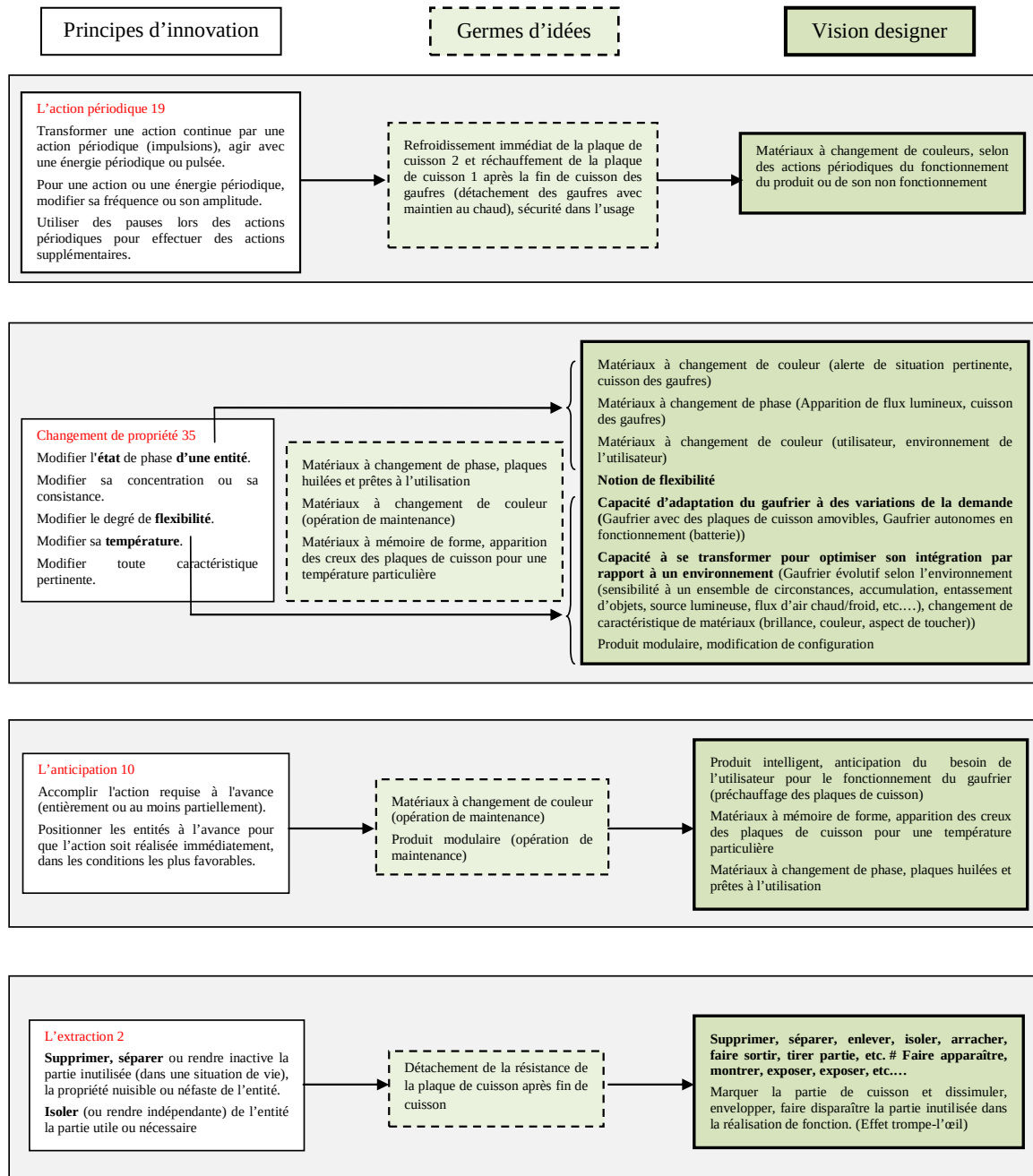
Afin de montrer l'intérêt de chaque modèle dans la résolution du problème, nous allons commenter une par une les idées de solutions générées par l'interprétation des principes d'innovation.

4.3 Phase de résolution

La phase de résolution va consister à interpréter pour chaque modèle de problème les principes d'innovations qui lui sont associés. Nous avons exprimé pour chaque principe des germes d'idées et une vision plus adaptée et explorée par un designer.

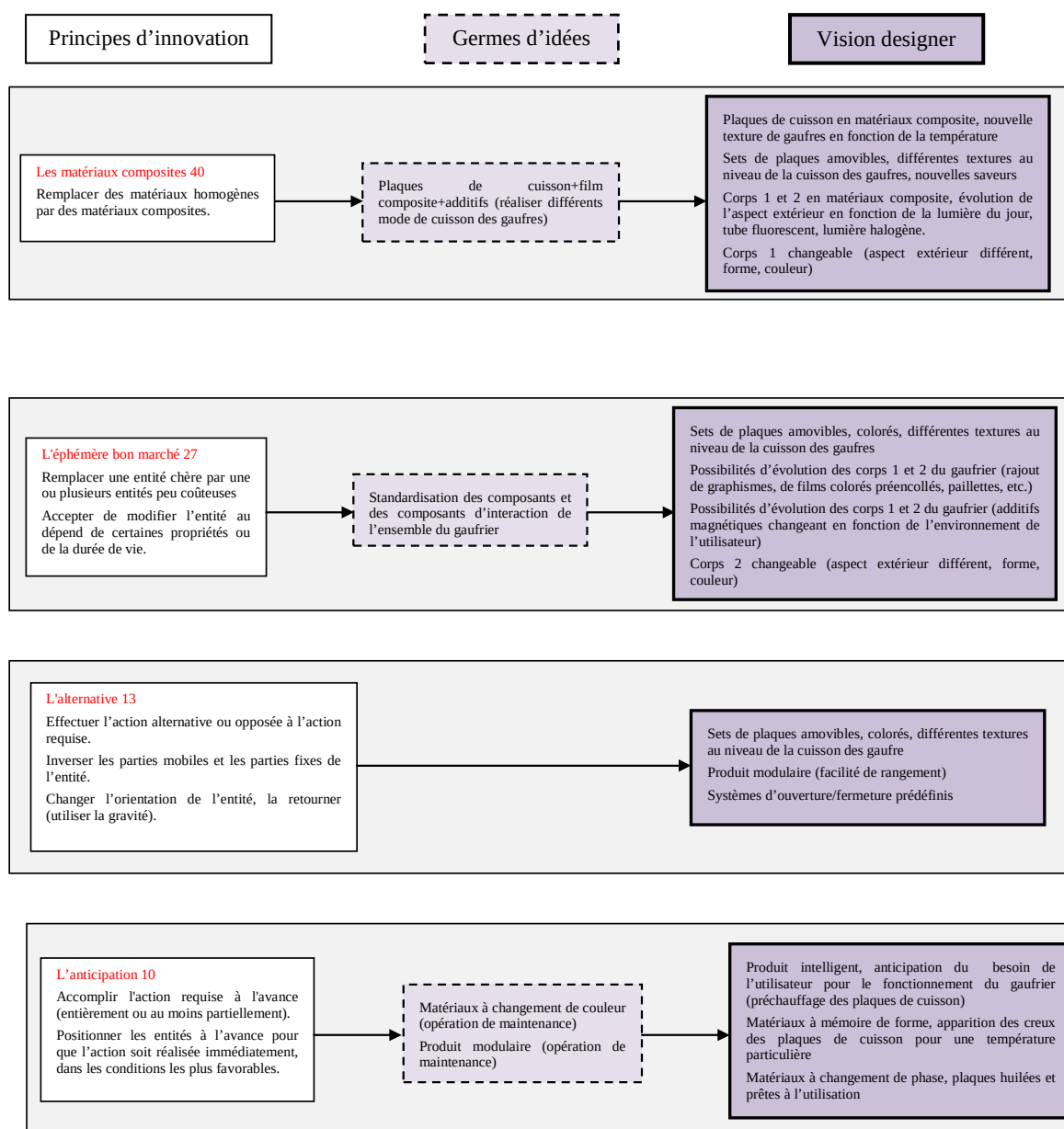
4.3.1 Modèle Pb1 : personnaliser l'ensemble produit sans dégrader la puissance

Actions à réaliser en conception	Puissance Non dégradée
Permettre la personnalisation de l'ensemble produit	19 Action périod. 35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 2 Extraction



4.3.2 Modèle Pb2 : personnaliser l'ensemble produit sans dégrader la fiabilité

Actions à réaliser en conception	Fiabilité Non dégradée
Permettre la personnalisation de l'ensemble produit	40 Mat Composite 8 Contre poids 27 Ephémère 13 Alternative 10 Anticipation



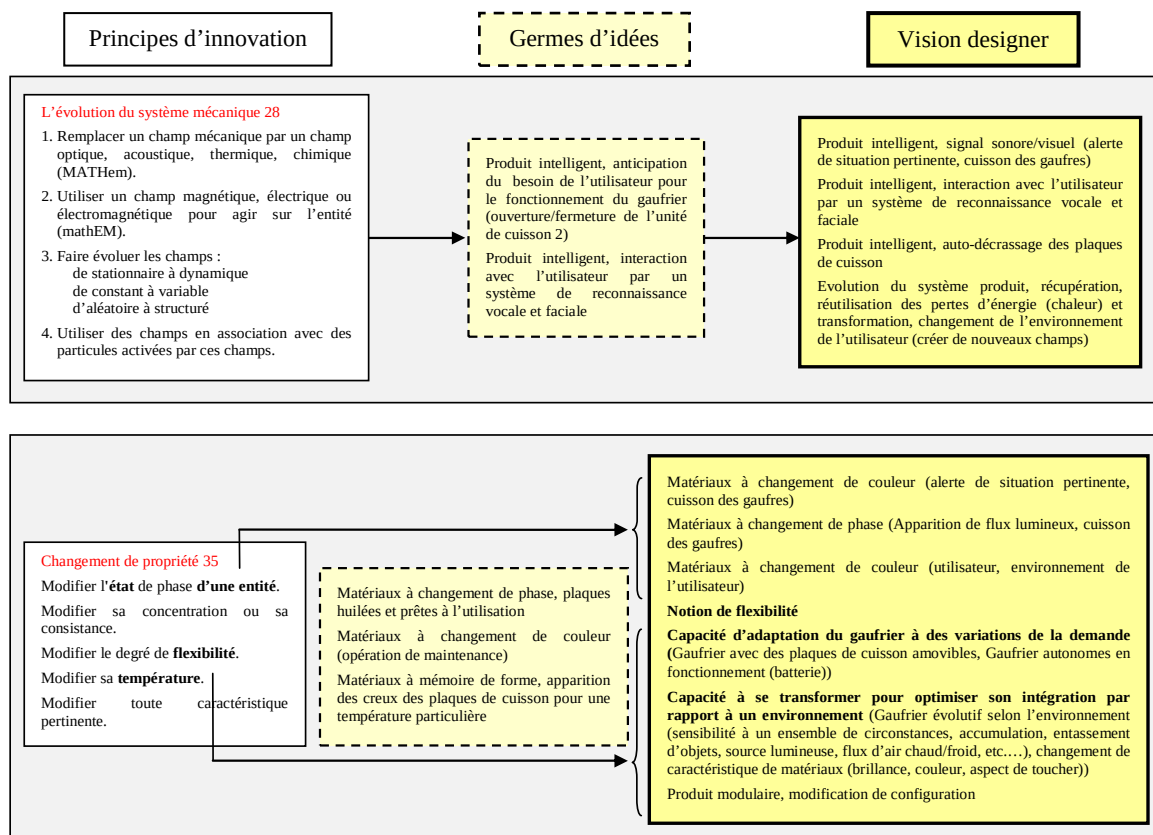
L'explication associée au principe d'innovation n°8 (contreponds) est difficilement exploitable par un designer.

