



HAL
open science

Développement d'un système de management intégré de l'éco-conception des appareillages électriques de moyenne tension

Wassim Daoud

► **To cite this version:**

Wassim Daoud. Développement d'un système de management intégré de l'éco-conception des appareillages électriques de moyenne tension. Planète et Univers [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2009. Français. NNT : 2009ENAM0002 . pastel-00004821

HAL Id: pastel-00004821

<https://pastel.hal.science/pastel-00004821>

Submitted on 25 May 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



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

T H È S E
pour obtenir le grade de

Docteur

de

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité “ Génie industriel ”

*présentée et soutenue publiquement
par*

Wassim DAOUD

le 26 janvier 2009

**DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME DE MANAGEMENT
INTEGRE DE L'ECO-CONCEPTION DES APPAREILLAGES
ELECTRIQUES DE MOYENNE TENSION**

Directeur de thèse : Daniel FROELICH

Co-encadrement de la thèse : Alain CORNIER

Jury :

M. Patrick ROUSSEAU, Professeur, IRIAF, Université de Poitiers Rapporteur
M. Olivier JOLLIET, Professeur, Université de Michigan Rapporteur
M. Abderrahmane BEROUAL, Professeur, Ecole Centrale de Lyon Examineur
M. Rémy GAUTIER, Maître de Conférences, ENSAM, Paris Examineur
M. Daniel FROELICH, Professeur, ENSAM, Chambéry Directeur de thèse
M. Alain CORNIER, Professeur, ENSAM, Chambéry Co-directeur de thèse
M. Mehrdad HASSANZADEH, Responsable éco-conception, AREVA T&D /PDS et SDS Membre invité
M. Jean-Luc BESSEDE, Directeur éco-conception et innovation, AREVA T&D Membre invité

Laboratoire de Mécanique des Systèmes et des Procédés
ENSAM, CER de Paris

RESUME

Notre travail s'intègre dans le cadre d'un programme de recherche relatif à l'amélioration des performances environnementales des appareillages de distribution électrique du centre de recherche et distribution de l'entreprise AREVA T&D. Il s'agit de développer une démarche d'éco-conception adaptée à ses produits et aux besoins de l'équipe de conception et consolidée sur le plan environnemental. Notre démarche s'est basée sur l'analyse du besoin des différents acteurs de l'équipe de conception, l'évaluation environnementale des produits existants et l'étude du processus de conception utilisé pour le développement de ces produits et de la stratégie d'éco-conception de l'entreprise. D'abord, nous avons identifié les outils d'éco-conception indispensables pour l'équipe de conception. Ensuite, l'étude du processus de conception existant nous a permis de déterminer des pistes d'intégration des paramètres environnementaux et des outils d'éco-conception durant les différentes phases de conception. Par ailleurs, nous avons étudié une série d'analyses de cycle de vie de produits de moyenne tension de catégories différentes ce qui nous a permis de déterminer la distribution des impacts environnementaux dans les phases de cycle de vie. Il en sort que la phase d'utilisation est la phase la plus polluante néanmoins très difficile à améliorer. La phase de distribution présente un impact très faible. Cela nous a permis de focaliser notre démarche sur les phases de fabrication et de fin de vie qui présentent un potentiel d'amélioration environnementale plus important.

Notre approche d'éco-conception s'intègre au système existant et se base sur l'association du respect de la réglementation, la satisfaction des besoins de l'équipe de conception et l'amélioration des aspects environnementaux à forte marge d'amélioration.

Nos travaux de recherche nous ont permis de développer un outil d'éco-conception (DECOD) permettant d'assister le concepteur tout au long du processus de conception et plus particulièrement pour les arbitrages écologiques. L'application de notre outil sur un cas d'étude nous a permis de confirmer la fiabilité de notre démarche.

Mots-clés : *éco-conception, appareillages de moyenne tension, analyse environnementale, processus de conception, aide à la décision, outils d'éco-conception, stratégie environnementale*

Development of a management system integrated to the ecodesign of medium voltage equipments

Our work is integrated within the framework of a research program relating to the improvement of the environmental performances of the equipment of electric distribution of the Distribution and Research Centre of AREVA T&D. It acts to develop a step of ecodesign adapted to these products and the needs for the design team and consolidated on the environmental level. Our step was based on the analysis of the need for the various actors of the design team, the environmental evaluation of the existing products and the study of the design process used for the development of these products and of the ecodesign strategy of the company. Initially, we identified the ecodesign tools for the team of design. Then, the study of the existing design process enabled us to determine tracks of integration of the environmental parameters and ecodesign tools lasting the various phases of design. In addition, we studied a series of Life Cycle Assessments of different categories of medium voltage products what enabled us to determine the distribution of the environmental impacts in the life cycle phases. It leaves there that the use phase is the most polluting phase nevertheless very difficult to improve. The phase of distribution presents a very weak impact. That enabled us to focus our step on the phases of manufacture and end-of-life which have a potential of environmental improvement more important. Our approach of ecodesign is integrated into the existing system and is based on the association of the observance of the regulation, the satisfaction of the needs of the design team and the improvement of the environmental aspects with strong margin of improvement.

Our research tasks enabled us to develop an ecodesign tool (DECOD) permitting to help the designer along the design process and more especially for the ecological arbitrations. The application of our tool on a case of study enabled us to confirm the reliability of our approach.

Keywords: *ecodesign, medium voltage products, environmental analysis, design process, decision assistance, ecodesign tools, environmental strategy*

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais tout d'abord exprimer toute ma gratitude à Monsieur Mehrdad HASSANZADEH, responsable éco-conception de AREVA T&D/DRCPDS/SDS, de m'avoir aidé et conseillé durant toute la durée de la thèse.

Je remercie Messieurs les Professeurs Daniel FROELICH et Alain CORNIER de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers pour m'avoir encadré et assisté pour mener à bien mes travaux.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury de thèse : Messieurs JOLLIET, ROUSSEAU, BEROUAL et GAUTIER pour avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteurs et examinateurs.

Je remercie sincèrement Messieurs Florent EYNAUD et Martin SCHLAUG, directeurs successifs du centre de recherche et de distribution de AREVA T&D, de m'avoir accueilli pendant ces trois ans et d'avoir accepté de financer cette thèse.

Je tiens également à remercier Monsieur Jean-Luc BESSEDE, directeur éco-conception et innovation de AREVA T&D, pour ses encouragements, ses commentaires enrichissants et l'intérêt qu'il a porté à mes travaux.

Merci également à tout le personnel de l'Institut ENSAM de Chambéry et celui de AREVA T&D/DRCet plus particulièrement à Sabine, Bertrand, Marianne, Yann, Carole, Nizar, Jean-François, Olivier, Delphine, Julien, Didier, Lucien, Sylvie, Agnès, Noura et Denis.

Encore merci aux stagiaires Benjamin, Caroline, Thierry, Sara et Thomas, qui sont venus enrichir mes connaissances à travers leur participation dans différentes études menées dans le cadre de cette thèse.

Enfin, je remercie mes parents qui m'ont transmis l'esprit de la découverte et l'amour du savoir et qui n'ont cessé de m'encourager et m'entourer de toute leur affection et toute ma famille et mes proches pour leur soutien sans faille et leur patience.

*« Sous nos pieds la terre promise,
Patrimoine de nos enfants,
Petit à petit agonise
Et je m'en soucie
Et pourtant les espèces devenues rares
Sont en voie de disparition
Et la laideur chante victoire
Sous le plastique et le béton.*

*La Terre meurt
L'homme s'en fout
Il vit sa vie
Un point, c'est tout.
Il met à son gré, à son goût,
Le monde sens dessus dessous
La Terre meurt
Où allons-nous ? »*

Extrait de la chanson de Charles AZNAVOUR, la terre meurt.

Méthodologie d'éco-conception pour les appareillages électriques de moyenne tension

SOMMAIRE

1.	CHAPITRE 1 : CONTEXTE DE LA RECHERCHE	18
1.1.	CONTEXTE GENERAL	18
1.2.	CONTEXTE DE RECHERCHE	21
1.3.	CONTEXTE INDUSTRIEL	21
1.4.	LES APPAREILLAGES ELECTRIQUES DE MOYENNE TENSION	29
1.5.	OBJET DE LA THESE	38
1.6.	HYPOTHESES	38
1.7.	PHASES D'ELABORATION DU PROJET DE RECHERCHE	38
1.8.	LIMITATIONS ET DOMAINES D'APPLICATION DE LA RECHERCHE	39
1.9.	CONCLUSION	40
2.	CHAPITRE 2 : DEMARCHE D'ELABORATION D'UNE METHODOLOGIE D'ECO-CONCEPTION ADAPTEE AUX APPAREILLAGES DE MOYENNE TENSION DE AREVA T&D	43
2.1.	INTRODUCTION A L'ECO-CONCEPTION	43
2.2.	L'INDUSTRIE FACE A LA CONTRAINTE : POURQUOI L'INDUSTRIE A-T-ELLE BESOIN DE L'ECO-CONCEPTION ?	44
2.3.	QUELLE DEMARCHE D'ECO-CONCEPTION POUR L'INDUSTRIE ?	46
2.4.	ELABORATION D'UNE METHODOLOGIE D'ECO-CONCEPTION ADAPTEE AUX APPAREILLAGES DE MOYENNE TENSION DE AREVA T&D	57
2.5.	CONCLUSION	74
3.	CHAPITRE 3 : INTEGRATION DE L'ECO-CONCEPTION DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION DES APPAREILLAGES DE MOYENNE TENSION	78
3.1.	INTRODUCTION	78
3.2.	LA CONCEPTION : GENERALITES	79
3.3.	L'INTEGRATION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION : ETAT DE L'ART	82
3.4.	L'INTEGRATION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION : CAS DE AREVA T&D/DRC	90
3.5.	CONCLUSION	110
4.	CHAPITRE 4 : DEVELOPPEMENT DE L'OUTIL D'ECO-CONCEPTION	112
4.1.	INTRODUCTION	112
4.2.	CAHIER DES CHARGES DES OUTILS D'ECO-CONCEPTION	113
4.3.	ETAT DE L'ART DES OUTILS D'ECO-CONCEPTION	114
4.4.	LA SIMPLIFICATION DES OUTILS D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE	128
4.5.	OUTIL SIMPLIFIE D'AIDE A L'ECO-CONCEPTION DES PRODUITS DE MOYENNE TENSION	131
4.6.	CONCLUSION	154
5.	CHAPITRE 5 : EXPERIMENTATION DE LA METHODE AU SEIN DU BUREAU D'ETUDE. EXEMPLE DE LA BIELLE ISOLANTE	156
5.1.	INTRODUCTION	156
5.2.	ETUDE DE CAS : BIELLE ISOLANTE	157
5.3.	CONCLUSIONS	170

Sommaire

6.	CONCLUSION	173
6.1.	BILAN DE NOTRE RECHERCHE	173
6.2.	APPORT ET ORIGINALITE DE NOTRE TRAVAIL	175
6.3.	LIMITES DE NOTRE TRAVAIL	176
6.4.	PERSPECTIVES	177
7.	BIBLIOGRAPHIE	179
	ANNEXE 1	194
	ANNEXE 2	197
	ANNEXE 3	198
	ANNEXE 4	201
	ANNEXE 5	206
	ANNEXE 6	219
	ANNEXE 7	221
	ANNEXE 8	221
	ANNEXE 9	224

INDEX DES FIGURES

Figure 1.	Cycle de vie d'un produit _____	16
Figure 2.	Consommation d'électricité (1973-2001, TWh) _____	20
Figure 3.	Situation actuelle relative aux appareillages de réseaux électriques _____	21
Figure 4.	Contexte général de notre travail _____	21
Figure 5.	Impact environnemental d'un kWh d'électricité _____	25
Figure 6.	Empreinte écologique mondiale par source _____	26
Figure 7.	Scénarios de surexploitation des ressources naturelles _____	28
Figure 8.	Réserves planétaires de combustibles, en tonnes équivalent pétrole (tep). _____	28
Figure 9.	Positionnement des appareillages de moyenne tension dans le réseau électrique _____	29
Figure 10.	ACV d'une machine à laver le linge (selon les méthodes EDIP97 et CML2000) _____	36
Figure 11.	ACV d'un disjoncteur de moyenne tension (selon les méthodes EDIP97 et CML2000) _____	36
Figure 12.	ACV d'un transformateur électrique de haute tension (selon les méthodes EDIP97 et CML2000) _____	37
Figure 13.	Construction de notre approche d'éco-conception _____	39
Figure 14.	Ampleur de la réorganisation de l'entreprise _____	49
Figure 15.	Les quatre niveaux d'éco-conception. _____	49
Figure 16.	Approche d'élaboration d'une méthodologie d'éco-conception adaptée aux appareillages de moyenne tension _____	58
Figure 17.	Chapitres 713 et 734 du manuel de AREVA Way _____	59
Figure 18.	ACV d'un disjoncteur à coupure dans le SF6 _____	65
Figure 19.	ACV d'un disjoncteur isolé dans l'air _____	66
Figure 20.	ACV d'un parafoudre _____	67
Figure 21.	ACV d'un transformateur _____	68
Figure 22.	ACV d'un interrupteur de caténaire _____	69
Figure 23.	Présentation de notre démarche d'éco-conception _____	76
Figure 24.	Les principales étapes d'un processus de conception _____	79
Figure 25.	Processus standard de conception _____	81
Figure 26.	Exemple d'intégration de règles d'éco-conception durant la phase de développement _____	85
Figure 27.	Processus d'éco-conception proposé par le Groupe Philips. _____	86
Figure 28.	Processus d'éco-conception proposé par l'Université de Tokyo _____	88
Figure 29.	Comment intégrer l'environnement dans un processus de conception existant ? _____	89
Figure 30.	Processus de conception des appareillages électriques de moyenne tension de AREVA T&D _____	91
Figure 31.	Exemple d'un cahier des charges fonctionnel _____	92
Figure 32.	Contraintes extérieures du produit _____	95
Figure 33.	Exemple de contraintes extérieures du produit _____	95
Figure 34.	Exemple de liaisons d'un produit _____	96
Figure 35.	Exemple de conception par sous-ensemble fonctionnel _____	97
Figure 36.	Prototypage et stratégie d'essai _____	99
Figure 37.	Intégration de l'éco-conception dans le processus de conception _____	101
Figure 38.	Prise de décision écologique pour les choix de conception _____	104
Figure 39.	Synthèse des possibilités d'intégration des paramètres environnementaux dans le processus de conception _____	107
Figure 40.	Approches d'éco-conception pendant les phases de conception _____	109
Figure 41.	Besoins en outils d'éco-conception _____	112
Figure 42.	Exemple de Eco-Wheel présenté par le cabinet de conseil O2 _____	120
Figure 43.	Mesure de la fiabilité de notre méthodologie d'éco-conception _____	130
Figure 44.	Positionnement de notre outil par rapport au choix de conception _____	133
Figure 45.	Positionnement de notre outil par rapport aux outils standards d'éco-conception _____	133
Figure 46.	Figure. Représentation schématique de la contribution environnementale des différentes phases des du cycle de vie _____	136
Figure 47.	Représentation schématique de la simplification des phases du cycle de vie des appareillages de moyenne tension _____	137
Figure 48.	Sources de consommation d'énergie pendant les phases de fabrication et de fin de vie _____	139
Figure 49.	Sources de consommation de l'eau pendant les phases de fabrication et de fin de vie _____	141

Index des figures

Figure 50.	Sources d'émissions de gaz à effet de serre pendant les phases de fabrication et de fin de vie _____	142
Figure 51.	Exemple de présentation sphérolitique _____	154
Figure 52.	Phases de déploiement de notre démarche d'éco-conception _____	157
Figure 53.	Principaux sous-ensembles de l'produite _____	157
Figure 54.	Distribution des impacts environnementaux de la bielle isolante en résine thermodurcissable _____	161
Figure 55.	Modélisation mécanique simplifiée pour l'estimation de la quantité de matière thermoplastique pour la bielle isolante _____	163
Figure 56.	Différents modèles potentiels de conception de la bielle isolante en thermoplastique _____	164
Figure 57.	Exemple de modélisation mécanique de la bielle isolante en thermoplastique _____	164
Figure 58.	Modèle retenu de la bielle isolante en thermoplastique _____	165
Figure 59.	Dispersion des impacts environnementaux des thermoplastiques par rapport à la résine thermodurcissable selon les méthodes EDIP/UMIP et CML _____	166
Figure 60.	Comparaison entre notre approche théorique et l'approche suivie dans le projet pilote _	169
Figure 61.	Principaux apports de notre travail de recherche _____	176

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1.	Les principaux textes réglementaires en relation avec l'éco-conception _____	22
Tableau 2.	Synthèse des normes environnementales _____	23
Tableau 3.	Comparaison synthétique des équipements électriques _____	34
Tableau 4.	Données d'entrée des ACV des équipements électriques _____	35
Tableau 5.	Les différents niveaux d'éco-conception et les modifications qu'ils engendrent au niveau de l'entreprise. _____	52
Tableau 6.	Problèmes rencontrés par les équipes de conception = risques de compromission du projet. _____	61
Tableau 7.	Synthèse des guides d'éco-conception _____	118
Tableau 8.	Synthèse des outils d'évaluation environnementale _____	127
Tableau 9.	Mesure de la fiabilité de notre méthode _____	130
Tableau 10.	Construction d'une stratégie d'éco-conception _____	136
Tableau 11.	Problématiques environnementales des phases de fabrication et de fin de vie _____	138
Tableau 12.	Mode de calcul des indicateurs environnementaux _____	138
Tableau 13.	Niveau de désassemblage selon la norme VDI2243 _____	145
Tableau 14.	Méthode de pondération des indicateurs environnementaux _____	150
Tableau 15.	Pondération des indicateurs environnementaux _____	150
Tableau 16.	Sources principales des impacts environnementaux de l'produite _____	158
Tableau 17.	Actions de conception et de recherche pour l'amélioration de l'impact environnemental de l'produite _____	159
Tableau 18.	Données d'entrée pour l'évaluation environnementale de la bielle isolante _____	160
Tableau 19.	Evaluation environnementale de la bielle isolante en résine thermodurcissable selon les méthodes EDIP/UMIP97 et CML 2000 _____	160
Tableau 20.	Evaluation environnementale de la bielle isolante en résine thermodurcissable selon la méthode DECOD _____	161
Tableau 21.	Données d'entrée pour l'évaluation environnementale du corps de la bielle en thermoplastique _____	165
Tableau 22.	Evaluation environnementale des grades de thermoplastiques selon les méthodes EDIP/UMIP et CML _____	166
Tableau 23.	Evaluation environnementale des grades de thermoplastiques selon la méthode DECOD _____	167
Tableau 24.	Données d'entrée pour l'évaluation environnementale des inserts de la bielle en thermoplastique _____	167
Tableau 25.	Evaluation environnementale des inserts de la bielle en thermoplastique selon les méthodes EDIP/UMIP et CML _____	167
Tableau 26.	Evaluation environnementale des inserts selon la méthode DECOD _____	168
Tableau 27.	Comparaison environnementale des bielles en thermoplastique et en résine thermodurcissable selon la méthode DECOD _____	168

INDEX DES PHOTOS

Photo 1.	Occupation du sol et nuisances au paysage _____	27
Photo 2.	Bielle isolante en résine thermodurcissable _____	160
Photo 3.	Prototype de la bielle isolante en thermoplastique _____	170

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

« Le monde n'appartient pas à l'homme ; l'homme appartient au monde... toutes les choses sont reliées. L'homme ne tisse pas le tissu de la vie ; il est simplement un rivage dedans. Quoi qu'il fasse au tissu, il le fait à lui-même ».

Seattle principal, 1854,

Tout est lié, les Lois, les Sciences, l'Economie et l'Environnement, mais cette connexion est quelquefois éludée par le développement rapide, la croissance démographique et la pression croissante sur les ressources qui créent de nombreux conflits d'usage. Comment devrait être utilisée la Terre ? Quel usage a une plus grande valeur économique ? Pouvons-nous faire de la science sans faire attention au profit ? Devrions-nous encourager le développement sans faire attention à l'environnement ? Comment pouvons-nous trouver l'équilibre écologique et financier pour rendre effectifs nos choix d'utilisation de la terre ? Telles sont les questions problématiques actuelles qui se posent à nous et aux générations futures. Comme le stipule le principe de Seattle, « Tout est relié..., science, politique, éthique, et science économique ». Nous pensons qu'il est primordial de lier transversalement toutes ces disciplines afin d'optimiser les ressources environnementales dans le monde.

Au cours des dernières décennies la société a pris conscience des nouveaux enjeux environnementaux dus à l'activité humaine. Les sommets de la terre Stockholm 1972, Nairobi 1982, Rio de Janeiro 1992 et Johannesburg 2002 témoignent de l'importance du mouvement mondial pour la protection de l'environnement. Ce mouvement se traduit par une forte mobilisation sociale et gouvernementale, particulièrement au niveau des pays industriels développés. L'équilibre entre le développement économique et la protection environnementale n'est plus assuré. L'homme produit plus que ce dont il a besoin et surtout plus que ce qu'il consomme réellement. Un équilibre est à trouver sur le long terme d'où l'apparition d'un nouveau modèle de consommation et de production durable qui permet de préserver l'homme et son environnement actuel et futur. Il est évident que la consommation massive des produits industriels cause divers impacts sur l'environnement comme la dégradation de la couche d'ozone, le réchauffement de la planète, la pollution de l'eau et de l'air. Ces impacts interviennent tout au long du cycle de vie du produit de la fabrication à la fin de vie.

Il est de la responsabilité des entreprises de ne plus créer un produit sans considérer son impact sur l'environnement. Pour ce faire, les entreprises travaillent sur différents paramètres tels que le type de matière, le mode de fabrication du produit, la gestion en fin de vie qui permettent de réduire l'impact de leurs produits sur l'environnement. Nous constatons une meilleure prise de responsabilité des producteurs vis-à-vis de leurs actions, leurs produits et leurs processus. Les entreprises tentent d'intégrer une démarche de développement durable qui leur permettrait de garantir un développement économique sans dégrader l'environnement social et naturel. Elles mettent en place des actions d'amélioration continue du produit et de la chaîne d'approvisionnement (supply chain). Par ailleurs, elles doivent faire face à toutes les pressions sociétales et aux exigences réglementaires de plus en plus contraignantes.

"Une nouvelle manière de penser est nécessaire si l'humanité veut survivre" A.EINSTEIN

Il est clair que pour changer les choses et pour assurer la durabilité de l'existence humaine sur Terre, il nous faut changer d'approche. Notre société actuelle basée sur la surenchère de la consommation et de la recherche de l'hyper confort et du super profit ne peut plus perdurer. Les ressources naturelles ne sont pas inépuisables et notre planète ne peut s'adapter à tous ces changements rapides comme elle a pu le faire auparavant au cours d'autres ères géologiques. En effet, la paléontologie nous apprend que la terre est passée par des périodes similaires de perturbations naturelles mais jamais des changements aussi rapides et aussi brusques n'ont été constatés, d'autant plus que ces phénomènes n'étaient pas liés à des activités humaines mais un mouvement naturel lent et continu. De nos jours, il n'est plus question de se dire que la nature va de toute façon s'auto-épurer et s'adapter à la pollution de plus en plus conséquente. Les sonnettes d'alarme tirées par les experts sont à prendre au sérieux sans être catastrophiste. Notre planète ne va pas bien mais il est encore possible de la sauver et même de l'améliorer. Il est important, pour cela, de faire un effort collectif et efficace pour protéger notre patrimoine naturel et offrir aux générations futures un meilleur cadre de vie avec les ressources nécessaires pour leur survie. Cela passe d'abord par le traitement de toutes les sources de pollution actuelles et ensuite par la réduction de l'impact sur l'environnement de toutes nos activités futures. Il va de soi que cela nécessite un effort considérable à tous les niveaux. Personne n'est exclu de cette démarche, les particuliers comme les industriels. Il est évident que les particuliers ont un rôle très important à jouer en tant que consommateurs avisés et raisonnables et qu'ils peuvent avoir une grande influence sur les industriels pour améliorer l'empreinte environnementale de leurs produits. Cela est valable aussi dans le cas où les consommateurs sont aussi des industriels, où les échanges se font « business to business ». Toutefois, un effort particulier est à fournir de la part des producteurs. En effet, ils doivent à la fois réduire leur pollution engendrée par la fabrication des biens et services mais aussi gérer équitablement la pollution due aux produits existants arrivés en fin de vie. Il y a donc une double source d'amélioration environnementale à savoir la réduction de la pollution des sites de production et celle des produits tout au long de leur cycle de vie. On parle alors d'éco-conception. L'éco-conception est un concept employé pour décrire une approche utilisée par l'équipe de conception pour réduire la pollution à la source en prenant en compte les critères environnementaux au niveau de la conception initiale.

En effet, l'impact sur l'environnement d'un produit est en grande partie fixé dès la phase de conception. C'est pour cela que l'intégration de l'éco-conception doit se faire au niveau des premières étapes du processus de conception. La conception d'un produit est la phase la plus importante dans le cycle de vie d'un produit, particulièrement du point de vue de la fonctionnalité, du coût et de l'environnement. Les décisions prises pendant cette phase poursuivent le produit jusqu'à sa fin de vie. Les choix faits avant la fabrication auront d'importants impacts sur l'environnement qui peuvent être évalués par une analyse du cycle de vie - couramment appelée ACV- (figure 1) pour en réduire les conséquences [JESWIET et HAUSCHILD 2005]. Il s'avère que l'intégration de toutes les phases du cycle de vie dans l'évaluation des performances environnementales d'un produit conduit

parfois à des résultats totalement différents de ceux qui concernent la « seule » pollution engendrée par la phase de fabrication.

Toutefois, malgré la pression sociétale et réglementaire et en dépit de leur volonté, certaines entreprises trouvent des difficultés à intégrer les considérations environnementales dans leurs produits [HANDFIELD et al. 2001]. En effet, il existe des multitudes de méthodes et d'approches pour pratiquer l'éco-conception. Toutefois, l'analyse de ces méthodes montre qu'elles ne sont pas assez utilisées pour deux raisons principales [AUSEN 2002].

- Des méthodes compliquées qui nécessitent un niveau d'expertise environnementale élevé.
- Des méthodes onéreuses qui demandent des ressources humaines et financières importantes.

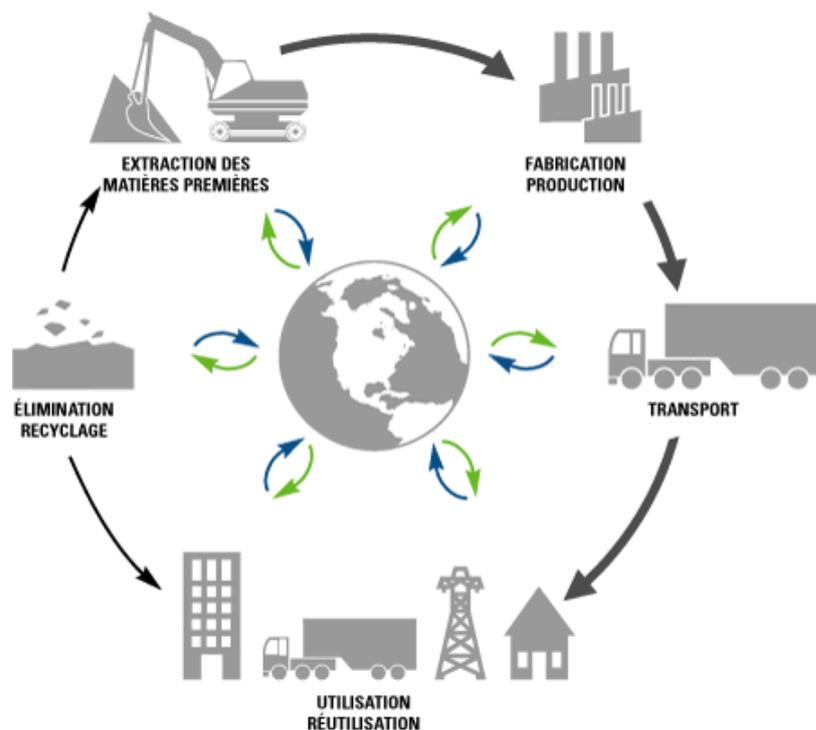


Figure 1. Cycle de vie d'un produit

Source : Rapport de développement durable de ALCAN, 2005

Il apparaît clairement que l'on manque considérablement de méthodes d'éco-conception simplifiées et orientées vers les concepteurs qui n'ont pas de connaissances environnementales approfondies. Il est fondamental de rapprocher l'éco-conception des concepteurs, qui sont au cœur du processus de développement d'un produit. Il faut donc donner les moyens aux concepteurs de faire des choix plus écologiques avant même d'entamer la phase de conception.

L'industrie électrique et l'éco-conception

L'industrie électrique et électronique est pionnière dans l'application de l'éco-conception. En effet, les appareillages électriques ont vu des améliorations environnementales majeures en termes de réduction de consommation d'énergie, d'eau et de poids et d'augmentation de taux de recyclabilité. De plus, depuis peu, la réglementation vient appuyer cette démarche de par l'obligation de déclaration des substances chimiques [REACH], l'interdiction de certaines substances dangereuses [RoHS] et l'obligation de recyclage en fin de vie [DEEE]. Cette démarche a permis de faire évoluer rapidement la qualité environnementale des produits électriques et de créer une synergie autour de la gestion de la fin de vie de ces équipements. Toutefois, cela se restreint aux produits de grande consommation de type électroménager, machines de basse tension, équipements informatiques, etc. Les produits électrotechniques qui sont à cheval entre l'industrie électrique et l'industrie mécanique sont exclus de ces obligations. Ils présentent des caractéristiques particulières en termes de conception, de conditions d'utilisation, de dispersion géographique et surtout d'utilisateurs. Ce sont des appareils vendus majoritairement à des professionnels pour un usage industriel. Une des difficultés de la conception de ces produits est de prédire les changements technologiques qui peuvent se révéler après le lancement du produit étant donné sa longue durée de vie. Par exemple, il est difficile de prévoir l'évolution de certains procédés de fabrication ou des filières de valorisation des matériaux en fin de vie. Cela est lié à l'évolution des connaissances scientifiques et technologiques et aux conditions économiques et industrielles.

Par ailleurs, nous avons constaté que les démarches actuelles d'éco-conception appliquées aux appareillages électriques de basse tension ne s'appliquent pas automatiquement sur les équipements de réseaux électriques. Nous avons alors travaillé sur l'élaboration d'une méthodologie d'éco-conception simplifiée, adaptée au secteur de la distribution de l'électricité et consolidée au niveau environnemental. Notre démarche est générale mais son application est spécifique aux équipements électriques de moyenne tension de la société AREVA T&D/DRC. AREVA T&D/DRC est un centre de recherche et développement relatif aux appareillages de distribution électrique de AREVA T&D. Il comporte à la fois un bureau d'études, une équipe d'éco-conception, un service achat et qualité, un service marketing et des laboratoires d'essai. Ce centre nous a servis d'unité pilote pour l'élaboration et le test de notre démarche.

**CHAPITRE 1 : CONTEXTE DE LA
RECHERCHE**

1. CHAPITRE 1 : CONTEXTE DE LA RECHERCHE

1.1. CONTEXTE GENERAL

AREVA T&D/DRC souhaite mettre en place une démarche d'éco-conception pour ses appareillages de moyenne tension. Cette démarche, totalement volontaire, est motivée par le respect de l'environnement, l'amélioration de l'image de marque et l'anticipation de futures évolutions réglementaires.

AREVA T&D/DRC, Distribution Research Centre : centre spécialisé dans le développement des appareillages de moyenne tension de AREVA T&D est situé à Montpellier. DRC compte un bureau d'études, un service achat et qualité, un service spécialisé dans les matériaux et éco-conception, un service marketing et des laboratoires d'essai.

L'objectif de ce travail étant d'apporter une assistance à l'équipe de conception pour lui permettre d'intégrer l'éco-conception lors du développement des nouveaux produits. Ceci s'inscrit dans le cadre d'une politique plus générale de développement durable. Plus globalement, notre travail de recherche s'inscrit dans un contexte industriel en évolution : un marché de l'électricité en pleine croissance, soumis à de fortes pressions sociétales, réglementaires et économiques.

En effet, l'accès à l'énergie est devenu une priorité internationale au même titre que l'accès à la nourriture ou à l'eau. L'électricité considérée autrefois comme un élément de confort est aujourd'hui une nécessité absolue. La croissance moyenne de la demande mondiale d'électricité est à l'heure actuelle de 3% par an. Il existe cependant, au niveau de la consommation mondiale d'énergie électrique de très fortes disparités, bien supérieures aux écarts enregistrés dans la répartition de la consommation d'énergie : les pays en développement représentent seulement un quart de la consommation mondiale d'électricité, alors qu'ils constituent 80% de la population mondiale. A titre d'exemple, les consommations s'élèvent à :

- 1 000 kWh/an/habitant pour la Chine
- 7 500 kWh/an/habitant pour le Japon
- 15 000 kWh/an/habitant pour le Suède

La consommation d'électricité devrait croître beaucoup plus vite que celle des autres énergies finales : de 50 à 100% d'ici 2020, de 140 à 320% d'ici 2050 (www.iea.org agence internationale de l'énergie).

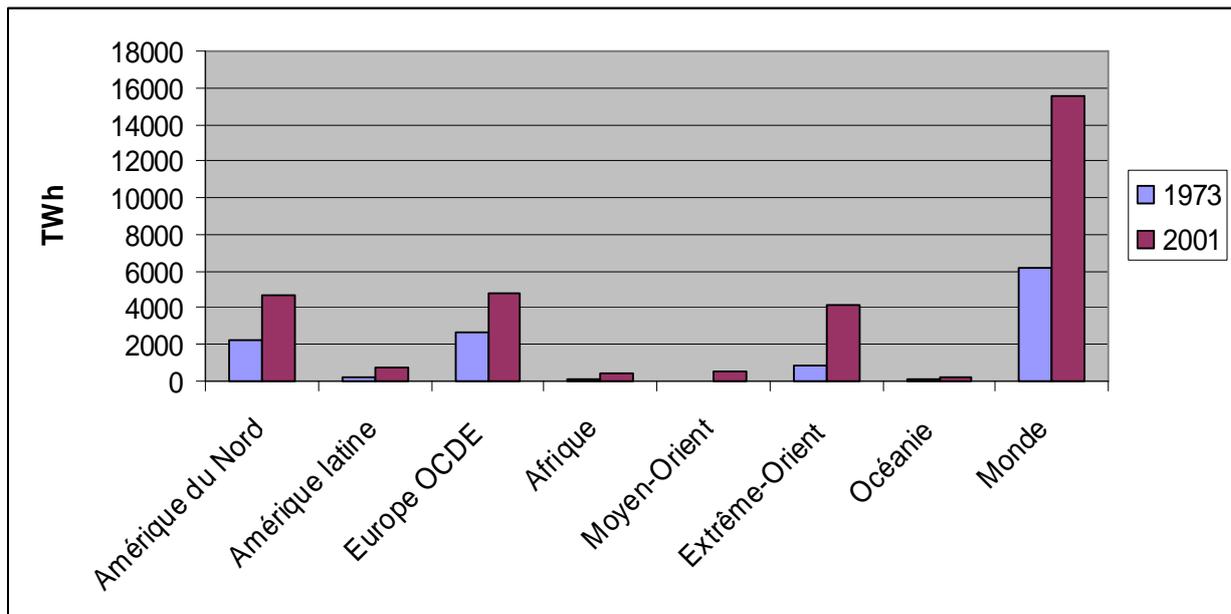


Figure 2. Consommation d'électricité (1973-2001, TWh)

source : DUFOURNET 2001

D'ici 2020, il sera construit plus de centrales de production d'électricité que lors des cent dernières années. Or l'industrie électrique absorbe aujourd'hui près de 35% du total des énergies primaires produites dans le monde (près de 40% dans les pays industrialisés).

Le vingt et unième siècle est certainement le siècle de l'énergie, d'autant que l'électricité est au centre de tous les débats écologiques. Toutefois, les études environnementales actuelles portent essentiellement sur deux thèmes principaux :

- La réduction de la pollution liée à la production de l'énergie.
- La réduction de la pollution engendrée par les équipements électriques et électroniques de grande consommation.

Nous constatons alors, que ces études ne concernent pas les appareillages de réseaux électriques qui permettent de faire la liaison entre l'unité de production de l'électricité et les équipements électriques chez l'utilisateur final. D'autant plus que ses appareils se sont largement développés avec la progression du marché de l'électricité. Nous pouvons admettre qu'il n'est pas possible de réduire les impacts environnementaux de l'utilisation de l'électricité sans prendre en considération la pollution liée à ces appareillages. Dans notre travail de recherche nous n'avons considéré que les équipements électriques de moyenne tension qui servent à la distribution électrique. A l'issue de ce mémoire nous proposerons les possibilités d'élargissement de notre méthodologie à d'autres produits dont les appareillages de transmission électrique (haute tension) ou des machines outils.

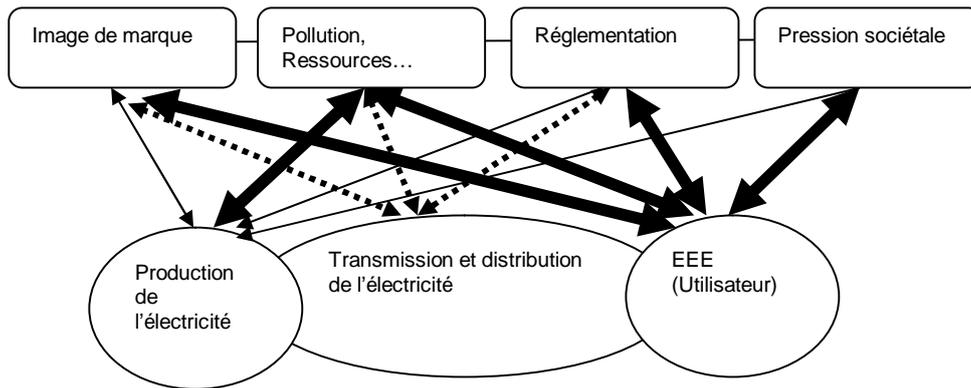


Figure 3. Situation actuelle relative aux appareillages de réseaux électriques

La figure 3 montre que les appareillages de réseaux électriques sont moins soumis à des pressions sociétales, réglementaires ou à des contraintes d'image de marque que les appareillages électriques domestiques. Toutefois, l'évolution réglementaire et la prise de conscience environnementale des clients laissent envisager un changement rapide de la demande du marché vers des produits plus écologiques. Et pour ce faire, il est important d'anticiper ces changements et d'améliorer la démarche d'éco-conception de ces produits.

1.2. CONTEXTE DE RECHERCHE

L'état de l'art, abordé dans les chapitres suivants, montre une multitude de méthodologies d'éco-conception orientées vers les produits industriels et plus particulièrement vers les équipements électriques et électroniques. Toutefois, nous avons constaté qu'il manquait des approches d'éco-conception simplifiées mais consolidées au niveau environnemental et centrées sur le concepteur. En effet, le concepteur utilise rarement les outils standards d'éco-conception car la plupart des méthodologies existantes sont destinées à des spécialistes en environnement. Il est important de noter que notre recherche n'est pas destinée à créer une nouvelle méthodologie totalement différente des méthodologies existantes mais de combiner des approches déjà éprouvées et approuvées afin de répondre à un besoin industriel spécifique. Dans notre cas, ce besoin est exprimé par la société AREVA T&D/DRC et pour une catégorie particulière de produits « les appareillages de moyenne tension ». Notre méthodologie de traitement de ce sujet devra, malgré tout, être indépendante de l'entreprise et du produit étudié. Il s'agit pour nous d'élaborer une approche générale qui peut être appliquée à différents types de produits et d'entreprises.



Figure 4. Contexte général de notre travail

1.3. CONTEXTE INDUSTRIEL

1.3.1. Les risques réglementaires

A différents niveaux, toute réglementation environnementale peut participer à la mise en place d'une démarche d'éco-conception. L'Europe est considérée comme pionnière dans l'élaboration d'un cadre réglementaire autour de l'environnement en général et l'éco-conception en particulier [ABRASSARD et AGERI 2001]. Depuis presque 30 ans, des textes législatifs sont développés autour de la problématique environnementale. Ces textes s'intéressaient, dans un premier temps, plus aux impacts provoqués par l'activité industrielle qu'aux impacts liés aux produits. A la fin des années 1990, une nouvelle approche réglementaire prend pour cible la réduction de la pollution des produits, ce qui a considérablement aidé au développement de l'éco-conception. Actuellement, un ensemble de propositions de textes législatifs est en cours de développement pour promouvoir l'éco-conception. Certains pays (Japon, Canada, USA) ont développé leur propre réglementation qui se rapproche de la réglementation européenne. D'autres pays tels que les pays asiatiques (Inde, Chine) se mettent actuellement en phase avec la législation européenne. Les produits en exportation vers l'Europe sont soumis aux mêmes contraintes que les produits européens. Dans le tableau suivant, nous avons résumé les textes réglementaires européens qui risquent de toucher les appareillages de moyenne tension :

Texte	Intitulé	Référence	Date de publication	Date d'application	Commentaires
Livre vert européen	Politique Intégrée de Produits PIP	IP/03/858	18/06/2003	2005 - 2007	Prise en compte progressive dans les marchés publics
Directive européenne	Etablissement d'un cadre pour l'éco-conception des équipements finaux EuE	2005/32/CE	06/07/2005	08/2007	Un ensemble de produits et d'actions sont sélectionnés progressivement
Directive européenne	Limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques ROHS	2002/95/CE	27/01/2003	01/07/2006	Caractère obligatoire. Concerne les équipements de basse tension
Directive européenne	Déchets des Equipements Electriques et électroniques DEEE	2002/96/CE Rectifiée par 2003/108/CE	27/01/2003	31/06/2006	Caractère obligatoire. Concerne les équipements de basse tension
Règlement européen	Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques REACH		12/2006	01/06/2007	Prise en compte progressive sur 11 ans. Concerne tous les produits

Tableau 1. Les principaux textes réglementaires en relation avec l'éco-conception

1.3.2. Les exigences normatives

Les organismes de normalisation ont déployé les normes “ environnement ” en reprenant une architecture bien connue des normes “ qualité ” et ont mis en parallèle l’approche “sites” et l’approche “produits”.

Sujet	Normes CEI	Normes ISO
Mise en œuvre d'une politique environnementale	CEI 62430 : intégration des aspects environnementaux dans la conception des appareillages électriques et électroniques (ébauche) CEI guide 114 : intégration des aspects environnementaux dans la conception des appareillages électrotechniques	Prise en compte de l'environnement en conception (ISO 14062)
Démonstration	CEI 62545 : déclaration environnementale des appareillages électriques et électroniques CEI 62474 : déclaration environnementale des matériaux utilisés dans les appareillages électriques et électroniques (ébauche)	Etiquetage environnemental (Série ISO 14020)
Outils d'évaluation	CEI 62422 : caractérisation environnementale des matériaux d'isolation solide	Analyse du cycle de vie (Série ISO 14040)
Terminologie	CEI guide 109 : aspects liés à l'environnement – Prise en compte dans les normes électrotechniques de produits	Termes et définitions (ISO 14050)

Tableau 2. Synthèse des normes environnementales

Une nouvelle norme d'éco-conception pour les produits électriques et électroniques (111/104/CDV) est en cours de validation par la Commission Electrotechnique Technique (CEI). Cette norme est inspirée des normes ISO et des guides CEI 109 :2002 et 114 : 2005. Elle fixe les exigences et les procédures destinées à intégrer les aspects environnementaux dans les processus de développement des produits. L'annexe B de cette norme présente une démarche d'élaboration d'un processus d'éco-conception avec pour chaque phase de conception les tâches générales, les questions essentielles et des exemples d'outil d'éco-conception. La démarche présentée dans cette première approche est semblable à notre démarche d'éco-conception que nous présenterons dans ce travail.

1.3.3. Les enjeux économiques

La protection de l'environnement est devenue une priorité stratégique de l'entreprise. Elle est régie, d'une part, par la prise de conscience écologique accompagnée d'exigences réglementaires de plus en plus strictes et d'autre part, par l'intérêt économique que peuvent présenter les produits verts. Il existe donc des surcoûts environnementaux liés aux moyens humains et financiers mis en place dans l'entreprise pour réduire la pollution due à la production et pour la gestion de ses produits en fin de vie.

A titre d'exemple, une étude de Novethic¹ révèle que le réchauffement climatique pourrait coûter à l'économie mondiale jusqu'à 7 trillions de dollars en l'absence de mesures concrètes d'ici 10 ans. Dans un contexte plus français, une étude de Agenda21², affirme que le coût moyen du traitement des déchets est de 50,50 €/an par habitant pour l'enlèvement et le traitement des déchets ménagers. En fonction du traitement appliqué le coût à la tonne fluctue de 88 € (incinération directe) à 240 € (refus de compostage). Le coût moyen à la tonne se situe à 126,20 €. Le tri de la poubelle présente un coût moyen de 178 €/tonne tandis que les matériaux recyclés ont un coût de 90 €/tonne. Il est donc aisé de conclure qu'une meilleure conception et une sélection des matériaux à la source ne peuvent que diminuer le coût du traitement global des déchets en limitant le nombre d'étapes nécessaires.

Ces investissements s'avèrent indispensables dans un marché de plus en plus sensible à la protection de l'environnement. Les produits "écologiques" peuvent, ainsi, présenter un nouvel argument de vente et un moyen de différenciation par rapport à la concurrence. Tel est le cas des équipements électroménagers qui affichent entre autres les consommations d'eau et d'électricité et les niveaux de bruit et de vibration. Le retour sur investissement n'est pas toujours quantifiable, toutefois, le résultat peut être mesuré par un indicateur de satisfaction des clients [VIGNERON et PATINGRE 2001 et LEPOCHAT 2005].

Très généralement, l'éco-conception s'accompagne d'une réduction de coût liée à la diminution de l'utilisation des ressources matières, de la facture énergétique et de la quantité de déchets. Par exemple, l'intégration des coûts de gestion des produits en fin de vie dans le coût initial a amené les industriels à revoir leur approche de conception afin de prendre en considération cette phase du cycle de vie.

Par ailleurs, les entreprises bénéficient de différentes aides financières pour mener des actions de réduction de pollution et de mise en conformité et plus récemment pour élaborer des projets d'éco-conception.

"Restructurer l'économie à l'aune des éco-technologies, c'est aussi promouvoir un autre modèle de développement, plus réaliste car basé sur des données concrètes, globales et systématiques. Actuellement, les marchés ne prennent pas en compte les véritables coûts des biens et services des écosystèmes terrestres qui sont indispensables à la santé de l'économie. A terme, l'économie ne survit pas dans un environnement dégradé, quel qu'il soit" [BREZET ET VAN HEMEL 1997].

1.3.4. Les enjeux sociaux

Les entreprises doivent faire face à une pression sociétale importante liée aux risques de pollution de leurs activités. Le produit est à l'image de son fabricant. Un produit éco-conçu rassure le consommateur sur la volonté de l'entreprise de respecter l'environnement et de donner une dimension humaine à sa production. D'ailleurs, les entreprises éco-responsables prennent en considération l'évolution même des exigences sociales afin d'anticiper les améliorations de conception. Cela rentre parfaitement dans le cadre de l'approche développement durable qui met l'homme et son environnement au centre. La pression sociétale est généralement accompagnée d'une pression médiatique qui nuit à l'image de marque de

¹ Novethic est un centre de ressources et d'expertise sur la responsabilité sociétale des entreprises et l'investissement socialement responsable. Novethic est une filiale de la Caisse des dépôts créée en avril 2001.

² Lancé en 2004 avec le concours du MEEDDAT, de l'ADEME, de Dexia Crédit Local et de Gaz de France, le site portail www.agenda21france.org propose une «cartographie» des Agenda 21, en France.

l'entreprise. Par ailleurs, dans l'esprit public, la pollution est généralement associée à de mauvaises conditions de travail. Les enjeux sociaux de l'éco-conception ne sont pas directement perceptibles mais peuvent être détectés à travers les enjeux environnementaux [LESTER 2003].

1.3.5. Les enjeux environnementaux

Il est quasiment impossible de dresser un bilan exhaustif des impacts de la production et de la distribution électriques sur notre environnement. Dans ce paragraphe, nous présenterons quelques uns de ces impacts.

1.3.5.1. Impact sur l'environnement de 1 kWh

Nous avons utilisé le logiciel SIMAPRO 7.1, la base de données Ecoinvent 2.0 et la méthode de calcul d'impact EDIP/UMIP 2.03 pour modéliser les impacts sur l'environnement de la production d'électricité dans différents pays en Europe (figure 5). Nous avons choisi la méthode EDIP/UMIP car elle présente des indicateurs environnementaux proches de ceux sélectionnés par GIMELEC pour les déclarations environnementales des appareillages électriques. L'analyse des résultats de modélisation montre qu'une part importante des impacts provient des déchets radioactifs et des substances toxiques émises dans la nature. Il est à noter que les impacts sur l'environnement varient considérablement selon le pays producteur. Cette disparité est due principalement aux ressources utilisées pour la fabrication de l'énergie électrique.

