

Lhossaine AMEKNASSI

**STRATÉGIE DE MISE EN ŒUVRE DE  
L'ÉCO CONCEPTION:  
ASPECTS TECHNIQUES &  
ORGANISATIONNELS**

Mémoire présenté  
à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de maîtrise en génie mécanique  
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
FACULTÉ DES SCIENCES ET GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2012

## Résumé

L'éco conception est une pratique par laquelle les considérations environnementales sont intégrées, dès la phase de conception des produits et services. Cette intégration qui repose sur une approche globale et multicritère de l'environnement est fondée sur la prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie d'un produit. Cependant, juste un nombre limité de firmes réussissent à mettre en œuvre l'éco conception de manière cohérente et efficace. D'un côté, les méthodes et les outils de l'éco conception manquent de coordination avec les activités de conception, d'un autre, les activités de l'éco conception sont souvent caractérisées par une déconnexion entre le niveau managérial et celui du développement de produit. La présente recherche propose des adaptations à quelques approches techniques et organisationnelles relativement récentes, pour finalement livrer une stratégie combinée de mise en œuvre de l'éco conception qui tient compte à la fois des aspects techniques et organisationnels. Les aspects techniques de la stratégie décrivent une méthodologie intégrée au processus de développement de produits, capable d'identifier les points critiques du produit relatifs aux attentes du marché et à l'environnement, d'analyser et modéliser les problèmes de conception, de générer des solutions vertes et innovantes et d'aider à la sélection du meilleur éco concept. Ses aspects organisationnels décrivent une façon de mener un diagnostic du processus de développement des produits qui permet de déceler les facteurs de succès et les obstacles; identifiés préalablement par la littérature qui respectivement favorisent ou empêchent de l'opérationnalisation de l'éco conception, ainsi que déterminer leurs ordres d'importance, afin d'établir un plan d'action supportant l'application efficace de la méthodologie proposée. Un exemple illustratif, issu de l'industrie électronique a été traité pour aider à mieux comprendre la stratégie proposée dans ses deux aspects.

**Mots clés :** Processus de Développement de produit, Diagnostic, méthodologie de conception, Éco conception, Évaluation du cycle de vie simplifiée, Benchmarking environnemental, Liste de contrôle, Stratégies d'éco conception, *QFDE*, *TRIZ-Su-Fields* et *AHP/ANP*.

## Abstract

Eco-design is a practice by which environmental considerations are integrated at the design phase of products and services. This integration which is based on a comprehensive and multi-criteria environmental takes into account all stages of the life cycle of a product. However, only a limited number of companies are able to implement eco-design consistently and effectively. On the one hand, methods and tools for eco-design lack coordination with the design activities. On the other hand, the activities of eco-design are often characterized by a disconnection between the management level and that of product development. The present research proposes adaptations to some technical and organizational approaches relatively recent, to finally deliver a combined strategy to implement eco-design that takes into account both technical and organizational aspects. The technical aspects of the strategy describe an integrated methodology to the development process of products able to, identify the critical points of the product relative to market expectations and environment, analyze and model design issues, generate innovative and green solutions and help select the best eco concept. Its organizational aspects describe how to conduct a diagnosis of the development process of products that can identify the success factors and obstacles; identified in advance by the literature, which respectively promote or inhibit the operationalization of the eco-design and determine their relative importance's, to establish a plan of action supporting the effective implementation of the proposed methodology. An illustrative example, derived from electronics industry has been treated to better understand the proposed strategy in its two aspects.

**Keywords:** Product Development Process, Diagnosis, design methodology, eco design, Simplified life cycle assessment, Environmental Benchmarking, Checklist, Eco-design strategies, *QFDE*, *TRIZ-Su-Fields* and *AHP / ANP*.

## Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Daoud Ait Kadi, Ph.D., M.Sc., Ing. , qui, en tant que Directeur de Recherche, s'est toujours montré à l'écoute et disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, les réunions de son groupe de Recherche, la qualité de l'enseignement, le partage de son savoir- faire et savoir être, l'encouragement et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Mes remerciements s'adressent également aux membres de Jury: Monsieur Luis Antonio De Santa Eulalia, Ph.D., professeur à UQÀM et Madame Nadia Lehoux, Ph.D., professeure au département de génie mécanique à l'Université Laval, qui ont bien voulu examiner et évaluer ce travail.

J'exprime ma gratitude à : Madame Sophie D'Amours, Ing., MBA, Ph.D. et Madame Claire Deschênes, Ing., Ph.D.; du département de Génie Mécanique, Madame Irène Abi -Zeid, M.Sc., Ph.D., et Monsieur Benoit Montreuil, Ing., M.Sc., Ph.D., du département d'opérations et systèmes de décisions, Monsieur René Del Villar, Ing., Ph.D. et Monsieur Dominique Dubé, Ing., Ph.D.; du département de génie des mines et métallurgie, Pour la valeur ajoutée scientifique, la générosité et la qualité d'enseignement dont ils ont su faire preuve.

Je remercie la bibliothèque Scientifique Vachon de l'université Laval de la qualité et le niveau de service lesquels ont sûrement contribués à l'enrichissement de ce travail.

Je n'oublie pas mes parents, mes frères, mes sœurs, mon épouse Atika et mes enfants ; Oussama, Wissal et Soukaina de leur soutien et leur patience incontestables.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à tous mes proches et amis notamment Abdelhamid Khoali, W. Ouakki et M-N. Darghouth et B. Naji étudiants en Génie Mécanique que j'ai côtoyés durant le programme de maîtrise.

Merci à tous et à toutes.



*Enthusiasm is one of the most powerful  
Engines to success. When you do something, do  
It with all you might. Put your whole soul  
Into it. Stamp it with your own personality.  
Be active, be energetic, be enthusiastic and  
Faithful and you will accomplish your object.  
Nothing great was ever achieved without  
Enthusiasm.*

Ralph Wald Emerson (1803, 1882)

# Table des matières

Résumé .....	i
Abstract .....	ii
Remerciements .....	iii
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	viii
Liste des acronymes .....	xi
Introduction.....	1
<b>1. Contexte : Environnement d'affaires et approches environnementales dans l'industrie .....</b>	<b>5</b>
1.1 Concept du modèle d'affaires .....	5
1.2 Planification pour la durabilité .....	7
1.3 Approches environnementales dans l'industrie .....	10
1.3.1 Prévention de la Pollution (P2) ou Production Plus Propre .....	10
1.3.2 Écologie industrielle .....	12
1.3.3 Éco conception .....	15
<b>2. Méthodologie de Conception des produits .....</b>	<b>19</b>
2.1 La Conception en tant que Processus continue et itératif .....	20
2.1.1 Identification du problème: .....	20
2.1.2 Définition du problème: .....	21
2.1.3 Génération des idées: .....	21
2.1.4 Sélection de la solution: .....	22
2.1.5 Analyse et optimisation de la solution: .....	22
2.1.6 Mise en œuvre: .....	22
2.1.7 Évaluation: .....	22
2.2 Les Cadres méthodologiques de la conception.....	23
<b>3. Problématique &amp; développement méthodologique .....</b>	<b>26</b>
3.1 Problématique .....	27
3.1.1 Situation problématique 1 .....	27
3.1.2 Situation problématique 2 .....	27
3.1.3 Situation problématique 3 .....	28
3.2 Développement méthodologique du travail de recherche.....	29
3.2.1 Aspects techniques « <i>Hard Eco design</i> » de l'éco conception.....	30
3.2.2 Aspects Organisationnels « <i>Soft Eco design</i> » de l'éco conception .....	34
<b>4. Approches &amp; principaux Outils de l'éco conception: Revue de littérature ..</b>	<b>35</b>
4.1 Portée & limites des normes environnementales .....	35
4.1.1 Le système de management environnemental (SME).....	35
4.1.2 ISO/TR 14062: 2002 .....	37
4.2 Principaux outils de l'éco conception .....	38

4.2.1	Analyse du cycle de vie :.....	38
4.2.3	Le Benchmarking Environnemental ( <i>BE</i> ).....	40
4.2.4	Méthode d'évaluation dite Liste de contrôle ( <i>Check-list</i> ).....	43
4.2.5	Sélection des stratégies d'éco conception .....	43
4.2.6	Déploiement de la fonction qualité pour l'environnement.....	45
4.2.7	Méthodologie de résolution des problèmes inventifs TRIZ.....	48
4.3	Organisation du processus de l'éco conception.....	51
<b>5.</b>	<b>Stratégie de mise en œuvre de l'éco conception : Aspects techniques.....</b>	<b>53</b>
5.1	Planification du produit, .....	54
5.2	Évaluation environnementale .....	54
5.2.1	Perspective du cycle de vie du produit.....	54
5.2.2	Perspective des parties prenantes .....	56
5.3	Choix de stratégies d'éco conception .....	60
5.4	Déploiement de la fonction qualité.....	61
5.5	Analyse et modélisation des problèmes de conception .....	61
5.6	Évaluation des éco concepts et application.....	65
<b>6.</b>	<b>Stratégie de mise en œuvre de l'éco conception : Aspects organisationnels .</b>	<b>67</b>
6.1	Structure et caractéristiques organisationnelles des entreprises pionnières en Éco conception .....	67
6.2	Diagnostic du processus de développement produits axé sur l'éco conception ...	69
6.1.1	Analyse quantitative : .....	69
6.1.2	Analyse qualitative .....	70
<b>7.</b>	<b>Exemple illustratif : Cas de l'industrie électronique .....</b>	<b>72</b>
7.1	Application du diagnostic sur les processus de développement de produits électroniques.....	72
7.1.1	Analyse des facteurs favorables à l'opérationnalisation de l'éco conception .....	73
7.1.2	Analyse des obstacles de l'opérationnalisation de l'éco conception.....	74
7.2	Application de la méthodologie intégrée à l'éco conception .....	75
7.2.1	Planification de produit .....	77
7.2.2	Évaluation environnementale de l'adaptateur .....	79
7.2.3	Choix de stratégies d'éco conception pour l'adaptateur AC.....	81
7.2.4	Déploiement de la Fonction Qualité pour l'Environnement .....	81
7.2.5	Développement de nouveaux éco concepts (Méthodologie TRIZ).....	85
	<b>Conclusion .....</b>	<b>87</b>
	<b>Annexes .....</b>	<b>90</b>
	Annexe 1 .....	90
	Annexe 2 .....	95
	Annexe 3 .....	96
	Annexe 4 .....	97
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>98</b>



## Liste des tableaux

- **Tab. 1** : Type d'informations utiles à la conception d'un produit  
Source : Dieter & Schmidt (2009)
- **Tab.2** : Priorités environnementales perçues par les différentes parties prenantes ; Exemple des Produits audio, D'après Stevels (2001). Source : Boks & Stevels (2003)
- **Tab.3** : Approches du Benchmarking Environnemental dans l'industrie automobile : Avantages et inconvénients. D'après Rothenberg et Maxwell (2005)
- **Tab.4** : Les 31 paramètres de Benchmarking Environnemental, proposés pour l'industrie électronique par Park et al. (2005)
- **Tab.5** : Les paramètres du Benchmarking environnemental pour le réservoir de carburant, D'après Wimmer et al. (2005),
- **Tab.6**: Relation entre les paramètres environnementaux spécifiques issus d'une liste de contrôle et les stratégies d'éco-conception. Source : Park et al. (2005)
- **Tab.7** : 25 Stratégies d'éco-conception proposées pour l'industrie électronique grand public, d'après Park et al. (2005)
- **Tab.8** : Matrice *LCA*-simplifiée (*Environmentally Responsible Product Assessment Matrix*) *ERPA* .Inspirée de Telenko et al. (2008)
- **Tab.9** : Influence de la réglementation environnementale récente sur le cycle de vie d'un produit. D'après Fargnoli et Kimura(2007)
- **Tab.10**: Paramètres Environnementaux pour Évaluer les aspects environnementaux utilisés par les grandes entreprises, Source : Kun-Mo et Park (2005)
- **Tab.11** : Synthèse de l'Évaluation environnementale sous la perspective des parties prenantes : Méthodes, étapes et critères.
- **Tab. 12** : Éléments d'entrée et de sortie de la méthodologie *QFDE Ia, Ib/II*
- **Tab.13** : Résultats empiriques des facteurs favorables à l'adoption des bonnes pratiques de l'éco conception (Industrie électronique Japonaise et Coréenne ,2003) Source :(Boks, 2005)
- **Tab.14** : Résultats empiriques des obstacles à l'adoption des bonnes pratiques de l'éco conception (Industrie électronique Japonaise et Coréenne ,2003) Source :(Boks, 2005)
- **Tab.15** : Identification des points faibles environnementaux de l'adaptateur actuel
- **Tab. 16** : *QFDE Ia*; Identification de la voix de l'environnement (*VOE*)
- **Tab. 17** : Identification de la voix du Client (*VOC*)
- **Tab. 18** : *QFDE I b*; Identification des paramètres techniques de conception biaisés par la stratégie globale de conception (facteur de sensibilité)
- **Tab. 19** : *QFDE II*; identification des composants spécifiques en tenant compte du facteur de sensibilité.



## Liste des figures

- **Fig.1** : Feuille de route du présent travail de recherche
- **Fig.2** : Triangle d'affaires, Source : Osterwalder et al. (2005)
- **Fig.3** : Relations entre modèle d'affaires, processus et stratégies d'affaires, Source : inspirée de Osterwalder, (2004)
- **Fig.4** : Les cinq stratégies d'affaires, Source : Cours Gin 7012, Ingénierie d'Entreprise, S. D'Amours, université Laval, Québec. D'après Osterwalder, (2004)
- **Fig.5** : Méthodologie pour comparer qualitativement les alternatives d'un modèle d'affaires, Source : inspirée de Olofsson ; Fazz, (2006)
- **Fig.6** : Vue simplifiée des interactions entre les systèmes Social, Environnemental et Économique, Source: *Environmentally Conscious; Material and Chemicals Processing*, (2007)
- **Fig.7**: Les cinq niveaux de planification pour la durabilité d'un système, Source : Inspirée de Karl-Henrik Robert, (2000)
- **Fig.8** : Une idée force de l'écologie industrielle ; Réorganiser le système industriel notamment par le bouclage des flux de matière et d'énergie. Source : Inspirée d'Allenby, (1992)
- **Fig.9** : La symbiose industrielle de Kalundborg (Danemark), exemple pionnier de l'écologie industrielle. Source : Erkman, (2010). Zonings durables et écologie industrielle. Pour une économie Wallonne ambitieuse et respectueuse de l'environnement, Val Saint Lambert, Liège.
- **Fig.10** : Échelle d'intervention des approches environnementales industrielles. Source : Erkman, (2010). Zonings durables et écologie industrielle. Pour une économie Wallonne ambitieuse et respectueuse de l'environnement, Val Saint Lambert, Liège.
- **Fig.11** : Cycle de vie total d'un produit : Toute activité anthropique est génératrice d'émissions. Source: Inspirée de Engineering Design. Dieter et Schmidt, (2009)
- **Fig.12** : Processus de développement de produit : modèle séquentiel. Source: Giudice et al. (2006) *Product Design for Environment: A life cycle Approach*.
- **Fig.13** : Conception vue entant que : a) Processus itératif, b) Cartographie fonctionnelle, Source: Thompson, (1999), *Design Analysis: Mathematical Modeling of Non-linear Systems*.
- **Fig.14** : Classification des cadres méthodologiques de la conception. Source : Inspirée de Giudice et al. (2006) *Product Design for Environment: A life cycle Approach*.

- **Fig.15** : Modèle de la Conception simultanée intégrée (*Concurrent Engineering, Design for X And Design for X*). Source : Inspirée de Giudice et al. (2006). *Product Design for Environment: A life cycle Approach*,
- **Fig.16** : Carte des outils d'éco conception actuels. Source : Ramani et al. (2010)
- **Fig. 17** : Approches ascendante et descendante de l'éco conception Source : Park et al. (2005)
- **Fig. 18**: Approche combinée d'éco conception Top down/Bottom up Proposée par Park et al. (2005)
- **Fig.19** : La norme ISO 14001 : 2004, la logique PDCA. Source : inspirée de Vaute, (2007).
- **Fig. 20** : ISO/TR 14062 version 2002 : Approche holistique de l'intégration des aspects environnementaux dans les processus de conception et développement existants. Source: inspirée de Kun-Mo et Park, (2005).
- **Fig.21** Étapes à suivre pour identifier les impacts environnementaux d'un produit, On distingue deux phases : La modélisation du produit et l'évaluation du cycle de vie proprement dite. Source: Ramani et al. (2010).
- **Fig.22** : Procédure de Benchmarking Environnemental mise en œuvre à Philips. Source: Inspirée de Boks et Stevel (2003). D'après Ram et Salemink (1998)
- **Fig.23** : Composants d'un téléphone portable.  
Sources : <http://sciences.comonthey.ch/?m=201011> et [http://www.treehugger.com/files/2007/01/the\\_littlest\\_pa.php](http://www.treehugger.com/files/2007/01/the_littlest_pa.php)
- **Fig. 24** : Réservoir de carburant d'une voiture Coréenne. Source: Wimmer et al. (2005)
- **Fig. 25** : Les 3 catégories de stratégie d'éco conception d'un produit. Source: Giudice et al. (2006), *Product Design for Environment: A life cycle Approach*, Edition Taylor & Francis Group, LLC
- **Fig. 26** : Les 8 éléments de « la maison Qualité » HOQ. Source: Engineering Design. Dieter & Schmidt, (2009)
- **Fig.27** : Diagramme montrant les 4 HOQ du processus complet QFD. Source: Engineering Design. Dieter & Schmidt, (2009)
- **Fig.28** : Processus de base de résolution des Problèmes par TRIZ. Source : Inspirée de (Pierre-marie Boitel, [http://www.g-scop.inpg.fr/~boitelp/triz/outils\\_triz.pdf](http://www.g-scop.inpg.fr/~boitelp/triz/outils_triz.pdf) )
- **Fig.29** : Contexte du processus de développement Produit. Source : Baumann et al. (2002)
- **Fig.30** : Les six étapes de la méthodologie intégrée de l'éco conception
- **Fig. 31** : Portefeuille sur l'évaluation des mesures de mise en œuvre. D'après Wimmer et al. (2001). Source : Kun-Mo et Park (2005)
- **Fig.32** : *Su-Fields* : Outil d'analyse utilisant des icônes et symboles pour modéliser les problèmes de conception. Source : Inspirée de Hsiang-Tang, (2004)

- **Fig.33:** Procédure de résolution de problème de conception basé sur l'analyse *Su-Fields* et tenant compte de contraintes environnementales. D'après Hsiang-Tang, (2004)
- **Fig.34 :** Méthode multicritère de décision : Structure *de l'AHP (Analytic Net work Process)* à quatre niveaux (un Objectif, deux Critères, six Sous-critères et k Alternatives) pour évaluer les éco concepts élaborés .Source : Inspirée de Dieter et Schmidt, (2009).Engineering Design,
- **Fig.35 :** Organisation les activités liées au DfE en Structure en « horloge de Sable » Inspirée d'Ehrenfeld et Lenox, (1997), M.I.T, Journal of Sustainable Product
- **Fig.36 :** Adaptateur secteur AC et une vue d'ensemble de ses composants électriques et électroniques. Sources :  
 Fig.a: <http://www.electroniccity.com/shopping/pricelist.asp?prid=332&brandinc=6> .  
 Visité le 1 juillet 2011.  
 Fig.b:<http://www.p-wholesale.com/cn-pro/5/123to2/acac-switching-adapter-95689.html>. Visité le 1 juillet 2011
- **Fig.37 :** Principe de fonctionnement d'un adaptateur secteur
- **Fig. 38 :** Résultats de l'analyse de cycle de vie (*LCA* Simplifiée) de l'adaptateur actuel. Source Trappey et *al.* (2009).
- **Fig.39 :** Voix de l'environnement *VOE* obtenue par *QFDE Ia*, exprimée essentiellement en quatre stratégies d'éco conception.
- **Fig.40:** Transformateur électrique.  
 Source : (<http://www.tutorvista.com/content/physics/physics-iv/alternating-currents/transformer-animation.php>) Dernière Visite le 11 juillet 2011
- **Fig.41 :** Modélisation et analyse du problème de conception
- **Fig. 42 :** Interfaces entre la conception et les différentes étapes du cycle de vie d'un produit. Source : inspirée de Ramani et *al.* (2010).



## Liste des acronymes

- **AC** (*Alternative Current*): Courant Alternatif
- **ASTM** (*American Society For Testing And Materials*)
- **CE** (*Concurrent Engineering*) : Ingénierie Concourante
- **DfE** (*Design for Environment*): Conception pour Environnement ou Eco conception
- **DfX** (*Design for X*): Conception pour X (X= manufacturabilité; fiabilité; maintenabilité; assemblage ; désassemblage; Robustesse; etc...)
- **EB** (*Environmental Benchmarking*) : Benchmarking Environnemental
- **ÉI** : Écologie Industrielle
- **ELV** (*End of Life Vehicles Directive*): La directive relative aux véhicules hors d'usage
- **EMAS** (*Eco Management and Audit Scheme*) : Système de Management Environnemental et d'Audit
- **ERPA** (*Environmentally Responsible Product Assessment*): Évaluation de la Responsabilité Environnementale d'un Produit « Approche matricielle ; Étapes de cycle de vie versus Préoccupations environnementales ».
- **EuP** (*Eco-design of Energy Using Products*): Directive EuP sur l'éco conception des produits consommateurs d'énergie
- **HOQ** (*House Of Quality*):Maison de la Qualité
- **ISO** (*International Standardisation Organisation*) : Organisation Internationale de normalisation
- **IPP** (*Integrated Product Policy*) directive: Prévention et réduction intégrées de la pollution IPP directive.
- **LCA** (*Life Cycle Assessment*): Évaluation du Cycle de Vie
- **LCCA** (*Life Cycle Cost Assessment*) : Évaluation du Coût de Cycle de Vie
- **LCD** (*Life Cycle Design*) : Conception du cycle de vie
- **LEED** (*Leadership in Energy and Environmental Design*): Leadership en conception énergétique et environnementale.
- **MP**: Matières Premières
- **N-RBV** (*Natural-Resource Based View*) ; Théorie des ressources naturelles de l'entreprise.



- **P2**: Prévention de la Pollution ou encore Production plus Propre,
- **QFD** (*Quality Function Deployment*): Déploiement de la Fonction Qualité
- **QFDE** (*Quality Function Deployment for Environment*): Déploiement de la Fonction Qualité pour l'Environnement
- **QSE** (*Quality, Security and Environment management system*) : Système de Management Qualité, Sécurité et Environnement
- **REACH** (*Registration, Evaluation and Authorization of CHemicals*): Le règlement sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques
- **RoHS** (*Restriction of the use of certain Hazardous Substances directive*): Directive sur la Restriction de l'utilisation de certaines substances dangereuses
- **Su-Fields Analysis** (*Substances-Fields Analysis*): Analyse Substances-Champs
- **SME** : Système de Management Environnemental
- **TIC** : Technologie de l'Information et de Communication
- **3BL** : Triple Bottom Line (Profit, Respect de l'environnement et Responsabilité sociale)
- **TRIZ** (*Teoriya Resheniya Izobreatelskikh Zadatch*) : Théorie de résolution des problèmes inventifs
- **UNEP** (*United Nation Environmental Programme*) : Programme des Nations Unies pour l'Environnement.
- **VOE** (*Voice Of Environment*): Voix de l'Environnement
- **VOC** (*Voice Of Customer*): Voix du Client
- **WEEE** (*Waste Electrical and Electronic Equipment directive*): Directive des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques.

## Introduction

Les entreprises publiques et privées sont aujourd'hui concernées par les évolutions réglementaires et normatives, les nouvelles démarches d'éco-socio efficacité (*factor X*, empreinte écologique, frontière efficace) et l'intégration volontaire des préoccupations sociales et environnementales dans leurs orientations stratégiques élargies. Les problèmes environnementaux tels que le changement climatique, la destruction de la couche d'ozone, l'épuisement des ressources, l'eutrophication, l'acidification, l'écotoxicité, la distribution des terres, etc. nécessitent un changement de techniques de production, une réduction de l'utilisation des matières et d'énergie et des modifications dans les produits finis.

Du point de vue des concepteurs, le développement des éco produits les oblige dès le début des activités de conception, à considérer les aspects environnementaux, en concurrence avec les aspects techniques et économiques traditionnels. D'où le besoin d'utiliser des méthodes et des outils spécifiques qui leurs permettent d'intégrer efficacement ces aspects dans les activités de conception (Fagnoli & Sakao) [22].

L'éco conception est une pratique par laquelle les considérations environnementales sont intégrées dès la phase de conception de produits ,procédés et services. Cette intégration qui repose sur une approche globale et multicritère de l'environnement est fondée sur la prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie d'un produit. Plusieurs méthodes et outils associés à l'éco conception sont aujourd'hui disponibles. Par exemple, l'ISO / TR 14062 liste environ 30 outils différents applicables à l'éco conception (Ramani et *al.*) [50].

Ces outils peuvent être généralement classés en trois catégories: les outils basés sur les lignes directrices et listes de contrôle (*Guidelines and Check-lists*), les outils basés sur l'évaluation du cycle de vie (Life Cycle Assessment), et ceux basés sur le déploiement de la fonction qualité (*Quality Function Deployment*). Cependant, il y'a peu de soutien disponible des concepteurs sur la façon de mettre en œuvre ces différents outils, pour vue d'une Éco conception efficace ; en termes de satisfaction des besoins et attentes des parties prenantes et d'une manière efficace ; en termes de durée de développement et optimalité des coûts.

Ainsi, même si plusieurs organisations désirent ardemment intégrer l'aspect environnemental dans la phase initiale de leur développement des produits, encore très peu savent comment y parvenir efficacement.

Sur le plan de recherche dans le domaine de l'éco conception, trois lacunes peuvent être observées :

- La complexité des approches existantes, faisant en sorte que notamment, les petites et moyennes entreprises ont de la difficulté à les intégrer dans leur processus de développement des produits (Kuhke et al.) [35],
- Le manque d'une approche systématique et intégrée dans les méthodes d'évaluation environnementales existantes ; lesquelles sont soit de type descendant (*Top-down*) comme ISO/TR 14062 : 2002 ou *United Nation of Environmental Program (UNEP)/Promising Approach* ; où les stratégies d'éco conception sont le point de départ pour générer les idées en matière d'éco conception , soit de type ascendant (*Bottom up*) ,où les points faibles du produit; spécifiques à l'environnement (composants, processus ou étapes du cycle de vie) sont utilisés pour générer les idées d'éco conception, ce qui limite la pertinence des solutions de conception dans le premier cas et la créativité des concepteurs dans le deuxième cas (Park et al.) [47] et,
- La non considération des aspects organisationnels dans les approches courantes (Ehrenfeld & Lenox) [19], de sorte que même avec la disponibilité des meilleurs outils et méthodes techniques, peu de grandes entreprises réussissent à adopter les bonnes pratiques de l'éco conception, ce qui diminue leur taux de succès (Boks) [9].

Afin de contribuer à combler ces lacunes, le présent travail consiste d'abord à mettre en évidence les trois lacunes citées, à partir de trois situations problématiques, ensuite précise la portée et les limites des normes environnementales courantes ; telles que la série ISO 14000, à intégrer les aspects environnementaux dans la conception des produits et propose des adaptations à quelques approches très récentes aussi bien techniques (Park et al.) [47], (Wimmer et al.) [66], (Wimmer & Züst) [67], (Kun-Mo & Park) [36] et (Trappey et al.) [61] qu'organisationnelles (Ehrenfeld & Lenox) [19], (Boks) [9] et (Baumann et al.) [7] pour finalement livrer une stratégie combinée de mise en œuvre efficace et consistante de l'éco conception qui tient compte à la fois des aspects techniques et organisationnels.

L'aspect technique « *Hard* » de cette stratégie est décrit une méthodologie intégrée de l'éco conception qui permet de définir, analyser et résoudre un problème d'éco conception en six étapes. L'aspect organisationnel « *Soft* » propose une procédure pour diagnostiquer le processus de développement des produits en vue de dresser un plan d'action spécifique de support à la mise en œuvre efficace de la méthodologie intégrée proposée.

La méthodologie intégrée de l'éco conception proposée suppose l'absence de conflits majeurs entre la réduction des impacts environnementaux et l'amélioration de la



fonctionnalité du produit ayant un rapport direct avec la rentabilité de l'entreprise. La résolution de tels conflits fait appel à d'autres outils méthodologiques actuellement en exploration et qui se basent sur la conception par analogie, la synergie et la génération de concepts biomimétiques (Fitzgerald et al.) [23].

Une autre supposition concerne l'aspect organisationnel de la stratégie ; c'est que dans un premier temps, le diagnostic à effectuer au niveau du processus de développement de produits d'une entreprise est supposé capable de conduire à une bonne compréhension des contraintes et incitations à la mise en œuvre efficace des méthodes et outils d'éco conception (Hein et Fan) [28]

L'approche proposée ; issue de nombreuses lectures concernant les différentes facettes de l'éco conception, se veut en même temps, être plus simple et complète que les approches existantes.

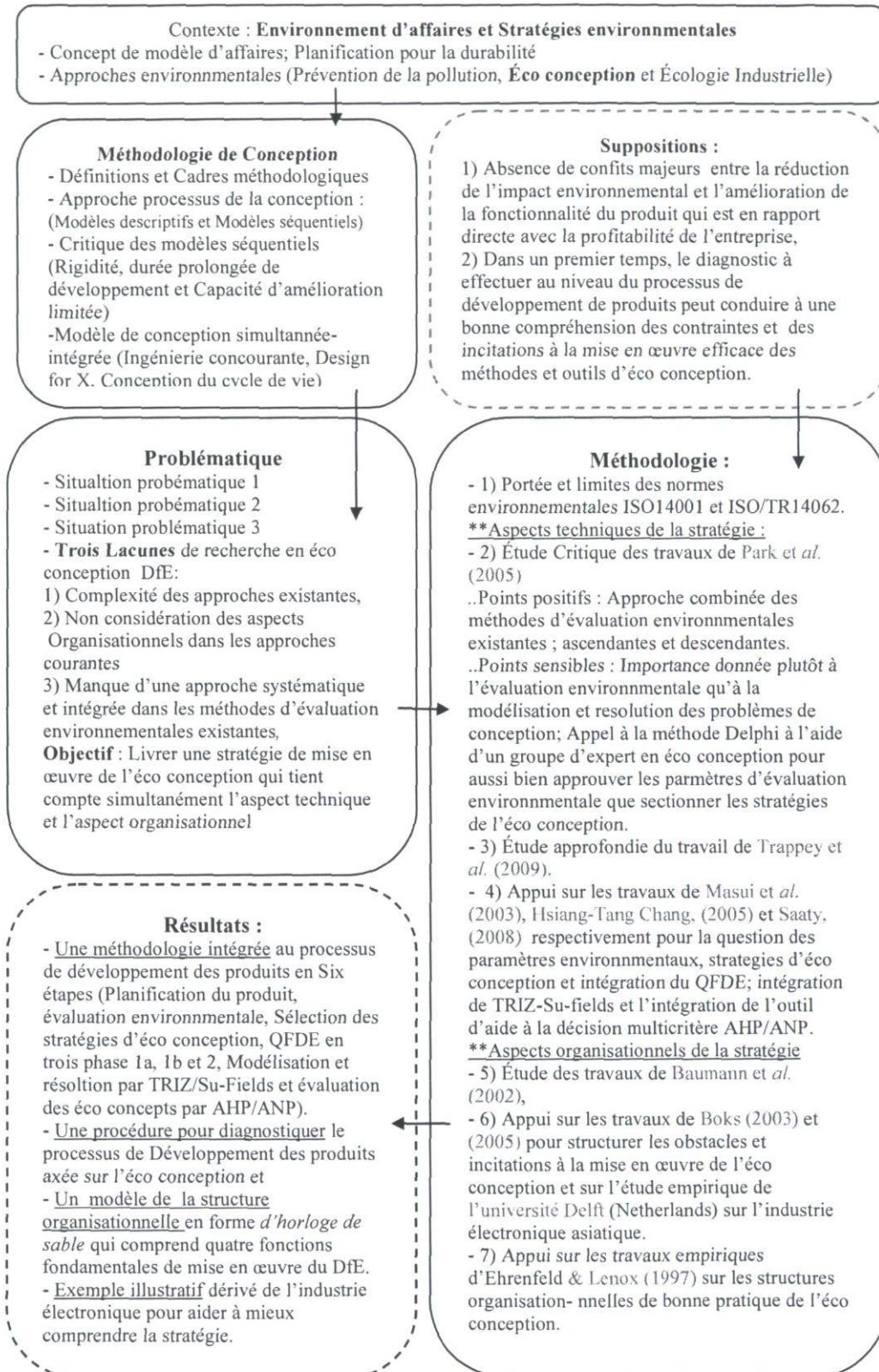
Finalement, visant à démontrer le fonctionnement de la stratégie, le travail présente un exemple illustratif combiné, issu de l'industrie électronique et qui aide à mieux comprendre les éléments de la stratégie.

Le reste de travail traite les sections suivantes :

1) Environnement d'affaires et approches environnementales dans l'industrie, 2) Méthodologie de conception des produits, 3) Problématique et développement méthodologique du présent travail, 4) Approches et principaux outils de l'éco conception : Revue de littérature; 5) Mise en œuvre de l'éco conception : Aspect technique ; 6) Mise en œuvre de l'éco conception : Aspect organisationnel ; 7) Exemple illustratif et la Conclusion.

La figure (1) illustre la feuille de route de cette présente recherche :





**Fig.1 : Feuille de route du présent travail de recherche**

# 1. Contexte : Environnement d'affaires et approches environnementales dans l'industrie

Ce premier chapitre positionne l'éco conception comme une approche environnementale industrielle orientée Produit par rapport aux autres démarches telles que; l'écologie industrielle ayant une orientation globale et la production plus propre orientée Processus. Ces approches industrielles dont on précise les enjeux s'inscrivent dans une démarche de développement durable que les industriels doivent entreprendre pour mieux utiliser et développer leur ressources, ainsi que et pour planifier à la durabilité globale de leurs écosystèmes. Cependant la durabilité est un concept relativement moins clair à positionner dans le contexte de l'environnement d'affaires, notamment pour les petites et moyennes entreprises. La planification pour la durabilité et le développement des stratégies de développement durable deviennent ainsi, innovantes et nécessitent une collaboration interentreprises, une vision réseau et une forme d'adaptation du modèle d'affaires de l'entreprise au fil des temps.

## 1.1 Concept du modèle d'affaires

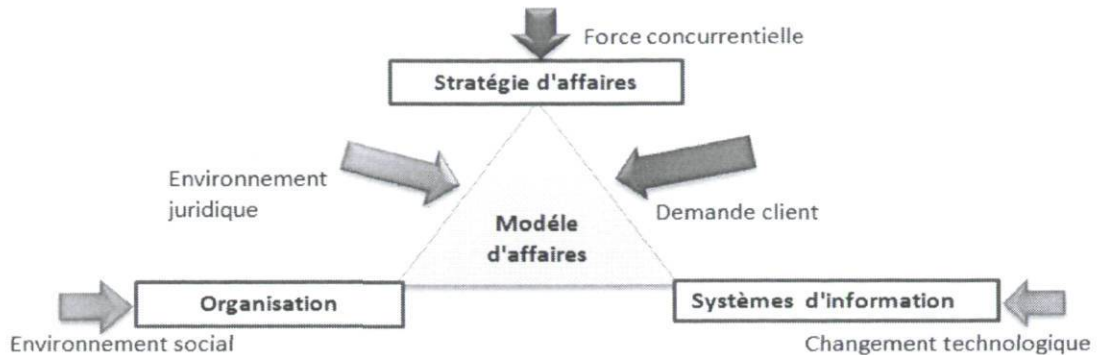
L'émergence du concept modèle d'affaires dans les années 1990 s'expliquent à la fois par des facteurs d'ordre technologique, économique et réglementaire. Ces facteurs ont entraîné de profonds bouleversements dans la gestion des entreprises et ont rendu nécessaire l'émergence de nouveaux schémas d'analyse stratégique comme le concept de Modèle d'Affaires (Rédis) [51].