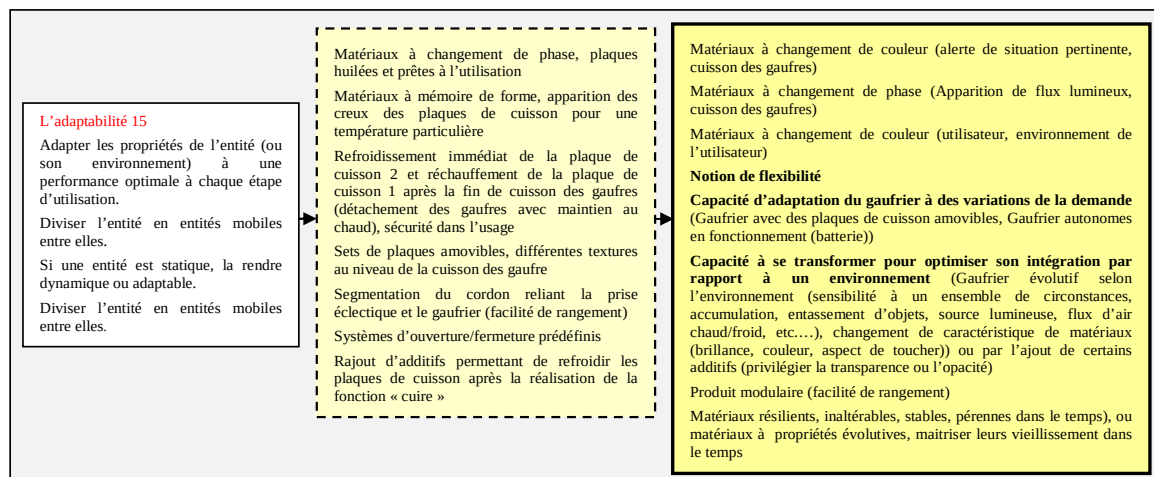
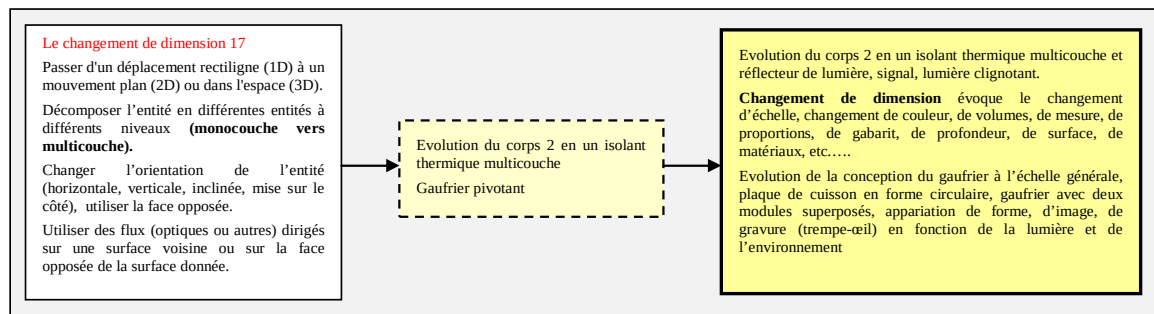
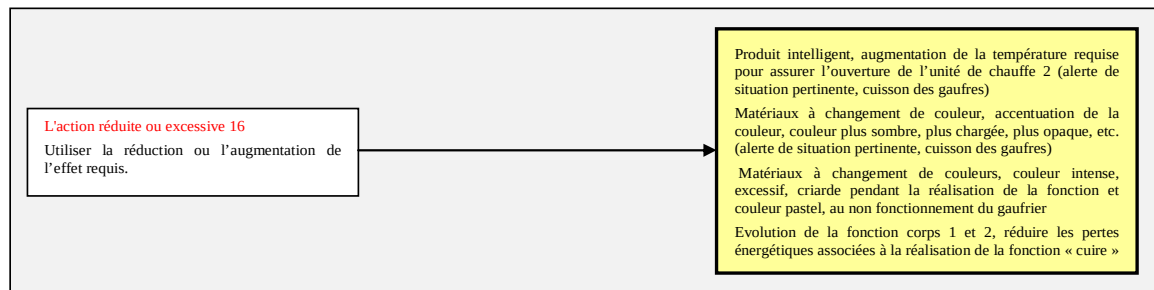
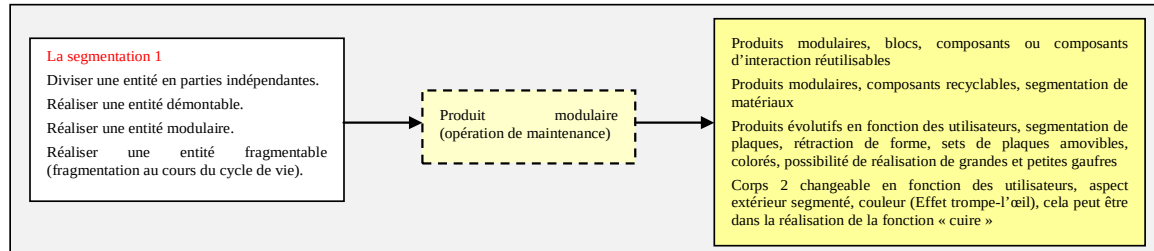
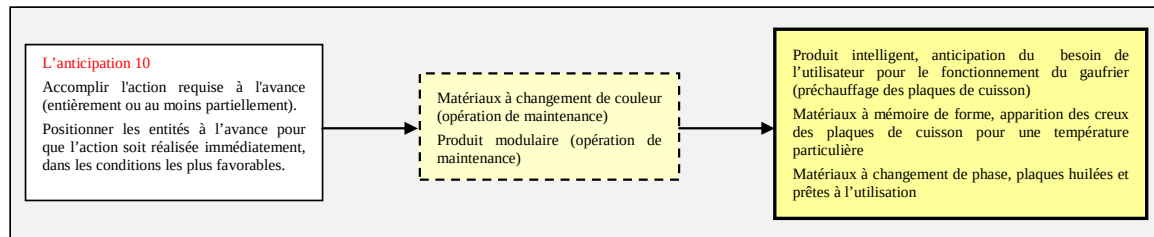
- Compenser le poids d'une entité par interaction avec une autre entité.
- Compenser le poids d'une entité par interaction avec un environnement (forces aérodynamiques, hydrodynamiques ou statiques type Archimède).

La compensation du poids, les forces aérodynamiques, hydrodynamiques et statiques décrivent des mécanismes liés à l'équilibre de forces opposées ou de modération d'action. Ce vocabulaire très technique, isolé entièrement du registre de l'usage, de l'ergonomie et de l'utilisateur n'inspirent pas les designers dans la recherche de concepts.

4.3.3 Modèle Pb3 : personnaliser l'ensemble produit sans dégrader la productivité

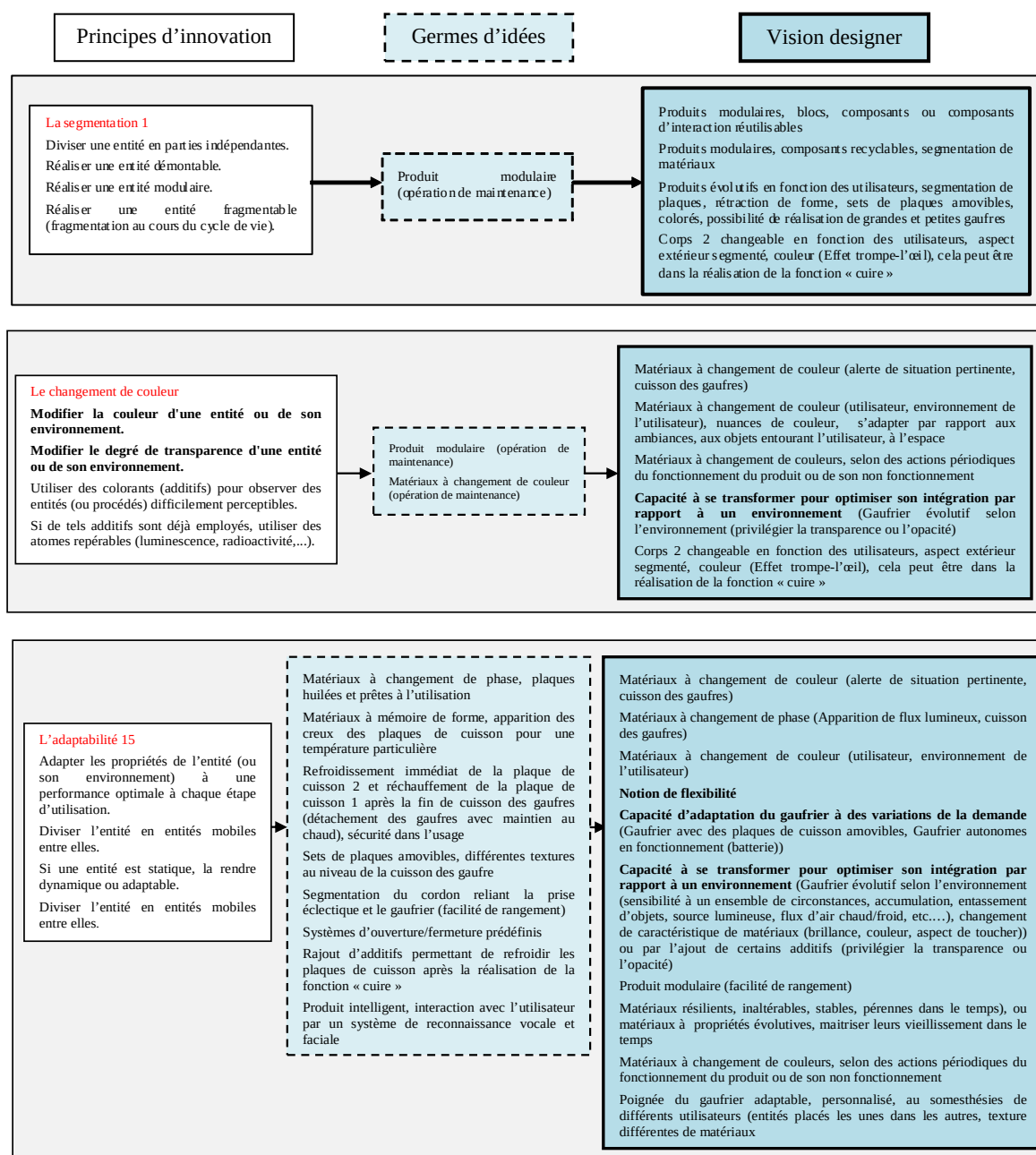
Actions à réaliser en conception	Productivité Non dégradée
Permettre la personnalisation de l'ensemble produit	28 Evol Syst méca 35 Chgt Propriétés 10 Anticipation 1 Segmentation 16 Action réduite 17 Chgt dimension 15 Adaptabilité





4.3.4 Modèle Pb4 : personnaliser l'ensemble produit sans dégrader la facilité d'utilisation

Actions à réaliser en conception	Facilité d'util. Non dégradée
Permettre la personnalisation de l'ensemble produit	1 Segmentation 32 Chgt couleur 15 Adaptabilité 26 La copie





5 Synthèse

Les premières idées générées correspondent à des germes d'idées exprimées par l'ingénieur de conception ou par le designer. Les idées générées (vision designer) sont exclusivement exprimées par le designer.

Le premier constat concerne l'utilisation de l'outil et la génération des idées de solutions (vision designer).

La génération des idées présentées reflète la capacité d'appropriation de l'outil de résolution Fast Eco-MAL'IN par les designers, notamment dans la démarche d'interprétation des principes d'innovation issus de la théorie TRIZ.

Le terme d'appropriation relève des mécanismes cognitifs, culturels et institutionnels qui conduisent à adapter une solution ou un outil comme une réponse spontanée à une situation donnée. Dans le cas du designer, l'appropriation des principes d'innovation résulte de son expérience, de son langage et vocabulaire, de son registre de réalisation et de sa capacité à comprendre et interpréter un principe d'innovation. On distingue deux cas de figure :

- *Les objectifs du principe d'innovation sont clairement définis* : le designer exprime des idées de solutions en intégrant les critères d'usages, les critères esthétiques et les critères personnels. Les idées et concepts environnementaux ne sont pas exprimés directement dans les idées de solutions puisque les principes d'innovation sont non qualifiés avec une vision développement durable. Par contre, les idées de solutions en vue de la personnalisation vont permettre de façon intrinsèque, d'augmenter l'estime du produit pour l'utilisateur et donc sa durée de vie.
- *Les objectifs du principe d'innovation ne sont pas totalement explicites* : le designer peut exprimer des idées de solutions en s'appuyant sur des « concepts » ou des « expressions » des principes d'innovation (ex : flexibilité, état d'une entité, température...). Le designer peut aussi construire ses concepts éco-innovants en se référant à une déclinaison de verbes (ex : supprimer, séparer, isoler). Cette démarche est intéressante car elle permet de rebondir sur des idées déjà exprimées.

Le deuxième constat concerne l'expression des idées de solutions (vision designer)

Les idées générées sont différentes, mais toutes tiennent compte du rôle de la représentation de la relation (utilisateur (usager) /produit). L'analyse de ces idées note la recherche de l'esthétique, la sensibilité à la forme, l'harmonie avec l'environnement au travers l'utilisateur et son environnement, en considérant bien évidemment les notions essentielles liées à l'usage. Pour chaque modèle de problème, on constate que ces idées illustrent des évolutions du gaufrier vers une conception harmonieuse et adaptée aux attentes de l'utilisateur (ex : produit intelligent, changement de couleur, utilisation adaptée, meilleure intégration avec l'environnement, adaptation du gaufrier aux besoins de l'utilisateur...). L'utilisateur et l'environnement sont omniprésents dans les idées éco-innovants exprimés dans la vision designer.

6 Conclusion

Les matrices Fast Eco-MAL'IN sont des outils d'éco-innovation dérivés de la méthode Eco-MAL'IN. Basée sur la résolution de modèles de problèmes de conception posés sous forme d'actions à réaliser et des fonctionnements non dégradés, cet outil permet de générer des concepts innovants de produit par l'interprétation des principes d'innovation associés à ces modèles. Chaque action est associée à quatre modèles de problème exprimant chacun des fonctionnements non dégradé du produit. il s'agit de la puissance, la fiabilité, la productivité et la facilité d'utilisation.

L'efficacité de cet outil d'éco-innovation réside dans la structuration des problèmes de conception à travers trente neuf actions à réaliser exprimant chacune un objectif de conception environnemental particulier mais aussi par les considérations de quatre fonctionnements non dégradés dans la démarche de résolution du problème. L'utilisation de cet outil est également facile et rapide mais il peut souffrir du manque d'analyse fine, analyse proposée dans la méthode générale Eco-MAL'IN.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ce travail de thèse a été effectué au sein du laboratoire TREFLE du centre de Bordeaux Talence d'Arts et Métiers ParisTech. Les travaux de recherche présentés traitent la problématique de l'adaptation des connaissances environnementales au stade préliminaire de conception, c'est-à-dire durant la phase de recherche de concept, notamment lors des séances de créativité.

A ce stade du processus de conception, intégrer des connaissances environnementales est une tâche complexe puisque le produit est encore mal défini. Des outils d'éco-innovation ont déjà été proposés, cependant, l'analyse de ces outils souligne différents types de problèmes. On peut citer:

- Connaissances environnementales d'analyse et d'évaluation du produit non adaptées au contexte des séances de créativité,
- Connaissances environnementales non adaptées à un groupe pluridisciplinaire,
- Absence de structuration des données d'analyse,
- Absence de fiches de connaissances, d'aide à l'appréhension d'un problème environnemental particulier,
- Absence de l'analyse des ressources internes et externes du produit,
- Manque d'interactivité et de facilité dans l'utilisation de certains outils.