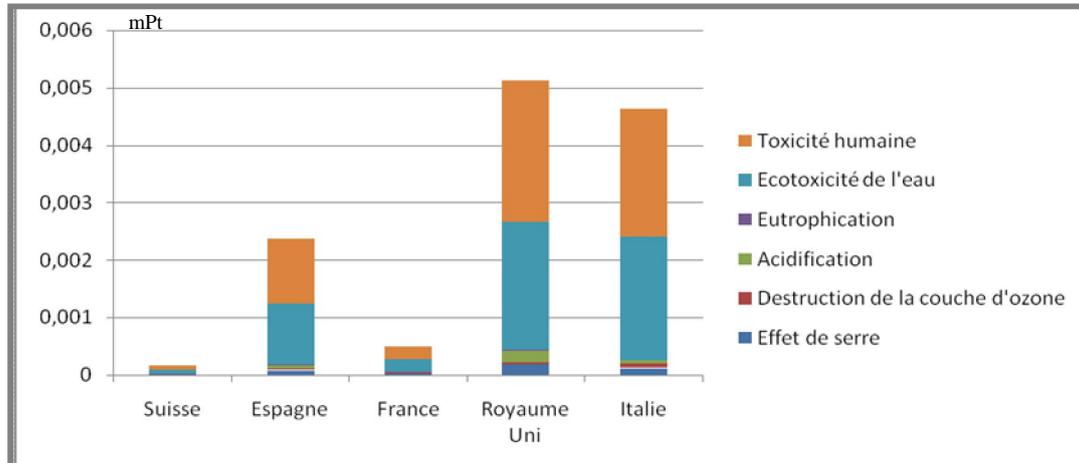


Figure 5. Impact environnemental d'un kWh d'électricité

1.3.5.2. L'effet de serre : un phénomène planétaire

Dans le paragraphe précédent nous avons montré que l'effet de serre n'est pas le seul impact important lié à la production de l'électricité. Toutefois, la gravité de l'effet de serre réside dans son impact planétaire global. En effet, à l'inverse d'autres impacts, l'effet de serre est un phénomène qui ne touche pas que le site ou le pays de production mais la terre toute entière, d'où l'intérêt porté à cette pollution. La dispersion dans l'atmosphère de quantités croissantes de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre (GES) modifie les échanges d'énergie entre le soleil, la terre et l'espace. Ces modifications pourraient avoir deux conséquences au niveau planétaire : le réchauffement du climat et les perturbations du cycle hydrologique.

L'effet de serre a des implications fortes pour les choix énergétiques futurs puisqu'une grande partie du flux de gaz carbonique vers l'atmosphère est due à la combustion d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), aujourd'hui 40% des émissions mondiales de gaz à effet de serre (seul le CO₂ d'origine fossile est incriminé dans l'augmentation de l'effet de serre). Le recours à des énergies sans émissions de CO₂ sera donc indispensable. La figure 6 montre que le CO₂ provenant des combustibles fossiles et le nucléaire participent à hauteur de 46% dans l'empreinte écologique globale.

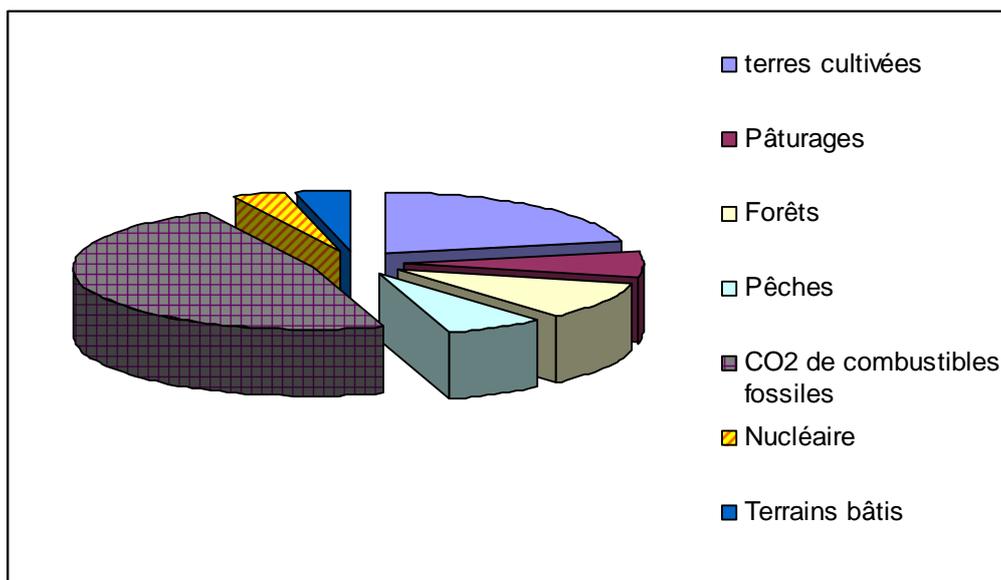


Figure 6. Empreinte écologique mondiale par source

Source : Rapport planète vivante 2006 de WWF

Quelques chiffres-clés (source www.etsu.com) :

- 1kWh “ nucléaire ” = 4g de CO₂
- 1kWh “ gaz ” = 446 g de CO₂
- 1kWh “ pétrole ” = 818 g de CO₂
- 1 kWh “ charbon ” = 955 g de CO₂

En France, l'énergie électrique est d'origine nucléaire et hydraulique à plus de 90%. Avec la Suède (dont la production électrique se répartit entre 50% d'hydraulique et 50% de nucléaire), elle présente de très loin, le plus faible rejet de CO₂ par kWh produit : 78 g de CO₂ par kWh, contre 444 en moyenne européenne. Si tous les pays de l'OCDE adoptaient la même structure de parc de production d'électricité que la France, la réduction de rejets de CO₂ des pays développés serait de 35% inférieure à la situation actuelle.

1.3.5.3. Réseaux électriques : occupation du sol et paysages

L'impact le plus visible du système électrique sur l'environnement est celui des réseaux électriques. Il s'agit à la fois d'un impact visuel (esthétique) mais aussi d'un impact sur l'occupation du sol.

Les efforts des gestionnaires de réseaux sont par conséquent de plus en plus importants. Il s'agit pour le gestionnaire du réseau public de transport de développer le réseau sans accroître la longueur de conducteurs aériens. La pose de nouvelles lignes aériennes est donc compensée par la dépose ou l'enfouissement d'autres lignes. Pour sa part, EDF enfouit 90% des nouvelles lignes moyenne tension, et enfouit ou réalise en technique discrète, deux tiers des lignes basse tension.

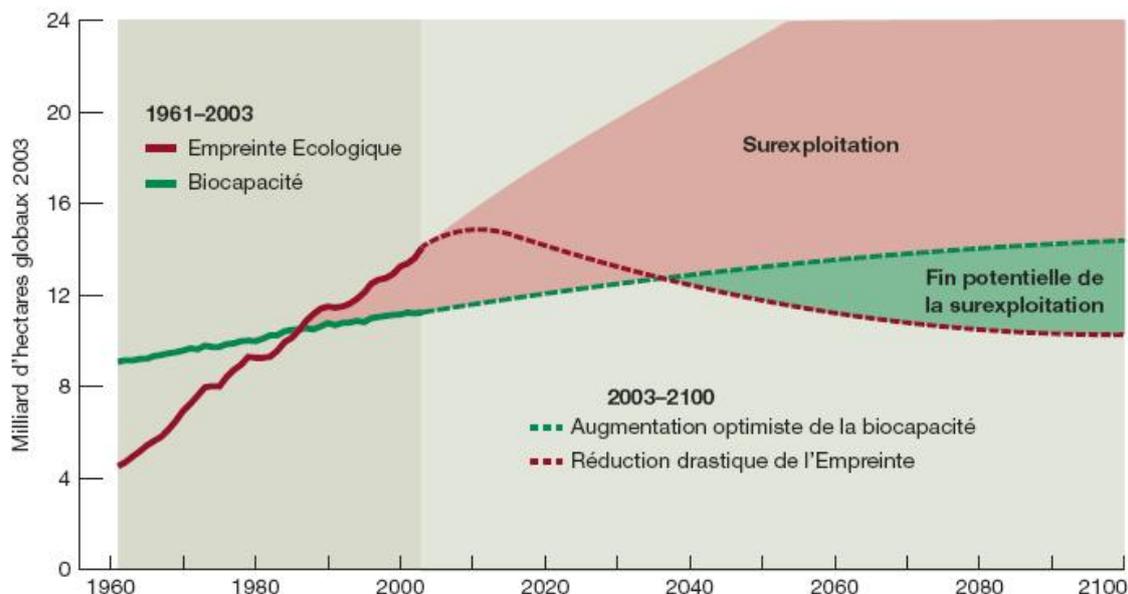


Photo 1. Occupation du sol et nuisances au paysage

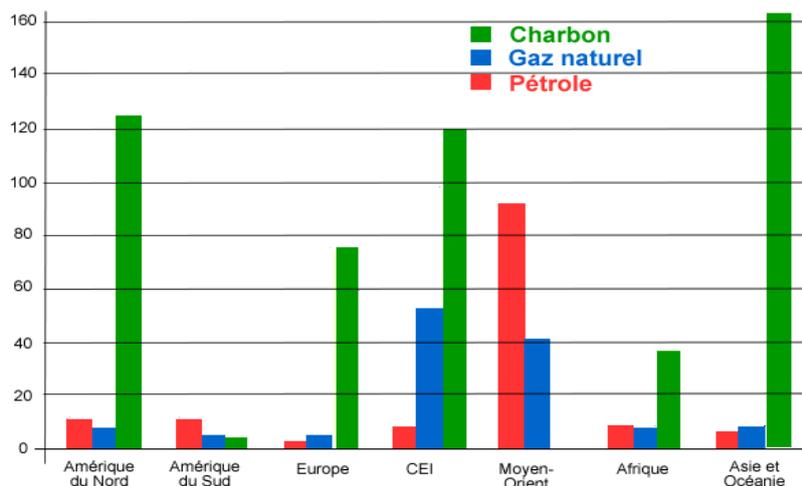
1.3.5.4. L'épuisement des ressources naturelles

Déjà au XVIII^e siècle, Malthus (1798) prédit que la population augmentera de façon exponentielle (par exemple : 1, 2, 4, 8, 16, 32, ...) tandis que les ressources croissent de façon arithmétique (1, 2, 3, 4, 5, 6, ...). Il en conclut à l'inévitabilité de catastrophes démographiques, à moins d'empêcher la population de croître. L'économie a redécouvert cette problématique en 1972, à la suite de la publication du rapport du Club de Rome « Les limites de la croissance ». En effet, les pays industrialisés ont connu une forte période de croissance économique et c'est la première fois, depuis Malthus, que l'on parle d'un risque d'épuisement des ressources naturelles.

En 2050, même en considérant les projections les plus optimistes des Nations Unies, l'humanité consommera des ressources à un niveau deux fois plus élevé que ce que la Terre ne peut générer. Cette « surexploitation » risque d'entraîner non seulement une perte de biodiversité mais aussi des dégâts sur les écosystèmes affectant leur capacité à fournir les ressources et services dont l'humanité dépend. La seule alternative est d'éliminer la surexploitation de ces ressources. Même si l'augmentation de la productivité des écosystèmes peut y contribuer, réduire l'empreinte globale de l'humanité est essentiel. Plus vite la surexploitation disparaîtra, moindres seront les risques de perturbations graves affectant les écosystèmes et moindres seront les coûts associés.



Alors que 90% des combustibles fossiles extraits sont utilisés comme combustible, chaque produit que nous utilisons est fait de substances dérivées de combustibles fossiles ou utilise des combustibles fossiles dans sa fabrication ou son transport. Les produits communs faits de combustibles fossiles incluent des détergents, fibres synthétiques (nylon, polyester, fibre acrylique), plastiques, peintures, additifs alimentaires, pesticides, produits cosmétiques... tous ces produits contiennent au moins un dérivé du pétrole utilisé dans la fabrication, le transport ou l'emballage. Les combustibles fossiles ne sont pas une ressource durable : il existe des réserves limitées qui ne peuvent pas être régénérées. De plus, ils créent une pollution qui détruit une partie des écosystèmes : eau, terre, et air.



L'autre inquiétude minérale principale de notre monde technologique est l'épuisement des métaux précieux et semi-précieux. L'utilisation des métaux en forte croissance va à l'encontre de l'épuisement des gisements miniers. Cela est confirmé par le fait que l'extraction de la matière est poussée dans des réserves plus difficiles.

Le risque est d'atteindre un point où ce n'est plus économiquement ni écologiquement possible d'extraire des minerais en faible concentration dans les gisements. Le manque de minerais facilement accessibles fait que les opérations d'extraction deviennent plus compliquées, plus coûteuses et consomment plus d'énergie.

1.4. LES APPAREILLAGES ELECTRIQUES DE MOYENNE TENSION

Les produits de distribution d'électricité n'étant pas connus du grand public, il nous a paru important de commencer par définir ces équipements et d'en donner quelques exemples.

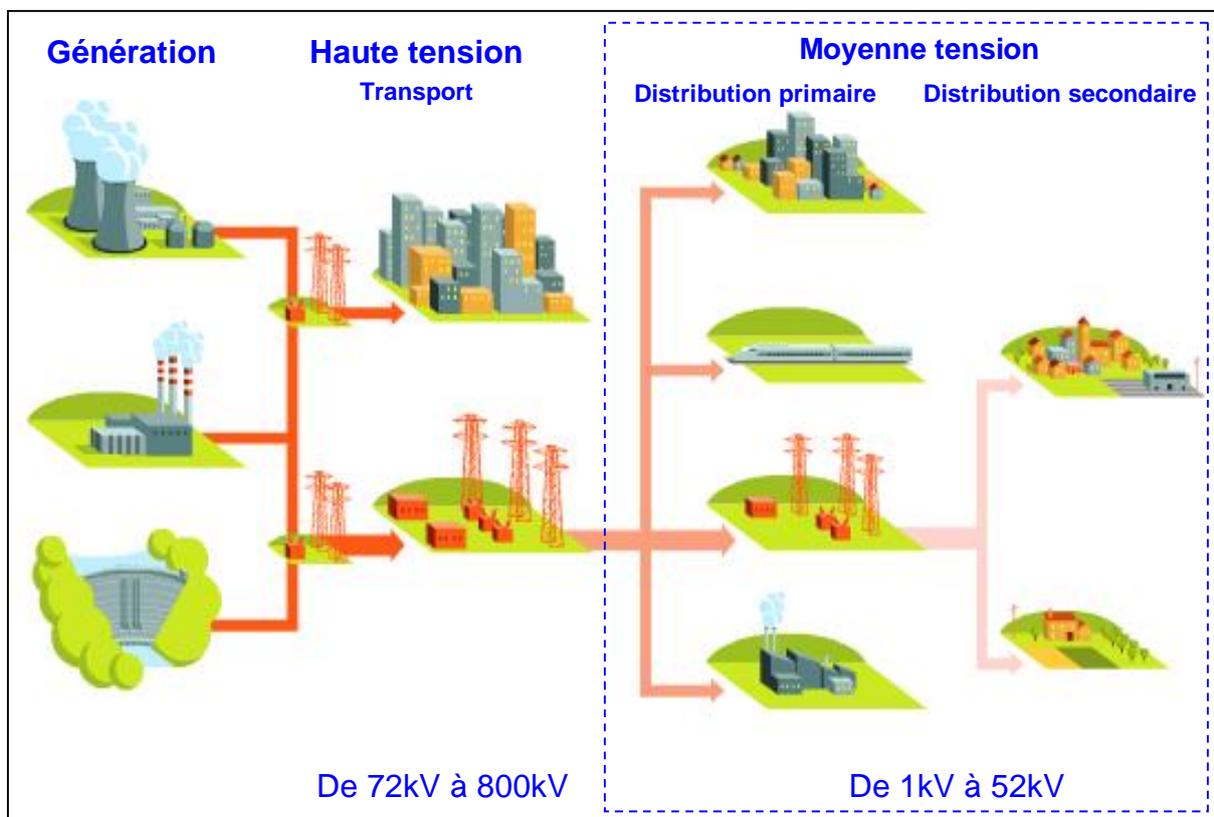


Figure 9. Positionnement des appareillages de moyenne tension dans le réseau électrique

L'appareillage électrique de moyenne tension concerne les réseaux de distribution d'électricité alimentés soit en courant alternatif sous des tensions supérieures à 1 000 V, soit en courant continu sous des tensions supérieures à 1 500 V. Cet appareillage permet d'assurer une protection automatique de ces réseaux contre tous les incidents susceptibles d'en perturber le fonctionnement, mais aussi d'effectuer sur commande les différentes opérations qui permettent de modifier la configuration du réseau dans les conditions normales de service.

Cet appareillage doit supporter des contraintes diélectriques dues à des ondes de chocs, assurer le passage du courant, sans échauffement excessif et sans dégradation des contacts, être capable de fonctionner dans des conditions atmosphériques sévères, supporter des séismes importants, etc.

Les appareillages de moyenne tension développent deux fonctions principales : la coupure et l'isolation électriques. La plupart de ces produits présentent un élément de coupure électrique, une partie mécanique et un ou plusieurs dispositifs d'isolation diélectrique. La partie mécanique sert à contrôler l'ouverture et la fermeture du système de coupure. L'isolation diélectrique permet d'isoler différents sous-ensembles entre eux, des autres équipements et de l'extérieur. Il s'avère donc que les produits de moyenne tension sont des produits complexes en termes de conception car il faut coordonner des fonctions électriques et des fonctions mécaniques. D'autres produits développent des fonctions différentes telles que les parafoudres et les transformateurs de distribution (voir annexe1).

1.4.1. Spécificités des appareillages de moyenne tension

La décision d'élaborer une méthodologie spécifique aux appareillages électriques de moyenne tension est liée aux spécificités de ces produits par rapport aux autres équipements électriques. En effet, les produits de moyenne tension se distinguent par les matériaux utilisés, la durée de vie, la dispersion géographique, la phase d'utilisation, et la gestion de l'installation et du démantèlement.

1.4.1.1. Durée de vie

La durée de vie minimale garantie pour les produits de moyenne tension est de 20 ans. Toutefois, l'expérience montre qu'ils dépassent généralement les 30 ans. Il est important de noter que la plupart des produits sont conçus pour fonctionner sans aucune maintenance sur toute leur durée de vie. Ceci implique des précautions de conception particulières et surtout une marge de sécurité très importante. L'impact de ces appareillages en cours d'utilisation se limite à la dissipation de l'énergie par effet joule. De plus, les appareillages contenant du SF₆ (hexafluorure de soufre) ne présentent que de très faibles fuites. Les émissions provenant des produits de AREVA T&D/DRC ne dépassent pas 0.03% du volume initial, par an (la norme CEI 60271-100 impose une fuite maximale de 0,1%). Malgré un potentiel de réchauffement planétaire élevé (PRP=22,200) l'effet des émissions de SF₆ provenant des appareils de moyenne et haute tension sur les changements climatiques s'avère marginal. Ces émissions représentent environ 0,1% des émissions mondiales de gaz à effet de serre (0,05% pour la communauté européenne) et ce chiffre ne cesse de décroître³. Hormis ces deux sources de pollution, il est possible de considérer des impacts environnementaux très faibles dus aux champs électromagnétiques, l'empreinte sur le paysage et l'occupation du sol.

1.4.1.2. Niveaux de courant et de tension

Les niveaux de courant et de tension sont déterminants dans la conception des appareillages électriques. En basse tension, le courant est coupé dans l'air et l'isolation électrique est généralement assurée par des polymères synthétiques de type thermoplastique ou thermodurcissable. En moyenne tension, il existe trois catégories de systèmes de coupure électrique : dans le gaz (SF₆), dans le liquide (huile) ou dans le vide (ampoule à vide).

³ Données de Schneider Electric selon des rapports de CAPIEL et EURELECTRIC.

L'isolation est assurée par du gaz (SF₆ ou mélanges de SF₆ avec d'autres gaz comme l'azote ou l'air), du liquide (huile d'isolation synthétique ou végétale), des polymères synthétiques (thermoplastiques, thermodurcissables et élastomères) ou par un système mixte. En haute tension, la coupure électrique se fait généralement dans le gaz sous des pressions plus fortes que celles de la moyenne tension. L'isolation électrique peut être assurée par les mêmes matériaux qu'en moyenne tension en plus du verre et de la porcelaine.

1.4.1.3. Conditions d'utilisation

Les appareillages de moyenne tension peuvent être utilisés à l'extérieur comme à l'intérieur dans des conditions de température (-55 à 90°) et d'humidité extrêmes. Cela se traduit par un choix de matériaux techniques de haute résistance. En général, ces produits sont conçus pour faire 10000 manœuvres alors que la plupart des tests sont réalisés à 30000 manœuvres. A la différence des produits de basse tension, le produit de moyenne tension est conçu pour être utilisé sans aucune maintenance sur sa durée de vie. Il n'est donc pas admissible d'avoir des défauts ou des pièces d'usure.

1.4.1.4. Dispersion géographique

Les produits de moyenne tension sont dispersés sur différents réseaux de distribution d'électricité, lignes ferroviaires et autres sites industriels à travers le monde. Parfois, ils sont installés dans des zones difficiles d'accès. Cela présente de sérieux problèmes pour la collecte en fin de vie. En effet, il est difficile de gérer de petites quantités de produits au niveau logistique et économique à la différence des produits de basse tension bien dispersés et dont les filières de récupération et de recyclage sont bien implantées

1.4.1.5. Matériaux utilisés

En réponse aux différentes conditions de fonctionnement, ces appareillages utilisent divers matériaux avec de hautes performances techniques qui ne sont pas requises en basse tension comme des céramiques techniques ou des résines époxy. Toutefois, certains matériaux peuvent être utilisés en moyenne tension et difficilement en haute tension, tels que les thermoplastiques.

L'utilisation de matériaux spécifiques entraîne plusieurs contraintes :

- Faibles données environnementales et toxicologiques
- Manque de retour sur l'expérience
- Absence de filières de recyclage

Par ailleurs, la transformation de certains matériaux implique l'utilisation de procédés de fabrication particuliers. Exemples de la fabrication des céramiques pour les interrupteurs à vide et des pièces en résine époxy pour les disjoncteurs.

1.4.1.6. Cycle de développement

La durée moyenne de développement d'un nouveau produit moyenne tension à AREVA T&D/DRC est de 2 à 3 ans. Toutefois, le taux de renouvellement des produits est faible. Il existe donc plus de projets de reconception que de projets de nouvelle conception. La reconception est effectuée pour trois raisons majeures : l'amélioration des performances du produit, la baisse de coût et l'adaptation à un nouveau cahier des charges. Les projets de reconception limitent les marges d'amélioration environnementale, les possibilités de modifications étant restreintes. Généralement, seule une partie du produit est revue et donc le concepteur est plus souvent confronté à des choix de conception pour une ou plusieurs pièces et non d'un produit complet. Par ailleurs, les innovations technologiques dans le domaine des appareillages de moyenne tension sont limitées contrairement aux produits de basse tension où les cycles de renouvellement sont très courts. Ceci est spécialement lié à la phase de qualification des technologies qui peut s'avérer longue compte tenu du nombre de contrôles à valider pour la mise sur le marché du produit.

1.4.2. Les contraintes réglementaires

Les appareillages de moyenne tension comme ceux de haute tension ne sont pas soumis aux mêmes exigences réglementaires que les produits de basse tension. En effet, il n'existe pas d'interdiction de substances dangereuses [RoHS] ou d'obligations en termes de recyclage [DEEE], ou de consommation énergétique. Le choix de l'application intégrale ou partielle de ces réglementations est totalement volontaire. Cependant, ils sont soumis à la réglementation REACH relative à l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des produits chimiques.

De son côté, AREVA T&D/DRC s'engage à respecter les réglementations de tous les pays quelle que soit la phase du cycle de vie du produit. Par exemple, l'entreprise a adopté et anticipé la directive européenne RoHS et les accords de Kyoto relatifs à la réduction des gaz à effet de serre. Cela implique l'élimination des substances dangereuses telles que le plomb, le chrome hexavalent et le cadmium, la réduction des émissions dans l'air du gaz SF6 et une meilleure prise en compte de la fin de vie des produits lors de la conception. Une veille réglementaire environnementale est assurée par le service d'éco-conception qui se charge de la communication des nouvelles mesures aux autres membres du bureau d'études. L'augmentation rapide du nombre de textes législatifs relatifs à l'environnement et plus particulièrement à l'éco-conception, laisse envisager une forte croissance et un élargissement des restrictions réglementaires qui demandent un suivi régulier des nouvelles solutions "écologiques".

1.4.3. Les contraintes technico-économiques

Les appareillages de moyenne tension sont des équipements techniques qui doivent garantir des performances (électriques, mécaniques, thermiques) élevées. Le premier objectif du concepteur est la satisfaction de tous les critères techniques du cahier des charges. Cela implique le choix de matériaux spécifiques et de procédés industriels complexes. Ainsi, le remplacement d'un élément comme le plomb ou d'un procédé de fabrication tel que le dégraissage au trichloréthylène peut

s'avérer une tâche difficile. En effet, une évaluation environnementale n'est pas suffisante.

Il est indispensable de passer par une phase de validation de chaque nouvelle solution technique. Cela peut rallonger les délais et les coûts de développement.

Le deuxième « challenge » du bureau d'étude concerne la compétitivité économique. L'intégration de l'éco-conception ne doit pas freiner la commercialisation des produits. Il est souvent difficile de chiffrer le retour sur investissement des améliorations environnementales. Il est donc nécessaire de prendre en considération la question du coût lors de l'intégration des paramètres environnementaux. Par exemple, il n'est pas envisageable de remplacer une pièce en composite non recyclable par une pièce en thermoplastique recyclable et plus légère mais qui coûterait trois fois plus cher. La prise en compte des contraintes techniques et économiques est donc fondamentale pour l'intégration de solutions plus écologiques dans le milieu industriel.

1.4.4. Les exigences des clients

Il n'existe pas de demande explicite des clients relative à des produits éco-conçus. Toutefois, certains clients et fournisseurs commencent à avoir des exigences environnementales strictes. D'une part, les fournisseurs qui appliquent les nouvelles directives européennes essaient d'harmoniser leurs produits pour les différents clients qu'ils soient ou pas soumis à cette réglementation. D'autre part, les clients soucieux de la protection de l'environnement intègrent dans leur cahier des charges des restrictions environnementales liées notamment aux matériaux utilisés et plus particulièrement à la gestion de fin de vie des produits. Les exigences environnementales des clients restent faibles mais l'évolution générale de la conscience écologique laisse envisager une forte croissance dans le futur proche.

1.4.5. Comparaison synthétique des équipements électriques

Le tableau 3 présente une comparaison synthétique des appareillages électriques de basse, moyenne et haute tension. Cette synthèse permet d'appuyer notre choix d'élaborer une méthodologie d'éco-conception relative aux produits électriques de moyenne tension et de mettre l'accent sur les points à intégrer afin d'étendre cette méthodologie aux différentes catégories d'appareillages électriques. En effet, le tableau 3 montre que les appareillages de moyenne tension se distinguent par rapport aux autres catégories d'équipements électriques de par les contraintes réglementaires et techniques et au niveau du cycle de développement. D'autre part, la gestion de la fin de vie apparaît comme un élément distinctif entre les différentes catégories : les dimensions des produits de moyenne tension permettent une manipulation plus facile en fin de vie. Un démontage manuel est possible et peut être facilité par la conception. Ceci se rapproche plus des appareillages de basse tension que des appareillages de haute tension. Toutefois, une décontamination préalable des produits moyenne et haute tension peut être requise dans certains cas, par exemple, pour des systèmes contenant du SF6 ou de l'huile.

En résumé, les appareillages de moyenne tension présentent des similarités à la fois avec la catégorie de basse tension et celle de haute tension.

Critère	Basse tension	Moyenne tension	Haute tension
Niveau de tension électrique	<1500V en courant continu et 1000V en courant alternatif	De1kV à 52kV en courant alternatif	>52kV en courant alternatif
Niveau de puissance électrique	<1MW	0,1 à 200 MW	100 à 800 MW
Réglementation relative aux produits	DEEE, RoHS, REACH	REACH, RGES	REACH, RGES
Cycle de développement	< 1an	De 2 à 3 ans	>3ans
Durée de vie moyenne	De quelques jours à 10 ans	De 20 à 30 ans	>30ans
Principaux matériaux utilisés	Aciers, aluminiums, cuivres, plastiques, verres, composants électroniques, gaz, huiles	Aciers, aluminiums, cuivres, plastiques, verres, composants électroniques, gaz, huiles, résines thermodurcissables, céramiques, élastomères	Aciers, aluminiums, cuivres, plastiques, verres, composants électroniques, gaz, huiles, résines thermodurcissables, céramiques, élastomères
Phase de fabrication	Quantités importantes, fabrication à la chaîne	Quantités moyennes, fabrication à l'unité	Quantités moyennes, fabrication à l'unité
Phase d'utilisation	Consommation électrique, maintenance, consommables	Consommation électrique, légère fuite de SF6	Consommation électrique, maintenance, légères fuites de SF6 et d'huiles, rayonnement électromagnétique
Phase de distribution	Zone de distribution restreinte, récupération des anciens produits, nombre variable de produits livrés	Zone de distribution étendue, nombre variable de produits livrés	Zone de distribution étendue, nombre limité de produits livrés
Phase de fin de vie	Recyclabilité : importante, démontabilité manuelle : facile, filières de récupération et de valorisation organisées, coût de traitement viable	Recyclabilité : bonne, démontabilité manuelle moyenne, filières de récupération et de valorisation existantes mais pas spécifiques, coût de traitement : moyen	Recyclabilité : bonne, démontabilité manuelle : difficile, filières de récupération et de valorisation existantes mais pas spécifiques, coût de traitement : moyen

Tableau 3. Comparaison synthétique des équipements électriques

1.4.6.L'analyse de cycle de vie de trois appareillages électriques

Afin de montrer les différences relatives à l'impact sur l'environnement de divers appareillages électriques, nous avons réalisé une analyse de cycle de vie de 3 produits électriques de basse, moyenne et haute tension.

	Basse tension	Moyenne tension	Haute tension	
Produit	une machine à laver le linge	un disjoncteur à isolation dans l'air et à coupure dans le vide	Un transformateur de puissance 600MVA	
Unité fonctionnelle	Laver 5kg de linge coton à 60°.	Mode passif : Laisser passer un courant de 3150 A/12 kV. Mode actif : Couper un courant > 50 kA et/ou >72 kV.	Transformer un courant de 430 kV à 22 KV	
Durée de vie	2600 lavages / 10 ans	20 ans (10000 coupures max)	40 ans	
Fabrication	Chine	France	France	
Matériaux (kg)	Al	1,12	3	2 ^{E3}
	Cu	2,7	11,4	38 ^{E3}
	Steel	10	45	243 ^{E3}
	S.Steel	17	0	0
	Plastics	6	2	0
	Thermosets		21	1.8 ^{E3}
	Concrete	21,6	0	0
	Mineral oil		0	89 ^{E3}
	Wood	1,8	0	3.7 ^{E3}
	Paper		0	16 ^{E3}
Distribution	Carton : 5kg/ Film plastique : 0,5kg	Box en bois réutilisable	Pas d'emballage	
	Transport maritime: 8000 km. Transport routier : 400 km	Transport routier : 1000 km	Transport routier : 1000 km	
Utilisation (France)	Conso électrique : 2470 kWh. Conso eau : 120 m3. Conso détergent : 306 kg	Conso électrique : 25 MWh	Conso électrique : 350 GWh	
Fin de vie	Recyclage	55 %	84 %	72 %
	Incineration	3 %	4 %	15 %
	Décharge	42 %	12 %	13 %
	Transport	100 km (routier)	200 km (routier)	1000 km (routier)

Tableau 4. Données d'entrée des ACV des équipements électriques

L'objectif de ces ACV est de montrer les similitudes et les différences de sources d'impacts sur l'environnement qui existent entre les produits électriques de basse, moyenne et haute tension. Ces points ne sont pas exhaustifs mais bien représentatifs de chaque catégorie. Nous reviendrons, avec plus de détails sur les analyses de cycle de vie des appareillages de moyenne tension dans le deuxième chapitre.

L'ACV de la machine à laver le linge donne les résultats suivants :

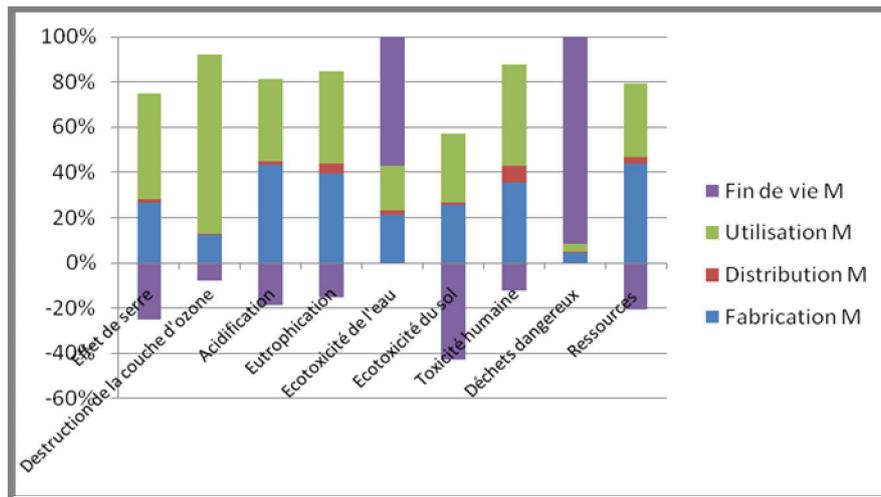


Figure 10. ACV d'une machine à laver le linge (selon les méthodes EDIP97 et CML2000)

Cette ACV est basée sur des études bibliographiques des Universités de Cadiz, Clausthal-Zellerfeld, de Oviedo et du centre de recherche sur les ACV de Ibaraki. La fabrication de ce même lave-linge en France réduirait considérablement les impacts environnementaux de la phase de fabrication. En effet, en Chine la production d'électricité et la fabrication industrielle sont plus polluantes.

L'ACV du disjoncteur de moyenne tension donne les résultats suivants :

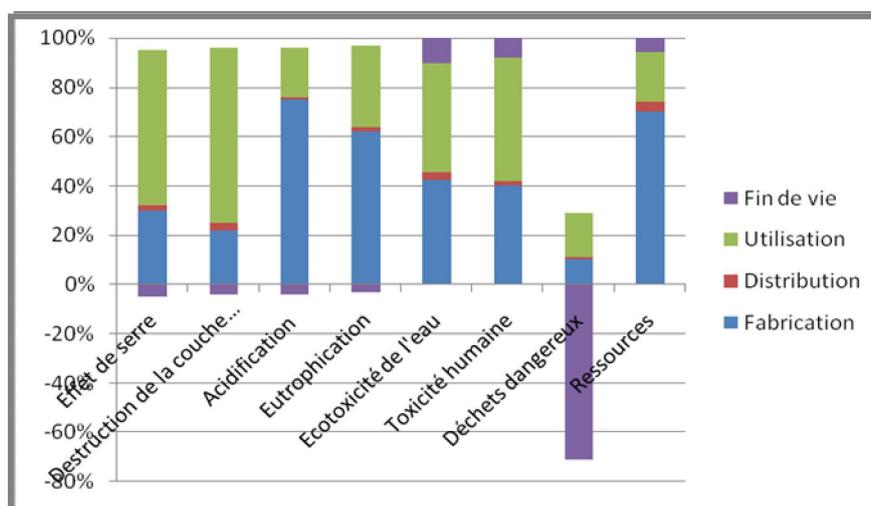


Figure 11. ACV d'un disjoncteur de moyenne tension (selon les méthodes EDIP97 et CML2000)

L'ACV du transformateur de puissance donne les résultats suivants :

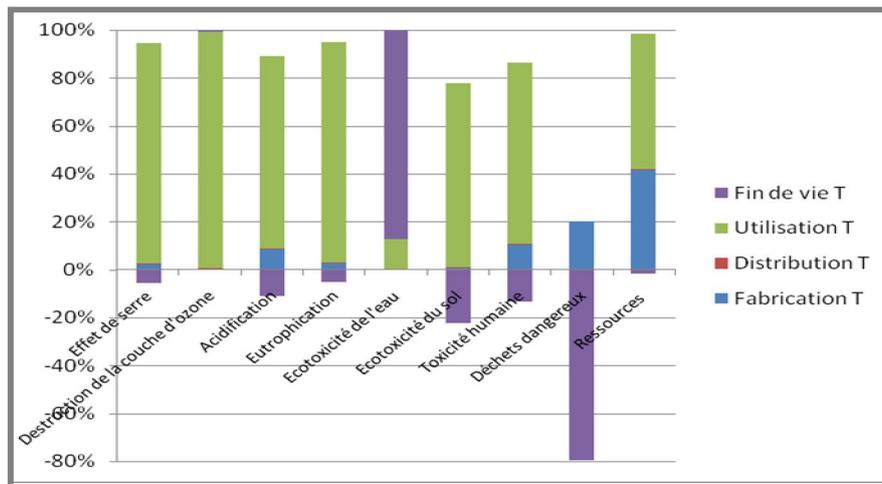


Figure 12. ACV d'un transformateur électrique de haute tension (selon les méthodes EDIP97 et CML2000)

L'étude de ces ACV montre que :

- La phase de distribution participe très faiblement à l'impact global des trois produits étudiés
- Les impacts négatifs sur l'environnement de la machine à laver sont dus principalement aux phases de fabrication, d'utilisation et de fin de vie.
- Les impacts négatifs sur l'environnement du disjoncteur de moyenne tension proviennent essentiellement des phases de fabrication et d'utilisation. Il apparaît que la phase de fabrication est plus impactante que pour les deux autres produits
- Le transformateur engendre une pollution beaucoup plus importante durant sa phase d'utilisation que durant les autres phases. Cela est dû à la forte consommation d'énergie sur une longue durée de vie. Aussi, les dimensions et la composition de ce produit rendent son démontage et sa valorisation en fin de vie plus difficile.
→ Le disjoncteur de moyenne tension présente un profil environnemental plus proche de celui du lave-linge que de celui du transformateur.

1.4.7. Conclusion

D'une manière générale, les appareillages de moyenne tension (AMT) ne sont pas des produits électriques de grande consommation. Ils sont caractérisés par des niveaux de tension et de courant élevés et une durée de vie importante. Cela engendre des contraintes techniques strictes au niveau de la conception. Les AMT se rapprochent à la fois des appareillages électriques et des équipements mécaniques.

L'intégration de l'éco-conception dans le développement de ces produits devrait faire face, outre les spécifications techniques, aux contraintes économiques et réglementaires. Ils sont fabriqués en nombre réduit et sont dispersés à travers le monde dans des zones parfois difficiles d'accès.

Ils utilisent des matériaux spécifiques qui ne sont pas utilisés dans l'électricité de basse tension et qui nécessitent des précautions de gestion particulières pendant la fabrication et en fin de vie.

1.5. OBJET DE LA THESE

L'objectif de la recherche est formulé comme suit :

« La recherche vise à élaborer un système intégré de management d'éco-conception simplifié, adapté aux spécificités de la distribution électrique et consolidée au niveau environnemental ».

Au niveau industriel, cette méthodologie se traduit par la mise en place d'un outil d'éco-conception intégré dans le processus de conception existant.

1.6. HYPOTHESES

Nous avons élaboré notre démarche sur la base de trois principales hypothèses :

H1 : Le concepteur est le principal acteur dans la réduction de la pollution à la source → la méthode développée doit considérer le concepteur au centre du système.

H2 : Notre approche doit s'intégrer dans l'organisation existante de la conception → l'environnement peut se traduire en critère technico-économique gérable par le processus de conception

H3 : L'intégration de l'environnement dans le processus de conception doit être simplifiée → cette simplification doit garantir la solidité de la qualité environnementale.

1.7. PHASES D'ELABORATION DU PROJET DE RECHERCHE

La figure 13 permet de décrire les différentes étapes intermédiaires nécessaires à l'élaboration de notre méthodologie d'éco-conception :

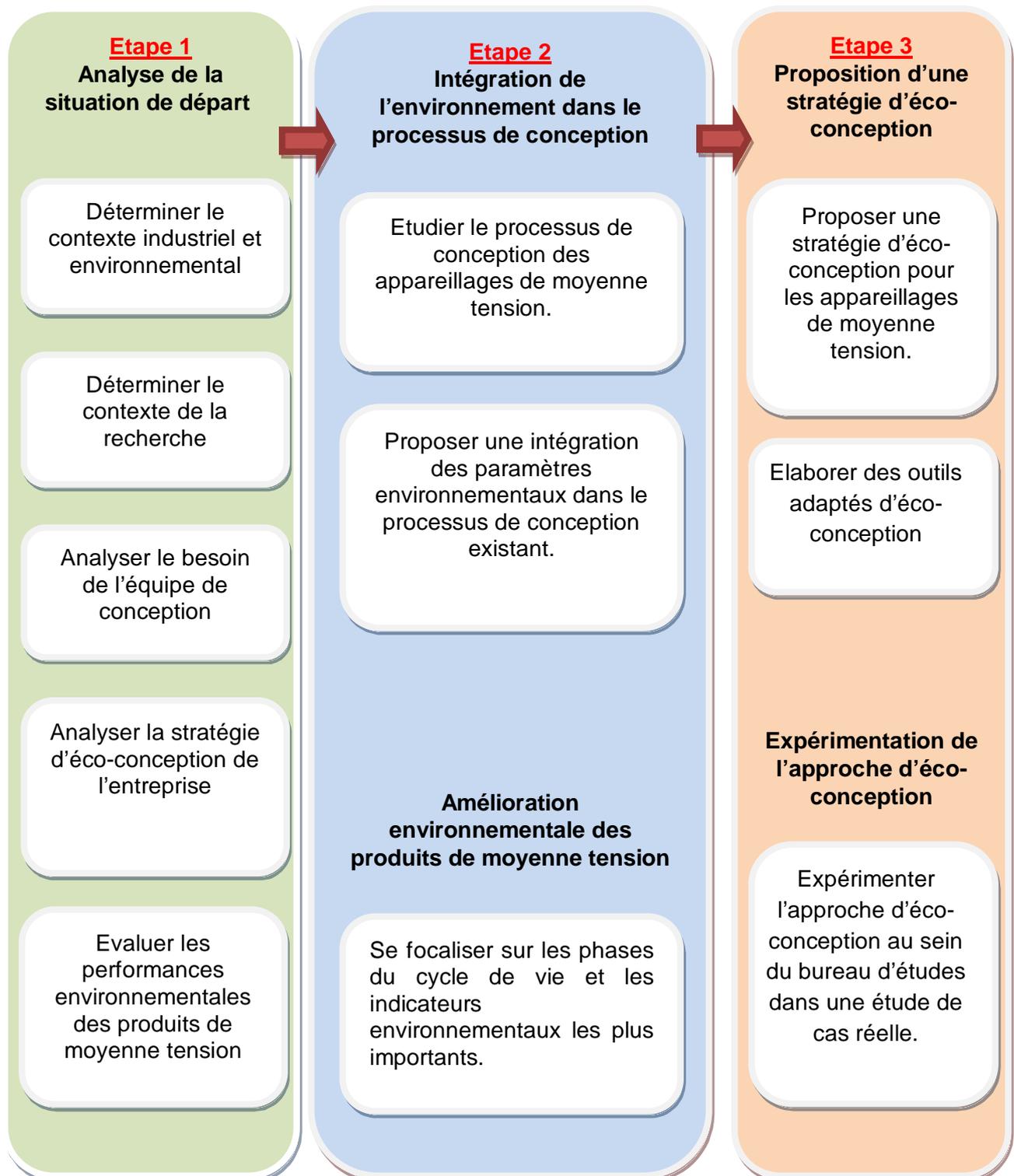


Figure 13. Construction de notre approche d'éco-conception

1.8. LIMITATIONS ET DOMAINES D'APPLICATION DE LA RECHERCHE

1.8.1. Les produits considérés

La recherche présentée dans ce mémoire a été essentiellement développée pour être appliquée lors de la conception de produits électriques de moyenne tension. Ces produits portent l'étiquette de produits électriques bien qu'ils soient totalement différents des produits de grande consommation. Les modèles composant notre méthode ont ainsi été spécifiquement développés pour ces produits. Néanmoins, il est possible d'utiliser la même méthode pour d'autres produits en adaptant la stratégie environnementale du producteur.

1.8.2. Echelle géographique

La dispersion géographique des appareillages de moyenne tension est l'une des principales problématiques de cette recherche. Elle pose avant tout deux contraintes :

La fabrication se fait sur différents sites à travers le monde. Souvent un produit est le résultat de l'assemblage de composants fabriqués dans différents pays. Aussi, le même composant peut être fabriqué sur divers sites utilisant des matériaux de sources différentes. Il s'avère donc que les performances environnementales d'un produit varient considérablement selon le lieu de fabrication. En effet, les sources d'énergie, les ressources hydriques, la composition de certains matériaux et les contraintes réglementaires sont largement différentes d'un pays à un autre.

La gestion de fin de vie est rendue plus difficile en raison des contraintes de récupération et de collecte des produits, soit du fait de la localisation de l'appareillage (zones difficiles d'accès, équipements isolés) soit à cause du manque voire de l'absence de filières de récupération en fin de vie.

L'Europe sera considérée comme référence géographique pour notre recherche. En effet, les données environnementales sur les matériaux et les sites de fabrication, les filières de fin de vie et le contexte législatif sont mieux définis qu'ailleurs. Des leviers de recalage géographique seront intégrés pour certains pays qui sont des acteurs majeurs au niveau du marché de la distribution électrique tels que l'Inde ou la Chine. Cela permettra de comparer l'impact sur l'environnement des produits fabriqués sur différents sites de la même entreprise ou chez les fournisseurs. D'ailleurs dans notre approche méthodologique, nous préconisons la collecte d'informations environnementales directes depuis les sites de fabrication internes et des principaux fournisseurs.

Nous pensons qu'à terme, la réglementation mondiale sera harmonisée sur le modèle européen qui apparaît comme le modèle le plus contraignant.

1.9. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre le contexte dans lequel s'inscrivent nos travaux de recherche à savoir :

- Une demande industrielle : la société AREVA T&D.
- Des produits spécifiques : les produits électriques de moyenne tension différents des autres produits électriques de basse et haute tension.
- Des contraintes multiples : un marché croissant, une situation environnementale inquiétante, un risque réglementaire et une pression sociale pressentie, un manque de données relatives aux produits, etc.
- Un besoin méthodologique et pratique : développer une méthodologie d'éco-conception simplifiée et adaptée à ces produits et des outils associés.

Nous avons montré les spécificités et les similitudes des appareillages de moyenne tension avec les autres équipements électriques. Il s'avère ainsi qu'il est important de développer une méthodologie d'éco-conception adaptée à cette catégorie de produits sans pour autant limiter le champ d'application à d'autres produits.

Dans le deuxième chapitre nous décrivons les différentes approches utilisées pour permettre la mise en place d'un système d'éco-conception dans le milieu industriel puis nous présenterons notre proposition d'approche d'éco-conception appliquée aux appareillages de moyenne tension.

Dans le troisième chapitre, nous traiterons les possibilités d'intégration de l'éco-conception dans le processus de conception. La première partie dressera un état de l'art des approches existantes. La deuxième partie présentera le processus de conception utilisé pour les appareillages de moyenne tension et notre proposition d'intégration des paramètres environnementaux dans ce processus.

Le quatrième chapitre présentera notre outil d'éco-conception associé à notre méthodologie. En première partie de ce chapitre, nous établirons un état de l'art des outils d'éco-conception existants et en deuxième partie nous décrivons les étapes de la construction de notre outil d'aide à l'éco-conception.

Dans le cinquième chapitre, nous étudierons le retour d'expérience relatif à la mise en application de notre méthodologie d'éco-conception et l'outil associé. Ensuite, nous présenterons des exemples réels de cette application.

Enfin, en dernière partie, nous conclurons d'une manière générale sur notre travail et proposerons des perspectives possibles à l'application de notre méthodologie.

**CHAPITRE 2 : DEMARCHE
D'ELABORATION D'UNE
METHODOLOGIE D'ECO-CONCEPTION
ADAPTEE AUX APPAREILLAGES DE
MOYENNE TENSION DE AREVA T&D**

2. CHAPITRE 2 : DEMARCHE D'ELABORATION D'UNE METHODOLOGIE D'ECO-CONCEPTION ADAPTEE AUX APPAREILLAGES DE MOYENNE TENSION DE AREVA T&D

« Une génération plante un arbre, la suivante profite de son ombre. »
Proverbe chinois

2.1. INTRODUCTION A L'ECO-CONCEPTION

Les impacts sur l'environnement surviennent durant toutes les phases du cycle de vie d'un disjoncteur isolé allant de l'extraction des matières premières jusqu'à la récupération en fin de vie. Toutefois, quel que soit le type d'impact généré et la phase du cycle de vie impactée, une grande partie de cet impact est déterminée au moment de la phase de conception du produit lors de la sélection des matériaux et de l'architecture du produit. Cela va de pair avec la détermination du coût du produit. L'éco-conception propose une réponse méthodologique qui permet de réduire la pollution à la source dès la phase de conception conceptuelle.

L'éco-conception se présente comme une manière intelligente de faire de la conception durable en phase avec le rapport BRUNTLAND qui préconise de satisfaire les besoins d'aujourd'hui sans mettre en péril les générations futures. D'après ce rapport, le développement durable est un processus de changement dans lequel l'exploitation des ressources, la direction des investissements, l'orientation du développement technique et le changement institutionnel sont tous en harmonie avec les possibilités d'améliorations des besoins humains actuels et futurs. D'après la norme internationale ISO 14062, l'éco-conception peut être définie comme l'intégration des contraintes environnementales dans la conception et le développement de produits. La norme ISO 14062 précise qu'il faut entendre par « produit » aussi bien des produits que des services et elle en propose une classification exhaustive selon différentes catégories.

L'éco-conception est aussi appelée conception pour l'environnement. Les travaux de recherche sur l'éco-conception sont largement orientés vers l'intégration systématique de l'aspect environnemental dans le développement des produits [OLUNDHL 2006]. La plupart des définitions présentent l'éco-conception comme la prise en considération des paramètres environnementaux sur tout le cycle de vie du produit.