La revue de littérature offre diverses définitions de ce concept suivant les champs de travaux de recherche entrepris, notamment les champs de Télécommunications Information et Communication(TIC), de biotechnologie et des champs génériques.

Selon (Ballon) [6], un modèle d'affaires est défini comme une description de la manière dont une entreprise ou un ensemble d'entreprises a l'intention de créer ou capturer la valeur d'un produit ou d'un service, tout en liant aux stratégies d'affaires les nouveaux environnements technologiques.

Le modèle d'affaires peut être schématisé en un triangle de sommets : stratégie d'affaires, structure organisationnelle et système d'information (Osterwalder et al.)[45], sollicitée constamment à cinq contraintes externes ; la force concurrentielle, l'environnement social, le changement technologique, l'environnement juridique et la demande du client.

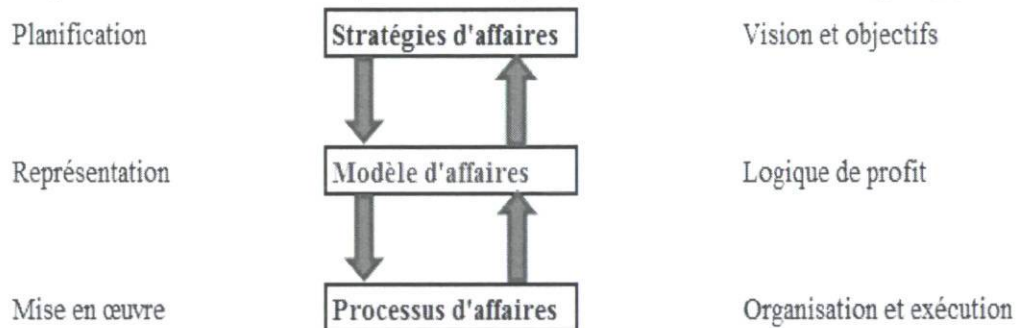
La figure (2) montre que le triangle d'affaires est soumis constamment à des contraintes externes.



**Fig.2 : Triangle d'affaires**

Source : Ostenwalder et al. (2005)

Le modèle d'affaires peut renforcer l'alignement entre les cinq stratégies d'affaires (Figure 3) et les processus de réalisation (Osterwalder) [46] comme le montre la figure(4).



**Fig.3 : Relations entre modèle d'affaires, processus et stratégies d'affaires**

Source : inspirée d'Osterwalder, (2004)



**Fig.4 : Les cinq stratégies d'affaires**

Source : Cours Gin 7012, Ingénierie d'Entreprise, S. D'Amours, université Laval, Québec. D'après Osterwalder, (2004)



En se basant sur l'approche de « *Balanced Score Card* » de Kaplan et Norton, (1992) et sur la littérature en management Markides, (1999), Osterwalder [46] adopte un schéma du modèle d'affaires basé sur quatre piliers :

- Produit : Valeur proposée du produit; services et expérience
- Interface client (Clientèle cible, Canaux de distribution et Type de relation)
- Management de l'infrastructure (Configuration de la valeur, Durabilité et Partenariat)
- Aspects financiers (Structure des coûts et Modèle de revenus)

Ces quatre « piliers » peuvent être éclatés en 9 composantes inter-reliées. Ainsi, il devient clair de définir l'état initial et l'état projeté du profil de l'entreprise et pouvoir à aligner les stratégies avec les processus d'affaires. La figure (5) illustre deux situations d'un modèle d'affaires et permet de tester qualitativement l'alignement des stratégies mises en œuvre avec les processus d'affaires.

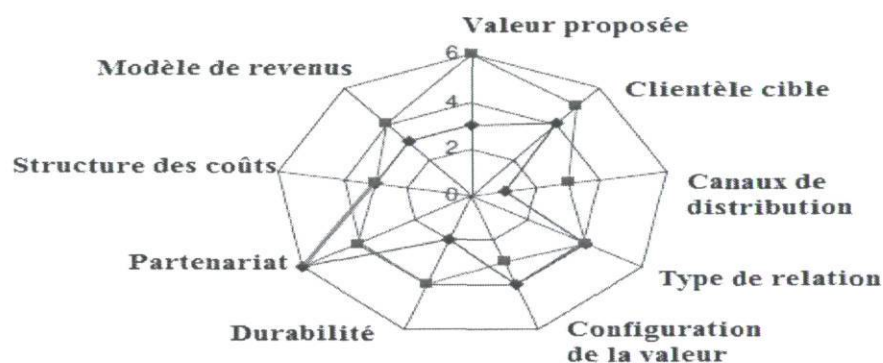


Fig.5 : Méthodologie pour comparer qualitativement les alternatives d'un modèle d'affaires

Source : inspirée d'Olofsson et Fazz, (2006) [43]

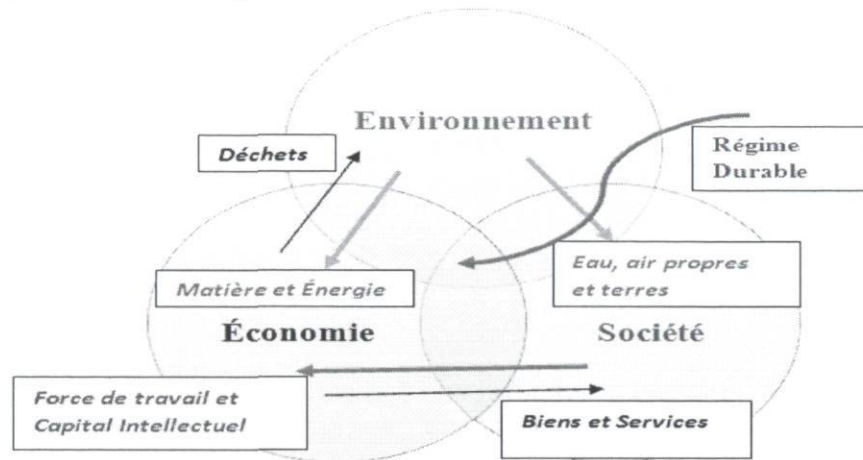
Le modèle d'affaire peut contribuer à la création des concepts et outils qui peuvent aider les managers à : Capturer, comprendre, communiquer, concevoir, analyser et modifier la logique d'affaires de leur entreprise. La valeur se déplace d'un secteur à un autre et cela rend nécessaire de faire évoluer les modèles d'affaire employés.

## 1.2 Planification pour la durabilité

La durabilité figure davantage comme une composante principale du modèle d'affaires d'une entreprise. Aussi, avec le développement durable sont désormais la priorité des gouvernements, la politique industrielle et la communauté scientifique (Azapagic et al.) [5]. Différents modèles conceptuels ont été développés autour de la problématique de développement durable qui permettent aux entreprises de bien utiliser et développer leurs ressources et à maintenir leurs avantages compétitifs. Un des plus connus étant celui de la (Triple bottom line ; 3BL) proposé par (Elkington) [20] qui suggère une approche tridimensionnelle de la durabilité en conciliant la performance financière (profit), la performance sociale (personne) et la performance environnementale (Planète).



La figure (6) montre une vue simplifiée de l'interaction des systèmes social, environnemental et économique.



**Fig.6 : Vue simplifiée des interactions entre les systèmes Social, Environnemental et Économique**

Source: Environmentally Conscious; Material and Chemicals Processing, (2007)

Pour qu'une société soit durable les fonctions de la nature et la biodiversité ne doivent pas être systématiquement soumis à :

- L'augmentation des concentrations de substances extraites de la croûte terrestre ou produites par la société,
- L'appauvrissement physique par la surexploitation ou d'autres manipulations des écosystèmes.
- D'autant plus, les ressources ne doivent être utilisées de façon juste et efficace en vue de répondre aux besoins de l'homme (K.-H. Robert), [33].

Toute violation des principes de durabilité se traduit par des effets négatifs sur la nature que l'on peut mesurer par des indicateurs. Les activités industrielles doivent alors être mises en œuvre selon des approches stratégiques appropriées de développement durable.

Il est difficile de décrire un futur durable, mais on peut définir ses principes de base.

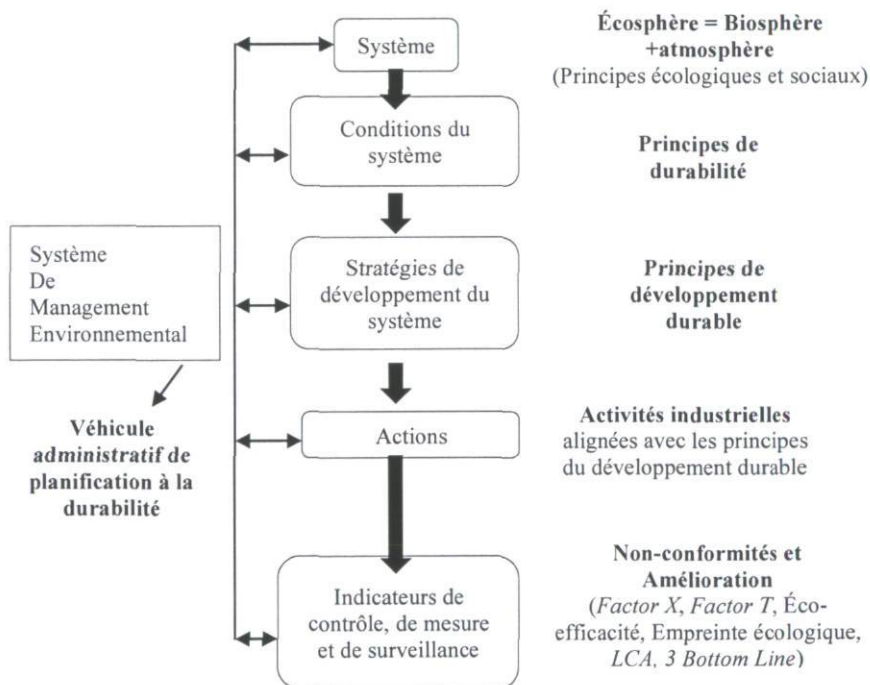
K.-H. Robert [33] propose une structure de planification pour la durabilité en cinq niveaux illustrée dans la figure (7) composée de cinq éléments ;

- 1) La définition du système,
- 2) Les conditions du système,
- 3) Les stratégies de développement,
- 4) Les actions et
- 5) Les indicateurs de mesures.

Elle est conçue pour le dialogue, la planification stratégique, la résolution des problèmes et notamment l'orientation des programmes d'investissement stratégiques en rapport avec

les systèmes de management environnementaux des entreprises. Elle permet d'aider l'entreprise à aligner son modèle d'affaires avec le contexte large du développement durable.

Les exigences croissantes des réglementations, les attentes de l'opinion publique ainsi que la volonté du management des affaires à maîtriser les risques de plus en plus variés, invitent les entreprises à assumer pleinement leurs responsabilités à l'égard de toutes les parties prenantes et d'implanter une stratégie de Développement Durable cohérente avec les principes de la durabilité, suivie par des indicateurs de performance tels que l'éco efficacité, le facteur X (Voir les sites Web de Hitachi, Toshiba) qui permettent d'apprécier les résultats de l'entreprise et son environnement. Les stratégies de développement durables deviennent ainsi, innovantes et nécessitent une collaboration interentreprises, une vision réseau et une forme d'adaptation du modèle d'affaires au fil des temps, en vue de maintenir durablement les avantages compétitifs.



**Fig.7: Les cinq niveaux de planification pour la durabilité d'un système,**  
(À ne pas confondre les principes de durabilité avec ceux du développement durable).

Source : Inspirée de Karl-Henrik Robert, (2000)

Au cours des prochaines années, les modèles d'affaires devront donc être modifiés en considérant de nouveaux concepts stratégiques, et il semble probable que la base d'acquérir

des avantages concurrentiels sera de plus en plus orientée vers un ensemble de capacités émergentes telles la minimisation des déchets, l'éco conception des produits et l'écologie industrielle ; bref ce que (Hart) [27] définit comme la théorie *Natural-Based resource View (N-RBV)* de l'entreprise basée sur les relations entre l'entreprise et son environnement naturel.

Le paragraphe qui suit traite les différentes approches environnementales dans l'industrie, en rapport avec ces capacités, à différentes échelles d'influence.

Le rôle prépondérant du système de management environnemental et ses limites dans le processus de développement durable seront traités dans le chapitre 4 .

### 1.3 Approches environnementales dans l'industrie

Les problèmes environnementaux tels que le changement climatique, l'épuisement des ressources, la détérioration de la couche d'ozone, l'acidification, l'eutrophication, le Smog photochimique, la toxicité humaine, l'écotoxicité et l'utilisation irrationnelle des terres, tous nécessitent un changement de techniques de production, une réduction d'utilisation des matières et énergie, et des modifications dans les produits finis.

Pour qu'une action puisse contribuer à la réduction des impacts négatifs sur l'environnement deux conditions sont à réunir (Jolliet et *al.*) [32] :

- 1) Disposer de solutions technologiques satisfaisantes pour l'utilisateur,
- 2) Déterminer quelles sont les priorités d'action parmi l'ensemble des mesures possibles, en tenant à la fois compte de leur efficacité environnementale, de leurs coûts et des contraintes qu'elles impliquent sur le plan économique.

Pour répondre à ces conditions , trois approches environnementales industrielles sont à envisager :

- Approche processus : Prévention de la pollution ou Production Plus Propre,
- Approche globale: Écologie Industrielle.
- Approche produit : Éco conception,

#### 1.3.1 Prévention de la Pollution (P2) ou Production Plus Propre

Le changement technologique joue un rôle décisif dans la résolution des problèmes environnementaux à travers plusieurs dimensions telles que , la gestion, la mesure, la détection ,le nettoyage et le recyclage .Ce processus de changement est basé sur ce que Metacalfe ,(1994) appelle l'innovation environnementale qui peut être définie comme une combinaison de compétences, connaissance, équipements et organisations nécessaires à satisfaire des objectifs environnementaux et réglementaires donnés (Oltra et Maider)[44] .



Suivant leur impact sur l'environnement, on peut différencier entre deux différents types de technologie; la technologie « *End of Pipe* » et, la technologie de Prévention de Pollution P2 (définition Nord-Américaine) ou dite encore Production Plus Propres « *Clean Production* » (définition de UNEP ; *United Nations Environmental Programme*).

Dans le cas de la technologie « *End of Pipe* », la solution aux problèmes de pollution consiste à traiter la pollution par le moyen d'appareils techniques qui s'appliquent à la fin de la production, telles que la technologie de dépollution des eaux, le dépoussiérage et l'incinération. Le processus de production n'est pas modifié, c'est pourquoi le niveau des émissions brutes demeure le même .Cependant, ces émissions sont traitées à la fin du processus, d'où la réduction du niveau de pollution net. Cette approche certes utile, se révèle de plus en plus coûteuse et souvent inefficace. Elle conduit souvent de manière régulière à viser le simple respect des normes réglementaires et parfois de déplacer la pollution d'un milieu à un autre.

La P2 ou Production Plus Propre englobe toutes les techniques, processus et produits qui évitent ou diminuent à la source les dommages environnementaux ainsi que l'usage des matières premières, les ressources naturelles et l'énergie (Oltra et Maider) [44]. On distingue quatre options de mise en œuvre de la P2 :

- 1) Économie et substitutions des intrants d'un processus : Le processus global de la production n'est pas modifié, mais plutôt adapté à l'utilisation moindre des inputs ou de nouveaux inputs moins polluants.
- 2) Maîtrise de la pollution et la technologie de prévention : Le but est d'intégrer dans les processus de production une nouvelle technologie qui permet d'éviter ou de traiter les émissions polluantes.
- 3) Processus intégré de Recyclage : Cette option est basée sur l'intégration de la récupération, le recyclage et/ ou la régénération des déchets et matériaux. Elle est favorable à une diminution des polluants bruts, c'est-à-dire les polluants avant le traitement par *End of Pipe*.
- 4) De nouveaux processus de production plus propres : Dans ce dernier cas, l'entreprise modifie complètement son processus de production et adopte des processus plus propres qui impliquent généralement des innovations radicales.

(Oltra et Maider) [44] soulignent que la difficulté principale dans le développement de la P2 est liée au besoin de combiner plusieurs objectifs ; à savoir les buts environnementaux, l'efficience et la performance de produits. Par conséquent, l'entreprise n'aura à entreprendre un projet de P2 que s'il existe des incitations en termes de productivité et compétitivité.

### 1.3.2 Écologie industrielle

L'écologie industrielle (ÉI) offre aux entreprises un modèle alternatif de création de la valeur qui prend en considération les enjeux environnementaux globaux. Elle appréhende les activités industrielles comme étant des écosystèmes particuliers, caractérisés par des flux de matières, d'énergie et d'information. En s'inspirant des connaissances sur le fonctionnement des systèmes naturels, elle vise à faire évoluer le système industriel vers un fonctionnement compatible avec la biosphère et viable à long terme (Voir figure 6).

On survole les principes de base de l'ÉI, les types de synergie industrielle, des exemples de symbioses industrielles et les conditions nécessaires à l'accomplissement d'un développement partiel de l'ÉI.

Cette évolution du système industriel repose sur quatre axes essentiels identifiés par (Erkman) [21]:

1) Les déchets doivent être valorisés systématiquement comme des ressources, contrairement au système linéaire actuel qui ne fait que transformer la matière d'un point à l'autre, jusqu'à la mise en décharge ou l'incinération. Ce qui traduit l'objectif ultime du bouclage de tous les flux de matière et énergie. (Voir la figure (8))

2) La minimisation des émissions dissipatives nocives qui résultent de la production et l'utilisation des produits, en disposant des technologies de substitution des matériaux qui permettent de les mitiger, qui favorisent la récupération de certains produits en fin de cycle de vie, afin d'éviter leur décharge.

3) La diminution des émissions de gaz carbonique liées au processus de production et de consommation, grâce à l'utilisation moindre et au remplacement des ressources d'énergie actuelles par des énergies non fossiles (par analogie aux écosystèmes naturels qui utilisent l'énergie solaire dans le processus de photosynthèse).

4) La dématérialisation des produits et des activités économiques consiste à diminuer le volume et la vitesse de circulation des flux de matières. En fait, comme le souligne (Payre) [48], un des problèmes majeurs inhérents au mode de fonctionnement des systèmes industriels actuels est la durée de vie des produits. La dématérialisation ambitionne d'intégrer une quantité moindre de matière dans les produits et services; réduction permise par les progrès technologiques, aussi par l'usage partagé.

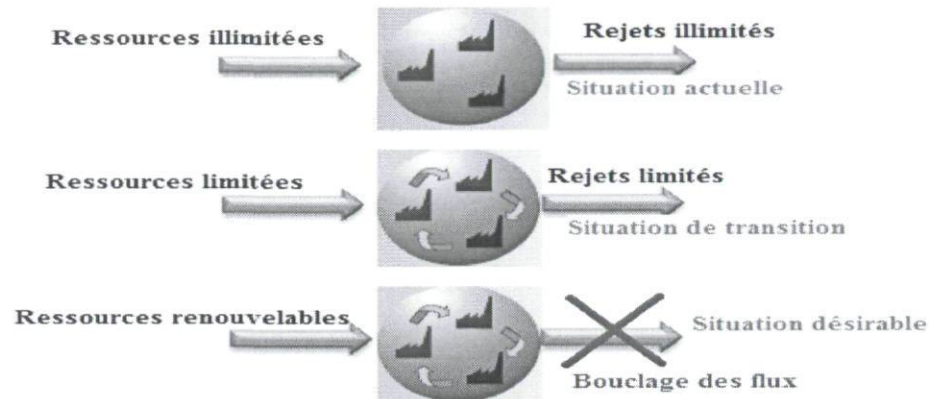
Ces principes d'utilisation intensive et de la durabilité jouent un rôle prépondérant dans l'émergence d'un modèle d'affaires appelé : Économie de fonctionnalité ; mis en œuvre par des multinationales telles que *Xerox*, *Michelin* ou *Interface*.

L'ÉI relève par conséquent d'un processus global et non d'un produit particulier. Ainsi, les synergies qui favorisent une vision réseau de l'entreprise et visent à améliorer l'impact



environnemental des acteurs économiques et leurs performances financières s'intègrent tout à fait dans l'écologie industrielle (Adoue) [2].

Ces synergies sont de deux types : Les synergies de mutualisation qui consistent à mutualiser la production, l'approvisionnement (acquisition de matières utilisées en commun), l'évacuation ou le traitement des flux et, les synergies de substitution de matière, d'eau ou d'énergie aux éléments initialement employés dans le processus de production.



**Fig.8 : Une idée force de l'écologie industrielle ;**

Réorganiser le système industriel notamment par le bouclage des flux de matière et d'énergie. Source : Inspirée d'Allenby, (1992)

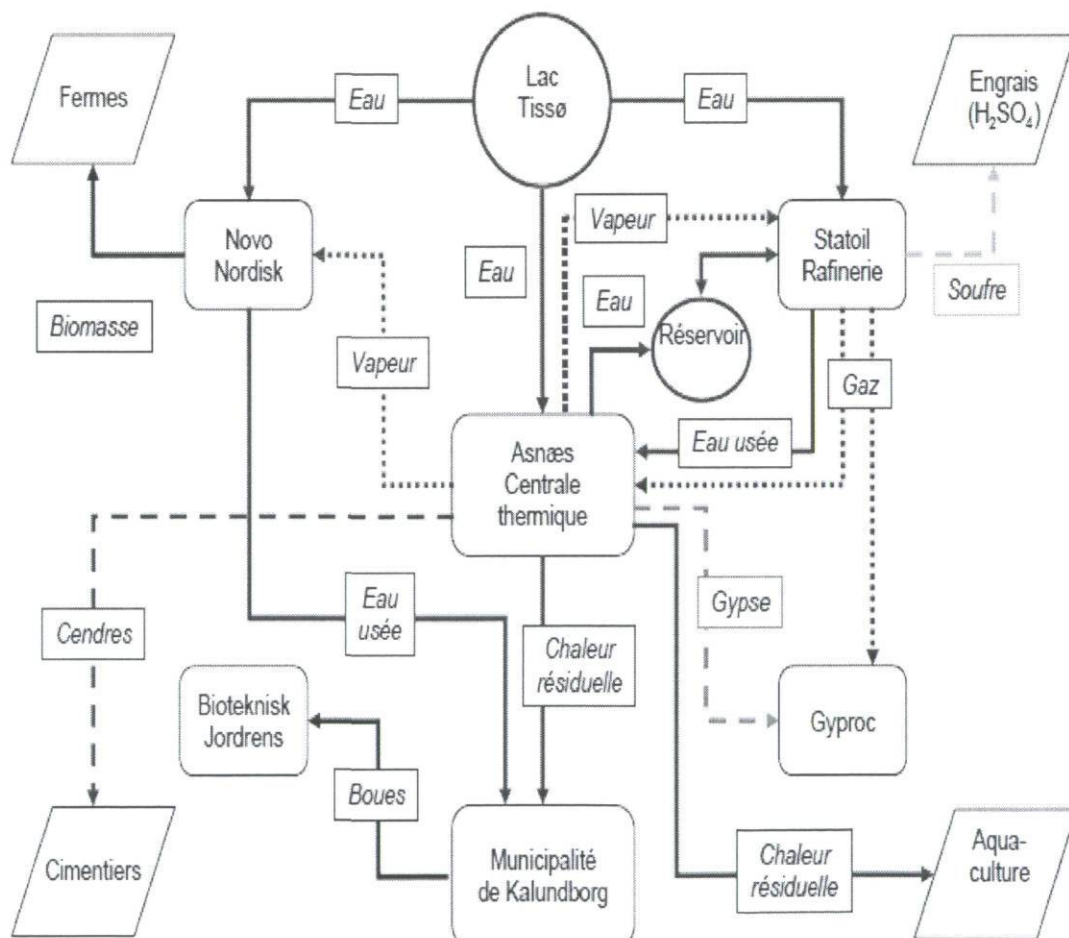
La symbiose industrielle est un sous domaine de l'écologie industrielle qui engendre à la fois des bénéfices économiques pour les entreprises impliquées et des bénéfices environnementaux en réduisant les impacts. Les exemples de parcs éco-industries et de regroupements d'entreprises illustrent la possibilité d'une restriction des quantités de déchets et de mise en décharge, ainsi que la réduction des émissions, grâce à l'application des principes de l'écologie industrielle. On peut citer l'éco parc de Saint Félicien à Québec au Canada, l'éco parc *Fair Field* à Baltimore aux USA et notamment la symbiose industrielle de Kalundborg au Danemark qui est pionnière en matière d'application des principes de l'écologie industrielle. Les entreprises participant à cette symbiose relèvent principalement de l'industrie lourde (raffinerie pétrolière, centrale électrique et usines de fabrication des matériaux de construction). La figure (9) illustre la configuration de cette symbiose industrielle.

Afin d'aider à la prise de décision lors de la planification des symbioses industrielles. Karlsson et Wolf, (2007) [34] ont utilisé une méthode basée de modélisation des flux de matière et d'énergie entre les entités d'un système de coopération composé de quatre usines de l'industrie forestière (une fabrique de pâte à papier, une scierie, un réseau de chauffage du district et une usine de concentration de biocarburants). Elle leur a permis d'identifier les améliorations possibles en comparant les coûts des différentes configurations.



Sur la base d'une étude comparative de 26 exemples de déclinaison opérationnelle des principes de l'écologie industrielle effectuée par (Payre) [48], une application stricte des principes notamment l'objectif de bouclage des flux de matière et d'énergie, de même que la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie du produit serait difficile. Certaines conditions nécessaires au développement partiel de l'ÉI doivent être vérifiées :

- Une réglementation incitative et flexible imposant des contraintes environnementales,
- Un contexte culturel favorisant la coopération et les échanges interentreprises,
- La présence d'une plate-forme jouant le pôle d'attraction et d'intermédiaire entre les acteurs privés et publics,
- La transformation de structures existantes, en tirant partie des complémentarités entre les activités.

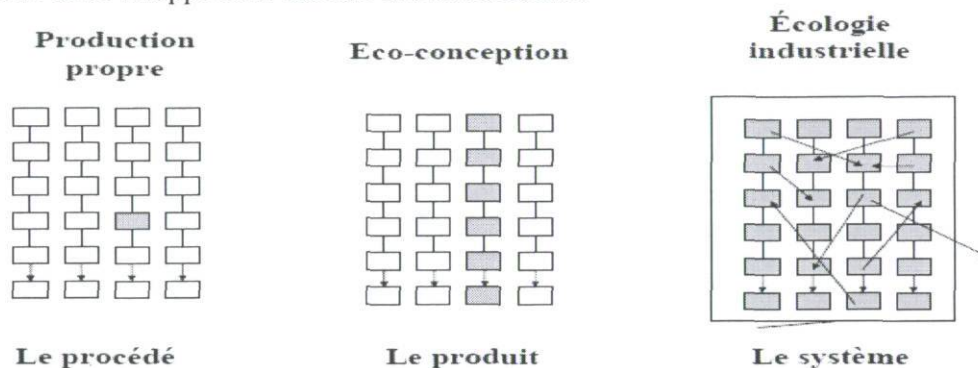


**Fig.9 : La symbiose industrielle de Kalundborg (Danemark), exemple pionnier de l'écologie industrielle,**

Source : (Erkman, Zonings durables et écologie industrielle. Pour une économie Wallonne ambitieuse et respectueuse de l'environnement, Val Saint Lambert, Liège ,2010)

### 1.3.3 Éco conception

L'idée de base de l'éco conception est la réduction des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie d'un produit, d'un processus ou d'un service. L'ÉI et la P2 ou encore dite production propre, comme approches respectivement globale et processus, se concentrent plutôt sur la minimisation des impacts environnementaux sans considérer la conception du produit. La figure (10) illustre le positionnement et l'échelle d'intervention de chacune de ces trois approches, par rapport aux activités de l'entreprise liées au processus de développement durable et à la durabilité.



**Fig.10 : Échelle d'intervention des approches environnementales industrielles**

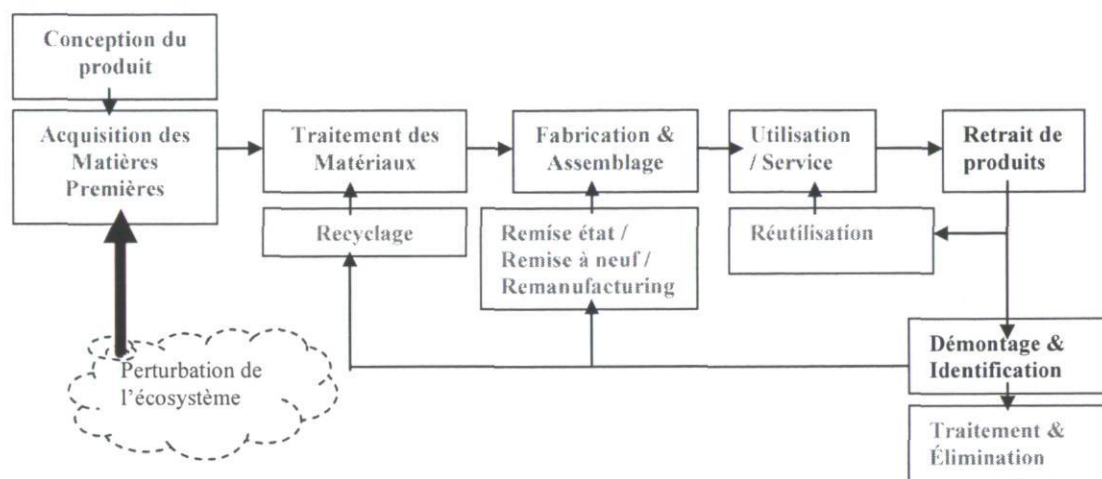
Source : (Erkman, (2010). Zonings durables et écologie industrielle. Pour une économie Wallonne ambitieuse et respectueuse de l'environnement, Val Saint Lambert, Liège)

Une fois la conception principale d'un produit est achevée et les technologies de fabrication nécessaires sont fixées, il ne reste que des possibilités minimales pour accroître l'efficacité des processus et minimiser les émissions de procédés de fabrication qui sont laissées à des mesures d'amélioration. Selon (Schischke et al.) [55] et plusieurs auteurs, plus de 80% d'impacts environnementaux liés aux produits sont déterminés pendant la phase de conception. Pour les coûts de cycle vie, la situation est la même. Alors, il est primordial de tenir compte des aspects environnementaux et économiques dès le début, comme partie intégrante de la conception du produit.

L'éco conception consiste à intégrer l'environnement dès la phase de conception des produits ou services. Cette intégration qui repose sur une approche globale et multicritère de l'environnement est fondée sur la prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie des produits, depuis l'acquisition des matières premières jusqu'à la décharge finale (ADEME) [1]. La syllabe Éco fait référence à la fois à l'Économie et à l'Écologie.

La figure (11) montre le cycle de vie total d'un produit et les potentialités pour son recyclage, sa remise en état ou à neuf ainsi que sa réutilisation. Bien que des avantages soient souvent associés à ces phases de traitement de fin de vie (*End Of Life*), des impacts environnementaux négatifs peuvent y surgir. C'est pourquoi, on doit en tenir compte lors de la conception ou l'amélioration de la conception et les calculs du cycle de vie (Mihelcic et Zimmerman) [42].

Le respect de la réglementation est le facteur essentiel et majeur qui incite les entreprises à repenser leurs produits. Cependant, la législation ne doit pas être la seule raison pour entreprendre des activités vertes. Lorsque l'entreprise se rend compte des avantages associés aux stratégies des produits verts, elle doit basculer de l'approche passive et réactive vers le développement de stratégies d'éco conception plus proactives.



**Fig.11 Cycle de vie total d'un produit**  
Toute activité anthropique est génératrice d'émissions  
Source: Inspirée de Engineering Design, (Dieter, Schmidt, 2009)

L'analyse des lois environnementales concernant le développement des produits amènent à l'établissement d'une série de listes de contrôle qui peuvent aider les concepteurs à l'application des différentes directives. Parmi les lois environnementales les plus récentes, complexes et présentant des similarités avec les lois issues des pays autres que ceux de l'Union Européenne, on distingue les directives :

- IPP (*Integrated Product Policy*) dont l'objectif principal, en relation avec le concept "développement durable" de stimuler l'offre (éco conception, information sur le cycle de vie) et la demande (sensibilisation, communication, "verdissement" des achats publics) de produits et de services, plus respectueux de l'environnement.
- EuP (*Eco Design of Energy Using Products*) dont le but est l'optimisation de tout le cycle de vie de produit et la considération des effets environnementaux dans chaque phase du cycle de vie.
- WEEE (*Waste Electrical and Electronic Equipment directive*) dont le but est l'amélioration du management de fin du cycle de vie des produits électriques et électroniques ainsi que la mise en œuvre de l'IPP.



- RoHS (*Restriction of the use of certain Hazardous Substances directive*) dont le but est la restriction des substances dangereuses : Métaux lourds (*Plomb, Mercure, Cadmium, Chrome valence VI...*) et Retardateurs de flamme (*PBB; Poly bromo bi phénols, PBDE; Poly bromo di phényle- éthers*)

- REACH (*Registration, Evaluation and Authorization of Chemicals*), les entreprises Européennes qui fabriquent ou importent plus d'une tonne d'une substance chimique annuellement doivent faire une déclaration dans une base de donnée centrale.

En plus de ces directives, il existe d'autres qui sont sectorielles et en rapport avec l'éco conception comme :

- ELV (*End of Life Vehicles directive*) pour augmenter la réutilisation et la récupération de 95% en masse moyenne par véhicule à l'horizon de 2015.

Les clients industriels sont un facteur plus important de l'éco conception, en particulier les acteurs mondiaux dont les politiques environnementales peuvent avoir un impact majeur sur leurs fournisseurs en leur exigeant au minimum d'utiliser à un certain degré, les principes de la gestion de l'environnement. Par conséquent, un système de management de l'environnement (*EMAS, ISO 14001 ou LEED*) serait un point de départ utile, susceptible de s'engager plus dans la démarche de l'éco conception.

Tout comme la mise en place d'une démarche Qualité, l'appropriation de toute démarche d'éco conception se fait par étapes successives sur une durée de plusieurs mois, à savoir :

- L'engagement de la hiérarchie,
- Lancement d'un projet pilote d'éco conception afin de définir le phasage et les outils adaptés à l'entreprise, et
- Le perfectionnement et la généralisation de la démarche à tous les projets de la conception.

Avant de généraliser une démarche d'éco conception, l'entreprise devra être sensibilisée entre autres:

- Au management de Qualité et Environnement,
- Au processus de Développement de produit en équipe transversale (Ingénierie Concurrentielle),
- Aux méthodes d'évaluation multicritères de performance des projets comme *AHP* ou *ANP /Fuzzy ANP*: L'équipe de projet sera amenée à comparer différentes solutions de conception selon les critères de rentabilité et de réponse au cahier de charge ou de référence, en intégrant la fonctionnalité, la performance financière et l'impact sur l'environnement et
- Aux méthodes d'analyse telles que l'analyse du cycle de vie (*LCA*), le Benchmarking Environnemental (*BE*), la liste de contrôle et le Déploiement de la Fonction

Qualité ; disciplines qui permettent de prendre en compte une grande diversité d'exigences lors du développement du produit.

- Aux méthodes de modélisation et résolution des problèmes de conception comme *TRIZ* (Théorie de résolution des problèmes inventifs) et le Design Axiomatique.

La majorité de ces éléments seront traités en profondeur dans un cadre méthodologique intégré proposé dans cette recherche.

Avant d'explicitier la problématique, il convient de ;

\*Faire un aperçu sur les activités de conception et développement des produits.