Pour résoudre ces problèmes exprimés dans les outils d'éco-innovation existants, nous avons fait évoluer la méthode MAL'IN d'aide à l'innovation pour pallier les critiques évoquées, ainsi, nous avons développé la méthode Eco-MAL'IN.

Contributions

La première partie de ce travail a concerné le développement d'une vision parcimonieuse de l'approche globale de l'analyse du produit et de la prise en compte des impacts environnementaux.

L'enjeu de cette partie a été de définir les connaissances environnementales permettant d'analyser et d'évaluer un produit au stade de recherche de concept. Plusieurs auteurs ont proposé des outils d'éco-conception et d'évaluation simplifiée, avec des approches matricielles, graphiques ou de check-lists dans le but de rendre moins complexe l'approche globale de la vision éco-conception. La plupart de ces outils ne proposent pas une analyse adaptée au stade où le produit est encore mal défini.

En revanche, l'étude des outils d'éco-conception nous a permis d'identifier des données pertinentes d'analyse environnementale du produit (impacts environnementaux et situations de vie du produit). De surcroît, l'analyse de certains de ces outils a montré qu'il était nécessaire de décomposer le produit selon la typologie de ses composants afin de mieux exprimer les directions d'évolution. Ainsi, nous avons proposé une description de « l'ensemble produit » et une vision environnementale associée au travers de la matrice « Eco-MAL'IN ».

L'ensemble produit :

La notion « produit accessoires » intégrée à la description de l'ensemble produit permet de mieux décrire les possibilités d'amélioration environnementale du produit. Dans le chapitre 3, tous ces produits que nous appelons « produit accessoires » sont décrits (fonctions contraintes particulières), typés (emballages,...documents, notices...) et qualifiés (composants consommables/non consommables,...).

La matrice Eco-MAL'IN :

Nous avons construit cette matrice à partir des outils d'éco-conception analysés dans le chapitre 1. Cette matrice croise les axes d'éco-efficacité et les cinq situations pertinentes du cycle de vie du produit. Différentes possibilités d'analyse et de démarches environnementales sont suggérées par cette matrice. Cette structuration permet à l'entreprise ou au groupe de créativité de cibler les priorités de choix des objectifs environnementaux de re-conception du produit. À partir de l'approche structurée de la matrice Eco-MAL'IN, nous avons défini une approche d'analyse orientée par trente neuf actions à réaliser en conception.

Trente neuf actions à réaliser pour une conception environnementale :

Chaque action à réaliser en conception est définie dans la direction d'un axe d'éco-efficacité. L'analyse de l'ensemble produit selon ces actions va impacter une situation de vie. Nous avons construit ces actions à partir de la description de l'ensemble produit en composants, composants d'interaction et milieux extérieurs. Les actions à réaliser s'expriment selon les codes de l'analyse fonctionnelle (verbe d'action + complément) et proposent d'agir sur les éléments l'ensemble produit. Ces règles sont ordonnées selon une logique d'actions successives cohérentes avec la description de l'ensemble produit.

La seconde partie des travaux concerne l'adaptation de la vision parcimonieuse de l'interaction environnement/produit à la méthode MAL'IN. Le principal apport a consisté à associer à chaque action à réaliser des éléments d'analyse et de structuration dans le but d'aider le groupe de créativité à exprimer le problème à résoudre et à amorcer la formalisation du problème qui permet de cibler les outils de résolution adéquats. Cette association constitue une démarche d'analyse et de structuration systématique

La démarche d'analyse et de structuration systématique liée aux actions à réaliser :

Dans cette démarche nous associons à chaque action une analyse des opportunités du produit, des fiches de connaissances et des propositions de structuration du problème.

L'analyse des opportunités du produit

Il est admis que l'analyse des ressources du produit fait partie d'une approche de conception environnementale. L'outil ressource défini dans la théorie TRIZ et adapté par la méthode MAL'IN est utilisé en phase de résolution du problème. Dans la méthode Eco-MAL'IN, nous avons mis en évidence l'importance des ressources du produit et nous les avons introduites dans la phase d'analyse. Nous avons sélectionné des ressources particulières à analyser pour chaque action à réaliser, elles constituent les opportunités du produit. Ce choix a été défini selon les objectifs de conception exprimés par chaque action.

Les opportunités sont donc des capacités internes ou externes au produit qui appuient fortement la démarche d'éco-innovation du groupe de créativité. Cette approche d'expression des opportunités au produit va améliorer et orienter la formalisation du problème et la recherche de concepts éco-innovants.

Les fiches de connaissances

Les fiches de connaissances rendent explicite les objectifs environnementaux exprimés par chaque action à réaliser. Elles sont de plusieurs types. Certaines précisent la sémantique de nouvelles terminologies évoquées dans les actions ou expriment des sous-actions à réaliser guidant le groupe de créativité vers l'objectif de l'action étudiée. D'autres sont construites à partir d'illustrations expliquant des évolutions de conception de produits industriels dans une vision développement durable. Toutes ces fiches permettent à un groupe de créativité :

- l'analyse de l'ensemble produit.
- la structuration du problème de conception étudié vers la formalisation.

La structuration du problème de conception

Nous avons exprimé six possibilités de structuration du problème :

- Suppression totale ou partielle de composants
- Suppression totale ou partielle de champs
- Segmentation de composants
- Segmentation de champs
- Ajustement des espaces et évolution des agencements
- Sélection des paramètres de conception

Les possibilités de structuration sont sélectionnées pour être en adéquation avec chaque action à réaliser. Chaque type de structuration va orienter la formalisation du problème à résoudre.

La démarche formalisation issue de la structuration du problème de conception :

L'interprétation des données d'analyse et l'intégration des connaissances dans la phase de formalisation et la définition des biais d'attaque n'est pas une démarche évidente pour les concepteurs. Les opportunités du produit, les fiche de connaissances et la sélection des possibilités de structuration va conduire le groupe à l'expression fonctionnelle du problème. Cette expression va se faire à travers le graphe substances/champs ou par la modélisation physique et l'utilisation des paramètres pertinents. L'analyse du graphe ou l'analyse des paramètres pertinents vont être conduites selon la méthode MAL'IN. Cette analyse conduit aux outils de résolution TRIZ ou MAL'IN.

La méthode Eco-MAL'IN :

La méthode Eco-MAL'IN résulte de la concaténation des différents outils développés à la méthode MAL'IN. La matrice d'analyse Eco-MAL'IN va permettre une pré-analyse du problème pour définir les orientations initiales. Les actions à réaliser et leurs tableaux associés sont intégrés dans la phase d'analyse et de structuration de MAL'IN, ils augmentent les facultés de la méthode à l'orientation de la formalisation du problème.

Les ressources de la méthode MAL'IN sont exprimées et orientées dans la vision environnementales et constituent, pour chaque action, les opportunités du produit pour sa propre évolution environnementale.

Cette méthode vient combler le manque constaté de lien entre l'analyse environnementale et les outils de résolution de problème en proposant une structuration et une formalisation du problème.

La matrice de résolution de problèmes Fast Eco-MAL'IN :

L'outil de résolution rapide orienté éco-innovation « Fast Eco-MAL'IN » que nous avons développé est basé sur des modèles de problèmes. Chaque modèle est construit sur le choix d'une action à réaliser de la matrice Eco-MAL'IN associé à un vœu de fonctionnement non dégradé (la puissance, la fiabilité, la productivité et la facilité d'utilisation). Les paramètres de conception liés à chaque action à réaliser sont à améliorer. La matrice de résolution des contradictions techniques de la théorie TRIZ permet de sélectionner les principes d'innovation les plus utilisés pour améliorer l'action à réaliser (au travers des paramètres de conception à améliorer).

L'outil de résolution se présente comme une matrice 39 x 4, les 39 lignes concernent les actions à réaliser et les 4 colonnes, les 4 paramètres de conception à ne pas dégrader. A leur intersection on sélectionne les principes d'innovation à interpréter. L'utilisation de la matrice n'impose pas une analyse approfondie particulière du produit.

Applications des méthodes et outils élaborés

La méthode Eco-MAL'IN a été utilisée pour rechercher des concepts de solution d'évolution d'un gaufrier. Trois applications ont été réalisées avec succès. On a pu montrer l'efficacité de la démarche en particulier en ce qui concerne l'articulation mise en place entre action à réaliser, opportunités du produit, structuration et formalisation du problème. Les outils de résolution sélectionnés sont différents dans chacune des trois applications menées, même si la formalisation privilégie les solutions standards. La troisième application a permis de comparer les analyses différentes selon l'utilisation de MAL'IN ou d'Eco-MAL'IN.

La quatrième application permet d'observer comment un designer peut utiliser l'outil Fast Eco-MAL'IN sur l'action à réaliser concernant l'augmentation de la durée d'utilisation et l'estime de l'utilisateur dans une démarche de personnalisation du produit. Le designer se distingue des autres membres du groupe de créativité par sa faculté de globalisation du problème, par sa prise en compte de l'environnement et de l'utilisateur (perception, sensation, estime,...). Le designer augmente l'efficacité de l'outil Fast Eco-MAL'IN en lui apportant de nouveaux élargissements et points de vue :

- Interprétation différentes des principes d'innovation par rapport à un concepteur (idées de solutions plus représentatives de la relation entre l'utilisateur et le produit),
- Interprétation très large d'un même principe d'innovation vers des idées de solutions portant sur des aspects formels, symboliques, usages et expériences, technologiques, fonctionnels, esthétiques,
- Exploitation des principes différemment d'un concepteur (utilisation de « concepts » et « expression » exprimés dans les principes d'innovation, déclinaison de verbes, etc.).

Intérêts des travaux

Nous apportons une nouvelle méthode d'éco-innovation « Eco-MAL'IN » qui offre en phase de pré-analyse des possibilités d'évolution d'un produit pour limiter les impacts environnementaux. Cette méthode est dotée de propositions d'actions à réaliser et d'une démarche de structuration du problème efficace. La description de l'ensemble produit conduit à une expression des actions à réaliser compréhensible par tous les membres du groupe de créativité. La formalisation du problème est orientée par les préconisations liées à chaque action. La matrice de résolution rapide orientée éco-innovation « Fast Eco-MAL'IN » est facile d'utilisation et permet de tenter de résoudre un problème sans passer du temps dans une analyse complète MAL'IN pouvant être considérée comme chronovore.

Perspectives

Cette thèse jette les bases d'une méthode complète de conception respectueuse de l'environnement. L'implémentation dans un outil logiciel doit se voir dans l'optique de la suite logicielle en conception préliminaire qui s'élabore dans le futur département « Ingénierie Mécanique et Conception (IMC) » de l'Institut de Mécanique et Ingénierie de Bordeaux (I2M).

A court terme, il faut valider, par des groupes de créativité pluri-culturels, la compréhension de chaque action à réaliser et des outils associés. A cette fin, il est nécessaire de procéder à des séries d'application pour utiliser toutes les actions dans des cadres divers de produits et de procédés. Cette procédure a commencé et va conduire à une qualification plus fine de l'utilisation de la méthode Eco-MAL'IN et de la matrice de résolution Fast Eco-MAL'IN, notamment dans le déroulement de la séance de créativité.

Le développement d'une méthode de hiérarchisation et de qualification des concepts de solutions exprimés n'a pas été abordé. Il est important de pouvoir offrir au groupe de créativité, après la période divergente de recherche d'idées, un moyen de classement des concepts émis. Ce travail, phase convergente de la session de créativité, est à mener.

A moyen terme et dans le cadre du développement d'un outil général de conception préliminaire, il est indispensable de tisser des liens avec les équipes de recherche nationales ou internationales travaillant sur le sujet de l'éco-conception. Ainsi, nous proposons d'intégrer la vision environnementale comme une contrainte de conception au même titre que les autres critères de performance d'un produit.

Enfin, un effort de formation des équipes projets doit être conduit. Nous pensons que la vision parcimonieuse de la matrice Eco-MAL'IN est le germe de la réalisation d'une formation rapide de sensibilisation aux problèmes de conception environnementale que vont rencontrer les départements de recherche et développement des entreprises.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (Ademe 02) ADEME, « Module de sensibilisation à l'éco-conception, Guide d'utilisation, fiches, modules », ADEME Éditions, Février 2002.
- (Ademe 06) ADEME, « L'éco-conception en actions », ADEME Éditions, Juillet 2006.
- (Ademe 99) ADEME, « Conception de produits et environnement : 90 exemples d'éco-conception », ADEME Éditions, Mai 1999, ISBN 2-86817-398-5, Paris.
- (Afnor 03) AFNOR, XP ISO/TR 14062. "Management environnemental – Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit », AFNOR, Janvier 2003.
- (Afnor 83) AFNOR, X30-110, « Matières premières et énergie- Vocabulaires et méthodologie de la détermination du contenu énergétique- Equivalences énergétiques », 18p, 1983.
- (Afnor 98) AFNOR, FD X30-310, « Management environnemental : prise en compte de l'environnement dans la conception et le développement des produits- Principes généraux et application - Ligne directrices », 16 p, 1998.
- (Albers et al, 09) Albers A., Leon-Rovira N., Aguayo H., Maier T., « Development of an engine crankshaft of computer-aided innovation », Computers in Industry, 60, pp 604-612, 2009.
- (Alijah et al, 92) Alijah R., Marin P., « La prise en compte des déchets dans le cycle de vie, Colloque du Forum du droit et des affaires : bilan écologique des produits », 1992.
- (Alting et al. 93) Alting L., Jorgensen J., « The Life Cycle Concept as a Basis for Sustainable Industrial Production », Annals of CIRP. Vol. 42/1, pp. 163-167, 1993.
- (Altshuller 84) Altshuller G., « Creativity as an exact science: The theory of the solution of inventive problems », Gordon & Breach, 1984.
- (Ammar 10) Ammar A. A., « Adaptation et mise en place d'un processus d'innovation et de conception au sein d'une PME », Doctorat Arts et Métiers ParisTech, 2010.
- (Azapagic et al. 99) Azapagic A., Clift R., « Life cycle Assessment and Multiobjective Optimisation », Journal of Cleaner Production, vol. 7, pp135-143, 1999.
- (Beard et al, 99) Beard C.M., Hartmann R, « Eco-innovation: Rethinking Future Business Products and Services », Greener Marketing, by Charter, M & Polonsky, J, Greenleaf Publishing, Sheffield, 1999.
- (Bertoluci et al, 09) Bertoluci G., Millet D., « Functional product enrichment and supply chain disorganisation: two barriers for sustainable design », International Journal of Product Development - Vol. 7, No.1/2 pp. 149 – 169, 2009.
- (Bleischwitz et al, 09) Bleischwitz R., Giljum S., Kuhndt M., Schmidt-Bleek F., et al., « Eco-innovation - putting the EU on the path to a resource and energy efficient economy », Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy ISBN: 978-3-929944-77-8, chapitre 3, 2009.
- (Bombardier 05) Bombardier, « Design for Environment Guidelines » (Center of Competence (CoC) for DfE EBoK. 3 EST 7-3049 Rév.1 juin 2005) [<http://www.pdfgeni.com/book/ECO-CONCEPTION-pdf.html>] [http://www.bombardier.com/files/en/supporting_docs/Design_for_Environment_Guidelines_en.pdf]
- (Boustead 93) Boustead I., « Eco-profiles of the European Plastics Industry Report n°10 », PWMI, Bruxelles, Belgique, 1993.
- (Bralla 96) Bralla J.G., « Design for excellence », Mc Graw Hill, New York, 1996.
- (Bretesche 00) De La Bretesche B., « La méthode APTE d'analyse de la valeur et d'analyse fonctionnelle », Editions PETRELLE, 2000.
- (Brezet 97) Brezet J.C., « Dynamics in ecodesign practice, UNEP Industry and Environment », Vol. 20, N° 1-2, pp. 21-24, Paris, 1997.