BREZET et VAN HEMEL (1997), définissent l'éco-conception comme la prise en considération des aspects environnementaux sur toutes les phases du processus de développement du produit, permettant d'engendrer le minimum d'impact durant tout le cycle de vie du produit.

SIMON et al. (2000), intègrent les services dans leur définition de l'éco-conception. Ils présentent l'éco-conception comme étant un terme général qui implique une vision équilibrée du cycle de vie complet du produit, de l'effort de conception axé sur la réduction des impacts environnementaux majeurs du produit ou service.

SHERWIN and EVANS (2000), ajoutent la notion de systèmes dans la liste des produits pouvant être éco-conçus.

CHARTER et TISCHNER (2001) définissent l'éco-conception comme suit : « *les solutions durables sont des produits, services, hybrides ou systèmes qui permettent de minimiser les impacts négatifs et de maximiser les impacts positifs- au niveau de l'économie, de l'environnement, de la société et de l'éthique- partout et au-delà du cycle de vie des produits ou solutions existants en accomplissant les demandes sociétales acceptables* ».

Du point de vue industriel, l'éco-conception sera la façon de combiner les considérations économiques et écologiques. Il s'agit là de réduire les impacts sur l'environnement et d'augmenter l'efficacité économique du produit [KARLSSON et CONRAD 2005]. Nous ajoutons que l'éco-conception ne doit pas participer à la dégradation de la fiabilité fonctionnelle du produit. D'ailleurs tous les choix de conception se font dans l'objectif de satisfaire un cahier des charges technique qui guide le développement d'un produit.

2.2. L'INDUSTRIE FACE A LA CONTRAINTE : POURQUOI L'INDUSTRIE A-T-ELLE BESOIN DE L'ECO-CONCEPTION ?

Pour la plupart des entreprises pionnières, la prise en compte de l'environnement est motivée par une raison économique directe telle que l'économie de matière, d'énergie, la réduction du coût de fabrication et de traitement des déchets ou indirecte telle que l'amélioration de l'image de marque et la distinction par rapport à la concurrence. Une entreprise qui aura su avoir cette vision proactive et concevoir des produits aisément retraitables en fin de vie pourra compter sur des économies substantielles, notamment en récupérant des composants ou en utilisant dans la fabrication de produits neufs des matériaux recyclés de produits usagés [JANIN 2002].

Il existe une multitude de paramètres moteurs qui incitent les entreprises à mettre en pratique l'éco-conception. Il semblerait que le moteur principal soit l'augmentation potentielle des bénéfices grâce à l'ouverture de nouveaux marchés. Ces bénéfices pourraient être liés à la demande du client, à l'intégration du coût global du cycle de vie du produit (consommation électrique, recyclage de matière, ...). Toutefois, il apparaît que le client final peut exiger la prise en compte des problèmes environnementaux mais il n'est pas encore prêt à payer beaucoup plus cher pour acheter un produit plus écologique [DONNELLY et al. 2005].

D'après un rapport rédigé par l'ADEME et l'AFNOR, [BRUN et SAILLET 2005] en plus de la réduction des impacts environnementaux des produits, les bénéfices les plus fréquemment évoqués par les entreprises qui ont pris en compte l'environnement en conception sont :

- se différencier de la concurrence : l'éco-conception porte un regard nouveau sur les produits ou services et permet d'explorer des voies d'amélioration originales : cette démarche est source d'innovation et de différenciation marketing, ...
- devancer les attentes des marchés : offre optimisée, produits dont la maintenance est facilitée, services moins consommateurs d'énergie, équipements réparables, ... L'éco-conception permet de répondre aux attentes actuelles ou à venir des clients, de conforter leur intérêt ou de se positionner sur de nouveaux marchés.
- s'appuyer sur un nouveau levier de motivation interne : source de créativité, l'éco-conception permet de dynamiser la réflexion autour des produits, de mobiliser tous les acteurs de l'entreprise en faveur de l'environnement et de susciter de nouvelles collaborations.

Une étude européenne [TUKKER et EDER 2000] concernant 500 grandes entreprises a révélé que la réduction du coût lié à la gestion des déchets et à la matière première est leur moteur principal pour l'éco-conception. En deuxième position apparaît la croissance de la demande de clients concernant des produits de meilleure empreinte écologique. D'une manière générale, le paramètre économique s'avère l'activateur principal loin devant le paramètre écologique. Par ailleurs, cette enquête montre que beaucoup d'entreprises ne mettent pas en place une démarche d'éco-conception en raison de certaines difficultés éprouvées quant à l'intégration des critères environnementaux dans la conception des produits. Dans certains cas, la présence d'une personne sensible au sujet de l'environnement, à la tête de l'entreprise, permet de dynamiser son approche durable. Mis à part les exigences réglementaires, il semblerait que l'intérêt croissant relatif aux systèmes de management environnemental SME (EMAS, ISO 14001) joue un rôle moteur pour la mise en place d'une démarche d'éco-conception intégrée. Cette étude montre aussi que les grandes entreprises semblent plus inquiétées par l'aspect « réduction des coûts » que par la réglementation, à l'opposé des petites entreprises.

Bien souvent, les entreprises n'ayant pas encore développé d'éco-produits ne prennent pas en considération les opportunités que leur offre la prise en compte de l'environnement dans leurs produits. Pourtant, il arrive souvent que les entreprises agissent dans le même sens « écologique » et « économique » sans que cela ne soit pris en compte au départ. La simplification, le compactage, la réduction des opérations de fabrication...présentent un exemple très concret de ce type d'actions. La différence c'est que cela se fait d'une façon aléatoire et sans réelle évaluation environnementale. Le risque de transfert de pollution devient alors très important.

Quelle que soit la raison de mettre en place une démarche d'éco-conception, nul ne peut ignorer la part de responsabilité de l'industrie dans la perturbation du système naturel (voir paragraphe suivant).

L'éco-conception présente une des voies d'amélioration environnementales qui peut s'intégrer dans une approche de gestion environnementale plus générale.

Dans le domaine industriel, l'éco-conception est parfois interprétée comme une source supplémentaire de contraintes techniques et économiques. En effet, le fait d'ajouter des contraintes de conception peut augmenter le coût de développement du produit. Toutefois, le coût global sur l'ensemble du cycle de vie est souvent non pris en compte. Tel est l'exemple des produits électriques où l'intégration du coût de la consommation d'énergie dans le coût global peut couvrir largement le coût des modifications qui ont permis une réduction de cette consommation. Certaines entreprises ont su tirer profit de leur démarche d'éco-conception : elles répondent à un besoin de la société d'une consommation plus écologique et plus responsable. Cela est lié principalement, à une prise de conscience générale constatée depuis quelques années surtout dans le monde occidental mais aussi à un phénomène de mode qui est apparu dans les années 2000. Tel est l'exemple de l'affichage du niveau de consommation d'énergie sur les équipements électroménagers.

Nous estimons que l'éco-conception doit s'inscrire dans une démarche globale de développement durable qui tient compte à la fois des aspects économiques, sociaux et environnementaux. Le respect des réglementations et des normes environnementales, de plus en plus strictes, doit être un moteur d'accélération de cette démarche.

2.3. QUELLE DEMARCHE D'ECO-CONCEPTION POUR L'INDUSTRIE ?

Dans la partie précédente, nous avons présenté l'implication des industriels dans la pollution de l'environnement et le besoin urgent de réagir à tous les niveaux. En effet, l'industrie doit trouver des solutions aux problèmes de pollutions induits par leurs activités et de répondre aux exigences réglementaires, normatives, sociales et économiques. Dans le contexte actuel de consommation effrénée, il s'avère impossible d'arrêter la production. Cependant, les industries ont réalisé des progrès très importants en termes de réduction de pollution des sites de fabrication en mettant en place des systèmes de gestion environnementale solides et éprouvés. Aujourd'hui, il est important d'aller plus loin dans la recherche de pistes pour la protection de l'environnement.

Une des solutions consisterait à réduire la pollution à la source, c'est-à-dire concevoir les produits d'une manière plus écologique. Cette approche demande de modifier l'approche de conception des produits afin de réduire les flux polluants (entrée/sortie). L'éco-conception présente alors une alternative intéressante pour la maîtrise de la pollution en optimisant le design, le choix des matériaux, la consommation énergétique, les procédés de fabrication, la gestion de la fin de vie, la logistique... Les contraintes environnementales doivent être intégrées dès le début de la phase de développement du disjoncteur isolé afin de garantir des marges de manœuvre plus importantes.

La mise en place d'une démarche d'éco-conception au sein d'une entreprise nécessite de fixer des choix stratégiques et techniques. La stratégie politique est directement établie par la direction de l'entreprise.

En général, c'est cette stratégie qui permet d'initier toute approche environnementale dans l'entreprise. La stratégie technique est plutôt fixée sur la base d'études spécifiques réalisées par des spécialistes en éco-conception et par le bureau d'études. Dans la suite, nous présentons différentes démarches stratégiques.

2.3.1. Démarche stratégique d'éco-conception

Le choix de la stratégie environnementale est la première étape de la construction d'une démarche d'éco-conception dans une entreprise, indépendamment de sa dimension et de la nature des produits qu'elle développe. Une entreprise désireuse de s'investir dans l'éco-conception doit en premier lieu choisir précisément le niveau qu'elle souhaite atteindre en fonction de sa stratégie. Une politique environnementale claire, basée sur des objectifs liés au développement durable de produits, est un facteur essentiel dans la réussite de la mise en place d'une démarche d'éco-conception. La politique environnementale produit vise à améliorer les pratiques d'éco-conception dans l'entreprise [JOHANSSON et MAGNUSSON 2005]. Elle peut concerner certains éléments tels que :

- Fixer des objectifs clairs et un plan d'action relatif à l'éco-conception.
- Identifier les produits et les paramètres environnementaux prioritaires.
- Tenir compte de la demande des clients, des exigences réglementaires et des ressources des fournisseurs.
- Mettre en place les ressources humaines et financières pour la réalisation des actions pratiques d'éco-conception.
- Créer un réseau d'éco-conception au sein de l'entreprise.
- Garantir une approche de communication interne et externe qui permette de valoriser les actions d'éco-conception de l'entreprise.
- Développer des outils et des méthodes d'éco-conception. Il peut s'agir d'outils existants utilisés dans le même secteur d'activité ou d'outils spécifiques adaptés au besoin de l'entreprise.
- Assurer une formation en éco-conception à tous les acteurs participant à cette activité (bureau d'études, achat, marketing, communication, ...).

Dans la plupart des entreprises, la politique environnementale produit est directement liée à la politique de développement durable. Le processus de développement et d'innovation de produits peut être traduit comme suit : La prise de décisions concernant le développement de produit est en accord avec la stratégie globale et les objectifs fixés par l'entreprise. Une fois que les options de conception sont établies par le bureau d'études, le choix d'une ou plusieurs options est établi selon les règles imposées par la politique environnementale de l'entreprise. Cette description montre que l'éco-conception ne requiert pas une approche radicalement différente de la démarche classique de conception de produits. Toutefois, elle nécessite de prendre en considération les aspects environnementaux au niveau des différents paramètres qui influent sur les décisions de conception [CRAMER et TUKKER 1998]. Il est important de noter qu'une politique d'éco-conception ne peut être réussie que si elle est soutenue et suivie par la direction de l'entreprise.

Généralement, l'entreprise élabore une feuille de route afin d'orienter son personnel dans la démarche d'éco-conception. Les objectifs environnementaux à atteindre peuvent être de priorité différente. Il existe des objectifs prioritaires et immédiats comme la conformité réglementaire et d'autres moins prioritaires et à long terme comme la réduction de la consommation d'eau. Les objectifs varient d'une entreprise à l'autre selon les paramètres suivants :

- L'importance des impacts sur l'environnement des produits développés par l'entreprise (effet de serre, épuisement des ressources, contamination des milieux naturels, ...).
- La nature du secteur : industriel ou tertiaire (énergie, automobile, aéronautique, services, ...).
- L'image de marque que veut véhiculer l'entreprise (entreprise référente dans le domaine, entreprise pionnière, entreprise certifiée, ...).
- Les moyens financiers et humains dont elle peut disposer.
- Le contexte géopolitique (polémique sur l'effet de serre, problématique des pesticides, pénurie des carburants,...).
- Les exigences des clients (produits exempts de certaines substances, produits moins polluants, produits sans maintenance, ...).

Cette série de paramètres n'est pas exhaustive, toutefois, il est important de savoir que les objectifs ne sont pas figés et définitifs. Dans la plupart des cas, l'entreprise est amenée à s'adapter à l'évolution du contexte dans lequel elle évolue. Cela constitue une contrainte supplémentaire dans la mise en place d'une démarche d'éco-conception. Pour JANIN (2002), il existe deux stratégies d'éco-conception : réactive et proactive. La stratégie réactive est une réponse à des pressions extérieures considérées, telles que des contraintes par l'entreprise. Cette approche peut s'avérer très contraignante économiquement et techniquement puisqu'elle peut obliger l'entreprise à agir dans l'urgence. C'est le cas des entreprises qui limitent leurs actions à la mise en conformité de leurs produits aux nouvelles réglementations. L'approche proactive relève d'une volonté interne d'origine éthique ou commerciale. Il est évident que l'approche proactive permet une meilleure visibilité dans la réalisation des objectifs environnementaux. L'entreprise devance les contraintes auxquelles elle doit faire face et se prépare plus facilement pour mieux répondre aux exigences futures. Néanmoins, cette approche nécessite plus de ressources financières pour assurer une veille réglementaire, technologique et sociétale active et une recherche de solutions pionnières. Les grands donneurs d'ordre jouent souvent ce rôle moteur grâce aux moyens de pression dont ils disposent.

GAUCHERON (2000) distingue différentes catégories de stratégies : hostile, défensive, bienveillante, coopérative et intégratrice. BONAITI (1994) compare deux stratégies « attentiste » et « volontariste » (voir figure 13). Il préconise une approche intégrative qui consiste à intégrer l'environnement dans tous les choix faits par l'entreprise : choix de matières, de procédés, de fournisseurs, etc. L'adoption d'une telle stratégie contribue à prévoir les dépenses liées à la protection de l'environnement et améliore l'image de marque de l'entreprise à l'opposé d'une approche attentiste.

Pour MILLET et al. (2003), le passage d'une approche palliative à une approche intégrative nécessite une profonde réorganisation de l'entreprise tant dans son aspect structural que fonctionnel (confère figure 14).

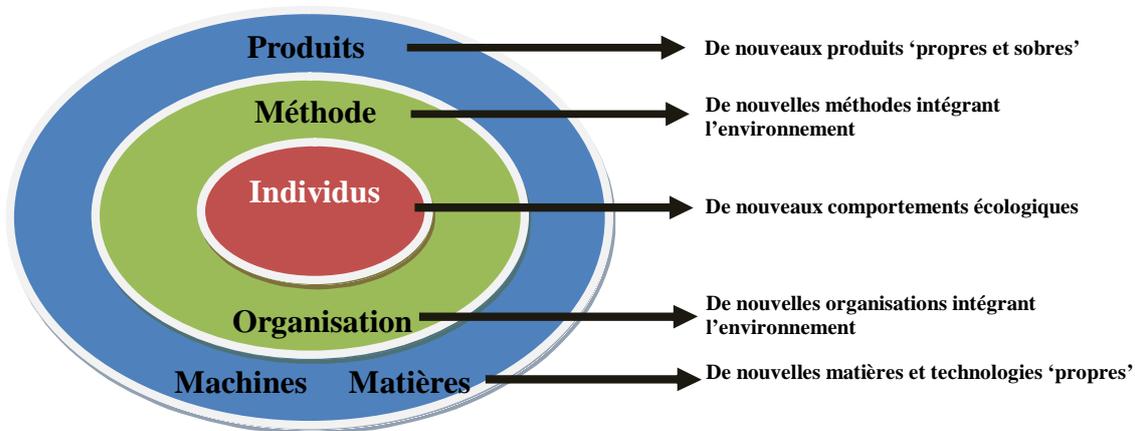


Figure 14. Ampleur de la réorganisation de l'entreprise

Source : MILLET 2003

Comme MILLET nous mettons le vecteur « individus » au cœur de la démarche d'éco-conception. Les individus et plus particulièrement les concepteurs sont les acteurs principaux dans la modification du produit. Cela est encore plus valable pour les produits complexes et ayant un haut niveau technologique.

2.3.1.1. Le niveau d'éco-conception recherché

Une équipe de recherche hollandaise [BREZET et al. 1995 et STEVELS 1997] a déterminé quatre niveaux d'approche stratégiques fixés selon le facteur d'amélioration de l'éco-efficacité.

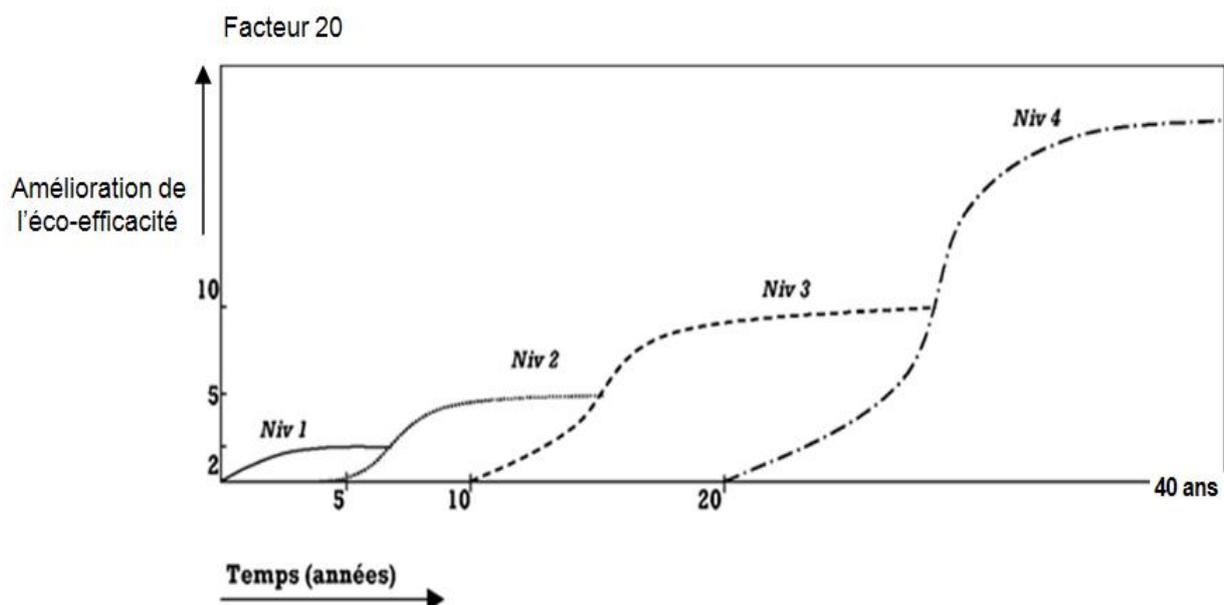


Figure 15. Les quatre niveaux d'éco-conception.

Source: BREZET J.C, Dynamics in ecodesign practice, UNEP Industry and Environment January-June 1997, p. 22.

L'éco-efficacité est un concept désignant des produits ou services caractérisés par une utilisation minimale de ressources pour une utilisation optimale.

L'OCDE définit l'éco-efficacité (ou "l'éco-efficience") comme "l'efficacité avec laquelle les ressources écologiques sont utilisées pour répondre aux besoins de l'être humain". Dans cette optique, l'éco-efficacité correspond à la productivité des ressources.

L'éco-efficacité est axée sur trois objectifs d'envergure :

1. Réduire la consommation de ressources – Minimiser la consommation d'énergie, de matériaux, d'eau et du sol et améliorer la recyclabilité et la durabilité du produit.
2. Réduire l'incidence sur la nature – Minimiser les émissions atmosphériques, les déversements accidentels, l'élimination des déchets et la dispersion de substances nocives, favoriser l'utilisation durable de ressources renouvelables.
3. Rehausser la valeur du produit ou service – Fournir plus d'avantages aux clients à travers la fonctionnalité et la souplesse du produit, fournir des services additionnels en misant sur la vente de besoins fonctionnels qui correspondent véritablement à ceux des clients. Cela soulève la possibilité de répondre au même besoin fonctionnel du client tout en consommant moins de matériaux et de ressources.

Les niveaux 1 à 4 correspondent à des niveaux de réduction des impacts environnementaux allant de 50 à 95 %. Pour les niveaux 1 et 2, cela correspond aux améliorations et transformations à apporter pour améliorer l'éco-efficacité des produits. Pour les niveaux 3 et 4, il s'agit plutôt de modifications plus importantes ou de produits innovants. L'entreprise peut choisir de se mettre directement à un niveau supérieur sans passer par les niveaux 1 et 2. Toutefois, l'expérience industrielle montre que l'évolution de la prise en compte de l'environnement dans la conception se fait de manière progressive et lente. Une innovation trop rapide peut constituer une contrainte commerciale et technique supplémentaire pour l'industriel. En effet, les clients et les fournisseurs peuvent ne pas être prêts et disponibles à ce type de changement radical.

Notons que l'échelle de temps indiquée sur la figure n'est pas figée. Elle représente une estimation du temps que mettrait l'industrie d'une manière générale avant de se hausser au niveau 4 d'éco-efficacité. Il est bien évident que des entreprises plus proactives peuvent y arriver plus rapidement.

Le niveau 1 : Amélioration du produit

Il s'agit d'une amélioration apportée à un produit existant sans changer le produit en soi. Il s'agit d'une « mise à jour » environnementale du produit. Cette approche est souvent guidée par le respect de la réglementation et les modifications de conception sont associées à une réduction des coûts. Les actions menées relèvent du bon sens du concepteur et peuvent être facilement appliquées par tout type d'entreprises : réduction du temps d'assemblage et de désassemblage, réduction de la masse du produit ou de son emballage, réduction de la consommation d'énergie. Les améliorations apportées sont simples à mesurer :

- Le nombre de pièces supprimées
- Le nombre de matériaux utilisés par rapport au produit d'origine

- Le nombre de fixations par rapport au produit d'origine
- La réduction de la consommation d'énergie
- La réduction du poids du produit
- Les substances toxiques éliminées
- Le temps de désassemblage
- Le coût des améliorations environnementales

Le niveau 2 : Reconception du produit

Il s'agit d'une reconception d'un produit existant. Ce type de projet nécessite une analyse environnementale approfondie du produit existant afin de déterminer les sources de pollution et d'étudier les interactions entre ces sources et les possibles transferts de pollution. BREZET (1995) préconise de dissocier les contraintes de coût/ qualité des contraintes environnementales pour élargir le champ de créativité. Dans ce type d'approche, le produit conserve sa fonctionnalité, seule la conception change. La géométrie du produit, son architecture et ses composants peuvent être changés. Cela peut engendrer des modifications des matériaux et techniques de fabrication. Ces changements peuvent affecter plusieurs phases du cycle de vie. Il est alors important d'évaluer les impacts environnementaux des produits reconçus afin de mesurer les réelles améliorations sur le produit.

Le niveau 2 est le niveau le plus recherché par les entreprises initiatrices de démarches d'éco-conception. Toutefois, ce niveau requiert un temps de développement plus long que le niveau 1 et des compétences environnementales plus approfondies. Ce type de projet nécessite des outils spécifiques d'éco-conception et d'évaluation environnementale. Les changements apportés peuvent impliquer les fournisseurs mais peu ou pas les clients. Le coût de la mise en place d'un tel projet peut s'avérer important.

Le niveau 3 : Nouveau concept de produit

Alors que les deux premiers niveaux sont orientés vers la révision des produits existants, le niveau 3 introduit un nouveau concept de produit. Le produit remplit les mêmes fonctions mais les systèmes utilisés sont catégoriquement différents. Le fabricant travaille sur une rupture technologique qui lui permet d'exploiter un nouveau marché sur une période relativement longue. C'est le cas des appareils photos numériques qui viennent remplacer les appareils argentiques ou du téléphone cellulaire qui a remplacé le téléphone filaire.

- Les risques liés à ce type de projet peuvent se révéler très importants :
- Le changement technologique peut nécessiter des investissements importants.
- Certains matériaux ou composants ne sont pas disponibles en quantité suffisante.
- Certains fournisseurs ne sont pas capables d'accompagner un tel niveau d'innovation.
- Les clients peuvent être réticents envers certains produits, soit par ce qu'ils ne sont pas préparés à les utiliser, soit parce que les avantages environnementaux ne justifient pas la perte en performance ou l'augmentation du prix.

L'entreprise doit donc intégrer toutes ces contraintes dans son projet d'éco-conception. Ce type de projet ne peut réussir que si la stratégie de développement adoptée est de long terme avec une vision large sur l'ensemble du cycle de vie. Par ailleurs, l'entreprise doit accompagner tous ses partenaires et clients dans le processus d'adaptation au nouveau produit. Les projets d'innovation réussis peuvent apporter des bénéfices économiques importants à l'entreprise à travers la vente du nouveau produit ou de la technologie.

Pour cela, il s'avère indispensable de protéger ces innovations par un dépôt de brevet et une communication organisée.

Le niveau 4 : Nouveau système productif

Ce niveau d'innovation ne touche pas uniquement le produit mais tout le système productif. Ce type de projet nécessite des changements profonds des infrastructures et des organisations. C'est le cas du développement du transport mécanique par rapport au transport basé sur les animaux qui a engendré une modification générale de notre mode de vie ou encore le développement de l'énergie électrique et le téléphone.

Dans le tableau suivant, STEVELS (1997), estime que l'entreprise est entièrement en charge des deux premiers niveaux d'éco-efficacité. Les niveaux 3 et 4, au contraire, requièrent des changements plus profonds au niveau de la société et du consommateur.

Niveau	Objectif	Evaluation environnementale et économique	Investissement	Changement du mode de vie du	Besoin de changement d'infrastructure
1	Amélioration progressive	"Sens commun" Check-lists	0	0	0
2	Reconception complète de concepts existants	Poids environnemental Eco-indicateur Coût du cycle de vie (LCC)	✓✓	(□□	0
3	Solutions alternatives	Analyse de cycle de vie ? Cashflow généré par le	✓✓✓✓	✓✓✓✓✓✓	√□(□(□(□ □□
4	Fonctionnalité compatible avec le	Analyse complète de cycle de vie ? Cashflow du cycle de vie complet	✓✓✓✓✓✓ ✓	✓✓✓✓✓✓ ✓✓✓✓	√✓✓✓√□(□ □□□□

(□(□(□(□(□ : très fort ✓✓✓✓✓✓ : fort ✓✓✓✓✓ : moyen ✓✓✓ : faible ✓✓ : très faible 0 : aucun

Tableau 5. Les différents niveaux d'éco-conception et les modifications qu'ils engendrent au niveau de l'entreprise.

Source: STEVELS 1997. "Moving companies towards sustainability through eco-design : conditions for success".

La plupart des entreprises qui s'investissent dans l'éco-conception adoptent des stratégies de reconception de niveaux 1 et 2. Cela s'explique par le rapport risque / amélioration environnementale. Il s'avère que les petites entreprises sont plus innovantes que les grandes. Dans le cas de ces petites unités, l'approche innovante constitue parfois la seule possibilité d'augmenter ses profits économiques. A contrario, les grandes entreprises essaient de préserver leurs parts d'un marché bien identifié en apportant les améliorations environnementales qui leurs permettent juste de devancer leurs concurrents ou de les suivre sans prendre de risques importants.

Néanmoins, ces entreprises investissent souvent une partie de leurs budgets de recherche dans le développement de technologies écologiques innovantes sur le long terme, en prévision des évolutions des contraintes réglementaires (restrictions de substances, taux de recyclabilité, ...) et économiques (augmentation des prix des matières, pénurie de certains matériaux,...).

Nous pensons que le diagramme de BREZET tel qu'il est présenté est à nuancer, d'abord par rapport à la chronologie des niveaux d'éco-conception et ensuite par rapport à la définition même de ces niveaux. En effet, l'expérience acquise au cours des dernières années montre que la mise en place d'une démarche de reconception qui tient compte des critères environnementaux requiert moins de temps que cela semble apparaître sur la figure 14 et ne nécessite pas une évaluation approfondie des performances environnementales du produit existant. Aussi, nous pensons que l'éco-efficacité est liée à la conception du produit et non au degré de modification apportée au produit. Ainsi, une entreprise peut adopter une démarche de niveau 1 ou 2 pour apporter une amélioration plus importante de l'éco-efficacité qu'avec un niveau 3 ou 4. De même, nous admettons qu'il existe plutôt deux niveaux d'éco-conception : un premier niveau de reconception partielle ou totale du produit et un deuxième niveau d'innovation ou de création d'un nouveau produit.

Le choix d'une démarche par rapport à une autre n'est pas seulement lié aux degrés de « maturité » de l'équipe de conception mais surtout à la réponse apportée aux objectifs environnementaux et aux contraintes techniques et économiques du cahier des charges.

2.3.2. Démarche technique d'éco-conception

En général, les entreprises qui souhaitent mettre en place une démarche d'éco-conception se réfèrent à l'expertise de spécialistes en éco-conception. La plupart des grandes entreprises intègrent cette compétence dans leur bureau d'études ou comme étant une fonction transversale à différentes branches de l'entreprise (technique, marketing, achat, communication, ...). D'autres entreprises font appel à des consultants extérieurs pour les aider à intégrer l'environnement dans la conception de leurs produits. La première tâche de ces spécialistes est de faire une évaluation de la démarche de conception existante et des performances environnementales des produits. L'étude de la démarche de conception permet de :

- connaître les contraintes technico-économiques de conception des produits
- comprendre le processus de conception
- connaître les outils utilisés
- évaluer le niveau de prise en compte de l'environnement
- détecter les possibilités d'intégration du paramètre environnemental

Une analyse environnementale détaillée des produits existants permet de :

- connaître les sources potentielles de pollution
- comparer les performances environnementales des produits avec des produits concurrents
- détecter des problèmes de non conformités réglementaires

- évaluer les marges d'amélioration environnementale des produits

Les spécialistes en éco-conception se basent sur l'étude environnementale associée à une étude du système de conception pour proposer à l'entreprise une démarche technique d'éco-conception. Cela se traduit généralement par une modification du processus de conception, du système de gestion de projet et par la mise en place de nouveaux outils d'éco-conception. Par ailleurs, ils préconisent des améliorations techniques qui peuvent apporter un gain écologique au produit tout en respectant le cahier des charges initial.

L'étape suivante consiste à internaliser une partie de l'expertise d'éco-conception au sein du bureau d'études. Nous pouvons alors parler d'une phase de «maturité écologique». Les concepteurs prennent en charge une partie des choix environnementaux lors de la phase de conception. Les travaux de JANIN (2000) et LEPOCHAT (2005) ont montré toute la difficulté de mettre en place ce type de démarche, plus particulièrement dans les petites entreprises. Cela est dû au manque de compétences environnementales des concepteurs d'une part et à une augmentation de la charge de travail et de la charge financière d'autre part.

Dans la démarche que nous proposons, nous tenons compte de ces paramètres afin que l'intégration de l'éco-conception soit plus accessible pour le bureau d'études. Dans le chapitre suivant nous présenterons la démarche d'éco-conception appliquée dans notre méthodologie d'éco-conception des appareillages de moyenne tension de AREVA T&D/DRC.

2.3.3. La cohérence entre l'éco-conception et l'économie

Pour la plupart des entreprises pionnières, la prise en compte de l'environnement est motivée par une raison économique directe telle que l'économie de matière, d'énergie, la réduction du coût de fabrication et de traitement des déchets ou indirecte telle que l'amélioration de l'image de marque et la distinction par rapport à la concurrence. Une entreprise qui aura su avoir cette vision proactive et concevoir des produits aisément retraitables en fin de vie pourra compter sur des économies substantielles, notamment en récupérant des composants ou utilisant dans la fabrication de produits neufs des matériaux recyclés de produits usagés (JANIN 2002).

D'autres entreprises ne sont ni proactives, ni réactives mais suiveuses. Ce sont des entreprises désireuses d'améliorer la qualité environnementale de leurs produits mais qui ne disposent pas des ressources nécessaires pour le faire. Elles se basent sur les efforts de recherche et développement supportés par d'autres entreprises. Par exemple, certains producteurs d'équipements électriques et électroniques n'ont pas mis en place des plans d'action pour la recherche de solutions de remplacement des substances interdites par la directive européenne (RoHS). Ils ont attendu la mise sur le marché des solutions développées par d'autres entreprises. Dans certains cas, une entreprise peut être pionnière dans un domaine et suiveuse dans d'autres.

2.3.4.Exemples de stratégies d'éco-conception

2.3.4.1. Réduire les risques éco-toxicologiques

Éliminer les substances polluantes

L'entreprise peut choisir d'éliminer un certain nombre de substances dangereuses utilisées dans leurs produits tout au long de leur cycle de vie. Cela peut inclure les substances :

- toxiques pour l'homme et la nature : métaux lourds tels que le plomb et le cadmium, les solvants organiques chlorés, les formaldéhydes,
- explosives et corrosives : mercure, brome
- destructives de couches d'ozone : CFC, HFC
- à effet de serre : CO₂, CFC, HFC, SF₆

Utiliser des procédés de fabrication propres

L'entreprise peut axer sa stratégie sur une fabrication « propre ». Cela consiste à utiliser des procédés qui consomment moins d'énergie et de ressources et qui produisent moins de déchets. L'équipe de conception peut jouer un rôle très important dans la mise en place d'une telle approche. Le concepteur doit être capable de déterminer les produits qui requièrent des procédés polluants et de faire des choix de conception qui évitent ces procédés. Tel est l'exemple des traitements de surfaces métalliques où le concepteur est responsable du choix du procédé de protection et donc directement impliqué dans la réduction de la pollution de la phase de production.

Le bureau d'étude peut être appelé à travailler avec l'équipe de production afin d'intégrer les rebus de fabrication dans la conception des nouveaux produits. Il peut aussi accompagner le service des achats dans le choix des fournisseurs et sous-traitants qui utilisent des procédés de fabrication plus écologiques.

L'entreprise peut aussi s'orienter vers l'utilisation de sources d'énergie plus « propres » telles que l'énergie solaire ou éolienne.

2.3.4.2. Réduire la consommation des ressources

Réduire la consommation d'énergie

La réduction de la consommation d'énergie du produit présente un intérêt environnemental et économique considérable. L'entreprise peut orienter son équipe de conception vers des produits à faible consommation d'énergie. Ce choix dépend de la nature du produit mais surtout de sa durée de vie. Toutefois, il est important de préserver les performances techniques afin de garantir la satisfaction du client. Il y a là un compromis à trouver entre la performance et l'efficacité énergétique. Au cours des deux dernières décennies, nous avons constaté une réduction considérable de la consommation électrique des produits électriques et électroniques et de celle des carburants pour les automobiles en même temps qu'une amélioration continue du rendu fonctionnel de ces produits.

Réduire la consommation d'eau

L'eau étant une ressource naturelle primordiale, il est important d'en optimiser la consommation. Le bureau d'études peut agir sur les quantités d'eau utilisées mais aussi sur la qualité de l'eau rejetée. Il est possible d'utiliser la même approche pour d'autres consommables tels que les détergents et les huiles. Par exemple, il existe des friteuses sans huile, des aspirateurs sans sacs et des machines à laver sans détergent.

Concevoir pour la réduction des déchets

La réduction des déchets présente souvent un double intérêt économique et écologique. Cela passe par la minimisation des matériaux utilisés à la source mais aussi par l'augmentation de la durée de vie et de la fraction recyclable du produit.

La réduction à la source est la manière la plus préventive. Elle nécessite une revue des fonctionnalités du produit et de son architecture. Cela peut se traduire par l'élimination de certaines parties ou le remplacement de certains matériaux par d'autres plus légers. Tel est l'exemple des bouteilles plastiques qui ont remplacé les bouteilles en verre. L'utilisation de moins de ressources est souvent équivalente à une réduction de pollution liée à l'extraction, la transformation et le transport des matières.

L'extension de la durée de vie du produit permet à la fois d'utiliser moins de ressources et de produire moins de déchets. Toutefois, il est faut trouver l'équilibre entre le renouvellement économique et technologique et la réduction de l'impact engendré par le produit. L'entreprise doit pouvoir à la fois améliorer les performances techniques de son produit et en assurer la pérennité économique. Une étude de STAMMINGER et al. (2005) réalisée sur les machines à laver le linge a montré que le renouvellement de ces machines tous les dix ans permet une meilleure réduction des impacts environnementaux.

L'utilisation de matériaux recyclés et recyclables permet de réduire les quantités de matières vierges utilisées. Il est souvent possible de mélanger des matériaux vierges avec des matériaux recyclés afin d'assurer les performances techniques requises.

Réutiliser le produit ou une partie du produit

La réutilisation du produit ou d'une partie du produit permet de réduire les impacts liés à la fabrication de nouvelles pièces ou à la gestion de la fin de vie. Le concepteur peut intégrer une partie des produits en fin de vie dans la conception des produits nouveaux pour la même application ou pour des applications différentes. Cependant, il est nécessaire d'évaluer les impacts environnementaux liés à la réutilisation afin d'éviter tout transfert de pollution.

Concevoir pour un démontage plus facile

Le recyclage et la réutilisation du produit nécessitent souvent une récupération plus simple. L'entreprise peut demander à son équipe de conception d'utiliser des modes de fixation faciles à démonter tels que le vissage, le positionnement et l'enclipsage. Un démontage facile peut constituer un avantage économique intéressant (le coût de démontage manuel en France est de l'ordre de 40€/heure, celui du broyage est de l'ordre de 100€/tonne).

2.3.5. Conclusion

Nous pensons que le paramètre écologique doit être considéré comme un paramètre stratégique qui peut avoir une influence positive sur la manière de penser les produits et constituer une opportunité économique pour l'entreprise. Considérer la démarche d'éco-conception comme simple réponse aux exigences extérieures est une approche très limitée et ne permet en aucun cas de créer une valeur ajoutée au produit. Le tout est de savoir apporter la dose d'innovation adéquate au bon moment. Ainsi, il faut veiller à ne pas oublier la rentabilité économique demandée au produit.

Par ailleurs, l'industrie a besoin de l'éco-conception pour faire face aux exigences environnementales, aux contraintes réglementaires et à la pression sociale. L'éco-conception a touché plus rapidement les biens de grande consommation comme les voitures et l'électroménager que les produits professionnels. Ceci s'explique par le fait que la plupart des réglementations ne touche pas encore ces produits. Par ailleurs, il n'existe pas de demande explicite des clients de produits « verts » et la quantité de ces produits est relativement faible : 35 millions de machines à laver par an pour 600 000 appareils de distribution d'électricité toutes catégories confondues. De plus, il apparaît clairement qu'il est quasiment impossible de réduire simultanément tous les impacts environnementaux liés à un produit ou une activité. Le concepteur a alors besoin d'une stratégie d'éco-conception formalisée par l'entreprise sur des bases qui lui sont propres.

Dans le sous-chapitre suivant, nous proposerons une démarche méthodologique qui permet de fixer une stratégie d'éco-conception relative aux appareillages de moyenne tension de AREVA T&D/DRC en se basant sur la politique éco-conception de l'entreprise, les besoins du bureau d'études et l'évaluation environnementale des produits existants. L'objectif sera de guider le concepteur vers des choix plus écologiques à court, moyen et long terme.

2.4. ELABORATION D'UNE METHODOLOGIE D'ECO-CONCEPTION ADAPTEE AUX APPAREILLAGES DE MOYENNE TENSION DE AREVA T&D

Dans les parties précédentes, nous avons mis en avant l'importance de l'éco-conception pour l'industrie et les différentes approches utilisées pour la mettre en pratique. Nous avons également montré la spécificité des appareillages électriques de moyenne tension et le besoin d'une démarche d'éco-conception appropriée. Dans ce chapitre, nous présenterons la démarche suivie pour élaborer une méthodologie d'éco-conception adaptée à l'industrie de la moyenne tension et plus spécifiquement au centre AREVA T&D/DRC.

Etant donné la complexité de la mise en place d'une démarche d'éco-conception dans les projets de conception des appareillages de moyenne tension, nous avons proposé une intégration complète de tous les acteurs participant à la conception de ces produits directement et indirectement : direction, marketing, commercial, achat et bureau d'études. Nous avons associé ces services à notre projet de recherche dès la phase de démarrage.

L'organisation d'une telle démarche permet de créer une synergie de travail autour d'un sujet nouveau et de faire adhérer les différents participants à l'approche environnementale. Nous passons alors d'une approche réactive à une approche participative où la stratégie d'éco-conception de l'entreprise est construite à travers la contribution des différents services. Toutefois, cette démarche se heurte à une difficulté principale qui est due à l'incompatibilité de certaines demandes et propositions des participants avec la stratégie environnementale existante de l'entreprise et les améliorations environnementales possibles des produits. En effet, le manque de connaissances environnementales solides de certaines parties prenantes aux projets de développement, peut les inciter à s'orienter vers des solutions de conception qui paraissent plus écologiques en apparence mais qui ne le sont pas réellement. Nous avons donc construit une démarche qui satisfait à la fois aux besoins de l'équipe de conception, au respect de la stratégie environnementale existante de l'entreprise et qui permet d'améliorer les performances environnementales des produits. Nous avons associé une approche fonctionnelle, une approche environnementale et une approche managériale. Ce choix permet de mettre en adéquation les directives environnementales de l'entreprise avec les projets de conception et les moyens et outils fournis aux concepteurs. Notre démarche est une démarche générale qui peut être utilisée dans différents domaines industriels. Les orientations stratégiques et techniques diffèrent selon l'entreprise et la nature des produits.

Dans la première partie de ce sous-chapitre, nous exposerons les besoins des différents services de l'équipe de conception. Ensuite, nous décrirons la stratégie environnementale existante de AREVA T&D. Enfin, nous analyserons les évaluations environnementales d'un ensemble de produits de moyenne tension. La synthèse de ces trois paramètres constitue notre point de départ dans la construction de notre méthodologie d'éco-conception.

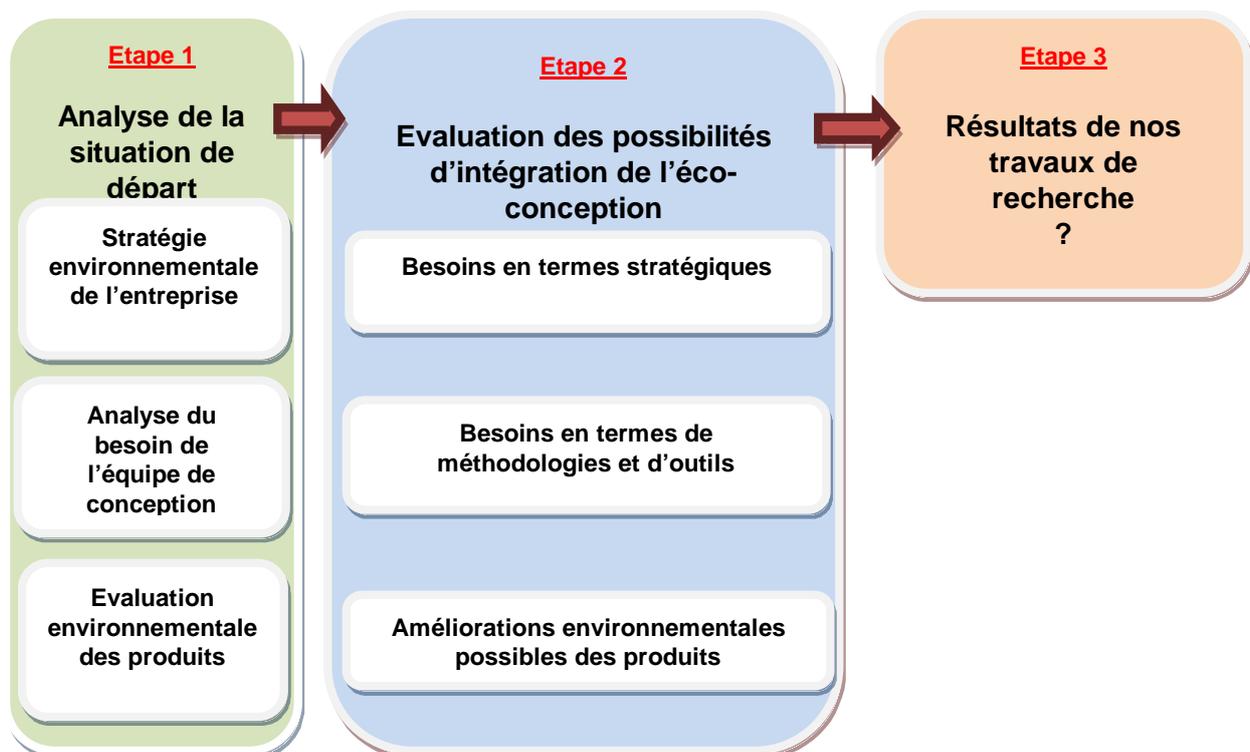


Figure 16. Approche d'élaboration d'une méthodologie d'éco-conception adaptée aux appareillages de moyenne tension

2.4.1. La stratégie d'éco-conception de AREVA T&D

La stratégie d'éco-conception de AREVA T&D s'inscrit dans une démarche globale de développement durable.

AREVA a mis en place une politique de développement durable et a décliné une politique éco-conception et un processus d'amélioration continue appelé AREVA Way. Dans ce paragraphe nous étudions la stratégie d'éco-conception. Pour cela, nous nous appuyons sur les documents de référence de l'entreprise à savoir les guides AREVA Way et AREVA T&D ecodesign road map

2.4.1.1. AREVA Way

AREVA Way est un processus dynamique de progrès continu décliné au travers de dix engagements de développement durable. Déployé depuis 2004 au niveau de chaque entité, il vise à conjuguer rentabilité, respect de l'environnement et responsabilité sociale, les trois piliers d'un développement durable. Les engagements environnementaux font partie de ce processus. AREVA Way comporte deux chapitres, 713 et 734, qui s'intéressent à l'organisation et aux pratiques de l'éco-conception au sein des unités du groupe, l'objectif étant que toutes les unités arrivent au niveau 4 de cette démarche (voir figure 17).

713. Organisation de l'éco-conception	
1	<ul style="list-style-type: none">• Les exigences environnementales réglementaires et contractuelles sont identifiées dès les premières phases des projets de conception ou re-conception (liste de produits interdits ou à éviter, matériaux privilégiés, taux de recyclabilité, niveau de consommation d'énergie...).• Il existe des acteurs identifiés qui assurent la transmission de ces exigences aux équipes de conception.
2	<ul style="list-style-type: none">• L'entité est organisée pour que les exigences environnementales sur l'ensemble des étapes du cycle de vie des produits soient intégrées dans les projets de conception ou re-conception.• Les fonctions concernées (marketing, santé, sécurité, achat, juridique, exploitation...) sont associées dans le cadre de groupes de travail spécifiques.• Les principaux acteurs de ces groupes de travail sont formés à l'éco-conception.
3	<ul style="list-style-type: none">• Les revues de conception intègrent un examen systématique du volet environnemental à des étapes préalablement identifiées.• Les résultats de la revue de conception sont évalués par rapport aux objectifs fixés dans le plan d'éco-conception (plan d'améliorations environnementales spécifiques à une gamme de produits).• Les résultats servent à améliorer la démarche et les méthodes d'eco-conception.
4	<ul style="list-style-type: none">• Les parties prenantes reconnaissent la démarche d'amélioration de la performance environnementale des produits de l'entité.

734. Pratiques de l'éco-conception	
1	<ul style="list-style-type: none"> • L'entité adapte les caractéristiques de ses produits en fonction des écarts aux réglementations applicables. • L'entité connaît la performance environnementale de ses produits ou gammes de produits et les enjeux environnementaux de sa filière professionnelle.
2	<ul style="list-style-type: none"> • L'entité met en œuvre un outil d'évaluation environnementale pour des nouveaux produits (Analyse du Cycle de Vie - ISO 14040). • Des plans d'éco-conception cohérents avec le modèle groupe sont systématiquement appliqués aux nouveaux produits.
3	<ul style="list-style-type: none"> • L'entité applique systématiquement un outil d'évaluation environnementale de ses produits (Analyse du Cycle de Vie - ISO 14040). • Les performances environnementales des nouveaux produits commercialisés sont améliorées conformément aux objectifs du plan d'éco-conception.
4	<ul style="list-style-type: none"> • L'entité est capable de valoriser ses efforts sur les performances environnementales de ses produits vis-à-vis de ses clients. • Les performances environnementales des produits commercialisés permettent à l'entité d'assurer durablement son leadership sur le marché.

Figure 17. Chapitres 713 et 734 du manuel de AREVA Way

2.4.1.2. La politique d'éco-conception de AREVA T&D/DRC

Le centre DRC de AREVA T&D applique la politique d'éco-conception de AREVA T&D. Cette politique se base sur le respect des réglementations et des normes en vigueur et vise à améliorer la qualité environnementale des produits. L'approche du pôle T&D de AREVA est une approche cycle de vie qui prend en considération toutes les phases du cycle de vie et tous les impacts environnementaux. Elle ne donne pas de voies de travail privilégiées. Cette politique est développée à travers une feuille de route (ecodesign roadmap : annexe 2) qui reprend les différentes étapes du cycle de vie du produit et concerne tous les acteurs liés au développement, à la fabrication, commercialisation et traitement en fin de vie. Ce guide permet à la fois d'évaluer le niveau d'intégration de l'éco-conception et de donner des objectifs quantitatifs à court et à moyen terme. Il contient onze rubriques portant sur les thèmes suivants :

- L'implication de la direction
- L'intégration de l'éco-conception dans la conception
- La formation
- La sélection des matériaux et des procédés de fabrication
- La gestion de la fin de vie
- La gestion des gaz à effet de serre
- L'évaluation environnementale des produits
- L'implication des fournisseurs
- La prise en compte de toutes les phases du cycle de vie

Dans le cadre de notre travail de recherche nous nous sommes penchés sur la problématique de simplification de cette démarche sur une catégorie spécifique des appareillages développés par AREVA T&D au sein du centre DRC.