\*Citer les différentes approches méthodologiques de conception des produits,

\*Mettre en focus un type de modèle de conception ; le modèle prescriptif intégré dans le processus de développement des produits, ainsi que

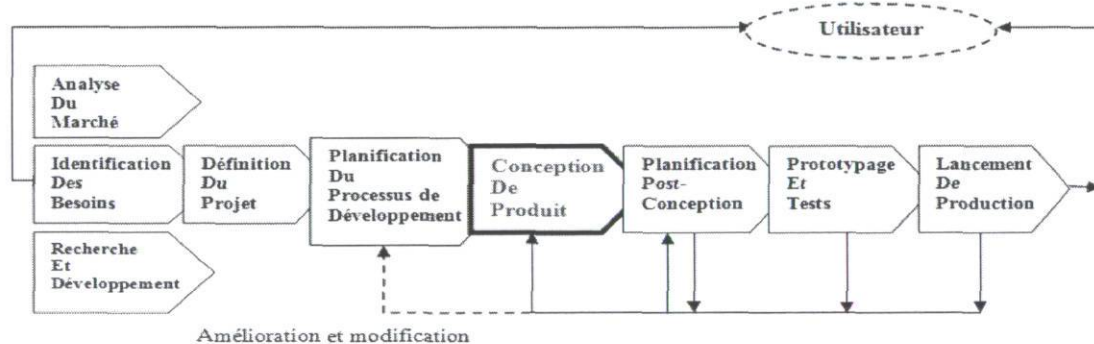
\*Décrire quelques concepts émergents qui remédient à certaines faiblesses du processus de conception, face aux nouvelles exigences du marché et de l'environnement, tels que

- L'ingénierie concurrente (*Concurrent Engineering*) CE,
- La conception du cycle de vie (*Life Cycle Design*) LCD et
- Le (*Design for X*) DfX.

## 2. Méthodologie de Conception des produits

La conception peut être définie comme une activité qui établit, de manière particulière, des solutions et des structures pertinentes pour les problèmes non résolus avant (Blumrich) [8]. Les défis présentés par la conception sont résumés dans ses quatre "C" (Dieter & Schmidt) [17] : Créativité, Complexité, Choix et Compromis.

Le développement de produit peut être défini comme une activité plus étendue qui, tout en incluant la conception, englobe un cadre large qui commence par l'identification d'un besoin ou une opportunité de marché et se termine par le lancement d'un produit [15]. La figure (12) illustre les principales étapes séquentielles d'un processus de développement de produits :



**Fig.12 Processus de développement de produit : modèle séquentiel**

Source: Giudice et al. (2006) *Product Design for Environment: A life cycle Approach*

Ce chapitre fournit une description sommaire des activités principales de la conception tant que *processus continu et itératif*, délimite les cadres méthodologiques de la conception destinés à structurer les activités et à orienter la prise de décision au cours de ce processus, afin d'améliorer son efficacité. Il souligne que la structuration séquentielle du processus de conception a fait objet de beaucoup de critique, notamment la durée prolongée de développement, la rigidité à réaliser un niveau particulier d'exigences du produit et la capacité limitée d'optimiser les solutions de modèles de conception. D'où l'émergence de nouveaux contextes méthodologiques prévoyant des actions de conception simultanée, interactive et soucieuse de toutes les phases de développement de produits. Trois approches représentent effectivement cette nouvelle méthodologie dite *Conception simultanée / intégrée*.



## 2.1 La Conception en tant que Processus continue et itératif

Dans les manuels d'ingénierie de conception, les activités de conception peuvent être considérées comme un processus continu et itératif qui permet de cartographier l'espace fonctionnel en un espace physique, en vue de satisfaire les exigences spécifiées par le concepteur fonctionnel (Suh) [57]. (Voir figure (13)).

Sept activités principales peuvent être distinguées :

### 2.1.1 Identification du problème:

On pourrait sentir le besoin pour corriger un défaut de conception précédente, développer un nouveau produit avec de nouvelles capacités pour rester compétitif ou parfois se donner un défi de conception entièrement nouvelle résultant d'une idée imaginative.

(Shigley), [56] indique qu'il y'a une distinction entre la reconnaissance d'un besoin et l'identification du problème. Le problème est plutôt plus spécifique ; par exemple si le besoin est pour l'eau potable, le problème pourrait être de réduire les infiltrations des eaux usées, le dumping (décharge) industriel, ou la contamination des ressources naturelles.

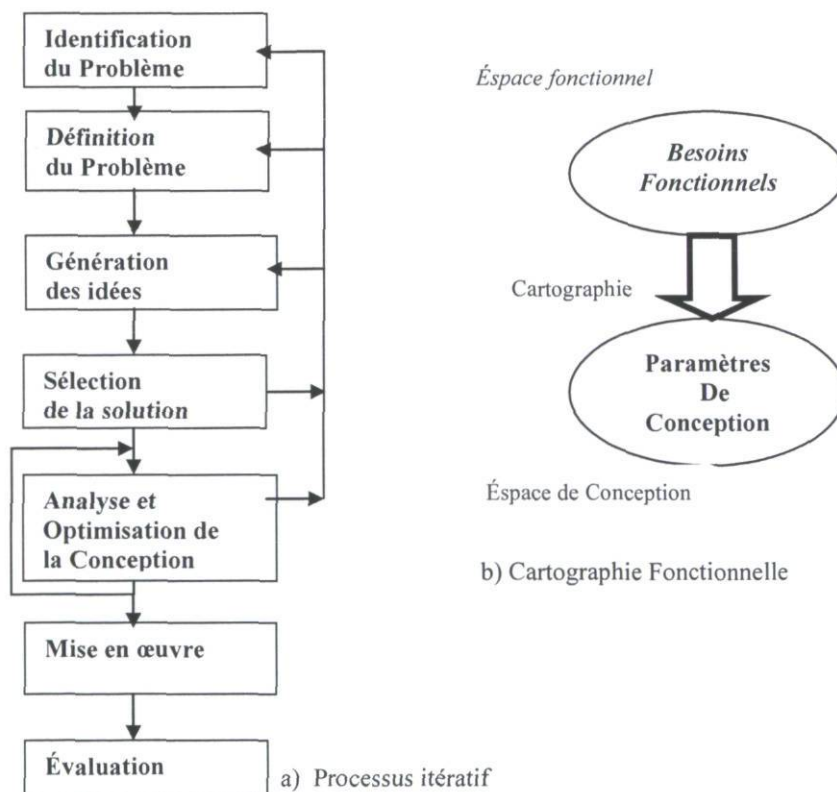


Fig.13 : Conception vue entant que : a) Processus itératif, b) Cartographie fonctionnelle, Source: Thompson, (1999), *Design Analysis: Mathematical Modeling of Non-linear Systems*.

### 2.1.2 Définition du problème:

L'étape de définition du problème commence par la collecte d'informations et la tentative de formuler ce que le problème comporte. Le tableau (1) en annexe 1 donne une vue d'ensemble sur les types d'information cherchés en conception.

Habituellement, ce processus aboutit à une « sur » ou « sous » spécification du problème (Thompson) [60]. Si un problème est trop précis, les contraintes sur la solution du problème sont si sévères qu'aucune solution n'est possible. De même un problème sous-spécifié est celui qui est si mal défini qu'il y'a un nombre infini de possibilités de conception possible, mais il n'y a aucun critère qui permet de déterminer laquelle à choisir. Ainsi, toute définition non appropriée du problème conduit souvent à une solution complexe inacceptable ou inutile.

Les paramètres, les variables de conception ainsi que les contraintes qui traduisent les exigences à satisfaire sont déterminés à partir d'un ensemble de méthodes comme le Benchmarking, l'ingénierie inverse, le déploiement de la fonction qualité QFD (*Quality Function Deployment*) et d'autres techniques de recherche plus spécifiques comme l'Analyse du cycle de vie *LCA (Life Cycle Assessment)* et l'analyse du Coût du Cycle de vie *LCCA (Life Cycle Cost Assessment)*.(Voir le chapitre 4 de ce mémoire)

### 2.1.3 Génération des idées:

La créativité et l'innovation sont les domaines de la conception les plus difficiles et gratifiants. Les techniques de créativité sont très utiles dans le processus de conception, elles peuvent générer une quantité large d'idées en peu de temps. Dans le guide de conception *Delft* pour la conception industrielle [53], les techniques de créativité sont classées de point de vue structurel en six catégories:

- techniques d'inventaire (*Mind map*) ;
- Techniques associative(*Brainstorming*) ;
- Techniques de confrontation (*Synectiques*);
- Techniques Provocatrices (utiliser *des analogies, des métaphores et des stimuli aléatoires*) ;
- Techniques intuitives permettant de développer une vision, ou une nouvelle perspective sur la question en main d'origine, ces techniques ont une grande influence sur l'enthousiasme, la motivation et le courage des membres de l'équipe) ;
- Techniques d'analyse systématique fondées sur;

- a) la description et l'analyse systématique d'un problème,
- b) l'élaboration d'un inventaire de solutions, et de variantes de sous-problèmes, et
- c) la systématique et la combinaison de variables de ces variantes de solution (méthode *d'analyse morphologique, Analyse fonctionnelle, TRIZ et Conception axiomatique*).

Le concepteur ne doit pas se contenter d'une alternative de conception unique, mais devrait se rendre compte qu'il y'a souvent plusieurs façons d'atteindre l'objectif majeur de la

conception (Thompson) [60]. D'autant plus, les décisions de conception majeures ne sont à éviter à ce stade et il faut simplement chercher à obtenir de nouvelles idées enregistrées.

#### **2.1.4 Sélection de la solution:**

Le but d'un processus de conception est de produire un système, une procédure ou un dispositif qui répond à un besoin. La sélection d'une solution raisonnable à un problème de conception consiste à faire des choix. Dans le processus de sélection, l'hypothèse sous-jacente est qu'il existe un mécanisme permettant de déterminer le meilleur choix parmi les solutions proposées. Toutefois, c'est l'équipe de conception qui formule les critères de ce qui est considéré comme bon ou mauvais.

#### **2.1.5 Analyse et optimisation de la solution:**

C'est peut-être l'aspect le plus techniquement difficile du processus de conception.

Il s'agit de décrire toutes les alternatives retenues de conception en termes mathématiques, ce qui permet à l'ingénieur de simuler le fonctionnement de la conception et de découvrir les défauts fondamentaux du raisonnement dans sa conception préliminaire.

Dans les dernières phases de l'analyse, à travers la perspective des mathématiques combinées à la modélisation, la conception la plus appropriée sera devenue évidente et l'analyse peut ainsi être centrée sur l'optimisation de la conception. C'est à partir de ces modèles que les informations essentielles à l'évaluation de la réussite d'un projet de conception sont dérivées.

#### **2.1.6 Mise en œuvre:**

Les prototypes initiaux sont élaborés et les décisions finales de la conception sont prises, elles pourraient soit améliorer la conception, soit la rendre plus facile à fabriquer, réduire le coût, ou tout simplement rendre le produit plus attrayant pour le client. Il est d'usage courant la simulation complète d'un système pour évaluer sa conception et de tester différents scénarios pour tenter de découvrir ses points faibles. La création des prototypes virtuels qui peuvent être testés fonctionnellement est un paradigme puissant.

#### **2.1.7 Évaluation:**

Lorsque les prototypes sont construits, de nouvelles alternatives de conception peuvent immédiatement apparaître, les changements de petits détails deviennent évidents. Souvent cette phase d'évaluation conduit aussitôt à une phase antérieure où une ré-conception s'avère nécessaire avant de relâcher la conception à la production.

(Thompson). [60] stipule que: « *Les Clés d'une conception réussie ne sont pas encore comprises complètement. La Créativité, l'attention au détail, le bon management de*



*données, les prouesses mathématiques et d'autres attributs semblent tous jouer un rôle prépondérant dans ce processus. Non seulement l'argent et de temps perdus, mais des conceptions plus appropriées peuvent avoir été interrompues en raison d'une approche de force brute ».*

## 2.2 Les Cadres méthodologiques de la conception

Les cadres méthodologiques de la conception sont destinés à structurer les activités et à orienter la prise de décision au cours du processus de conception, afin d'améliorer son efficacité. Leur variété est telle que, les modèles correspondant aux processus de conception qu'ils génèrent peuvent être divisés en plusieurs catégories principales (Giudice et al.) [25]. La classification de ces cadres méthodologiques est représentée dans la figure (14). En effet, la complexité du processus de conception et des facteurs qui l'influencent de diverses manières ont été récemment encore plus compliqués par la nécessité de répondre à un large éventail de besoins, tout en respectant les nécessités imposées par le marché concurrentiel. Par conséquent, aussi bien le processus de conception que ceux de gestion de production et distribution ont exigé des innovations considérables, principalement dans le but de réduire le temps et les ressources utilisées. La structuration séquentielle du processus de conception a fait objet de beaucoup de critique, *notamment* la durée prolongée de développement, la rigidité à réaliser un niveau particulier d'exigences du produit et la capacité limitée d'optimiser les solutions de modèles de conception.

La structuration séquentielle a été supplantée par de nouveaux contextes méthodologiques prévoyant des actions de conception simultanée, interactive et soucieuse de toutes les phases de développement de produits. L'Ingénierie Concourante (*Concurrent Engineering*), *Design for X* et la Conception du Cycle de vie (*Life Cycle Design*) sont les trois approches qui représentent cette nouvelle *méthodologie dite Conception simultanée / intégrée* (Giudice et al.)[25] ;

- L'Ingénierie Concourante vise une harmonisation complète entre l'amélioration de la qualité des produits, la réduction des délais de développement et les coûts, grâce à une structuration du développement de produits qui comporte une large équipe de conception. Cette équipe multifonctionnelle conduit des actions simultanées et interconnectées d'analyse et de synthèse, en rapport avec toutes les phases du développement de produit.

- *Design for X (DfX)* implique un système flexible de méthodologies et d'outils de conception, chacun étant destiné à réaliser un niveau d'exigences de produit particulier. Les techniques de DfX les plus courantes sont :

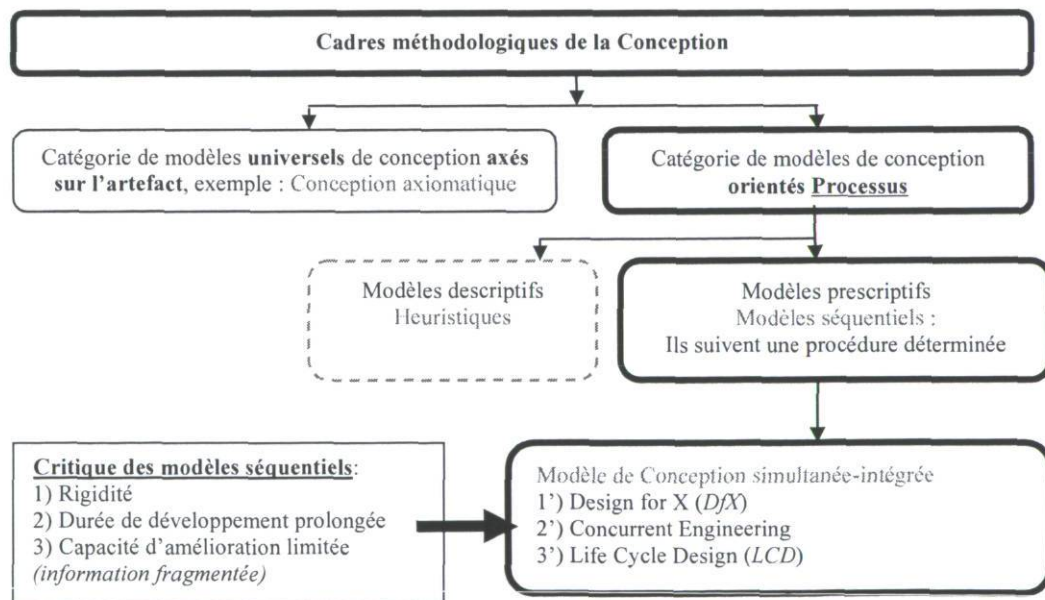
- \* *Design for Producibility/Manufacturability, Design for Assembly, Design for Variety,*
- \* *Design for Robustness/Quality;* pour la phase de production;
- \* *Design for Reliability, Design for Serviceability/Maintenability, and Design for Safety;* pour la phase d'utilisation.
- \* *Design for Retainment/Recovery/Disassembly)* ; pour la phase de fin du cycle de vie

• La Conception du cycle de vie a comme objectif dominant l'optimisation des performances du produit le long de son cycle de vie entier.

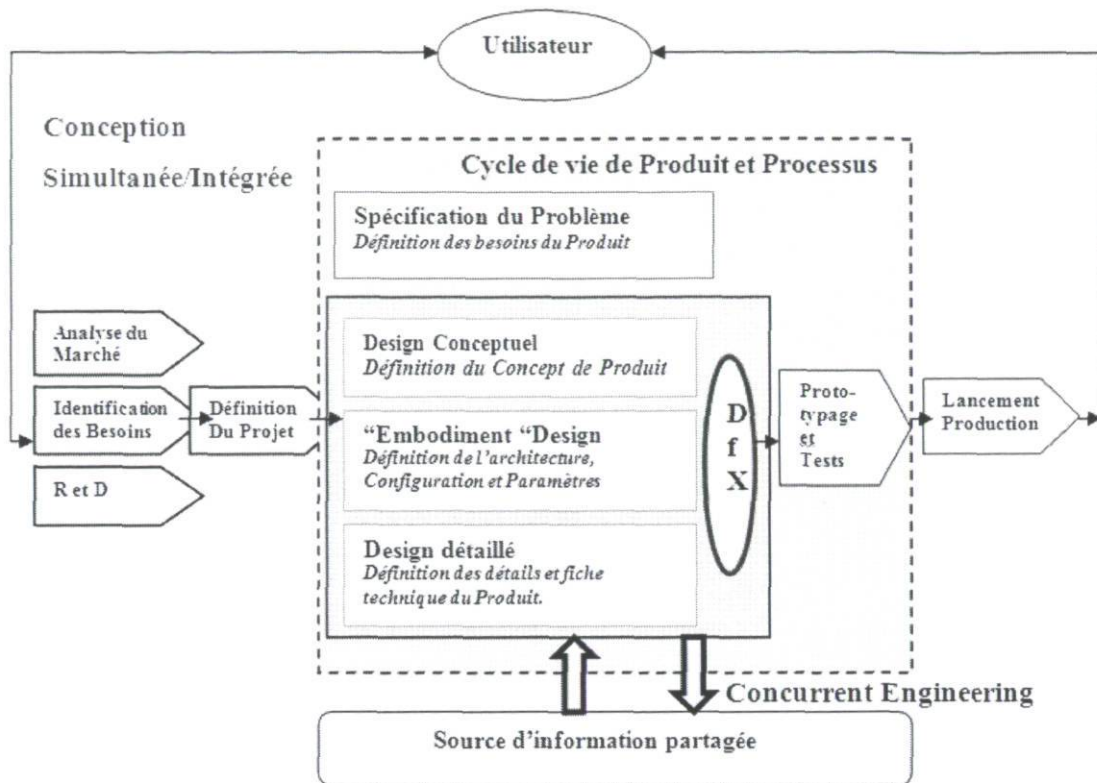
La figure (15) illustre l'intégration de ces trois concepts dans le cadre d'un cadre méthodologique appelé Conception simultanée intégrée.

En revanche, d'autres propriétés objectives sont appliquées à travers l'ensemble du système *DfX*, car elles ne peuvent pas être liées à une seule phase de cycle de vie. Parmi elles, il convient de noter celles qui sont spécialement liées à :

- \* La maîtrise des coûts, servant de base pour la Conception pour le coût (*Design for Cost*), et celles associées à :
- \* La protection de l'environnement qui sont la base de l'éco conception (*Design for Environment*) ; noyau de ce présent travail et la conception pour la durabilité (*Design for Sustainability*).



**Fig.14 Classification des cadres méthodologiques de la conception**  
 Inspirée de Giudice et al. (2006) *Product Design for Environment: A life cycle Approach*



**Fig.15 : Modèle de la Conception simultanée intégrée** (Concurrent Engineering, Design for X And Design for X). Source : Inspirée de Giudice et al. (2006). *Product Design for Environment: A life cycle Approach*,



### 3. Problématique & développement méthodologique

Dans ce chapitre, trois situations problématiques de la mise en œuvre efficace de l'éco conception dans les entreprises industrielles ont été reportées. Elles nous ont permis de marquer l'existence de trois lacunes de la recherche en éco conception :

- 1) Complexité des approches existantes,
- 2) Non considération des aspects organisationnels dans les approches courantes,
- 3) Manque d'une approche systématique et intégrée dans les méthodes d'évaluation environnementales existantes.

L'Objectif de cette recherche est finalement de livrer une stratégie de mise en œuvre claire et efficace de l'éco conception qui tient compte en plus des exigences du client, de l'environnement et de la concurrence, des spécificités organisationnelles de l'entreprise.

Une revue approfondie de littérature sur les différentes facettes de l'intégration de l'éco conception dans les phases préliminaires du développement du produit , ainsi que sur les bonnes pratiques de l'éco conception notamment dans les entreprises avancées dans ce domaine , nous a permis de structurer la présente stratégie en deux aspects :

- L'aspect technique qui décrit un kit méthodologique consistant pour éco concevoir un produit. Ce kit a été le résultat de l'adaptation de plusieurs approches éparpillées dans la littérature.
- L'aspect organisationnel qui fournit une procédure pour diagnostiquer le processus de développement de produit permettant d'identifier et classer les principaux points favorables et défavorables à la mise en œuvre efficace de l'éco conception et de prévoir ainsi, un plan d'action qui supporte la mise en œuvre du kit méthodologique. Il adopte aussi un modèle organisationnel du processus de l'éco conception; en forme d'horloge de sable inspiré des entreprises leaders dans le domaine de l'éco conception, en vue de tenir compte de la criticité de certaines fonctions principales dans le processus d'éco conception.

Un exemple démonstratif a été reporté pour justifier l'applicabilité de la stratégie et notamment pour aider à comprendre ses différents aspects.

## 3.1 Problématique

### 3.1.1 Situation problématique 1

L'intégration durable des aspects environnementaux dans la phase de conception nécessite une certaine capacité et un certain niveau de connaissance. Ainsi, l'incorporation des aspects de l'éco conception diminue avec la taille de l'entreprise (Kuhke et al.) [56].

En effet, dans une étude empirique Kuhke et al. , on rapporte que l'éco conception trouve son champ d'application plus favorable dans les grandes entreprises. En fait, les questions environnementales jouent un grand rôle dans leurs stratégies d'affaires et elles ont de grands départements de l'environnement avec une capacité énorme à effectuer des analyses de cycle de vie complètes et utiliser les autres outils d'éco conception.

Le scénario dans les entreprises de taille moyenne semble être comme suit: Dans la plupart des cas, il y a un département environnemental avec un petit groupe d'experts. Ces experts renforcent leurs connaissances en obtenant des informations à partir des séminaires, colloques, associations industrielles et ainsi de suite. Ils ne sont pas exactement familiarisés avec l'impact environnemental de leurs produits le long de leurs cycles de vie et ils n'utilisent pas certains logiciels-outils ou des méthodes d'éco conception, mais ils savent les lois environnementales et les stratégies communes pour améliorer l'environnement.

Le troisième scénario dans les petites entreprises est différent par rapport aux autres. Dans ces entreprises, la plupart du temps, il y'a juste une personne qui nonobstant d'autres fonctions est responsable des problèmes de l'environnement. Il ne peut pas passer beaucoup de temps pour cette tâche et il est impossible d'obtenir et ou de filtrer toutes les informations pertinentes et adéquates pour construire le savoir-faire. Dans ce cas, les connaissances sur les questions environnementales liées aux produits sont relativement pauvres, d'autant plus, il n'y a pas de procédures établies qui intègrent les aspects environnementaux liés au produit dans le processus de conception et développement du produit. La protection de l'environnement est plus un problème intuitif.

Ils concluent que des recherches doivent se pencher sur la façon de permettre aux petites et moyennes entreprises de mettre en œuvre l'éco conception en tenant compte de leur capacités et savoir-faire limités.

### 3.1.2 Situation problématique 2

Un problème de mise en œuvre des bonnes pratiques d'éco conception a été tiré d'une interview avec une entreprise multinationale de l'industrie électronique (Boks) [9] :



Dans cette entreprise, la responsabilité de la question environnementale est divisée entre deux départements :

Un département, intégré dans le département d'assurance qualité, il est responsable de l'évaluation du cycle de vie (*Life Cycle Assessment LCA*) et de toutes les tâches qui lui sont associées.

Un autre département intégré dans une division de technologie d'appui, il est responsable de l'éco conception, et est généralement connu d'être très bien informé sur ce qui se rapporte à l'éco conception.

Dans cette entreprise, les unités d'affaires sont libres de demander de l'aide soit du département *LCA* (qui est libre), soit du département d'éco conception (qui n'est pas libre ; c'est-à-dire, il travaille sous pression et a des comptes à rendre).

Un employé du département d'éco conception a indiqué qu'ils avaient arrêté leur service de consultation à une unité d'affaire ; exactement, un département particulier du génie électrique. Ils ont arrêté de fournir des suggestions pour améliorer la consommation énergétique des produits, parce que les ingénieurs électriques ont vu cela comme une critique de leur travail, et n'étaient pas disposés à les accepter à partir d'un département qualifié relativement d'un faible "statut" interne.

Le département d'éco conception avait peur que le département de génie électrique ne fasse plus appel à leurs services et qu'il choisisse de dépendre uniquement des entrées du département *LCA*.

Pour éviter les pertes d'activité, le département d'éco conception a donc décidé de ne fournir que des objectifs cibles sans suggestions de comment les atteindre.

Ceci est un exemple où, même avec la disponibilité des meilleurs outils et méthodes techniques, la mise en œuvre de l'éco conception n'est pas efficace par manque de compétences organisationnelle et de communication.

### 3.1.3 Situation problématique 3

De point de vue des concepteurs, le développement des produits écologiques les oblige à considérer les aspects environnementaux en concurrence avec les aspects traditionnels techniques et économiques depuis le début des activités de conception. D'où le besoin d'utiliser des méthodes et outils spécifiques pour le développement et le management des activités de conception (Fargnoli et Sakao) [22]. Un grand nombre de méthodes et de techniques sont disponibles aujourd'hui, compte tenu à la fois des résultats de travaux de recherche académique, ainsi que les efforts déployés par les organisations internationales (Ramani et al.) [50]. Par exemple, l'ISO / TR 14062 liste environ 30 outils différents, applicables à l'éco conception. Les outils actuels de l'éco conception varient aussi bien dans la présentation des données que la mise en œuvre dans le processus de conception. Figure (16) illustre la situation de certains outils récents de l'éco conception et leur application individuelle dans le processus de conception ainsi que le type de données



nécessaires à leurs mises en œuvre. Ces outils peuvent généralement être classés en trois catégories:

- les outils basés sur des lignes directrices et listes de contrôle,
- les outils basés sur le cycle de vie d'évaluation du cycle de vie (LCA), et
- les outils basés sur le déploiement de la fonction qualité QFD.

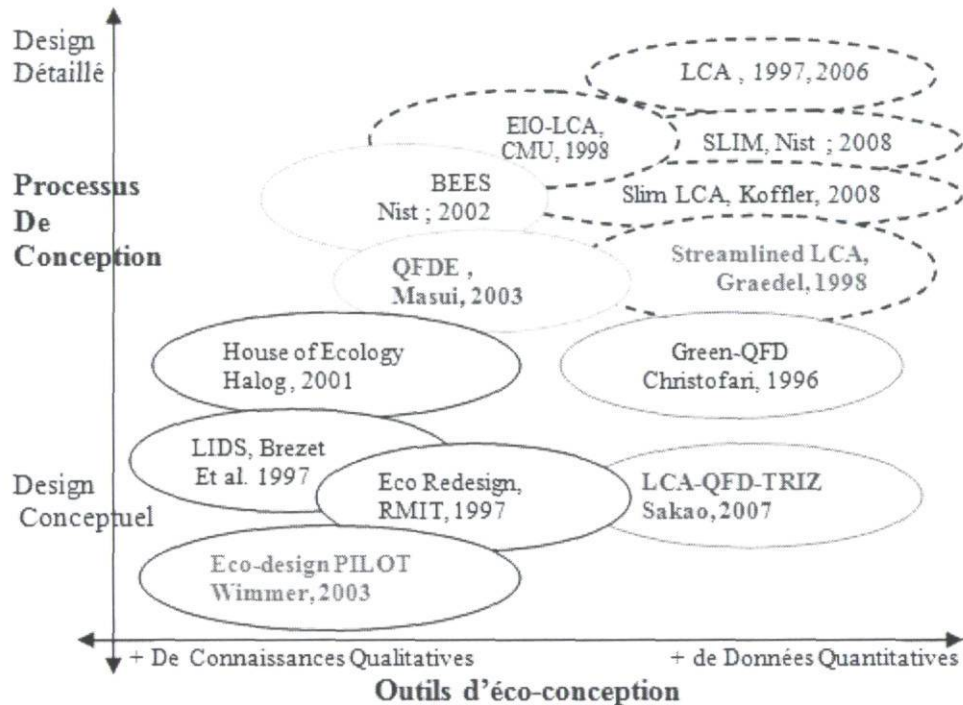


Fig.16 : Carte des outils d'éco conception actuels

Source : Ramani et al. (2010)

Cependant, il y'a peu de soutien disponible pour les concepteurs sur la façon de mettre en œuvre ces différents outils en vue d'une Éco conception efficace (satisfaction des besoins et attentes de parties prenantes) et efficiente (durée de développement et coût optima) .En d'autres termes, les méthodes et les outils d'éco conception courants manquent relativement d'approche systématique et notamment de coordination des activités de conception (Fargnoli et Sakao) [22],

### 3.2 Développement méthodologique du travail de recherche

Deux suppositions sont à admettre pour adopter la présente stratégie de mise en œuvre de l'éco conception dans les entreprises industrielles permettant de considérer les exigences du client, celles l'environnement et la concurrence :

- 1) Absence de conflits majeurs entre la réduction de l'impact environnemental et amélioration de la fonctionnalité du produit qui est en rapport directe avec la profitabilité de l'entreprise. En effet, la résolution de tels conflits fait appel à d'autres outils méthodologiques actuellement en exploration qui se basent sur la conception par analogie, la synectique et la génération de concepts biomimétiques (Fitzgerald et *al.*) [23].
- 2) Dans un premier temps, le diagnostic à effectuer au niveau du processus de développement de produits d'une entreprise peut conduire à une bonne compréhension des contraintes et incitations à la mise en œuvre efficace des méthodes et outils d'éco conception (Hein et Fan) [28].

Les approches normatives; comme la norme environnementale orientée organisation ISO14001 et celle orientée produit ISO/TR14062 qui jouissent d'une grande popularité sont d'abord étudiées pour connaître leurs portées et leur limites dans la mise en œuvre du processus d'éco conception.

L'éco conception est vue dans cette recherche sous deux volets : le volet technique et le volet organisationnel :

- L'aspect technique ou « *Hard* » comprend les différentes approches méthodologiques récentes qui s'appliquent pour traiter les problèmes de l'éco conception et
- L'aspect organisationnel ou « *Soft* » comprend les modèles organisationnels de l'éco conception, les facteurs favorables et les obstacles de sa mise en œuvre efficace, ainsi que les caractéristiques d'une bonne application des pratiques de l'éco conception.

La stratégie de mise en œuvre de l'éco conception doit être élaborée sur la base de ces deux aspects pour contourner; la situation problématique 3 que nous considérons de type *Hard*, la situation problématique 2 que nous considérons de type *Soft* et la situation problématique 1 que nous considérons de type composé *Hard* et *Soft*.

❖ *Nota Bene* :

Nous explicitons ci-dessous les grandes lignes du développement méthodologique. Les détails seront traités dans les prochains chapitres.

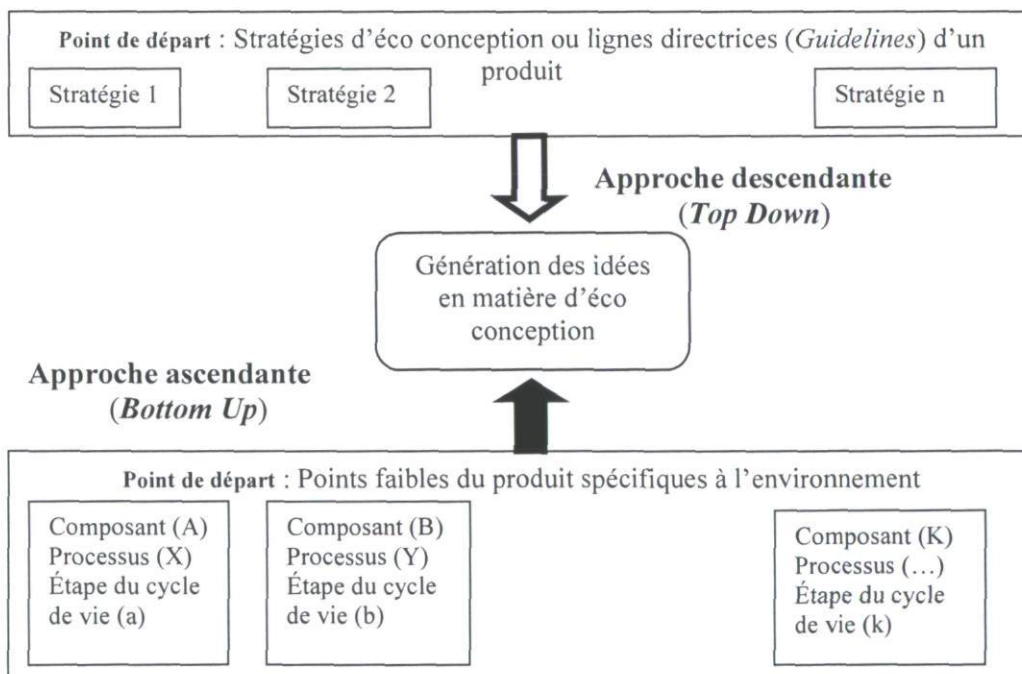
### **3.2.1 Aspects techniques « *Hard Eco design* » de l'éco conception**

En vue de traiter les aspects *Hard* de l'éco conception, nous avons procédé à une analyse scrupuleuse des travaux de Park et *al.* [47], de Trappey et *al.* [61], de Masui et *al.* [40], et de Hsiang-Tang Chang [30] en procédant à des adaptations qui permettent de remédier à certaines insuffisances.

- Park et *al.* ont généralisé les méthodes d'éco conception en procédant d'abord au classement des méthodes d'évaluation environnementales existantes en deux catégories d'approches distinctes (voir figure (17)) : Approches ascendantes (*Bottom up*) et Approches descendantes (*Top down*).

Les approches ascendantes (*Bottom up*) (Gertsakis et *al.* (1997), Keoleian et *al.* (1993), Meinders, (1997)) où les points faibles spécifiques à l'environnement d'un produit ; spécifiques à l'environnement sont identifiés, et cette information est utilisée pour générer les idées d'éco-conception. C'est plus facile de générer des idées avec cette approche puisqu'elle permet de spécifier les points faibles. Son inconvénient majeur est que l'information est issue du produit déjà existant, d'où la difficulté de générer des idées créatrices (Ha) [26].

Les approches descendantes (*Top down*) (ISO14062 :2002, *United Nation of Environmental Program* (UNEP)/*Promising Approach* élaborée par Brezet et *al.* (1997)) où les stratégies d'éco conception ou les lignes directrices sont le point de départ pour la génération des idées en matière d'éco conception (voir le paragraphe 4.2.1). Le principal avantage de l'approche Top-down est qu'elle permet aux concepteurs de produire des idées créatives. Toutefois, il est difficile de générer de meilleures idées et plus détaillée, du fait que les objectifs d'amélioration de produits sont souvent peu clairs.