- (Brezet et al 94) Brezet J.C., Van Hemel C., « Product Development with the environment as Innovation Strategy-The PROMISE Approach », Delft University of Technology Report, Delft, Pays-Bas, 1994.
- (Brezet et al, 97) Brezet J.C., Van Hemel C., « Eco-design: A promising approach to sustainable production and consumption », Rathenau Institute, TU Delft & PNUE, Paris, 1997.
- (Bridgestone Corporation) Bridgestone Corporation World Wild Website
<http://www.bridgestonetire.com/tech/index.asp>.
- (Buzan et al, 95) Buzan T., Buzan G., « The Mind Map Book », London: BBC Books, 1995.
- (Cascini 04) Cascini G., « State of the Art and trends of Computer-Aided Innovation tools, Towards the integration within the Product Development Cycle, Building the Information Society, Kluwer », Academic Publishers, pp 461-470. 2004.
- (Cavaillès 91) Cavaillès, J., « Méthodes de management de programme », Teknéa, Toulouse, 1991.
- (Cavallucci et al, 07) Cavallucci, D., « Khomenko, from TRIZ to OSTM-TRIZ: addressing complexity challenges in inventive design », International Journal of Product Development, 4 (1-2), pp 4-21, 2007.
- (CETIM 03) Barnabé F., Ganier M., Lafleur B., Malosse R., Moulin V., Schiesser P., « L'éco-conception pour les mécaniciens : Comment concilier conception et environnement pour un développement durable », Centre technique des industries mécaniques (CETIM) ISBN 2-85400-546-5, 2003.
- (Chang et al, 04) Chang H-T., Chen J.L., « The conflict-problem-solving CAD software integrating TRIZ into eco-innovation », Advances in Engineering Software, Vol. 35, 553–566 Elsevier, 2004.
- (Charlotte et al, 06) Charlotte., Fiell P, « Design Industriel A-Z », Taschen, ISBN 3-8228-5056-X, 2006.
- (Chen et al, 03) Chen J.L., Liu C-C., « An eco-innovative design approach incorporating the TRIZ method without contradiction analysis », The Journal of Sustainable Product Design Vol. 1: 263–272, 2001, Kluwer Academic Publishers. 2003.
- (Cong et al, 09) Cong H., Tong L., H., « Pattern-oriented associative rule-based patent classification, Expert Systems with applications », 10 pages, 2009.
- (Conran et al, 05) Conran T., Fraser M., « Design / Designers », EPA, 2005.
- (Cugini et al, 07) Cugini U., Cascini G., Ugolotti M., « Enhancing interoperability in the design process-the PROSIT approach », Proceedings of the 2nd IFIP Working Conference on Computer-Aided Innovation, Brighton, USA, 8-9 October, published on trends in Computer-Aided Innovation, Springer, pp 189-200. 2007.
- (Cugini et al, 09) Cugini, U., Cascini, G., Muzzupappa M., Nigrelli, V., « Integrated Computer-Aided Innovation: The PROSIT approach », Computers in Industry, 60, pp 629-641. 2009.
- (Curran 96) Curran M.A., « Environmental life-cycle assessment », New York: McGraw-Hill, 1996.
- (Danese 90) Danese B., « Catalogue de la collection Milan », Parsi, 1990.
- (Daoud 09) Daoud W., « Développement d'un système de management intégré de l'éco-conception des appareillages électriques de moyenne tension », Thèse de doctorat, ENSAM Chambéry, 2009.
- (De Medina 06) De Medina H. V., « Eco-design for materials selection in automobile industrie », 13th CIRP International conference on life cycle engineering, pp 299-304, Leuven (Belgium), May 31-June 2, 2006.
- (Desimone et al, 97) Desimone L.D., Popoff F., « Eco-efficiency: the business link to sustainable development », Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- (Détrie 05) Détrie P, « L'entreprise durable », Dunod ISBN 2 10 048551 2, Paris, 2005.
- (Dewberry 95) Dewberry E., « Ecodeisgn Strategies », Eco design, Vol. IV, N°1, pp. 32-33, 1995.
- (Dewberry et al. 96) Dewberry E., Goggin P.A., « Spaceship Ecodesign », Eco design, co-design journal, N°5-6, pp. 12-17, 1996.

- (Domb 97a) Domb E., « 40 inventive principles with examples ». TRIZ Journal of 1997
- (Domb 97b) Domb, E., « The idea final result: Tutorial », TRIZ Journal of 1997, 1997.
- (Domb 97c) Domb E., « Using the ideal final result to define the problem to be solved », TRIZ Journal of 1997.
- (Doré et al, 05) Doré R., Pailhès J., Fischer X., Nadeau J.-P., « Integration of user's requirements in preliminary design : application to parabolic ski in basic turn », PLM05, International conference on product lifecycle management, Lyon, 11-13/07/05, 2005.
- (Dubigeon 09) Dubigeon O., « Piloter un développement responsable : quel processus pour l'entreprise », Pearson Education France (3ème édition) ISBN 978-2-7440-6389-3, Paris, 2009.
- (Dubuisson et al, 96) Dubuisson S., Hennion A., « Le design : l'objet dans l'usage », Edition Ecole des Mines de paris, ISBN 2-911762-02-9, 1996.
- (Eberle 90) Eberle, R., « Scamper : Games for imagination development », D.O.K. Press, Buffalo, NY, 1990.
- (Ecodesign Pilot 01) ECODESIGN PILOT, Edition Vienna TU, Institute for Engineering Design – ECODESIGN [<http://www.ecodesign.at/toolbox>] version française réalisée l'Ademe, 2006.
- (Ecofaire 08) ECOFAIRE , Outil Méthodologique ECOFAIRE, issu du programme ECOFAIRE piloté par la SEM régionale des Pays de Loire et financé par l'Etat, la Région Pays de Loire et l'ADEME, 2008.
- (EIME 04) EIME, Environmental Information and Management Explorer, Technical Brochure, 10/2004, [http://www.gimelec.fr/images/gimelec/publication_correct_pdf/brochure_technique_eime_oct_2004.pdf]
- (Electrolux 00) Electrolux Environmental Affairs, Environmental guidelines for electrolux cold products. AB Electrolux, Stockholm, 2000.
- (ENSCI-DPI 98) Secreteriat d'état à l'industrie France, « Design de A à Z », Departement Design Information (DPI), Ecole nationale supérieure de création industrielle, ENSCI, 1998.
- (Frenklach 98) Frenklach, G., « Classifying the technical effects », TRIZ Journal of 1998, 1998.
- (Frosh et al. 89) Frosh R., Gallopoulos N., « Strategies for Manufacturing », Scientific American, Vol. 261, 3, pp. 144-152, 1989.
- (Fussler et al, 96) Fussler C., James P., « Driving Eco Innovation- A breakthrough discipline for innovation and sustainability », Pitman Publishing, Londres, 1996.
- (Goedkoop 95 a) Goedkoop M., « The Eco-indicator 95 : Final Report », National Reuse of Waste Research Programme (NOH), Pré consultants, Rapport N°9523, 1995.
- (Goedkoop 95 b) Goedkoop M., « The Eco-indicator 95 : Manual for Designers », National Reuse of Waste Research Programme (NOH) Pré consultants, Rapport N°9524, 1995.
- (Hirtz et al 02) Hirtz J., Stone R., McAdams D., Szykman S. and Wood K., « A Functional Basis for engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts », Research in Engineering Design 13(2), 65-82, 2002.
- (Ishikawa 07) Ishikawa K., « Gestion de la qualité », DUNOD, Paris, 2007.
- (ISO 140 40) ISO 14040, « Management environnemental- Analyse de cycle de vie-Principes généraux et cadre », 2006.
- (ISO 140 41) ISO 14041, « Management environnemental- Analyse de cycle de vie- Définition des objectifs et de l'échelle-Inventaire du cycle de vie », 2000.
- (ISO 140 42) ISO 140 42, « Management environnemental - Analyse l'impact du cycle de vie - Exemples d'application de l'ISO 14042 », 2003.
- (ISO 140 43) ISO/DIS 14043, « Management environnemental- Analyse de cycle de vie-Interprétation du cycle de vie », 1999.

- (ISO 140 44) ISO 140 44, « Management environnemental-Analyse du cycle de vie-Exigences et lignes directrices », 2006.
- (Janin 00) Janin M., « Démarche d'éco- conception en entreprise. Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus », Thèse de doctorat, ENSAM Chambéry, 2000.
- (Johansson 01) Johansson G., « Environmental performance requirements in product development. An exploratory study of two development projects », PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Linköping University, 2001.
- (Jones et al, 00) Jones E., Harrison D., « Investigating the use TRIZ tools in Eco-Innovation », Department of Design, Runnymede Campus, Egham, Surrey, TRIZCON2000 conference proceedings, The Altshuller Institute, Mai 2000.
- (Jones et al, 01) Jones E., Stanton N.A., Harrison D., « Applying structured methods to Eco-innovation : An evaluation of the Product Ideas Tree diagram », Department of Design, Brunel University, Runnymede Campus, Egham, Surrey TW20 0JZ, UK, Elsevier Science, 2001.
- (Jung et al, 06) Jung, H., Bae J., Suh S., Yi H., « Use of TRIZ to develop a novel auto-focus camera module », The TRIZ Journal of 2006, 2006.
- (Kai et al, .03) Kai Y., Basem S., E., « Design for Six Sigma : A roadmap for product Development », McGraw-Hill Professional, 2003.
- (Khomenko et al, 07) Khomenko N., De Guio R., Lelait L., Kailov I., « A framework for OSTM-TRIZ based computer support to be used in complex problem management », International Journal of Computer Application in Technology, 30, 1/2. 2007.
- (Kobayashi 06) Kobayashi H., « A systematic approach to eco-innovative product design based on life cycle planning », Advanced Engineering Informatics Vol. 20 113–125. 2006.
- (Kun-Mo Lee et al, 05) Kun-Mo L., Pil-Ju P., « ECODESIGN : Best Practice of ISO/TR 14062 », Eco-product Research Institute (ERI), Ajou University, Korea, Edition, ISBN 981-05-3115-X, APEC Secretariat, 2005.
- (Laville 04) Laville E., « L'entreprise verte : le développement durable change l'entreprise pour changer le monde », Pearson Education France (2ème édition) ISBN 2-7440-6121-2, Paris, 2004.
- (Laville 09) Laville E., « L'entreprise verte : le développement durable change l'entreprise pour changer le monde », Pearson Education France (3ème édition) ISBN 978-2-7440-6335-0, Paris, 2009.
- (Le Pochat 05) LE POCHAT S., « Intégration de l'éco-conception dans les PME : proposition d'une méthode d'appropriation de savoir –faire pour la conception environnementale des produit », Thèse de doctorat, ENSAM Paris, 2005.
- (Lebahar 94) Lebahar J-C, « Le design industriel : sémiologie de la séduction et code de la matière », Editions parenthèses, ISBN 2-86364-074-7, 1994.
- (Leon 09) Leon N., « The future of computer-aided innovation », Computers in Industry, 60, pp 539-550, 2009.
- (Li et al, 09) Li T., Huang, H., « Applying TRIZ and fuzzy AHP to develop innovative design for automated manufacturing systems », Expert Systems with applications, 36, pp 8302-8312, 2009.
- (Liu et al, 01) Liu, C.C., Chen, J.L., « A TRIZ inventive design method without contradiction information », The TRIZ Journal of 2001, 2001.
- (Lofthouse 01) Lofthouse, V. A., « Facilitating Ecodesign in an Industrial Design Context: An Exploratory Study », Enterprise Integration, Doctoral Thesis, Cranfield University, 2001.
- (Lofthouse 06) Lofthouse V.A., « Ecodesign tools for designers: defining the requirements », Journal of Cleaner Production, Volume 14, Issues 15-16, pp 1386-1395, 2006.
- (Luttropp et al, 06) Luttropp C., Jessica Lagerstedt J., « EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development », Journal of Cleaner Production 14 (2006) 1396-1408, 2006.