2.4.1.3. Conclusion

Il apparait clairement que le volet éco-conception fait partie intégrante de la politique de développement durable de AREVA. La politique environnementale du groupe et les chapitres liés à l'éco-conception ne donnent pas une orientation précise sur les priorités environnementales liées au produit. Il est néanmoins possible de constater que l'accent est mis sur le respect de la réglementation, le choix des matériaux et la consommation de l'énergie. Nous nous baserons sur cette politique générale pour proposer une stratégie spécifique pour les appareillages de moyenne tension. Comme nous l'avons mentionné, il est important d'évaluer les produits existants afin de déterminer les voies d'amélioration possibles et d'orienter les concepteurs vers des choix plus écologiques. Dans le paragraphe suivant nous présenterons les résultats des analyses de cycle de vie réalisées sur un ensemble d'appareillages électriques de moyenne tension (disjoncteurs, transformateurs, interrupteurs, parafoudres, ...).

2.4.2. Etude du besoin des acteurs de la branche moyenne tension de AREVA T&D/DRC en matière d'éco-conception

Dans ce paragraphe nous étudions les besoins des différents acteurs de l'équipe de conception impliqués dans les projets de développement des produits de moyenne tension, à savoir : le bureau d'études, le service commercial, le service marketing et le service achats. L'analyse du besoin de l'équipe de conception permet de comprendre la démarche de conception utilisée dans le développement des produits d'un secteur industriel bien déterminé. Il s'agit de décortiquer le cheminement de la chaîne de création et de déterminer les possibilités d'intégration des paramètres environnementaux. Il faut également étudier les outils de conception et éventuellement d'éco-conception mis en place. Par ailleurs, il a été primordial d'intégrer une équipe de conception pour suivre les processus de développement d'un produit du début à la fin. Cela permet aussi de comprendre le fonctionnement des différentes compétences de cette équipe, leurs rôles et les voies de communication entre elles.

D'après BULLINGER (1994), les principaux problèmes ainsi rencontrés par une équipe de conception sont les suivants :

Matériaux	<ul style="list-style-type: none"> ■ Insuffisance de données environnementales sur les matières premières et les matériaux recyclés
Procédés	<ul style="list-style-type: none"> ■ Manque ou insuffisance d'informations sur les procédés de désassemblage, de recyclage et de fin de vie
Produit	<ul style="list-style-type: none"> ■ Re-conception orientée environnement impossible ■ Spécifications strictes du client ■ Degré de liberté du concepteur très faible ■ Suppression de substances toxiques impossible
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> ■ Accroissement des coûts dû aux mesures de protection environnementale
Organisation	<ul style="list-style-type: none"> ■ Adaptation difficile des procédés et des structures du département de conception ■ Manque de normes et de guidelines
Méthodes	<ul style="list-style-type: none"> ■ Manque de méthodes d'évaluation et d'outils ■ Pas de lien avec la CAO et les bases de données (classiques) ■ Aucune règle établie

Tableau 6. Problèmes rencontrés par les équipes de conception = risques de compromission du projet.

Source: "Methods and Tools to Support Design for Recycling", BULLINGER H-J. 1994.

2.4.2.1. Le besoin du service commercial

En terme commercial, toute amélioration apportée au produit peut contribuer à l'augmentation de la vente. Toutefois, il est essentiel de prendre en considération deux paramètres importants : satisfaire le cahier des charges du client et ne pas augmenter le coût de revient du produit, autrement dit son prix de vente. En effet, l'argument écologique n'est pas encore vendeur dans le domaine des appareillages de moyenne tension. Les clients ne sont pas encore demandeurs de produits écologiques mais certains demandent des informations supplémentaires sur les performances environnementales et plus spécialement sur la gestion de la fin de vie. Par ailleurs, aucune obligation réglementaire ne s'applique à cette catégorie d'équipements électriques et le prix de vente actuel n'inclut pas le coût de la gestion du produit en fin de vie. Néanmoins, à prix égal, un appareil écologique se vendrait mieux qu'un appareil polluant. Le service commercial n'est pas demandeur de produits éco-conçus ou d'améliorations environnementales particulières. Il est cependant intéressé par les outils de communication qui permettent de présenter d'une manière simplifiée les données environnementales relatives aux produits. Nous pensons que le service commercial jouera un rôle plus important dans le futur compte tenu du durcissement des réglementations et l'attention croissante portée par les clients à la problématique environnementale.

2.4.2.2. Le besoin du service marketing

Le rôle du service marketing consiste à orienter les projets de développement de nouveaux produits vers les besoins du marché, à suivre l'évolution technologique de la concurrence et à communiquer sur les caractéristiques des produits en catalogue ou en développement. Les marketeurs sondent les évolutions technologiques et économiques et prennent des décisions stratégiques pour l'entreprise.

Actuellement, le service marketing encourage à concevoir des produits plus écologiques avec, comme principale orientation stratégique, la réduction des émissions des gaz à effet de serre du produit. Cela est lié à la stratégie globale du groupe AREVA qui revendique une énergie électrique sans CO2. Par ailleurs, ce service s'intéresse, comme le service commercial, aux outils de communication environnementale qui lui permettent de mieux présenter les avantages écologiques des produits.

2.4.2.3. Le besoin du service d'achat

Ce service est la première source d'approvisionnement de l'entreprise. Nous pensons que sa participation à la mise en place d'une démarche d'éco-conception est primordiale : il ne nous paraît pas possible de concevoir un produit écologique si les composants de ce produit sont fabriqués dans le non respect de l'environnement. Les acheteurs ont donc besoin d'outils adaptés pour l'évaluation environnementale des fournisseurs et d'un cahier des charges environnemental pour l'achat des produits finis. De plus, ils demandent d'intégrer les projets de conception dès le début afin d'anticiper les nouvelles demandes en technologies propres. Le service achat requiert donc d'être tenu informé sur les évolutions technologiques et réglementaires afin de mettre à jour sa liste de fournisseurs. Notons que la majeure partie de la conception est réalisée en interne chez AREVA et de ce fait, il n'existe pas beaucoup d'implication des fournisseurs dans la phase de conception.

2.4.2.4. La demande du bureau d'études

Le bureau d'études est certainement l'acteur le plus influant sur la qualité environnementale du produit. Il prend toutes les décisions concernant la conception : choix de l'architecture, des matériaux, des assemblages, etc. Afin d'évaluer ses besoins et de comprendre ses attentes, nous avons organisé des séances de réflexion avec un ensemble de concepteurs et de responsables de projets de développement. Nous avons alors posé les questions suivantes :

- Quel est le niveau actuel d'intégration de l'environnement dans la conception ?
- Quelles sont les connaissances en éco-conception de l'équipe de conception ?
- Quels sont les critères environnementaux à intégrer dans la conception ?
- Comment intégrer le paramètre environnemental dans la conception des nouveaux produits ?
- Quels sont les outils nécessaires pour l'aide à l'éco-conception ?

Nous avons constaté que le bureau d'étude n'intégrait aucun paramètre environnemental dans la conception des nouveaux produits et n'utilisait aucun outil d'éco-conception.

Il apparaît également que seuls quelques concepteurs ont reçu une formation de sensibilisation en éco-conception et qu'aucun d'entre eux n'a suivi une formation spécialisée dans le domaine. Le bureau d'études était alors incapable de proposer des critères environnementaux à prendre en considération lors de la conception des nouveaux produits. Néanmoins, les concepteurs sont demandeurs d'outils adaptés d'aide à l'éco-conception.

Le traitement de nos échanges avec le personnel du bureau d'étude, nous montre distinctement qu'il faut prendre en considération les critères suivants pour la réussite d'une démarche d'éco-conception :

- Avoir un apprentissage rapide adapté au niveau de compétences du personnel
- Assurer une application facile
- Fournir des résultats concrets et faciles à assimiler
- Garantir une communication et un échange faciles
- Ne pas engendrer un coût supplémentaire important sur les projets de conception et sur les produits.
- Ne pas nécessiter d'importantes ressources matérielles
- Etre cohérent avec le processus et les outils existants
- Etre facile à mettre à jour

Nous pensons que pour répondre aux besoins des concepteurs, il faut agir en trois étapes. D'abord, améliorer leur niveau de connaissances environnementales. Ensuite, intégrer des paramètres environnementaux dans le processus de conception utilisé. Et enfin, leur fournir des outils appropriés d'aide à l'éco-conception et les accompagner dans l'utilisation de ces outils.

2.4.2.5. Conclusion

Le travail d'investigation que nous avons entrepris avec les différents acteurs de la conception, nous a permis d'évaluer leur niveau de connaissances environnementales, leurs besoins et de prendre en considération leurs propositions. Tous les acteurs sont concernés par cette démarche mais il apparaît clairement que le bureau d'études est l'acteur technique le plus influant dans la chaîne de conception et plus particulièrement le concepteur qui se trouve habituellement en fin de chaîne.

Nous défendons le fait que notre approche d'éco-conception développe un système de management environnemental de la conception basé sur le concepteur. Nous pensons qu'il n'est pas possible de fixer des objectifs environnementaux ambitieux sans que le concepteur n'y adhère et sans lui fournir la formation, l'information et les outils nécessaires pour les mettre en application. Nous allons construire une démarche d'éco-conception simplifiée qui s'adapte aux besoins et au niveau de formation environnementale du concepteur. Toutefois, nous avons tenu compte des demandes et des réflexions de tous les services (achat, marketing, commercial, etc.) afin de créer un système unique qui réponde aux différentes attentes.

2.4.3.L'évaluation environnementale des produits existants

Nous allons identifier et quantifier les impacts sur l'environnement de ces produits afin de déterminer les sources de pollution et donc de mesurer les marges d'amélioration environnementale. L'évaluation des performances environnementales se base sur des analyses de cycle de vie de produits représentatifs de plusieurs catégories d'appareillages de moyenne tension.

2.4.3.1. Analyses de cycles de vie de produits de moyenne tension de AREVA

Nous avons réalisé des analyses de cycle de vie d'un ensemble de produits de moyenne tension de AREVA. Ces ACV nous ont permis de déterminer la tendance générale de la pollution engendrée par cette catégorie de produits en termes de répartitions de pollution entre les différentes phases de cycle de vie et les indicateurs d'impacts environnementaux. Pour ce faire nous avons utilisé le logiciel SIMAPRO version 7.1 et la méthode EDIP/UMIP97 qui est la méthode de référence de AREVA T&D.

Hypothèses d'entrée :

- Ne sont pas considérés
 - ✓ les phases de transport intermédiaires dans la chaîne d'approvisionnement
 - ✓ les contraintes géographiques liées à la fabrication. Les produits étudiés sont fabriqués en France.
- Les inventaires proviennent des bases de données conventionnelles, essentiellement, ECOINVENT et IDEMAT et des données collectées à partir des sites de fabrication de AREVA T&D et de ses fournisseurs.
- La fabrication et le traitement en fin de vie sont calculés sur une base énergétique française.
- Les calculs effectués pour la gestion de la fin de vie des produits sont basés sur les connaissances actuelles et les données disponibles au moment de la réalisation de notre projet. Nous estimons que ces données peuvent changer dans le sens d'une meilleure valorisation du produit en fin de vie étant donnée la tendance générale dans ce domaine : réglementation plus strictes, prix croissant des matériaux, techniques de recyclage sophistiquées, demande grandissante du marché, etc.

ACV d'un disjoncteur à coupure dans le SF6

Caractéristiques techniques	
Tension nominale	27 kV
Courant nominal	3000 A
Courant de court-circuit	50 kA

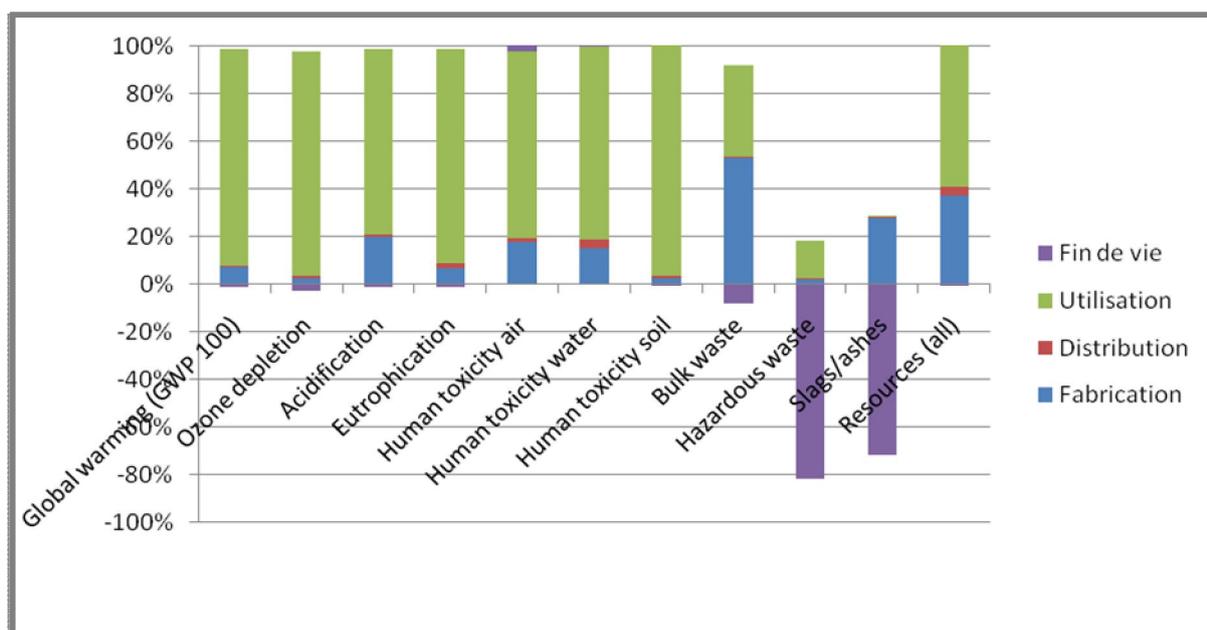


Figure 18. ACV d'un disjoncteur à coupure dans le SF6

L'ACV du disjoncteur à coupure dans le SF6 montre une prédominance de la phase d'utilisation sur l'ensemble des indicateurs environnementaux : effet de serre, destruction de la couche d'ozone, acidification, eutrophication, toxicités humaines de l'air, de l'eau et du sol, déchets dangereux et épuisement des ressources naturelles. La phase de fabrication engendre plus de pollution relative aux déchets encombrants et aux déchets de cendres. La phase de distribution ne présente qu'un impact très faible par rapport aux autres phases du cycle de vie et ce, au niveau de tous les indicateurs environnementaux. La phase de fin de vie présente un impact légèrement équivalent à celui de la phase de distribution au niveau de la toxicité humaine de l'air. Sinon, elle présente des impacts « positifs » partout ailleurs et plus particulièrement au niveau des indicateurs relatifs aux déchets : déchets encombrants, déchets dangereux et déchets de cendres. En effet, ces impacts évités sont dus à la part de valorisation du produit en fin de vie.

ACV d'un disjoncteur isolé dans l'air

Caractéristiques techniques	
Tension nominale	12 kV
Courant nominal	2500 A
Courant de court-circuit	40 kA

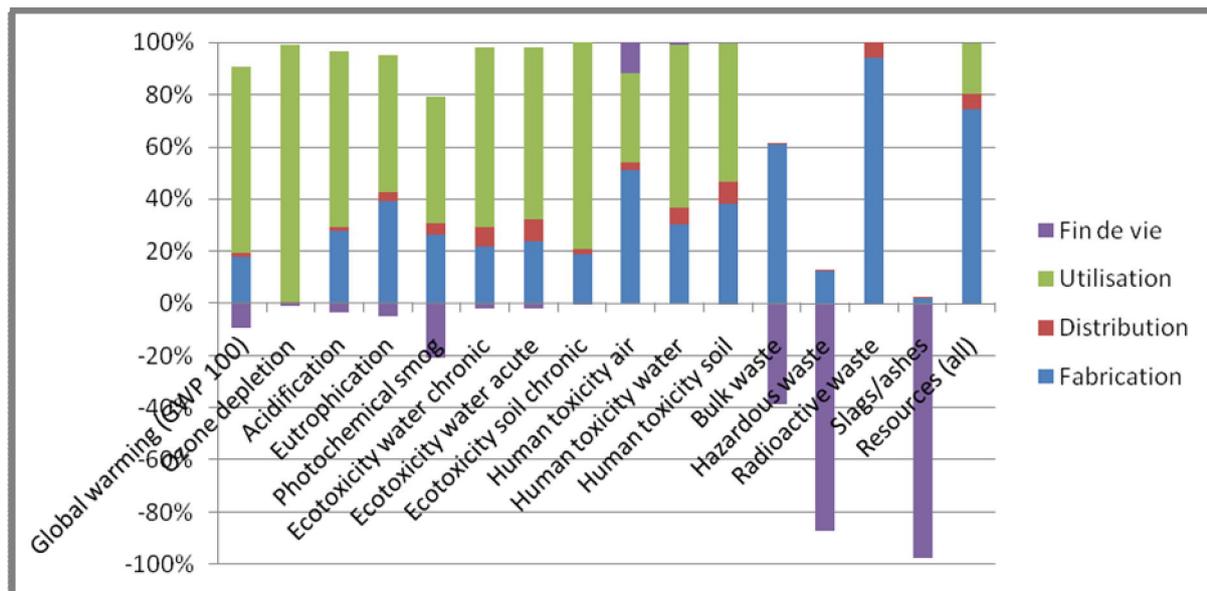


Figure 19. ACV d'un disjoncteur isolé dans l'air

L'ACV du disjoncteur isolé dans l'air montre une prédominance de la phase d'utilisation sur l'ensemble des indicateurs environnementaux : effet de serre, destruction de la couche d'ozone, acidification, eutrophication, brume photochimique, écotoxicité de l'eau et du sol et toxicité humaine de l'eau et du sol. La phase de fabrication manifeste plus de pollution relative à la toxicité humaine de l'air, aux déchets encombrants et radioactifs et aux ressources naturelles. La phase de distribution ne présente qu'un impact très faible par rapport aux autres phases du cycle de vie et ce, au niveau de tous les indicateurs environnementaux. La phase de fin de vie présente un impact supérieur à celui de la phase de distribution au niveau de la toxicité humaine de l'air. Sinon, elle présente des impacts « positifs » partout ailleurs et plus particulièrement au niveau des indicateurs relatifs aux déchets.

ACV d'un parafoudre

Caractéristiques techniques	
Tension nominale	24 kV
Courant nominal	5000 A

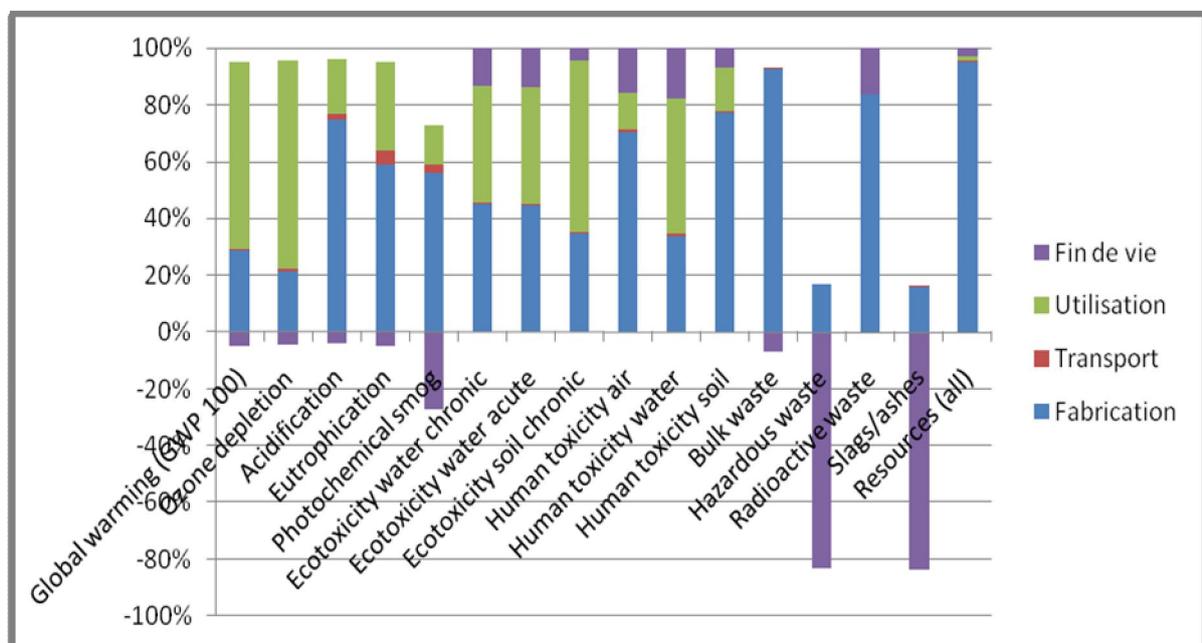


Figure 20. ACV d'un parafoudre

Ce produit présente des impacts environnementaux importants de la phase de fabrication associés à l'acidification, l'eutrophication, la brume photochimique, la toxicité humaine de l'air et du sol, aux déchets et aux ressources. La phase de distribution présente des impacts négligeables par rapport aux autres phases du cycle de vie. La phase d'utilisation présente des impacts importants au niveau de l'effet de serre, de la destruction de la couche d'ozone et la toxicité humaine de l'eau. Sinon, elle montre des niveaux d'éco-toxicité de l'eau équivalents. La phase de fin de vie présente des impacts négatifs au niveau des indicateurs de toxicité et des déchets radioactifs.

ACV d'un transformateur

Caractéristiques techniques	
Puissance	630 kVA
Primaire	20 kVA
Secondaire	400 V

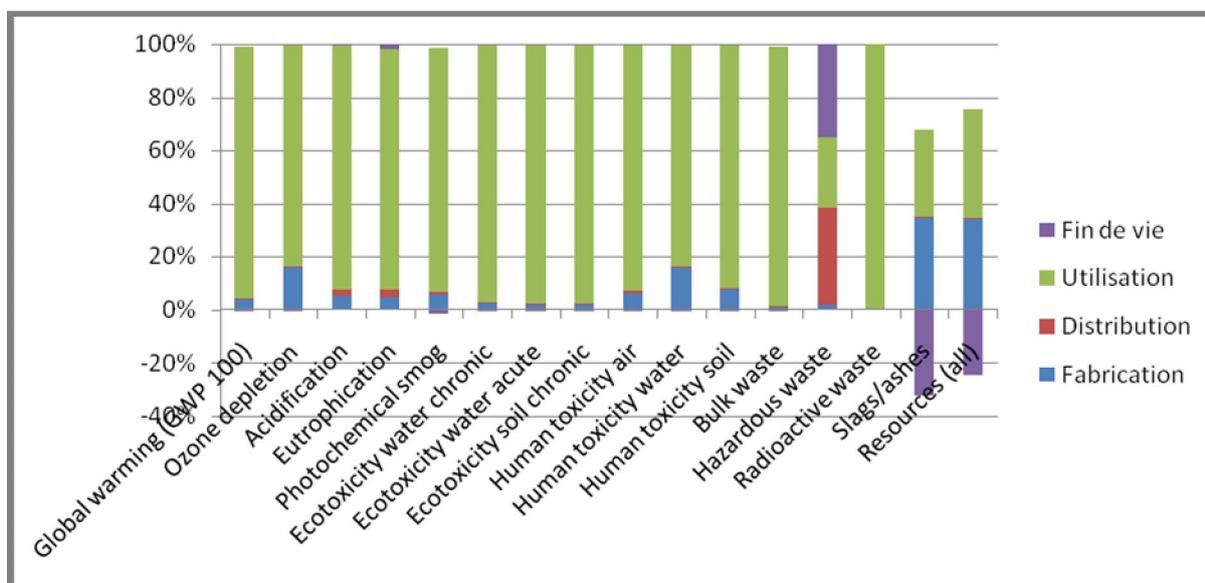


Figure 21. ACV d'un transformateur

La phase d'utilisation est prédominante dans ce produit. La phase de distribution apparaît comme négligeable sauf pour l'indicateur de déchets dangereux. Ce résultat nous paraît incohérent avec la taille du produit. Aussi, les impacts de la phase de fabrication ne se manifestent qu'au niveau des indicateurs de cendres et de ressources. La phase de fin de vie ne présente un impact négatif visible qu'au niveau des déchets dangereux. Sinon, elle affiche un impact « positif » au niveau des indicateurs : cendres et ressources.

ACV d'un interrupteur de caténaire

Caractéristiques techniques	
Tension nominale	38 kV
Courant nominal	2000 A
Courant de court-circuit	40 kA

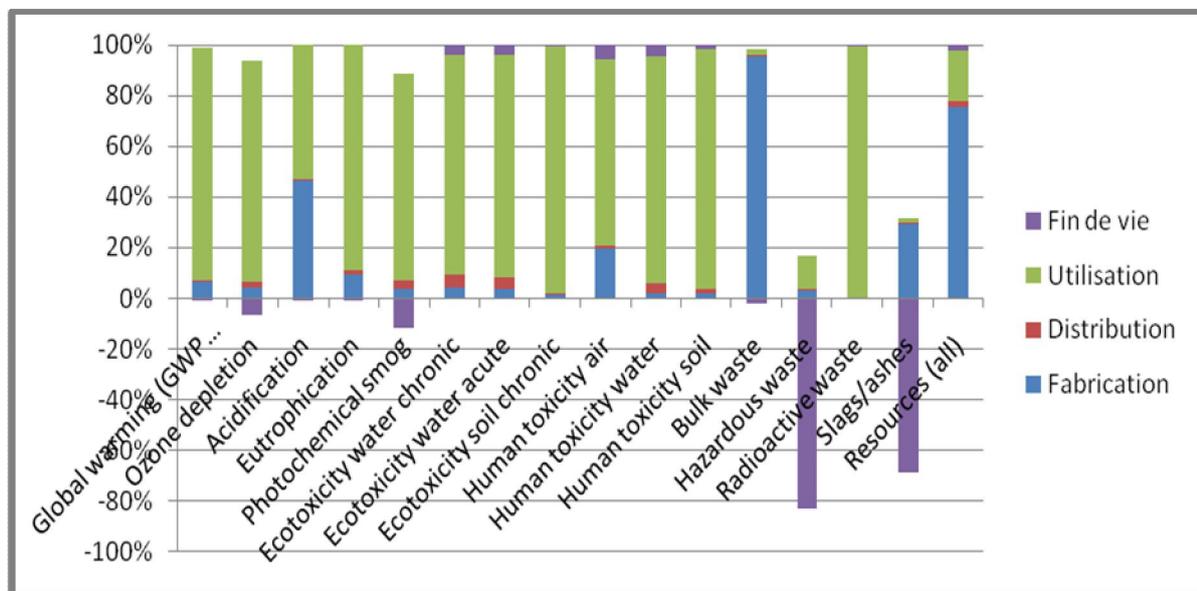


Figure 22. ACV d'un interrupteur de caténaire

La phase de fabrication ne présente un impact environnemental visible qu'au niveau des indicateurs : acidification, déchets encombrants et ressources. Tous les autres indicateurs sont prédominés par les impacts environnementaux de la phase d'utilisation sauf les indicateurs déchets dangereux et cendres qui montrent des impacts « évités » par la phase de fin de vie.

2.4.3.2. Conclusion

Cette étude nous a permis d'analyser le potentiel et la distribution des impacts environnementaux durant le cycle de vie d'un groupe représentatif de produits de moyenne tension. La synthèse de ces résultats montre une quasi monopolisation des impacts par la phase d'utilisation suivie de la phase de fabrication et puis de la phase de fin de vie et de distribution. Cela est principalement dû à la consommation de l'énergie électrique sur la durée de vie supérieure à 20 ans. Il y apparaît, aussi que la phase de fin de vie présente des impacts environnementaux variables selon le produit. Ceci est principalement dû à la nature des matériaux utilisés et à l'architecture du produit. Dans certains cas, cette phase participe d'une manière positive à réduire les impacts environnementaux. Il s'agit de la pollution évitée par la valorisation du produit. Toutefois, nous constatons que les tendances générales des impacts restent similaires.

2.4.4.Synthèse environnementale des appareillages de moyenne tension

L'interprétation des résultats des ACV des appareillages de moyenne tension s'avère insuffisante pour déterminer les principales sources de pollution de ces produits. Nous avons donc appuyé notre analyse sur les flux d'entrée/sortie et notre connaissance des matériaux et procédés utilisés pour la fabrication de ces appareillages. En effet, les méthodes de calculs utilisées dans les logiciels d'ACV ne considèrent pas toutes les substances utilisées ou émises le long du cycle de vie d'un produit, ce qui peut modifier considérablement les résultats des ACV. Ainsi, nous avons essayé d'utiliser différentes méthodes d'agrégation des impacts (score unique) mais nous avons constaté qu'aucune d'elles ne prend en compte tous les impacts réels des produits. Dans la suite de ce paragraphe nous présentons les sources potentielles d'impacts environnementaux de chaque phase du cycle de vie.

2.4.4.1. Phase de fabrication

Dans notre étude, nous avons intégré l'extraction, le raffinage et la transformation des matières premières en produits finis ou semis produits. Cette phase est la plus complexe du cycle de vie par ce qu'elle fait intervenir un grand nombre de variables avec une incertitude importante. Les impacts sur l'environnement varient considérablement selon les produits et le cadre spatio-temporel. Cela dépend également du design, des choix des matériaux et des procédés de fabrication. Il est évident que, la maîtrise des impacts de cette phase des impacts sur l'environnement est très influente sur les performances environnementales du produit.

Etant donné le manque de données appropriées relatives aux procédés de fabrication spécifiques des appareillages de moyenne tension, nous avons élaboré une base de données complémentaire aux bases de données conventionnelles. Nous y reviendrons plus en détail dans le chapitre 5.

L'étude des analyses de cycle de vie des produits de moyenne tension ne montre pas d'impacts environnementaux dominants. Il s'avère donc difficile de pondérer ces impacts à partir de ces ACV. Toutefois, nous retrouvons une distribution relativement similaire entre les différents produits à savoir une prédominance prévisible des impacts de la phase d'utilisation suivis par les impacts de la phase de fabrication. Cela est nécessairement dû à la différence de dimensions qui va de quelques centimètres et quelques kilogrammes à quelques mètres et quelques centaines de kilogrammes. Il est peut être plus judicieux de comparer des kilogrammes de produits mais cet exercice ne répond pas à notre besoin qui consiste à déterminer les sources d'impacts potentielles de ces produits.

Nous nous appuyons sur les données d'entrée/sortie des ACV pour déterminer les impacts environnementaux majeurs durant la phase de fabrication. Cela nous a permis de confirmer qu'ils proviennent essentiellement de :

- substances toxiques contenues dans les produits synthétiques tels que les polymères, les gaz et les huiles et les traitements chimiques tels les traitements de surface ;

- gaz à effet de serre utilisés dans l'isolation diélectrique (particulièrement le SF6) ;
- la consommation d'énergie des installations de fabrication : usinage, soudure, traitement de surface, fours, etc. ;
- déchets de fabrication tels que les rebus de céramiques, de métaux et de plastiques.

Nous retiendrons la nécessité d'introduction de ces sources de pollution dans l'évaluation environnementale de produits de moyenne tension (confère chapitre 4).

2.4.4.2. Phase de distribution

Nous constatons que l'impact sur l'environnement de la phase de distribution n'est pas significatif par rapport à l'ensemble du cycle de vie. De plus, il est difficile d'intégrer la logistique dans le procédé d'éco-conception pour des quantités de produits qui peuvent varier d'une à plusieurs dizaines d'unités. Cependant, il est important de préparer des instructions spécifiques pour l'optimisation de l'emballage (choix des matériaux et des dimensions) et des modes de transport.

L'emballage ne constitue pas une part importante des produits de moyenne tension. La plupart des produits est emballée par des films de polyester et du polystyrène dans des caissons en bois et transportée sur des palettes. Les caissons et les palettes ne sont pas retournés à l'usine de fabrication. Ils peuvent être réutilisés, recyclés ou incinérés.

Le transport local se fait essentiellement par voie routière. Le transport « longues distances » se fait par voie maritime. Le transport aérien est pratiqué occasionnellement.

2.4.4.3. Phase d'utilisation

Comme prévisible, il apparaît que la phase d'utilisation est la phase la plus polluante du cycle de vie. En effet, ceci est principalement dû à la consommation électrique par perte par effet joule durant la durée de vie du produit (>20ans). La perte par effet joule (P) est liée à l'intensité du courant sur le réseau électrique (I) et à la résistance de l'appareillage de réseau (R).

$$P=R.I^2$$

Où $R=R_o.L/S$ (R_o : résistivité, L : longueur du conducteur et S : section du conducteur). Donc, pour réduire la résistance d'un conducteur il faut réduire la longueur et augmenter la section. La longueur du conducteur est généralement imposée par les contraintes extérieures aux produits. Augmenter la section revient à augmenter la quantité de métal utilisé. Par exemple, pour un conducteur en cuivre de 1 m et de section 0,01 m², $R= 17^E-9.1/0,01=1,7 \mu\Omega$. Réduire de 10 % la résistance de ce conducteur revient à augmenter sa section à 0,0011 m². Ce qui induit une augmentation de sa masse de 8,9 kg à 9,88 kg.

L'intensité du courant électrique varie de quelques centaines à quelques milliers d'ampères et la résistance des appareils est généralement de quelques micro ohms ($\mu\Omega$), d'où la faible marge de manœuvre de réduction de la consommation électrique des appareillages de moyenne tension.

L'étude de l'état de l'art technique montre que les solutions existantes présentent de très faibles possibilités d'amélioration et ne sont pas économiquement viables à ce jour.

A titre d'exemple, la consommation électrique d'un disjoncteur moyen de moyenne tension de résistance $30 \mu\Omega$ et traversé par un courant de 1250 A présente une perte par effet joule sur 20 ans égale à :

$$P = 1250^2(\text{A}) \cdot 30 \text{ E-}6(\Omega) \cdot 24(\text{h}) \cdot 365(\text{jour}) \cdot 20(\text{ans}) = \mathbf{8,21 \text{ MWh}}$$

Le coût estimé de la perte par effet joule sur la durée de vie de ce disjoncteur est de 266 € ($32,4 \text{ €} \times 8,21 \text{ MWh}$). Ce calcul est basé sur le coût moyen de production de l'électricité en France en 2007 « références tarifaires de l'observatoire français de l'énergie ». Ce coût apparaît comme très faible comparé au coût d'acquisition du disjoncteur qui est de 5000 €.

Par ailleurs, d'autres phénomènes peuvent apparaître durant la même phase, notamment des fuites du gaz à effet de serre « SF6 » et des rayonnements X. Toutefois, il faut noter que cette consommation énergétique est très faible de même que pour les émissions de SF6 ($<1 \text{ g/an/appareil}$). La réduction de la consommation énergétique de ces appareillages est au cœur des préoccupations de l'industrie électrique de moyenne tension. Des progrès très importants sont réalisés mais les voies d'amélioration sont limitées compte tenu des niveaux de tension et de courant élevés qui traversent l'appareil. Les fuites de SF6 restent très faibles ne dépassant pas 0.1 %/an de la quantité initiale et les rayonnements X sont très largement maîtrisés et en dessous des seuils de danger.

La majorité des appareillages de moyenne tension ne requiert pas de maintenance, nous soumettons l'hypothèse qu'aucun déchet direct ne sera émis au cours de la période d'utilisation de ces produits.

Les impacts environnementaux durant la phase d'utilisation sont calculés sur la base d'une installation en France dont la source principale d'électricité est l'énergie nucléaire. C'est pour cela que nous estimons qu'il faut faire un réajustement selon la localisation géographique des installations.

2.4.4.4. Phase de fin de vie

Il s'avère très difficile de prévoir la gestion de fin de vie des produits de moyenne tension en raison des contraintes technico-économiques, géographiques et temporaires:

- Une durée de vie > 20 ans.
- L'évolution technologique
- L'évaluation des coûts de gestion de fin de vie
- La récupération du produit en fin de vie (large périmètre de distribution)

Toutefois, les problématiques environnementales de la phase de fin de vie que nous avons intégrées dans notre étude sont liées à :

- La présence de polluants tels que les gaz, les huiles, les traitements de surface, les peintures, ...

- La présence de matériaux non recyclables tels que les céramiques, les résines thermodurcissables,...
- La logistique de collecte et de transport.

Nous retiendrons que les principaux impacts environnementaux en fin de vie sont associés à la toxicité, à la consommation d'énergie, à l'effet de serre et à la valorisation de la matière (confère chapitre 4).

La modélisation des impacts environnementaux en fin de vie dépend des matériaux utilisés mais surtout du mode de désassemblage et de valorisation suivi. Nous avons alors élaboré une méthodologie générale de gestion de fin de vie des appareillages électriques de moyenne tension. Cette méthodologie se base à la fois sur des études théoriques et expérimentales réalisées en interne et par des prestataires extérieurs. Pour l'ensemble des produits présentés, nous avons étudié les scénarios de démantèlement et de valorisation selon des critères économiques et techniques. Parallèlement, nous avons demandé à des démolisseurs d'équipements électriques et électroniques de démonter les produits, de décrire le scénario de démontage suivi et d'évaluer les difficultés et les risques liés au démontage, le temps et le coût de l'opération, le bilan et la destination des matériaux ainsi que la valeur de rachat (voir annexe 4).

2.4.4.5. Synthèse des évaluations environnementales

La synthèse des évaluations environnementales des appareillages de moyenne tension montre une grande disparité entre les impacts sur l'environnement des différentes phases du cycle de vie mais une concordance entre les différents produits. En effet, la phase d'utilisation apparaît comme la phase la plus polluante, suivie des phases de fabrication, de fin de vie et de distribution.

L'impact principal est dû à la consommation électrique sur une durée de vie supérieure à 20 ans. La réduction de la consommation électrique est au cœur du métier de l'électricité moyenne tension. Des évolutions techniques considérables sont réalisées dans ce domaine mais il s'avère que les marges d'amélioration sont réduites dans l'état actuel de l'évolution technique. La phase de distribution ayant un faible impact sur l'environnement et étant bien maîtrisée, peut être négligée par rapport à l'ensemble du cycle de vie.

Notre approche se base sur le principe de l'amélioration environnementale la plus rapide correspondant à l'état actuel des produits. L'hypothèse que nous admettons est la suivante : « nous focalisons les améliorations environnementales non seulement sur les impacts importants durant le cycle de vie mais surtout sur les axes d'amélioration qui ont été moins pris en compte dans la conception du produit ». Cette démarche est évolutive puisque ces axes de travail sont révisables selon l'évolution de la conception du produit. Ainsi, l'optimisation de l'impact environnemental durant la phase d'utilisation reste très importante mais le travail effectué jusqu'à maintenant est beaucoup plus avancé sur ce sujet que sur les autres paramètres tels que la réduction des matières premières ou l'amélioration de la démontabilité et du recyclage. Nous confirmons que le choix de ne pas considérer la phase d'utilisation correspond à notre vision industrielle des produits développés au sein du bureau d'étude AREVA T&D/DRC.

Dans la suite de notre travail nous admettrons qu'une forte marge d'amélioration environnementale des produits de moyenne tension est directement liée à la réduction de la pollution engendrée par la fabrication et par le traitement de la fin de vie. Aussi, nous défendons le fait que ces deux phases sont directement liées par le choix des matériaux et l'architecture du produit. Nous considérons que la phase de fin de vie est équivalente à une nouvelle phase de fabrication. En effet, elle admet les mêmes contraintes que la phase de fabrication « primaire » à savoir des matériaux en entrée et des produits en sortie avec au milieu des procédés industriels et des déchets. Nous traiterons plus en détail cette approche dans le chapitre 4.

2.5. CONCLUSION

L'étude de la stratégie de l'entreprise, la synthèse des évaluations environnementales des appareillages de moyenne tension et l'analyse des besoins de l'équipe de conception nous ont permis de déterminer les contraintes à prendre en compte dans notre démarche d'éco-conception.

Les résultats de nos travaux de recherche reposent sur trois actions principales, à savoir :

- Proposer une stratégie environnementale produit pour les équipements de moyenne tension,
- Intégrer le paramètre environnemental dans le processus de conception existant,
- Développer et mettre en place les outils nécessaires à la communication, à l'évaluation et à l'amélioration des performances environnementales.

La figure 23 résume notre approche pour la création et la mise en place d'une démarche d'éco-conception spécifique aux appareillages de moyenne tension. A partir de l'analyse de la situation de départ, nous avons identifié les possibilités d'intégration de l'éco-conception dans ces produits et les pistes d'amélioration environnementale. La troisième partie présente le résultat de nos travaux de recherche en réponse aux besoins identifiés.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons notre proposition pour l'intégration de l'éco-conception dans le processus de conception des appareillages de moyenne tension de AREVA T&D/DRC. A l'issue de ce chapitre nous présenterons les modifications effectives apportées à l'approche de conception existante et les possibilités d'amélioration possibles.



Figure 23. Présentation de notre démarche d'éco-conception

**CHAPITRE 3 : INTEGRATION DE L'ECO-
CONCEPTION DANS LE PROCESSUS DE
CONCEPTION DES APPAREILLAGES DE
MOYENNE TENSION**

3. CHAPITRE 3 : INTEGRATION DE L'ECO-CONCEPTION DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION DES APPAREILLAGES DE MOYENNE TENSION

"Définir une méthodologie de conception garantissant la conformité du produit aux exigences spécifiées au meilleur coût de production et conforme à la politique de développement durable du groupe" (AREVAT&D, 2005).

3.1. INTRODUCTION

La conception d'un produit industriel apporte une réponse aux besoins exprimés sous forme d'un cahier des charges formalisé à la suite d'une demande client ou du service marketing, après analyse du potentiel de marché. La re-conception peut intervenir pour apporter des modifications partielles ou générales sur un produit existant pour en améliorer les performances, la qualité ou pour l'adapter à une utilisation particulière non prévue dans le dossier de définition initial. Le processus de conception fait intervenir un ensemble de compétences nécessaires (ingénierie, finance, marketing, environnement, achat) pour le développement du produit. La difficulté consiste à satisfaire toutes les exigences souhaitées par ces corps de métiers. Couramment, l'exemple rencontré est celui des contrastes entre les objectifs de coût, de performance et d'impact sur l'environnement [LUTTROP et LAGERSTEDT 2006].

Dans la plupart des processus se retrouvent souvent les phases successives suivantes : expression du besoin, recherche de concepts, recherche d'architecture, conception détaillée. Cette dernière phase (recouvrant calculs, simulation, dimensionnement, production de plans détaillés) est souvent assimilée en France à la conception tout court [YANNOU 2001].

La recherche de ce consensus est intrinsèque aux démarches des concepteurs ; elle met en œuvre leur jugement, un arbitrage, et finalement des décisions. Durant les premières étapes de la conception d'un produit, des décisions déterminent jusqu'à 90 % des futurs coûts du cycle de vie du produit. Cette phase de la conception comporte donc des risques. Mais les décideurs ne possèdent pas encore nécessairement tous les éléments qui les aideraient à faire des choix raisonnés. Des outils de validation de la conception existent pour des phases plus avancées, lorsque la définition du produit est plus complète [SACRAVETTI 2005].

Ainsi nous nous sommes intéressés au processus de conception des appareillages de moyenne tension afin d'y proposer une démarche d'intégration de l'éco-conception. Ainsi, nous avons développé des outils d'aide à l'éco-conception et plus particulièrement un outil d'aide à la décision « environnementale » dans la phase préliminaire de conception.

Dans la première partie de ce chapitre nous présenterons le déroulement d'un processus de conception standard et passerons en revue certains travaux de recherche relatifs à l'intégration de l'environnement dans le processus de conception. Ensuite, nous étudierons le système de conception des appareillages électriques de moyenne tension chez AREVA T&D. Enfin, nous exposerons notre proposition de prise en compte de l'éco-conception dans les projets de développement de ces appareillages.

3.2. LA CONCEPTION : GENERALITES

La conception consiste à développer et produire les systèmes et les produits qui conviennent au travail pour lequel ils sont prévus. La conception peut être vue comme une série d'étapes qui part d'une idée d'un produit jusqu'à l'aboutissement d'un produit validé et commercialisable.

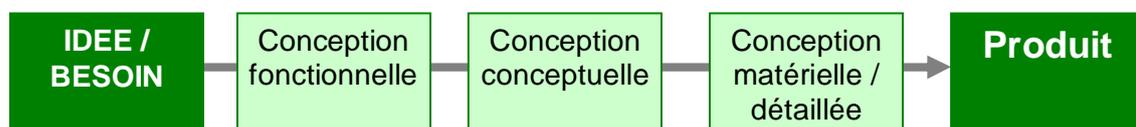


Figure 24. Les principales étapes d'un processus de conception

D'après JEANTET (1996), concevoir un produit, c'est passer de l'expression d'un besoin à la définition des caractéristiques d'un objet permettant de le satisfaire et à la détermination de ses modalités de fabrication. Le futur produit passe par une série d'états avant d'être fabriqué.

Pour MISTREE, il s'agit d'un procédé de conversion d'information qui caractérise les besoins et exigences pour un artefact, en connaissance sur le produit.

SUH (1990) définit la conception comme l'interaction entre ce que nous voulons réaliser, et comment nous voulons le réaliser; c'est-à-dire la transformation d'exigences fonctionnelles en paramètres de conception.

Pour REYMEN (2001), le processus de conception est une séquence d'activités de conception, nécessaires pour créer une ou plusieurs représentations du produit.

Plus simplement [RODENACKER 1970, MAITRE 1992 et DUCHAMP 1999], considèrent la conception comme la transformation d'un concept en un produit.

En accord avec cette définition, la démarche de conception représente l'ensemble des activités, donc des acteurs et de leurs tâches qu'il faut organiser au mieux pour transformer un concept (abstrait) en un produit (réel). Les techniques (ou outils) désignent l'ensemble des moyens utilisés lors des différentes activités. Ceux-là peuvent être des logiciels, des normes, des questionnaires, du prototypage, des outils d'analyse, etc. [MARSOT 2002].

Il n'existe pas de modèle unique de processus de conception. Les méthodologies de conception sont considérées comme un ensemble d'approches conceptuelles qui sont employées pour organiser le processus de développement d'un produit. Le processus de conception lui-même devrait être considéré en tant que plan d'étude à la conception et à la fabrication de processus réels à partir d'une association d'idées ou de besoins identifiés.

Il y a deux écoles principales de méthodologies de développement de produit : scientifique et industrielle. Il existe d'une part des modèles descriptifs, qui décrivent le déroulement du travail et d'autre part des modèles prescriptifs qui proposent une approche plus algorithmique et une procédure systématique à suivre. Mais dans les deux cas, la conception est conduite au travers de phases, différenciées par le niveau d'abstraction de la représentation du produit.

La synthèse des processus de conception théoriques et industriels permet de discerner des points communs dans les phases et les jalonnements. Il est alors possible de schématiser une approche générale qui présente une trame commune aux processus de conception. Selon SUH, les activités de conception communes sont :

- Connaître et comprendre les besoins du client
- Définir le problème à résoudre pour satisfaire les besoins ;
- Conceptualiser la solution ;
- Effectuer l'analyse, pour optimiser la solution proposée ;
- Vérifier la conception obtenue, pour voir si elle répond aux besoins clients initiaux.

Par ailleurs, nous avons constaté un découpage semblable des phases de conception. Dans certains cas, les phases sont complètement distinctes et dans d'autres, ces phases se chevauchent. Qu'il s'agisse d'une approche séquentielle ou simultanée chacune des phases se termine en effet par des choix et des décisions [QUARANTE 1994].