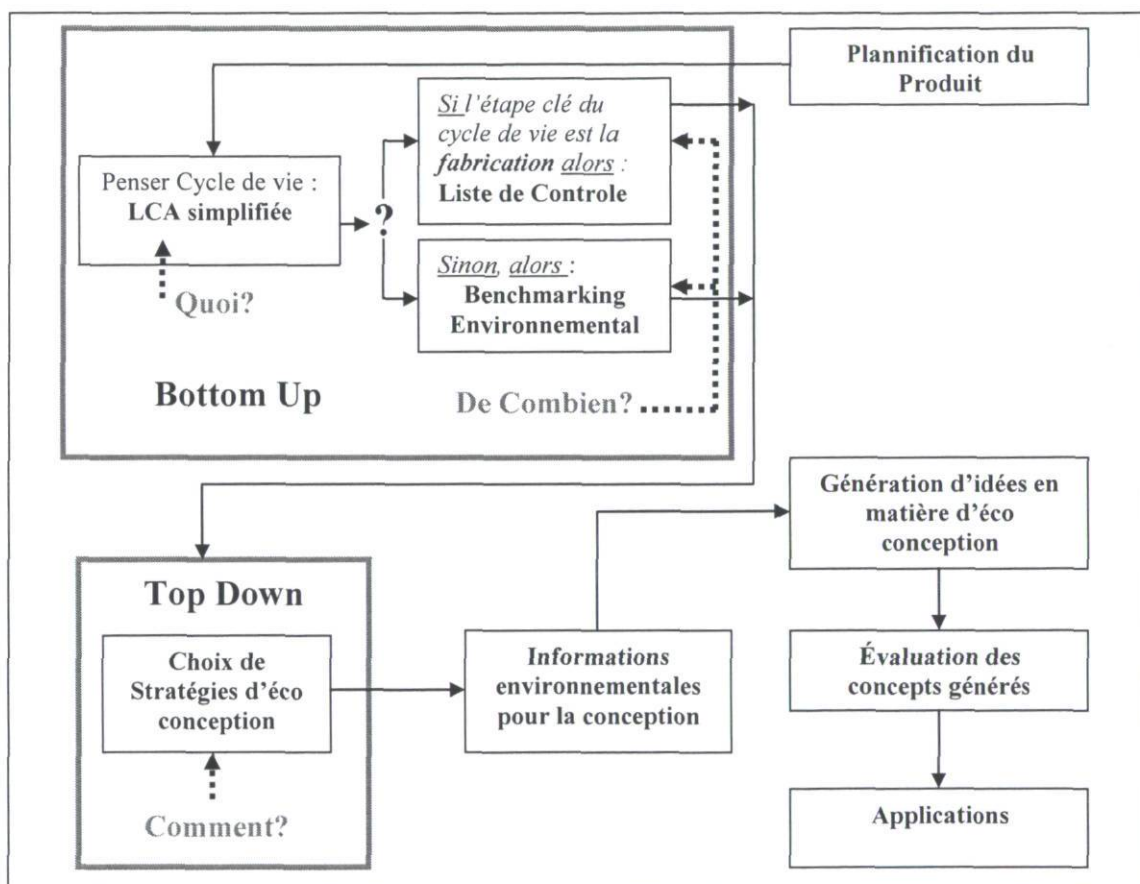
**Fig. 17 : Approches ascendante et descendante de l'éco conception**

Source : Park et *al.* (2005)



En vue de remédier à ces imperfections, Park et al. [47] ont proposé une approche combinée de l'évaluation environnementale dite *Top down/Bottom up*. Cette approche composée de sept étapes est illustrée dans la figure (18):

- 1) Planification du produit,
- 2) **Évaluation environnementale** « *Bottom up* »,
- 3) **Sélection des stratégies de l'éco conception** « *Top down* »,
- 4) Informations Environnementales pour la conception,
- 5) Génération d'idées en matière d'éco conception,
- 6) évaluation des concepts générés et,
- 7) Application)



**Fig. 18 : Approche combinée d'éco conception Top down/Bottom up**

Proposée par Park et al. (2005) :

Outils de l'évaluation environnementale : **Quoi ?** (LCA simplifiée) ; **De Combien ?** (Benchmarking Environnemental et /ou Liste de contrôle) et **Comment ?** (Stratégies d'éco conception)

Park et al. [47] , dans cette approche combinée mettent l'accent essentiellement sur l'évaluation environnementale (point fort de l'approche combinée) et le choix des

stratégies de conception; deux points très importants qui permettent de définir le problème de l'éco conception d'un produit .Ils recommandent qu'elle doit être conduite par un groupe d'experts ayant au moins une expérience de six mois dans le domaine d'éco conception et que la méthode de Delphi doit être adoptée pour valider les paramètres environnementaux du produit à cibler , ainsi que le type de stratégies d'éco conception à suivre pour résoudre le problème de conception , cependant ils ne fournissent pas une méthodologie pour chercher les solutions possibles voire une méthode systématique aboutissant au meilleur éco concept.

- Afin de remédier à ces points faibles Trappey et *al.* [61] ont recommandé part d'utiliser systématiquement la méthode du Déploiement de la Qualité pour l'Environnement *QFDE* proposée par Masui et *al.* [40] à trois phases pour :

- 1) Déterminer aussi bien les paramètres environnementaux critiques du produit et les stratégies d'éco conception correspondant à la voix de l'environnement(*VOE*) et ainsi éviter utiliser la méthode Delphi
- 2) En suite, déterminer les paramètres techniques de conception à améliorer en associant aussi bien la voix de l'environnement à la voix du client (*VOC*)
- 3) D'autant plus, bien poser le problème de conception en déterminant les composants du produit déjà énumérés lors de l'étape la planification produit.

Ensuite, en vue de résoudre les problèmes de conception Trappey et *al.* [61] ont manifesté une affinité à la méthode Substances-champs (*Su-Fields*) une variante de la méthodologie de résolution des problèmes inventifs dite dans L'acronyme russe (Teoriya Resheniya Izobreatelskikh Zadatch) *TRIZ*.

- Toutefois, nous avons enregistré les sensibilités suivantes :

- 1) Au niveau de l'évaluation du cycle de vie de produit, bien que l'utilisation de la méthode simplifiée de l'analyse du cycle de vie (*LCA simplifiée*) (voir paragraphe 4.2.1) permet de gagner le temps, le fait de ne considérer que l'étape du cycle de vie la plus importante dans la suite de la méthodologie risque de réduire le champ de résolution des problèmes de l'éco conception et par suite un manqué d'efficacité.
- 2) Au niveau de l'évaluation environnementale relative aux parties prenantes, le choix aussi bien des paramètres environnementaux et les stratégies d'éco conception peuvent issues des listes génériques proposées dans les travaux de Masui et *al.* [40], notamment pour les éco concepteurs débutants.
- 3) En adoptant les remèdes de Trappey et *al.* [61] au niveau de la définition du problème de conception (*QFDE* à trois phases), on constate qu'ils considérés la voix du client(*VOC*) et la voix de l'environnement (*VOE*) à égalité d'importance .Il conviendra

de faire une étude de sensibilité pour aider le décideur à bien choisir sa stratégie de conception.

- 4) En adoptant les propositions de Trappey et *al.* [61] au niveau de la résolution du problème de conception par la méthode *Su-Fields* de *TRIZ*, rien ne garantit que la solution du problème bien qu'elle soit innovante est bonne pour l'environnement. Nous nous appuyons sur les travaux de Hsiang-Tang Chang [30] pour surmonter ce risque.
- 5) Une fois la résolution des problèmes d'éco conception aboutit à un ensemble de concepts verts et innovants, il faut choisir un éco concept de base pour développer les étapes postérieures Park et *al.* [47] ou Trappey et *al.* [60], bien qu'ils évoquent l'évaluation des éco concepts, ils ne précisent pas via une méthode systématique le comment faire. Nous proposons l'intégration d'un outil d'aide à la décision multicritère *AHP/ANP*.
- 6) Les exemples illustratifs de Park et *al.* [47] et Trappey et *al.* [61] relèvent de l'industrie électronique (téléphones portables et adaptateur de courant électrique). Le traitement d'autres exemples issus de l'industrie chimique, mécanique ou aérospatiale par exemple aurait enrichi l'applicabilité de ces approches combinées.

### 3.2.2 Aspects Organisationnels «*Soft Eco design*» de l'éco conception

En vue de traiter les aspects *Soft* de l'éco conception, dans cette la présente recherche, on a procédé à une analyse scrupuleuse;

- Des grands travaux de Baumann et *al.* [7] portant sur *650 articles* pour identifier les aspects contextuels contraignant la mise en œuvre réussie de l'éco conception,
- Des travaux de Boks [9,10] pour structurer les obstacles et incitations à la mise en œuvre de l'éco conception
- les travaux empiriques de Ehrenfeld & Lenox [4] sur les structures organisationnelles de bonne pratique de l'éco conception et identifier les fonctions critiques en rapport avec les activités et les projets de l'éco conception.
- l'étude empirique de l'université Delft (*Netherlands*) [9,53] sur l'industrie électronique asiatique pour élaborer une procédure de diagnostiquer le processus de conception et développement des produits afin d'élaborer un plan d'action servant d'appui à la démarche méthodologique intégrée proposée dans cette recherche.



## 4. Approches & principaux Outils de l'éco conception: Revue de littérature

### 4.1 Portée & limites des normes environnementales

#### 4.1.1 Le système de management environnemental (SME)

Le système de management environnemental (SME) est un outil de gestion de l'entreprise qui lui permet de s'organiser de manière à réduire et à maîtriser ses impacts sur l'environnement (revoir le paragraphe 1.2). Il inscrit dans la durée l'engagement d'amélioration environnementale de l'entreprise en lui permettant de se perfectionner continuellement (Vaute) [64]. La figure (19) résume les paragraphes du chapitre 4, de la norme ISO 14001 :2004 qui permettent de constituer, mettre en place, évaluer et entretenir un système de management environnemental.

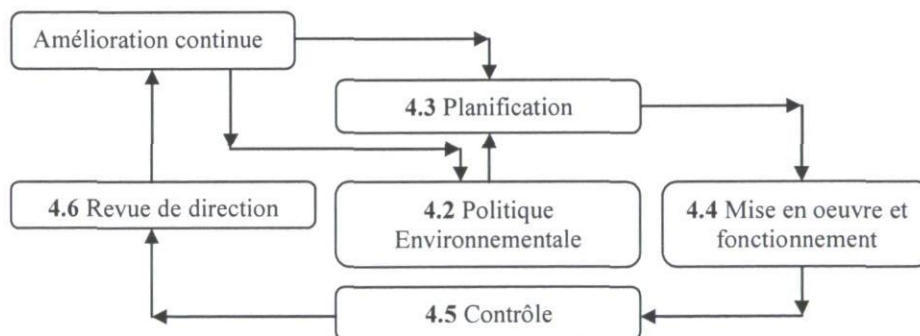


Fig.19 : La norme ISO 14001 : 2004, la logique PDCA,  
Source : inspirée de Vaute, (2007).

Les principaux objectifs d'un SME sont :

- Respecter la réglementation avec un dépassement des objectifs initiaux.
- Maîtriser les risques pour le site.
- Maîtriser les coûts des déchets par des économies d'énergie et de matière première.
- Améliorer la performance du système de management avec l'introduction d'un nouvel angle critique,
- Se différencier par rapport à la concurrence,
- Valoriser l'image de l'entreprise et

- Communiquer de manière transparente vis-à-vis du personnel, des riverains, des clients, des assureurs, etc.

Un des avantages les plus importants de la norme ISO sur le management environnemental, c'est qu'elle peut influencer le comportement des entreprises à l'égard de l'environnement. Elle conduit à une méthode de travail normalisée à laquelle les entreprises qui exportent leurs produits vers le marché mondial doivent se conformer. Plus souvent, les clients exigent une vérification que leurs fournisseurs prennent leur responsabilité au sérieux.

Le point faible du SME est que l'intégration des questions environnementales dans les stratégies de conception de produits ne reçoit qu'une attention très limitée (Cramer) [11] ; C'est-à-dire que l'adoption de la norme ne garantit pas des résultats optimaux de l'environnement. Comme indiqué par la norme ISO: *"Il est à noter que cette norme n'établit pas d'exigences absolues pour les performances de l'environnement au-delà de l'engagement, dans la politique, au respect des lois et règlements applicables et à l'amélioration continue. Ainsi, deux organisations exerçant des activités similaires mais ayant différentes performances environnementales peuvent à la fois se conformer à ses exigences"*.

Ainsi, la norme ISO 14001 n'a pas l'intention de fixer des objectifs absolus pour la performance environnementale des entreprises. Les objectifs de l'entreprise dépendront de sa stratégie environnementale particulière (Starick et al.) [52].

En d'autres termes, ISO 14001 fournit le cadre approprié, tandis que les objectifs environnementaux fixés par l'entreprise déterminent le niveau d'ambition environnementale.

La portée de cette ambition peut varier considérablement. En effet, les entreprises peuvent apporter trois types d'améliorations environnementales au sein de la chaîne de production (Cramer) [11];

- Incrémentation étape par étape des changements dans leurs produits, qui nécessitent l'implication des différents acteurs au sein de l'entreprise et, parfois ses clients et fournisseurs,
- De profonds changements dans les produits existants, qui nécessitent l'appel à une plus grande communication et une coopération entre tous les acteurs de la chaîne du produit.
- Des changements radicaux dans la fonction du produit, qui ne peuvent être fait sans provoquer des changements fondamentaux dans la production et la consommation

#### 4.1.2 ISO/TR 14062: 2002

ISO / TR 14062: 2002, *Management environnemental-Intégration des aspects environnementaux dans la conception et développement* est une norme internationale qui fournit des conseils à mettre en œuvre en matière d'éco-conception.

La norme définit l'**aspect environnemental** tout élément d'activités, produits ou services d'un organisme susceptible d'interagir avec l'environnement. Plus l'aspect environnemental est significatif, plus l'impact sur l'environnement est aussi significatif " (ISO, (2002)) [31].

Le Rapport Technique de cette norme décrit les concepts et les pratiques courantes en relation avec l'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement des produits. Il s'adresse à tout utilisateur impliqué dans le processus de conception et développement de produits indépendamment du type d'organisation, sa taille, son lieu ou sa complexité. Le Rapport Technique n'est pas destiné à être utilisé en tant que spécification, à des fins de certification et d'enregistrement, mais il peut être utilisé dans l'élaboration de documents spécifiques à un secteur d'activités.

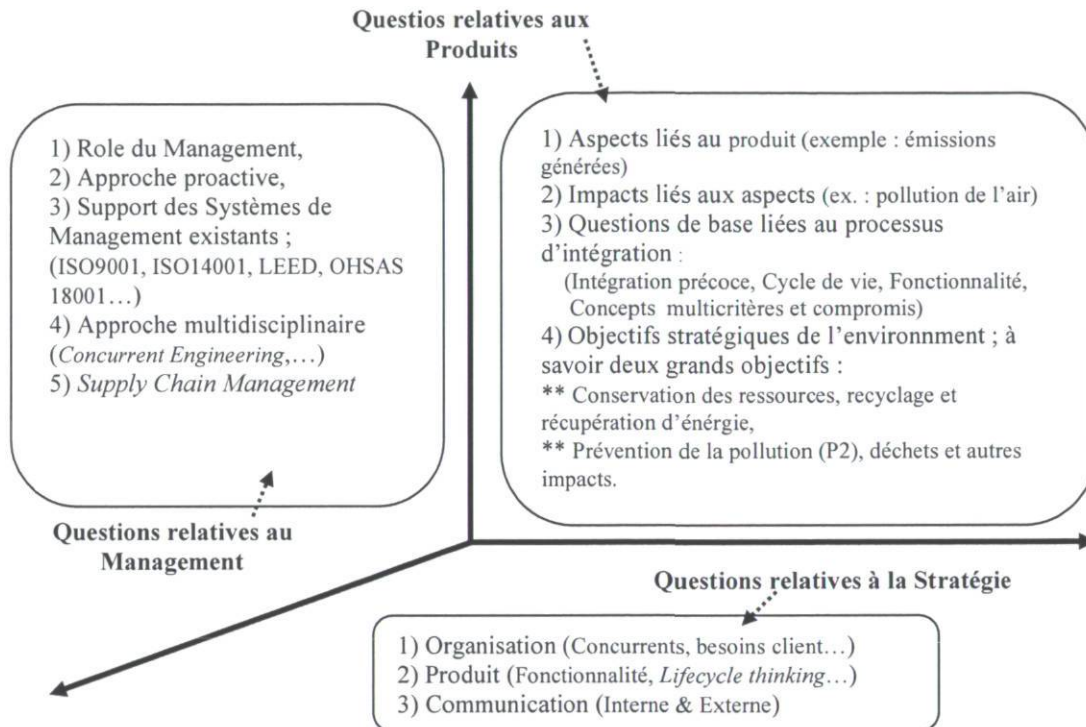
Un des traits les plus marquants de l'ISO / TR 14062 est son approche holistique qui intègre les aspects environnementaux des produits aux processus de la conception et développement existants (Kun-Mo et Park) [36]. En fait, Kun-Mo et Park précisent que la clé de réussite de l'intégration des aspects environnementaux dans les processus de conception et développement existants réside dans la considération de trois dimensions : Le Produit, la Stratégie et le Management. La figure (20) illustre les questions relatives à ces dimensions. Par conséquent, une organisation peut se décider de la combinaison d'approches de conception à mettre en œuvre pour répondre aux objectifs stratégiques de l'environnement.

ISO / TR 14062 propose un modèle générique de conception et développement de produits composée de six étapes :

- Planification (planification et la formulation de l'exigence de produits),
- Design conceptuel (réalise les exigences de produit)
- Conception détaillée (actions supplémentaires pour répondre aux spécifications de conception du produit avant la production),
- Test /prototypage (pour vérifier la conception détaillée par rapport aux objectifs environnementaux et autres spécifications),
- Lancement du marché (la Délivrance des produits sur le marché et de la communication de renseignements sur les caractéristiques du produit et des avantages pour les clients) et,



- Revue des produits (vise à déterminer si les attentes de l'organisation, les clients et autres parties prenantes est une source d'information importante pour l'organisation d'améliorer les produits actuels ou futurs.



**Fig. 20 : ISO/TR 14062 version 2002 : Approche holistique de l'intégration des aspects environnementaux dans les processus de conception et développement existants**

Source : inspirée de Kun-Mo et Park (2005)

Le principal avantage de cette approche holistique ; comme toute approche descendante, est qu'elle permet aux concepteurs de produire des idées créatives (Voir le paragraphe 3.2.1), du fait que les stratégies d'éco conception ou les lignes directrices sont le point de départ pour générer les idées en matière d'éco conception. Toutefois, il est difficile de générer de meilleures idées et plus détaillée, du fait que les objectifs d'amélioration de produits sont souvent peu clairs.

## 4.2 Principaux outils de l'éco conception

### 4.2.1 Analyse du cycle de vie :

Le cycle de vie du produit peut être divisé en cinq étapes: l'acquisition des matières premières (MP), la fabrication, la distribution, l'utilisation/la maintenance et l'élimination en fin de cycle de vie.

L'analyse du cycle de vie (*Life Cycle Assessment LCA*) est un outil quantitatif standard défini par la série ISO 14040 qui permet d'analyser les impacts environnementaux d'un produit, durant toutes les étapes de son cycle de vie. Pour chaque étape, *LCA* comptabilise les intrants (matières et énergie) et sortants (produit, coproduits, émissions dans le sol, l'eau et l'air). De cette manière, il est difficile de transférer par inadvertance les impacts néfastes sur l'environnement d'un stade de cycle de vie à un autre (Telenko et al.) [58].

La figure (21) illustre les étapes à suivre pour identifier les impacts environnementaux d'un produit, procédé ou service en conduisant une évaluation du cycle de vie.

On peut distinguer deux grandes phases :

- La modélisation du produit qui consiste à analyser la composition du produit et à développer les différents scénarii de son cycle de vie et
- L'évaluation proprement dite du cycle de vie qui se déroule en quatre sous phases :
  - 1) La définition du système de Produit et la détermination de l'objectif de l'étude,
  - 2) Le calcul des inventaires,
  - 3) La classification et la caractérisation des impacts environnementaux et enfin
  - 4) L'interprétation des résultats de l'évaluation du cycle de vie.

D'un point de vue fonctionnel, on distingue deux fonctions extrêmes de *LCA* (Hochschorner et Finnveden) [29] :

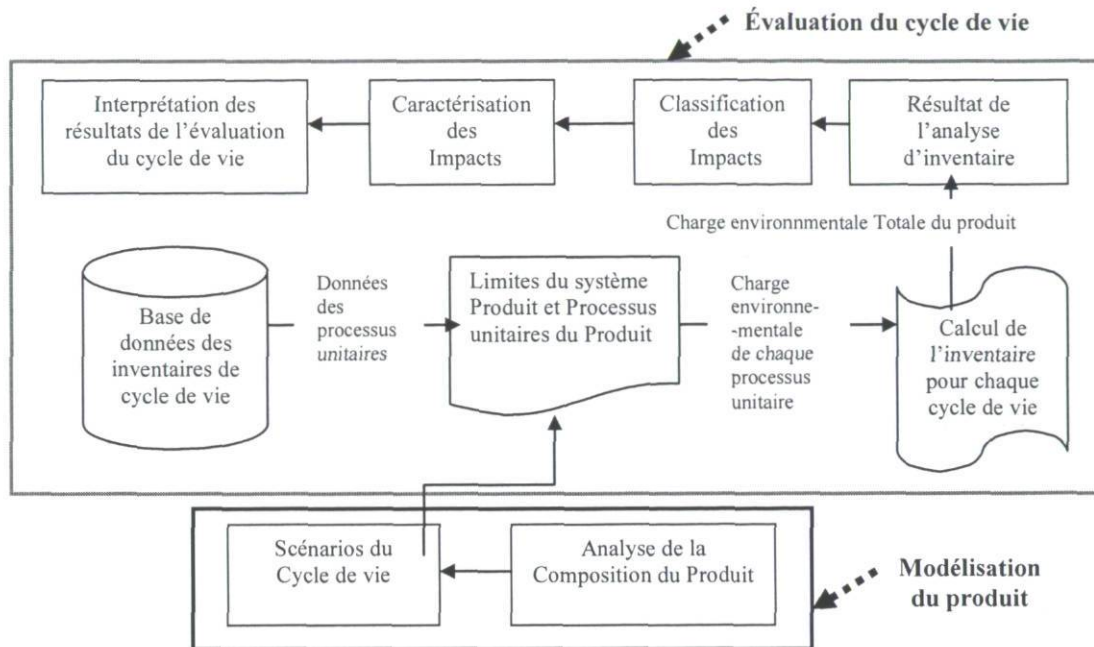
- Soutenir le choix entre deux ou plusieurs alternatives (Life cycle scenarios);
- Identifier les aspects environnementaux critiques et proposer des stratégies d'atténuation des impacts (C'est cette fonction qui nous intéresse dans cette présente recherche).

Dans la pratique, ces deux fonctions peuvent être pertinentes pour une étude de cas spécifique, mais l'accent mis sur les deux fonctions peut varier. En fait, Il est beaucoup plus important d'avoir des données quantitatives pour la première fonction que la seconde fonction.

De point de vue qualité et quantité d'informations disponibles à l'appui d'une décision, il existe trois niveaux de base pour mener une évaluation du cycle de vie (*LCA*) (Hochschorner et Finnveden) [29]:

- 1er niveau ; Matrice *LCA* : Analyse qualitative ou semi-quantitative,
- 2ème niveau ; Étude préalable ; Screening *LCA* : Analyse quantitative ou semi-quantitative, utilisant des données facilement disponibles,
- 3ème niveau ; Étude *LCA* complète : Analyse quantitative normalisée, incluant de nouvelles données de l'inventaire.

L'évaluation complète du cycle de vie pourrait être très coûteuse et prend du temps, de sorte que seules les grandes entreprises peuvent se permettre de le faire. Il y a eu des efforts pour régler ces questions en élaborant des Évaluations de cycle de vie simplifiées (*Simplified LCA*) à des fins de dépistage.



**Fig.21 Étapes à suivre pour identifier les impacts environnementaux d'un produit,**  
On distingue deux phases : La modélisation du produit et l'évaluation du cycle de vie proprement dite  
Source : Ramani et al. (2010).

#### 4.2.3 Le Benchmarking Environnemental (BE)

Le Benchmarking est une méthode qui extrait systématiquement des informations pour améliorer un produit en comparant ses paramètres spécifiques par rapport à ceux des produits concurrents (Kun-Mo & Park) [36].

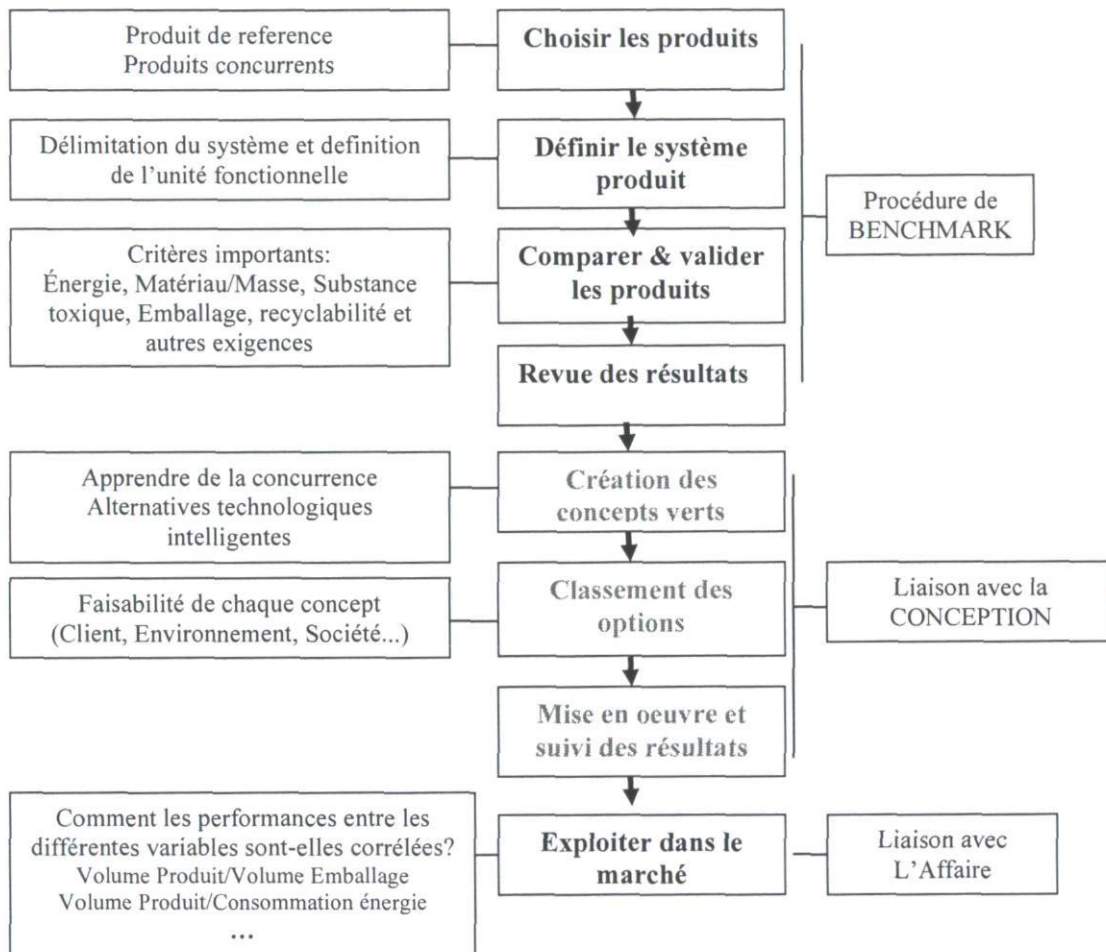
Le(BE) est une modification du procédé classique de Benchmarking, où seuls les paramètres environnementaux sont à comparer.

Cette méthode a été développée en 1997 par Le ECC (*Environmental Competence Centre*) à Philips Électronique grand public et DUT (*Delft University of Technology*). C'est une méthode robuste, reproductible et pratique, et basée sur l'évaluation des cinq domaines d'intervention (Boks et Stevels) [11]:

- Énergie,
- Matériau/masse,
- Emballage,
- Substances potentiellement toxiques et
- Recyclabilité.



Telle qu'elle figure dans un document officiel de Philips, La méthode (BE) est définie par l'organigramme de référence, décrit dans la figure (22). Ici, l'organigramme ne comprend pas seulement le (BE) des produits en tant que tel, mais il positionne cette activité dans une approche intégrée qui facilite l'exploitation des résultats de référence.



**Fig. 22 : Procédure de Benchmarking Environnemental mise en œuvre à Philips**

Source: Inspirée de Boks et Stevel (2003)

D'après Ram et Saleminck (1998)

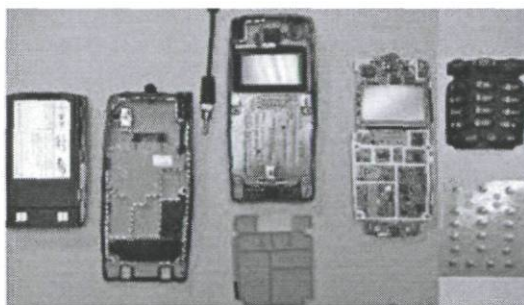
Plusieurs projets de recherche concluent que les questions environnementales sont perçues différemment par les parties prenantes (Client, Personnel commercial, les académiciens et le gouvernement...). Le tableau (2) en annexe 1 montre un exemple des produits Audio (Slevens et al.) [11] où la différence dans la perception crée un dilemme aussi bien pour les producteurs sur la façon de classer les options d'amélioration provenant de la procédure du (BE), que pour les managers de produit sur la façon d'exploiter les résultats sur le marché.

Afin de faire face à ce dilemme, un compromis peut être fait par pondération des améliorations environnementales ayant une incidence sur les différents domaines d'intervention. Par exemple en vue de mieux comprendre les avantages et les problèmes des différentes approches du (BE) dans l'industrie automobile (Rothenberg et Maxwell) [52] ont constaté que décider comment mesurer la performance environnementale était une tâche beaucoup difficile que prévu. Ils ont classé les différentes approches de mesure des performances environnementales en quatre catégories. Le tableau (3) en annexe 1 présente les avantages et inconvénients de chaque catégorie.

Ils concluent que les entreprises de l'industrie automobile suivent des approches différentes de (BE) en fonction du contexte réglementaire et de la stratégie d'affaires. Le type de produit, la culture d'entreprise et de la société, les coûts des ressources, toutes les demandes des parties prenantes ont également une influence sur le choix de l'approche (BE). Et globalement, les programmes les plus robustes du Benchmarking environnemental doivent intégrer les éléments de ces quatre approches.

Nous donnons ici deux exemples de paramètres du (BE) utilisés dans l'industrie électrique et électronique et l'industrie mécanique. Le tableau (4) en annexe 1 montre les 31 paramètres environnementaux développés pour l'industrie électronique (voir la figure (23)) par Park et al. [47]

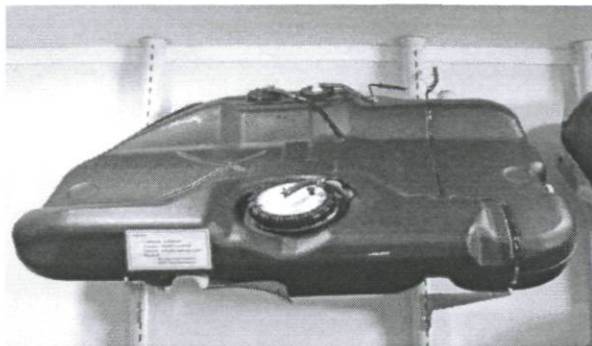
Le tableau (5) en annexe 1 montre un exemple développé par Wimmer et al. [66] des paramètres environnementaux arrangés selon les étapes du cycle de vie d'un réservoir de carburant illustré dans la figure (24)



**Fig.23 : Composants d'un téléphone portable**

Plus de 1500 pièces : (~21,1% métaux) pour Coque et autres composants, (~15%Cu) pour les Câbles, (~55% plastique ou fibres de verre) pour Carte mère et écran ; (~4%Co, Li, C..) pour batterie, ...

Sources : (<http://sciences.comonthey.ch/?m=201011>) et ([http://www.treehugger.com/files/2007/01/the\\_littlest\\_pa.php](http://www.treehugger.com/files/2007/01/the_littlest_pa.php))



**Fig. 24 : Réservoir de carburant d'une voiture Coréenne**  
 (Composé de : coque, protecteur de chaleur, module de pompe à carburant, et d'autres composants d'assemblage)  
 Source: Wimmer et *al.* (2005)

#### 4.2.4 Méthode d'évaluation dite Liste de contrôle (*Check-list*)

La liste de contrôle peut être définie comme étant un moyen mnémotechnique qui consiste en une liste des activités, articles, et critères utilisés pour effectuer une certaine tâche.

Lorsqu'elles sont utilisées dans l'évaluation, des listes de contrôle permettent d'orienter la collecte des éléments de preuve pertinents pour déterminer la valeur ou l'importance d'un paramètre (Hsiang-Tang Chang) [30] et Martz (2010) [39].

Cette méthode est recommandée par Park et *al.* [47] à la place du (*BE*) lorsque l'étape clé du cycle de vie identifiée par *LCA* est la fabrication.

En fait, les paramètres de la liste de contrôle sont développés sur la base de tous les intrants (y compris le matériel auxiliaire et énergies) et sorties (y compris les déchets et les émissions dans l'air de l'eau) (Zhang et *al.*) [68]. Il faut noter que les entrées de matières premières et des produits ou coproduits ne sont pas inclus dans la liste de contrôle parce que les problèmes environnementaux du processus de fabrication ne proviennent seulement que de l'utilisation des matériaux et de la production d'émissions. Le tableau (6) en annexe 1 comprend un exemple de paramètres environnementaux issus d'une liste de contrôle.

#### 4.2.5 Sélection des stratégies d'éco conception

La stratégie d'éco conception peut être considérée comme une intervention de conception destinée à tenir compte du comportement d'un produit vis-à-vis de l'environnement, au cours de son cycle de vie. Elle doit, en général, avoir l'objectif principal d'optimiser la répartition des flux de ressources et des émissions par :



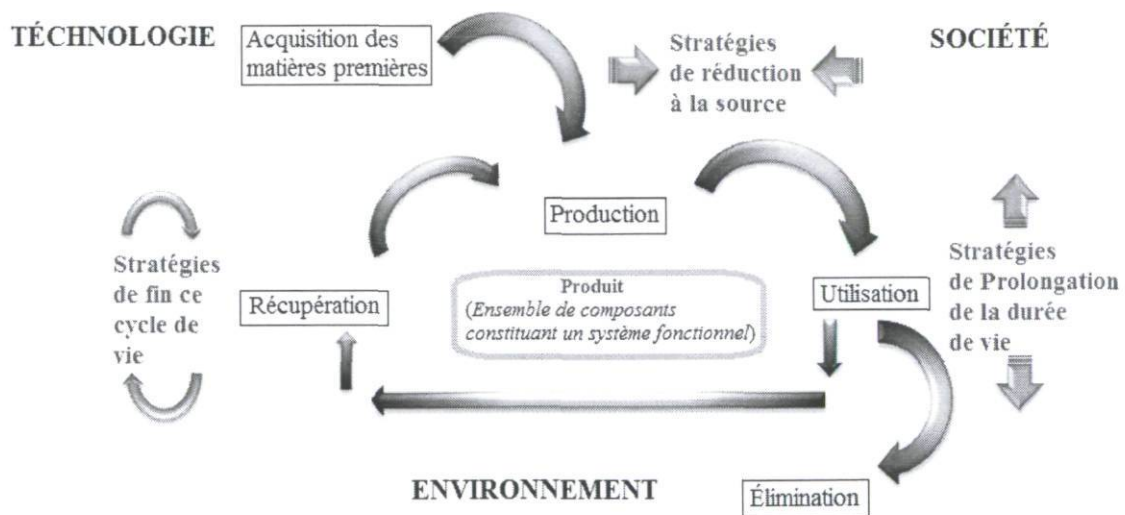
- La réduction des volumes de matériaux utilisés et l'extension de leur durée de vie,
- La fermeture des cycles des flux de ressources grâce à des interventions de récupération,
- La réduction au minimum des émissions et de la consommation d'énergie dans la production, l'utilisation et l'élimination.