- (Luttrupp et al. 01) Luttrupp C., Karlsson R., « The conflict of contradictory environmental targets », EcoDesign 2001, 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, 2001.
- (Lyonnet 97) Lyonnet, P. « La qualité, outils et méthodes », Tech & Doc, Lavoisier, Paris. 1997.
- (MAL'IN 04) Site Web Laboratoire TREFLE (site ENSAM, Valorisation, MALIN), <http://www.trefle.u-bordeaux1.fr/malin>, 2004.
- (Mao 00) Mao Y.J., « Case Studies in TRIZ : An integrated steering shaft lock for motorcycles », The TRIZ Journal of 2000, 2000.
- (Massey et al, 1993) Massey, A P., O'Keefe, M., « Insights from attempts to validate a multi attribute model of problem definition quality », Decision Sciences, 24 (1), pp 106-125, 1993.
- (Matbase) MATBASE, site internet : <http://www.matbase.com/guidelines.html>
- (Mc Aloone et al 95) Aloone Mc T.C., Evans S., « The challenges of environmentally conscious design », International Conference on Clean Electronics Products and Technology, Edimbourg, Royaume-Uni, 1995.
- (Meinders 97) Meinders H. « Point of no return », Philips EcoDesign guidelines, Eindhoven, 1997.
- (Millet et al, 03) Millet D., Coppens C., Jacquenson L., Le Borgne R., Tonnelier P., « Intégration de l'environnement en conception : l'entreprise et le développement durable », Hermès Lavoisier, ISBN 2-7462-0732-X, chapitre N°1, Paris, 2003.
- (Nadeau et al, 04) Nadeau J.P., Pailhes J., Olivares P., « MAL'IN Logiciel de conduite d'études, Méthodes d'Aide à L'Innovation », diffusion SERAM, Paris, 2004.
- (Nadeau et al, 05) Nadeau J.P., Pailhes J., Doré R., Scaravetti D., « Analyser, qualifier et innover en conception par les lois d'évolution TRIZ », 6ème Congrès International de Génie Industriel, Besançon, 7-10/06/05, 2005.
- (Nadeau et al, 06) Nadeau J.-P., Pailhes J., « Intégration de l'innovation et des sensations utilisateur en conception préliminaire par le biais de l'analyse fonctionnelle, Ingénierie de la conception et cycle de vie du produit », Chapitre 2, Traité IC2, ISBN : 2-7462-1214-5, Hermès, Paris, 2006.
- (Nadeau et al, 06) Nadeau J.P., Pailhes J., Scaravetti D., (2006), « Des outils de l'analyse fonctionnelle vers la créativité technique », International Journal Of Design and Innovation Research, Vol 3, N°3/4, pp87-106, Paris.
- (NF X50-151) AFNOR, « Management par la valeur - Expression Fonctionnelle du Besoin et cahier des charges fonctionnel - Exigences pour l'expression et la validation du besoin à satisfaire dans le processus d'acquisition ou d'obtention d'un produit », 2007.
- (Norman 04) Norman D, « Emotional Design, Why we love (or hate) every day things », Basic Book, New York, 2004.
- (Ölundh 06) Olundh, G., « Modernising Ecodesign, Ecodesign for innovative solutions », Doctoral thesis, Department of Machine Design, Royal Institute of Technology, SE-100 44 Stockholm, 2006.
- (Pailhes et al, 05) Pailhes J., Nadeau J.P., Scaravetti D., « Intégration des flux fonctionnels pour l'aide à la décision en conception préliminaire », 17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes, 29/08/05-01/09/05, 2005.
- (Pailhes et al, 07) Pailhès J., Nadeau J.-P., Innover en conception par les Méthodes d'Aide à L'INnovation MAL'IN, 7ème Congrès International de Génie Industriel, 6-8/06/07, Troisrivières, Canada, 2007.
- (Pailhes et al, 10) Pailhès, J., Sallaou, M., Nadeau, J., Fadel, G. M. « Taxonomy of preliminary design knowledge from an energy based standpoint », Journal of Mechanical Design, (papier soumis), 2010.
- (Petrov 02) Petrov, V., « The laws of system evolution », TRIZ Journal of 2002, 2002.
- (Quarante 94) Quarante D, « Eléments de design industriel », Polytechnica-2ème édition, ISBN 2-84054-018-5, 1994.

- (Reid et al, 08) Reid A., Miedzinski, M, « SYSTEMATIC Innovation Panel on eco-innovation », Final report for sectoral innovation watch (SIW), [www.europe-innova.org], 2008.
- (Saaty et al, 00) Saaty T.L., Vargas L.G., « Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process », Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- (Samet et al, 09) Samet S., Ledoux Y., Nadeau J.P., « La création face aux enjeux du développement durable et de l'éco-conception », 1er Colloque Internationale de l'ISAMS (l'Actualité de l'Arts face à la Société Industrialisée), Sfax (Tunisie) 10-11 Avril 2009.
- (Savransky 00) Savransky S.D., « Engineering of creativity, Introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving », CRC Press, Boca Raton, Florida, 2000.
- (Scaravetti et al, 05) Scaravetti D., Nadeau J.-P., Pailhes J., Sébastien P., « Structuring of embodiment design problem based on the product lifecycle », Int. J. Product Development, Vol. 2, Nos. 1/2, pp.47-70, Indersciences Ed., Genève, Suisse. 2005.
- (Schmidt-Bleek 94) Schmidt-Bleek F., « Gedanken über eine neue Dimension des Umweltschutzes. Wie erreichen wir ein zukunftsfähige Wirtschaft ? », Rapport Technique du Wuppertal Institute, Wuppertal, Allemagne, 1994.
- (Schneider 05) Schneider Electric, « Guide générale d'éco-conception, Intersection », 11/2005, [http://www.intersections.schneider-electric.fr/stock_images/telec/1/n3/GT14_ECOCONCEPTION.pdf]
- (Schneider Electric 01) Schneider Electric, « Guide général d'éco-conception, rapport technique (service Environnement Produit) rédigé par : Claude Jollain, Michel Lauraire, Willy Martin de la société Schneider Electric », 2001.
- (Shimomura et al, 98) Shimomura Y., Yoshio M., Takeda H., Umeda Y., Tomiyama T., « Representation of design object based on the functional evolution process model », Journal of Mechanical Design, (ASME), Vol. 120, pp 221-229, 1998.
- (Steinhilper 95) Steinhilper R., « Product recycling and eco-design: challenges, solutions and examples », International Conference on clean Electronics, Edimbourg, Royaume-Uni. 1995.
- (Stevens 97) Stevens, A.L.N., « Moving companies towards sustainability through eco-design : conditions for success », The Journal of Sustainable Product Design, Vol. 3, pp 47-55, 1997.
- (Tan et al, 02) Tan R., Kraft D., « A conceptual design methodology for variety using TRIZ and QFD », Proceedings of the ASME 14th International Conference on Design Theory and Methodology Integrated Systems Design, Sep 29-Oct 2, Montreal, Canada, 2002.
- (Tassinari 03) Tassinari, R., « Pratique de l'analyse fonctionnelle », DUNOD, Paris, 2003.
- (Terninko 00) Terninko, J., « Su-field analysis », The TRIZ Journal of 2000, 2000.
- (Terninko 97) Terninko J., « The QFD, TRIZ and Taguchi Connection: Customer-Driven Robust Innovation », Transactions of ninth Symposium on quality Function Deployment, Novi, Mi QFD Institute, 1997.
- (Tompkins et al, 06) Tompkins, M., Price, T., Clapp, T., The TRIZ Journal of 2006, 2006.
- (Unesco 00) Unesco, « L'engagement responsable: un nouvel enjeu pour les entreprises », Actes de la manifestation CIME-UNESCO, 14 avril 2000.
- (Ventere 95) Ventere J., « La qualité écologique des produits – Des écobilans aux écolabels », Éditions Sang de la Terre – AFNOR, 1995.
- (Villard 09) Villard S., « Qu'est-ce que c'est le design aujourd'hui (pour une conception écologique du design) », Editions Beaux arts, 2009.
- (Volvo Standards) Volvo Standards, « Corporate standards for materials. Black, gray and white e list of materials », <http://www.tech.volvo.se/standard/docs/.pdf>
- (WBCSD 99) World Business Council for Sustainable Development (1999), « Eco- efficiency Indicators: A Tool for Better Decision-Making », Technical Report.

- (Wenzel et al, 97) Wenzel H., Hauschild M., Alting L., « Environmental assessment of product: methodology, tools and case studies in product development », vol. 1. London: Chapman & Hall, 1997.
- (Wimmer et al, 02) Wimmer, W. and Züst, R., « ECODESIGN Pilot – Product-Investigation-, Learning- and Optimization- Tool for Sustainable Product Development », Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2002.
- (Yamashina et al, 02) Yamashina H., Ito T., Kawada H., « Innovative product development process by integrating QFD and TRIZ », International Journal of Production Research, V. 40, N° 5, pp 1031-1050, 2002.
- (Zanni-Merk et al, 09) Zanni-Merk C., Cavallucci D., Rousselot F., « An ontological basis for computer aided innovation », Computers in Industry, 60, pp 563-574, 2009.
- (Zhang et al, 09) Zhang X., Mao X., AbouRizk S., « Developing management system for improved value engineering practices in the construction industry », Automation in Construction, 18, pp 777-789, 2009.
- (Zlotin et al, 99) Zlotin, B., Zusman, A., « ARIZ to the move », TRIZ Journal of 1998, 1999.

Annexe 1: Elimination des contradictions physiques par séparation des exigences contradictoires

Séparation dans l'espace

- Caractéristique présente là où on en a besoin et absente ailleurs.
- Caractéristique présente là où on en a besoin et inverse ailleurs.

Principes d'innovation :

Agir sur une substance :	1, 2, 3,
Agir sur la géométrie :	4, 7, 17,
Agir sur un champ :	24, 26, 30.

Séparation dans le temps

- Caractéristique présente quand on en a besoin et absente dans les autres cas.
- Caractéristique présente quand on en a besoin et inverse dans les autres cas.

Principes d'innovation :

Anticiper :	9, 10, 11,
Adapter des caractéristiques :	15, 16,
Agir sur le rythme :	18, 19, 20,
Modifier des conditions ou l'entité :	21, 27, 34.

Séparation entre le tout et les parties

- Caractéristique présente au niveau du système et absente au niveau d'un sous-système.
- Caractéristique présente au niveau du système et inverse au niveau d'un sous-système.

Principes d'innovation : 1, 27.

- Caractéristique présente au niveau du système et absente au niveau du super système.
- Caractéristique présente au niveau du système et inverse au niveau du super système.

Principes d'innovation : 5, 22.

Séparation sous conditions

- Caractéristique présente (ou élevée) sous une condition et absente (ou faible) sous une autre.

Principes d'innovation :

Changer un champ :	13, 28, 32,
Changer des caractéristiques :	35, 36, 38, 39.

Annexe 2 : Paramètres de conception de la théorie TRIZ

<i>Paramètres TRIZ</i>	<i>Paramètres caractéristiques</i>
1. Masse d'une entité mobile	Paramètres liés à la masse de l'entité
2. Masse d'une entité immobile	
3. Longueur d'une entité mobile	Caractéristique dimensionnelle de l'entité
4. Longueur d'une entité immobile	
5. Surface d'une entité mobile	Caractéristique surfacique de l'entité
6. Surface d'une entité immobile	
7. Volume d'une entité mobile	Caractéristique volumique de l'entité
8. Volume d'une entité immobile	
9. Vitesse	Vitesse, cadence, évolution d'une action
10. Force	Interaction entre entités
11. Contrainte, pression	Répartition surfacique des forces
12. Forme	Contours, morphologie
13. Stabilité de l'entité	Stabilité chimique, Cohésion, Pertes, Accroissement d'entropie
14. Résistance	Résistance mécanique, rigidité
15. Longévité d'une entité mobile	Durée de vie, Durée de fonctionnement
16. Longévité d'une entité immobile	
17. Température	Paramètres liés à la thermique
18. Brillance	Paramètres liés à l'éclairage, à l'optique
19. Energie dépensée par l'entité mobile	
20. Energie dépensée par l'entité immobile	
21. Puissance	Rendement
22. Gaspillage d'énergie	Energie non utilisée, Pertes énergétiques
23. Gaspillage de substance	Pertes de masse, de matière, de composants, totale ou partielle
24. Pertes d'informations	Pertes d'informations (données, sens, aspect, arôme, texture, vue,...)
25. Perte de temps	Durée d'une activité
26. Quantité de substance	Nombre ou quantité de matière, de composants, total ou partiel
27. Fiabilité	Probabilité d'une action dans des conditions et pour une durée donnée
28. Précision de la mesure	Minoration d'erreur, d'incertitude Par abus, exactitude de la mesure
29. Précision de l'usinage	Respect des spécifications (dimensionnelles, de forme et de position)
30. Facteurs nuisibles agissant sur l'entité	Sensibilité du système à des facteurs nuisibles (froid, corrosion,...)
31. Facteurs nuisibles induits	Sensibilité du système à des effets qu'il génère (chaleur,...)
32. Usinabilité	Facilité de fabrication, de réalisation
33. Facilité d'utilisation	Usage, Fonctionnement intuitif
34. Aptitude à la réparation	Démontage, Remplacement, Maintenance
35. Adaptabilité	Adaptabilité, Disponibilité, Universalité, Polyvalence
36. Complexité de l'appareil	Nombre de composants, Diversité, Maîtrise
37. Complexité de contrôle	Contrôle, Détection, Mesure, Analyse
38. Degré d'automatisation	Commande, Régulation, Autonomie, Asservissement
39. Productivité	Nombre d'actions par unité de temps, Débit de produits