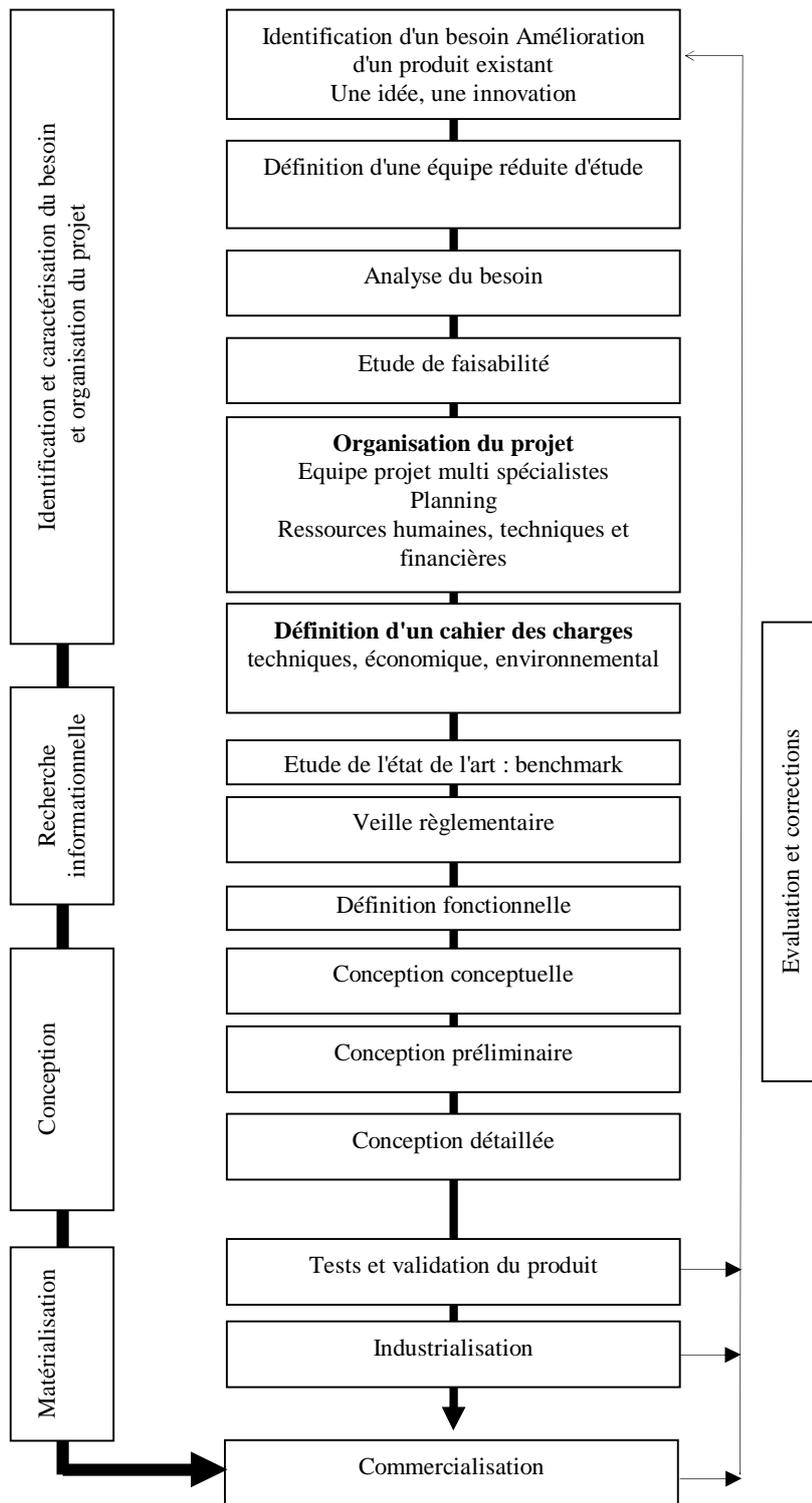


Figure 25. Processus standard de conception

Les principales raisons qui incitent à la compréhension et à l'amélioration des processus de conception sont : la complexité des produits modernes, le renouvellement des matériaux et des technologies, l'évolution rapide des connaissances mises à la disposition des développeurs de produits [THOUVENIN

2002]. Par ailleurs, le besoin de travailler en équipe et d'associer différentes compétences pousse à structurer et systématiser l'approche de conception.

Il est donc indispensable d'avoir une démarche claire et organisée qui permet de définir le rôle de chaque membre de l'équipe de développement d'intervenir au bon moment et sans conflit avec les autres parties. L'objectif principal reste de concevoir un produit fiable au moindre coût. D'autres critères viennent s'ajouter à ces critères techniques et économiques à savoir des critères environnementaux, ergonomiques, sociaux, etc. Notre étude s'intéresse à l'aspect environnemental. Il s'agit d'étudier les possibilités d'intégration de l'environnement dans le processus de conception des appareillages électriques moyenne tension.

3.3. L'INTEGRATION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION : ETAT DE L'ART

La prise en compte d'une nouvelle contrainte dans l'entreprise passe par une analyse de l'organisation et des méthodes de travail de celle-ci (TONNELIER 2002). Dans notre cas, nous étudions les possibilités d'intégration du paramètre environnemental dans le processus de conception. Ce paramètre vient s'ajouter aux autres paramètres conventionnels tels que la performance technique, le coût, le respect de la législation et la qualité. Cette démarche d'intégration est directement liée à la complexité du produit et à l'organisation des projets de conception. HOLLOWAY précise par exemple pour le choix des matériaux en conception que la performance environnementale est un critère parmi d'autres, comme le coût, la densité, les performances mécaniques, ou encore l'aptitude à être mis en forme [HOLLOWAY 1998].

Une meilleure intégration de paramètres supplémentaires doit se faire le plus en amont et à toutes les étapes du processus de conception de produit. Ceci est d'autant plus vrai pour le paramètre environnemental. De nombreuses publications mettent normativement l'accent sur ce point [FD X30-310 AFNOR 1998]. La mise en place d'une approche environnementale intégrée à toutes les phases de conception contribue à répondre à une problématique différente le long du cycle de conception. Le degré de liberté des équipes de conception diminue au cours du processus : dans les premières étapes du processus, la liberté est totale et tout changement est toléré ; dans les phases plus en aval, les bases de la conception ne doivent pas être modifiées, mais des modifications majeures sont encore possibles; dans les phases très avancées, lors d'une optimisation de conception, seules des modifications locales sont tolérées, à condition de limiter les implications sur le voisinage [PNUELI et ZUSSMAN 1997]. L'approche d'intégration d'un nouveau paramètre au processus de conception doit tenir compte du caractère itératif des phases de conception conceptuelle et de conception détaillée [TONNELIER 2002].

L'analyse des processus de conception montre que les principales décisions sont prises au niveau des premières phases de développement. Toutefois, il apparaît que la phase de créativité fait émerger plusieurs options de conception.

Il est certes intéressant d'explorer plusieurs solutions, mais cette orientation s'avère économiquement non viable. Concentrer les efforts sur un seul concept paraît plus intéressant d'un point de vue industriel. Il est donc important d'aider les concepteurs dans l'évaluation des concepts sélectionnés.

Les recherches sur l'éco-conception confirment l'importance de l'intervention dès les premières étapes de conception du produit. Cela permet une meilleure amélioration environnementale et un plus haut niveau d'innovation. Une étude réalisée sur un ensemble de fabricants de produits électriques et électroniques européens et américains montre que les projets d'éco-conception présentent de meilleures performances écologiques lorsque l'environnement a été entraîné en amont des projets [MCALOONE 1998, SIMON et al. 1998]

« Beaucoup d'entreprises ont traité le sujet des premières étapes du processus de conception et ont mis en évidence l'importance d'intégrer l'environnement le plus en amont possible. Il a été reconnu qu'au delà d'une certaine étape du processus de conception, il est extrêmement difficile de modifier certains aspects du produit qui sont des points clés pour la performance environnementale » [BHAMRA et al.1999].

Différents travaux de recherche montrent que 80 à 90% des impacts environnementaux et du coût du produit sont déterminés pendant les premiers stades de conception [VAN NES et CRAMER 1997, MCALOONE 1998, SHERWIN et EVANS 2000]. Ces études mettent en évidence l'importance des concepteurs dans la durabilité du produit. Cela place le concepteur au premier niveau de responsabilité environnementale. Nous pensons que le rôle du concepteur est aussi important que le rôle de l'utilisateur. C'est pour cela qu'il est souhaitable de développer des méthodes d'éco-conception centrées autour du concepteur.

3.3.1. Méthodes d'intégration de l'éco-conception dans le processus de conception

Il est pratiquement impossible de dresser toute la liste des méthodes développées pour l'intégration du paramètre environnemental dans le processus de conception. La recherche relative aux méthodologies et aux outils d'éco-conception a été développée grâce aux travaux réalisés par les entreprises industrielles et les organismes de recherche, par exemple RYDING et al. (1995), BREZET et HEMEL (1997), GERTSAKIS et al. (1997), et SIMON et al. (1998), WRISBERG et al. (2000), LEWIS et GERTSAKIS (2001), ERNZER et BIRKHOFFER (2002), MATHIEUX (2004), LEPOCHAT (2005), etc. Nous pensons que cette abondance de méthodes a engendré une certaine confusion auprès des concepteurs et des responsables des projets de développement tant au niveau de la mise en place de la démarche d'éco-conception que dans le choix des outils d'évaluation environnementale et d'aide à la décision. Nous défendons le fait que chaque entreprise doit adopter une démarche d'intégration de l'éco-conception adaptée à ses besoins et à ses ressources. En effet, les processus de conception dépendent de la nature du produit et de l'organisation de la conception au sein de l'entreprise. En pratique, une même entreprise peut utiliser différentes approches et outils de conception selon le besoin. Nous estimons qu'il n'est pas possible d'élaborer une approche générale pour intégrer l'éco-conception dans le processus de conception.

Toutefois, il est plus facile de proposer une méthode structurée de prise en compte de l'environnement lorsque la démarche de conception est bien organisée. En d'autres termes lorsque le cahier des charges est bien défini, les étapes de développement et les outils de conception sont déterminés et les responsabilités sont fixées.

3.3.2. Les risques de l'intégration de l'environnement dans le processus de conception

D'une manière générale, l'intégration d'un paramètre supplémentaire dans le processus de conception peut entraîner des défaillances au niveau du produit. Dans notre cas, cela peut être dû à plusieurs raisons dont :

- la non satisfaction d'une partie des exigences définies dans le cahier des charges initial car les exigences environnementales peuvent paraître contraignantes voire non réalisables ;
- l'oubli ou la négligence de certains besoins qui s'avèrent plus importants que ceux de l'environnement ;
- l'augmentation du coût du produit ;
- l'augmentation du temps et donc du coût de développement ;
- l'évolution du cahier des charges à la fin du processus de conception à cause d'une modification de la réglementation ou de la stratégie de l'entreprise.

D'après FERNEZ-WALCH (1991), il existe des risques surtout lors d'un projet d'innovation car l'innovation peut déstabiliser les modes de fonctionnement des entreprises.

Afin d'évaluer les risques éventuels en conception, TOMALA (2003) propose des indicateurs globaux qui reflètent les facteurs d'influence sur le cycle de vie d'une innovation : indicateurs de performance, indicateurs sociaux, de coût, et environnementaux.

Comme nous l'avons exprimé auparavant, la nature industrielle des appareillages de moyenne tension nous empêche d'utiliser ce type d'indicateurs : aucune influence sociale, aucune influence négative possible sur le coût et sur la performance technique, donc nous nous limiterons aux seuls indicateurs environnementaux.

Un certain nombre d'audits de projets de conception nous a permis de déterminer les risques potentiels rencontrés auprès des bureaux d'études qui ont initié des projets de conception en y intégrant le critère environnemental. Il en sort les conclusions suivantes :

- Une mauvaise connaissance des risques environnementaux,
- Une intégration tardive de ce paramètre,
- Un blocage devant certains choix de conception,
- Un risque de développement de produits plus polluants que les produits existants,
- Une mauvaise communication sur les produits éco-conçus,
- Un frein économique lié à certaines améliorations écologiques.

Nous concluons que les risques de défaillances liées à l'intégration de l'environnement dans le processus de conception peuvent augmenter si l'équipe de conception n'est pas guidée tout au long du processus de conception et s'il n'existe pas de stratégie bien définie par l'entreprise.

3.3.3. Exemples d'approches d'intégration de l'environnement dans les processus de conception

3.3.3.1. Première étude de cas : SIEMENS

En 1993 SIEMENS a créé la norme interne SN 36350 « Produits compatibles avec l'environnement ». Cette norme établit les principes de la conception écologique dans le projet et le développement des produits. L'intégration complète de ces principes dans la phase initiale du projet est d'importance cruciale. La procédure pour assurer cette approche est décrite dans la figure suivante [KOCH 2000].

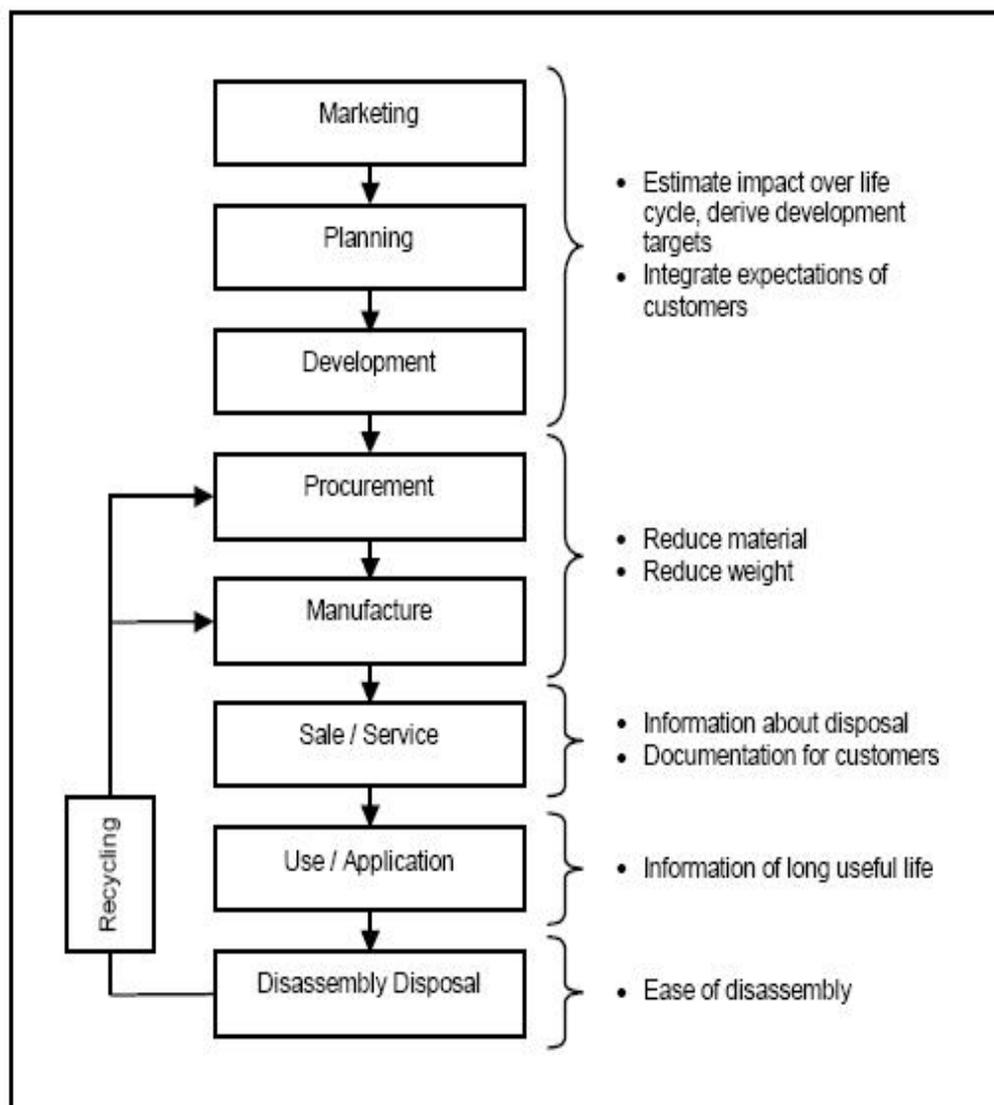


Figure 26. Exemple d'intégration de règles d'éco-conception durant la phase de développement

Source: Eco-design guide (ECOLIFE) 2002

3.3.3.2. Deuxième étude de cas : PHILIPS

Le guide interne du groupe Philips présente les principales étapes de son processus d'éco-conception en différenciant la démarche stratégique d'une part et la démarche opérationnelle d'autre part [MEINDERS 1997]. La figure suivante présente le détail de ce processus.

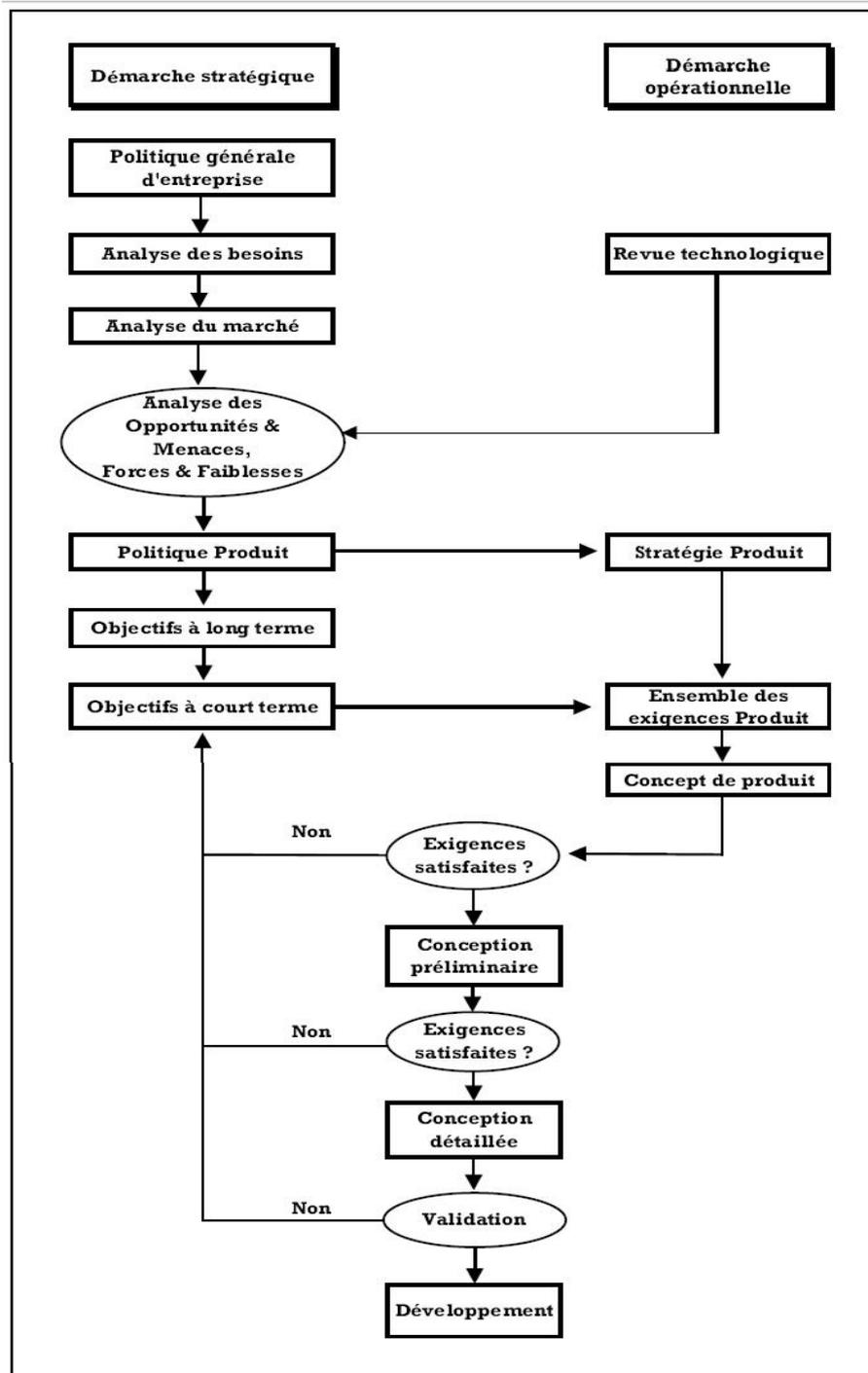


Figure 27. Processus d'éco-conception proposé par le Groupe Philips.

Source: "Point of no return", Philips EcoDesign guidelines, MEINDERS 1997.

3.3.3.3. Troisième étude de cas : THOMSON

L'intégration de l'environnement dans le processus de conception chez THOMSON s'est fait selon un modèle d'amélioration continue. Ce processus a été orienté vers la conception pour le recyclage. Les options de conceptions sont comparées selon des critères de désassemblage, de recyclabilité et de dépollution. L'intégration des critères environnementaux dans la phase de conception est basée sur un ensemble de règles intégrées au cahier des charges des projets de développement, à savoir :

- Faciliter le recyclage des sous-ensembles plastiques les plus importants,
- Utiliser le maximum de matériaux recyclés,
- Bannir les substances dangereuses,
- Eviter l'usage de peinture. Si nécessaire utiliser la peinture à l'eau,
- Réduire le poids du produit et de son emballage,
- Limiter la consommation d'énergie tout au long du cycle de vie.

3.3.3.4. Quatrième étude de cas : Université de Tokyo

FARGNOLI et FUMIHIKO (2007) de l'université de Tokyo ont élaboré une méthode d'intégration de l'éco-conception dans le processus de conception basée sur le respect de la réglementation (RoHS, DEEE et EuP) et l'application du système QFDE (Quality Function Deployment for Environment). Le QFDE se fait en quatre étapes. Le concepteur peut identifier les parties du produit responsables des principaux impacts environnementaux en suivant les phases 1 et 2. Par la suite, il peut trouver la conception la plus optimisée au cours des phases 3 et 4. La figure 29 présente le détail de cette méthodologie :

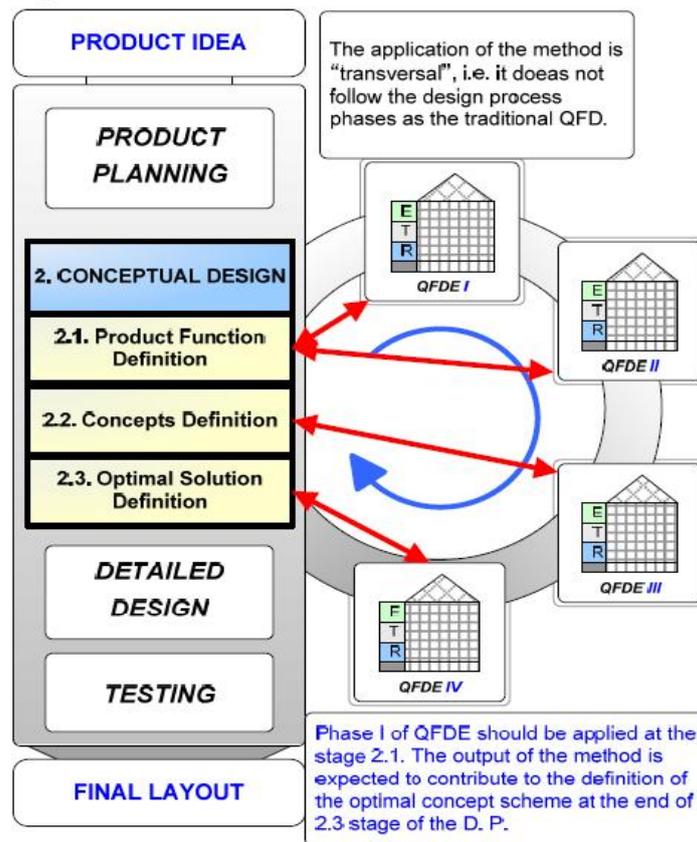


Figure 28. Processus d'éco-conception proposé par l'Université de Tokyo

Source: The Optimization of the Design Process for an Effective Use in Eco-Design. FARGNOLI et FUMIHIKO. 2007.

3.3.4. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons étudié la démarche générale de conception des produits et les possibilités d'intégration des paramètres environnementaux dans cette démarche. Cette étude n'est pas exhaustive mais permet de donner une vision sur quelques approches industrielles et scientifiques couramment utilisées pour la mise en pratique de l'éco-conception. Ces modèles montrent qu'il est possible d'intégrer l'environnement tout au long du processus de conception ou au niveau de certaines étapes. Cela nous renvoie vers le deuxième chapitre relatif aux stratégies d'éco-conception. Nous avons aussi montré qu'une intégration non organisée des paramètres environnementaux dans le système de conception peut aboutir à des résultats complètement contraires à ceux espérés. On doit adapter l'approche d'intégration au processus de conception utilisé et aux besoins de l'équipe de conception. Nous défendons le fait qu'il n'est pas possible d'adopter un modèle standard de processus d'éco-conception valable pour tout type de produit et d'entreprises.

Dans le paragraphe suivant nous présenterons notre proposition d'intégration de l'éco-conception dans le processus de conception des appareillages de moyenne tension de AREVA TD/DRC. Il s'agit d'abord d'analyser la procédure actuelle de conception et d'étudier les voies d'intégration des paramètres environnementaux tout au long du processus de conception.

Notre proposition prend en compte :

- Les méthodes d'intégration existantes,
- Les besoins de l'équipe de conception,
- Notre expérience en conception,
- Les contraintes économiques et techniques.

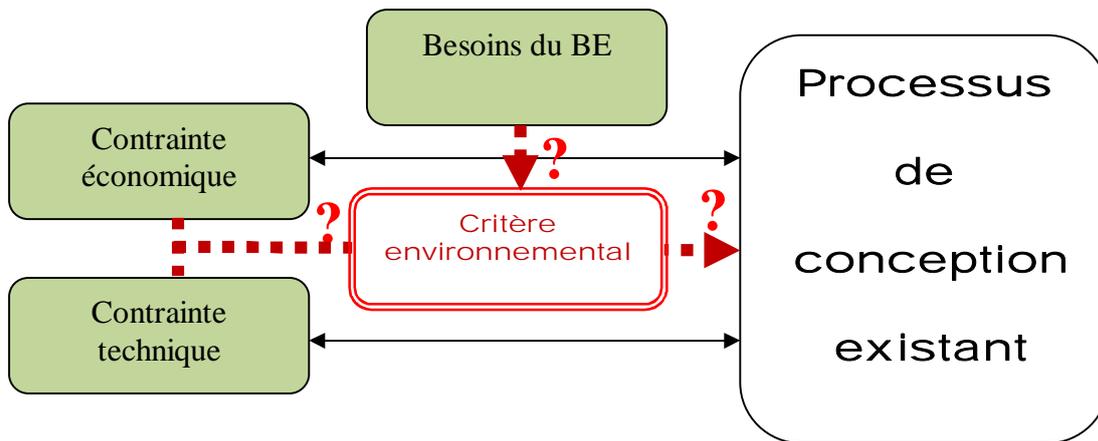


Figure 29. Comment intégrer l'environnement dans un processus de conception existant ?

3.4. L'INTEGRATION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION : CAS DE AREVA T&D/DRC

3.4.1. Analyse de l'approche de conception des appareillages de moyenne tension

Afin de décrire un système d'aide à l'éco-conception, nous nous sommes intéressés à la manière dont se pratique la conception, aux démarches proposées, aux difficultés rencontrées. Pour pouvoir supporter l'activité de conception, il est indispensable d'étudier et de formaliser ces processus [DENEUX 2002].

Nous souhaitons proposer une approche complémentaire à celle existante. Nous étudions pour ce faire la démarche de conception de AREVA T&D/DRC en essayant d'identifier les différentes phases, leurs limites, ainsi que les possibilités d'intégration d'éco-conception.

Le processus de conception étudié est celui utilisé par le centre DRC de AREVA T&D pour les appareillages électriques de moyenne tension (voir figure 30). La conception se fait selon un schéma de conception standard partant d'un besoin identifié, passant par une conception générale puis une conception détaillée pour se terminer par une phase d'essais et de validation.

Le suivi du déroulement des projets de développement des appareillages de moyenne tension nous a permis de mieux comprendre la procédure de conception de ces produits. En effet, nous nous sommes rendu compte qu'il existe certaines disparités entre l'approche théorique de la conception et l'approche pratique ou industrielle. Ces disparités se manifestent par le non respect des étapes de conception, le changement du cahier des charges en cours de développement, le déclenchement d'une procédure de re-conception avant la fin de la conception, etc. Ces écarts par rapport au schéma standard sont souvent dus aux contraintes techniques et économiques qui peuvent évoluer à cause d'un changement de marché, du cahier des charges du client ou des normes ou en raison de l'évolution des coûts des matériaux.

L'analyse de la méthodologie de conception utilisée permet de comprendre la démarche suivie par les concepteurs et d'étudier les possibilités d'intégration des paramètres environnementaux aux différentes étapes du processus. Il s'agit de mettre en place une approche d'éco-conception adaptée aux concepteurs.

Dans la suite de ce paragraphe nous allons décrire les différentes étapes du processus de conception des appareillages de moyenne tension chez AREVA T&D/DRC. Ceci nous permet de comprendre les limites de chaque phase et de présenter pour chacune des phases les critères environnementaux susceptibles d'y être associés.

A la fin de ce paragraphe nous dressons un bilan de toutes les propositions d'intégration de l'éco-conception dans le système existant. A chaque étape, nous mettrons en avant les outils d'éco-conception nécessaires pour l'application de notre proposition.

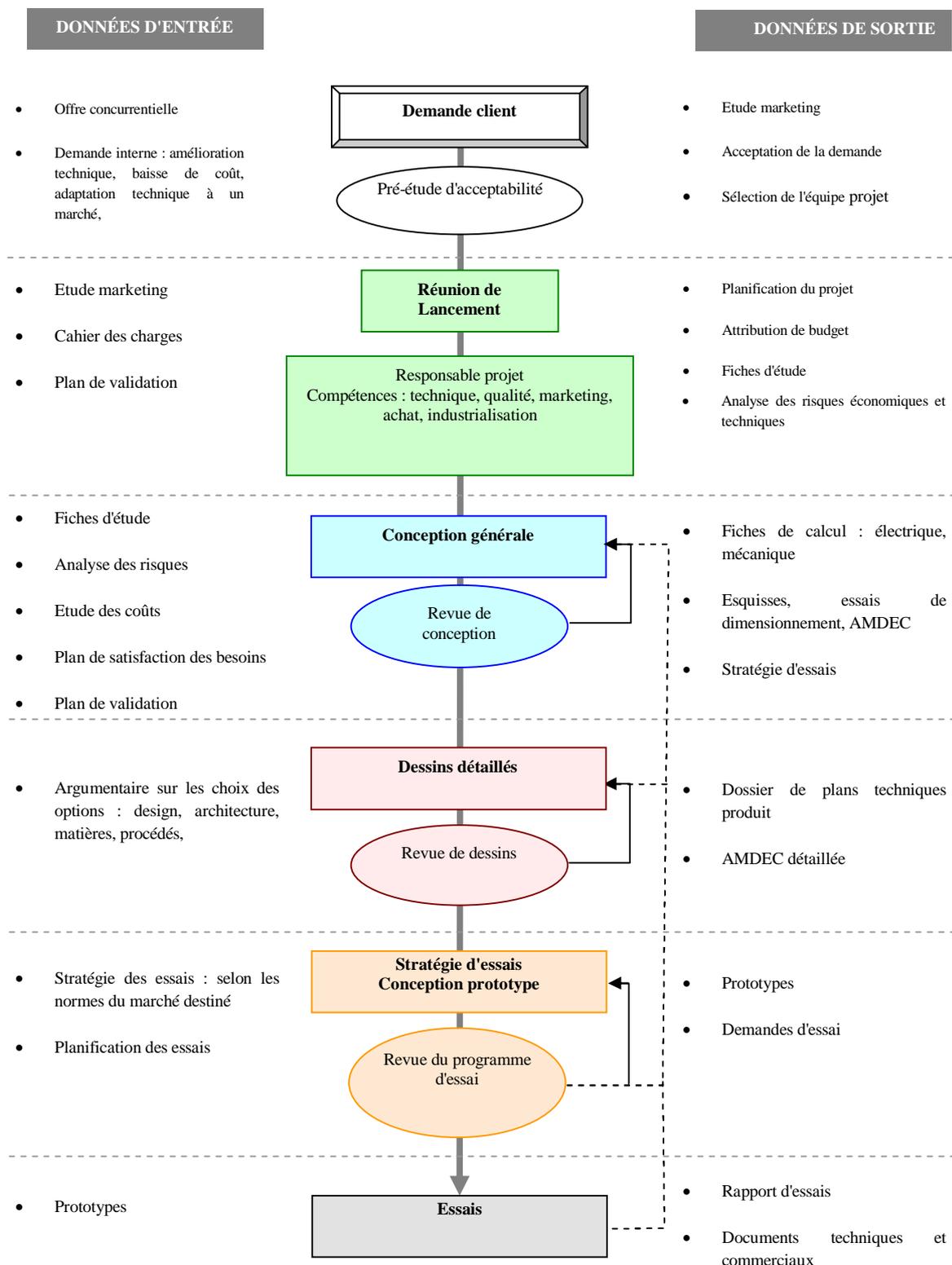


Figure 30. Processus de conception des appareillages électriques de moyenne tension de AREVA T&D/DRC

Source: Document interne AREVA T&D/DRC n°73PG02

Le besoin d'un nouveau produit est créé à la demande d'un client : interne (service de marketing, unité de production, service après vente) ou d'un client externe (EDF, SNCF, industrie). Une grande partie des nouveaux produits moyenne tension sont des re-conceptions de produits existants. Il s'agit soit d'améliorer les performances techniques, soit de baisser le coût, soit de s'adapter à d'autres exigences techniques, soit de se conformer à la législation. Le temps de développement est en moyenne de 2 à 3 ans. Une deuxième partie de ces produits se base sur une conception innovante et totalement différente de l'existant. Cette approche est plus difficile et nécessite un travail de recherche plus approfondi. Ceci est généralement lié au développement d'une nouvelle technologie, un nouveau matériau ou "process", ou une combinaison des trois. Les projets de développement innovants durent de 3 à 10 ans. Il existe aussi une troisième catégorie de produits conçus en intégrant un élément innovateur dans un produit existant, il s'agit d'une innovation partielle. Cela permet de raccourcir les délais de développement en améliorant la qualité du produit.

La demande du client est étudiée par un comité technique et marketing afin d'en évaluer l'acceptabilité. L'analyse de la demande est basée sur l'évaluation technique, l'étude du marché et la veille législative et normative. Une fois la demande acceptée, une équipe projet est désignée, réunissant les différentes compétences nécessaires pour le développement du produit : technique, achat, marketing, normes, qualité, industrialisation, etc.

Par la suite un cahier des charges détaillé est élaboré contenant entre autres les caractéristiques techniques, les objectifs économiques, les délais et autres contraintes imposés par le marché. Ce document peut être réalisé en collaboration avec le client.

Ensuite, le cahier des charges technique est traduit en termes de fonctionnalités. Dans ce cas les sous-ensembles du produit représentent des fonctions et non des sous-ensembles physiques.

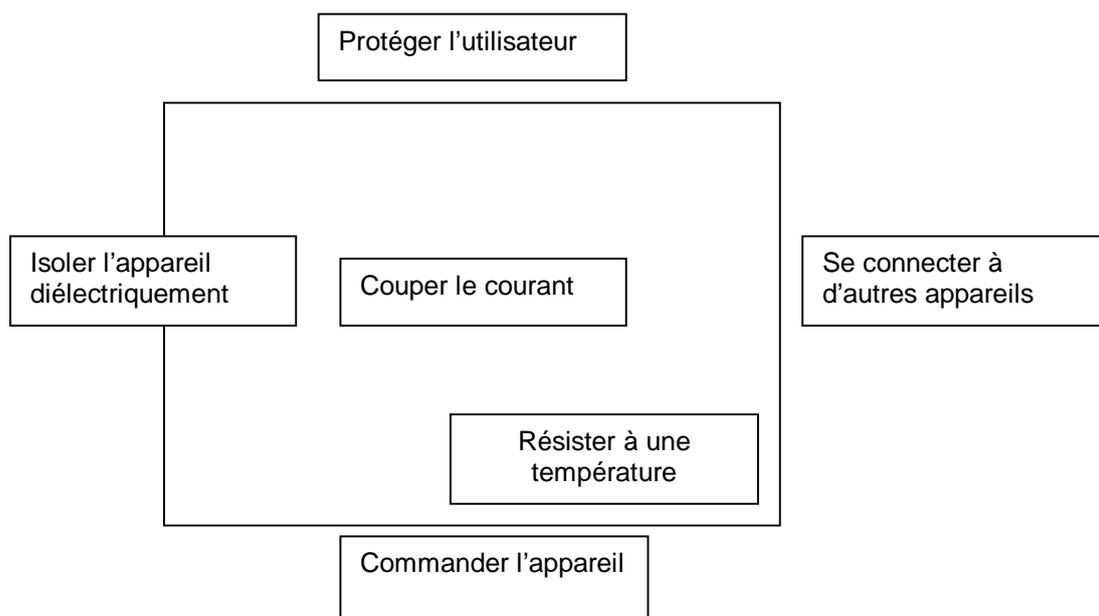


Figure 31. Exemple d'un cahier des charges fonctionnel

3.4.1.2. La phase de lancement de projet

L'équipe projet se réunit pour étudier le besoin et rédiger un cahier des charges pluridisciplinaire. Le client peut participer à l'élaboration du cahier des charges. Certaines clauses du cahier des charges peuvent être communes à tous les produits ou à une catégorie de produits telles les clauses de qualité par exemple. L'identification et la caractérisation du besoin permettent de planifier le projet, de fixer les actions et les responsabilités et d'attribuer un budget.

Avant de commencer la conception proprement dite, il est nécessaire de faire une veille technique, réglementaire et normative. Le respect de la législation est obligatoire et passe en priorité, avant tous les critères techniques et économiques. Il est alors indispensable d'étudier la réglementation des pays pour lesquels le produit est destiné. Il s'avère que certaines restrictions peuvent influencer la conception du produit. Par exemple, les directives européennes DEEE, RoHS. Cela est encore plus vrai en ce qui concerne les normes. En effet, il est impossible de commercialiser un produit qui ne respecte pas les normes du pays destinataire (CEI⁴, ANSI⁵, GB⁶, etc). Les normes sont considérées comme une garantie de qualité. Mais souvent, les exigences des clients vont au-delà de ces normes. Il est évident que dans le secteur de l'électricité en général et en moyenne et haute tension en particulier, une attention particulière est portée à la sécurité et à la fiabilité du produit.

La connaissance de l'état de l'art passe par l'étude des produits existants sur le marché (catalogues produits, communications) ou en cours de développement par les concurrents (brevets, publications). Cela permet d'éviter de rechercher ce qui existe déjà et de recenser les possibilités d'amélioration ou d'intégration des systèmes concurrentiels dans le produit à développer. Après l'analyse de l'état de l'art, le groupe de travail doit répondre aux questions suivantes :

1. Quel est l'objectif coût du produit?

Pour cela il est indispensable de faire une étude commerciale approfondie qui permet d'évaluer l'évolution de l'offre et de la demande et de prévoir la part du marché susceptible d'être gagnée. Cela déterminera le coût du produit.

2. Quel est le risque d'échec, technique et/ou économique, et quelles seraient les contraintes?

Ajoutée à l'étude du marché, une étude de criticité technique s'avère très importante. Elle se base sur les connaissances et les compétences techniques existantes en interne et en externe. Le risque d'échec est plus grand quand la demande est très complexe et la maîtrise des éléments technique faible mais aussi quand la demande n'est pas assez précise et le besoin mal défini. Il faut donc s'assurer de pouvoir mobiliser les bonnes compétences au bon moment et avoir les ressources financières suffisantes pour le déroulement du projet.

3. Comment satisfaire la demande du client?

⁴ Comité Electrotechnique International

⁵ American National Standards Institute

⁶ Normes chinoises écrites en Grande Bretagne

La demande du client doit être la plus précise possible. Pour cela il faut utiliser les outils de définition du besoin disponibles et validés au sein de l'entreprise. Chez AREVA T&D/DRC, les outils les plus utilisés sont l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la valeur (confère § outils de conception).

Une fois le besoin identifié et bien explicité et le coût fixé, les développeurs commencent à réfléchir sur la conception générale du produit.

3.4.1.3. La phase de conception générale

La conception générale se base sur une approche technique rigoureuse. En effet, dans les produits de moyenne tension, l'esthétique ne joue pas un rôle important. Tout l'effort doit donc se concentrer sur la satisfaction du cahier des charges fonctionnel. Les spécifications techniques et l'environnement d'utilisation vont orienter le processus vers une première architecture grossièrement décrite du produit. Des séances de créativité, type brainstorming (voir § outils de conception) permettent d'investiguer plusieurs pistes et de proposer différentes options. Les solutions retenues doivent être revues plus en détail afin de vérifier l'acceptabilité technique et économique. Cela passe par des calculs techniques précis ou par des expérimentations. Une première AMDEC (voir § outils de conception) est réalisée afin de détecter et d'éliminer les systèmes qui présentent un risque de défaillance important. L'ensemble de ces travaux doit être archivé et consultable par tous les membres du groupe de travail.

Des réunions de revue de conception sont prévues selon l'évolution du projet. L'ensemble du groupe de travail participe à ces réunions.

La conception permet alors de répondre à la demande exprimée dans le cahier des charges. Le passage du format « texte » au format « dessin » ou « forme » est très important car il permet de visualiser l'« objet ». Les produits industriels étant de plus en plus complexes, il s'avère impossible de concevoir tout en même temps. Généralement, le concepteur commence par fixer les contraintes extérieures au produit à savoir les limites dans l'espace « l'enveloppe » du produit et les connexions.

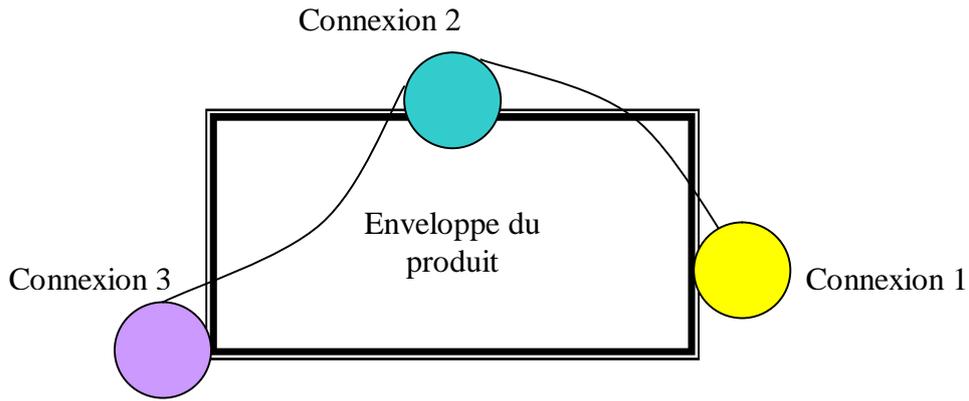


Figure 32. Contraintes extérieures du produit

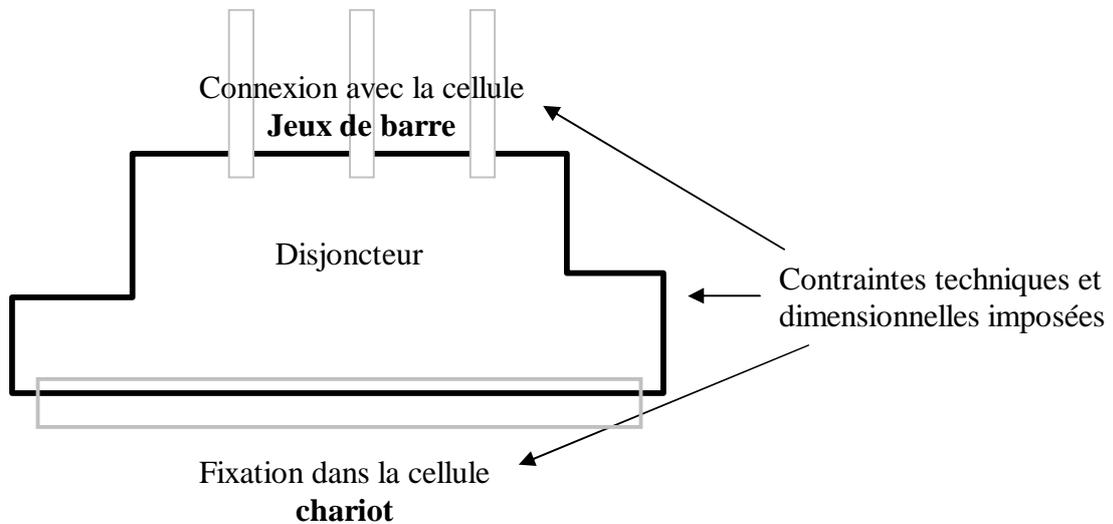


Figure 33. Exemple de contraintes extérieures du produit

Par la suite, il s'agit de concevoir les liaisons entre ces connexions. Nous sommes dans la phase de conception générale. Le produit n'est pas encore défini mais les principaux ensembles et sous-ensembles sont visualisés.

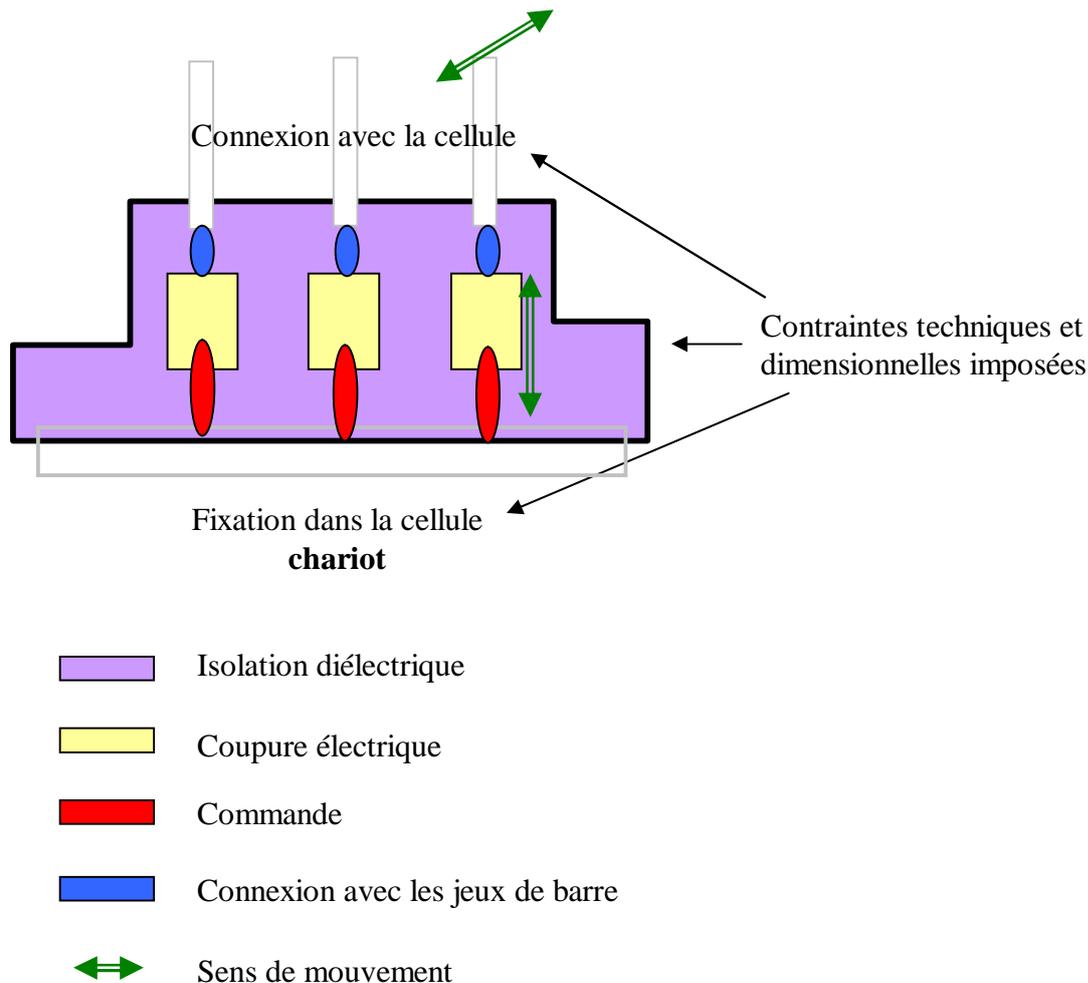


Figure 34. Exemple de liaisons d'un produit

3.4.1.4. La phase de conception détaillée

La phase de conception détaillée est sans doute la phase la plus technique et la plus complexe. Elle requiert l'association de plusieurs compétences : électriques, matériaux, mécaniques, industrielles,...Le produit est décomposé en sous-ensembles développés par différents concepteurs en même temps. Chaque sous-ensemble est défini par une spécification technique précise. Cela permet de réduire les temps de développement et de travailler en "îlots" de conception. Chaque îlot est spécialisé dans une partie du produit (coupure, isolation, mécanisme, connexions, commande, électronique, etc). Les compétences communes (achat, normes, qualité, industrialisation, marketing,...) interviennent transversalement auprès de toutes les équipes de conception. Les sous-ensembles sont définis comme des produits à part entière, et suivent donc le même cheminement de conception que le produit entier. Par exemple, la connexion qui relie l'élément de coupure au branchement électrique doit s'intégrer dans un volume fixé et s'adapter aux contraintes géométriques des deux éléments.

Cette phase se base essentiellement sur des calculs et des modélisations techniques mais aussi sur l'expérience des concepteurs. Des réunions intermédiaires permettent de coordonner le travail des différentes équipes. En effet, le retour d'expérience permet de réduire les risques de défaillances et d'erreurs de conception. Cela peut parfois engendrer un ralentissement de l'innovation. C'est pour cela qu'il est important de diversifier la composition des équipes de conception.

A la fin de cette phase tous les sous-ensembles du produit sont dessinés. Le produit final peut être « assemblé » et visualisé. Toutefois, il est parfois nécessaire de procéder à des pré-prototypages, des essais matériaux complémentaires ou des modélisations afin de finaliser la conception détaillée. Certaines parties peuvent être validées indépendamment de la validation du produit final, tels que les éléments de coupure ou l'électronique. Un dossier contenant les plans détaillés et les fiches de calcul, de modélisation et d'essai est constitué pour chaque sous-ensemble validé par l'équipe projet.