Pour atteindre pleinement ces conditions, il est nécessaire d'intervenir dans deux zones séparées : La conception des produits et la conception des processus (Giudice et *al.*) [25].

Le sujet de ce mémoire concerne plutôt la conception des Produits ; ces produits étant définis comme un ensemble de composants conçus en tant que systèmes fonctionnels pour répondre à certaines exigences.

La figure (25) montre le positionnement de trois catégories des grandes stratégies d'éco conception d'un produit :

- Stratégies de réduction à la source (dématérialisation), dont l'éco conception des processus joue un rôle prépondérant.
- Stratégie de Prolongation de la durée de vie (Maintenance, réparation, mise à neuf et adaptation)
- Stratégies de fin de cycle de vie (Réutilisation des systèmes et composants, le recyclage des matériaux dans le cycle de production primaire ou dans les cycles externes)



**Fig. 25 : Les 3 catégories de stratégie d'éco conception d'un produit**

Source: Giudice et *al.* (2006), Product Design for Environment: A life cycle Approach, Edition Taylor & Francis Group, LLC

Ces stratégies diffèrent d'une catégorie de produits à une autre, puisque les caractéristiques environnementales de chaque catégorie sont uniques.

La sélection de stratégies pertinentes en matière d'éco-conception est une action essentielle à la réussite de l'éco-conception (Ulrich & Eppinger) [63].

Il existe trois sources bien connues qui peuvent aider à choisir les stratégies d'éco-conception (Kun-Mo & Park) [36] :

- (*Life cycle design guidance manual*) Keolean and Menerey, (1993)
- Approche de Thompson (Thompson, 1999).
- (UNEP /*Promising Manual*) Brezet et Hemel, (1997)

Les tableaux (6) et (7) en annexe 1 donnent des exemples de stratégies d'éco conception élaborées pour l'industrie électrique et électronique respectivement associées à la fabrication et les autres étapes du cycle de vie.

#### 4.2.6 Déploiement de la fonction qualité pour l'environnement

Le produit peut être vu comme un ensemble de trois aspects (Subversion assembla, <http://subversion.assembla.com/svn/90a10qf/td1/td1.pdf>) [59]:

- a) Fonctions de service (Protection, transport, cuisson,...),
- b) fonctions techniques (Systèmes informatiques, systèmes de motorisation,...) et
- c) composants (Puces, engrenages, vis,...).

Le client n'identifie pas clairement ces trois aspects, ce qui l'amène à des attentes où se mêlent sans distinction les fonctions de service, les fonctions techniques et les composants.

En vue de clarifier les attentes du client et mieux dégager des solutions techniques adéquates, Toyota a inventé dans les années 1950 un outil d'organisation *QFD* (*Quality Function Deployment*); le Déploiement de la Fonction Qualité.

C'est une représentation matricielle appelée « maison de qualité » (*House Of Quality HOQ*), capable de coupler simultanément la voix des clients (*Voice Of Customers VOC*) ; exigences perçues et formulées à partir de l'étude du marché (fonctionnalité, fiabilité, durabilité, facilité d'utilisation et de maintenance, moins cher, moins consommable de matière et d'énergie ...) et les caractéristiques techniques du produit (masse, volume, *MTBF*, bruit, Puissance, vitesse, débit...) ; déterminées généralement à partir du Benchmarking, Ingénierie inverse et/ou recherches techniques (Dieter & Schmidt) [17].

La figure (26) illustre les huit éléments de la maison qualité qui sont :

- 1) la Voix du Client(*VOC*) exprimées en degré d'importance relative, couplée aux
- 2) caractéristiques techniques;
- 3) les corrélations entre les (*VOCs*) et entre les caractéristiques techniques (indifférence, effet de synergie ou bien contradiction);
- 4) les attributions aux caractéristiques techniques sur une échelle ordinale de 0 à 9;
- 5) le classement par importance relative des caractéristiques techniques;
- 6) l'évaluation des produits concurrents par le client;

- 7) l'évaluation technique et
- 8) les valeurs cibles pour les caractéristiques techniques.

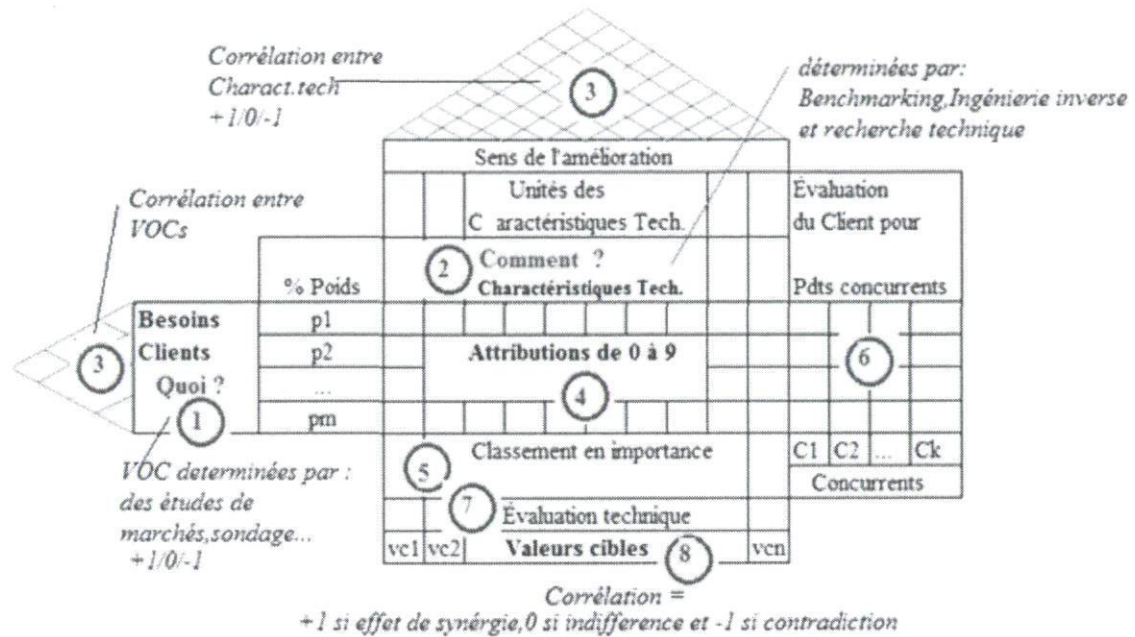


Fig. 26 : Les 8 éléments de « la maison Qualité » HOQ

Source: Engineering Design. Dieter & Schmidt, (2009)

Il doit y avoir un nombre minimum de "maisons" HOQ à accomplir en processus de développement produit pour profiter des avantages du QFD. En fait, le terme « déploiement » dans le QFD réfère au fait que cette méthode détermine l'ensemble des besoins importants pour chaque phase du processus de développement, et les utilise pour identifier l'ensemble des caractéristiques techniques de chaque phase qui contribuent le plus à satisfaire les exigences.

La figure (27) montre le minimum de HOQ que l'on doit utiliser pour le développement d'un produit, à savoir :

- \* HOQ 1 (VOC, Caractéristiques techniques)
- \* HOQ 2 (Caractéristiques techniques, Caractéristiques des composants)
- \* HOQ 3 (Caractéristiques des composants, Besoins processus) et
- \* HOQ 4 (Besoins processus, Besoins de production)



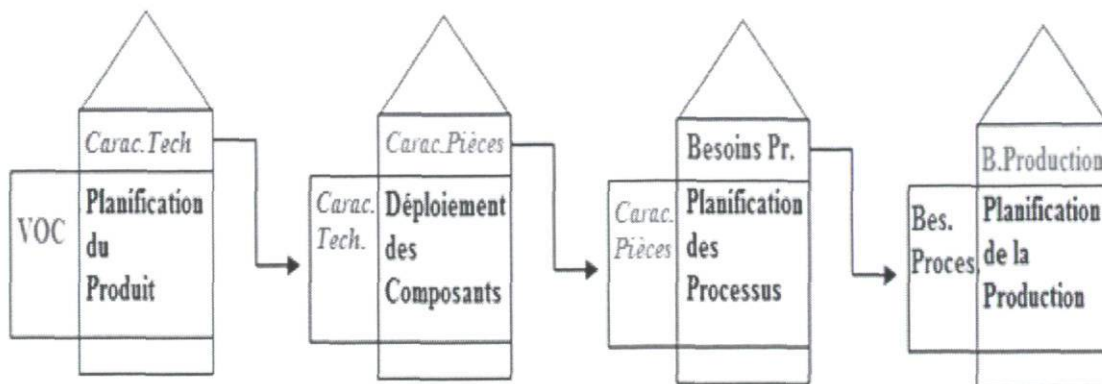


Fig.27 : Diagramme montrant les 4 HOQ du processus complet QFD

Source: Engineering Design. Dieter & Schmidt, (2009)

Cependant, la déficience du *QFD* est qu'il ne dispose pas d'un mécanisme explicite pour inclure l'évaluation de l'impact environnemental dans le cadre du développement de produit ou de son amélioration (Zhang et al.) [68]. Par suite, plusieurs recherches ont été entreprises pour associer la voix de l'environnement à la voix du client dans le *QFD* notamment : Le *QFD* « vert » (*Green Quality Function Deployment GQFD*) dans lequel l'Analyse du cycle de vie (*LCA*) et le coût du cycle de vie (*Life Cycle Cost LCC*) sont combinés au *QFD* traditionnel pour évaluer différents concepts du cycle de vie (Christofari et al.) [15], le *GQFD-II* ; une amélioration de la première qui fournit un mécanisme en trois phases, et permet de déployer toutes les exigences le long du cycle de vie d'un produit. Ces phases sont : l'identification des exigences techniques, la génération des concepts du produit et la conception aussi du produit et des processus (Zhang et al.) [68], et le *QFDE* (*Quality Functin Deployment for Environment*); une méthode assez simple pour supporter l'éco conception en intégrant simultanément les aspects environnementaux dans le *QFD* traditionnel (Masui et al.) [40] et (Sakao) [54].

Le *QFDE* consiste en quatre phases :

- Phase I : Corréler la voix du client (*VOC*) associée à la voix de l'environnement (*VOE*) avec les caractéristiques techniques (issues aussi bien du Benchmarking et Ingénierie inverse d'une part et le Benchmarking Environnemental ou bien la liste de contrôle d'autre part) sont corrélés.

- Phase II : Corréler les caractéristiques techniques et les composants du produit (identifiés dans l'étape antérieure de planification du produit).

Les éléments de sortie des phases I et II sont l'identification des caractéristiques techniques et les composants critiques sur lesquelles il faut se concentrer lors de la génération des concepts pour répondre aux exigences aussi bien du client que de l'environnement.

- Phases III : Envisager plusieurs alternatives de concepts. Il existe en fait, deux approches pour décider sur quelle caractéristique faut-il se concentrer à priori. Une approche déjà issue d'un objectif cible de *VOC*, l'autre approche qui examine tous les composants critiques obtenus par la phase II.
- Phase IV : Évaluer Les effets des différents changements sur les aspects environnementaux.

#### 4.2.7 Méthodologie de résolution des problèmes inventifs TRIZ

Alors que le *QFDE* permet d'identifier les aspects des produits qui doivent être améliorés, il ne donne pas la façon de les améliorer.

Les techniques de créativité sont très utiles dans le processus de conception afin de résoudre les problèmes de conception, elles peuvent générer une large quantité d'idées en peu de temps. Parmi ces techniques, on distingue ; l'analyse morphologique, l'analyse fonctionnelle, la conception axiomatique et la théorie de résolution des problèmes inventifs *TRIZ* (Dieter & Schmidt) [17].

La théorie de résolution des problèmes inventifs, connue par l'acronyme Russe (*Teoriya Resheniya Izobreatelskikh Zadatch*) *TRIZ* s'intègre bien avec le *QFD*. C'est une méthodologie de résolution des problèmes sur mesure, capable de fournir des solutions conceptuelles innovantes, notamment aux problèmes scientifiques et techniques (Chang Quing et al.) [14]. Dans un cadre générique de la résolution des problèmes, le fondateur de *TRIZ* Genrich Altshuller (1926-1998) ; et son groupe de recherche ont intégré des principes de la bonne pratique inventive et ce, à partir de l'analyse de 3 millions environ de brevets d'invention. Le processus de base de la résolution des problèmes par *TRIZ* est représenté dans la figure (28).

- Au stade d'analyse

Pour passer du problème spécifique au modèle de problème, certains principes de la bonne pratique inventive doivent être assimilés (Pierre-marie Boitel) [49]:

1) Les huit lois de l'évolution d'un système technique; défini comme tout système qui remplit une fonction donnée : Elles permettent d'analyser un système et prévoir son évolution; elles sont subdivisées en :

\*\* Trois lois Statiques qui régissent l'organisation et la viabilité d'un système (Loi d'intégrité des parties d'un système technique, loi de la conductivité énergétique du système et loi de coordination du rythme des parties du système);



\*\* Trois lois Cinématiques qui sont relatives à l'évolution du système technique (Loi de l'augmentation du niveau de perfectionnement, loi de développement inégal des parties d'un système technique et loi de transition vers le super système qui n'est autre que l'environnement global du système);

\*\* Deux lois Dynamiques qui sont relatives à l'évolution du système en tenant en compte des éléments techniques (Loi de transition d'une macro vers un micro niveau et loi d'augmentation du niveau de contrôlabilité).

2) Les Contradictions: *TRIZ* modélise un problème sous forme de deux éléments ou paramètres en conflits. Selon *TRIZ*, une contradiction se produit lorsque l'idéalité d'un sous-système spécifique entraîne une contradiction dans les autres sous-systèmes. En vu de pousser un paramètre du sous-système spécifique à l'idéalité, la performance d'un paramètre pertinent à un autre sous-système pourrait être affectée. Le résultat est l'inefficacité technique et la contradiction avec ce sous-système. La solution à ce problème conduit souvent à un compromis entre le résultat désiré et la contradiction, donc à des performances médiocres. C'est la tentative de passer directement du problème spécifique (1) à la solution spécifique (4).

Afin de distinguer clairement les contradictions, Genrich Altshuller a classé les contradictions en trois catégories ; techniques (puissance versus poids, complexité vs fiabilité, productivité vs précision...), physiques (liquide vs solide/gaz, électro conductivité vs di électricité...) et administratives (nécessité d'investissements plus élevés vs peu d'argent) (Mann) [38].

3) Les Ressources : *TRIZ* privilégie l'utilisation de ressources moins chères et disponibles.

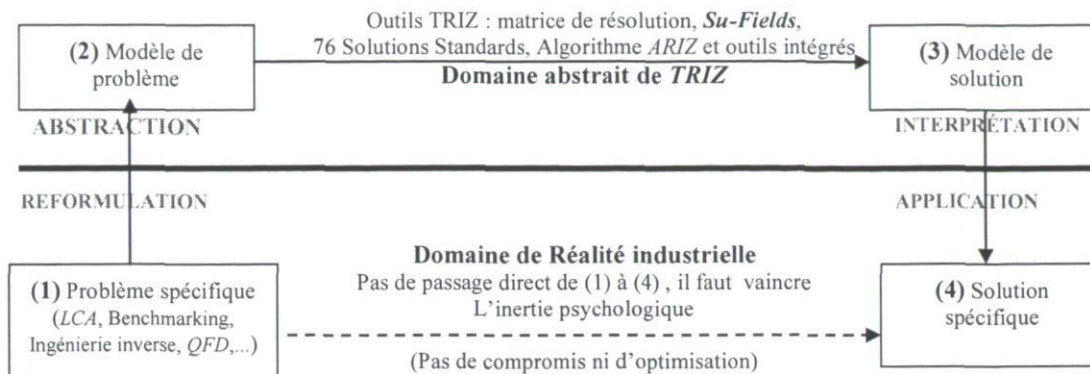
4) Le Résultat final idéal : *TRIZ* oriente le concepteur en permanence vers la solution idéale. En fait, il existe six approches pour situer le résultat idéal final :

- a) Exclure les fonctions auxiliaires,
- b) Exclure des éléments,
- c) Identifier le « *self* »service,
- d) Remplacer les éléments, pièces ou la totalité du système,
- e) Changer le principe de l'opération et
- f) Utiliser les ressources pas encore exploitées dans le système.

5) L'Inertie psychologique : *TRIZ* essaie de casser l'inertie psychologique des concepteurs :

- a) En situant le système technique (Super-système + Système+ Sous-système) dans le temps et l'espace.
- b) En minorant ou intensifiant les paramètres pertinents du problème.
- c) Ne jamais être persuadé que la solution réside dans notre domaine de compétence (par exemple ; problème chimique avec solution en mécanique).





**Fig.28 : Processus de base de résolution des Problèmes par TRIZ**

Source : Inspirée de (Pierre-marie Boitel, [http://www.g-scop.inpg.fr/~boitelp/triz/outils\\_triz.pdf](http://www.g-scop.inpg.fr/~boitelp/triz/outils_triz.pdf))

- Au stade de la résolution des problèmes,

TRIZ propose quatre stratégies différentes pour générer une solution innovante à un problème de conception (Dieter & Schmidt) [17].

- 1) Améliorer une fonction d'un produit ou d'un système en augmentant son idéalité (Prévision technologique, Utilisation des huit lois de l'évolution du système technique).
- 2) Améliorer la performance d'un produit en identifiant sa position par rapport à son idéalité et le forcer à l'étape suivante (Utilisation des effets physiques-Chimiques-Géométriques),
- 3) Identifier les contradictions physiques ou technologiques principales dans le produit et réviser la conception pour les surmonter en utilisant les 40 principes inventifs. La matrice de contradiction est accessible via des sites comme [www.triz40.com/?lan=fr](http://www.triz40.com/?lan=fr) -
- 4) modéliser un produit ou un système en utilisant l'outil d'analyse Substances-Champs (Su-Field), technique de représentation graphique des systèmes techniques qui donne plus de visibilité, et appliquer les modifications candidates.

L'outil de résolution le plus couramment appliqué est la matrice de contradiction. C'est matrice carrée 39x39, composée des 39 paramètres techniques et utilisant 40 principes inventifs. Sauf que, ces principes sont bons pour améliorer la créativité technique, mais ne font qu'effleurer la surface du problème dans les situations compliquées (Livotov) [37].

L'outil Substances-Champs *Su-Fields* et l'algorithme *ARIZ* sont plutôt utilisés pour analyser et modéliser les problèmes avancés de conception (Domb) [16].

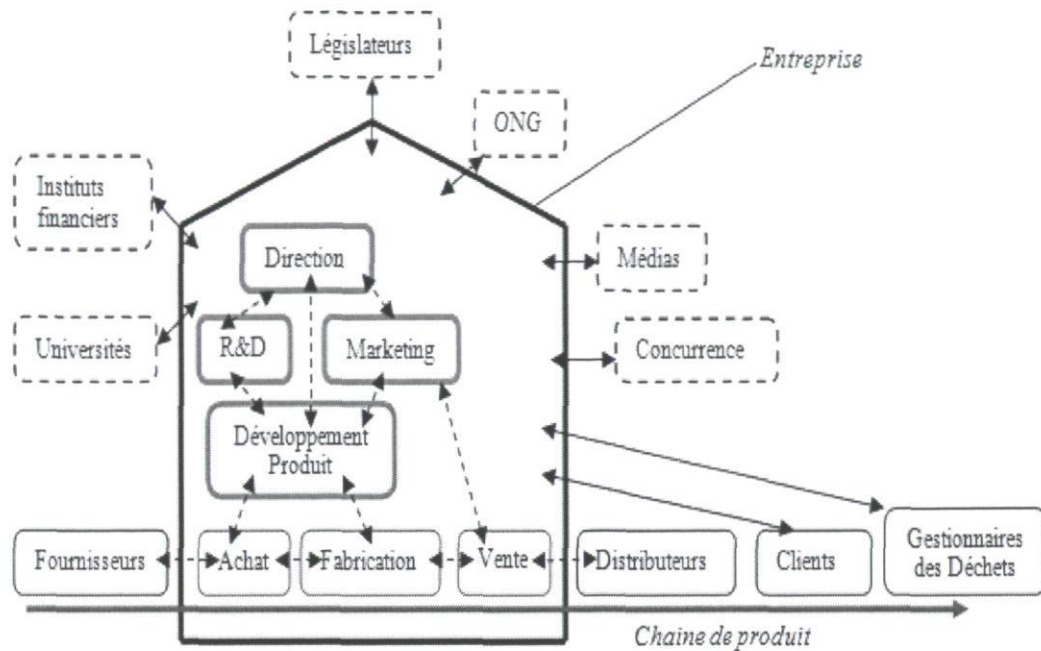
Le modèle d'analyse de Substance-Champs *Su-Fields* que nous adoptons dans cette recherche est capable d'aider les concepteurs à diagnostiquer et à résoudre la plupart des problèmes grâce à un système d'icônes et de symboles et certaines règles de transformation (Hsiang-Tang Chang) [30].

### 4.3 Organisation du processus de l'éco conception

Sur la base de 650 articles issus des trois domaines ; ingénierie de conception, politiques environnementales et perspectives des affaires, un article publié dans *The Journal of Clean Production* en 2002 avait indiqué que malgré l'intérêt donné au développement des produits respectueux de l'environnement , peu de changements avaient eu dans la pratique au quotidien Baumann et *al.* [7]. Parmi les aspects contextuels contraignant la mise en œuvre réussie de l'éco conception:

- Trop de développement des outils : Les références indiquent que les personnes impliquées dans le domaine sont plus intéressés à développer un nouvel outil qu'à étudier et évaluer l'utilisation de ceux déjà existants, en vue de les améliorer.
- Lien trop faible entre l'intention stratégique et le contenu: les approches descendantes aux questions environnementales *Top-Down* (politiques, lignes directrices etc.) et les approches ascendantes *Bottom up* (activités quotidiennes) ne se rencontrent pas réellement dans les affaires.
- Négligence du contexte plus large du développement de produit: Le processus de développement produit au sein de l'entreprise est rarement lié d'autres processus dans l'entreprise, contrairement à ceux externes à l'entreprise.

D'où la nécessité d'adopter dans la recherche et développement des éco produits une approche systémique dans laquelle le processus interne de développement de produit soit lié aussi bien aux processus internes de l'entreprise qu'aux processus de concurrence et de coopération avec les acteurs économiques de la chaîne du produit , comme l'illustre la figure (29).



**Fig.29 : Contexte du processus de développement Produit**

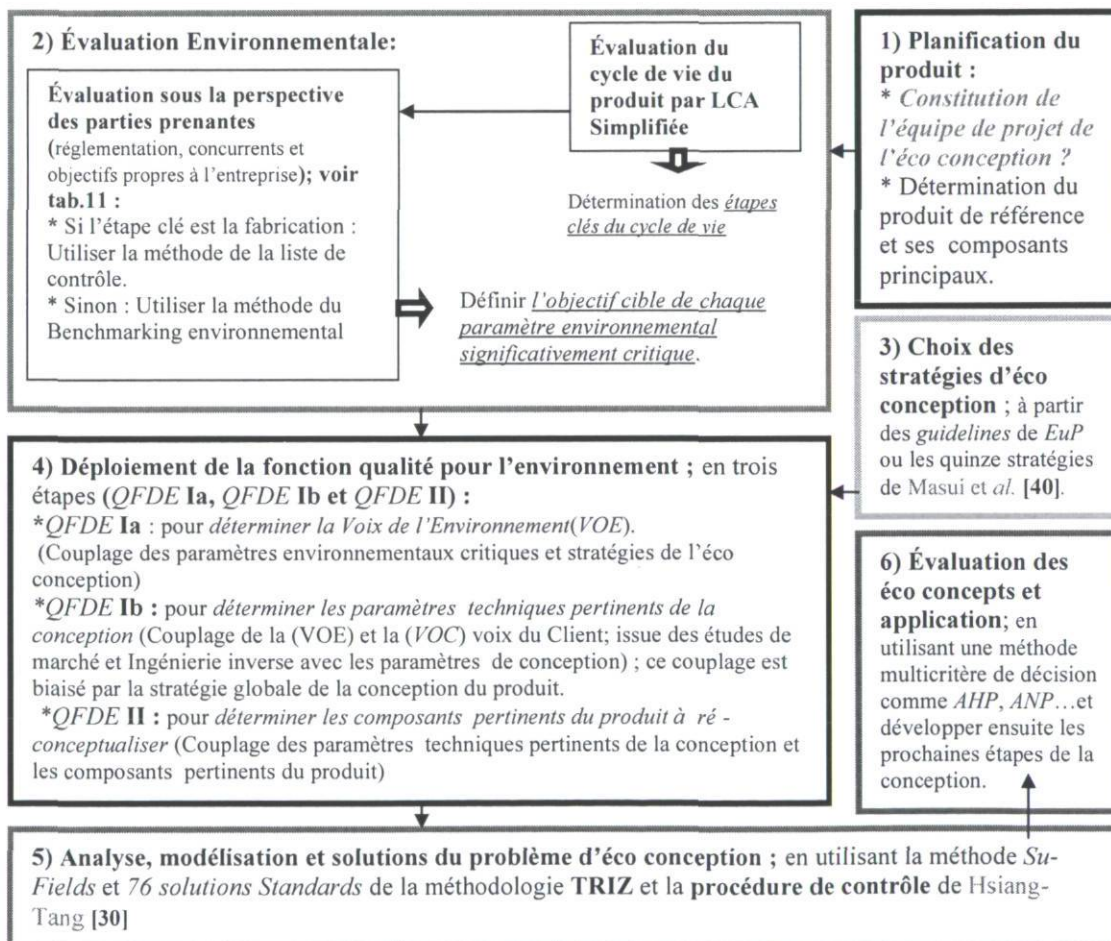
Source : Baumann et al. ( 2002)

En revanche, des travaux récents ont porté sur les stratégies d'organisation et de mise en œuvre de l'éco conception. Ehrenfeld et Lenox [19], Mathieu et al. [41], Boks [9,10] ont traité l'aspect « soft » de l'éco conception, en s'intéressant aux modèles de structure organisationnelle des entreprises qui excellent dans le domaine de l'éco conception et les facteurs favorables, ou défavorables à l'opérationnalisation efficace de l'éco conception.



## 5. Stratégie de mise en œuvre de l'éco conception : Aspects techniques

Les aspects techniques de la stratégie proposée dans ce mémoire décrivent une méthodologie issue de la synthèse de nombreuses lectures sur les différentes facettes des techniques de l'éco conception. Elle se concentre sur la phase conceptuelle du produit en intégrant systématiquement les aspects environnementaux dans chaque stade de son déroulement. La figure (30) illustre la méthodologie intégrée de l'éco conception en six étapes. Nous traitons ci-dessous chaque étape afin de rendre plus fluide sa compréhension. L'exemple illustratif de l'adaptateur du courant alternatif au chapitre 7 démontre l'applicabilité de cette méthodologie.



**Fig.30 Les six étapes de la méthodologie intégrée de l'éco conception**

(La constitution de l'équipe et l'efficacité de ses activités seront revues dans l'aspect organisationnel au chap. 6).

## 5.1 Planification du produit,

Elle comprend :

- Identification des Composants du produit, Pièces, et Matériaux,
- Identification des caractéristiques du marché.
- Collecte des informations sur les étapes du cycle de vie du produit; en d'autres termes des informations sur le système du produit (domaine de définition).
- Sélection d'un produit de référence à développer et enfin,
- Constitution de l'équipe de projet d'éco conception et la définition des objectifs principaux du projet. L'allocation du budget et du personnel y compris les caractéristiques des équipes inter-fonctionnelles sont également déterminées à ce stade.

Ce dernier point est d'une importance cruciale pour l'efficacité de mise en œuvre des activités de l'éco conception et de leur intégration dans le processus de développement de produits. Il sera traité scrupuleusement dans le chapitre 6.

## 5.2 Évaluation environnementale

Les aspects environnementaux d'un produit peuvent être évalués sous deux perspectives : Perspective du cycle de vie et Perspective des parties prenantes.

### 5.2.1 Perspective du cycle de vie du produit

Le but principal de cette évaluation est d'identifier les étapes de cycle de vie du produit les plus critiques. En analysant par la suite ces étapes on peut non seulement réduire le temps et l'argent dépensé dans l'analyse, mais aussi optimiser les améliorations environnementales.

Les étapes clés du cycle de vie peuvent être identifiées grâce à l'utilisation des méthodes simples à base de *LCA*, comme la matrice d'Évaluation des Produits Respectueux de l'Environnement (*Environmentally responsible product assessment matrix ERPA*) Telenko et al. [58].

C'est une matrice 5x5 ; voir le tableau (8) ci-dessous qui peut être utilisée pour évaluer les produits, les procédés, les installations, les services ou une infrastructure. Sur une base des listes de contrôle préétablies, on associe un score  $m_{ij}$  de 0 à 4 pour chaque élément de la matrice (4 pour un impact important et 0 pour un impact faible). D'autant plus, cette méthode ; dite *LCA*-simplifiée étant semi quantitative, elle permet de pondérer la matrice, par consensus de l'équipe du projet de l'éco conception en considérant;

- Les étapes du cycle de vie susceptibles de produire des impacts sévères,
- Le degré la criticité des impacts environnementaux,

Comme le montre le tableau (9), la réglementation environnementale récente a une grande influence sur le cycle de vie d'un produit et par conséquent sur le degré de criticité des impacts environnementaux.



- Les attributs dominants liés à l'environnement,
- Le temps, la distance et
- Le risque.

Les résultats de *LCA* issus de la littérature existante peuvent aussi être utilisés lorsque le concepteur n'a pas de connaissance préalable sur les outils et les méthodes d'évaluation environnementale.

**Tab.8 ; Matrice *LCA*-simplifiée (*Environmentally responsible product assessment matrix*) *ERPA* .**Inspirée de Telenko et al. (2008)

Préoccupations environnementales		<i>Choix des Matériaux</i>	<i>Utilisation d'Énergie</i>	<i>Résidus Solides</i>	<i>Résidus Liquides</i>	<i>Résidus Gazeux</i>	Score Total
Étape du cycle de vie		$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	
<b>Acquisition matières premières</b>	$\alpha_1$	m11	m12	m13	m14	m15	$\alpha_1 \cdot \sum \beta_j \cdot m_{1j}$
<b>Fabrication</b>	$\alpha_2$	m21	m22	m23	m24	m25	$\alpha_2 \cdot \sum \beta_j \cdot m_{2j}$
<b>Distribution</b>	$\alpha_3$	m31	m32	m33	m34	m35	$\alpha_3 \cdot \sum \beta_j \cdot m_{3j}$
<b>Utilisation/ Maintenance</b>	$\alpha_4$	m41	m42	m43	m44	m45	$\alpha_4 \cdot \sum \beta_j \cdot m_{4j}$
<b>Remise à neuf, Recyclage et Élimination</b>	$\alpha_5$	m51	m52	m53	m54	m55	$\alpha_5 \cdot \sum \beta_j \cdot m_{5j}$

$\alpha_i$  et  $\beta_j$  étant les poids associés par consensus aux étapes du cycle de vie et les préoccupations environnementales et  $m_{ij}$  score associé compris entre 0 et 4.

**Tab.9 : Influence de la réglementation environnementale récente sur le cycle de vie d'un produit.** D'après Fagnoli et Kimura (2007)

		EuP	WEEE	RoHS
Acquisition des matières	Matières premières	++	+	+++
	Matériaux recyclés	++	++	+++
Production	Fabrication	++	++	++
	Assemblage	++	++	+
Distribution	Emballage	++	+	++
	Stockage	++	+	+
	Transport	+++	+++	+
Utilisation	Utilisation	+++	+	+
	Maintenance	+++	+	+++
Fin de cycle de vie ( <i>End Of Life</i> )	Réutilisation de composants	++	+++	+
	Recyclage des matériaux	++	+++	++
	Récupération d'énergie	++	+	+
	Élimination	++	+++	+++

+++ : Influence forte, ++ : Influence modérée et + : Influence faible

\*\* Nous recommandons de considérer dans la suite de l'évaluation environnementale les étapes du cycle de vie de score total relativement important et cumulant ensemble 80% de l'impact global.



### 5.2.2 Perspective des parties prenantes

L'évaluation environnementale sous la perspective des parties prenantes consiste à déterminer trois choses ;

- les points faibles environnementaux associés aux étapes clés du cycle de vie de produit,
- leurs importances relatives et
- l'objectif ciblé de chaque paramètre environnemental pertinent.

Les exigences environnementales réglementaires, la demande du marché, les aspects environnementaux des produits concurrents et les exigences propres à l'organisme doivent être scrupuleusement analysées.

Si l'étape clé du cycle de vie n'est pas la fabrication (Acquisition des matières premières, distribution, utilisation, traitement de fin de cycle de vie) la méthode d'évaluation à utiliser est celle du Benchmarking environnemental (*BE*).

Sinon, c'est la méthode des listes de contrôle (*Check-lists*) qu'il faudra appliquer (Park et *al.*)[47].

La définition des paramètres environnementaux associés à chaque étape du cycle de vie est une phase cruciale dans cette évaluation.

S'il s'agit d'un produit issu de l'industrie électrique ou électronique, nous recommandons de s'inspirer de ceux pré- identifiés dans la littérature scientifique (Park et *al.* ; Wimmer et *al.* ; Wimmer & Zust; Kun-Mo & Park) [47, 66, 67, 36]

Autrement, on doit se baser sur ceux invoqués dans les rapports environnementaux des compagnies de renommée (voir le tableau 10), puis procéder à leur validation par groupe d'experts en éco conception.

Nous proposons la liste générique de quinze paramètres environnementaux génériques; ci-dessous, établie par Masui et *al.* [40], pouvant être utilisés notamment par les concepteurs peu expérimentés, comme un point de départ à déterminer les objectifs environnementaux spécifiques :

- 1) Poids du produit,
- 2) Volume,
- 3) Nombre de pièces,
- 4) Nombre de types de matériaux,
- 5) Vitesse de se salir,
- 6) Dureté des pièces,
- 7) Durée de vie physique,
- 8) Quantité d'énergie consommée,

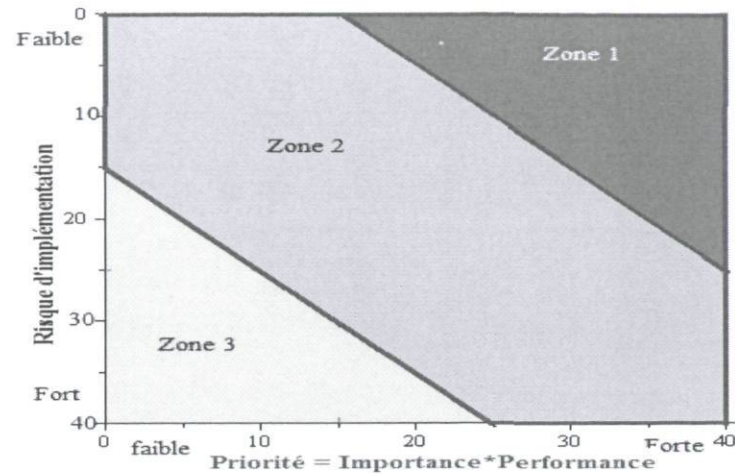
- 9) taux de matière recyclée dans le produit,
- 10) Bruit, ondes électromagnétiques lors d'utilisation,
- 11) Masse des émissions dans l'air durant toutes les étapes du cycle de vie,
- 12) Masse des émissions dans l'eau durant toutes les étapes du cycle de vie,
- 13) Masse des émissions dans le sol durant toutes les étapes du cycle de vie,
- 14) biodégradabilité des matériaux à mettre en décharge et
- 15) Toxicité des matériaux.