Annexe 3 : Paramètres de conception et axes d'éco-efficacité

Paramètres TRIZ	A	B	C	D	E	F	G
1. Masse d'une entité mobile	⊗	⊗					
2. Masse d'une entité immobile	⊗						
3. Longueur d'une entité mobile	⊗	⊗					
4. Longueur d'une entité immobile	⊗						
5. Surface d'une entité mobile	⊗	⊗					
6. Surface d'une entité immobile	⊗						
7. Volume d'une entité mobile	⊗	⊗					
8. Volume d'une entité immobile	⊗						
9. Vitesse				⊗			⊗
10. Force				⊗			
11. Contrainte, pression				⊗			
12. Forme	⊗						
13. Stabilité de l'entité			⊗			⊗	
14. Résistance	⊗				⊗	⊗	
15. Longévité d'une entité mobile						⊗	
16. Longévité d'une entité immobile						⊗	
17. Température		⊗					
18. Brillance		⊗					
19. Energie dépensée par l'entité mobile		⊗					
20. Energie dépensée par l'entité immobile		⊗					
21. Puissance		⊗					
22. Gaspillage d'énergie		⊗					
23. Gaspillage de substance	⊗						
24. Pertes d'informations							⊗
25. Perte de temps							⊗
26. Quantité de substance	⊗						
27. Fiabilité							⊗
28. Précision de la mesure				⊗			
29. Précision de l'usage				⊗			
30. Facteurs nuisibles agissant sur l'entité					⊗	⊗	
31. Facteurs nuisibles induits			⊗				
32. Usinabilité	⊗	⊗		⊗			
33. Facilité d'utilisation							⊗
34. Aptitude à la réparation					⊗	⊗	
35. Adaptabilité							⊗
36. Complexité de l'appareil				⊗			
37. Complexité de contrôle							⊗
38. Degré d'automatisation							⊗
39. Productivité	⊗	⊗					⊗

Annexe 4 : Matrice des contradictions

		paramètres qui se dégradent																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
paramètres à améliorer	1			15,8 29,34		29,17 38,34		29,2 40,28		2,8 15,38	8,10 18,37	10,36 37,40	10,14 35,40	1,35 19,39	28,27 18,40	5,34 31,35		6,29 4,38	19,1 32	35,12 34,31	
	2				10,1 29,35		35,30 13,2		5,35 14,2		8,10 19,35	13,29 10,18	13,10 29,14	26,39 1,40	28,2 10,27		2,27 19,6	28,19 32,22	19,32 35		18,19 28,1
	3	8,15 29,34				15,17 4		7,17 4,35		13,4 8	17,10 4	1,8 35	1,8 10,29	1,8 15,34	8,35 29,34	19		10,15 19	32	8,35 24	
	4		35,28 40,29				17,7 10,40		35,8 2,14		28,10	1,14 35	13,14 15,7	39,37 35	15,14 28,26		1,40 35	3,35 38,18	3,25		
	5	2,17 29,4		14,15 18,4				7,14 17,4		29,30 4,34	19,30 35,2	10,15 36,28	5,34 29,4	11,2 13,39	3,15 40,14	6,3		2,15 16	15,32 19,13	19,32	
	6		30,2 14,18		26,7 9,39						1,18 35,36	10,15 36,37		2,38	40		2,10 19,30	35,39 38			
	7	2,26 29,40		1,7,4 35		1,7,4 17				29,4 38,34	15,35 36,37	6,35 29,4	1,15 1,39	28,10 1,39	9,14 15,7	6,35 4		34,39 10,18	2,13 10	35	
	8		35,10 19,14	19,14	35,8 2,14						2,18 37	24,35	7,2 35	34,28 35,40	9,14 17,15		35,34 38	35,6 4			
	9	2,28 13,38		13,14 8		29,30 34		7,29 34			13,28 15,19	6,18 38,40	35,15 18,34	1,18 26,14	8,3 35,5	3,19 35,5		28,30 36,2	10,13 19	8,15 35,38	
	10	8,1 37,18	18,13 1,28	17,19 9,36	28,10	19,10 15	1,18 36,37	15,9 12,37	2,36 18,37	13,28 15,12		18,21 11	10,35 40,34	35,10 21	35,10 14,27	19,2		35,10 21		1,16 36,37	
	11	10,36 37,40	13,29 10,18	35,10 36	35,1 14,16	10,15 36,28	10,15 36,37	6,35 10	35,24	6,35 36	36,35 21		35,4 15,10	35,33 2,40	9,18 3,40	19,3 27		35,39 19,2		14,24 10,37	
	12	8,10 29,40	15,10 26,3	29,34 5,4	13,14 10,7	5,34 4,10		14,4 15,22	7,2 35	35,15 34,18	35,10 37,40	34,15 10,14		33,1 18,4	30,14 10,40	14,26 9,25		22,14 19,32	13,15 32	2,6 34,14	
	13	21,35 2,39	26,39 1,40	13,15 1,28	37	2,11 13	39	28,10 19,39	34,28 35,40	33,15 28,18	10,35 21,16	2,35 40	22,1 18,4		17,9 15	13,27 10,35	39,3 35,23	35,1 32	32,3 27,16	13,19 29,18	27,4 29,18
	14	1,8 40,15	40,26 27,1	1,15 8,35	15,14 28,26	3,34 40,29	9,40 28	10,15 14,7	9,14 17,15	8,13 26,14	10,18 3,14	10,3 18,40	10,30 35,40	13,17 35		27,3 26		30,10 40	35,19 10	19,35 28	35
	15	19,5 34,31		2,19 9		3,17 19		10,2 19,30		3,35 5	19,2 16	19,3 27	14,26 28,25	13,3 35	27,3 10			19,35 39	2,19 4,35	28,6 35,18	
	16		6,27 19,16		1,40 35					35,34 38				39,3 35,23				19,18 36,40			
	17	36,22 6,38	22,35 32	15,19 9	15,19 39,18	3,35 39,18	35,38	34,39 40,18	35,6 4	2,28 36,30	35,10 3,21	35,39 19,2	14,22 19,32	1,35 32	10,30 22,40	19,13 39	19,18 36,40		32,30 21,16	19,15 3,17	
	18	19,1 32	2,35 32	19,32 16		19,32 26		2,13 10		10,13 19	26,19 6		32,30	32,3 27	35,19 6	2,19 6		32,35 19	32,1 19	32,35 1,15	
	19	12,18 28,31		12,28		15,19 25		35,13 18		8,15,35	16,26 21,2	23,14 25	12,2 29	19,13 17,24	5,19 9,35	28,35 6,18		19,24 3,14	2,15 19		
	20		19,9 6,27								36,37			27,4 29,18	35				19,2 35,32		
	21	8,36 38,31	19,26 17,27	1,10 35,37		19,38	17,32 13,38	35,6 38	30,6 25	15,35 2	26,2 36,35	22,10 35	29,14 2,40	35,32 15,31	26,10 28	19,35 10,38	16	2,14 17,25	16,6 19	16,6 19,37	
	22	15,6 19,28	19,6 18,9	7,2,6 13	6,38 7	15,26 17,30	17,7 30,18	7,18 23	7	16,35 38	36,38			14,2 39,6	26			19,38 7	1,13 32,15		
	23	35,6 23,40	35,6 22,32	14,29 10,39	10 28,24	35,2 10,31	10,18 39,31	1,29 30,36	3,39 18,31	10,13 28,38	14,15 18,40	3,36 37,10	29,35 3,5	2,14 30,40	35,28 31,40	28,27 3,18	27,16 18,38	21,36 39,31	1,6 13	35,18 24,5	28,27 12,31
	24	10,24 35	10,35 5	1,26	26	30,26	30,16		2,22	26,32						10	10		19		
	25	10,20 37,35	10,20 26,5	15,2 29	30,24 14,5	26,4 5,16	10,35 17,4	2,5 34,10	35,16 32,18		10,37 36,5	37 36,4	4,10 34,17	35,3 22,5	29,3 28,18	20,10 28,18	28,20 10,16	35,29 21,18	1,19 26,17	35,38 19,18	1
	26	35,6 18,31	27,26 18,35	29,14 35,18		15,14 29	2,18 40,4	15,20 29		35,29 34,28	35,14 3	10,36 14,3	35,14	15,2 17,40	14,35 34,10	3,35 10,40	3,35 31	3,17 39		3,35 16,18	3,35 31
	27	3,8 10,40	3,10 8,28	15,9 14,4	15,29 28,11	17,10 14,16	32,35 40,4	3,10 14,24	2,35 24	21,35 11,28	8,28 10,3	10,24 35,19	35,1 16,11		11,28	2,35 3,25	34,27 6,40	3,35 10	11,32 13	21,11 27,19	36,23
	28	32,35 26,28	28,35 25,26	28,26 5,16	32,28 3,16	26,28 32,3	32,13 32,3	6		28,13 32,24	32,2	6,28 32	6,28 32	32,35 13	28,6 32	28,6 32	10,26 24	6,19 28,24	6,1 32	3,6 32	
	29	28,32 13,18	28,35 27,9	10,28 29,37	2,32 10	28,33 29,32	2,29 18,36	32,28 2	25,10 35	10,28 32	28,19 34,36	3,35	32,30 40	30,18	3,27	3,27 40		19,26	3,32	32,2	
	30	22,21 27,39	2,22 13,24	17,1 39,4	1,18	22,1 33,28	27,2 39,35	22,23 37,35	34,39 19,27	21,22 35,28	13,35 39,18	22,2 37	22,1 3,35	35,24 30,18	18,35 37,1	22,15 33,28	17,1 40,33	22,33 35,2	1,19 32,13	1,24 6,27	10,2 22,37
	31	19,22 15,39	35,22 1,39	17,15 16,22		17,2 18,39	22,1 40	17,2 40	30,18 35,4	35,28 3,23	35,28 1,40	2,33 27,18	35,1	35,40 27,39	15,35 22,2	15,22 33,31	21,39 16,22	22,35 2,24	19,24 39,32	2,35 6	19,22 18
	32	28,29 15,16	1,27 36,13	1,29 13,17	15,17 27	13,1 26,12	16,40	13,29 1,40	35	35,13 8,1	35,12	35,19 1,37	1,28 13,27	11,13 1	1,3 10,32	27,1 4	35,16	27,26 18	28,24 27,1	28,26 27,1	1,4
	33	25,2 13,15	6,13 1,25	1,17 13,12		1,17 13,16	18,16 15,39	1,16 35,15	4,18 39,31	18,13 34	28,13 35	2,32 12	15,34 29,28	32,35 30	32,40 3,28	29,3 8,25	1,16 25	26,27 13	13,17 1,24	1,13 24	
	34	2,27 35,11	2,27 35,11	1,28 10,25	3,18 31	15,13 32	16,25	25,2 35,11	1	34,9	1,11 10	13	1,13 2,4	2,35	11,1 2,9	11,29 28,27	1	4,10	15,1 13	15,1 28,16	
	35	1,6 15,8	19,15 29,16	35,1 29,2	1,35 16	35,30 29,7	15,16	15,35 29		35,10 14	15,17 20	35,16	15,37 1,8	35,30 14	35,3 32,6	13,1 35	2,16	27,2 3,35	6,22 26,1	19,35 29,13	
	36	26,30 34,36	2,26 35,39	1,19 26,24	26	14,1 13,16	6,36	34,26 6	1,16	34,10 28	26,16	19,1 35	29,13 28,15	2,22 17,19	2,13 28	10,4 28,15		2,17 13	24,17 13	27,2 29,28	
	37	27,26 28,13	6,13 28,1	16,17 26,24	26	2,13 18,17	2,39 30,16	29,1 4,16	2,18 26,31	3,4 16,35	36,28 40,19	35,36 37,32	27,13 1,39	11,22 39,30	22,3 15,28	19,29 39,25	25,34 6,35	3,27 35,16	2,24 26	35,38 16	19,35
	38	28,26 18,35	28,26 35,10	14,13 17,28	23	17,14 13		35,13 16		28,10	2,35	13,35	15,32 1,13	18,1	25,13	6,9		26,2 19	8,32 19	2,32 13	
	39	35,26 24,37	28,27 15,3	18,4 28,38	30,7 14,26	10,26 34,31	10,35 17,7	2,6 34,10	35,37 10,2		28,15 10,36	10,37 14	14,10 34,40	35,3 22,39	29,28 10,18	35,10 2,18	21,10 16,38	35,21 28,10	26,17 19,1	35,10 38,19	1