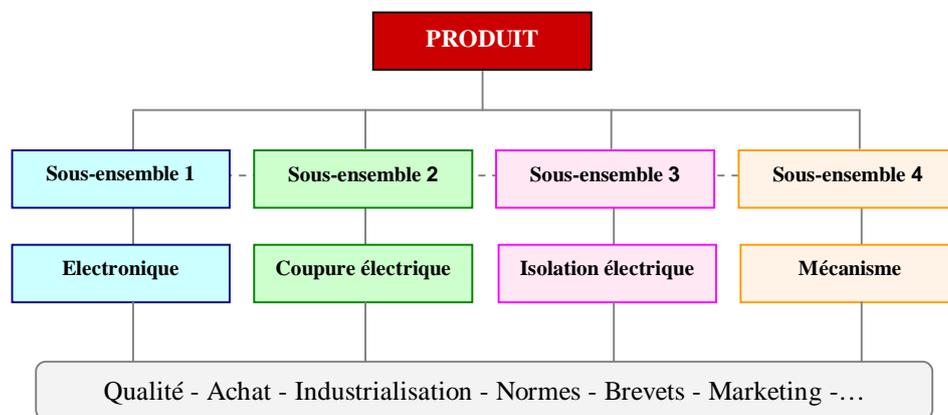


Figure 35. Exemple de conception par sous-ensemble fonctionnel

La conception détaillée se base sur les résultats de la conception générale. Les solutions les moins économiques et les moins fiables sont éliminées. La conception détaillée passe par une approche technique qui permet à travers des règles de calcul précises et éprouvées de dessiner un ou plusieurs plans par pièce selon le choix de ou des matières. Les concepteurs sont alors confrontés à une prise de décision selon différentes options :

- techniques : dimensionnement, matériaux, procédés industriels, assemblage
- économiques : prix de matière, prix d'industrialisation, logistique

En général, ces choix sont basés sur le rapport "qualité/prix" et sur "l'expérience" des concepteurs.

Une AMDEC détaillée considère l'ensemble du fonctionnement du produit ou d'une partie du produit (les plus critiques) et permet de réduire les risques de défaillances.

Les solutions retenues doivent être vérifiées soit par modélisation, soit par expérimentation. Cela permet de détecter les défaillances et d'affiner le dessin du produit [MILLET et al. 2003].

3.4.1.5. La phase de prototypage et essais

Le prototypage permet de fabriquer le produit développé ou une partie de ce produit identique au produit final. Le prototype est l'outil indispensable pour la validation du produit. Il arrive souvent que les différents sous-ensembles d'un produit soient testés indépendamment. Généralement, les pièces critiques sont fabriquées en premier et testées séparément. Les tests finaux se font sur des appareils complets. Les essais permettent de détecter les éventuelles défaillances et d'apporter les modifications nécessaires pour les corriger. L'homologation finale passe par la validation de tous les essais sur le prototype du produit [HEMEL et CRAMER 2002]. Une fois validés, les composants sont assemblés pour monter le produit.

Les essais de validation sont établis selon le cahier des charges technique initial. Ils comportent l'ensemble des tests :

- électriques : décharges partielles, choc de foudre, etc
- mécaniques : traction, compression, torsion, manœuvre, etc
- thermiques : vieillissement, températures maximales des parties accessibles, inflammabilité
- chimiques : compatibilité chimique, etc
- de manœuvre : manœuvre manuelle indépendante, verrouillage, indicateur de position, etc.

Prototypage et stratégie d'essai : des essais supplémentaires peuvent s'ajouter selon la demande du client et la destination du produit avec une partie des essais qui se fait en interne et une autre en externe dans des laboratoires certifiés.

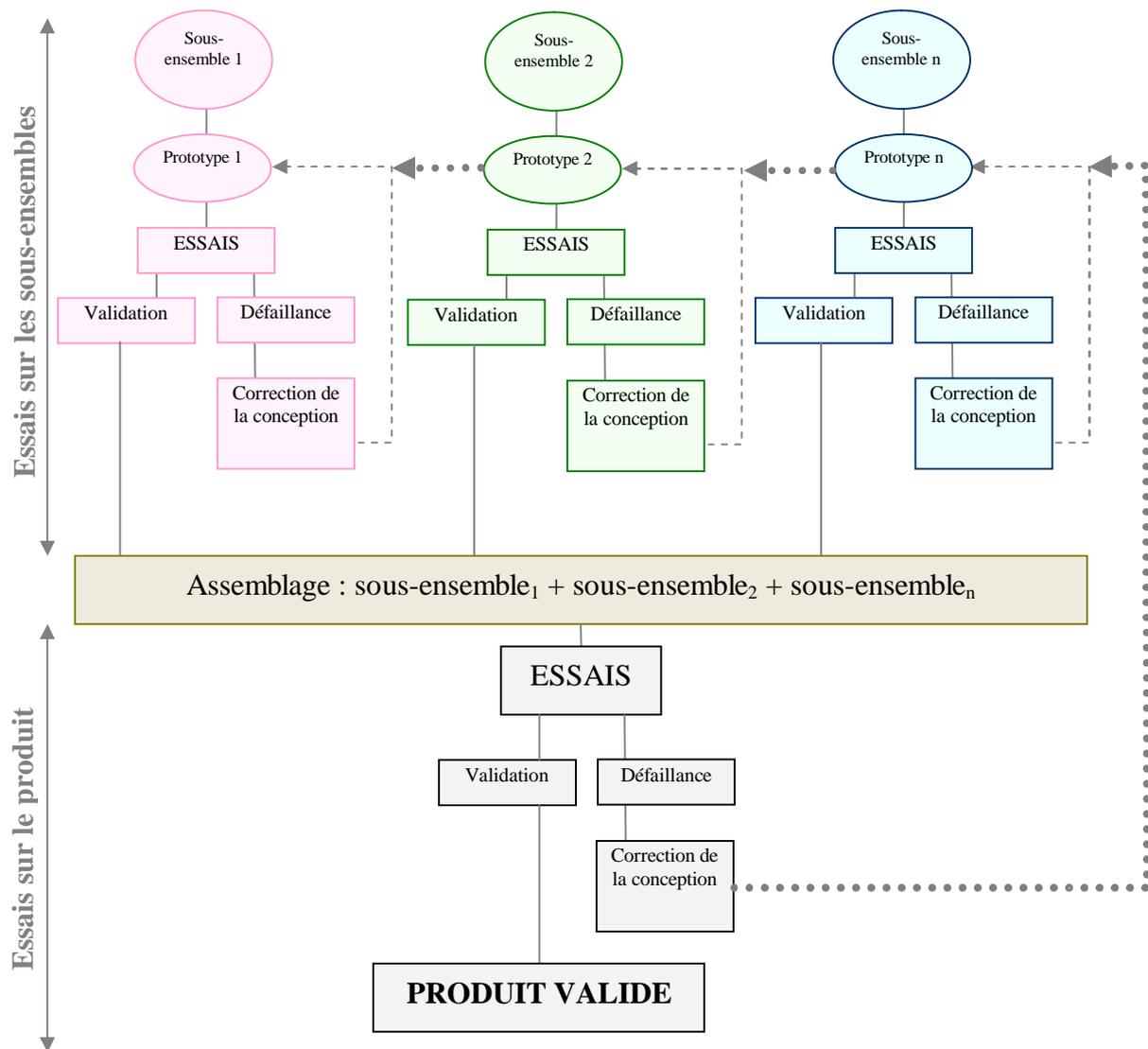


Figure 36. Prototypage et stratégie d'essai

3.4.1.6. Conclusion

Afin de proposer une approche complémentaire qui s'intègre facilement dans les démarches existantes, nous avons décrit dans ce chapitre :

- Les processus de conception existants ;
- Les étapes intermédiaires de conception rencontrées durant ces processus et les objets associés.

La plupart des processus de conception proposent une approche de traduction du besoin en deux étapes. La première étape est l'élaboration d'un cahier des charges qui décrit un besoin spécifique technique, économique, environnemental ou autre. Cette phase est restrictive du champ d'exploration d'idées. La deuxième étape est la phase de conception préliminaire. Cette phase est la première phase de créativité et d'innovation. C'est à ce niveau que toutes les idées répondant au cahier des charges peuvent être étudiées. Vient ensuite la phase de conception détaillée des concepts sélectionnés.

Toutefois, certains modèles font apparaître l'état de concept pertinent durant la conception préliminaire, laquelle se poursuit au-delà des spécifications techniques, jusqu'à l'étape définissant une architecture : c'est la phase de conception architecturale qui est comprise entre concept et topologie validée [SCARAVETTI 2004].

Toutefois, nous constatons que nous ne disposons pas de toutes les informations nécessaires à la conception du produit après la phase de conception préliminaire. Certaines contraintes sont identifiées au fur et à mesure de la construction de l'architecture du produit. D'après SCARAVETTI, plusieurs itérations sont nécessaires pour trouver une combinaison de paramètres qui satisfasse les exigences listées, mais qui n'est pas forcément celle respectant au mieux le cahier des charges, les règles métiers, les contraintes de fabrication, etc. De plus, cette phase se base plus sur l'expérience du groupe de conception que sur des calculs précis ou des résultats expérimentaux. L'ambiguïté consiste donc à innover et générer de la créativité en se basant sur un ensemble de connaissances préétablies et une démarche rodée et éprouvée.

L'étude de l'approche de conception utilisée par les bureaux d'études de AREVA T&D/DRC pour le développement des appareillages moyenne tension montre une approche conceptuelle classique. Les spécificités de cette approche sont liées à la complexité technique des produits. En effet, il est difficile de passer directement de la conception à la réalisation. Il y a donc une phase de réajustement liée aux tests effectués sur les prototypes. Dans certains cas, les calculs et les modélisations ne suffisent pas pour évaluer le comportement de la pièce en fonctionnement. Cela est encore plus valable pour les pièces sollicitées électriquement et mécaniquement.

Il s'avère ainsi que l'éco-conception est absente de cette approche de conception. Il n'existe aucun outil ni règle d'éco-conception. Seuls les critères techniques et économiques sont pris en considération. Il apparaît aussi que les concepteurs n'ont pas de notions environnementales solides. L'intégration de l'éco-conception à cette approche de conception peut se faire à différents niveaux : dans l'élaboration du cahier charges, dans les règles de conception, dans le choix des matériaux et procédés de fabrication...Le paragraphe suivant présente les possibilités de mise en place d'une méthodologie d'éco-conception adaptée à la procédure de conception utilisée et aux concepteurs.

3.4.2. Les possibilités d'intégration de l'éco-conception dans le processus de conception

L'introduction d'une démarche d'éco-conception dans le processus de conception est une opération complexe [MATHIEUX 2002] qui se base sur les besoins du bureau d'études et des contraintes de conception. Il s'agit de choisir une approche théorique générale et pour chaque phase de conception une définition des paramètres environnementaux et des outils d'application et de contrôle. Il est important d'évaluer les limites d'acceptabilité des modifications apportées au processus de conception par l'équipe de conception. L'objectif étant d'apporter des améliorations effectives, utiles et applicables par l'ensemble des concepteurs. Il est possible d'imaginer une intégration progressive des paramètres environnementaux en cas d'une surcharge méthodologique.

La planification de cette intégration se fait en accord avec la direction de l'entreprise et l'équipe de conception. Dans la figure suivante, nous présentons notre approche d'intégration progressive de l'éco-conception dans le système de conception.

L'intégration des paramètres environnementaux dans le processus de conception peut se faire à toutes les étapes et selon différentes approches. Toutefois, les marges d'amélioration environnementale sont plus importantes en amont. De plus, les coûts d'intervention sur le disjoncteur isolé augmentent au fur et à mesure de l'avancement du développement [TONNELIER 2002].

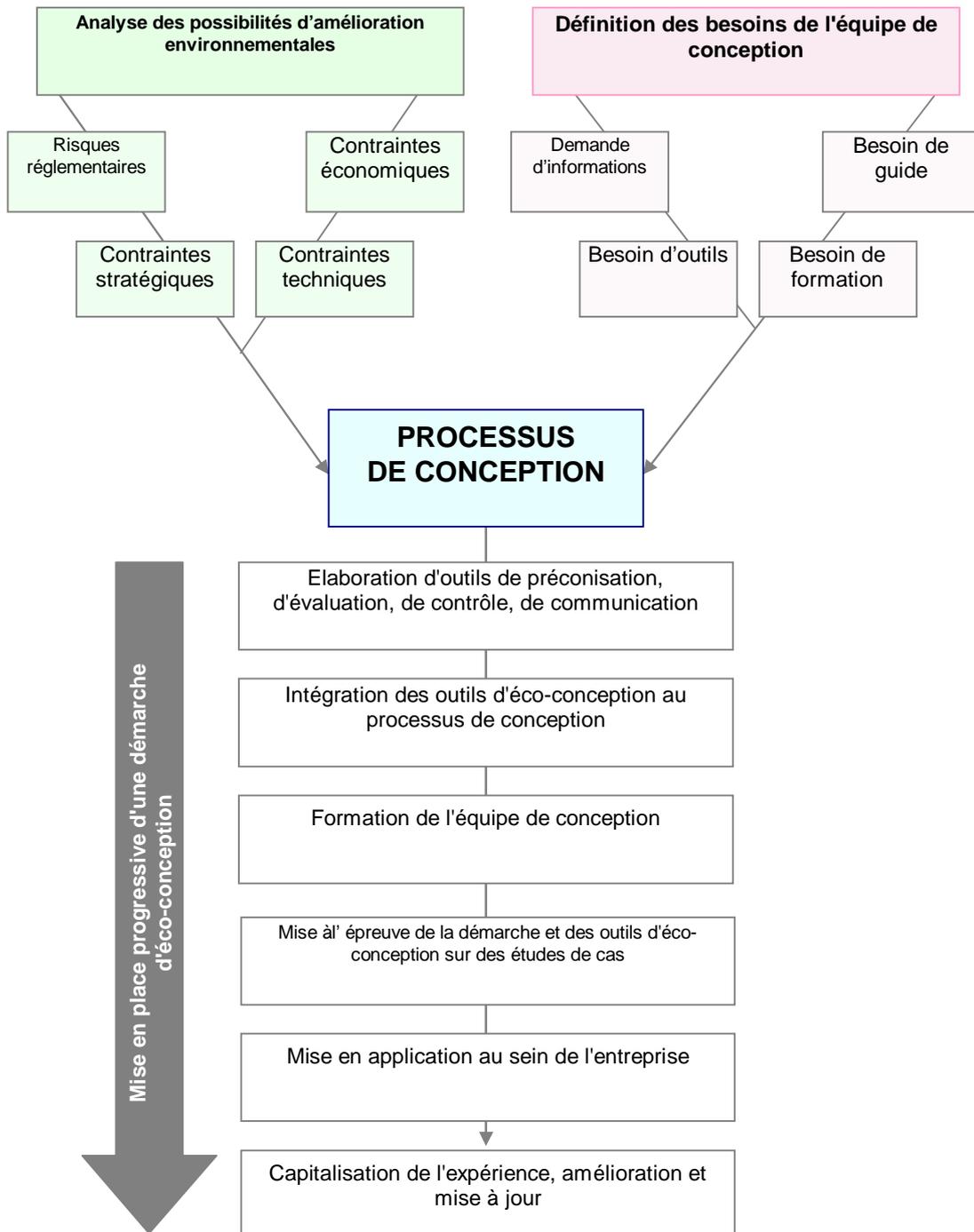


Figure 37. Intégration de l'éco-conception dans le processus de conception

3.4.2.1. La phase de lancement de projet

La mise en place en amont de la conception se fait principalement par la mise en place de restrictions environnementales valables pour l'ensemble des produits. Ces obligations doivent être intégrées dans le cahier des charges technique et peuvent concerner par exemple:

- l'interdiction d'utilisation de certaines substances toxiques (voir liste des substances interdites),
- l'obligation d'introduction d'un système de récupération d'effluents liquides ou gazeux tel que le SF6,
- l'obligation d'atteindre un taux de recyclabilité minimal.

Pour certains produits, il est possible d'introduire des clauses spécifiques par exemple ne pas utiliser de SF6, concevoir un produit complètement démontable, ne pas dépasser une certaine masse et/ou volume, etc.

La direction de l'entreprise joue un rôle très important durant cette phase. Elle a en charge le choix des obligations environnementales et leur application. Ces obligations doivent être introduites dans le cahier des charges technique afin d'assurer une plus grande efficacité.

Nous admettons qu'il existe trois niveaux de restrictions environnementales :

- Les restrictions réglementaires et les demandes des clients qui sont de premier ordre et incontournables dans le cahier des charges,
- Les restrictions internes à l'entreprise qui constituent une base de référence pour les choix environnementaux mais qui peuvent être ponctuellement transgressées par l'équipe de conception à cause de certains problèmes techniques ou environnementaux. Une dérogation est alors obligatoire pour le développement du produit,
- Les recommandations ou préconisations de la direction qui forment un ensemble d'objectifs environnementaux à atteindre sans aucune pénalité en cas de non respect de ces objectifs.

A ce jour, seule la réglementation REACH est appliquée aux appareillages de moyenne tension. Nous pensons qu'en prévention d'un éventuel élargissement des directives européennes DEEE et RoHS aux appareillages électriques professionnels, il est nécessaire d'instaurer deux règles de conception intégrées à tous les cahiers des charges :

- La première obligatoire : interdire l'utilisation de toutes les substances dangereuses de la directive RoHS,
- La deuxième incitative : atteindre un niveau de recyclabilité > 75% pour tous les produits (Cf §2.4.4.4).

Ces restrictions sont amenées à évoluer selon les modifications de la réglementation, de la demande des clients et du niveau d'intégration dans la conception des nouveaux produits. L'objectif est d'initier la réflexion environnementale avant même le début de la conception. L'application des règles d'éco-conception doit être suivie et contrôlée de la même manière que le cahier des charges technique et économique.

3.4.2.2. La phase de conception générale

L'introduction de l'éco-conception durant cette phase peut se faire par la mise à disposition des concepteurs de conseils en conception tenant compte des paramètres environnementaux, tels que :

- Utiliser des matériaux recyclés et recyclables : métaux, thermoplastiques, etc.
- Utiliser des matériaux compatibles pour le tri et le recyclage,
- Penser au marquage des pièces en plastique et des cartes électroniques,
- Favoriser les liaisons facilement démontables : vissage, emboîtement, etc.
- Compacter et alléger le produit : penser au transport et à l'installation,
- Réduire la consommation énergétique : optimiser le choix des matériaux et le dimensionnement des conducteurs,
- Penser au procédé de fabrication au moment de la conception : simple et écologique.

La mise en application de ces règles est tributaire du niveau d'intégration des risques environnementaux par l'équipe de conception. Nous pensons qu'il est plus facile de faire adhérer les concepteurs sensibilisés aux problématiques écologiques à notre approche d'éco-conception. C'est pour cela que nous conseillons d'organiser des sessions de formation en éco-conception pour tous les acteurs qui participent directement ou indirectement à la conception. Un guide d'éco-conception doit être mis à la disposition de l'équipe de conception. Ce guide sert de support de référence pour orienter les choix généraux de conception. Toutefois, nous remarquons que ce type d'outil est rapidement dépassé étant donné qu'il n'est pas dynamique ni évolutif. Il joue un rôle important au début de la mise en place d'une démarche d'éco-conception dans une entreprise mais ce rôle diminue au fur et à mesure de l'appropriation des règles d'éco-conception par l'équipe de conception. C'est pour cela que nous ne mettons pas l'accent sur ce type d'outils.

Par ailleurs, une première évaluation environnementale sommaire pourrait être réalisée dès cette phase afin de réduire le nombre de solutions de conception et de s'orienter vers les solutions les plus écologiques.

3.4.2.3. La phase de conception détaillée

Durant cette phase, les concepteurs sont confrontés à plusieurs options. Généralement, ils doivent choisir entre plusieurs matériaux, procédés de fabrication et modes de fixation. L'étude de cas concrets de conception a montré que les concepteurs n'ont pas les outils nécessaires pour faire la sélection "écologique" de ces éléments. Exemple : une pièce d'isolation diélectrique peut être fabriquée en céramique, en thermodurcissable, en thermoplastique ou en bois. A chaque matériau correspondent un design et un mode de fabrication différents. Le choix se complique si les différents systèmes sont techniquement et économiquement similaires. Dans ce cas, intervient l'expertise éco-conception pour réaliser une évaluation environnementale des produits et faire le meilleur choix.

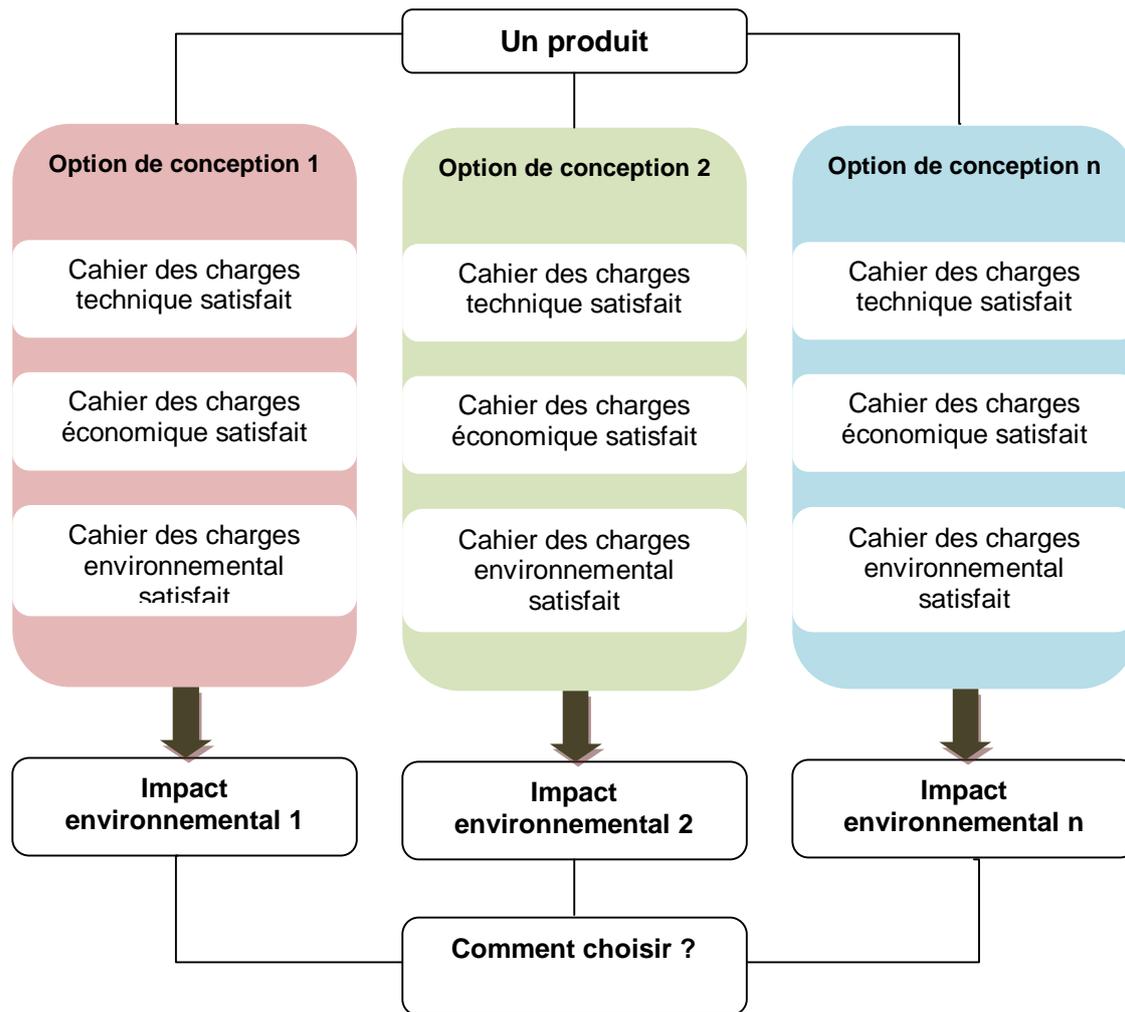


Figure 38. Prise de décision écologique pour les choix de conception

L'intervention de l'expert en éco-conception n'est pas toujours indispensable et peut même freiner l'autonomie des concepteurs et ralentir le développement. La solution consiste à faire une évaluation environnementale de tous les matériaux, procédés industriels et des modes d'assemblage utilisés chez AREVA T&D/DRC pour les appareillages moyenne tension et de préparer une base de données adaptée au bureau d'études.

Du point de vue du concepteur, l'obtention d'un paramètre unique pour l'évaluation de l'impact environnemental de son produit en parallèle avec les autres paramètres tels que le coût et les performances techniques devrait être le meilleur moyen pour faire de l'éco-conception [VAN DEN HOED 1997]. L'outil de sélection environnementale doit être simple d'utilisation et présenter des résultats accessibles aux utilisateurs. Ces résultats peuvent être soit sous forme numérique soit sous forme de rapport de synthèse soit une association des deux.

Les utilisateurs pourront sélectionner leurs données d'entrées à partir d'une base de données normalisée (matériaux, procédés, assemblage). Ce sont les mêmes données d'entrée qu'une ACV classique, sauf qu'elles se réfèrent aux données normalisées en entreprise, donc spécifiques à l'application étudiée et qui peuvent ne

pas exister dans la base de données environnementale des logiciels de modélisation.

Les données de sortie peuvent se présenter comme suit :

- un classement par impact sur l'environnement et par phase du cycle de vie,
- un classement général des produits,
- un rapport de synthèse avec des conseils de conception. Ce rapport présentera les avantages et les inconvénients des différents produits et avisera l'utilisateur des non conformités.

L'évaluation environnementale des matériaux et des procédés de fabrication peut se faire selon différentes méthodes se basant soit sur la quantité des rejets dans la nature, soit la toxicité des matériaux utilisés, soit la consommation énergétique, soit la consommation des ressources naturelles soit une association de plusieurs paramètres [JINCHENG 2001]. Le choix des indicateurs environnementaux sera fixé ultérieurement.

3.4.2.4. La phase d'essais et de validation

Cette phase permet de valider les choix déjà effectués durant les phases précédentes de conception. Si le produit présente des défaillances, un retour sur la conception est obligatoire. Cette opération présente généralement un coût élevé car il faut reprendre toutes les étapes de conception et surtout développer ou modifier les prototypes. Les erreurs de conception sont généralement dues à une mauvaise définition du cahier des charges, des problèmes de calcul et de dessin, un manque d'expérience, un manque de moyens techniques, un nombre important d'inconnues, etc.

Au même titre que la validation technique, il est possible d'intégrer une validation écologique du produit à savoir une vérification du respect du cahier des charges mais aussi une évaluation des impacts environnementaux du produit. Nous préconisons d'intégrer cette procédure au moment des revues de projet et plus particulièrement au moment de la validation du produit pour le lancement en production. Cette vérification peut se faire à travers des check-lists ou des supports de contrôle équivalents et dans certains cas, une phase d'essai est nécessaire pour vérifier la conformité environnementale du produit. Tel est le cas des tests de mesure du taux de fuite de gaz ou d'huile ou des niveaux de rayonnement X.

La mise en place d'une démarche d'éco-conception ne doit pas poser de difficultés particulières à l'équipe de conception. Nous conseillons d'abord de relever les non conformités environnementales et de les mentionner dans les comptes rendus des revues de projets. La deuxième étape consiste à demander un plan d'action correctif des produits non conformes. La dernière étape consiste à interdire la fabrication des produits qui ne respectent pas le cahier des charges environnemental au même titre que le cahier des charges technique. L'organisation chronologique de ces étapes revient à la direction de l'entreprise.

3.4.2.5. La phase de contrôle et de capitalisation

La mise en place d'une procédure de contrôle de l'application de la démarche d'éco-conception permet de vérifier le respect de cette démarche et d'y apporter les améliorations nécessaires. Des corrections peuvent être demandées au bureau d'études afin d'optimiser le produit.

Par ailleurs, nous avons remarqué qu'il n'existait pas de système fiable de capitalisation des savoir faire technique et environnemental acquis au cours de projets de développement. Nous avons donc introduit dans notre démarche, cette fonction transversale qui peut être utilisée par tous les acteurs de l'entreprise. Cela permet d'éviter la perte de certaines connaissances liées à un nombre réduit de personnes.

D'une manière générale, un retour sur l'expérience est nécessaire pour engager un système d'amélioration continue de notre démarche d'éco-conception. L'observation de différents projets de conception permet de mesurer l'appropriation de cette démarche par l'équipe de conception et de mettre à jour et de corriger les outils utilisés.

3.4.3. Synthèse des possibilités d'intégration des paramètres environnementaux dans le processus de conception de AREVA T&D/DRC

La figure suivante résume notre proposition d'intégration des paramètres environnementaux dans le processus de conception et les outils d'éco-conception associés. Notre intérêt sera porté à la phase de conception détaillée. Nous admettons que c'est au cours de cette phase que nous avons la plus forte valeur ajoutée.

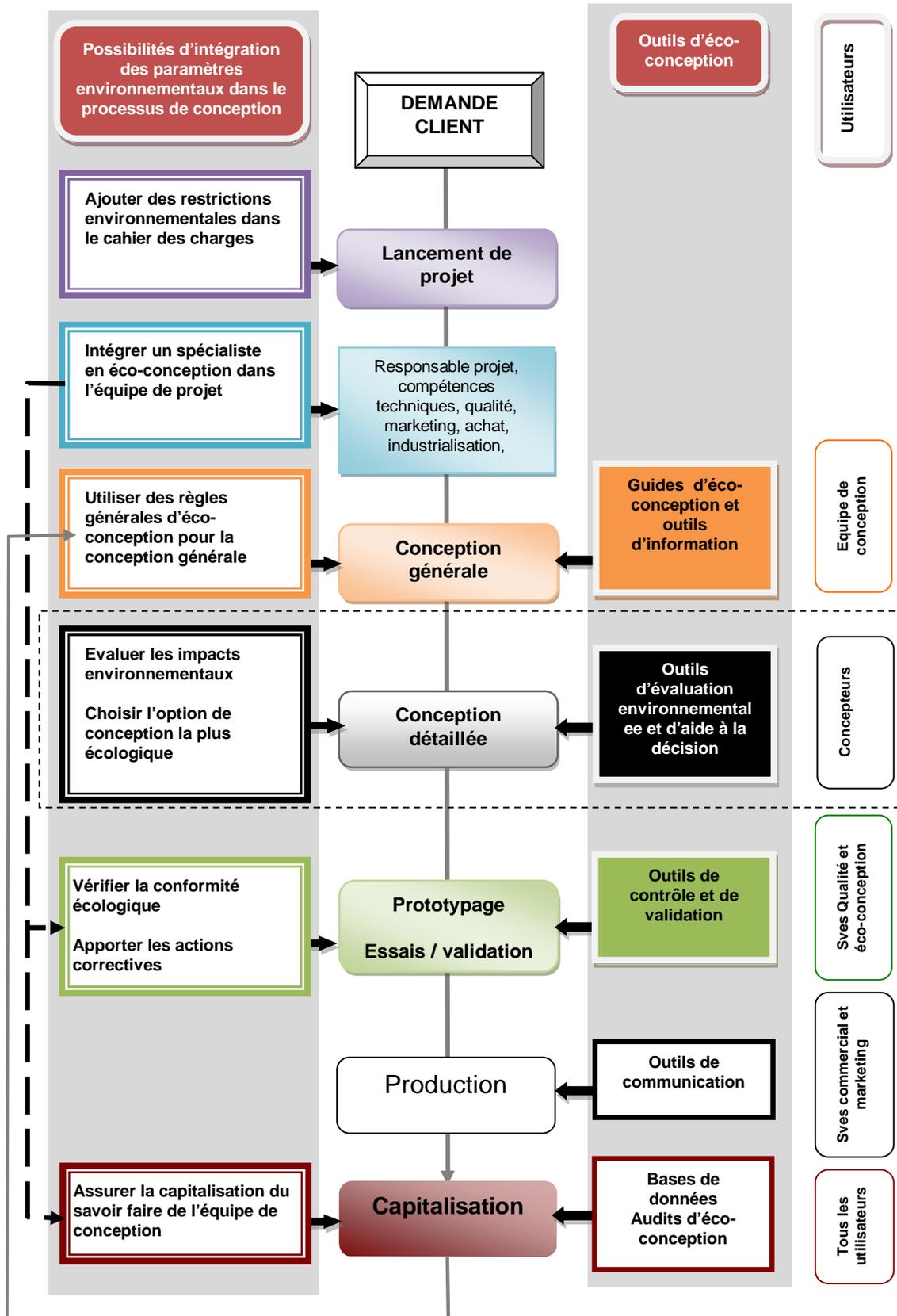


Figure 39. Synthèse des possibilités d'intégration des paramètres environnementaux dans le processus de conception

D'une manière plus générale nous diviserons notre processus de conception en trois phases :

Phase de « avant conception », phase de « conception » et phase de « après conception ». Dans la phase « avant conception », nous défendons deux approches complémentaires : une approche restrictive pour forcer certains choix de conception et une approche informative pour acquérir les connaissances de base en environnement.

Dans l'approche restrictive, nous fixons des règles d'éco-conception dès la phase d'élaboration du cahier des charges. En plus des caractéristiques techniques et des contraintes économiques, nous ajoutons des restrictions environnementales. Il peut exister des interdictions générales telles que l'utilisation de substances toxiques ou plus spécifiques telles que la limitation de certains gaz ou huiles. Cette première étape permet déjà d'orienter le concepteur vers des solutions techniques différentes. Ceci peut se traduire par un changement de matière, de design ou même de technologie. Toutefois, cette démarche restrictive ne peut pas fonctionner correctement si elle n'est pas accompagnée d'une approche informative. En effet, il est très important de former les personnes impliquées dans les projets de développement à l'éco-conception. Il ne s'agit pas là d'une formation approfondie de longue durée mais d'une formation appropriée qui traite des points suivants :

- Les effets éco-toxicologiques des substances utilisées,
- Les impacts sur l'environnement des procédés de fabrication,
- Les problèmes de gestion de la fin de vie,
- Le coût « environnemental ».

Cette formation permet de sensibiliser les concepteurs aux problèmes écologiques et les aiderait à mieux adopter les restrictions environnementales. Cela permet aussi de préparer le bureau d'études à intégrer les outils d'éco-conception dans sa base d'outils de conception.

Dans la phase de conception, nous pensons que pour certains projets complexes la présence d'un expert en éco-conception est indispensable. Il s'agit d'intégrer à l'équipe de développement une compétence transversale qui assiste l'équipe de conception pour améliorer son rendement écologique. Cette approche est intéressante et présente néanmoins plusieurs inconvénients :

- les coûts supplémentaires engendrés par la présence d'experts en éco-conception dans tous les projets de conception,
- le ralentissement du processus de conception,
- le renforcement du clivage entre les concepteurs et l'éco-conception.

Dans la pratique, il s'avère qu'il est impossible d'initier une approche « experte » uniquement. C'est pour cela que nous proposons une approche « simplifiée » destinée aux concepteurs. Cette approche doit être adaptée aux besoins du bureau d'études et aux produits développés. Les deux approches « experte » et « simplifiée » peuvent coexister pour un même projet de conception.

A la fin de la conception, il est nécessaire de pouvoir contrôler le produit conçu par rapport au cahier des charges initial et de mesurer les écarts éventuels.

Aussi, il est recommandé de comparer le produit final avec d'autres produits anciens ou de la concurrence afin de mesurer l'efficacité du système d'éco-conception utilisé. Enfin, le résultat de ces approches « vérificatives » et « comparatives » permet d'apporter des améliorations environnementales sur le produit. La figure suivante résume la répartition de ces phases de conception :

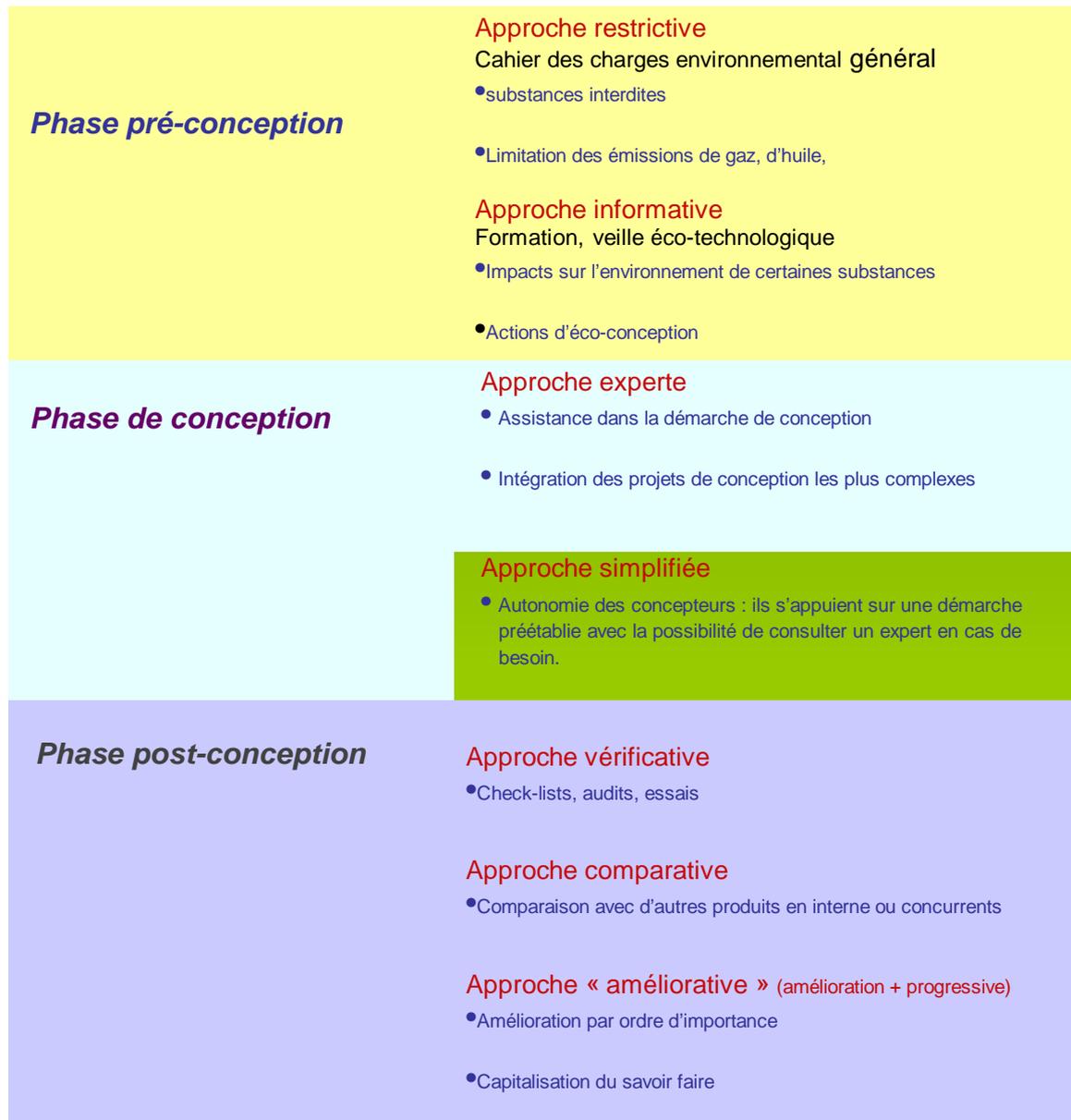


Figure 40. Approches d'éco-conception pendant les phases de conception

3.5. CONCLUSION

L'intégration de l'éco-conception dans le processus de conception des appareillages moyenne tension ne nécessite pas un changement radical de l'approche de conception actuelle. Il s'agit de mettre en place une stratégie d'éco-conception en adéquation avec la stratégie existante. Des paramètres environnementaux sont introduits dans toutes les étapes du processus de conception et selon le degré d'évolution du projet.

La stratégie de l'entreprise et la réglementation sont prioritaires. Leur application est obligatoire dans tous les nouveaux produits. Elles doivent apparaître en amont de chaque projet de conception et être intégrées au cahier des charges du produit. Ces restrictions peuvent être à l'origine du développement d'un nouveau produit soit suite à une demande de client, soit suite à l'application d'une nouvelle réglementation.

La deuxième phase d'intégration se base sur un ensemble de règles d'éco-conception à mettre à disposition de l'équipe de conception. Ces règles concernent les bonnes pratiques environnementales relatives au choix des matières, à l'assemblage, au recyclage, etc.

La troisième phase de la démarche d'éco-conception consiste en l'intégration d'un outil d'aide à la décision mis à disposition des concepteurs pour l'évaluation environnementale des différentes options de conception et la comparaison de ces options.

La quatrième phase est relative à l'intégration d'essais de validation environnementale relatifs à la toxicité et à la gestion de fin de vie et l'évaluation environnementale du produit.

La dernière phase est une phase de capitalisation du savoir faire et de contrôle du bon déroulement de la démarche d'éco-conception tant au niveau de l'approche que du résultat.

Toutes ces phases seront révisées lors des revues de projet de développement.

L'application de cette démarche permet de prendre en considération les paramètres environnementaux dès la première phase de conception. Elle se base sur l'amélioration du processus actuel de conception et la satisfaction des besoins de l'équipe de conception. Cette approche doit être accompagnée par une formation en éco-conception adaptée à tous les intervenants dans les projets de conception.

Nous avons constaté que la phase de conception qui présente une forte marge d'amélioration est la phase de conception détaillée. Durant cette phase, les concepteurs font face à des choix précis de conception : la forme de la pièce, la matière et le mode d'assemblage sont pratiquement définis. Toutefois, plusieurs options de conception peuvent se présenter au concepteur. Jusqu'à maintenant le concepteur se contentait de sélectionner l'option qui présente une performance technique satisfaisante au meilleur coût. Le critère écologique ne rentrait pas en ligne de compte. Nous proposons, alors, un outil simplifié qui permet au concepteur d'intégrer le paramètre environnemental dans sa sélection. Dans le quatrième chapitre, nous présenterons cet outil d'aide à l'éco-conception des appareillages électriques de moyenne tension.

CHAPITRE 4 : DEVELOPPEMENT DE L'OUTIL D'ECO-CONCEPTION

*Simplifié, consolidé et adapté aux équipements
électriques de moyenne tension*

4. CHAPITRE 4 : DEVELOPPEMENT DE L'OUTIL D'ECO-CONCEPTION

Simplifié, consolidé et adapté aux équipements électriques de moyenne tension

4.1. INTRODUCTION

Dans le troisième chapitre nous avons présenté notre proposition d'intégration des paramètres environnementaux dans le processus de conception des appareillages de moyenne tension. Il y apparaissait un besoin d'outils spécifiques d'aide à l'éco-conception, d'évaluation, de communication environnementales et d'audits de projets de conception. Dans ce chapitre nous présentons les outils que nous avons développés et mis en place au sein de l'équipe de conception.

En première partie, nous exposerons notre cahier des charges relatif aux outils d'éco-conception qui répondent aux besoins de l'équipe de conception. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous ferons un état de l'art succinct d'outils existants dont nous identifierons les limites et les avantages. Il s'agit de montrer le besoin de nouveaux outils appropriés et les améliorations éventuelles à apporter à des outils existants afin de répondre aux besoins spécifiques de notre méthode. En troisième partie, nous présenterons les outils développés afin de répondre à notre cahier des charges initial. Nous nous intéressons plus particulièrement au développement d'un outil d'aide à l'éco-conception qui intègre à la fois une assistance technique, réglementaire, économique et environnementale. L'objectif de ce travail n'étant pas de développer un outil d'éco-conception de plus mais d'adapter des outils existants afin de créer un outil intégré qui répond à un besoin industriel identifié.

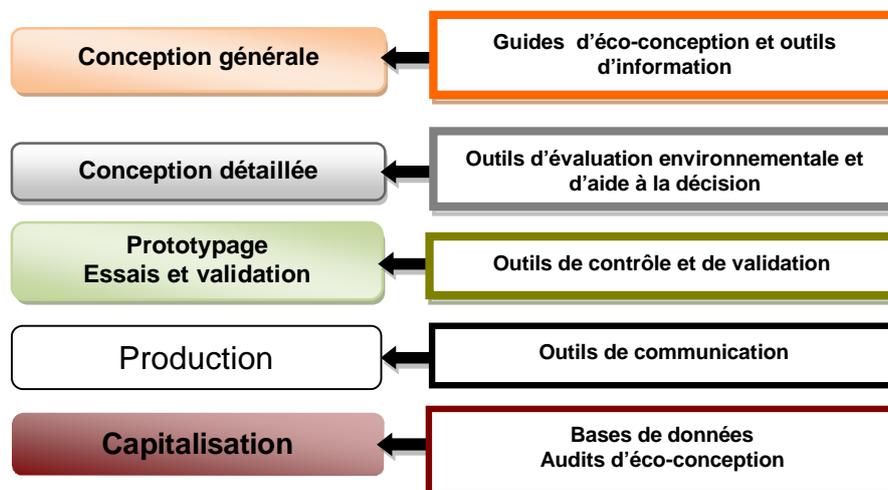


Figure 41. Besoins en outils d'éco-conception

4.2. CAHIER DES CHARGES DES OUTILS D'ECO-CONCEPTION

Dans ce paragraphe, nous présenterons notre cahier des charges relatif à trois outils principaux d'éco-conception :

- Un guide d'éco-conception
- Un outil de communication
- Un outil d'aide à la décision environnementale

L'objectif étant d'intégrer ces différents outils en un seul et unique outil d'aide à l'éco-conception qui réponde aux différents membres de l'équipe de conception. Nous avons ainsi développé différents outils d'éco-conception destinés aux différents acteurs de l'équipe de conception. Au fur et à mesure, nous nous sommes rendu compte que le premier concerné, le concepteur, n'en faisait pas bon usage comme il le devait. Afin de créer une synergie de travail autour de l'éco-conception et d'en faciliter l'accès aux « simples » concepteurs, nous avons jugé utile de regrouper ces outils en un outil simplifié d'aide à l'éco-conception. Nous allons décrire le cahier des charges de chacun des outils développés afin de construire l'outil final.

4.2.1. Cahier des charges du guide d'éco-conception

Le guide d'éco-conception doit apporter les informations nécessaires à tous les acteurs de l'entreprise pour initier une démarche d'éco-conception. Il doit contenir :

- La définition et les principes de l'éco-conception,
- La politique environnementale de l'entreprise,
- Les règles d'or de l'éco-conception,
- Une veille réglementaire normative,
- Des outils d'éco-conception,
- Une méthodologie de gestion en fin de vie,
- Des exemples d'éco-conception,
- Des ressources bibliographiques supplémentaires.

Ces informations doivent être accessibles aux utilisateurs n'ayant pas de formation environnementale tout en gardant un bon niveau technique.

4.2.2. Cahier des charges de l'outil de communication

L'outil de communication environnementale doit permettre de présenter les performances environnementales standards relatives au produit à savoir :

- Le bilan des matériaux,
- L'énergie consommée,
- Le bilan des substances toxiques,

- Le pourcentage des matériaux recyclables,
- Le taux de mise en décharge,
- Les économies (matière, énergie,...) réalisées par rapport à d'autres produits.

Ces outils doivent présenter des résultats clairs et simples basés sur des évaluations environnementales consolidées.

4.2.3. Cahier des charges de l'outil d'aide à l'éco-conception

Cet outil est l'outil principal de notre démarche d'éco-conception. Nous souhaitons élaborer un outil d'aide à l'éco-conception destiné essentiellement au concepteur. Cet outil doit permettre à l'utilisateur de faire le choix entre plusieurs options de conception, basé sur des critères techniques, environnementaux et économiques.

Notre outil doit répondre aux exigences suivantes :

Intégration : cet outil doit s'intégrer dans la démarche de conception utilisée au sein du bureau d'études. L'utilisation de cet outil doit être possible dès les premières phases de conception et tout au long du processus de développement. La terminologie utilisée doit correspondre à la terminologie en place. L'outil doit être intégrable dans les outils de conception et de calcul de coût existants.

Multifonctionnalité : cet outil doit être multifonctionnel : technique, environnemental, réglementaire et économique. Il sert à la fois d'outil d'information, de communication, d'assistance technique et d'aide à la décision.

Rapidité et facilité : l'outil développé doit être facile à prendre en main par l'utilisateur. L'accès aux informations et le calcul des résultats doivent être rapides. Dans le cas contraire, l'outil risque de ne pas être utilisé par l'équipe de conception. La mise à jour ainsi que la modification des bases de données et des modes de calcul doivent être aisées et restreintes à un administrateur.

Données de qualité: les données techniques, environnementales et économiques doivent être d'une très bonne qualité afin de garantir un résultat proche de la réalité. La qualité des données dépend de leur écart avec les données réelles et de leur exhaustivité. Les données mesurées ou calculées selon des méthodes scientifiques et techniques approuvées sont les données les plus fiables.

Communication et marketing : l'outil doit permettre de communiquer en interne et avec les différentes parties prenantes de l'entreprise sur les performances environnementales de leurs produits. Ce support devra aussi permettre de générer automatiquement un rapport environnemental standard.

Ressources : cet outil doit fournir un support bibliographique au concepteur afin d'enrichir ses connaissances en éco-conception : sites internet, articles, exemples d'éco-conception, normes, notes internes, ...

4.3. ETAT DE L'ART DES OUTILS D'ECO-CONCEPTION

Une multitude d'outils d'éco-conception ont été développés pour aider les entreprises à intégrer l'éco-conception dans leur démarche de conception. Différentes études ont classé ces outils en différentes catégories. Nous retiendrons celles de KORTMAN et al. (1995), SWEATMAN et al. (1996), VAN BERKEL (1997), LENOX et al. (1997), DE CALUWE (1997), SIMON et al. (1998), BEY (2000), JANIN (2000), BAUMAN et al. (2002), TISCHNER (2003), DEWULF (2003) et LEPOCHAT (2005). BAUMAN recense plus de 150 outils d'éco-conception de six différentes catégories :

- outils d'analyse structurelle,
- check-lists,
- logiciels d'aide à l'éco-conception,
- systèmes experts,
- outils organisationnels,
- outils de hiérarchisation et de classement.

Il est à noter que de nombreux outils sont développés en interne par des entreprises afin de répondre à leurs besoins spécifiques ou pour des raisons économiques. Toutefois, l'information autour de ces outils est réduite et il est donc difficile de les présenter dans notre état de l'art.

Dans ce paragraphe nous ne présentons qu'une partie de ces outils et plus particulièrement ceux qui nous intéressent dans notre démarche à savoir :

- les guides d'éco-conception,
- les outils de communication environnementale,
- les outils d'évaluation environnementale.