**Tab.10: Paramètres Environnementaux pour Évaluer les aspects environnementaux utilisés par les grandes entreprises, Source : Kun-Mo et Park (2005)**

Entreprise	Paramètres environnementaux pour évaluer les aspects Environnementaux
<i>Philips</i>	<i>Masse, Substances dangereuses, Consommation d'énergie, Recyclage et Élimination, Emballage.</i>
<b>Siemens</b>	Substances dangereuses, Consommation des matières premières et d'Énergie, Minimisation des déchets.
<i>IBM</i>	<i>Récupération des matériaux, Efficience énergétique, Emballage, réduction à la source, Substance dangereuses.</i>
<b>Hewlett-Packard</b>	Consommation d'énergie, Moins de matériaux, Matériaux de recyclage(Emballage), réutilisation et recyclage.
<i>Toshiba</i>	<i>Consommation électrique, Masse, Recyclabilité, Emballage</i>
<b>Sony</b>	Consommation d'énergie, Consommation d'eau, Emballage, Matières dangereuses, Production des déchets.
<i>Nokia</i>	<i>Intensité énergétique, Intensité matérielle des biens et services, Dispersion des substances toxiques, Recyclabilité, Utilisation des ressources Renouvelables, Durabilité du produit, Efficience totale des processus.</i>

Ensuite, pour déterminer l'objectif environnemental ciblé de chaque paramètre environnemental, trois critères doivent être respectés. Le tableau (11) récapitule la procédure à suivre aussi bien dans le cas du *BE* que la liste de contrôle.

Le tracé : **Risque de mise en œuvre = f (priorités)** dans la figure (31) peut être utilisé pour évaluer la mesure associée à un paramètre. Cette évaluation devient la base du choix des paramètres environnementaux pertinents liés à l'étape de fabrication.



**Fig. 31 : Portefeuille sur l'évaluation des mesures de mise en œuvre.**

Source : Kun-Mo et Park (2005). D'après Wimmer et al. (2001).

- La zone 1 représente le domaine où le paramètre de la liste de contrôle doit être mis en œuvre aussitôt que possible en vue d'une amélioration environnementale du produit.
- La zone 2 représente le domaine où le paramètre de la liste a besoin d'être mis en œuvre dans le futur proche,
- La zone 3 représente le domaine où on n'a pas besoin de considérer un paramètre de la liste pour une amélioration environnementale du produit.



**Tab.11 : Synthèse de l'Évaluation environnementale sous la perspective des parties prenantes : Méthodes, étapes et critères.**

Évaluation environnementale		<b>Benchmarking Environnemental</b> Pour toute étape clé du cycle de vie sauf la fabrication	<b>Liste de contrôle</b> Si l'étape clé du cycle de vie est la fabrication
<b>Étape 1</b>		Extraire les paramètres environnementaux, pertinents au produit de référence, à partir des rapports environnementaux des grandes entreprises dans le monde	Faire une revue des listes existantes, par exemple ; (Wimmer 2002, Brezet et Hamel, 1997, Clark et de la Chartre 1999).
<b>Étape 2</b>		Générer et arranger les paramètres environnementaux par étapes du cycle de vie lors d'une réunion de l'équipe de projet d'éco conception,	Générer et arranger les paramètres environnementaux par étapes du cycle de vie lors d'une réunion de l'équipe de projet d'éco conception.
<b>Étape 3</b>		Rectifier de nouveau ces paramètres lors de l'application sur le produit réel et définir l'objectif cible de chaque paramètre environnemental significativement critique en vérifiant les trois critères ci-dessous :	Évaluer les paramètres environnementaux en fonction de leur priorité et le risque associé à leur mesure de mise en œuvre .Pour ce faire, trois critères sont à vérifier :
<b>Critères de l'étape 3</b>	Critère 1	Il faut vérifier d'abord que le produit choisi satisfasse à exigences légales (*) IPP, EuP, WEEE, RoHS, REACH, etc... Autrement, d'autres objectifs cibles doivent être ajoutés à la liste des paramètres pour se conformer à ces exigences.	Associer un attribut à chaque paramètre environnemental de la liste de contrôle du produit en fabrication. 10 points : haute importance, 5 : moyenne et 0 : aucune importance)
	Critère 2	Comparer la performance $X$ de chaque paramètre environnemental avec celle $Y$ de la concurrence. Il recommande de disposer de deux à quatre produits concurrents. Soit $Y_{max}$ =Meilleure Performance environnementale des concurrents. Si le taux relatif $(Y_{max} - X) * 100/X > 0$ Ce taux devient l'objectif cible de l'amélioration environnementale. Sinon, on passe au critère suivant.	Évaluer la performance de la mesure associée à chaque paramètre environnemental de l'étape de fabrication:(Attribuer 1 point si la mesure a été déjà mise en œuvre, 2 points si n'est pas correctement appliquée mais néanmoins déjà mise en œuvre, 3 points si n'est pas mise en œuvre mais la mise plutôt considérée dans un futur proche, ou attribuer 4 points si aucun plan de mise en œuvre de la mesure n'existe pas) <b>Priorité du paramètre = Importance relative * Performance</b>
	Critère 3	Soit $Z^*$ la performance visée par l'organisme telle que $Z^* > Y_{max}$ , alors l'objectif environnemental devient  $(Z^* - X) * 100/X$	Évaluer le risque de mise en œuvre de la mesure associée au paramètre (critère toujours étudié lorsqu'on utilise la méthode d'évaluation par liste de contrôle). Attribuer 30 points si risque élevé, 20 points si modéré et 10 points si faible. Le tracé <b>Risque de mise en œuvre =f(priorités)</b> peut être utilisé pour évaluer la mesure associée à un paramètre. Cette évaluation devient la base du choix des paramètres environnementaux pertinents liés à l'étape de fabrication.

(\*\*) : IPP (Integrated Product Policy), EuP (Eco Design of Energy Using Products), WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment directive), RoHS (Restriction of the use of certain Hazardous Substances directive), REACH (Registration, Evaluation and Authorization of Chemicals)...

### 5.3 Choix de stratégies d'éco conception

La stratégie d'éco conception peut être considérée comme une ligne directrice destinée à tenir compte du comportement d'un produit vis-à-vis de l'environnement, au cours de son cycle de vie. C'est une intervention de conception qui doit, en général, avoir comme objectif principal l'optimisation de la répartition des flux de ressources et des émissions par le moyen de :

- La réduction des volumes de matériaux utilisés et l'extension de leur durée de vie,
- La fermeture des cycles de flux des ressources grâce à des interventions de récupération,
- La réduction au minimum des émissions et de la consommation d'énergie dans la production, l'utilisation et l'élimination.

Afin d'atteindre pleinement ces conditions, il est nécessaire d'intervenir dans deux zones de conception séparées : La conception des produits et la conception des processus. La présente recherche concerne plutôt la conception des produits ; ces produits étant définis comme un ensemble de composants conçus en tant que systèmes fonctionnels pour répondre à certaines exigences (section 2).

Il existe plusieurs sources qui peuvent aider à sélectionner les stratégies d'éco-conception en fonction de la catégorie de produits et les étapes clés du cycle de vie, notamment: *Life cycle design guidance manual*, Approche de Thompson et *UNEP /Promising Manual* [25].

Masui et al. [40] ont dressés également une liste générique de quinze stratégies d'éco conception ou lignes directrices pouvant être utilisées par les concepteurs peu expérimentés.

- 1) Moindre utilisation de matière,
- 2) Facilité de transport et de conservation,
- 3) Facilité de traitement et assemblage,
- 4) Moindre consommation d'énergie,
- 5) Durabilité élevée,
- 6) Facilité de réutilisation,
- 7) Facilité de démontage,
- 8) Facilité de nettoyage,
- 9) Facilité de casse en fin de cycle de vie,
- 10) Facilité de triage,
- 11) Sécurité lors d'incinération,
- 12) Sécurité pour l'enfouissement,
- 13) Émission inoffensive pour l'entourage, lors de la fabrication et l'utilisation (Non libération de substances toxiques, bruit, vibrations, ondes électromagnétiques et odeurs),
- 14) Émission en toute sécurité lors de la fabrication et
- 15) Facilité de mise en décharge par l'utilisateur.

## 5.4 Déploiement de la fonction qualité

Nous adoptons dans cette recherche le *QFDE* simplement et clairement en deux phases, suivies à postériori par une analyse et une modélisation du problème de conception. La première phase étant le *QFDE I* subdivisé en deux sous phases ; *QFDE Ia* et *QFDE Ib* et la seconde phase étant le *QFDE II*.

- Le *QFDE Ia* : pour déterminer la Voix de l'Environnement(*VOE*) en couplant les paramètres environnementaux critiques aux stratégies de l'éco conception.
- Le *QFDE Ib* : pour déterminer les paramètres techniques pertinents de la conception en couplant la(*VOE*) et la (*VOC*); voix du Client; issue des études de marché et Ingénierie inverse avec les paramètres de conception ; ce couplage est biaisé par la stratégie globale de la conception du produit.(voir exemple illustratif que nous avons traité au chapitre 7).
- Le *QFDE II* : pour déterminer les composants pertinents ou les unités fonctionnelles clés du produit à ré -conceptualiser en couplage des paramètres techniques pertinents de la conception et les composants pertinents du produit)

Le tableau 12 récapitule les éléments d'entrée et de sortie de chaque phase.

Tab. 12 : Éléments d'entrée et de sortie de la méthodologie *QFDE Ia, Ib/II*

Éléments d'entrée	Outil méthodologique	Éléments de sortie
Paramètres environnementaux pertinents obtenus par le Benchmarking environnemental ou/et la liste de contrôle (avec leurs seuils relatifs à atteindre)	<b>QFDE I-a</b>	Objectifs environnementaux avec seuils normalisés.
Objectifs environnementaux couplés aux stratégies d'éco-conception sélectionnées à partir de la littérature ou lignes directrices	<b>QFDE I-b</b>	Voix de l'environnement <i>VOE</i> exprimée en termes de ligne directrices avec un ordre d'importance relatif
Voix de l'environnement <i>VOE</i> associée à la voix du client <i>VOC</i> (supposée identifiée par un QFD habituel) couplées aux Composants ou unités fonctionnelles du produit	<b>QFDE II</b>	Composants ou unités fonctionnelles clés identifiés sur lesquels il faut se concentrer pour générer les éco concepts.

## 5.5 Analyse et modélisation des problèmes de conception

L'outil *Su-Fields* est construit en se basant sur la découverte d' Altshuler qu'un système viable doit contenir au minimum de deux substances «  $S_1$  » et «  $S_2$  » et un champ «  $Fi$  », formant un 'Vé pôle' ; une relation triangulaire typique (figure (32a)). Cette relation peut être interprétée que la substance  $S_2$  agit sur la substance  $S_1$  à travers le champ  $Fi$  et que toutes les composantes coopèrent pour exécuter une fonction.



Dans la théorie *TRIZ*, le « Champ »  $F_i$  est souvent défini comme une énergie et utilisé au sens large, incluant : Le champ magnétique ( $F_M$ ), acoustique ( $F_A$ ), thermique ( $F_T$ ), chimique ( $F_C$ ), électrique ( $F_E$ ), optique ( $F_O$ ), etc. Aussi le modèle *Su-Fields* fournit 9 types de connexion (Figure (32d)) permettant de décrire les relations entre  $S_1$ ,  $S_2$  et  $F$ . Par exemple, si une substance  $S_2$  agit non seulement sur une autre substance  $S_1$  à travers un champ  $F$ , mais provoque un effet nuisible, le modèle *Su-Fields* peut être trouvé comme le montre la figure (32 b).

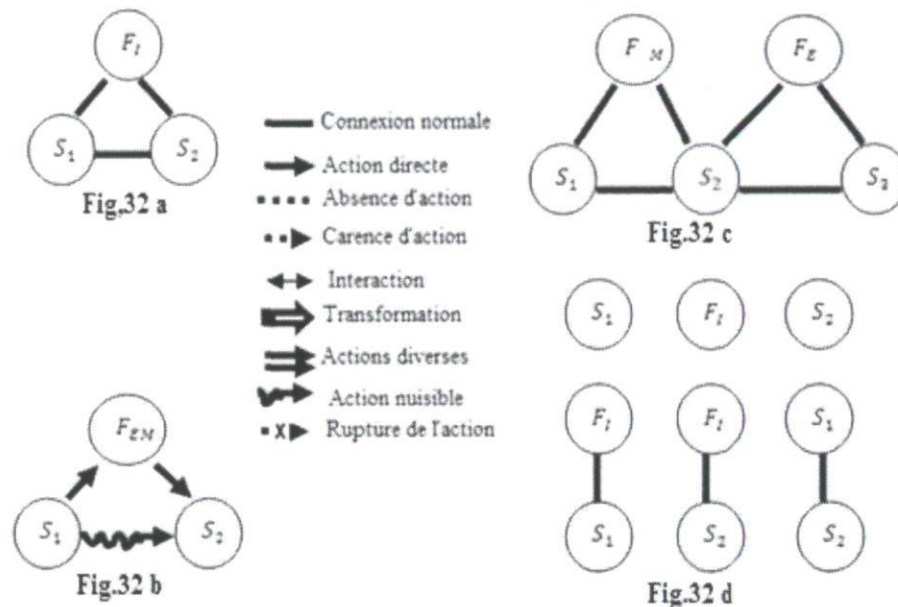


Fig.32 *Su-Fields* : Outil d'analyse utilisant des icônes et symboles pour modéliser les problèmes de conception. Source: Inspirée de Hsiang-Tang, (2004)

En vue d'appliquer correctement l'outil d'analyse *Su-Fields*, il faut connaître : Cinq propriétés de base; Cinq règles de transformation pour vaincre l'inertie psychologique et; Savoir utiliser et transformer les 76 normes associées à l'outil *Su-Fields*.

- Cinq propriétés de base,

Le modèle d'analyse *Su-Field* peut représenter un système, un processus ou un sous-système. Ci-joint, cinq propriétés de base (Altshuler) [4] :

- 1) Si un concepteur considère que le modèle d'analyse qu'il vient de construire est incomplet, c'est-à-dire manquant de composants (figure (32d)), il peut changer les caractéristiques de ces composants et ainsi former un triangle-type *Su-Fields* complet (figure 32a).
- 2) Toute action exercée sur un composant du modèle *Su-Fields* agira aussi sur les autres composants.
- 3) Si un composant du modèle *Su-Field* admet une structure Espace-temps particulière, alors les autres composants du modèle peuvent avoir une structure similaire.

- 4) La quantité du « champ » qui agit entre les substances n'est pas limitée; elle est entièrement dépendante des caractéristiques de substances et de leur interaction.
- 5) Un composant d'un modèle d'analyse *Su-Fields* peut être le composant d'un autre modèle en même temps, comme le cas de la substance  $S_2$  à la figure (32 c).

- Cinq règles de transformation pour vaincre l'inertie psychologique

La construction du modèle d'analyse *Su-Fields* permet au concepteur d'identifier clairement le problème de conception. Afin d'explorer la solution, les règles dites de transformation peuvent assister le concepteur à vaincre l'inertie psychologique :

\*\*Transformation 1) Pour tout modèle *Su-Fields* incomplet, un nouvel élément peut être introduit pour résoudre le problème de conception correspondant.

\*\*Transformation 2) Afin d'augmenter l'efficacité fonctionnelle d'un modèle *Su-Fields*, l'existant modèle peut être connecté à d'autres modèles indépendants pour former une chaîne de modèles.

\*\*Transformation 3) Dans le problème de détection et mesure, deux champs peuvent être introduits; un comme élément d'entrée et l'autre comme élément de sortie.

\*\*Transformation 4) La façon la plus efficace d'éliminer une substance ou champ nuisible, indésirable ou pas nécessaire, est d'introduire un nouveau composant pouvant être considéré comme une modification du composant existant.

\*\*Transformation 5) Pour réaliser une transformation physique à partir d'un champ lié à une substance, le modèle *Su-Fields* peut être transformé en ajoutant une substance intermédiaire. Par exemple ; pour un modèle initial ayant juste une substance  $S_1$  et un champ optique  $F_O$  comme élément d'entrée, l'introduction d'une nouvelle substance intermédiaire induit à la sortie un champ électrique  $F_E$ .

- Savoir utiliser et interpréter les 76 Solutions standard associées à cet outil.

Ces solutions fournissent les moyens de transformer un modèle incomplet ou inadéquat de *Su-Fields* en un modèle complet et efficace. Compilées par Altshuler et ses associés entre 1975 et 1985, elles sont groupées en cinq larges catégories les suivantes (Altshuler et al. , Gasanov et al.) [3,24], voir la fiche en annexe (4):

- 1) Amélioration du système avec un minimum de changement: 13 solutions standards.
- 2) Amélioration du système avec changement du système: 23 solutions standards.
- 3) Systèmes de transition : 6 solutions standards.
- 4) Systèmes de détection et mesure : 17 solutions standards,
- 5) Stratégies de simplification et amélioration : 17 solutions standards.

Nous adoptons dans notre méthodologie une procédure claire, proposée par (Hsiang-Tang Chang) [30] qui permet de modéliser les problèmes inventifs en prenant en considération la contrainte environnementale. La figure (33) illustre cette procédure dans l'organigramme suivant :

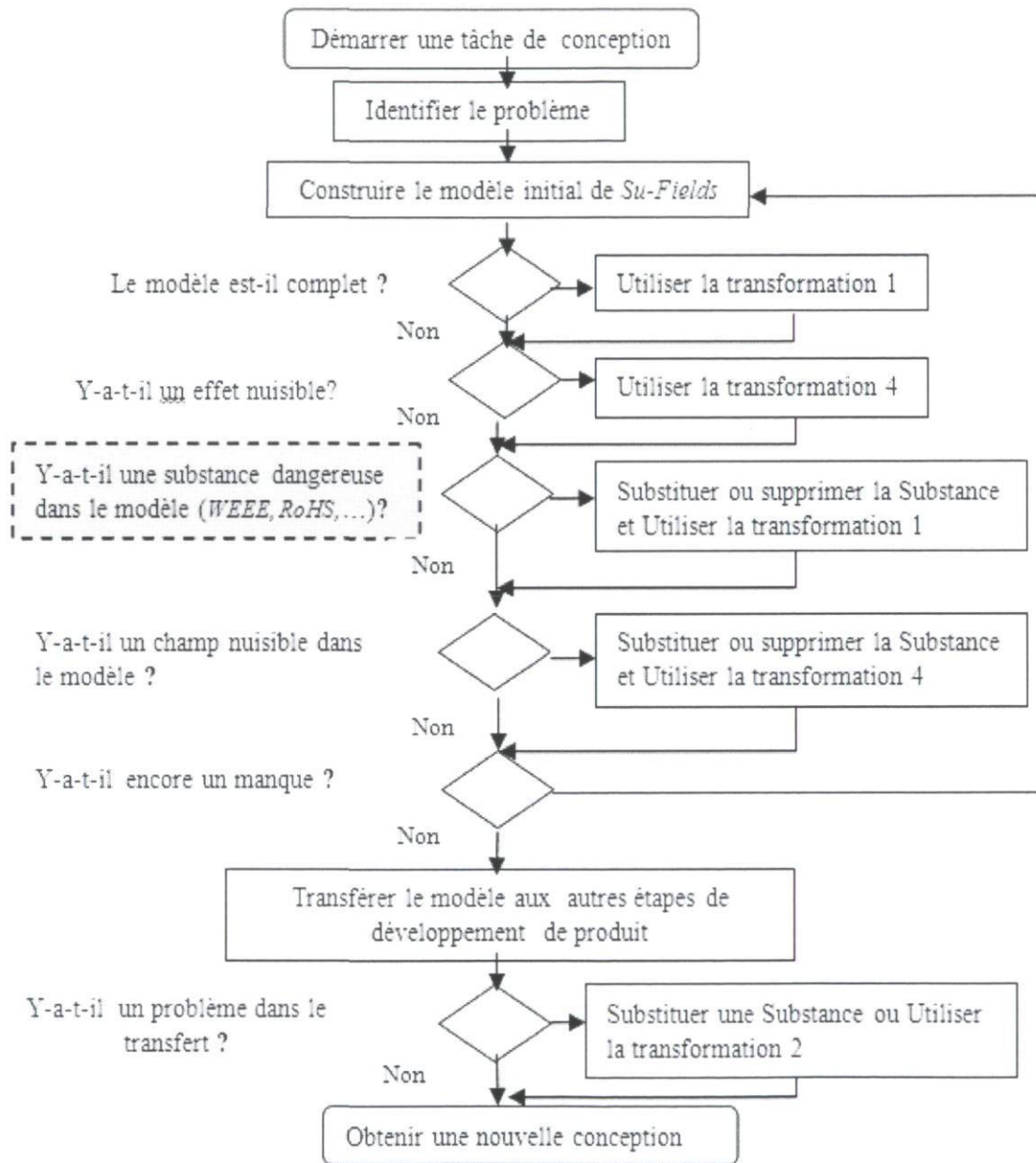


Fig.33: Procédure de résolution de problème de conception basé sur l'analyse *Su-Fields* et tenant compte de contraintes environnementales. D'après Hsiang-Tang, (2004)



## 5.6 Évaluation des éco concepts et application

L'évaluation des éco concepts est la dernière étape de cette méthodologie proposée. C'est une phase de prise de décision dans laquelle des alternatives (nouvelles solutions de conception) sont d'abord comparées avant de choisir la meilleure parmi elles.

Dans les cas où la décision est trop complexe, le «bon» choix de l'éco concept n'est pas facilement identifiable, et dans de nombreux cas, nous avons recours à des techniques de prise de décision telles que, l'analyse multicritère (*MCDA*), ou les arbres de décision (Bouyssou et al.) [12]

La structuration est la première étape de la systématisation et la représentation d'un problème de décision. A cet effet, la méthode multicritère de décision *AHP* (*Analytic hierarchic Process*) joue un rôle important dans les problèmes de décision à tendance relativement peu complexe. Avec cette méthode, on représente le problème de décision à l'aide d'une structure reflétant les interactions entre les divers éléments du problème, considéré comme un système.

Les cinq étapes antérieures de la méthodologie proposée permettent de rendre simple la structure de décision, puisque plusieurs aspects ont été pris en considération dans l'élaboration des éco concepts. La figure (34) illustre les critères et sous critères qui contrôlent le choix du meilleur éco-concept, ainsi que leurs interactions. Néanmoins, notre proposition reste indicative et flexible selon la complexité du produit et sa phase dans le cycle de vie (Nouveau produit, croissance, maturité ou déclin).

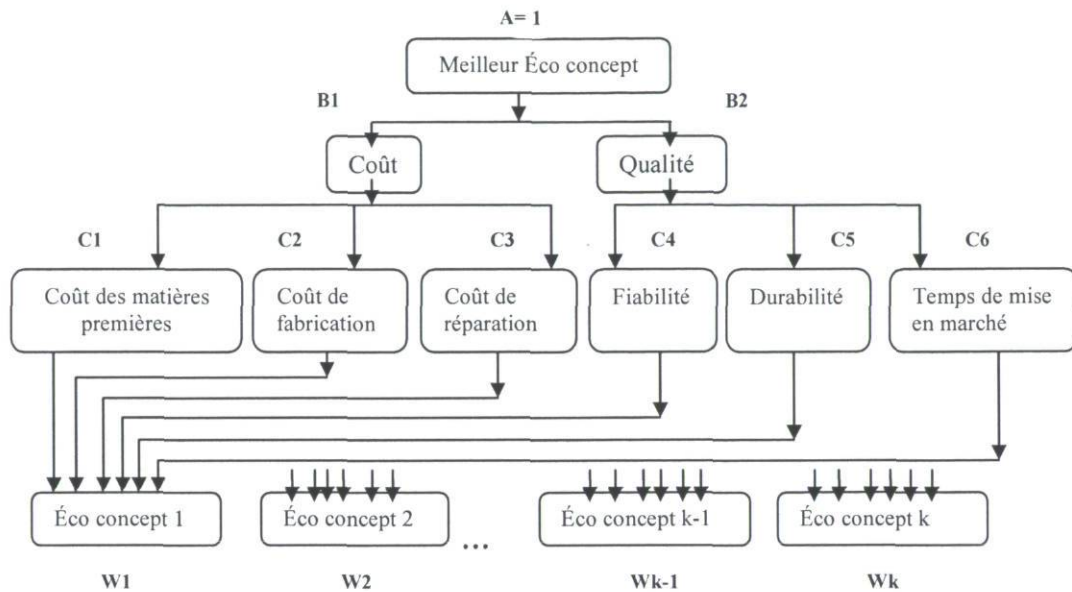
Il faut signaler que si la structure se complique par l'ajout soit de nouveaux critères (exemple le stade d'évolution de produit : Nouveau, Croissance, Maturité ou Déclin) ou d'autres sous critères, il devient important d'utiliser la méthode *ANP* (*Analytic Network Process*), une forme générale de l'*AHP* avec une structure contenant des composants intermédiaires traitant des dépendances intérieures, les interdépendances ainsi que les rétroactions.

Les étapes de l'*AHP* peuvent être résumées comme suit [62]:

- 1) Choisir les critères de contrôle, de définir les sous critères et les alternatives à évaluer. L'établissement des critères inappropriés dans la structure du problème de décision conduit à des résultats erronés.
- 2) Effectuer des comparaisons par paires et en calculant l'importance de chaque critère, sous critère et alternative par rapport au niveau hiérarchique supérieur ; une gamme variée de techniques sont disponibles, y compris la technique des vecteur propres par la méthode de la puissance
- 3) Vérifier la cohérence des jugements par paires, autrement il réviser les comparaisons.

4) Normaliser les importances relatives ; Dans la figure (34), la somme des importances relatives à chaque niveau est égale à l'unité.

La plus grande importance relative (**Wi**) **max** correspond au meilleur éco concept à développer dans les prochaines étapes du processus de conception du produit (*Embodiment et Detail Design*).



**Fig.34 Méthode multicritère de décision : Structure de l'AHP**  
(Analytic Net work Process) à quatre niveaux (un Objectif, deux Critères, six Sous-critères et k Alternatives) pour évaluer les éco concepts élaborés

Source : Inspirée de Dieter et Schmidt, (2009).Engineering Design,

## 6. Stratégie de mise en œuvre de l'éco conception : Aspects organisationnels

### 6.1 Structure et caractéristiques organisationnelles des entreprises pionnières en Éco conception

Basés sur une série d'études de cas concernant les compagnies Xerox, IBM, AT & T et Digital qui se spécialisent dans la fabrication de produits électroniques de haute technologie et reconnues comme des leaders dans l'Eco conception (*Design for Environment DfE*), Ehrenfeld & Lenox (1997) ont présenté un ensemble de facteurs qui contribuent à la conception efficace pour l'environnement (Telenko et al.) [19].

- La façon dont les entreprises ont organisé les activités liées au (*DfE*),
- La façon dont elles ont abordé la mise en place de ces activités,
- Les liens d'information ; le facteur le plus critique établi pour faciliter le flux d'informations provenant des personnes ayant des connaissances ou des compétences et ceux qui pourraient en bénéficier.
  - La façon dont les entreprises utilisent les activités de conception pour coordonner une variété de fonctions du management environnemental.

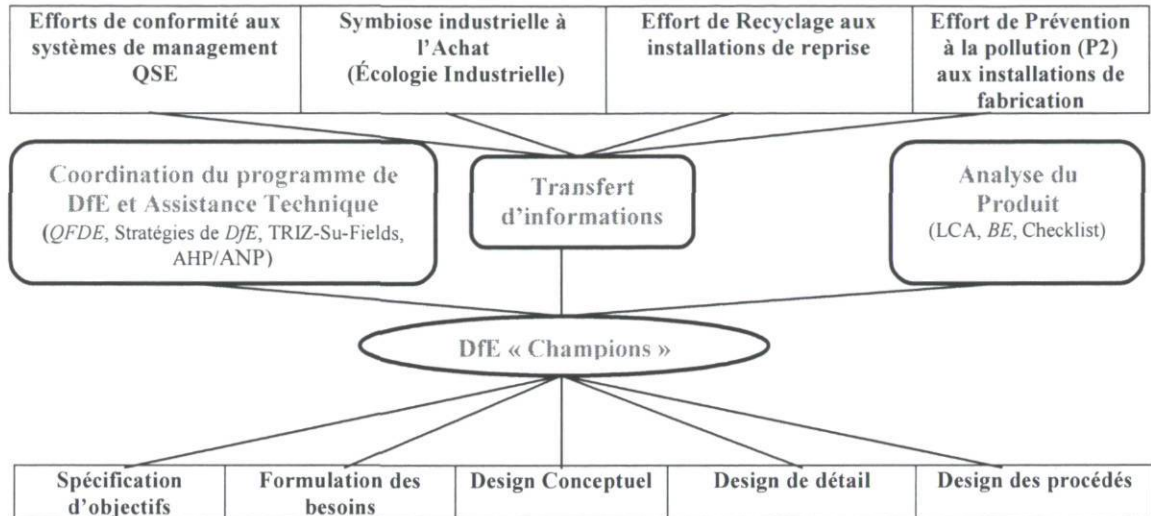
La figure (35) résume la façon dont les entreprises leaders de l'éco conception (*DfE*) organisent les activités liées au (*DfE*).

La structure rappelle une « horloge de sable » elle comprend quatre types de fonction qui aident à bien transférer les bonnes pratiques d'éco conception du niveau managérial au niveau de développement de produits et notamment aider à structurer l'équipe du projet de l'éco conception;

1) **Fonction de coordination du Programme d'éco conception et d'assistance technique** : Elle consiste en la diffusion des activités d'éco conception, la coordination des activités de conception à travers les unités d'affaires ainsi que l'examen des activités d'éco conception au sein de différentes unités d'affaires et l'assistance technique du processus de développement produit à résoudre les problèmes spécifiques de conception.



2) **Fonction d'évaluation du produit** : Elle conduit des méthodes basées sur l'Analyse du Cycle de Vie et peut être intégrée au niveau des unités d'affaires. Cependant, l'obstacle majeur est les coûts perçus et réels.



**Fig.35 : Organisation les activités liées au DfE en Structure en « horloge de Sable »**  
 (DfE) *Design for Environment* ;(QSE) Qualité/Sécurité/Environnement; (BE) Benchmarking Environnemental ;(LCA) *Life Cycle Assessment* ;(AHP/ANP) *Analytic Hierarchic Process / Analytic Network Process*  
 Inspirée d'Ehrenfeld et Lenox, (1997), M.I.T, *Journal of Sustainable Product*

3) **Fonction de transfert de l'information** : C'est l'une des plus intéressantes fonctions de l'éco conception. Elle peut coordonner de nombreuses installations de reprise (*take back facilities*), les efforts de conformité aux Systèmes de Management QSE ; Qualité, Environnement, Santé et Sécurité, les installations de fabrication et les unités d'affaires ainsi que les problèmes d'approvisionnement au sein de la chaîne logistique.

4) **Fonctions au sein du produit et son développement** : Le processus de développement de produits étant un processus complexe (voir la section méthodologie de conception). Le rôle des « champions » de (DfE) est souvent celui des médiateurs. Ils peuvent agir en tant que défenseurs et experts en éco conception. Leur défi est d'utiliser l'information provenant des trois fonctions de support décrites ci-haut, afin de participer effectivement aux activités du processus de développement de produits.

Ainsi, cette structure de base permet en plus de

- Positionner correctement chaque méthode ou outils utilisés par la méthodologie proposée, et
- éviter l'énergie réactive ainsi que les conflits d'intérêts entre les services liés à l'éco conception (voir situation problématique 2).

## 6.2 Diagnostic du processus de développement de produits axé sur l'éco conception

En supposant que dans un premier temps, un diagnostic du processus de développement de produits d'une entreprise, peut conduire à une bonne compréhension des contraintes et incitations de la mise en œuvre efficace des méthodes et outils d'éco conception, nous proposons une procédure qui consiste en deux analyses ; quantitative et qualitative .

L'approche est fondée sur une étude empirique conduite en 2003 par *Delft University of Technology* des industries électroniques Japonaise et Coréenne Boks (2005) [9] dont les buts principaux étaient de

- vérifier l'importance relative des facteurs favorables et obstacles à la mise en œuvre réussie de l'éco conception dans les multinationales interviewées et de
- déterminer l'importance relative d'un nombre d'incitations qui motivent cette industrie à être proactive en matière d'ingénierie et management environnementaux.

### 6.1.1 Analyse quantitative :

Voici la procédure adoptée dans ce mémoire pour traiter l'aspect organisationnel de la mise en œuvre de l'éco conception :

1) Définir le processus de conception et développement des produits, dans l'objectif est de vérifier l'existence des fonctions clés de mise en œuvre de l'éco conception ; citées au paragraphe 6.1 (Fonction de coordination du Programme, Fonction d'évaluation du produit, Fonction de transfert de l'information et les responsables du projet d'éco conception),

- \*Éléments d'entrée (quoi? et par qui?)
- \*Éléments de sortie (quoi? et pour qui?)
- \*Séquence des activités internes
- \*Documentation
- \*Organisation (autorité, responsabilité et communication)

\*Ressources (humaine, information, technique)

\*Pilotage du processus de conception et développement.

2) Diviser le processus de conception et développement en deux parties sur la base de distinction entre deux contextes:

- La diffusion en interne d'informations entre les intervenants (Tels que les concepteurs, les ingénieurs, le département des ventes et marketing, le département des achats)
- L'application des principes d'éco conception sur les produits finis commercialisés, (Référence au Personnel impliqué dans les dernières étapes du processus de développement de produit).

3) Définir la liste du personnel du premier contexte et celle du deuxième contexte. Plus le personnel appartient à différents niveaux hiérarchique, plus le résultat du diagnostic soit plus efficace.

4) Soumettre au premier groupe la fiche 1 et la fiche 2, en annexe 2 comprenant respectivement un ensemble d'obstacles et facteurs favorables ; préalablement identifiés par la littérature scientifique, Boks (2005) [9] qui pourraient avoir **une influence sur la qualité de diffusion de l'information en matière d'éco conception.**

5) Soumettre au deuxième groupe la fiche 3 et la fiche 4, en annexe 3 comprenant respectivement un ensemble d'obstacles et facteurs favorables ; préalablement identifiés par la littérature scientifique, Boks (2005) [9] qui pourraient respectivement **empêcher ou aider les principes d'éco conception de se matérialiser dans les produits destinés au marché**

6) Analyser quantitativement les résultats avec l'objectif d'identifier les facteurs de succès et les obstacles considérés par l'entreprise comme étant les plus importants. L'importance relative peut être déterminée par un système d'évaluation quantitative simple en accumulant et calculant une moyenne pour chaque facteur.

### 6.1.2 Analyse qualitative :

Une série de questions d'entrevue semi-structurée avec un représentant de la direction de l'entreprise directement impliqué dans les activités de coordination des programmes d'éco conception et d'assistance technique. Cette série doit être formulée pour répondre à un large éventail de sujets, elle comprend:

- Terminologie concernant l'éco conception de produits,
- Incitatifs initiaux pour l'adoption d'éco conception, le classement de ces incitatifs.



- Intervenants internes, le flux de communication, les responsabilités et l'implication des différents départements, la fréquence et la qualité de communication et le rôle des « Champions *DfE* »
  - Contenu, organisation et flux de la communication avec les intervenants externes,
  - Mesure de la performance environnementale des produits ainsi que ceux de la compétition, le choix des méthodes, l'intégration dans les processus de gestion, les attentes et les avantages tirés des procédures actuelles,
  - Connexion de l'environnement avec les autres considérations d'affaires, la comptabilité environnementale
  - Communication sur l'environnement, les rapports de réalisation de l'éco conception pour diverses parties prenantes.

Ces interviews semi-structurées fournissent une excellente base pour valider qualitativement les résultats obtenus par l'analyse quantitative.

Les facteurs de premier ordre qu'ils soient parmi les obstacles ou facteurs de succès exprimés par les deux parties amont et aval du processus de développement méritent d'être interprétés et transformés en termes de mesures et actions dans la stratégie de mise en œuvre du *DfE* avant de procéder à l'application de la méthodologie intégrée proposée.

L'exemple donné dans le chapitre 7 illustre le type de résultats attendu de ce diagnostic.