paramètres qui se dégradent																			paramètres à améliorer
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
12,36 18,31	6,2 34,19	5,35 3,31	10,24 35	10,35 20,28	3,26 18,31	1,3 11,27	28,27 35,26	28,35 26,18	22,21 18,27	22,35 31,39	27,28 1,36	35,3 2,24	2,27 28,11	29,5 15,8	26,30 36,34	28,29 26,32	26,35 18,19	35,3 24,37	
15,19 18,22	18,19 28,15	5,8 13,30	10,15 35	10,20 35,26	19,6 18,26	10,28 8,3	18,26 28	10,1 35,17	2,19 22,37	35,22 1,39	28,1 9	6,13 1,32	2,27 28,11	19,15 29	1,10 26,39	25,28 17,15	2,26 35	1,28 15,35	
1,35	7,2 35,39	4,29 23,10	1,24	15,2 29	29,35	10,14 29,40	28,32 4	10,28 29,37	1,15 17,24	17,15	1,29 17	15,29 35,4	1,28 10	14,15 1,16	1,19 26,24	35,1 26,24	17,24 26,16	14,4 28,29	
12,8	6,28	10,28 24,35	24,26	30,29 14		15,29 28	32,28 3	2,32 10	1,18		15,17 27	2,25	3	1,35	1,26	26		30,14 7,26	
19,10 32,18	15,17 30,26	10,35 2,39	30,26	26,4	39,30 6,13	29,9	26,28 32,3	2,32	22,33 28,1	17,2 18,39	13,1 26,24	15,17 13,16	15,13 10,1	15,30	14,1 13	2,36 26,18	14,30 28,23	10,26 34,2	
17,32	17,7 30	10,14 18,39	30,16	10,35 4,18	2,18 40,4	32,35 40,4	26,28 32,3	2,29 18,36	27,2 39,35	22,1 40	40,16	16,4	16	15,16	1,18 36	2,35 30,18	23	10,15 17,7	
35,6 13,18	7,15 13,16	36,39 34,10	2,22	2,6 34,10	29,30 7	14,1 40,11	26,25 28	25,28 2,16	22,21 27,35	17,2 40,1	29,1 40	15,13 30,12	10	15,29	26,1	29,26 4	35,34 16,24	10,6 2,34	
30,6		10,39 35,34		35,16 32,18	35,3	2,35 16		35,10 25	34,39 19,27	30,18 35,4	35		1		1,31	2,17 26		35,37 10,2	
19,35 38,2	14,20 19,35	10,13 28,38	13,26		10,19 29,38	11,35 27,28	28,32 1,24	10,28 32,25	1,28 35,23	2,24 35,21	35,13 8,1	32,28 13,12	34,2 28,27	15,10 26	10,28 4,34	3,34 27,16	10,18		
19,35 18,37	14,15	8,35 40,5		10,37 36	14,29 18,36	3,35 13,21	35,10 23,24	28,29 37,36	1,35 40,18	13,3 36,24	15,37 18,1	1,28 3,25	15,1 11	15,17 18,20	26,35 10,18	36,37 10,19	2,35	3,28 35,37	
10,35 14	2,36 25	10,36 3,37		37,36 4	10,14 36	10,13 19,35	6,28 25	3,35	22,2 37	2,33 27,18	1,35 16	11	2	35	19,1 35	2,36 37	35,24	10,14 35,37	
4,6,2	14	35,29 3,5		14,10 34,17	36,22	10,40 16	28,32 1	32,30 40	22,1 2,35	35,1	1,32 17,28	32,15 26	2,13 1	1,15 29	16,29 1,28	15,13 39	15,1 32	17,26 34,10	
32,35 27,31	14,2 39,6	2,14 30,40		35,27 35	15,32		13	18	35,24 30,18	35,40 27,39	35,19	32,35 30	2,35 10,16	35,30 34,2	2,35 22,26	35,22 39,23	1,8 35	23,35 40,3	
10,26 35,28	35	35,28 31,40		29,3 28,10	29,10 27	11,3	3,27 16	3,27	18,35 37,1	15,35 22,2	11,3 10,32	32,40 28,2	27,11 3	15,3 32	2,13 25,28	27,3 15,40	15	29,35 10,14	
19,10 35,38		28,27 3,18	10	20,10 28,18	3,35 10,40	11,2 13	3	3,27 16,40	22,15 33,28	21,39 16,22	27,1 4	12,27	29,10 27	1,35 13	10,4 29,15	19,29 39,35	6,10	35,17 14,19	
16		27,16 18,38	10	28,20 10,16	3,35 31	34,27 6,40	10,26 24		17,1 40,33	22	35,10	1	1	2		25,34 6,35	1	20,10 16,28	
2,14 17,25	21,17 35,38	21,36 29,31		35,28 21,18	3,17 30,39	19,35 3,10	32,19 24	24	22,33 35,2	22,35 2,24	26,27	26,27	4,10 16	2,18 27	2,17 16	3,27 35,31	26,2 19,16	15,28 35	
32	19,16 1,6	13,1	1,6	19,1 26,17	1,19		11,15 32	3,32	15,19 32,39	35,19 28,26	19,35 19	28,26 13,16	15,17 1,19	15,1 13	6,32 13	32,15	2,26 10	2,25 16	
6,19 37,18	12,22 15,24	35,24 18,5		35,38 19,18	34,23 16,18	19,21 11,27	3,1 32		1,35 6,27	2,35 6	28,26 30	19,35	1,15 17,28	15,17 13,16	2,29 27,28	35,38	32,2	12,28 35	
		28,27 18,31			3,35 31	10,36 23			10,2 22,37	19,22 18	1,4					19,35 16,25		1,6	
	10,35 38	28,27 18,38	10,19	35,20 10,6	4,34 19	19,24 26,31	32,15 2	32,2	19,22 31,2	2,35 18	26,10 34	26,35 10	35,2 10,34	19,17 34	20,19 30,34	19,35 16	28,2 17	28,35 34	
3,38		35,27 2,37	19,10	10,18 32,7	7,18 25	11,10 35	32		21,22 35,2	21,35 2,22	35,32 1	2,19			7,23 15,23	2	28,10 29,35		
28,27 18,38	35,27 2,31			15,18 35,10	6,3 10,24	10,29 39,35	16,34 31,28	24,31	33,22 30,40	10,1 34,29	15,34 33	32,28 2,24	2,35 34,27	15,10 2	35,10 28,24	35,18 10,13	38,10 18	28,35 10,23	
10,19	19,10			24,26 28,32	24,28 35	10,28 23			22,10 1	10,21 22	32	27,22				35,33	35	13,23 15	
35,20 10,6	10,5 18,32	35,18 10,39	24,26 28,32		35,38 18,16	10,30 4	24,34 28,32	24,26 28,18	35,18 34	35,22 18,39	35,28 34,4	4,28 10,34	32,1 10	35,28	6,29	18,28 32,10	24,28 35,30		
35	7,18 25	6,3 10,24	35	35,38 18,16		18,3 28,40	3,2 28	33,30	35,33 29,31	3,35 40,39	29,1 35,27	35,29 25,10	2,32 10,25	15,3 29	3,13 27,10	3,27 29,18	8,35	13,29 3,27	
21,11 26,31	10,11 35	10,35 29,39	10,28	10,30 4	21,28 40,3	32,3 11,23		11,32 1	27,35 2,40	35,2 40,26		27,17 40	1,11	13,35 8,24	13,35 1	27,40 28	11,13 27	1,35 29,38	
3,6 32	26,32 27	10,16 31,28		34,34 28,32	2,6 32	5,11 1,23			28,24 22,26	3,33 39,10	6,35 25,18	1,13 17,34	1,32 13,11	13,35 2	27,35 10,34	26,24 32,28	28,2 10,34	10,34 28,32	
32,2	13,32 2	35,31 10,24		32,26 28,18	32,30	11,32 1			26,28 10,36	4,17 34,26		1,32 35,23	25,10		26,2 18		26,28 18,23	10,18 32,39	
19,22 31,2	21,22 35,2	33,22 19,40	22,10 2	35,18 34	35,33 29,31	27,24 2,40	28,33 23,26	26,28 10,18				24,35 2	2,25 28,39	35,10 2	35,11 22,31	22,19 29,40	22,19 29,40	33,3 34	22,35 13,24
2,35 18	21,35 2,22	10,1 34	10,21 29	10,21 1,22	3,24 39,1	24,2 40,39	3,33 26	4,17 34,26							19,1 31	2,21 27,1	2	22,35 18,39	
27,1 12,24	15,34 19,35	32,24 33	35,28 18,16	35,23 34,4	1,35 1,24		1,35 12,18		24,2			2,5 13,16	35,1 11,9	2,13 15	27,26 1	6,28 11,1	8,28 1	35,1 10,28	
35,34 2,10	2,19 13	28,32 2,24	4,10 27,22	4,28 10,34	12,35 10,34	17,27 8,40	25,13 2,34	1,32 35,23	2,25 28,39		2,5 12		12,26 1,32	15,34 1,16	32,26 12,17		1,34 12,3	15,1 28	
15,10 32,2	15,1 32,19	2,35 34,27		32,1 10,25	2,28 10,25	11,10 1,16	10,2 13	25,10	35,10 2,16	1,35 11,10	1,12 26,15			7,1,4 16	35,1 13,11		34,35 7,13	1,32 10	
19,1 29	18,15 1	15,10 2,13		35,28	3,35 15	35,13 8,24	35,5 1,10		35,11 32,31	1,13 22,19	15,34 1,16	1,16 7,4			15,29 37,28	1	27,34 35	35,28 6,37	
20,19 30,34	10,35 13,2	35,10 28,29		6,29	13,3 27,10	13,35 1	2,26 10,34	26,24 32	22,19 29,40	27,26 19,1	27,9 1,13			29,15 28,37		15,10 37,28	15,1 24	12,17 28	
19,1 16,10	35,3 15,19	1,18 10,24	35,33 27,22	18,28 32,9	3,27 29,18	27,40 28,8	26,24 32,28		22,19 29,28	2,21	5,28 11,29	2,5	12,26	1,15	15,10 37,28		34,21	35,18	
28,2 27	23,28	35,10 18,5	35,33	24,28 35,30	35,13	11,27 32	28,26 10,34	28,26 18,23	2,33	2	1,26 13	1,12 34,3	1,35 13	27,4 1,35	15,24 10	34,27 25		5,12 35,26	
35,20 10	28,10 29,35	28,10 35,23	13,15 23		35,38	1,35 10,38	1,10 34,28	18,10 32,1	22,35 13,24	35,22 18,39	35,28 2,24	1,28 7,19	1,32 10,25	1,35 28,37	12,17 28,24	35,18 27,2	5,12 35,26		

Annexe 5 : Principes d'Innovation

1) La segmentation

- a. Diviser une entité en parties indépendantes.
- b. Réaliser une entité démontable.
- c. Réaliser une entité modulaire.
- d. Réaliser une entité fragmentable (fragmentation au cours du cycle de vie).

2) L'extraction

- a. Supprimer, séparer ou rendre inactive la partie inutilisée (dans une situation de vie), la propriété nuisible ou néfaste de l'entité.
- b. Isoler (ou rendre indépendante) de l'entité la partie utile ou nécessaire.

3) La qualité locale

- a. Aller de la structure homogène d'une entité (ou de l'environnement ou d'un champ) vers une structure hétérogène.
- b. Adapter chaque partie de l'entité afin qu'elle possède ou réalise des fonctions différentes.
- c. Découper une entité en éléments ou blocs fonctionnels (modularité), chacun possédant une fonction indépendante.
- d. Placer chaque partie de l'entité sous les conditions les plus favorables et optimales pour l'adapter à sa fonction.

4) L'asymétrie

- a. Remplacer une forme symétrique par une forme asymétrique.
- b. Si l'entité est déjà asymétrique, accroître son asymétrie.

5) La combinaison

- a. Associer dans l'espace des entités homogènes ou à fonctionnalité connexe, réduire l'encombrement.
- b. Associer dans le temps des procédés homogènes ou à fonctionnalité connexe, réduire les temps de fonctionnement.
- c. Intégrer différentes fonctionnalités dans la même entité.

6) L'universalité

- a. Privilégier la polyvalence d'une entité de manière à réduire le nombre d'entités nécessaires.

7) Les poupées gigognes

- a. Placer les entités les unes dans les autres.
- b. Faire passer une entité au travers d'une autre par ses cavités ou porosités.

8) Le contrepoids

- a. Compenser le poids d'une entité par interaction avec une autre entité.
- b. Compenser le poids d'une entité par interaction avec un environnement (forces aérodynamiques, hydrodynamiques ou statiques type Archimède).

9) L'action contraire préalable

- a. Rajouter des actions contraires préalables afin d'éliminer ou compenser les effets nuisibles.
- b. Intégrer à l'entité une entité qui réalise une ou des actions contraires préalables (type précontrainte) afin de s'opposer aux effets nuisibles en fonctionnement.

10) L'anticipation

- a. Accomplir l'action requise à l'avance (entièrement ou au moins partiellement).
- b. Positionner les entités à l'avance pour que l'action soit réalisée immédiatement, dans les conditions les plus favorables.

11) La prévention

- a. Améliorer la sûreté de fonctionnement de l'entité par des mesures préventives.

12) L'équipotentialité

- a. Changer les conditions de travail de manière à minimiser la consommation d'énergie.
- b. Limiter les déplacements verticaux.

13) L'alternative :

- a. Effectuer l'action alternative ou opposée à l'action requise.
- b. Inverser les parties mobiles et les parties fixes de l'entité.
- c. Changer l'orientation de l'entité, la retourner (utiliser la gravité).

14) La courbure

- a. Remplacer des lignes droites par des courbes, des surfaces planes par des surfaces courbes ou des formes parallélépipédiques par des volumes à section courbe.
- b. Utiliser des formes circulaires, spiralées, sphériques ou arborescentes.
- c. Remplacer un mouvement de translation par un mouvement de rotation, hélicoïdal ou curviligne. Utiliser les effets centrifuges.

15) L'adaptabilité

- a. Adapter les propriétés de l'entité (ou son environnement) à une performance optimale à chaque étape d'utilisation.
- b. Diviser l'entité en entités mobiles entre elles.
- c. Si une entité est statique, la rendre dynamique ou adaptable.
- d. Diviser l'entité en entités mobiles entre elles.

16) L'action réduite ou excessive

- a. Utiliser la réduction ou l'augmentation de l'effet requis.

17) Le changement de dimension

- a. Passer d'un déplacement rectiligne (1D) à un mouvement plan (2D) ou dans l'espace (3D).
- b. Décomposer l'entité en différentes entités à différents niveaux (monocouche vers multicouche).
- c. Changer l'orientation de l'entité (horizontale, verticale, inclinée, mise sur le côté), utiliser la face opposée.
- d. Utiliser des flux (optiques ou autres) dirigés sur une surface voisine ou sur la face opposée de la surface donnée.

18) La vibration mécanique

- a. Faire vibrer ou utiliser la vibration d'une entité.
- b. Accroître la fréquence de vibration jusqu'aux fréquences ultrasonores.
- c. Utiliser la fréquence de résonance.
- d. Utiliser les vibrations piézo-électriques.
- e. Associer les ultrasons et les champs électromagnétiques.