4.3.1. Guides d'éco-conception

Dans ce paragraphe, nous décrivons succinctement un ensemble de guides et supports d'éco-conception sur lesquels nous nous sommes basés pour l'élaboration de notre méthodologie. Chaque entreprise élabore un guide d'éco-conception qui répond à son besoin, l'objectif étant, en général, d'orienter l'équipe de conception vers une prise en compte progressive des critères environnementaux lors de la conception des produits.

4.3.1.1. L'ISO/TR 14062 (2002)

L'Iso/TR 14062 décrit les concepts et pratiques ayant trait à l'intégration des aspects environnementaux à travers les six étapes du processus de conception et de développement du produit : planification, conception préliminaire, conception détaillée, essais/prototype, lancement sur le marché et revue du produit.

Ce rapport technique a pour objectif de stimuler la créativité et l'innovation en vue d'apporter des améliorations environnementales aux biens et services.

Il est destiné à toutes les catégories d'entreprises indépendamment de leur taille, leur localisation et le produit qu'elles développent.

4.3.1.2. Le guide ECMA (Standard ECMA-341, 2002)

Le guide ECMA (European Computer Manufacturers Association) identifie les pratiques d'éco-conception relatives aux technologies de l'information et de communication et aux produits électriques et électroniques de grande consommation dont la tension est inférieure à 1000 V en courant continu. Ce guide, sous forme de norme, spécifie les besoins et les recommandations pour une conception commercialement viable et respectueuse de l'environnement. Il couvre les aspects environnementaux suivants : consommation d'énergie, épuisement des ressources, sélection des matériaux, extension de la durée de vie et la gestion en fin de vie. Il propose aussi une check-list qui permet d'évaluer le profil environnemental des produits électriques. Cette norme reprend les principes de la norme ISO 14062 sans intégrer pour autant les considérations relatives aux procédés.

4.3.1.3. Eco-design guide (ECOLIFE 2002)

Ce rapport est un guide des bonnes pratiques d'éco-conception à travers des études de cas d'équipements électriques et électroniques. Des exemples de bonnes pratiques d'éco-conception sont présentés afin d'inspirer les concepteurs travaillant dans ce domaine. Certains exemples sont incomplets et d'autres ne sont pas convaincants mais l'approche nous paraît très intéressante pour l'équipe de conception. C'est pourquoi nous avons adopté ce type d'apprentissage par l'exemple lors des sessions de formation organisées pour les concepteurs. Par ailleurs, ce guide contient une bibliographie intéressante relative à la conception écologique.

4.3.1.4. Environmentally Oriented Product Design (Federation of Finnish Electrical and Electronics Industry 1998)

Ce guide en conception orientée vers l'environnement est élaboré comme un sous-projet du projet EU ADAPT (assistance des PME membres de la « supply chain » pour adopter une démarche environnementale). L'objectif était de présenter les principes généraux de l'éco-conception et des règles essentielles à l'intégration de l'éco-conception dans la démarche de conception. Ce rapport sert de support pour des formations en éco-conception orientées vers l'industrie électrique et électroniques.

4.3.1.5. Module de sensibilisation à l'éco-conception (MEDD et ADEME 2001)

C'est un module sous forme de présentation qui sert de support de formation pour sensibiliser et former l'équipe de conception aux pratiques de l'éco-conception. Des modules complémentaires existent afin de répondre d'une manière plus détaillée à des thématiques spécifiques (substances dangereuses, marquage, etc.).

4.3.1.6. Eco-conscious design of electrical and electronic equipment (IPU, DTC et GN-Teknik, 2005)

Cet outil essaie de répondre aux besoins des entreprises du secteur électrique et électronique qui initient une démarche d'éco-conception. Il contient les rubriques suivantes : une formation basique relative à l'interaction des produits avec l'environnement, une rubrique qui concerne les actions et les responsabilités liées à l'éco-conception et des exemples relatifs à l'évaluation environnementale des produits, des règles de prise en compte de l'environnement lors de la conception des appareillages électriques et électroniques (choix de matières, fabrication, fin de vie), une information sur les contraintes réglementaires, une rubrique sur l'évaluation et l'élimination des substances dangereuses et un calculateur environnemental qui permet une évaluation rapide du disjoncteur isolé aux premiers stades de la conception.

4.3.1.7. A Guide for EcoDesign Tools (IZM 2005)

Ce guide présente une sélection d'outils d'éco-conception spécifiques au secteur électrique et électronique. Il fournit également un certain nombre de liens internet pour des outils en libre service en ligne et des ressources bibliographiques supplémentaires. L'avantage de ce guide est qu'il décrit d'une manière succincte les outils principaux d'éco-conception et reste très accessible au concepteur. Toutefois, ce guide ne suffit pas pour mettre en pratique les outils présentés. Nous nous sommes servis de ce guide pour étoffer les formations en éco-conception organisées pour l'équipe de conception.

4.3.1.8. Conclusions

Le tableau suivant présente une synthèse des guides d'éco-conception décrits dans le paragraphe précédent :

Guide	Thème	Secteur	Commentaires
L'ISO/TR 14062	Intégration de l'éco-conception dans la conception	Tous produits	Il manque les outils associés à chaque étape de conception
Le guide ECMA	Bonnes pratiques d'éco-conception. Axé sur les matériaux et la fin de vie	Produits électriques et électroniques et technologies de l'information	Ces pratiques sont applicables aux appareillages de moyenne tension.
Eco-design guide (ECOLIFE 2002)	Exemples de bonnes pratiques d'éco-conception. Ressources bibliographiques	Produits électriques et électroniques	Il n'existe pas d'exemples qui concernent nos produits.
Environmentally Oriented Product Design	Principes généraux de l'éco-conception et des règles essentielles à l'intégration de l'éco-conception dans la démarche de conception	Produits électriques et électroniques	Très général. Ne contient pas les outils d'éco-conception et les intervenants au niveau de chaque étape.
Module de sensibilisation à l'éco-conception de l'ADEME	Support de formation pour l'équipe de conception aux pratiques de l'éco-conception	Produits électriques et électroniques	Très général mais contient les connaissances essentielles en éco-conception.
Eco-conscious design of electrical and electronic equipment	Guide complet sur les règles d'éco-conception, la réglementation, des exemples d'éco-conception, outil d'évaluation environnementale	Produits électriques et électroniques	Riche en informations. Présente un outil simplifié d'évaluation environnementale qui ne répond pas à notre cahier des charges.
A Guide for EcoDesign Tools	Présentation des principaux outils d'éco-conception	Tous produits	Une bonne synthèse des outils d'éco-conception mais ne guide pas le concepteur dans le choix et l'utilisation de ces guide.

Tableau 7. Synthèse des guides d'éco-conception

Il existe une multitude de guides d'éco-conception plus ou moins orientés, par secteur et plus ou moins détaillés mais une forte similitude existe entre eux. En effet, ils contiennent des informations nécessaires au concepteur pour la mise en pratique de l'éco-conception : les règles essentielles d'éco-conception, les outils d'éco-conception, une veille réglementaire, des exemples, des ressources bibliographiques, etc.

La différence majeure demeure dans le choix des outils d'éco-conception proposés à l'équipe de conception. Nous estimons que ce type de guide est primordial dans la mise en place d'une démarche d'éco-conception. C'est pour cela que nous avons élaboré notre propre « guide vert » destiné à l'équipe de conception de AREVA T&D/DRC. Ce guide est présenté plus en détail dans la deuxième partie de ce chapitre.

4.3.2. Les outils de communication environnementale

Comme indiqué dans le deuxième chapitre, les services environnement, commercial et marketing ont besoin d'outils de communication environnementale. Ces outils doivent leur permettre de présenter les avantages écologiques de leurs produits et les actions d'éco-conception de l'entreprise. En effet, ces derniers sont utilisés auprès des clients, des fournisseurs, des recycleurs, au grand public, etc. Nous allons présenter brièvement un ensemble d'outils utilisés dans l'industrie. L'objectif étant de développer notre propre outil de communication environnementale.

4.3.2.1. Déclaration Environnementale de Produit

Cet outil a été développé par VOLVO pour communiquer sur les performances environnementales de ses produits. Ce document est scindé en deux parties ; la première partie décrit le système de management environnemental de Volvo et la deuxième présente les impacts environnementaux durant le cycle de vie de ses véhicules. Depuis, ce type de document a été utilisé par un grand nombre d'entreprises et plus particulièrement dans les domaines de l'automobile et de l'électricité.

Cette démarche est intéressante car elle incite l'industriel à réfléchir sur la pollution engendrée par son produit et les éventuelles possibilités d'amélioration. Elle lui permet, par ailleurs, de valoriser ses efforts en termes de conception écologique. Néanmoins, cet outil se base sur des données propres au fabricant ne subissent aucune vérification extérieure. Il n'existe pas non plus de format standard et harmonisé entre les différents industriels. Pour encadrer l'utilisation des auto-déclarations environnementales, l'ISO a publié les normes 14020, 14021, 14024 et 14025. Ces normes d'applications volontaires rappellent les principes généraux de pertinence, de sincérité et d'exactitude que toute auto-déclaration environnementale est censée respecter.

4.3.2.2. Product-related environmental attributes (ECMA TR/70, 1997)

Ce rapport technique, développé par l'ECMA, fournit un type "d'éco-langage" concernant les produits électroniques qui permet de partager le même langage avec les différents interlocuteurs. Il est ainsi focalisé sur la rédaction d'une auto-déclaration des fabricants leur permettant de communiquer aux clients et aux recycleurs des informations environnementales sur leurs produits : consommation d'énergie, émissions chimiques, substances dangereuses, types de batterie, facilité de désassemblage, précautions de démontage, marquage, etc. Ce document est en cohérence avec les normes sur les auto-déclarations de la série Iso14020.

4.3.2.3. Roue des Stratégies d'Eco-Conception

La roue des stratégies d'éco-conception ou Eco-Wheel permet aux responsables de l'entreprise de communiquer sur la stratégie environnementale et les actions à engager. Ci-dessous un exemple de Eco-Wheel du cabinet O2 :

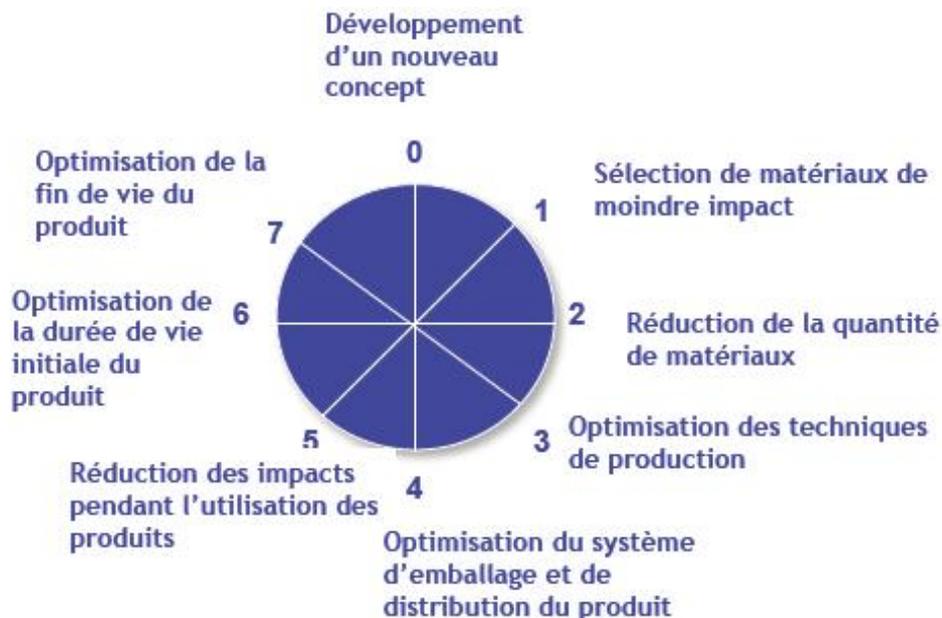


Figure 42. Exemple de Eco-Wheel présenté par le cabinet de conseil O2

Source : [Éco-design, colloque Offensiv/PME - CCI 79 \(2006\)](#)

4.3.2.4. Rapport de développement durable

C'est un rapport annuel complet qui présente le programme de développement durable de l'entreprise. Ce rapport contient entre autres les performances environnementales et les actions menées et à venir pour la réduction de la pollution et la protection de l'environnement. Depuis peu, bon nombre d'entreprises intègrent dans leurs rapports une rubrique relative à l'éco-conception des produits. Ce type de document est généralement réalisé par un cabinet de contrôle extérieur afin de rendre plus transparents et plus crédibles les résultats affichés.

4.3.2.5. Les écolabels

Les écolabels peuvent constituer un outil de communication direct auprès des clients. Ils permettent de confirmer le caractère « respectueux de l'environnement » du produit labellisé. Ils sont mis en place par les pouvoirs publics et garantissent à la fois la qualité d'usage d'un produit et ses caractéristiques écologiques. La labellisation requiert un contrôle par une tierce partie et doit répondre à un cahier des charges préétabli fixant des critères pour la catégorie de produit considérée ; l'élaboration des cahiers des charges fait appel aux différentes parties intéressées (professionnels, associations, pouvoirs publics...). Les écolabels les plus courants sont l'écolabel européen, NF-Environnement en France, l'Ange Bleu en Allemagne, Eco Mark au Japon, Cygne Blanc pour les pays nordiques, etc.

4.3.2.6. Conclusion

Nous avons présenté quelques outils de communication environnementale mais plusieurs entreprises et groupement d'intérêt ont élaboré leurs propres modèles de communication. Ceci permet d'offrir aux clients une information homogène qui leur permet de comparer les avantages et les impacts écologiques de deux ou plusieurs produits proposés par des fournisseurs différents. Tel est le cas de l'étiquetage des appareillages électriques concernant la consommation d'électricité et d'eau et le niveau de bruit. Dans le secteur du bâtiment, il existe un travail en cours, d'un groupe français, qui vise à établir une liste des avantages écologiques des composants standards utilisés dans le secteur afin d'utiliser la même base pour comparer la qualité environnementale des produits. En attendant que de telles approches se mettent en place, nous préconisons d'utiliser des auto-déclarations environnementales basées sur des études scientifiques et des méthodes approuvées telle que l'ACV. Toutefois, nous appelons à la simplification et à l'harmonisation des données affichées dans ces documents afin qu'elles soient accessibles à l'utilisateur. Nous nous baserons sur la stratégie d'éco-conception élaborée pour proposer un outil simplifié de communication environnementale orientée produit.

4.3.3. Les outils d'évaluation environnementale

L'évaluation environnementale des produits permet d'identifier ses performances environnementales sur une ou plusieurs phases du cycle de vie. Le concepteur peut se servir de cette évaluation pour déterminer les axes d'amélioration des nouveaux produits. Il existe essentiellement des outils quantitatifs et des outils qualitatifs.

4.3.3.1. Outils d'évaluation environnementale quantitative

Analyse de Cycle de Vie

L'Analyse de Cycle de Vie est un outil qui permet la quantification des impacts environnementaux d'un produit, d'un procédé ou d'une activité sur l'ensemble de son cycle de vie. L'ACV est utilisée, dans le secteur industriel, depuis une vingtaine d'années et plus particulièrement depuis le début des années 90 où elle a été reconnue en tant que moyen d'aide à la décision. Cela se traduit notamment par l'intégration de l'ACV dans le système de management environnemental ISO 14000, dans le schéma européen d'éco-management et d'audit (EMAS) ainsi que la directive européenne du contrôle et de la prévention intégrée de la pollution (IPPC) [AZAPAGIC 1999]. L'ACV tire sa crédibilité du fait qu'elle modélise quantitativement les impacts environnementaux en se basant sur les données les plus réelles et exhaustives possibles.

Selon la norme ISO 14040, cette méthodologie se construit en quatre phases : objectifs, inventaire, analyse des impacts et interprétation.

1) Objectifs : Pour chaque système étudié il est indispensable de fixer les frontières et de définir l'objectif de l'évaluation environnementale, le principal but de l'ACV étant l'évaluation des impacts engendrés par les différents cycles de vie d'un même produit ou de produits concurrents.

La comparaison de différents systèmes se base sur la définition d'une unité fonctionnelle qui est définie avec précision à partir de l'objectif de l'étude, de son utilisation et de la fonction étudiée [ROUSEAUX 2005].

2) Inventaire : cette étape consiste à collecter toutes les données relatives aux flux entrants et sortants du système défini. Il peut s'agir de matières, d'énergie, de surface utilisée, de bruit, de rayonnement, etc. La réalisation de l'inventaire est une opération qui peut se faire par la recherche bibliographique, les mesures sur le terrain, le calcul ou les estimations d'experts. L'accent est mis sur la qualité des données utilisées, en grande partie responsables de la fiabilité des résultats obtenus [BLANC et al. 99]. Diverses bases de données environnementales ont été élaborées à des niveaux de qualité différents.

3) Analyse des impacts : il s'agit de traduire les flux en terme d'impacts environnementaux, généralement regroupés en deux catégories principales :

- impacts locaux : conséquences toxiques et écotoxiques, et nuisances telles que le bruit et les odeurs,
- impacts globaux : effet de serre, dégradation de la couche d'ozone, épuisement des ressources naturelles.

Les équipes de recherche à travers le monde ont développé diverses méthodes de calculs des impacts. Les plus utilisées étant les méthodes CML (Pays-Bas), EPS (Suède), Tellus (Etats-Unis), EDIP (SETAC), Eco-indicateurs (Pays-bas et Suisse), LUCAS (Canada) et Impact2002+ [JOLLIET et Al. 2005]. La plupart de ces méthodes se basent sur des outils informatisés qui facilitent le calcul et l'exploitation des résultats.

4) Interprétation : il s'agit d'exploiter les bilans environnementaux des produits analysés en vue de :

- sélection du produit le plus écologique,
- détermination des axes d'amélioration environnementale,
- communication,
- etc.

Il est important que la norme ISO14040 impose une revue critique de toutes les ACV comparatives publiques. Cela consiste en une expertise technique par une tierce partie indépendante des réalisateurs et commanditaires.

Limites des ACV

Les faiblesses des ACV demeurent liées à quatre paramètres principaux :

- La disponibilité et l'incertitude sur la qualité des données,
- La difficulté d'intégration des dimensions spatio-temporelles,
- La non prise en compte des difficultés de démontage du produit en fin de vie (modes d'assemblage, nombre de matériaux utilisés, compatibilité au recyclage, ...),
- La difficulté d'interprétation des résultats d'évaluation environnementale.

L'ACV demeure de ce fait une approche utilisée par de grandes entreprises ou des organismes de recherche car l'étude complète s'avère lourde économiquement et nécessite un haut niveau d'expertise. De plus, sans une bonne interprétation, l'ACV ne permet pas de déterminer les voies d'amélioration des performances environnementales du produit. En effet, le concepteur a besoin d'être orienté dans ses choix de conception et nous en concluons que cette méthode ne convient pas au concepteur industriel et ne répond pas à notre besoin. Toutefois, nous nous inspirons de cette approche de cycle de vie pour développer notre outil d'aide à la décision.

Analyse de Cycle de Vie simplifiée

Nous allons nous intéresser beaucoup plus à cette approche car elle semble mieux répondre à notre demande, notre objectif étant de simplifier l'intégration de l'éco-conception dans la conception au niveau du « simple » concepteur. La simplification de l'ACV peut se faire de différentes manières pour diminuer la quantité des données à collecter et les données à traiter. Il existe plusieurs types de simplification que nous pouvons distinguer :

- La simplification, en évaluant seulement les flux d'entrée/sortie pour déterminer les sources de pollution potentielles. Ce type d'approche nécessite un certain niveau d'expertise qui ne correspond pas à notre souhait de vulgariser l'éco-conception.
- La simplification en se limitant à un seul paramètre environnemental tel que la consommation électrique ou les substances toxiques. Cela est généralement lié à la stratégie environnementale de l'entreprise ou du pays. Cela se traduit par des méthodes de calcul spécifiques telles que la méthode du bilan carbone [JANCOVICI 2005] ou celle du contenu énergétique [AFNOR X30-110]. Nous estimons qu'il est difficile d'apprécier la qualité environnementale d'un produit sur la base d'un seul paramètre. Toutefois, nous admettons qu'il est important de limiter le nombre de critères et des axes d'amélioration environnementale. Dans notre méthodologie, nous fixerons un certain nombre de paramètres prioritaires à prendre en considération lors de la conception du produit.
- La simplification du cycle de vie du produit en ne considérant qu'une ou plusieurs phases. Par exemple, les constructeurs automobiles et d'équipements électriques et électroniques se focalisent sur la réduction des impacts durant la phase d'utilisation et la phase de fin de vie afin de réduire la consommation énergétique et augmenter la recyclabilité du produit.
- La simplification des données quantitatives en données qualitatives. Il s'agit d'une approche qualitative telle que l'ESQCV (Evaluation Simplifiée et Quantitative du Cycle de vie). Cette grille d'évaluation est extraite de la norme AFNOR X30-310. Cette approche reste une approche experte et ne convient pas à notre cahier des charges. De plus, les avis des experts peuvent varier d'où des résultats parfois contradictoires. Toutefois, nous nous inspirons de cette approche pour affecter une valeur quantitative à une appréciation qualitative liée à la facilité de démontage.
- Il est possible de combiner différents types de simplifications : monocritère/multiphasés, monocritère/monophasé, quantitative et qualitative, etc.

Méthode des éco-indicateurs

Les éco-indicateurs sont des scores uniques attribués au disjoncteur isolé dans le SF6 après évaluation environnementale. La méthode se base sur le même principe que l'ACV. Les méthodes les plus utilisées sont Eco-indicator 95 et 99. La méthode E95 utilise le concept de « *distance to target* » où le poids relatif attribué à chaque polluant est fonction de la distance entre la pollution actuelle et la pollution « objectif » (LE BORGNE 1998). La méthode E99 est basée sur une approche de normalisation et d'évaluation des dommages. Les éco-indicateurs représentent les impacts environnementaux d'un matériau en intégrant toutes les phases du cycle de vie. Ils sont facilement exploités par les concepteurs. Cette approche répond partiellement à notre cahier des charges mais n'intègre pas la stratégie environnementale de l'entreprise. Nous nous inspirerons de cette méthode pour adopter le système de « score environnemental unique » représentant à lui seul un ensemble d'impacts environnementaux.

4.3.3.2. Outils d'évaluation environnementale qualitative

Approches matricielles

Ce type d'approche se présente sous forme de grilles d'évaluation environnementale à remplir d'une manière relativement simple. Elle se base sur une approche cycle de vie multiphasées et multicritères. Ce type d'outil peut être utilisé en groupe de travail pour déterminer les pistes d'amélioration environnementale. Nous avons utilisé une approche similaire pour identifier les axes de travail et les priorités environnementales. Cette évaluation peut aussi s'appuyer sur des avis d'experts ou des études similaires. Etant donné la subjectivité des appréciations des impacts environnementaux, une approche quantitative peut être utilisée pour permettre de détailler les pollutions potentielles.

Evaluation basée sur la réglementation

Cet outil permet d'évaluer les performances environnementales d'un produit par rapport aux exigences réglementaires. Les produits ne respectant pas la réglementation en vigueur ou en préparation seront considérés comme polluants ou polluants potentiels. L'écart entre la pollution due au produit et la réglementation permet de classer le niveau de risque qu'il présente. Nous considérons que cette approche peut être utilisée comme un moteur d'éco-conception mais le respect de la réglementation n'est pas suffisant pour concevoir un produit écologique. Dans notre démarche nous avons considéré la réglementation en tant qu'axe principal pour fixer les priorités environnementales. Il est toutefois important de noter que ce type d'outil nécessite une veille réglementaire rigoureuse et une mise à jour quotidienne. Aussi, l'application d'une telle approche à une échelle mondiale s'avère difficile voire impossible de nos jours étant donné les disparités des exigences entre les différents pays.

Indice écologique

Il s'agit d'un indice qui se réfère à l'évaluation environnementale d'un ensemble de critères considérés comme pertinents. Une analyse multicritères, basée sur l'identification des problèmes environnementaux de différents niveaux de gravité, permet de les reformuler sous forme de questions qualitatives dont les réponses ou modalités sont hiérarchisées de la situation idéale (modalité favorable) à la situation insatisfaisante (modalité défavorable) et pondérées par des pénalités. La pénalité est 0 pour une modalité favorable, X (à déterminer) pour une modalité défavorable et X/2 pour une modalité médiane (situation intermédiaire).

Check-lists

Les check-lists sont des questionnaires qui permettent d'évaluer les performances environnementales d'un produit, de vérifier le respect de la réglementation ou de certains paramètres fixés lors de la conception. Par exemple, vérifier si le produit est conforme à la directive RoHS ou que le produit est marqué, etc. Ce questionnaire peut être utilisé par le concepteur, le responsable du projet ou les auditeurs. Dans le cadre de notre travail de recherche nous avons établi une check-list qui englobe à la fois les aspects environnementaux mais aussi de sécurité, hygiène et ergonomie. Nous utiliserons ce document en tant qu'aide-mémoire pour le concepteur et un moyen de vérification du respect du cahier des charges initial en fin de conception. Ce document doit être obligatoirement validé lors de la revue de projet finale avant de lancer le produit en fabrication.

Listes de matériaux et substances

Certaines entreprises ont élaboré une classification des matériaux selon leurs niveaux d'impact sur l'environnement ou leur toxicité. Cela permet au concepteur d'éviter les matières les plus dangereuses et de faire leur sélection dans la liste des matériaux à moindre impact. Cette classification est généralement basée sur les réglementations en vigueur ou en préparation. La réglementation REACH vient renforcer et harmoniser cette approche en mettant en place une classification européenne des substances chimiques utilisées dans l'industrie. Chez RENAULT et VOLVO, il existe trois listes différentes de matériaux : autorisés, à risque et interdits. PHILIPS dispose de trois listes : substances interdites, substances de la liste A (seuil limite de concentration autorisé dans le matériau ou le produit : 1 ppm), substances de la liste B (seuil limite de concentration autorisé dans le matériau ou le produit : 100 ppm). Quant à Schneider Electric, elle distingue les substances interdites d'une part et les substances déconseillées d'autre part [JANIN 2002]. Chez AREVA T&D, nous avons établi une liste des substances interdites en référence à la réglementation et nous avons proposé d'élaborer une liste de substances à risque ou qui risquent d'être visées par de nouvelles directives. Cette approche est intéressante parce qu'elle incite le bureau d'études à réfléchir à des solutions alternatives aux matériaux conventionnellement utilisés. Toutefois, nous émettons quelques réserves quant à l'efficacité de la démarche. En effet, l'étude de certains matériaux montre que le procédé de fabrication est parfois plus polluant que la matière elle-même. Tel est le cas des polymères synthétiques ou des verres.

Nous pensons qu'il n'est pas suffisant de prendre en considération le matériau mais il faut tenir compte d'autres paramètres tels que :

- La quantité de matière utilisée pour une fonction équivalente,
- Le procédé de fabrication,
- La disponibilité de la matière (épuisement des ressources),
- La maîtrise des flux polluants tout au long du cycle de vie,
- L'état de la matière utilisée.

4.3.3.3. Synthèse des outils d'évaluation environnementale

En résumé, il existe une multitude d'approches de qualification des performances environnementales d'un produit mais aucune méthode n'a l'unanimité. Les outils quantitatifs présentent un avantage certain quant au calcul des impacts environnementaux et à la facilité de comparaison entre produits. Les outils qualitatifs sont plus faciles d'utilisation mais le résultat de l'évaluation environnementale reste subjectif et tributaire de l'utilisateur. Nous avons donc essayé de développer un outil qui allie à la fois la précision des outils quantitatifs et la simplicité des outils qualitatifs.

Méthode	Avantages	Limites
ACV	L'approche la plus approuvée par la communauté scientifique Etude détaillée et chiffrée des impacts environnementaux	Collecte de données fastidieuse Interprétation et exploitation difficiles des résultats Non prise en compte des paramètres spatio-temporaires Un coût élevé
L'ACV simplifiée	Plus simple et plus accessible que l'ACV	Un besoin d'un ou plusieurs experts dont les avis peuvent se contredire. Difficulté de comparaison sur un nombre réduit de critères écologiques Difficulté à s'entendre sur des études établies par des personnes différentes
La méthode des éco-indicateurs	Facilité d'exploitation des résultats et la rapidité de la réalisation par le concepteur lui-même.	Les modes de calcul des éco-indicateurs peuvent être contestés étant donné la part d'approximation dans le calcul et dans le choix du système de pondération
L'approche matricielle	Méthode facile, multicritères, multi-phases Interprétation facile.	Un certain niveau d'expertise environnementale est nécessaire Le résultat reste tributaire de l'appréciation de l'utilisateur. Matrices personnalisées qui ne peuvent pas être utilisées pour comparer des produits analysés avec d'autres types de matrices et/ou par des personnes différentes.
L'évaluation basée sur le respect de la réglementation	Un repère intéressant pour les entreprises qui initient une démarche d'éco-conception.	Difficile à une échelle internationale Insuffisante pour comparer les performances environnementales de deux ou plusieurs produits
L'indice écologique	Méthode simple qui permet une attribution de note « écologique » à différents produits,	Méthode monocritère. Le choix des critères et des pondérations reste complètement subjectif.
La méthode des check-lists	Couramment utilisée dans l'industrie Simplicité d'application et d'utilisation tout au long du processus de conception.	Certaines questions peuvent renvoyer à une évaluation d'expert. La comparaison entre produits apparaît difficile

Tableau 8. Synthèse des outils d'évaluation environnementale

4.3.4. Conclusion

Les outils d'éco-conception présentés sont des outils largement utilisés dans l'industrie. En ce qui concerne les guides d'éco-conception et les outils de communication, nous estimons que les supports existants peuvent répondre à notre besoin en y apportant quelques adaptations et améliorations. Toutefois, nous n'avons pas trouvé d'outils d'aide à l'éco-conception et d'aide à la décision qui satisfassent notre demande, à savoir un outil simple d'utilisation avec des données techniques et environnementales fiables et orientées vers le concepteur.

4.4. LA SIMPLIFICATION DES OUTILS D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

Deux études liées à des projets de recherche ont permis d'identifier les problèmes auxquels font face les concepteurs pour faire de l'éco-conception et les outils et supports dont ils ont besoin pour faciliter l'intégration de l'éco-conception dans le processus de conception. Durant l'étude pilote, une série de données a été collectée à travers une étude approfondie de la conception chez Electrolux et de quatre autres sources donnant un aperçu assez large. Ces sources incluent des concepteurs de grandes multinationales, des concepteurs novices, des consultants en conception avec une faible expérience en éco-conception, des experts en éco-conception et des responsables environnement [LOFTHOUSE 2006].

Ces études et les recherches bibliographiques montrent que les outils existants ne sont pas adaptés au besoin des concepteurs par ce qu'ils sont axés sur la conception. En effet, ils sont plutôt orientés vers le management stratégique et l'analyse rétrospective des produits existants. Par ailleurs, il s'avère que ces outils ne tiennent pas compte de la culture de conception industrielle. La plupart des concepteurs questionnés lors de cette étude indiquent qu'ils ne possèdent pas les outils appropriés et la formation adéquate pour concevoir « écologiquement ».

La démarche présentée ci-après tient à simplifier l'approche d'éco-conception et de la mettre au niveau des concepteurs.

4.4.1. Pourquoi simplifier?

Comme indiqué précédemment, l'éco-conception reste une affaire de spécialistes et les premiers concernés c'est-à-dire les concepteurs ne sont pas les premiers utilisateurs. Aussi, certains outils d'éco-conception existants demandent une formation spécifique et des moyens humains et financiers importants (ACV, étude d'impact sur l'environnement, étude de gestion de fin de vie, bilan carbone, ...). D'autres, plus qualitatifs et moins précis ne donnent pas de résultats pertinents et servent plus d'outils de communication et de vérification (check-lists, ACV simplifiée,...).

Par ailleurs, il s'avère que le plus difficile est d'interpréter les résultats de ces outils pour en tirer des choix de conception.

La simplification proposée est orientée vers les concepteurs. Il s'agit de les aider dans leur approche de conception en apportant une aide à la décision liée à la performance environnementale des produits qu'ils développent.

Cela permettra de :

- mettre l'éco-conception au niveau des concepteurs,
- aller vers l'essentiel et viser les points à forte marge d'amélioration ,
- cibler les paramètres sur lesquels le concepteur peut avoir une forte influence.

4.4.2. Quels types de simplifications?

Dans la littérature, il existe plusieurs possibilités de simplification de l'approche éco-conception :

- Fixer des règles d'éco-conception simples telle que l'interdiction d'une ou plusieurs substances toxiques,
- S'intéresser à un seul paramètre environnemental comme l'effet de serre,
- S'intéresser à une seule phase ou une partie du cycle de vie telle que la fin de vie,
- Normaliser les résultats des ACV : score unique,
- Comparer les bilans matériaux,
- Utiliser les évaluations environnementales qualitatives,
- etc.

L'objectif de notre démarche n'est pas de créer de nouveaux modes de simplification mais de combiner ces possibilités afin de développer une démarche de simplification solide sur le plan environnemental.

4.4.3. Comment simplifier sans perdre la qualité?

Le risque avec la simplification est la perte de qualité. Cela se manifeste par des orientations environnementales erronées et des possibilités de transfert de pollution. C'est pour cela qu'il est impératif de tenir compte de l'efficacité de notre démarche de simplification. Aussi, les simplifications proposées seront orientées vers un secteur industriel bien déterminé. Ce qui garantit une simplification plus réaliste et proche de l'activité industrielle concernée.

Afin de simplifier la démarche d'éco-conception sans perdre la qualité, il est important de :

- Veiller au non transfert de pollution,
- Analyser les produits existants et détecter les points importants à forte marge d'amélioration,
- Se référer aux résultats d'ACV complètes,
- Vérifier et consolider les données d'entrée,
- Utiliser des indicateurs environnementaux consolidés compréhensibles par les concepteurs,
- Créer une base de données ciblées pour les appareillages de moyenne tension.

4.4.4. Comment vérifier que la simplification est efficace?

Nous considérons qu'une simplification est efficace si elle permet de donner les mêmes orientations de conception que les démarches plus complexes. Il est donc très important de vérifier l'efficacité de la simplification en comparant la concordance de nos résultats avec les résultats des approches plus complexes sur une série de produits. Les écarts entre les résultats servent à améliorer la simplification et à se rendre compte des cas particuliers. Ainsi, il est conseillé de mesurer le niveau d'acceptation et de mise en application par les concepteurs.

Nous nous baserons sur l'avis d'un expert pour mesurer le degré de convergence entre le résultat d'une étude environnementale détaillée de type ACV et notre méthode d'évaluation environnementale. Nous proposons qu'un spécialiste en éco-conception accompagne un ensemble de projets de développement et travaille en parallèle avec les concepteurs sur les choix écologiques de conception. Il s'agit d'évaluer l'écart entre des études détaillées réalisées par l'expert et les choix effectués par le concepteur en utilisant notre démarche. Il est prévu d'appliquer cette méthode sur une dizaine de projets nouveaux de AREVA T&D/DRC dans les trois années qui suivent la fin de la thèse afin de déterminer son niveau de convergence. Nous admettons quatre niveaux de convergence :

	Résultat de l'expert / résultat de notre méthode
Très fiable	100% ou le classement effectué par l'expert correspond exactement à celui du concepteur
Fiable	$\geq 75\%$ $< 100\%$ ou la meilleure option écologique sélectionnée par l'expert correspond à celle du concepteur
Moyennement fiable	$\geq 50\%$ $< 75\%$
Non fiable	$< 50\%$

Tableau 9. Mesure de la fiabilité de notre méthode

Nous estimons que notre méthode est fiable si au moins sept études sur dix présentent un niveau de fiabilité $\geq 75\%$.

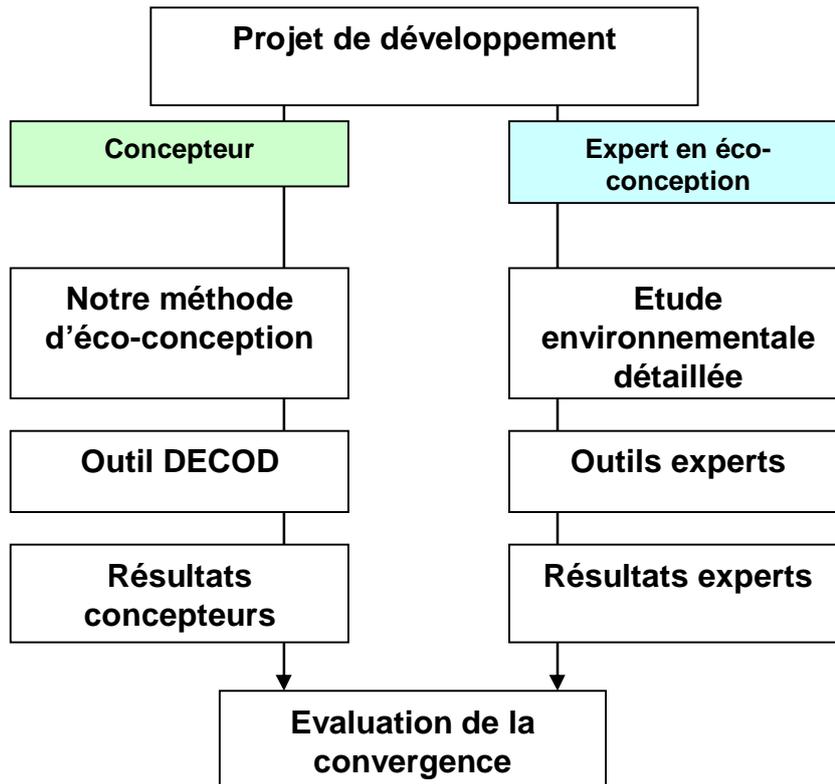


Figure 43. Mesure de la fiabilité de notre méthodologie d'éco-conception

La démarche de simplification de l'évaluation environnementale des produits est passée par l'étude des évaluations environnementales des produits existants pour détecter les possibilités de simplification soit en termes de paramètres environnementaux, soit en termes de phases de cycle de vie du produit, soit les deux. Dans ce cadre, nous avons réalisé les actions suivantes :

1. Examen de la réglementation en vigueur et potentielles,
2. Analyse d'un ensemble d'études environnementales existantes relatives à la catégorie de produit étudié - Études d'impacts sur l'environnement, ACV, gestion de fin de vie, rapports de mesures environnementales, auto-déclarations environnementales, etc,
2. Détection des sources de pollution potentielles et les marges d'amélioration,
3. Etude des possibilités de transfert de pollution,
4. Prise en compte de la stratégie environnementale de l'entreprise (producteur) : approche pro-active,
5. Etat de l'art de la prise en compte de l'environnement dans le domaine d'étude : éco-technologies, filières de recyclage, benchmarking,...
6. Analyse des besoins des concepteurs.

Cette méthode permet d'orienter les concepteurs vers les paramètres environnementaux qui présentent une marge de manœuvre plus importante à leur niveau. Nous décrivons notre approche de simplification de l'évaluation environnementale dans le paragraphe « outil simplifié d'aide à la décision environnementale des appareillages de moyenne tension ».

4.5. OUTIL SIMPLIFIE D'AIDE A L'ECO-CONCEPTION DES PRODUITS DE MOYENNE TENSION

4.5.1. Guide d'éco-conception

L'élaboration d'un guide d'éco-conception ou « guide vert » au sein du bureau d'études a accompagné une démarche plus générale d'éco-conception. Il s'agissait d'une volonté de l'entreprise de mettre en place une approche environnementale dans le système conception des appareillages de moyenne tension. Nous avons alors essayé de répondre à toutes les demandes qui proviennent de l'équipe de conception (voir cahier des charges). Ce support contenait les volets suivants :

- Une description du contexte environnemental mondial,
- L'origine du besoin de l'éco-conception : environnemental, économique, éthique, social, réglementaire, ...
- Une définition de l'éco-conception,
- Un bref historique de l'éco-conception,
- Une présentation des principes de l'éco-conception,
- Une description des contraintes réglementaires et normatives,
- Une analyse des problématiques de la gestion des produits en fin de vie,
- Bonnes pratiques d'éco-conception.

4.5.2. Outil d'évaluation environnementale simplifiée

Nous avons exprimé précédemment le besoin d'un outil d'aide à la décision environnementale simplifié et adapté aux besoins du concepteur. Cet outil se base essentiellement sur l'évaluation et la comparaison des impacts environnementaux des options de conception. Concrètement, le concepteur est souvent confronté à des choix de design qui concernent essentiellement les matériaux, les procédés de fabrication, les modes d'assemblage et l'architecture du produit. Pour un grand nombre de produits et plus particulièrement pour les appareillages de moyenne tension, ce choix se base essentiellement sur les performances techniques et économiques. En effet, le paramètre environnemental se trouve optionnel voire non intégré.

Postulat : Nous avons admis qu'à l'heure actuelle, nous ne pouvons prétendre positionner le critère écologique en tant que premier critère de choix des options de conception. Cela est dû à un manque de contraintes réglementaires et d'exigences particulières de la part des clients.

Notre approche est totalement volontaire et doit respecter le déroulement actuel du processus de conception, ce qui réduit d'une manière considérable notre marge de manœuvre. Pour résumer, le concepteur analyse le besoin exprimé par le cahier des charges initial, imagine plusieurs scénarios de conception qui répondent aux exigences techniques et économiques et c'est à ce niveau qu'intervient notre méthodologie d'aide à la décision. En règle générale, ce choix se présente entre différentes options de conception pour deux ou plusieurs sous-ensembles d'un produit complexe. Notre approche est purement comparative. Elle permet au concepteur d'orienter sa conception vers un produit plus écologique et de lui proposer des pistes d'amélioration environnementale (voir figure 45).

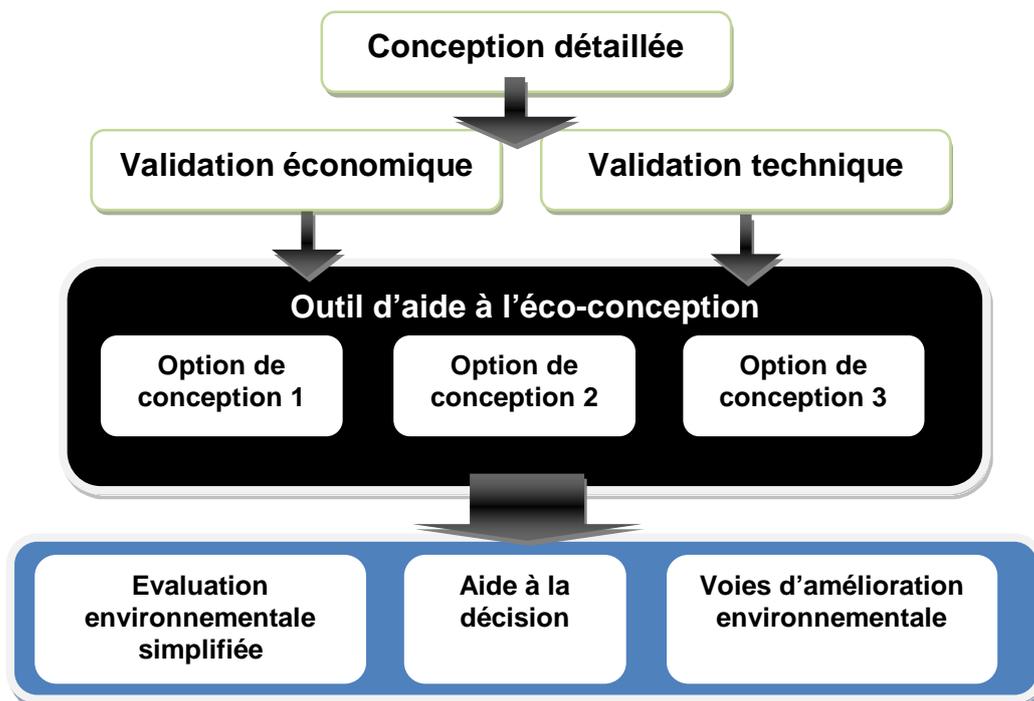


Figure 44. Positionnement de notre outil par rapport au choix de conception

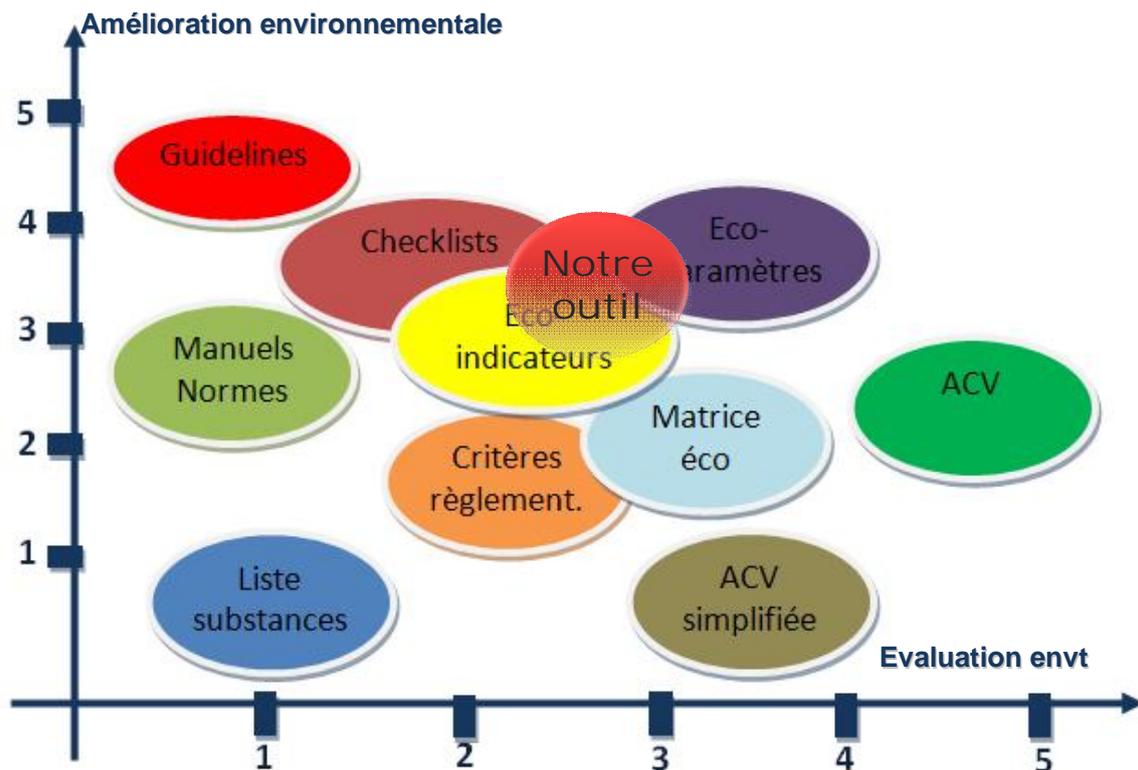


Figure 45. Positionnement de notre outil par rapport aux outils standards d'éco-conception

Source : Janin 2000 (modifié)

La construction de notre outil se base sur cinq étapes successives :

- La simplification de l'évaluation environnementale,
- Le choix des indicateurs,
- La comparaison des performances environnementales,
- La construction d'une base de données spécifique,
- L'élaboration de voies d'amélioration environnementale.

4.5.3. Etape 1: la construction d'une stratégie d'éco-conception

La simplification de l'évaluation environnementale des produits de moyenne tension se base sur deux paramètres :

- La réglementation,
- Les évaluations environnementales.

Nous rappelons que dans le deuxième chapitre nous avons déjà procédé à une simplification du Cycle de vie du produit par la suppression des phases d'utilisation et de distribution.

Dans la première colonne, du tableau 10, nous présentons les principales réglementations et conventions applicables ou susceptibles d'être appliquées aux produits de la moyenne tension. Dans la deuxième colonne nous présentons le résultat des évaluations environnementales relatives à ces produits. Nous montrons alors la situation environnementale des équipements existants et l'écart par rapport à la réglementation concernée. Dans la troisième colonne nous dérivons notre proposition stratégique d'éco-conception en accord avec la réglementation et l'évaluation environnementale mais aussi avec les capacités de l'équipe de conception. Nous considérons que la réglementation peut constituer un référentiel solide pour une stratégie environnementale. Toutefois, cette base n'est pas suffisante et il faut y associer d'autres actions stratégiques non liées à des obligations réglementaires.

La stratégie proposée reste une stratégie qui découle d'une approche de recherche. La direction de l'entreprise peut choisir de l'appliquer totalement ou partiellement et de modifier les échéances et l'ordre des priorités. Cette stratégie est également évolutive dans le temps selon le développement des connaissances techniques, des restrictions réglementaires et des pressions économiques et sociales.

Toutefois, la définition de la stratégie d'éco-conception est primordiale dans la mise en place d'une démarche d'éco-conception. Elle sert de repère pour tous les acteurs de l'équipe de conception. De plus, nous nous servons de cette stratégie pour le choix des indicateurs environnementaux et la hiérarchisation de ces indicateurs.