## 7. Exemple illustratif : Cas de l'industrie électronique

### 7.1 Application du diagnostic sur les processus de développement de produits électroniques

Nous analysons dans ce mémoire les résultats de l'étude empirique qui a été conduite par l'université Delft en 2003 sur les industries électroniques Japonaise et Coréennes. En se basant sur une liste de facteurs favorables et défavorables à l'adoption des bonnes pratiques de l'éco conception, et qui ont été identifiés par la littérature scientifique,

Les réponses aux fiches 1, 2,3 et 4); aux annexes 2 et 3 ont révélé que l'industrie électronique asiatique est très sensible aux facteurs favorables et défavorables dressés respectivement dans les tableaux (13) et (14). Ils sont classés selon l'ordre d'importance en deux catégories : Première importance et seconde importance.

**Tab.13 : Résultats empiriques des facteurs favorables à l'adoption des bonnes pratiques de l'éco conception** (Industrie électronique Japonaise et Coréenne ,2003) Source :(Boks, 2005)

	Fiche 2	Fiche 4
	Personnel impliqué dans <u>la partie amont</u> du processus de développement de produit	Personnel impliqué dans <u>la partie aval</u> du processus de développement de produit
<b>Facteurs favorables de première importance</b>	1) Outils d'éco conception personnalisés et élaborés sur mesure pour le besoin de l'entreprise	1) Importance des questions environnementales dans toutes les activités de l'entreprise
	2) Utilisation des points de contrôle de l'environnement, des revues, des étapes et des feuilles de route	2) Présence des Lignes directrices, règles et normes très spécifiques à l'entreprise
	3) Bon engagement de la direction et bon support	3) Inclusion des questions environnementales dans la stratégie technologique de notre société
<b>Facteurs favorables de seconde importance</b>	4) Alignement des dimensions opérationnelle et stratégique	4) Formation du client et consommateurs sur les questions environnementales.
	5) Présence de ce qu'on appelle « Champions de l'environnement »	5) Suivi des études, apprentissage de manière systématique des expériences antérieures
	6) Bon réseau international	6) Concentration sur le consommateur et bonnes études de marché

**Tab.14 : Résultats empiriques des obstacles à l'adoption des bonnes pratiques de l'éco conception**  
(Industrie électronique Japonaise et Coréenne ,2003) Source :(Boks, 2005)

	Fiche 1	Fiche 3
	Personnel impliqué dans <b>la partie amont</b> du processus de développement de produit	Personnel impliqué dans <b>la partie avale</b> du processus de développement de produit
<b>Obstacles de première importance</b>	1) Trop grand "écart" entre les promoteurs de l'éco conception et ceux qui doivent l'exécuter	1) Pas de demande du marché
	2) Complexités de l'organisation et manque d'infrastructure appropriée	2) Manque d'objectifs environnementaux et de vision pour chaque projet de développement
	3) Manque de coopération entre les départements	
<b>Obstacles de seconde importance</b>	4) Manque d'engagement de la direction et de support	4) Trop de questions liées aux matériaux
	5) Les outils disponibles sont trop complexes	5) Manque de réflexion innovante
	6) Manque du contexte industriel en général/pas de connexion de l'environnement avec les considérations d'affaires.	6) Manque d'essais

Dans notre analyse on considère dans un premier temps la nature des facteurs favorables et défavorables ainsi que leurs classements relatifs pour chaque contexte du processus de développement de produits, ensuite on considère simultanément les degrés d'importance accordés à ces facteurs par dans les deux contextes.

### 7.1.1 Analyse des facteurs favorables à l'opérationnalisation de l'éco conception

L'industrie électronique asiatique considère d'une part la personnalisation des outils d'éco conception, la maîtrise et les audits environnementaux et l'engagement de la direction comme des points forts à la planification l'organisation et le contrôle du processus d'éco conception. D'autre part, l'existence d'une politique environnementale active et spécifique à l'entreprise comme facteur incitatif de première importance à la mise en œuvre et contrôle des activités de l'éco conception.

L'alignement des dimensions environnementales stratégiques et opérationnelles et l'existence d'un « *DfE Champion* » seraient d'une importance secondaire comme facteurs incitatifs au management opérationnel de l'éco conception. De même, le suivi de la Voix du Client (*VOC*) et la Voix de l'Environnement (*VOE*) seraient d'une importance secondaire comme facteurs incitatifs à l'exécution et le contrôle des tâches d'éco conception.

L'industrie électronique asiatique ; du moins les entreprises interviewées ne considèrent pas les questions de présence d'équipe inter fonctionnelle des projets de l'éco conception, le bon contact entre les départements sur les questions environnementales, la bonne



éducation à l'environnement et la formation de tout le personnel du processus développement produit ainsi que la présence de ce qu'on appelle « *Champions de l'environnement* » comme facteurs incitatifs à la bonne pratique de l'éco conception . Cela est peut être du à la culture d'entreprises asiatiques et à la simplicité éventuelle des outils d'éco conception en usage.

Cependant, on constate une certaine distorsion entre la partie amont et la partie aval du processus de développement pour les questions de :

- la nécessité de présence de lignes directrices, règles et normes très spécifiques à l'entreprise et,
- l'utilisation des points de contrôle de l'environnement, des revues, des étapes et des feuilles de route.

Ces points sont mutuellement non reconnus par les deux parties comme étant des points forts à exploiter au profit de la bonne pratique de l'éco conception.

Cette distorsion doit être éclaircie et interprétée lors de l'analyse qualitative, à partir d'une interview semi-structurée avec le représentant de la direction.

### **7.1.2 Analyse des obstacles de l'opérationnalisation de l'éco conception**

L'industrie électronique asiatique considère d'une part le trop grand "écart" entre les promoteurs de l'éco conception et ceux qui doivent l'exécuter, les complexités de l'organisation et le manque d'infrastructure appropriée et, le manque de coopération entre les départements comme des obstacles majeurs qui empêchent l'efficacité de la planification ,l'organisation et le contrôle du processus d'éco conception. D'autre part, le moins de demande du marché aux produits éco conçus, le manque d'objectifs environnementaux et de vision pour chaque projet de développement constitueraient les grands obstacles à l'exécution et le contrôle des activités de l'éco conception.

Le manque d'engagement de la direction et de support, la grande complexité des outils disponibles sont et le manque du contexte industriel en général et l'absence de connexion de l'environnement avec les considérations d'affaires seraient des problèmes d'importance secondaire au management opérationnel de l'éco conception. De même, trop de questions liées aux matériaux, le manque de réflexion innovante et le manque d'essais de prototypage seraient des obstacles d'une importance secondaire à l'exécution et le contrôle des tâches d'éco conception.

L'industrie électronique asiatique ; du moins les entreprises interviewées manifestent globalement une négligence aux questions méthodologiques de l'éco conception (réflexion sur le cycle de vie, questions abordées en termes de fin de cycle de vie ou recyclage,

problèmes logistiques, incitations réglementaires, expérience des autres entreprises (Benchmarking Environnemental)...) quant à l'exécution et le contrôle des activités de conception.

D'autant plus, on constate une certaine distorsion entre la partie amont et la partie aval du processus de développement vis-à-vis des questions organisationnelles de l'éco conception (implication et la coopération entre les différents départements). Cette distorsion doit être éclaircie et interprétée lors de l'analyse qualitative sur la base d'une interview semi-structurée avec le représentant de la direction.

Les facteurs de premier ordre qu'ils soient parmi les obstacles ou facteurs de succès exprimés par les deux parties amont et aval du processus de développement méritent d'être interprétés et transformés en terme de mesures et actions dans le cadre d'une stratégie de mise en œuvre efficace de l'éco conception, avant de parler d'approches ou outils méthodologiques à entreprendre.

On en déduit que l'intégration de l'éco conception dans le processus de développement de produit doit passer par l'appropriation des points avantageux cités, la réorganisation du processus de développement tout en prenant en considération le modèle de l'horloge de sable, sinon au moins la création ou la spécification des quatre types fonctions qui aident à bien transférer les bonnes pratiques d'éco conception du niveau managérial au niveau de développement de produits et notamment aider à structurer l'équipe du projet de l'éco conception; à savoir la fonction de coordination du Programme d'éco conception et d'assistance technique, la fonction d'évaluation du produit, la fonction de transfert de l'information et les fonctions des « champions » de (DfE).

Les caractéristiques d'une telle stratégie comprennent la vision, le soutien (Support), les ressources, la participation technique, le portage ou "*Peggy backing*", la responsabilisation et la formation / éducation.

## **7.2 Application de la méthodologie intégrée à l'éco conception d'un adaptateur secteur AC**

Selon la directive EuP, l'adaptateur secteur est un élément qui accompagne les principaux produits électroniques. Ainsi, toute déficience d'éco conception de l'adaptateur se traduisant par la non-conformité aux lignes directrices de la directive EuP (*Eco Design of Energy Using Products*) dont le but est l'optimisation de tout le cycle de vie de produit et la considération des effets environnementaux dans chaque



phase du cycle de vie, est susceptible de provoquer des impacts non désirables sur les industries d'équipements électriques et électroniques.

Ainsi, afin d'aider à mieux comprendre l'aspect technique de la stratégie de mise en œuvre d'éco conception, nous avons utilisé l'exemple de l'adaptateur secteur, en s'inspirant des données de l'évaluation du cycle de vie et l'évaluation *QFD* dressées dans l'étude de Trappey et *al.* [61].

L'objet est de reconcevoir un adaptateur secteur en tenant compte de la voix du client, la voix de l'environnement tout en intégrant les aspects environnementaux du produit dès les premières phases de conception et développement du produit.

Le diagnostic du processus de développement produit étant supposé effectué, et qu'un plan d'action est élaboré sur la base d'exploiter de manière efficace les facteurs favorables et pertinents à supporter la méthodologie intégrée de l'éco conception (figure (30)) et de remédier notamment aux différents obstacles relevés et qui risquent d'entraver la bonne marche du projet d'éco conception.

Il est supposé aussi qu'il n'existe pas de conflits majeurs entre la réduction de l'impact environnemental et les fonctionnalités du produit qui sont directement liées à la rentabilité de l'entreprise.

Six grandes étapes sont à suivre pour éco concevoir de « nouveau » notre adaptateur :

- 1) Planification produit (Équipe d'éco-conception, Étude de marché, Benchmarking, Ingénierie Inverse) pour identifier des composants principaux ou les unités fonctionnelles de l'adaptateur actuel)
- 2) Évaluation environnementale (LCA simplifiée, Benchmarking Environnemental ou bien liste de contrôle) pour déterminer parmi les étapes du cycle de vie de l'adaptateur celles qui présentent des aspects ayant le plus d'impacts, ensuite à partir des aspects environnementaux pertinents associés à ces étapes, définir les objectifs environnementaux associés à l'adaptateur , en considérant; pro activement la réglementation environnementale, la concurrence et les objectifs environnementaux propres à l'entreprise.
- 3) Choix des stratégies de l'éco conception pour atteindre ces objectifs,
- 4) Expression de la voix de l'environnement (*VOE*) par le moyen de l'outil QFDE (Ia) et par le moyen du QFDE (Ib), les paramètres techniques pertinents de la conception. Cette étape est assez compliquée du fait qu'il faut associer d'abord la voix de l'environnement (*VOE*) à la voix du client (*VOC*); déjà issue d'un QFD ordinaire. Cette association est effectuée par le moyen d'une stratégie de conception. C'est-à-dire associer une importance relative à chacune de ces voix.



Ensuite, coupler les voix avec les paramètres techniques de conception par l'outil QFDE (Ib). Le résultat étant la détermination des paramètres techniques de conception les plus pertinents. La détermination des composants de l'adaptateur qu'il faut toucher afin de résoudre le problème de conception est faite par le moyen de l'outil QFDE (II).

- 5) Analyser et modéliser le problème de conception présenté par les composants techniques pertinents de l'adaptateur en utilisant la méthodologie de résolution des problèmes inventifs *TRIZ* (Analyse par *Su-Fields* et Résolution par les 76 Standards en annexe 4). La conformité environnementale des solutions conceptuelles innovantes obtenues sont testées par l'algorithme de Hsiang-Tang [30]. Voir figure (33).
- 6) L'évaluation des éco concepts suppose la disponibilité de plusieurs solutions en main à comparer. Alors que nous n'avons traité qu'un seul problème de conception parmi cinq (Au premier rang; réduction du Volume et/ou masse, *réduction des vibrations* pour réduire le bruit du transformateur, réduction des ondes électromagnétiques et au deuxième rang; réduire la consommation d'énergie), cette étape qui fait référence à la figure (34) n'a pas été traitée.

### 7.2.1 Planification de produit

Un adaptateur secteur (voir figure (36)) est constitué principalement d'un transformateur qui abaisse la tension alternative à la même fréquence, suivi d'un pont de diodes qui redresse cette tension et d'une batterie de condensateurs qui lisse la tension redressée.

Le schéma de principe est représenté dans la figure (37).

Sept types de composants de l'adaptateur de référence (produit à reconcevoir) sont identifiés :

- 1) Condensateurs,
- 2) Diodes,
- 3) Circuit Intégrés,
- 4) Transformateur,
- 5) Pièces mécaniques,
- 6) Circuits imprimés et
- 7) Résistances.

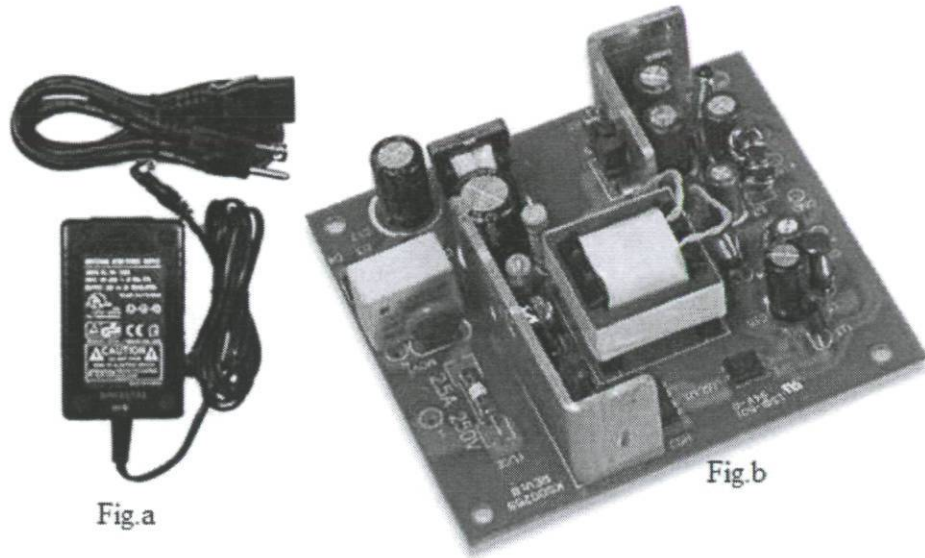


Fig.36 : Adaptateur secteur AC et une vue d'ensemble de ses composants électriques et électroniques. Sources :

Fig. b: <http://www.p-wholesale.com/cn-pro/5/123to2/acac-switching-adapter-95689.html>

Fig. a: <http://www.electroniccity.com/shopping/pricelist.asp?prid=332&brandinc=6>.

Visités le 1 juillet 2011.

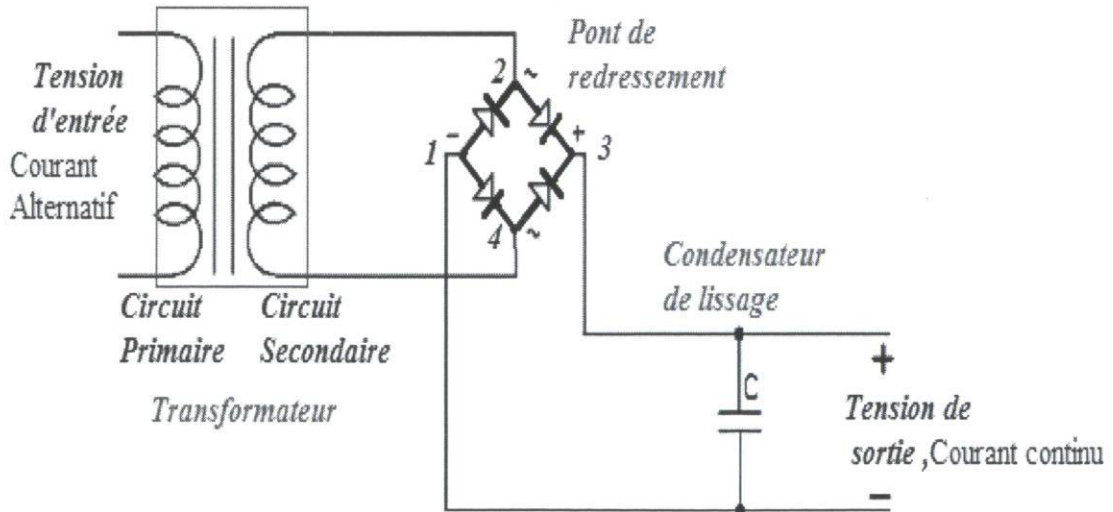


Fig.37 : Principe de fonctionnement d'un adaptateur secteur

## 7.2.2 Évaluation environnementale de l'adaptateur

(LCA simplifiée, Benchmarking Environnemental ou bien liste de contrôle),

### a) Évaluation du cycle de vie :

\*\* En utilisant le Tab.2 : Matrice LCA-simplifiée *ERPA*, les résultats de l'analyse LCA simplifiée (matrice 5x5) sont repartis par étape de cycle de vie de l'adaptateur actuel dans la figure (38):

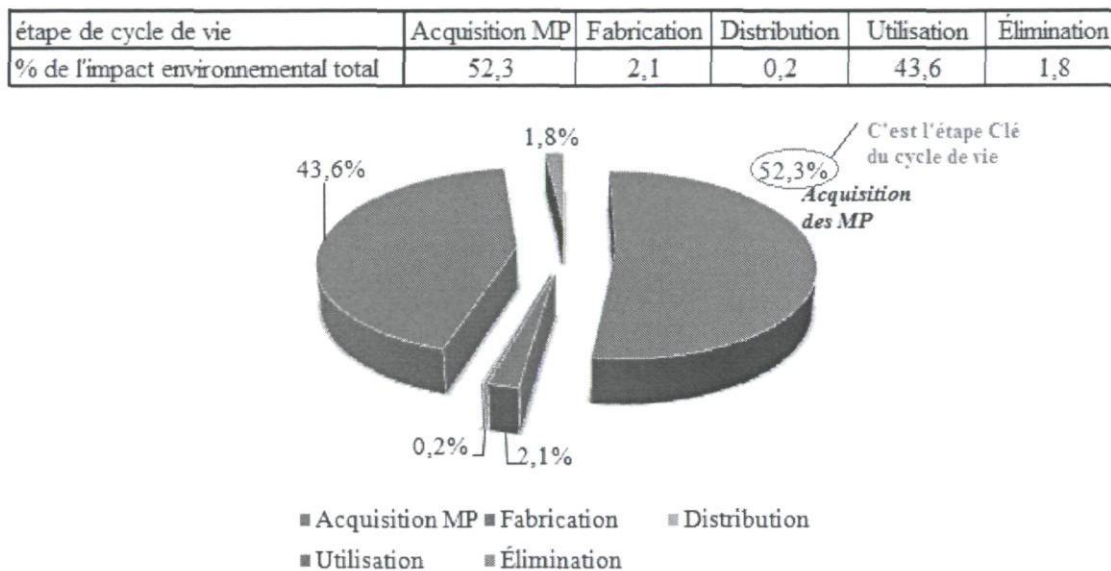


Fig. 38 : Résultats de l'analyse de cycle de vie (LCA Simplifiée) de l'adaptateur actuel

Il est clair que l'étape d'acquisition des matières premières et celle de l'utilisation ont des impacts environnementaux négatifs les plus significatifs. Elles représentent à deux : 95,9% du total des impacts environnementaux.

### b) Évaluation environnementale : perspective des parties prenantes :

L'étape de fabrication n'étant pas l'étape clé du cycle de vie, la méthode de Benchmarking environnemental (*BE*) est la méthode appropriée pour identifier les points faibles environnementaux ainsi que de combien faut-il les améliorer ?

\*\* La réglementation environnementale ; voir Tableau(9)

Toutes les exigences sont supposées être vérifiées puisque le produit en question est commercialisé en Europe. Autrement, toute non-conformité avec la réglementation et



toute suggestion d'anticipation de la réglementation doivent être considérées « au premier rang » des modifications lors de l'étape de résolutions des problèmes de conception.

\*\* Deux adaptateurs de la concurrence sont considérés dans cette étude. Du Tableau (4) (Les 31 paramètres de Benchmarking Environnemental, proposés pour l'industrie électronique par Park et al. [47]. on extrait Six paramètres environnementaux pour évaluer la performance environnementale à savoir ;

- 1) Le nombre de pièces de l'adaptateur,
- 2) le nombre de types de matériaux,
- 3) le poids de l'adaptateur,
- 4) le poids de l'emballage,
- 5) Le rapport Poids/Longueur des câbles et
- 6) la surface de la carte électronique (le circuit imprimé *PCB*).

Le tableau (15) regroupe les résultats de Benchmarking environnemental.

**Tab.15 : Identification des points faibles environnementaux de l'adaptateur actuel :**

Produit	Adaptateur actuel	Compétiteur 1	Compétiteur 2	Amélioration cible %	Poids relatif % (normalisation)
<b>Paramètres Environnementaux</b>					
Nombre de pièces	0	0	++	<b>24</b>	24/122=0.19
Nombre de types de matériaux		+	++	<b>14</b>	14/122=0.11
Poids du produit	0	0	++	<b>13</b>	13/122=0.11
Poids de l'emballage	0	0	++	<b>12</b>	12/122=0.10
Poids/Longueur des câbles	0	0	++	<b>51</b>	51/122=0.42
Surface de <i>PCB</i>	0	+	0	<b>08</b>	08/122=0.07
	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>122</b>	<b>1.00</b>
	Nombre total de points			Total	

\*Les produits des compétiteurs choisis sont meilleurs par rapport à notre produit (le nombre total de points de l'adaptateur actuel étant zéro).

\*L'attribution 0 signifie que notre produit est au même pied d'égalité avec celui du concurrent.

\*L'attribution ++ signifie une légère supériorité,

\*L'attribution +++ signifie une supériorité flagrante.

On obtient alors, les points faibles environnementaux du produit actuel par rapport aux produits concurrents ainsi que leurs importances relatives correspondants.

### 7.2.3 Choix de stratégies d'éco conception pour l'adaptateur AC

Les stratégies d'éco conception sont dérivées, soit de l'annexe 1 de la directive Européenne EuP ; Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council [18], soit des travaux de Masui et *al.* [40]

Nos stratégies d'éco conception pour cet exemple illustratif ; en nombre de huit sont dérivées de l'annexe 1 de la directive EuP :

- a) Moindre utilisation de matière,
- b) Moindre consommation d'énergie
- c) Moindres poids et volume (Facilité de transport et de conservation),
- d) Moindres émissions et déchets,
- e) Facilité de réutilisation et recyclage,
- f) Facilité de fabrication et assemblage,
- g) Facilité de désassemblage et
- h) Émission en toute sécurité lors de la fabrication.

Ces stratégies représentent la Voix de l'environnement (*VOE*), sauf qu'on ne sait pas en ce moment le poids relatif de chacune d'elles.

### 7.2.4 Déploiement de la Fonctin Qualité pour l'Environnement

Afin d'identifier la Voix de l'Environnement (*VOE*), on doit déterminer les relations entre les points faibles environnementaux et les stratégies d'éco conception en utilisant QFDE (Ia), représentée par la « maison Qualité » au tableau (16) :

Tab. 16 : QFDE Ia; Identification de la voix de l'environnement *VOE*

QFDE Ia	Poids	Stratégies d'éco conception dérivées de l'annexe 1 de la directive EuP ( <i>VOE</i> )							
		a	b	c	d	e	f	g	h
Paramètres environnementaux									
Nombre de pièces	<b>0.19</b>	9	5	5	9	9	9	9	3
Nombre de types de matériaux	<b>0.11</b>	3	3	3	3	9	3	3	3
Poids du produit	<b>0.11</b>	9	3	9	3	3	3	3	3
Poids de l'emballage	<b>0.10</b>	9	3	9	9	3	3	3	3
Poids/Longueur des câbles	<b>0.42</b>	9	9	9	9	9	3	3	3
Surface de PCB	<b>0.07</b>	9	3	9	9	9	3	3	3
<b>Score de l'éco stratégie</b>		8.34	6.32	7.58	7.68	4.8	4.14	4.14	3
<b>Poids relatif de l'éco stratégie</b>		<b>0.17</b>	<b>0.11</b>	<b>0.16</b>	<b>0.16</b>	<b>0.16</b>	<b>0.09</b>	<b>0.09</b>	<b>0.06</b>

Les stratégies d'éco conception pondérées représentent la Voix de l'Environnement(*VOE*). Voir la figure (39).

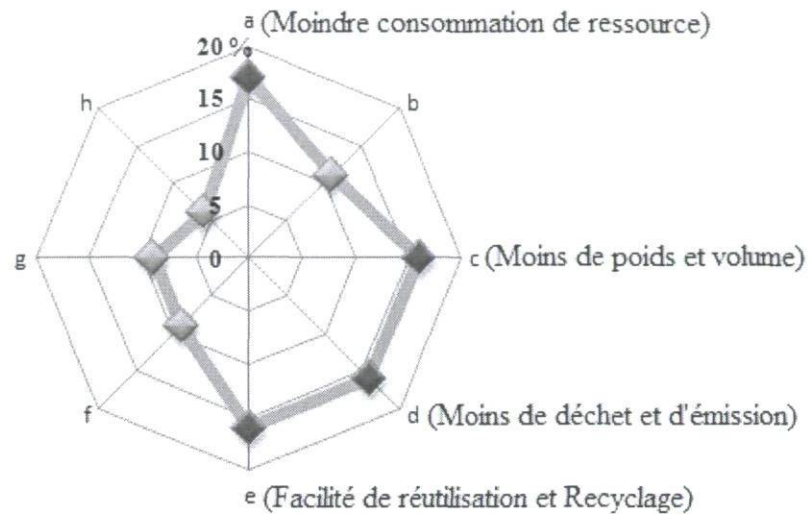


Fig.39 : Voix de l'environnement *VOE* obtenue par QFDE Ia, exprimée essentiellement en quatre stratégies d'éco conception (moindre consommation de ressource, moins de poids et volume, moins de déchet et émission et facilité de réutilisation et recyclage).

«**Moins de bruit**» et «**réduction des ondes électromagnétiques**» sont les deux préoccupations majeures de la clientèle. En conséquence, ces deux paramètres sont considérés la voix du Client (*VOC*) avec les poids exprimés dans le tableau (17) obtenus par un simple QFD ordinaire.

Tab. 17 : Identification de la voix du Client (*VOC*)

Voix du client ( <i>VOC</i> )	Moins de bruit (i)	Réduire les ondes électromagnétiques (j)
Poids correspondants	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>

En vue d'identifier les paramètres techniques de conception du Produit nécessaires à améliorer pour satisfaire simultanément les exigences de l'environnement et du client, on utilise QFDE (Ib).

Ces paramètres sont biaisés par le choix de stratégie de conception à suivre. Les choix externes de cette stratégie sont : une orientation à 100% (*VOC*) ou bien une orientation 100% (*VOE*).

On propose de mener une simple étude de sensibilité en attribuant à chacune des voix une fraction centésimale. Voir le tableau (18);



Tab. 18 : QFDE I b; Identification des paramètres techniques biaisés par le facteur de sensibilité

QFDE Ib	Poids	Consommation d'énergie	Masse	Volume	Vibration	Ondes électromagnétiques	
V O E	a	K*0.17	3	9	9	3	3
	b	K*0.11	9	3	3	3	5
	c	K*0.16	3	9	9	5	5
	d	K*0.16	3	5	5	5	5
	e	K*0.16	3	5	5	5	5
	f	K*0.09	3	5	5	5	5
	g	K*0.09	3	5	5	5	5
	h	K*0.06	3	3	3	9	5
VOC	i	(1-K)*0.5	3	3	3	9	3
	j	(1-K)*0.5	3	3	3	3	9
Score final et Poids relatif Pkj Du paramètre de Design j en fonction du facteur K	K= 0.0		3.00	3.00	3.00	6.00	6.00
			0.14	0.14	0.14	0.29	0.29
	0.1		3.07	3.30	3.30	5.87	5.87
			0.14	0.15	0.15	0.27	0.27
	0.2		3.13	3.60	3.60	5.74	5.73
			0.14	0.17	0.17	0.26	0.26
	0.3		3.20	3.89	3.89	5.60	5.60
			0.14	0.18	0.18	0.25	0.25
	0.4		3.26	4.19	4.19	5.47	5.46
			0.14	0.19	0.19	0.24	0.24
	0.5		3.33	4.49	4.49	5.34	5.33
			0.14	0.20	0.20	0.23	0.23
	0.6		3.40	4.79	4.79	5.21	5.20
			0.15	0.2	0.2	0.22	0.22
	0.7		3.46	3.46	5.09	5.08	5.06
			0.15	0.21	0.21	0.21	0.21
	<b>0.8</b>		<b>3.53</b>	<b>5.38</b>	<b>5.38</b>	<b>4.94</b>	<b>4.93</b>
			<b>0.15</b>	<b>0.22</b>	<b>0.22</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>
	0,9		3.59	5.68	5.68	4.81	4.79
			0.15	0.23	0.23	0.20	0.20
K=1,0		3.66	5.98	5.98	4.68	4.66	
		<b>0.15</b>	<b>0.24</b>	<b>0.24</b>	<b>0.19</b>	<b>0.19</b>	
<b>Moyenne Poids relatif</b>			0.14	0.19	0.19	0.23	0.23
<b>Écart-type</b>			<b>0.0013</b>	<b>0.0320</b>	<b>0.0320</b>	<b>0.0325</b>	<b>0.0328</b>

K étant le facteur de sensibilité,

K=1 si la stratégie de conception est carrément orientée Environnement.

K=0 si la stratégie de conception ne considère que les exigences du client.

De ce tableau on voit que tous paramètres techniques sont sensibles à l'orientation de la stratégie de conception excepté la consommation d'énergie puisque ce paramètre devait répondre dans une certaine mesure à la fois aux exigences du client et de l'environnement.

Les paramètres techniques de conception étant maintenant identifiés. On doit déterminer parmi les composants du produit identifiés lors de la première étape de cette méthodologie, ceux qui reflètent les dix aspects de conception qui traduisent la voix du client (deux) et la voix de l'environnement (huit). C'est-à-dire les composants spécifiques.

Pour ce faire, on utilise QFDE II conservant l'ouverture de la stratégie de conception à tous les scénarios possibles entre L'orientation Client et l'orientation verte. Voir le tableau (19)

**Tab. 19 : QFDE II; identification des composants spécifiques en tenant compte du facteur de sensibilité**

QFDE II	poids	Condensateurs	Diodes	Circuits intégrés	Transformateur	Pièces mec.	Circuits Imprimés	Résistances
Consom. énergie	<b>Pk1</b>	9	9	9	<b>9</b>	3	3	3
Masse	<b>Pk2</b>	3	3	3	<b>9</b>	5	3	3
Volume	<b>Pk3</b>	3	3	3	<b>9</b>	9	9	3
Vibration	<b>Pk4</b>	3	3	3	<b>9</b>	5	3	3
Ondes Électro-Magnétiques	<b>Pk5</b>	3	3	3	<b>9</b>	9	3	3
Score et poids relatif du composant spécifique en fonction du facteur de sensibilité K								
K=0.00		3.86	3.86	3.86	9.00	6.43	3.86	3.86
		0.11	0.11	0.11	0.26	0.19	0.11	0.11
K=0.20		3.86	3.86	3.86	9.00	6.42	3.99	3.86
		0.11	0.11	0.11	0.26	0.18	0.11	0.11
K=0.80		3.88	3.88	3.88	9.00	6.41	4.44	3.88
		<b>0.11</b>	<b>0.11</b>	<b>0.11</b>	<b>0.25</b>	<b>0.18</b>	<b>0.13</b>	<b>0.11</b>
K=1.00		3.88	3.88	3.88	9.00	6.41	4.44	3.88
		0.11	0.11	0.11	0.25	0.18	0.13	0.11

On constate que quel que soit la sensibilité le composant de l'adaptateur le plus critique pour répondre aux exigences du client et de l'environnement est le transformateur.

En optant ici pour une stratégie de conception influencée par l'environnement à un niveau de (K=0.8)

Les paramètres critiques de design sur lesquels faudra-t-il se focaliser pendant l'étape de génération des nouveaux concepts sont :

- Au premier rang : Volume (0.22) et/ou masse (0.22) et/ou, vibration (0.20) et/ou, réduction des ondes électromagnétiques (0.20).
- Au deuxième rang : Consommation d'énergie (0.15).

### 7.2.5 Développement de nouveaux éco concepts (Méthodologie TRIZ)

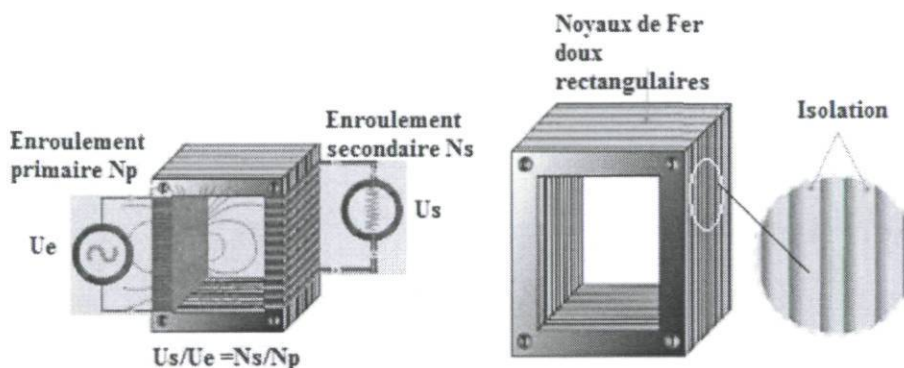
Dans cet exemple illustratif, nous avons choisi de développer l'alternative de diminution des vibrations pour réduire le bruit du transformateur AC (Courant alternatif).

Les autres alternatives (réduction des ondes électromagnétiques, réduction du volume et/ou la masse et la réduction de la consommation d'énergie) peuvent être développées afin d'élargir le nombre des solutions en main. Le choix du meilleur éco concept peut se faire à l'étape d'évaluation par les méthodes multicritères comme l'*AHP* (*Analytic Hierarchic Process*) ou l'*ANP* (*Analytic Network Process*) ou *Fuzzy ANP*...

Jusqu'à présent, l'orientation de l'amélioration de la conception est encore inconnue. L'analyse *Su-Field* ; variante de la méthodologie TRIZ que nous avons étudiée au chapitre précédent sera utilisée pour nous aider à identifier cette orientation.

On utilise alors, la procédure représentée dans la figure (33),

- 1) Identifier le problème : Réduire les Vibrations du transformateur pour réduire le bruit.
- 2) Construire le modèle initial de *Su-Field* :



**Fig. 40 : Transformateur électrique**

Source : (<http://www.tutorvista.com/content/physics/physics-iv/alternating-currents/transformer-animation.php>), Dernière Visite le 11 juillet 2011

À partir de la figure (40), on peut considérer dans le modèle initial *Su-Field*, la substance S1 c'est les noyaux de Fer doux, la substance S2 c'est l'enroulement aussi bien primaire que secondaire et le champ F c'est le Champ d'induction électromagnétique.

- 3) Le modèle est complet (vé pôle de base : S1, F, S2) ; voir figure (41)
- 4) Il y'a un effet nuisible : Le bruit causé par la transformation des champs électrique et magnétique dans le noyau de Fer doux du transformateur.