19) L'action périodique

- a. Transformer une action continue par une action périodique (impulsions), agir avec une énergie périodique ou pulsée.
- b. Pour une action ou une énergie périodique, modifier sa fréquence ou son amplitude.
- c. Utiliser des pauses lors des actions périodiques pour effectuer des actions supplémentaires.

20) La continuité d'une action utile

- a. Utiliser une action continue pour que l'entité agisse en permanence. Toute partie de l'entité doit travailler à sa capacité maximale en permanence.
- b. Eliminer les mouvements à vide et les mouvements intermédiaires.
- c. Remplacer le mouvement de va et vient par une rotation.

21) L'action rapide pour la sécurité

- a. Changer les conditions pour que les fonctions dangereuses ou nuisibles agissent pendant des durées réduites.

22) La transformation d'un effet nuisible en effet utile

- a. Utiliser les effets nuisibles, notamment environnementaux pour obtenir un effet utile.
- b. Eliminer un effet nuisible en l'associant à d'autres effets nuisibles.
- c. Intensifier un effet nuisible jusqu'à ce qu'il cesse d'être nuisible.

23) L'asservissement

- a. Introduire un asservissement.
- b. Si l'asservissement existe, accroître son efficacité.

24) L'intermédiaire

- a. Utiliser une entité ou un champ intermédiaire pour réaliser une action.
- b. Joindre temporairement à l'entité une autre entité ou un champ facile à éliminer.

25) Le self service

- a. Utiliser les ressources d'une entité pour assurer son autonomie en créant des fonctions auxiliaires.
- b. Durant le cycle de vie de l'entité, donner à l'entité des fonctionnalités correctrices ou préventives.

26) La copie

- a. Remplacer une entité fragile ou délicate par des copies simplifiées et moins chère.
- b. Remplacer l'entité par une entité virtuelle. Changer d'échelle.
- c. Passer d'une copie visible à une copie infrarouge, ultraviolets ou autres.
- d. Remplacer la copie par une entité manipulable par un ou plusieurs des cinq sens.

27) L'éphémère bon marché

- a. Remplacer une entité chère par une ou plusieurs entités peu coûteuses
- b. Accepter de modifier l'entité au dépend de certaines propriétés ou de la durée de vie.

28) L'évolution du système mécanique

- a. Remplacer un champ mécanique par un champ optique, acoustique, thermique, chimique (MATHem).
- b. Utiliser un champ magnétique, électrique ou électromagnétique pour agir sur l'entité (mathEM).
- c. Faire évoluer les champs :
 - (1) de stationnaire à dynamique
 - (2) de constant à variable
 - (3) d'aléatoire à structuré
- d. Utiliser des champs en association avec des particules activées par ces champs.

29) Les fluides

- a. Remplacer les parties solides d'une entité par un fluide (poudres, gel, pâte, liquide, gaz). Utiliser des entités gonflables hydrostatiques, hydrodynamiques ou à coussin d'air.
- b. Utiliser la force d'Archimède.
- c. Utiliser la pression atmosphérique ou mettre en dépression.
- d. Utiliser une mousse en combinaison avec un liquide ou un gaz.

30) Le déformable

- a. Changer une entité rigide par une entité déformable.
- b. Remplacer une structure par une enveloppe déformable.
- c. Isoler une entité de son environnement par une enveloppe déformable.

31) Le matériau poreux

- a. Réaliser une entité poreuse ou lui adjoindre des éléments poreux (inserts, revêtements,...).
- b. Utiliser les pores d'une entité poreuse pour introduire une substance ou une fonctionnalité.

32) Le changement de couleur

- a. Modifier la couleur d'une entité ou de son environnement.
- b. Modifier le degré de transparence d'une entité ou de son environnement.
- c. Utiliser des colorants (additifs) pour observer des entités (ou procédés) difficilement perceptibles.
- d. Si de tels additifs sont déjà employés, utiliser des atomes repérables (luminescence, radioactivité,...).

33) L'homogénéité

- a. Réaliser l'entité principale et les entités associées à partir du même matériau ou des matériaux aux propriétés similaires.
- b. Rendre les entités cohérentes entre elles.

34) Le rejet et la régénération

- a. Éliminer ou modifier la partie de l'entité qui a rempli sa fonction ou est devenue inutile (dissoute, évaporée,...)
- b. Régénérer les parties consommées de l'entité durant la réalisation de la fonction.

35) Le changement de propriétés

- a. Modifier l'état de phase d'une entité.
- b. Modifier sa concentration ou sa consistance.
- c. Modifier le degré de flexibilité.
- d. Modifier sa température.
- e. Modifier toute caractéristique pertinente.

36) La transition de phases

- a. Utiliser des phénomènes connexes aux transitions de phase (expansion ou rétraction de volume, variation de pression, endothermie, exothermie,...).

37) L'expansion thermique

- a. Utiliser la dilatation thermique (ou la contraction) de matériaux. Utiliser des matériaux avec des coefficients de dilatation thermique différents.
- b. Utiliser le changement de phase.
- c. Utiliser les matériaux à mémoire de forme.

38) L'oxydation

- a. Remplacer de l'air normal par de l'air enrichi en oxygène.
- b. Remplacer de l'air enrichi par de l'oxygène.
- c. Agir sur l'air, sur l'oxygène ou sur l'environnement par des radiations ionisantes.
- d. Remplacer l'oxygène par de l'ozone.

39) L'environnement inerte

- a. Remplacer l'environnement par de l'environnement inerte.
- b. Introduire des substances neutres dans une entité.
- c. Utiliser le vide.

40) Les matériaux composites

- a. Remplacer des matériaux homogènes par des matériaux composites.

Annexe 6 : Ressources TRIZ et adaptées par MAL'IN

Les ressources sont à lister dans chaque situation de vie. Elles constituent un gisement à la disposition du concepteur. Leur utilisation peut être instantanée ou décalée (notion de stockage ou d'accumulation).

1) Substances

Tous les éléments et matières composant le système et son environnement.

Les milieux extérieurs sont donc des ressources

2) Energie

Tous champs ou flux d'énergie qui existent ou qui sont produits par le système et son environnement.

Externe à chaque substance

Contact (musculaire, mécanique, thermique,...)

A distance (gravité, inertie, attractions, sons, induction, rayonnement, magnétisme,...)

Interne à chaque substance

Possibilités d'accumulation (MATHEM)

3) Informations

Toutes les informations existant ou pouvant être produites dans le système et son environnement.

4) Espace

Tous les espaces utilisables appartenant au système et à son environnement.

5) Temps

Tous les intervalles de temps partiellement ou entièrement inutilisés avant, après ou pendant les situations de vie ou durant les opérations lors du fonctionnement

6) Ressources fonctionnelles

Toutes les fonctions supplémentaires à celles employées jusque là offertes par le système et son environnement.

7) Self-service

Toutes les propriétés ou caractéristiques non exploitées, en particulier les propriétés physiques, chimiques et géométriques.

8) Ressources systèmes

Toutes les nouvelles fonctions ou propriétés qui peuvent être obtenues par modification des liaisons entre les sous-systèmes ou par une nouvelle façon de lier les systèmes.

9) Ressources organisationnelles

Toutes les structures existantes mais pas totalement employées qui peuvent facilement être intégrées dans le système par une nouvelle combinaison des éléments, par un nouvel agencement des blocs fonctionnels (nouvelle gestion des systèmes ou des opérations).

10) Ressources différentielles

Tous les gradients utilisables pour créer un flux ou générer de nouvelles fonctions pouvant exister entre certains paramètres.

- a) En substances
 - Anisotropie
 - Variations de propriété au sein d'un matériau
- b) En champs
 - Gradient de variables d'état ou de variables pertinentes
 - Champ non-homogène dans l'espace

11) Ressources antérieures

Toutes les nouvelles propriétés ou caractéristiques du système dues à des évolutions antérieures et restées inexploitées.

12) Rejets

Tous les rejets du système et de son environnement qui peuvent être employés.

Qualification des ressources

- **Estimation quantitative**

Insuffisante
Suffisante
Illimitée

- **Estimation qualitative**

Utile
Neutre
Nuisible

- **Coût**

Chère
Bon marché
Gratuite

- **Degré de disponibilité selon les situations de vie**

Disponible

Toute ressource exploitable directement sans modifications

Adaptée

Toute ressource exploitable après transformation ou association avec d'autres ressources

Toute ressource exploitable après transformation dans une autre situation de vie

- **Possibilité d'utilisation**

Dans une zone de fonctionnement
Dans une période de fonctionnement
Dans le système
Dans les sous-systèmes
Dans le super système

Annexe 7 : Ressources TRIZ adaptées par MAL'IN avec une vision développement durable

Les ressources sont à lister dans chaque situation de vie. Elles constituent un gisement à la disposition du concepteur. Leur utilisation peut être instantanée ou décalée (notion de stockage ou d'accumulation).

1) Substances

Tous les éléments composant le système (produit et produits accessoires) et son environnement : composants, composants d'interaction, milieux extérieurs. Les milieux extérieurs sont donc des ressources

Vision développement durable

Nombre de composants,

Composants non perdables, fonctionnels, non redondants, non jetables, non toxiques, fragmentables, réutilisables.

Milieux extérieurs (consommables)

2) Energie

Tous champs ou flux d'énergie qui existent ou qui sont produits par le système (produit et produits accessoires) et son environnement.

Externe à chaque substance

Contact (musculaire, mécanique, thermique,...)

A distance (gravité, inertie, attractions, sons, induction, rayonnement, lumière, magnétisme,...)

Interne à chaque substance

Possibilités d'accumulation selon tous les types d'énergie (MATHEM)

Vision développement durable

Circuit ouvert

Circuit fermé : accumulation

Energies renouvelables et propres

Energies non toxiques

3) Informations

Toutes les informations existant ou pouvant être produites dans le système (produit et produits accessoires) et son environnement.

Toute caractéristique ou changement de caractéristique permettant d'identifier l'évolution d'un phénomène physique pertinent du fonctionnement.

Vision développement durable

Marquage, aspect, couleur des matériaux

Matériau pérenne, biodégradable, renouvelable, recyclable, valorisable, résilient, non énergivore, non corrosif, non toxique

Types de fabrication, brut

Vieillessement, pérennité de composants

Rejets : Odeur, ouïe, vue, couleur, agression, chaleur,...

4) Espace

Tous les espaces utilisables appartenant au système (produit et produits accessoires) et à son environnement.

- Espace interne aux composants (vide, matière non utilisée)
- Espace inter-composants
- Espace inter produit et produits accessoires
- Environnement proche

Vision développement durable

Utilisation de l'espace pour augmenter les capacités du système ou pour régénérer des matériaux ou des énergies.

5) Temps

Tous les intervalles de temps partiellement ou entièrement inutilisés avant, après ou pendant les situations de vie, durant les transferts entre les moments significatifs lors du fonctionnement ou lors de fonctionnement intermittents.

Vision développement durable

Utilisation du temps pour augmenter les capacités du système ou pour régénérer des matériaux ou des énergies.

6) Ressources fonctionnelles

Toutes les fonctions existant dans le système (produit et produits accessoires) ou son environnement et non utilisées dans la situation de vie considérée.

Vision développement durable

Analyse de ces fonctions dans la vision développement durable.

7) Self-service

Toutes les propriétés ou caractéristiques non exploitées :

- Propriétés physiques des matériaux et de leurs interactions
- Propriétés chimiques des matériaux et de leurs interactions
- Propriétés géométriques des composants et de leurs interactions.

Vision développement durable

- Formation de rejets ou pertes d'énergie,
- Flottabilité (matériau et forme) pour le recyclage,
- Densité de fluides pour le recyclage,
- Thermoplasticité pour le recyclage,
- Rétention de fluides (porosité, perméabilité, granulométrie),
- Mélanges miscibles, non miscibles.
- Opacité et transparence (confinement de composants)
- Possibilité de réutilisation.

8) Ressources interactions

Toutes les nouvelles fonctions ou propriétés qui peuvent être obtenues par modification des liaisons entre les composants ou, par modification des composants d'interaction.

Vision développement durable

- Standardisation des composants d'interaction,
- Composants poly-matériaux vers composants multi-matériaux puis composants dissociables, composant dissociables,
- De statique à dynamique pour un meilleur contrôle et un accroissement de l'efficacité,

Amélioration des pertes par la maîtrise des interactions,
Libre passage de l'énergie.

9) Ressources organisationnelles

Tous les nouveaux agencements des composants ou des blocs fonctionnels permettant de nouvelles fonctions, de nouveaux comportements ou l'utilisation des ressources du système (produit et produits accessoires) et de son environnement.

Vision développement durable

Optimisation des ressources, de la compacité,
Maîtrise et réduction des flux d'énergie, de matière et de signal
Confinement du système (sécurité, autarcie, innocuité)
Modularité du système pour le recyclage

10) Ressources différentielles

Tous les gradients utilisables pour créer un flux ou générer de nouvelles fonctions pouvant exister entre certains paramètres.

- a) En substances
 - Anisotropie
 - Variations de propriété au sein d'un matériau
- b) En champs
 - Gradient de variables d'état ou de variables pertinentes
 - Champ non-homogène dans l'espace

Vision développement durable

Maîtrise et réduction des flux d'énergie, de matière et de signal

11) Ressources antérieures

Toutes les nouvelles propriétés ou caractéristiques du système (produit et produits accessoires) dues à des évolutions antérieures et restées inexploitées.

Vision développement durable

Elimination des surplus de matière, de composants
Maîtrise et réduction des flux d'énergie, de matière et de signal

12) Rejets

Tous les rejets du système (produit et produits accessoires) et de son environnement qui peuvent être éliminés, réduites ou employés.

Vision développement durable

Récupération et élimination des rejets
Du circuit ouvert au circuit fermé

Annexe 8 : Exemples de fiches de connaissances