Dans le modèle initial *Su-Field*, une action nuisible causé par le champ F qui est généré par S2 pour influencer S1, en autorisant les lames de fer de vibrer au rythme du réseau. Selon la procédure, afin d'analyser le problème on doit utiliser la règle de transformation (4): « La façon la plus efficace d'éliminer une substance ou champ nuisible, indésirable ou pas nécessaire, est d'introduire un nouveau composant pouvant être considéré comme une modification du composant existant ».

Ce qui correspond à la solution standard 1-2-3 de l'annexe 2 (76 Solutions Standards associées à l'analyse *Su-Field*) .Voir Annexe 2.En vue d'absorber cet effet nuisible, on doit introduire soit un champ soit une substance S3 .Voir la figure (41).

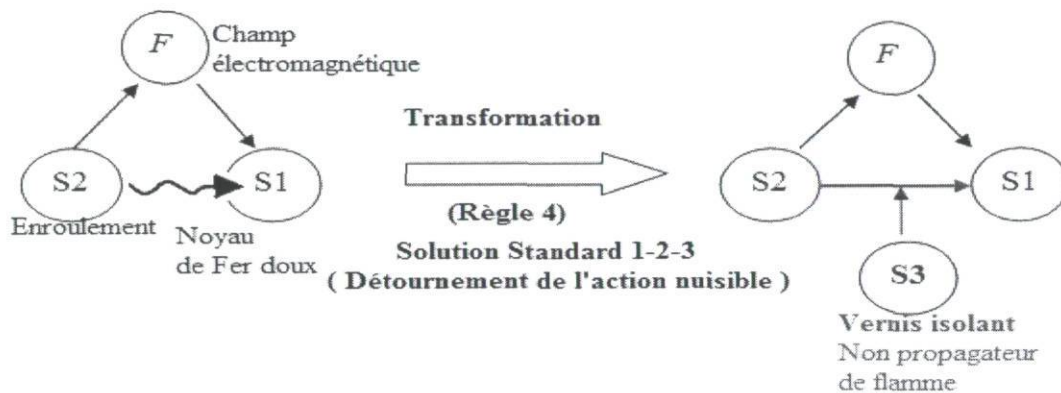


Fig.41 : Modélisation et analyse du problème de conception

La substance S3 proposée est le vernis isolant « Non propagateur de flamme ». L'imprégnation de l'ensemble Fer-Bobinage dans le vernis isolant permet en plus d'absorber les vibrations sonores, de pérenniser les caractéristiques mécaniques et éviter les déplacements de spires vers les tôles, éviter l'infiltration de l'humidité dans les isolants et un meilleur échange thermique <http://bricolsec.canalblog.com/tag/joule> [13].

5) Existe-t-il une matière dangereuse ?

Il n'est pas question que le vernis isolant contienne des retardateurs de flamme interdits par la réglementation environnementale comme :

Les poly bromo bi phényles éthers (PBDE) qui sont cancérigènes.

Les poly bromo bi phényles (PBB) qui ne sont plus produits en Amérique du Nord.

La classe de vernis CB qui satisfait aux exigences de la norme ASTM D 1932, ' *Military Specification Insulating Varnishes and Solvent less Resin For Application by the Dip Process* ' peut s'appliquer sur les enroulements et les bobines fixes comme dans notre cas (ASTM : American Society For Testing And Materials).

<http://www.wbdg.org/ccb/FEDMIL/i24092d.pdf> [65].

D'où la solution en main; un éco concept potentiel à comparer avec les autres éco concepts éventuels.

## Conclusion

Dans les dernières années, les consommateurs, les entreprises et les gouvernements ont augmenté leur attention vers l'environnement. Les gouvernements ont changé les lois sur l'environnement de "end of pipe" à d'autres plus approfondies, notamment l'élargissement de la responsabilité des producteurs de leurs produits, le long de tout leur cycle de vie. Les entreprises investissent davantage dans l'évaluation et la réduction de l'impact environnemental de leurs produits et services.

Pour qu'une action puisse contribuer à la réduction des impacts négatifs sur l'environnement deux conditions sont à réunir (Jolliet et al.) [32] :

Disposer de solutions technologiques satisfaisantes pour l'utilisateur et déterminer quelles sont les priorités d'action parmi l'ensemble des mesures possibles, en tenant à la fois compte de leur efficacité environnementale, de leurs coûts et des contraintes qu'elles impliquent sur le plan économique. Pour répondre à ces conditions, on distingue trois approches environnementales industrielles : Approche processus : Prévention de la pollution ou Production Plus Propre, l'approche produit : Éco conception et l'approche globale: Écologie Industrielle.

L'éco conception est une pratique par laquelle les considérations environnementales sont intégrées, dès la phase de conception des produits et services. Cependant, juste un nombre limité de firmes réussissent à mettre en œuvre l'éco conception de manière cohérente et efficace. Au niveau de la recherche en éco conception, trois grandes lacunes existent :

- Complexité des approches existantes,
- Non considération des aspects organisationnels dans les approches courantes,
- Manque d'une approche systématique et intégrée dans les méthodes d'évaluation environnementales existantes.

L'Objectif de cette recherche a été de livrer une stratégie de mise en œuvre claire et efficace de l'éco conception qui tient compte, aussi bien facteurs exogènes; la voix du client (*VOC*) et la voix de l'environnement (*VOE*) et les facteurs endogènes qui tiennent compte des spécificités organisationnelles de l'entreprise.

- Les aspects techniques de la stratégie décrivent une méthodologie intégrée au processus de développement de produits en six étapes qui amène à un ensemble d'éco concepts innovantes.
- Les aspects organisationnels de la stratégie décrivent une procédure de diagnostiquer le processus de conception et développement de produits sur la base



d'ensemble de facteurs favorables et défavorables à l'opérationnalisation de l'éco conception dans une entreprise. Les analyses quantitative et qualitative amenant à faire un plan d'action cohérent capable de supporter la mise en œuvre efficace du kit méthodologique proposé.

La contribution de ce travail réside dans la proposition d'un guide stratégique de mise en œuvre des projets d'éco conception, résultat de plusieurs analyses de différentes facettes de l'éco conception et notamment des réadaptations et ajustements de certaines approches combinées et intégrées récentes. Ce guide commence par un diagnostic du processus de conception et développement ,ensuite établissement un plan d'action pour soutenir la mise en œuvre de la méthodologie intégrée proposée Il doit s'inspirer du modèle de « l'horloge de sable » pour situer et renforcer les quatre types fonctions qui aident à bien transférer les bonnes pratiques d'éco conception du niveau managérial au niveau de développement de produits . Enfin entamer la séquence des activités de conception en six étapes : la planification de produit, l'évaluation environnementale, le déploiement de la qualité pour l'environnement, l'analyse et modélisation des problèmes de conception et le test éco conceptuel des solutions en main, enfin l'évaluation des éco concepts et application.

La vision pour chaque projet d'éco conception, le soutien (Support), les ressources, la participation technique, le portage ou "*Peggy backing*, la responsabilisation et la formation / éducation sont les caractéristiques clés d'une excellente organisation de l'éco conception.

Le point critique de notre stratégie, est de supposer l'absence de confits majeurs entre la réduction de l'impact environnemental et l'amélioration de la fonctionnalité du produit qui est en rapport directe avec la profitabilité de l'entreprise. Cette hypothèse peut être réfutée notamment au fur et à mesure de l'amélioration continue des éco concepts, au point de ce qu'on appelle l'éco efficience ; la frontière où toute réduction de l'impact environnemental s'accompagne avec une perte de profitabilité de l'entreprise. La résolution de tels conflits élargit le cadre méthodologique de l'éco conception en adoptant les modèles descriptifs de la conception (heuristiques) et la conception axiomatique. Les travaux de (Fitzgerald et al.) [23] peuvent être un bon départ pour attaquer cette problématique. Ils font appel à d'autres outils méthodologiques actuellement en exploration qui se basent sur la conception par analogie, la synectique et la génération de concepts biomimétiques.

La stratégie d'éco conception étant considérée comme une intervention de conception destinée à tenir compte du comportement d'un produit vis-à-vis de l'environnement, au cours de son cycle de vie. Elle doit, en général, avoir l'objectif principal d'optimiser la répartition des flux de ressources et des émissions par :

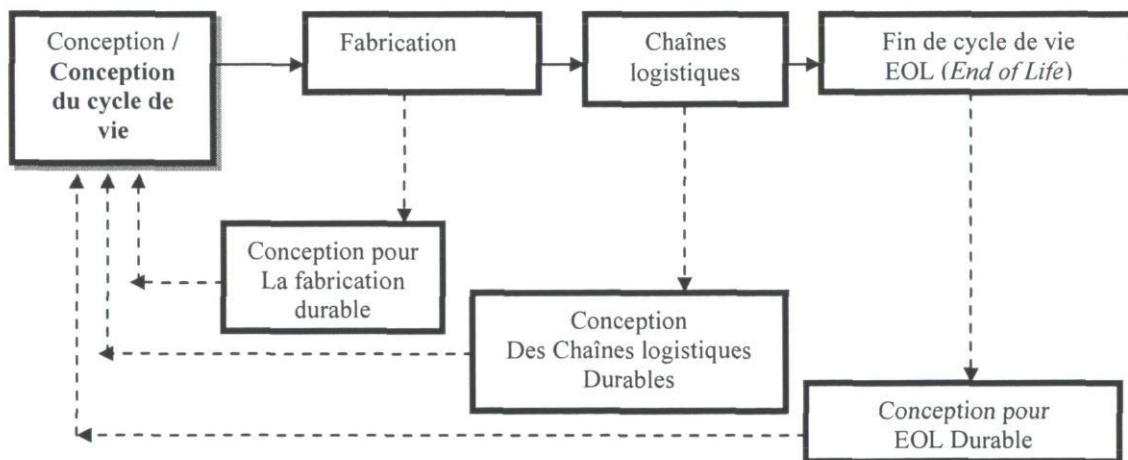


- La réduction des volumes de matériaux utilisés et l'extension de leur durée de vie,
- La fermeture des cycles des flux de ressources grâce à des interventions de récupération,
- La réduction au minimum des émissions et de la consommation d'énergie dans la production, l'utilisation et l'élimination.

Pour atteindre pleinement ces conditions, il est nécessaire d'intervenir dans deux zones séparées : La conception des produits et la conception des processus (Giudice et al.) [25]. Alors que notre présente recherche ne concerne que la conception produits.

La recherche scientifique est présentement limitée au niveau des interfaces entre la conception et plusieurs étapes du cycle de vie du produit. (Voir figure (42)).

La planification pour la durabilité et le développement des stratégies de développement durable nécessitent une collaboration interentreprises, une vision réseau et une forme d'adaptation du modèle d'affaires de l'entreprise au fil des temps. Les directeurs de recherche doivent ainsi, mettre en œuvre une approche d'aide à la prise de décision pour la conception durable des systèmes complexes, dans laquelle la conception, la fabrication, les chaînes logistiques, et traitement en fin de cycle de vie soient tous liés.



**Fig. 42 : Interfaces entre la conception et les différentes étapes du cycle de vie d'un produit**

Source : inspiré de Ramani et al. (2010)

## Annexes

### Annexe 1

**Tab. 1 : Type d'informations utiles la conception d'un produit**

Source : Dieter et Schmidt, (2009)

Client	Enquêtes et feed-back
	Données de marketing
Motifs liés à la conception	Spécifications et dessins pour les versions précédentes du produit
	Dessins et modèles similaires de concurrents (reverse engineering)
Méthodes d'analyse	Rapports techniques
	Programmes informatiques spécialisés, par exemple, analyse par éléments finis.
matériaux	Performance des conceptions passées (AMDEC)
	Propriétés
Fabrication	Aptitude des processus, méthodes de l'assemblage
	Analyse de la capacité
	Sources de fabrication
Coûts	Historique des coûts
	Matériel actuel et coûts de fabrication
Composants standard	Disponibilité et qualité des fournisseurs
	Dimensions et des données techniques
Normes techniques	ISO, ASTM (American Society for Testing and Materials),
	Spécificités propres de la compagnie
Réglementation	Sécurité, environnement, règlements basés sur la performance...
Questions de cycle de vie	Maintenance/Feedback, Fiabilité et données de la Qualité et de garantie, recyclabilité,...

**Tab.2 : Priorités environnementales perçues par les différentes parties prenantes.**

Exemple des Produits audio, D'après Stevels (2001). Source : Boks et Stevels (2003)

Différents domaines d'intervention	Énergie	Substances dangereuses	Matériaux	Emballage	Recyclabilité
Parties prenantes					
Client	1	2	3	4	5
Personnel commercial	1	2	3	5	4
Science LCA-base	1	5	2	4	3
Politiques Gouvernementales	3	1	5	4	2

1 : plus forte importance...5 : plus faible importance.

**Tab.4 Les 31 paramètres de Benchmarking Environnemental, proposés pour l'industrie électronique par Park et al. (2005)**

Étape du cycle de vie	Paramètre (BE)	Attribut	Étape du cycle de vie	Paramètre (BE)	Attribut
<b>Acquisition des Matières</b>	Contenu en matières dangereuses	-	<b>Utilisation</b>	Efficacité énergétique du Chargeur	-
	Marquage des composants dangereux	+		Consommation d'énergie en mode Stand-by	-
	Surface de la carte du circuit imprimé(PCB)	-		Consommation en mode Opérationnel	-
	Nombre de Composants dans la (PCB)	-		Quantité de consommables nécessaires	+
	Surface de l'afficheur en Cristaux Liquides(LCD)	-	<b>Fin de Cycle de vie (End Of Life)</b>	Contenu en matières recyclées	+
	Rapport (poids /Longueur) du câble (ou câblage)	-		Contenu en matières recyclables	+
	Poids des matériaux de l'emballage	-		Partie réutilisable	+
	Poids du produit	-		Nombre de joints	-
	Nombre et poids des pièces accessoires	-		Nombre d'outils pour le démontage	-
	Nombre de type de matériaux	-		Durée de démontage	-
	Nombre de pièces	-		Nombre de types de joints	-
	<b>Distribution</b>	Nombre et poids des manuels de l'utilisateur		-	Nombre de pièces
Rapport (poids Emballage/poids Produit)		-		Marquage des matériaux	+
Volume de boîte d'Emballage		-		Nombre de sortes de matériaux	-
Poids total du produit y compris Emballage		-	Période de garantie	+	
Poids total du produit y compris Emballage		-			

(-) : Paramètre négatif (plus la valeur est petite plus la performance environnementale est bonne).

(+) : Paramètre positif (plus la valeur est grande plus la performance environnementale est bonne).

N.B. La fabrication n'est pas concernée par le Benchmarking Environnemental dans l'approche combinée Top down/Bottom up.



**Tab.3 : Approches du Benchmarking Environnemental dans l'industrie automobile : Avantages et inconvénients. D'après Rothenberg et Maxwell (2005)**

Type d'approche du Benchmarking Environnemental	Exemple	Avantage	Inconvénient
Réglementation	*Antécédents de conformité, *Montant total des amendes.	*Explique comment l'entreprise respecte les lois environnementales, *Facilité de mesure,	*La réglementation gouvernementale peut varier considérablement, *Ne donne pas une indication de l'impact environnemental réel.
Émissions brutes	*Total des produits chimiques libérés, *Total des déchets solides,	*Les entreprises peuvent hésiter à révéler une certaine indication des usines relative à l'impact sur l'environnement. *Assez faciles à mesurer.	*Difficile de tenir compte des différences de production entre les usines. *Ne donne pas une indication de l'impact environnemental ou humain réels.
Efficience	*Énergie, eau et ressource d'utilisation par unité fonctionnelle	*Peut indiquer le processus « santé » de l'entreprise, *Facilité de la mesure, *Peut être plus étroitement liée aux autres mesures de performance ; tels que le coût et la qualité.	*Le gaspillage des ressources peut être perçu par les parties intéressées comme un point faible du management des ressources.
Cycle de vie	*Impact environnemental du cycle de vie entier	*Meilleur indicateur de l'impact environnemental, *Comprend aussi la chaîne logistique.	*Extrêmement difficile à mettre en œuvre et à interpréter.

**Tab.5 : Les paramètres du Benchmarking environnemental pour un réservoir de carburant. D'après Wimmer et al. (2005),**

	Paramètres environnementaux
Paramètres Environnementaux Généraux	Poids
	Volume
	Durée de vie
	Fonctionnalité
	Nombre de pièces
	Performance environnementale des pièces approvisionnées
Acquisition des matières premières	Matériaux utilisés
	Problématique des matériaux (par exemple présence de PVC dans les câbles)
Distribution	Type et matériaux d'emballage
	Transport
Utilisation du produit	Facilité d'utilisation
	Consommation d'énergie
	Déchets (au cours d'utilisation)
	Émissions dans Air, Eau et Sol (au cours d'utilisation)
	Bruit et vibration
	Maintenance
	Facilité de réparation
Fin de cycle de vie	Fixations et articulations
	Durée de démontage
	Taux de réutilisation
	Taux de recyclage

N.B. La fabrication n'est pas concernée par le Benchmarking Environnemental dans l'approche combinée Top down/Bottom up de Park et al. (2005)

**Tab.6 : Relation entre les paramètres environnementaux spécifiques issus de la liste de contrôle et les stratégies d'éco conception pour l'industrie électronique grand public.**  
Source : Park et al. (2005)

Catégorie	Paramètre environnemental de la liste de contrôle	Stratégie d'éco conception
<b>Matières auxiliaires</b>	De préférence, utiliser les matières auxiliaires renouvelables	Réduction des matériaux à la source Utilisation des matériaux à contenu énergétique faible
	Recycler autant que possible les matières auxiliaires	<i>Recyclage et réutilisation des déchets</i>
	Utiliser des matériaux auxiliaires acceptables pour l'environnement	Prévention/ Réduction des substances toxiques Utilisation des matériaux à contenu énergétique faible
	Éviter les matériaux auxiliaires dangereux	Prévention/ Réduction des substances toxiques
<b>Énergie</b>	<i>Utiliser les technologies de production d'énergie efficaces</i>	<i>Minimisation de la consommation d'énergie au stade de production</i> <i>Utilisation des sources d'énergie renouvelable</i>
	<i>De préférence, utiliser les ressources d'énergie renouvelables</i>	<i>Utilisation des sources d'énergie renouvelable</i>
	<i>Réduire la consommation d'énergie par la conception d'un procédé optimal</i>	<i>Minimisation de la consommation d'énergie au stade de production</i> <i>Utilisation des sources d'énergie renouvelable</i>
	<i>réduire la consommation globale d'énergie dans le site de production</i>	<i>Minimisation de la consommation d'énergie au stade de production</i> <i>Utilisation des sources d'énergie renouvelable</i>
<b>Déchets</b>	Utiliser les technologies de production à faibles émissions	<i>Minimisation des déchets et émissions dans l'environnement</i>
	Éviter les technologies de production dangereuses pour l'environnement	<i>Minimisation de la consommation d'énergie au stade de production</i>
	Éviter le gaspillage dans le processus de production	<i>Minimisation des déchets et émissions dans l'environnement</i>
	Fermer les cycles de matière dans le processus de production	<i>Recyclage et réutilisation des déchets</i>
	Recycler/Réutiliser les déchets des nouvelles matières	<i>Recyclage et réutilisation des déchets</i>
	Éliminer les déchets inévitables d'une manière écologiquement acceptable	<i>Recyclage et réutilisation des déchets</i>
	Tri des déchets/Séparation quand c'est possible	<i>Recyclage et réutilisation des déchets</i>
<b>Émission</b>	<i>Éviter les émissions de l'environnement dans le procédé de production</i>	<i>Minimisation des déchets et émissions dans l'environnement</i>

**Tab.7 : 25 Stratégies d'éco conception proposées pour l'industrie électronique grand public, d'après Park et al. (2005)**

Catégorie d'attributs		Stratégie d'Éco conception	Catégorie d'attributs		Stratégie d'Éco conception
<b>Produit</b>	<b>Utilisation</b>	Indication de la consommation des ressources/énergie le long du stade d'utilisation	<b>Matériaux</b>	<b>Utilisation</b>	Prévention/ Réduction des substances toxiques
		Étiquetage des matériaux y compris les instructions pour élimination			Réduction de consommation des matériaux pendant l'utilisation
	<b>Élimination</b>	<i>Facilité de démontage</i>			Réduction des matériaux à la source
		<i>Inclusion des instructions d'élimination du produit pour les utilisateurs</i>			Réduction du nombre des matériaux et pièces
	<b>Cycle de vie</b>	Maintenance et Réparation facile			Réutilisation des pièces et composants mis à neuf
		Facilité de mise à neuf			Utilisation des matériaux à contenu énergétique faible
		Éco conception des surfaces			Utilisation des matériaux recyclables
		Intégration des fonctions			Utilisation des matériaux recyclés
		Standardisation des composants			Utilisation des matériaux renouvelables
	<b>Énergie</b>	<b>Utilisation</b>			<i>Minimisation de la consommation d'énergie au stade d'utilisation</i>
<i>Minimisation de la consommation d'énergie au stade de production</i>			<i>Recyclage et réutilisation des déchets</i>		
<i>Utilisation des sources d'énergie renouvelable</i>			<b>Emballage</b>	Optimisation du rapport poids/Volume de l'emballage	
		Utilisation des matériaux d'emballage réutilisables			







## Annexe 4

Liste des 76 standards de résolution des problèmes inventifs, associés à l'analyse Su-Field. Sources : Althsuler et al. [3] et Gasanov et al. [24]

- **Classe 1 : Construction et destruction des systèmes vé pôles (13)**

\*Sous-classe 1.1 : Synthèse des vé pôles (8)

1.1.1 : *Construction du vé pole*

1.1.2 : *Vé pole complexe intérieur*

1.1.3 : *Vé pole complexe extérieur*

1.1.4 : *Vé pole basé sur l'environnement.*

1.1.5 : *Vé pole basé sur l'environnement avec les additifs*

1.1.6 : *Régime minimal*

1.1.7 : *Régime maximal*

1.1.8 : *Régime maximal sélectif*

\*Sous-classe 1.2 : Destruction des vé pôles (5)

1.2.1 : *Élimination du lien nuisible par l'introduction de S3*

1.2.2 : *Élimination du lien nuisible par l'introduction de S1 et S2 modifiées*

1.2.3 : *"Détournement" de l'action nuisible*

1.2.4 : *Résistance aux liens nuisibles à l'aide de C2*

1.2.5 : *"Débranchement" des liens magnétiques*

- **Classe 2 : Évolution des systèmes vé pôles (23)**

\*Sous-classe 2.1 : Transition vers les vé pôles complexes(2)

\*Sous-classe 2.2 : Renforcement des vé pôles(6)

\*Sous-classe 2.3 : Renforcement par l'accord des rythmes(3)

\*Sous-classe 2.4 : Fe pôles (vé pôles complexes renforcés) (12)

- **Classe 3 : Transition vers un super-système et au micro-niveau(6)**

\*Sous-classe 3.1 : Transition vers les bi- et poly-systèmes(5)

\*Sous-classe 3.2 : Transition vers les super-systèmes(1)

- **Classe 4 : Standards de détection et de mesure des systèmes(17)**

\*Sous-classe 4.1 : Détours(3)

\*Sous-classe 4.2 : Synthèse des systèmes de mesure(4)

\*Sous-classe 4.3 : Renforcement des vé pôles "de mesure"(3)

\*Sous-classe 4.4 : Transition vers les systèmes Fe pôles(5)

\*Sous-classe 4.5 : Voie d'évolution des systèmes de mesure(2)

- **Classe 5 : Standards d'application des standards(17)**

\*Sous-classe 5.1 : Introduction de substances(4)

\*Sous-classe 5.2 : Introduction des champs(3)

\*Sous-classe 5.3 : Transition de phase(5)

\*Sous-classe 5.4 : Particularités d'utilisation des effets physiques(2)

\*Sous-classe 5.5 : Standards expérimentaux (3)



## Bibliographie

[1](ADEME)

<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=1&cid=96&m=3&catid=12922> , site visité le 07 mai 2011.

[2] Adoue, (2007). *Mettre en œuvre l'écologie industrielle*, Édition Presses Universitaires polytechniques Romandes.

[3] Althsuler et al. (1989) *Search New Ideas: From Insight To Technology (Theory and Practice of Inventive Problem Solving)*, Kishinev: Kartya Moldovenyaska Publishing House. ISBN 5-362-00147-7

[4] Altshuler, (1996) *A suddenly the inventor appeared: TRIZ, The theory of inventive Problem solving*, Technical Innovation Center, MA, and Worcester.

[5] Azapagic et al. (2004) *Sustainable Development in Practice* .John Wiley .New York,

[6] Ballon, (2004) "Scenarios and business models for 4G in Europe", *info*, Vol. 6 Iss: 6, pp.363 – 382.

[4] Baumann et al. (2002). Mapping the green product development field:

Engineering, policy and business perspectives. *Journal of Clean Production* 10 (2002) 409-425. Elsevier Science Ltd.

[8] Blumrich (1970) *Design Science*, vol.168, pp. 1551-1554.

[9] Boks (2005) *The Soft Side of Eco design*, *Journal of Clean Production* 14 (2006) 1346- 1356. Elsevier Ltd

[10] Boks, (2003). How research institutions can contribute towards research progress in true operationalization of eco design. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International seminar on life cycle engineering*. May 22-23, 2003, Copenhagen, Denmark; 2003.

[11] Boks & Stevels (2003): *Theory and Practice of environmental benchmarking in a Major Consumer Electronics Company*. D'après (Ram et Salemink, 1998)

[12] Bouyssou et al. (2006). *Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria : Stepping stones for the analyst International series in operations research and management science* .Volume 86, 2006, DOI: 10.1007/0-387-31099-1 .Springer Link

[13] <http://bricolsec.canalblog.com/tag/joule>, Dernière visite le 11 juillet 2011.

[14] Chang Quing et al. (2005) *A Creative conceptual design ideas can be gotten with TRIZ methodology*.

<http://www.triz-journal.com/archives/2005/06/03.pdf> , dernière visite le 29 juin 2011

[15] Christofari et al. (1996). *Green Quality Function Deployment*. *Proceedings of the 4th International Conference on Environmentally Conscious Design and Manufacturing*, July 23-25, Cleveland, Ohio, pp. . . .297-304.

- [16] Domb, (2006). Using TRIZ to Enhance Quality Functional Deployment, <http://www.triz-journal.com/content/c080922a.asp>), dernière visite le 29 juin 2011.
- [17] Dieter & Schmidt, Engineering Design, Edition 2009.
- [18] Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council, (2005), establishing a framework for the setting of eco design requirements for energy-using products and amending Council Directive 92/42/EEC and Directives 96/57/EC and 2000/55/EC of the European Parliament and of the Council. The official journal of the European Union.
- [19] Ehrenfeld & Lenox (1997) the development and implementation of DfE programs. The Journal of Sustainable Design Product, April 1997.
- [20] Elkington, (1994) towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development.
- [21] Erkman, (1998), Vers une écologie industrielle, Paris, Éditions Charles Léopold Mayer,
- [22] Fargnoli & Sakao (2008). Coordinating Eco design Methods in Early Stages of Industrial Product Design, International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing, Vol. 14 .No 2.
- [23] Fitzgerald et al. (2010). A Conceptual Design tool for Resolving Conflicts between Product Functionality and Environmental Impact. A Journal of mechanical Design. Vol. 132 / 091006 -1.
- [24] Gasanov et al. (1995) Birth of the Invention. Moscow: Interparks, 1995. 432 p. ISBN 5-85235-226
- [25] Giudice et al. (2006), Product Design for Environment: A life cycle Approach, Edition Taylor & Francis Group, LLC
- [26] Ha (2001): Practical Eco design methods focused on electronics products. MS thesis, Anjou University, Korea
- [27] Hart (1995) a natural-Resource-Based View of the firm, Academy of management review, Vol.20, No 4,986-1014.
- [28] Hein & Fan (2007). Constraints and Shortfalls in Engineering Design Practice, International Conference On Advanced Design and Manufacture ICADAM 2008 Conference Programme, 14-16th January 2008, Sanya, China.
- [29] Hochschorner & Finnveden, (2003). LCA Methodology .Evaluation of Two Simplified Life Cycle Assessment Methods, International Journal of Life Cycle Assessment, 2003 8(3) 119-128 (2003)
- [30] Hsiang-Tang Chang, (2005). The Study of Integrating Su-Fields Analysis Modeling with Eco-Innovative Concept for Product Design. 3B-2-2 F. 1- 4244- 0081-3/05. IEEE.
- [31] ISO, (2002) ISO / TR 14062:2002, Management environnemental; Intégration des aspects environnementaux dans la conception et développement.
- [32] Jolliet et al. (2005) Analyse du cycle de vie: Comprendre et réaliser un écobilan, Collection Gérer l'environnement. Les Presses polytechniques & universitaires Romandes.



- [33] K.-H. Robert, (2000) Tools and concepts for sustainable development, how do they relate to a general framework for sustainable development, and to each other? / *Journal of Cleaner Production* 8 (2000) 243–254. [www.elsevier.com/locate/jclepro](http://www.elsevier.com/locate/jclepro).
- [34] Karlsson & Wolf. (2007). Using an optimisation model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry, *Journal of Clean Production*, 20.
- [35] Kuhke et al. (2006). *LCA & Eco-Design in German Electronics Industries*. 13<sup>th</sup> CIRP International Conference on Life cycle engineering .Proceedings of LCA 2006.
- [36] Kun-Mo & Park, (2005), *Eco design: Best Practice*, Eco-product Research Institute, Anjou University, Korea.
- [37] Livotov, (2004), the undervalued innovation potential: Industrial application of TRIZ delivers more breakthroughs to less cost - if the right tools are applied at the right time and place. TriSolver oHG. Hanover, Germany, [www.trisolver.com](http://www.trisolver.com), <http://www.triz-journal.com/archives/2004/04/09.pdf>. Dernière visite, le 5 juillet 2011.
- [38] Mann, (2000), The Four Pillars of TRIZ, Systematic Innovation, <http://www.systematicinnovation.com/Articles/99,%2000,%2001/Mar00-The%20Four%20Pillars%20of%20TRIZ.pdf>, dernière visite le 29 juin 2011.
- [39] Martz, (2010) Validating an evaluation checklist using a mixed method design. *Evaluation and Program Planning*, 33, 215-222. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.evalprogplan>.
- [40] Masui et al. (2003) Applying Quality Function Development to environmentally conscious design, *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol.20 No.1, 2003 pp.90-106.
- [41] Mathieu et al. (2002) Implementation of Eco design in European electronics industry. *Proceedings of the 9<sup>th</sup> international seminar of life cycle engineering*, April 9-10. Erlangen.
- [62] Mihelcic & Zimmerman (2010). *Environmental Sustainability, Design*. Edition : John Wiley & Sons, Inc.
- [43] Olofsson & Fazz. (2006). Business Model tools and definition: A literature review. [www.vivaceproject.com/content/engine/bmt&d\\_full.pdf](http://www.vivaceproject.com/content/engine/bmt&d_full.pdf) , (consulté le 6 mars 2011)
- [44] Oltra & Maider, (2003), the dynamics of environmental innovations: Three stylised trajectories of Clean Technology. IFReDE-E3-GRES, [www.gres-so.org](http://www.gres-so.org)
- [45] Osterwalder et al. (2005) "Clarifying Business Models: Origins, Present, and Future of the Concept," *Communications of the Association for Information Systems*: Vol. 16, Article 1. Available in <http://aisel.aisnet.org/cais/vol16/iss1/1>. visité le 4 mars 2011.
- [46] Osterwalder, (2004) .The Business Model Ontology, A Propositional in a design Science approach. Université de Lausanne. École des Hautes Études Commerciales. [Http://www.hec.unil.ch/aosterwa/PhD/](http://www.hec.unil.ch/aosterwa/PhD/) , visité le 5 mars 2011.
- [47] Park et al. (2005). Development of an Environmental Assessment Method of Consumer Electronic by Combining Top-Down and Bottom-up Approaches. *International Journal LCA*, 11(4)254-264, <http://dx.doi.org/10.1065/lca2005.05.205>.



- [48] Payre. (2008), L'écologie industrielle, une stratégie conciliant les dimensions économique et environnementale du développement durable. Observatoire de management alternatif, HEC, Paris.
- [49] Pierre-marie Boitel, Introduction à la créativité comme science exacte, Conception Innovation 3IFM - Grenoble INP, [http://www.g-scop.inpg.fr/~boitelp/triz/outils\\_triz.pdf](http://www.g-scop.inpg.fr/~boitelp/triz/outils_triz.pdf), dernière visite le 29 juin 2011.
- [50] Ramani et al. (2010). Integrating Sustainable Life cycle Design: A Review. Journal of Mechanical Design, Vol. 132 / 091004-1.
- [51] Rédis, (2007) .Le Business model: notion polymorphe ou concept gigogne? 5ème Congrès de l'Académie de l'Entrepreneuriat, Sherbrooke, 3-5 octobre 2007 [redisj@istm.fr](mailto:redisj@istm.fr), [www.entrepreneuriat.com/fileadmin/.../JeanRedis.pdf](http://www.entrepreneuriat.com/fileadmin/.../JeanRedis.pdf) , (consulté le 02/03/2011)
- [52] Rothenberg & Maxwell, (2005) Lessons from benchmarking environmental performance at automobile assembly plants. Benchmarking .An International Journal, Vol. 12 No 1, 2005, pp. 5-15
- [53] Saaty, (2008) 'Decision making with the analytic hierarchy process', Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, pp.83–98.
- [54] Sakao, (2007) A QFD-centred design methodology for environmentally conscious product design, International Journal of Production Research, 45:18, 4143-4162
- [55] Schischke et al. (2005). An introduction to eco design strategies –Why, What and How. Fraunhofer IZM, Berlin, Germany.
- [56] Shighley, (1977) Mechanical Engineering Design, 3rd Edition, Mc Graw-Hill, New York.
- [57] Suh (1990). Principles of Design, Oxford University Press, New York.
- [58] Telenko et al. (2008). A Compilation of Design for Environment Principles and Guidelines. Proceedings of IDETC/CIE 2008, ASME 2008, International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. August 3-6, 2008, New York, USA.
- [59] Subvert ion assembla .TD01: Quality Function Deployment and Squiz, <http://subversion.assembla.com/svn/90a10qf/td1/td1.pdf>, Visité le 10 octobre 2010
- [60] Thompson, (1999) Design Analysis: Mathematical Modeling of Non-linear Systems. Cambridge University Press.
- [61] Trappey et al. (2009).The Green Product Eco-design Approach and System Complying with Energy Using Products (EuP) Directive .Global perspective for competitive enterprise, Economy and Ecology Advanced Concurrent Engineering, Part 5,243-254 .Springer Link.
- [62] TU Delft, Creativity Techniques" of the Delft Design Guide, for Industrial Design, <http://ocw.tudelft.nl> ; dernière visite le 20 juin 2011
- [63] Ulrich & Eppinger, (2000). Product Design and Development, 2nd edition, McGraw-Hill, New York

- [64] Vaute (2007). Contrôler et améliorer le système de management environnemental <http://www.bivi.qualite.afnor.org/layout/set/popin/ofm/certification-iso-9000/viii/viii-65> (visité le 10 juillet 2011)
- [65] <http://www.wbdg.org/ccb/FEDMIL/i24092d.pdf> , dernière visite le 21 juillet 2011.
- [66] Wimmer et al. (2005). Eco Design in Twelve Steps-Providing Systematic Guidance for Considering Environmental Aspects and Stakeholder Requirements in Product Design and Development. International Conference on Engineering Design. ICDE, 05, Melbourne, August 15-18, 2005.
- [67] Wimmer & Zust, (2001): Eco design Pilot-Product Investigation, Learning and Optimization Tool of Sustainable Product Development, with CD-ROM. Kluwer academic publishers, The Netherlands ISBN 1-4020-1090-7(PB).
- [68] Zhang et al. (1998), Green QFD-II: A life cycle approach for environmentally conscious manufacturing by integrating LCA and LCC into QFD matrices. International Journal of Production Research, vol. 37, No. 37, 1075-1091.