Réglementation de référence	Evaluations environnementales Cibles concernées	Stratégie proposée à l'entreprise	
		Actions	Priorités
DEEE	Recyclabilité limitée par l'emploi de résines thermodurcissables, de céramiques, de gaz SF6.	Améliorer la recyclabilité avec un objectif de 95% de recyclage du poids total	Moyen terme : atteindre 85% de recyclabilité
			Long terme : atteindre 95% de recyclabilité
		Faciliter le désassemblage	Long terme
RoHS	Utilisation du Chrome hexavalent	Eliminer les substances dangereuses contenues dans ces produits.	Priorité immédiate
	Utilisation du plomb dans les cartes électroniques		Moyen terme
	Utilisation de trichloréthylène pour dégraissage		Priorité immédiate
Kyoto	Emissions de gaz SF6 à effet de serre	Réduire les fuites de SF6.	Priorité immédiate
		Chercher des solutions de substitution gaz, liquides, solides ou mixtes	Long terme
	Consommation d'électricité pour la fabrication et la gestion de la fin de vie	Réduire la consommation électrique	Moyen terme
REACH	Utilisation de substances susceptibles d'être reconnues comme dangereuses	Chercher des solutions de substitution des substances dangereuses	Long terme
Réglementation environnementale	Emissions toxiques dans la phase de fabrication	Eliminer les substances toxiques	Moyen terme
Aucune	Consommation de ressources hydriques	Réduire la consommation de l'eau	Moyen terme
	Présence de pièces massives avec des matériaux parfois incompatibles	Réduire la consommation des ressources naturelles	Court terme
	Utilisation de matériaux et de procédés émettant des gaz à effet de serre	Réduire les émissions de gaz à effet de serre	Court terme

Tableau 10. Construction d'une stratégie d'éco-conception

4.5.4. Etape 2: Simplification de l'évaluation environnementale

4.5.4.1. Etape 2.1 : Simplification des phases de cycle de vie

D'après les analyses de cycle de vie présentées dans le deuxième chapitre, il apparaît que la phase d'utilisation est la phase la plus polluante du cycle de vie des appareillages de moyenne tension. Ceci est dû à la consommation de l'énergie électrique par effet joule. Toutefois, la consommation instantanée de ces équipements est très faible, de l'ordre de quelques watts.

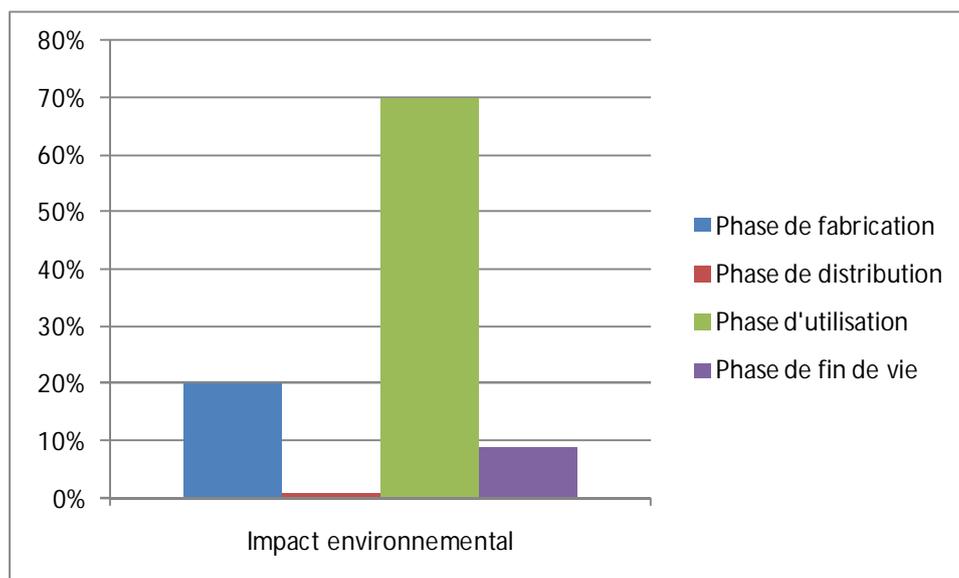


Figure 46. Figure. Représentation schématique de la contribution environnementale des différentes phases du cycle de vie

L'analyse des technologies disponibles montrent que les marges de réduction de ces pertes sont très faibles et que les possibilités de réduction restent limitées dans l'état actuel des connaissances. D'autres part, les solutions existantes présentent des coûts nettement supérieurs au coût actuel. A titre d'exemple la réduction de la consommation électrique de 5% peut engendrer un coût de revient supérieur de 20%. Notre ligne directrice étant la réduction des impacts environnementaux à forte marge d'amélioration, nous avons choisi de ne pas considérer la réduction de la consommation électrique comme un axe de travail important. Par ailleurs, les autres sources de pollution durant la phase d'utilisation peuvent venir de la fuite de SF6 ou des rayonnements X. Dans ces deux cas, le taux de pollution est très faible et limité par des normes très strictes. De même pour la perte par effet joule, il apparaît que les marges de manœuvre sont très limitées.

Ainsi, les ACV des appareillages de moyenne tension montrent que la phase de distribution impacte très faiblement le cycle de vie du produit. De plus, le bureau d'études ne participe pas à l'organisation de l'emballage et à la logistique. Nous jugeons qu'il existe tout de même des possibilités d'optimisation de cette phase mais ces possibilités restent très restreintes et ne permettent pas d'apporter une amélioration notable de l'éco-efficacité du produit.

Par ailleurs l'évaluation environnementale des produits de moyenne tension montre que les phases de fabrication et de fin de vie présentent des impacts environnementaux importants et de fortes possibilités d'amélioration. Ces améliorations concordent avec la stratégie d'éco-conception proposée à l'entreprise. Nous considérons que ces deux phases sont directement liées de part les choix initiaux de matériaux et de l'architecture du produit. Aussi, nous défendons le fait que la phase de fin de vie est équivalente à une nouvelle phase de fabrication. En effet, le produit futur déchet, est considéré comme un ensemble de matériaux qui vont subir des procédés industriels pour générer de nouvelles matières qui seront utilisées pour la fabrication de nouveaux produits ou de l'énergie. La partie non valorisée sera considérée comme les déchets de fabrication. Nous admettons donc que nous pouvons construire une approche d'éco-conception basée sur ces deux phases. La figure suivante montre l'aspect du cycle de vie simplifié des phases de distribution et d'utilisation.

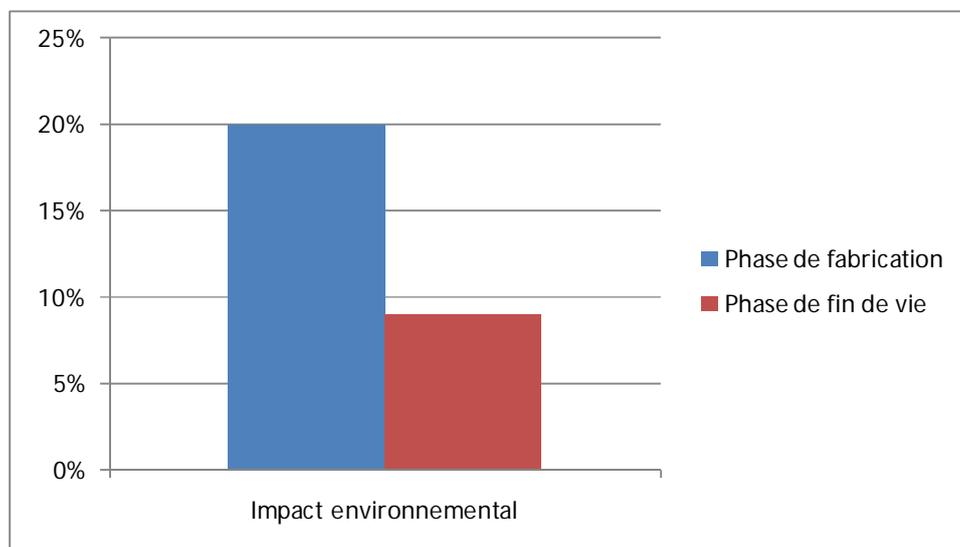


Figure 47. Représentation schématique de la simplification des phases du cycle de vie des appareillages de moyenne tension

4.5.4.2. Etape 2.2 : Proposition d'indicateurs environnementaux pour le management de l'éco-conception

Il existe une multitude d'indicateurs environnementaux quantitatifs et qualitatifs, normalisés ou pas. L'objectif de notre étude n'est pas de créer de nouveaux indicateurs mais d'adapter des indicateurs existants à notre application. Il s'agit de mettre l'accent sur les paramètres environnementaux importants. Afin de sélectionner nos indicateurs, nous nous basons sur les évaluations environnementales de nos produits. Dans le tableau suivant nous montrons les impacts les plus importants associés à nos produits pour les deux phases de fabrication et de fin de vie. Nous avons dissocié les problématiques environnementales liées aux matériaux utilisés, aux procédés de fabrication et de fin de vie ou à l'architecture du produit.

	Matériaux	Procédés	Architecture du produit
Phase de fabrication	Toxicité, épuisement des ressources, effet de serre, déchets, recyclabilité, valorisation énergétique	Consommation électrique, consommation de l'eau, effet de serre, toxicité, déchets,	Difficultés de désassemblage → une récupération plus difficile des matériaux en fin de vie
Phase de fin de vie			

Tableau 11. Problématiques environnementales des phases de fabrication et de fin de vie

La synthèse de ces problématiques nous a permis de choisir une série d'indicateurs environnementaux qui nous permettent d'évaluer les performances environnementales de nos produits. Le tableau suivant présente notre sélection d'indicateurs environnementaux et leurs modes de calcul. Nous avons intégré les données relatives à la fin de vie dans le calcul des indicateurs afin d'avoir un indicateur unique sur l'ensemble des 2 phases de fabrication et de fin de vie.

Indicateur	Mode de calcul	unité
Consommation énergétique	Energie consommée par l'extraction et la transformation de la matière première + Énergie consommée par la fabrication + Énergie consommée par le broyage, recyclage +/- Énergie dissipée ou récupérée par l'incinération	MJ
Consommation de l'eau	Eau consommée par l'extraction et la transformation de la matière première + (Eau consommée par la fabrication + Eau consommée par le recyclage) * coefficient de disponibilité «si la localisation géographique des sites de fabrication et de recyclage est connue sinon coef = 1»	dm3
Ressources naturelles minérales	Σ coef de disponibilité x (Matériau utilisé par la fabrication + déchets de fabrication - % de recyclabilité x Matériaux utilisés par la fabrication) <ul style="list-style-type: none"> • Les matériaux déplacés pendant l'extraction ne sont pas comptabilisés • Les ressources utilisées pour le raffinage et le traitement des minerais sont considérées 	kg
Effet de serre	Émissions dans l'air des gaz à effet de serre des opérations d'extraction et de transformation des matériaux + émissions dues à la consommation électrique par la fabrication + émissions dues à la consommation électrique par la fin de vie+ émissions dues au broyage, au recyclage (CO2, CFC, SF6) et à l'incinération L'effet de serre du à la conso électrique doit être adapté au pays où se trouvent les sites de fabrication et de gestion de fin de vie	g éq CO2
Toxicité Air + eau + sol	Matières + additifs + substances émis pendant la fabrication et la fin de vie <ul style="list-style-type: none"> • un coefficient unique de toxicité humaine (éq 1,4 D-B) de CML 2000 L'unité éq Ni est plus compréhensible donc il serait intéressant de ramener l'indicateur CML en éq Ni (confère MEEUP methodology)	éq Ni
Désassemblage	Degrés de facilité du désassemblage <ul style="list-style-type: none"> • 5 degrés de difficultés de désassemblage 	Note absolue ou une échelle de 0 à 5

Tableau 12. Mode de calcul des indicateurs environnementaux

Dans la suite de ce paragraphe nous décrivons l'importance et le détail de chacun des indicateurs d'éco-conception sélectionnés.

Consommation énergétique

Force est de constater que tous les produits et que toutes les phases du cycle de vie sont consommateurs d'énergie. Cela implique une forte implication de ce paramètre dans l'impact global du produit. Ensuite, dans le contexte actuel, l'énergie présente un enjeu géopolitique très important à cause de :

- Un coût en forte croissance,
- L'épuisement des combustibles fossiles et radioactifs,
- La dépendance de la situation géopolitique : guerres, conflits, catastrophes,
- La problématique du réchauffement de la terre associée aux gaz à effet de serre directement issus de la production de l'énergie.

Par ailleurs, AREVA est leader dans le domaine de la production et de l'acheminement de l'énergie donc son image de marque est fortement liée à cette problématique environnementale.

La figure suivante présente les sources de consommation d'énergie durant les différentes étapes de fabrication et de fin de vie :

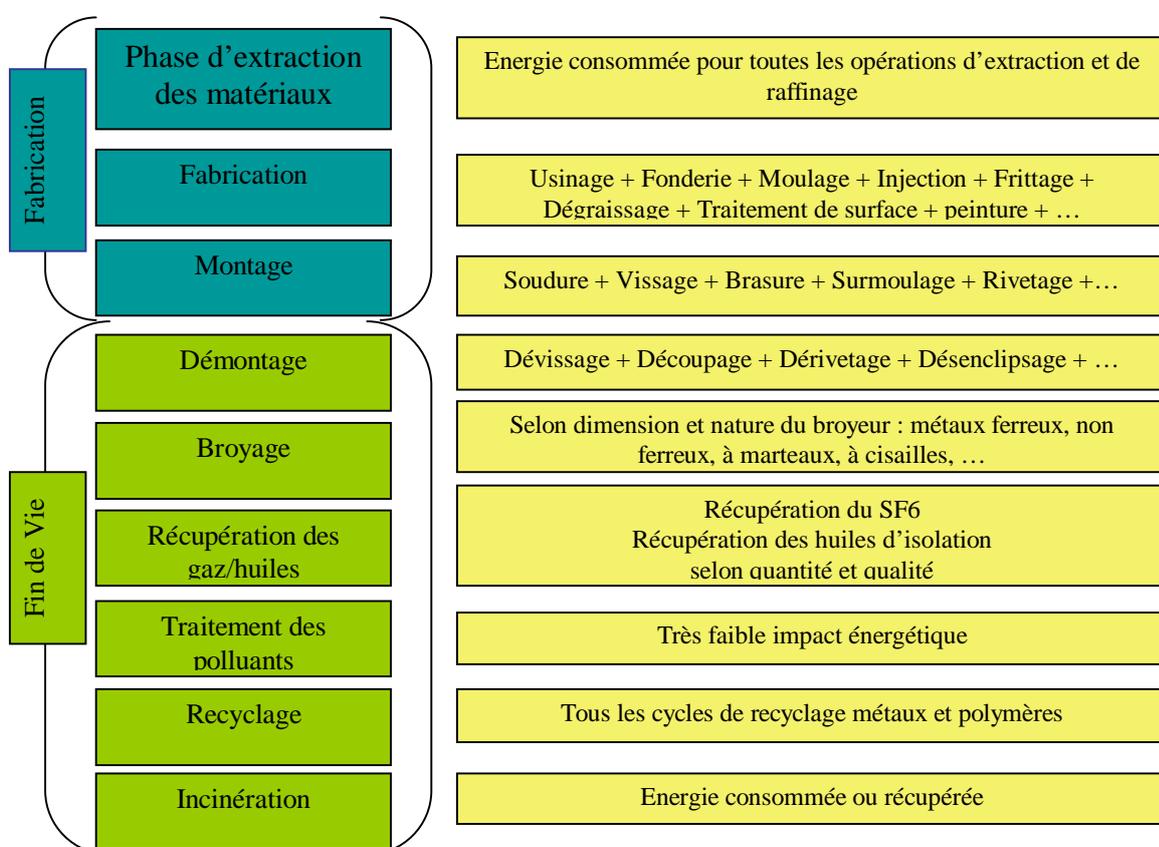


Figure 48. Sources de consommation d'énergie pendant les phases de fabrication et de fin de vie

La phase d'extraction et de raffinage des matériaux est prise en compte : cette phase est très variable et les données utilisées dépendent largement de la localisation géographique et du type de la ressource.

- Pour les minerais : de la densité du minerai dans le gisement, de la localisation géographique de la mine : distance par rapport aux ports et type de ressources utilisées dans la production de l'énergie, des polluants associés aux minerais,
- Pour le pétrole et le gaz : de la profondeur du gisement, de la nature de l'hydrocarbure (degrés de maturité), de la situation géographique : inshore, offshore, des ressources utilisées pour le forage et la production, du degré de raffinage.

Il apparaît que l'énergie nécessaire pour l'extraction et le raffinage est généralement supérieure à l'énergie consommée par la fabrication et la fin de vie !!!

La phase de fabrication dépend des procédés utilisés. Les procédés les plus énergivores :

- Fonderie,
- Injection des thermoplastiques, des élastomères,
- Cuisson,
- Déformation à chaud.

La phase de fin de vie dépend essentiellement de la stratégie de démontage et de la nature des matériaux :

- Le démontage manuel ou assisté est peu énergivore,
- Le démantèlement, broyage est plus énergivore selon les matériaux et les dimensions.

Le recyclage des matières est souvent moins énergivore que la production de la matière première (en moyenne 30%). Pour prendre en considération la consommation énergétique des procédés de fin de vie, nous avons calculé :

- l'équivalent énergétique au broyage de chaque type de produit
- la contribution des différents procédés de régénération de la matière (essentiellement les métaux : aciers, cuivre, aluminium, zinc, les thermoplastiques : PBT, PC, ABS,...et les élastomères : silicone)
- la contribution des procédés de récupération et de traitement des produits spécifiques (SF6, huiles d'isolation).
- La consommation énergétique due à l'incinération (+/-) : essentiellement les polymères.
- un équivalent énergétique pour le transport des produits spécifiques en fin de vie (SF6, huiles, parafoudres,) : produits récupérés dans des sites spécialisés.
- Les énergies secondaires produites à partir de l'énergie électrique (mécanique, thermique) ne seront pas considérées.

Consommation de l'eau :

L'eau est la première ressource vitale et la plus importante au monde. Nous ne pouvons parler de pénurie de l'eau sur terre mais il existe une forte disparité entre différentes zones géographiques. Les ressources hydriques constituent un enjeu géopolitique majeur et l'optimisation de leur exploitation se trouve au cœur la politique des Nations Unies. Nous pensons qu'il est dès lors très important d'ajouter un coefficient de disponibilité de cette ressource selon le pays où se fait la consommation. Au contraire des ACV classiques, nous insistons sur l'intégration des paramètres spatiotemporels dans l'évaluation environnementale.

Par ailleurs, il apparaît clairement que l'industrie ne peut pas se passer de l'eau qu'elle utilise d'une manière très permanente. Toutefois, il est important de noter que l'industrie électrotechnique n'est pas une importante consommatrice d'eau. Une grande partie de l'eau est consommée dans la phase d'extraction et de traitement de la matière première, dans le traitement et le nettoyage des surfaces métalliques et le recyclage des matériaux en fin de vie. La figure 49 présente les sources de consommation d'eau durant les différentes étapes de fabrication et de fin de vie :

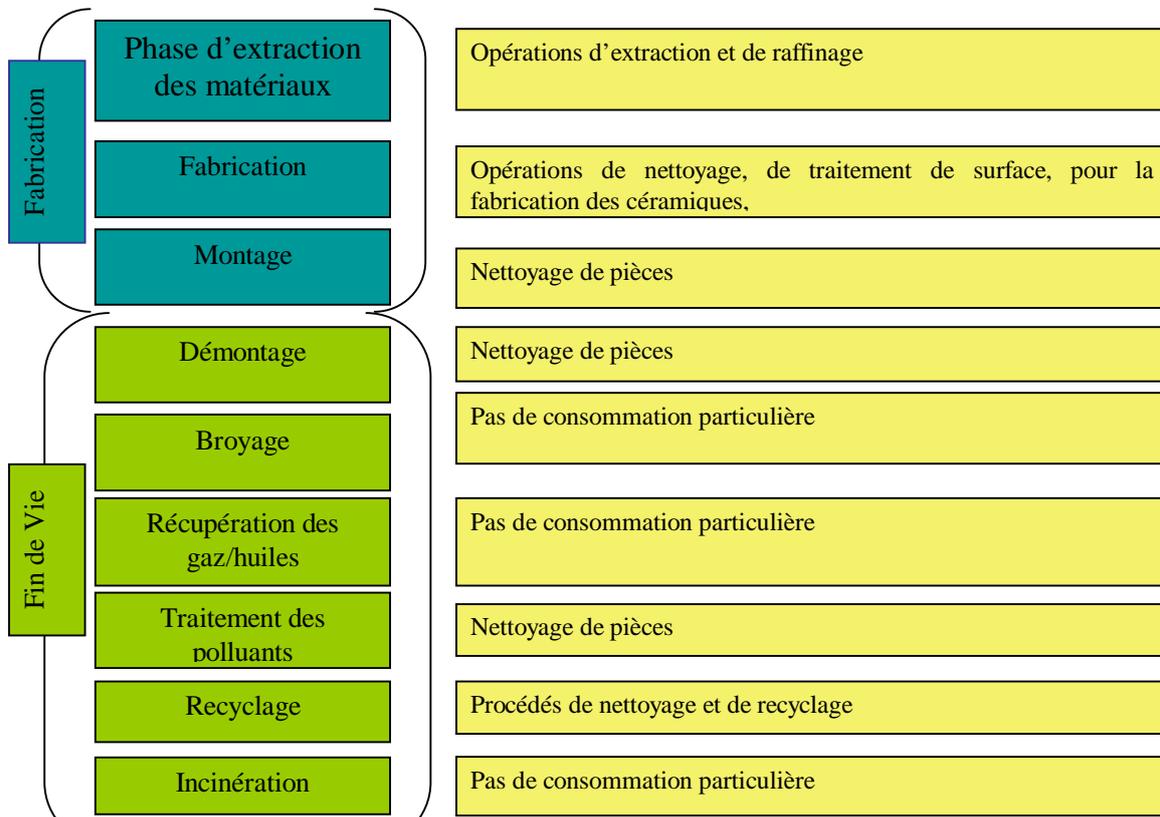


Figure 49. Sources de consommation de l'eau pendant les phases de fabrication et de fin de vie

La phase d'extraction et de raffinage des matériaux sera prise en compte. La consommation des ressources hydriques dépend de la nature des matériaux. Elle intervient essentiellement dans la phase de raffinage. Il n'est pas possible d'ajouter un coefficient d'impact par rapport à la localisation géographique des gisements et des sites de raffinage étant donné que nous ne maîtrisons pas les sources de matières.

La phase de fabrication

Les procédés utilisés dans la fabrication des équipements de moyenne tension ne sont pas très consommateurs d'eau. Les procédés les plus consommateurs d'eau sont :

- Les traitements de surface,
- Le nettoyage.

La phase de fin de vie dépend essentiellement des cycles de recyclage des matériaux et de la technique de nettoyage utilisée.

Effet de serre :

L'effet de serre provient des émissions des gaz à effet de serre dont le plus connu est le CO₂. La première source d'effet de serre est la production énergétique : production de l'électricité, transport, production de l'énergie thermique, ... En effet, la combustion des carburants (fuel, charbon, ...) engendre une quantité importante de gaz à effet de serre. Les gaz à effet de serre de nos produits proviennent essentiellement de la production de l'énergie nécessaire à la fabrication et à la gestion en fin de vie d'où l'importance de connaître la localisation des sites de fabrication et de valorisation.

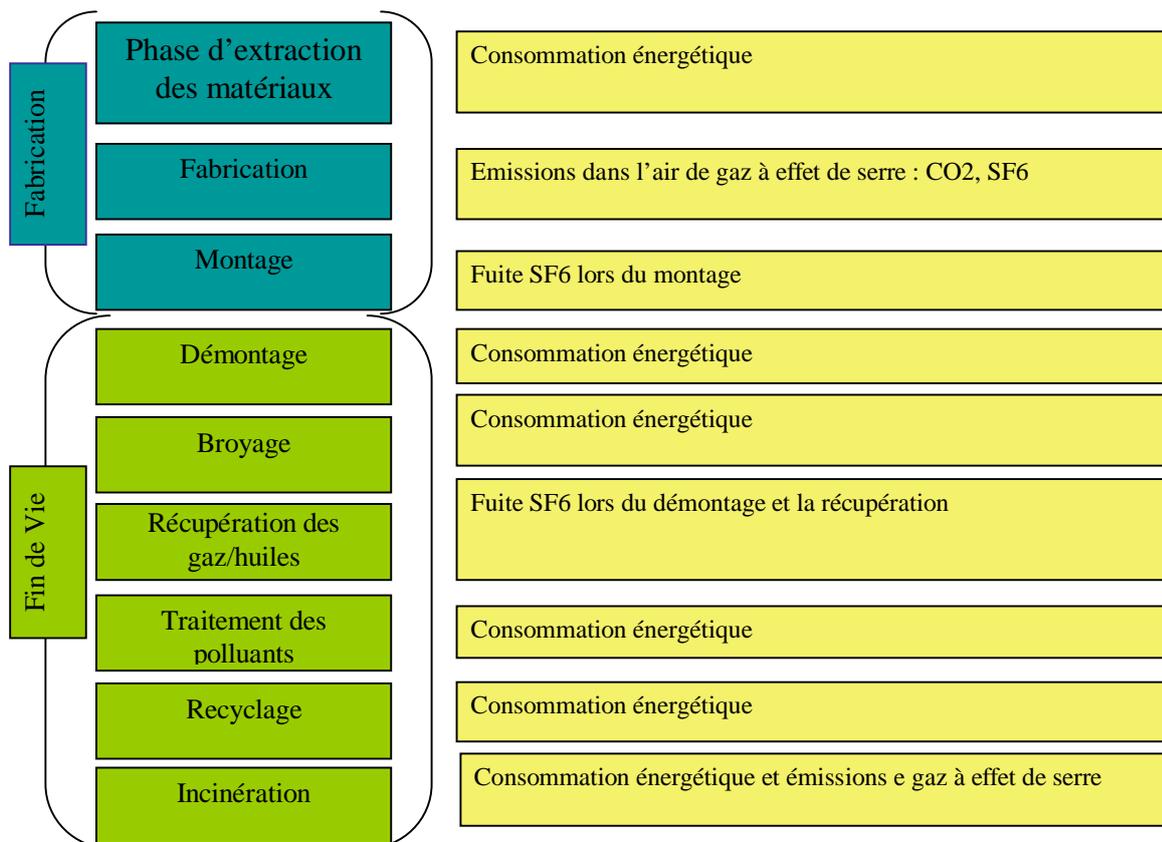


Figure 50. Sources d'émissions de gaz à effet de serre pendant les phases de fabrication et de fin de vie

Plus spécifique au domaine électrique, l'effet de serre peut provenir des fuites du gaz SF6 utilisé dans l'isolation diélectrique. Ce gaz présente un potentiel d'effet de serre 23000 fois supérieur à celui du CO2 (base 100 ans).

Il est donc essentiel d'accorder la plus grande importance aux modes de remplissage et de récupération de ce gaz.

Les ressources naturelles minérales

Cet indicateur intègre toutes les ressources naturelles minérales qui ne sont pas recyclées. Nous prenons en compte les ressources matières utilisées dans l'extraction, le raffinage et la fabrication des matières premières, les additifs utilisés dans la fabrication et le recyclage. A la différence de l'indicateur normalisé, nous ajoutons ici la notion de recyclage et de disponibilité ou de rareté. Le recyclage est intégré à travers le potentiel de recyclabilité de la matière utilisée. Nous supposons que les matières recyclables sont régénérées en fin de vie (voir en annexe 4 notre méthodologie de gestion de fin de vie des appareillages de moyenne tension). Il est également possible d'ajouter un coefficient relatif à la qualité de la matière recyclée. Cela est d'autant plus vrai pour les thermoplastiques qui perdent de leurs propriétés techniques après recyclage.

Toxicité

Nous considérons dans cet indicateur les substances toxiques émises dans toutes les étapes d'extraction, de raffinage, de fabrication et recyclage. Les émissions les plus toxiques sont détectées lors de la transformation des matériaux pendant la fabrication ou pendant le recyclage de certains matériaux. Les sources principales sont les traitements de surface, les peintures, les produits de nettoyage, certains additifs utilisés dans la fabrication des pièces plastiques, les graisses, les colles, etc.

Désassemblage

Dans la pratique certaines fractions de matière ne sont pas recyclées en raison de la difficulté à récupérer le produit. C'est pour cela que nous estimons qu'il est important d'intégrer deux autres paramètres à savoir : la compatibilité au recyclage et la difficulté de désassemblage. Ces deux notions sont en effet complémentaires et essentielles dans les choix de démontage en fin de vie. Nous avons donc créé un nouvel indicateur que nous avons appelé « désassemblage » qui permet d'évaluer le niveau de difficulté lors du démontage en fin de vie. Cet indicateur n'est pas directement un indicateur environnemental. Il sert surtout à porter l'attention du concepteur sur les problématiques de désassemblage et de séparation des matières en fin de vie. De plus, cela peut avoir une influence sur la quantité et la qualité des matériaux récupérés. Le calcul de cet indicateur nécessite l'élaboration d'un algorithme spécifique qui intègre les règles de séparation des matériaux en fin de vie (voir annexe 4). L'idée est d'assister le concepteur dans ses choix en vue d'un futur désassemblage. Des règles de démontage seront intégrées à l'outil d'évaluation automatique.

Cet outil proposera un mode de désassemblage approprié qui pourra être remplacé par l'utilisateur par la suite. Exemples de règles de démontage par catégorie standard de produit :

- Appareil à isolation dans le SF6 : récupération + traitement SF6 avant démontage,
- Appareil à coupure dans le SF6 : récupération + dépollution SF6,
- Appareil à isolation dans l'huile : récupération + dépollution huile avant démontage,
- Ampoule à vide : broyage ,,
- Bielle isolante : broyage,
- Traversée : broyage
- Commande mécanique : désarmement + broyage,
- Pôle complet : désassemblage du bâti + démontage accessoires (sous-ensembles sauf inserts) + broyage pôle simple,
- Connexions : désassemblage,
- Assemblage ampoule/bielle : désassemblage,
- Assemblage bielle/commande : désassemblage,
- Pièce surmoulée : broyage,
- Pièces visées : désassemblage manuel,
- ...

Nous proposons deux systèmes de calcul de cet indicateur :

- Un système simplifié : l'utilisateur estime le degré de difficulté lié au désassemblage du produit,
- Un système élaboré : l'outil calcule automatiquement le niveau de difficulté du désassemblage. La valeur attribuée à cet indicateur correspond à la moyenne des étapes de désassemblage = $\frac{\sum \text{degré de difficulté de désassemblage}}{\text{le nombre d'assemblages}}$.

Nous nous sommes basés sur la norme allemande VDI2243 pour l'affectation des niveaux de difficulté de désassemblage. Voir tableau suivant :

Situation	Niveau	Justification
Les sous-ensembles sont fabriqués dans la même matière que les fixations.	1	Pas besoin de désassemblage. Tout peut être recyclé comme une seule pièce. Meilleure situation
Les fixations et les sous-ensembles sont fabriqués dans des matières compatibles pour le recyclage	1	Pas besoin de désassemblage. Le tout peut être recyclé comme une seule pièce.
Les fixations et les sous-ensembles sont fabriqués dans des matières incompatibles pour le recyclage mais faciles à désassembler	1, 2	Les sous-ensembles peuvent être séparés manuellement.
Les fixations et les sous-ensembles sont fabriqués dans des matières incompatibles pour le recyclage mais possibles à désassembler en exerçant une force	3, 4, 5	Les sous-ensembles peuvent être séparés manuellement ou mécaniquement si les propriétés mécaniques des matériaux le permettent.
Les fixations sont fabriquées en métal ferreux et les pièces attachées sont en matériaux compatibles ou en plastique	1, 2, 3	Les liaisons peuvent être cassées manuellement ou par broyage suivi par une séparation magnétique. Le choix dépend du temps nécessaire à l'opération. Les plastiques peuvent être recyclés en mélange.
Les fixations ne sont pas démontables mais fabriquées en métal ferreux et les sous-ensembles sont en plastiques compatibles	3	Les liaisons peuvent être cassées par broyage suivi par une séparation magnétique. Les plastiques peuvent être recyclés en mélange.
Les fixations ne sont pas démontables mais fabriquées en métal ferreux et les sous-ensembles sont en plastiques incompatibles	3, 4, 5	Les liaisons peuvent être cassées par broyage suivi par une séparation magnétique. Les plastiques sont séparés par densité (si possible). Ils peuvent être recyclés en mélange.
Les fixations et les sous-ensembles ne sont pas compatibles. Les fixations ne sont pas récupérables.	4, 5	Pas de séparation possible. Contamination possible en cas de broyage. Quelques solutions de séparation chimique sont envisageables.
Les matériaux des sous-ensembles sont compatibles entre eux mais pas avec ceux des fixations. Toutefois, le poids des liaisons est trop faible pour contaminer le recyclage des pièces.	1	Tout peut être recyclé comme une seule pièce. A vérifier le taux de contamination accepté.

Tableau 13. Niveau de désassemblage selon la norme VDI2243

- Niveau 1: désassemblage manuel facile,
- Niveau 2 : désassemblage manuel avec effort
→ Le composant peut contenir un revêtement ou un adhésif compatible
- Niveau 3 : Désassemblage mécanique ou broyage (procédé conventionnel)
→ Le composant peut contenir un revêtement ou un adhésif incompatible
- Niveau 4 : Désassemblage mécanique ou broyage (procédé spécifique ou à développer)
→ Le composant peut contenir un revêtement ou un adhésif incompatible
- Niveau 5 : Désassemblage impossible
→ pas de technologie existante
→ coût trop important.

4.5.5. Etape 3 : Construction d'une base de données spécifique

La base de données spécifique aux appareillages de moyenne tension est un élément principal dans la construction de notre outil d'éco-conception. En effet, nous défendons le fait que la qualité des données contribue fortement dans l'aide à la conception en général et à l'éco-conception d'une manière plus particulière. En effet, l'analyse des bases de données environnementales standards montre des lacunes qui peuvent avoir une influence certaine sur les orientations de conception :

- Données génériques relatives à une catégorie de matières,
- Données moyennes entre différents sites de fabrication,
- Absence de données relatives à certains matériaux et procédés.

Nous avons également remarqué que les différentes données techniques, environnementales, économiques et réglementaires sont dispersées dans diverses sources et outils. Nous proposons donc de regrouper ces données dans une seule et unique base de données accessible au concepteur. Nous avons construit notre base de données par type de matériaux et procédés (clé d'entrée). Pour chaque matériau nous associons une norme technique qui contient les propriétés mécaniques, thermiques, électriques et chimiques, un module environnemental, une note réglementaire (si nécessaire), un module économique (source et coût) et la liste des procédés de fabrication et de fin de vie qui peuvent y être associés. Pour chaque procédé nous affectons un module technique qui présente les caractéristiques du procédé et son aptitude par rapport aux différents matériaux, un module environnemental qui contient les données relatives aux flux d'entrée sortie, une note réglementaire et un module économique.

Par ailleurs, nous consacrons une partie de cette base de données à la veille technologique et bibliographique. En effet, nous souhaitons utiliser cet outil d'éco-conception en tant qu'outil d'information qui permet à l'équipe de conception d'accéder facilement à une information synthétique et fiable.

4.5.5.1. Etape 3.1 : base de données environnementale

Comme présenté, nous avons mis l'accent sur l'élaboration de la base de données environnementale. Pour ce faire nous avons suivi l'approche suivante :

1. Elaborer une liste de tous les matériaux et procédés utilisés dans l'industrie de la moyenne tension,
2. Déterminer les principaux matériaux et procédés afin de créer un premier noyau de la base de données. Ce travail a été effectué en concertation avec les responsables d'industrialisation et différents responsables de projets de conception,
3. Vérifier les modules environnementaux correspondants dans les bases de données conventionnelles (ECOINVENT, IDEMAT, ETH, ECOMATERIAL SELECTOR,...). Cette vérification se fait de plusieurs manières : contrôle de la date, relecture des sources bibliographiques, demande d'information au rédacteur du module, demande de l'avis d'experts,... Tous les modules de mauvaise qualité sont éliminés,
4. Elaborer de nouveaux modules environnementaux. Notre approche de création de nouveaux modules est basée sur une sélection de sources classées selon le niveau de qualité suivant :
 - i. Données mesurées et vérifiées sur les sites de fabrication de l'entreprise ou de ses fournisseurs,
 - ii. Données calculées des sites de fabrication de l'entreprise ou de ses fournisseurs,
 - iii. Données retrouvées dans des sources bibliographiques fiables.

Néanmoins, nous n'avons pas intégré la notion de qualité dans nos calculs ultérieurs.

4.5.5.2. Etape 3.2 : base de données technique

Les données techniques relatives aux matériaux sont relativement accessibles. En effet, AREVA T&D/DRC dispose d'une base de normes de matériaux utilisés en moyenne tension et d'un outil d'aide à la sélection de ces matériaux. Cependant, les données relatives aux procédés de fabrication ne sont pas synthétisées et viennent de différentes sources bibliographiques ou sont éparpillées chez différents acteurs de l'équipe de conception. Nous avons donc élaboré des modules techniques qui regroupent toutes les informations relatives aux procédés de fabrication et de valorisation en fin de vie. Ces modules mettent l'accent sur les aptitudes d'application par rapport aux différents matériaux et les précautions à prendre pour les applications particulières. A titre d'exemple, nous pouvons citer les procédés de soudure et leurs comportements vis-à-vis de différents métaux, ou les paramètres de moulage pour l'injection des différents grades de thermoplastiques.

4.5.5.3. Etape 3.3 : données réglementaires

Il n'existe pas de restrictions réglementaires particulières relatives aux appareillages de moyenne tension. Toutefois, et en prévision de l'évolution réglementaire, nous attirons l'attention des concepteurs sur les risques réglementaires tels ceux des directives DEEE et RoHS ou de la réglementation REACH. Ceci intègre la directive interne à AREVA T&D/DRC relative à l'interdiction de certaines substances interdites (confère chapitre 2). La mise en garde du concepteur se fait d'une manière automatique lorsqu'il sélectionne le matériau ou le procédé concerné. L'accès direct à ces informations est possible dans une rubrique séparée de l'outil. La mise à jour de ces données est très importante et nécessite une veille réglementaire régulière. Le concepteur doit, alors, être averti de toute modification dans cette rubrique.

4.5.5.4. Etape 3.4 : données économiques

La mise à disposition des données économiques constitue une valeur ajoutée importante apportée au concepteur. En effet, avec la diversité et la variation quotidienne des cours des matériaux cela permet d'ajuster les calculs de coût au moment de la conception. A titre d'information, notre outil intégrera un calculateur de coût qui contient entre autres les prix de rachat, de broyage, de mise en décharge, d'incinération et de récupération des polluants en fin de vie. Par ailleurs, nous avons inclus un outil de calcul de coût de fabrication de pièces métalliques, développé en interne, afin de regrouper les différentes fonctions en un seul outil de conception.

4.5.5.5. Etape 3.5 : données diverses et veille technologique

Cette catégorie regroupe toutes les données générales qui peuvent intéresser le concepteur. Nous utilisons cette rubrique comme bibliothèque d'information où chaque acteur de l'équipe de conception peut contribuer pour partager des documents ou des références bibliographiques avec les autres membres de cette équipe. Nous avons également mis en place un système de veille technologique qui s'intéresse aux nouvelles solutions écologiques applicables au domaine de la moyenne tension, tel que des nouveaux matériaux, traitements de surface ou procédés de recyclage.

4.5.6. Etape 4 : hiérarchisation environnementale des options de conception

L'objectif principal de cet outil est d'orienter le concepteur vers l'option de conception la plus écologique. Nous estimons qu'il est intéressant de donner les valeurs des indicateurs environnementaux à l'utilisateur mais dans la pratique le concepteur souhaite simplement avoir un résultat qu'il arrive à comprendre.

Nous rappelons que la difficulté essentielle des ACV est le manque d'interprétation des évaluations environnementales quantitatives. Dans la pratique, que ce soit pour évaluer une préférence ou une similarité, les critères sont rarement unanimes dans la comparaison des alternatives et l'on doit se résoudre à prendre parti sur la résultante des conflits existants. Pour cela, on cherche généralement à définir une règle qui permette de bâtir une relation de préférence ou de similarité sur l'ensemble des alternatives à partir de leurs vecteurs de performances.

Dans la suite, nous nous consacrerons à la construction d'une relation de préférence entre les indicateurs environnementaux des différentes options de conception. Cette approche est basée sur une démarche mathématique multicritères. En effet, il s'agit d'élaborer un algorithme de comparaison multicritères avec des indicateurs ayant des unités et des ordres de grandeur différents. L'analyse multicritères est un concept plus ancien, mais sa structure est équivalente à celle de l'analyse de cycle de vie. De plus, c'est aussi un outil pour des décideurs, permettant de sélectionner une solution. De nombreuses méthodes ont été proposées pour agréger les performances de chacune des solutions relativement à chacun des critères. Les méthodes d'analyse multicritères sont des outils d'aide à la décision développés depuis les années 1960. De nombreuses méthodes ont été proposées afin de permettre aux décideurs de faire un « bon » choix [BENOIT et ROUSSEAU 2003]. Pour certains experts du domaine, ce choix existe dans l'esprit du décideur, et le processus d'aide à la décision doit le faire ressortir. Pour d'autres, le processus d'aide à la décision doit créer ce choix. L'objectif des méthodes multicritères est ainsi d'aider à prendre une décision (ou à évaluer entre elles plusieurs solutions, sans avoir forcément de choix à effectuer au final) dans les situations de choix où aucune possibilité n'est parfaite; et où différents critères entrent en conflit. L'idée de base est de considérer tous les critères qui entrent en compte; leur attribuer un poids lié à leur importance relative ; de noter chaque action par rapport à tous les critères et finalement d'agréger ces résultats. L'état de l'art des principales méthodes de comparaison multicritères (voir annexe 5), telles que PROMETHEE, ELECTRE, MAUT et AHT, montre que les méthodes de sur-classement et notamment ELECTRE et PROMETHEE sont les plus adaptées à notre cas [HAOUES 2006]. Ces deux méthodes se basent sur deux étapes principales : la pondération des critères de comparaison et la comparaison deux par deux des solutions à comparer. La méthode ELECTRE permet de comparer deux options sans tenir compte des écarts qui existent entre ces deux options. PROMETHEE intègre une fonction de préférence entre deux actions. Néanmoins, le choix de cette fonction est laissé à l'utilisateur.

Nous nous baserons sur le principe de la méthode PROMETHEE pour élaborer notre algorithme de comparaison des options de conception. A la différence de cette méthode nous comparons et classons toutes les options de conception en même temps. La comparaison se fera critère par critère. L'option de référence pour chaque critère est l'option qui présente la valeur la plus faible.

4.5.6.1. Etape 4.1 : pondération des indicateurs environnementaux

Nous nous sommes basés sur la stratégie environnementale pour la pondération des indicateurs environnementaux. Les indicateurs correspondant à une priorité immédiate ont une pondération forte et vice versa.

Nous avons choisi une échelle de poids de 1 à 5 équivalente à celle utilisée dans la norme VID2243 pour le recyclage :

- 1 pour les priorités de long terme
- 2 pour les priorités de moyen terme
- 3 pour les priorités de court terme
- 5 pour les priorités immédiates

Le tableau 14 présente notre méthode d'attribution de poids relatif à chaque action stratégique :

Evaluations environnementales	Stratégie proposée à l'entreprise		Indicateur environnemental	Poids (P)
	Actions	Priorités		
Recyclabilité limitée par l'emploi de résines thermodurcissables, de céramiques, de gaz SF6.	Améliorer la recyclabilité avec un objectif de 95% de recyclage du poids total	Moyen terme : atteindre 85% de recyclabilité	Ressources naturelles minérales	2
		Long terme : atteindre 95% de recyclabilité	Ressources naturelles minérales	1
	Faciliter le désassemblage	Long terme	Désassemblage	1
Utilisation de Chrome hexavalent	Eliminer les substances dangereuses contenues dans ces produits.	Priorité immédiate	Toxicité	5
Utilisation du plomb dans les cartes électroniques		Moyen terme		2
Utilisation de trichloréthylène pour dégraissage		Priorité immédiate		5
Emissions de gaz SF6 à effet de serre	Réduire les fuites de SF6.	Priorité immédiate	Effet de serre	5
	Chercher des solutions de substitution gaz, liquides, solides ou mixtes	Long terme	Effet de serre	1
Consommation d'électricité pour la fabrication et la gestion de la fin de vie	Réduire la consommation électrique	Moyen terme	Consommation d'énergie	2
Utilisation de substances susceptibles d'être reconnues comme dangereuses	Chercher des solutions de substitution des substances dangereuses	Long terme	Toxicité	1
Emissions toxiques dans la phase de fabrication	Eliminer les substances toxiques	Moyen terme	Toxicité	2
Consommation de ressources hydriques	Réduire la consommation de l'eau	Moyen terme	Consommation de l'eau	2
Présence de pièces massives avec des matériaux parfois incompatibles	Réduire la consommation des ressources naturelles	Court terme	Ressources naturelles	3
Utilisation de matériaux et de procédés émettant des gaz à effet de serre	Réduire les émissions de gaz à effet de serre	Court terme	Effet de serre	3

Tableau 14. Méthode de pondération des indicateurs environnementaux

Pour chaque indicateur nous considérons le niveau de pondération le plus élevé. Il en résulte le système de pondération suivant :

Indicateur environnemental	Poids (P)
Toxicité	5
Effet de serre	5
Ressources naturelles minérales	3
Consommation d'énergie	2
Consommation d'eau	2
Désassemblage	1

Tableau 15. Pondération des indicateurs environnementaux

4.5.6.2. Etape 4.2 : calcul des écarts entre les options de conception

L'objectif de cette étape est de passer d'un système absolu à un système relatif indépendant des valeurs et des unités des indicateurs environnementaux. Dans cette étape le paramètre principal est l'écart entre la valeur à comparer et la valeur la plus faible pour chaque indicateur, l'objectif étant de donner un poids à cet écart. Il est important de noter que l'intégration de la notion d'écart permet de rendre compte des différences qui existent entre les différentes options de conception. En effet, la simple classification par ordre de mérite ne suffit pas et ne reflète pas la réalité des choses car quelque soit l'écart entre les options de conception, la classification sera la même. Nous nous servons de ce type de classification pour mettre en avant l'option de référence (option min).

Exemple :

	Option a	Option b	Option c
Toxicité	112	220	50

Dans cet exemple, « l'option c » est l'option qui a la valeur minimale de l'indicateur toxicité. Cette option sera l'option de référence pour cet indicateur. Nous calculerons alors l'écart entre cette option et toutes les autres par rapport à l'intervalle des valeurs. L'intervalle étant la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale, dans cet exemple l'intervalle = 220-50.

L'écart (E) entre deux options de conception est mesuré avec l'équation suivante :

$$E_i = \frac{\text{Valeur de l'indicateur pour l'option } i - \text{Valeur de l'indicateur pour l'option min}}{\text{Valeur de l'indicateur pour l'option max} - \text{Valeur de l'indicateur pour l'option min}}$$

Dans le cas de notre exemple :

- E option a = $112-50/220-50 = 0,885$
- E option b = $220-50/220-50 = 1$
- E option c = $50-50/220-50 = 0$

4.5.6.3. Etape 4.3 : classification des options de conception

Il s'agit d'attribuer une note relative à chaque indicateur pour les différentes options de conception. Cette note est le résultat de la multiplication de l'écart E par le poids de l'indicateur P.

$$N_i = P_i \times E_i$$

Le score de chaque option de conception est la somme des notes attribuées à chaque indicateur :

$$S_j = \sum N_i$$

L'option de conception qui a le score le plus faible est la solution la plus écologique (selon notre stratégie), ainsi de suite.

4.5.7. Etape 5 : Capitalisation et intégration de recommandations en éco-conception

Outre les restrictions internes à l'entreprise ou les risques réglementaires, nous avons ajouté des recommandations de conception pour orienter le concepteur vers des pistes d'amélioration environnementale. Il s'agit de proposer des solutions alternatives aux choix effectués par le concepteur. Cette liste de recommandations est à mettre à jour selon l'évolution des technologies propres et le retour sur l'expérience de l'équipe de conception. A titre d'exemple nous présentons les solutions de substitution du chrome hexavalent dans les traitements de surface métalliques, les matériaux de remplacement des résines thermodurcissables, les solutions de soudure sans plomb, les techniques de nettoyage sans trichloréthylène, etc. Ces messages apparaissent automatiquement quand le concepteur renseigne ses options de conception et dans le rapport environnemental.

4.5.7.1. Outil de communication environnementale

En termes d'outils de communication, nous avons opté pour deux outils principaux :

- Une auto-déclaration environnementale,
- Un manuel de gestion en fin de vie.

Ces outils peuvent être utilisés en interne ou proposés aux partenaires et clients de l'entreprise.

4.5.7.2. Auto-déclaration environnementale

Nous avons élaboré une auto-déclaration environnementale conforme à la norme ISO14025 type III et au modèle de GIMELEC7.

Ce document contient les informations suivantes :

- Une description du produit,
- Une présentation du ou des sites de fabrication,
- Une analyse du cycle de vie,
- Un bilan des matériaux,
- La destination des matériaux en fin de vie,
- Des voies d'amélioration de la conception,
- Autres informations utiles.

4.5.7.3. Manuel de gestion en fin de vie

Ce document présente la procédure préconisée pour une meilleure gestion des produits en fin de vie. Il s'agit d'une présentation des éléments suivants :

- Description du produit,
- Précautions à prendre avant le démontage du produit,
- Les obligations de dépollution,
- Les scénarii de désassemblage,
- Des pistes d'amélioration pour la valorisation en fin de vie.

4.5.7.4. Présentation sphérolitique

En dehors de ces deux supports de communication, nous proposons un système simplifié de communication des impacts environnementaux intitulé « présentation sphérolitique ». Il s'agit de présenter les phases du cycle de vie d'un produit sous forme de sphères ou de cercles. Le diamètre de la sphère est représentatif de l'impact global de la phase du cycle de vie. Les secteurs sont représentatifs des impacts environnementaux spécifiques. L'avantage de ce type de présentation est la facilité de réalisation et de compréhension. En outre, ce modèle peut être utilisé pour la comparaison de deux ou plusieurs produits. Nous présentons ci-dessous, un exemple d'application de notre modèle sphérolitique.

⁷ Groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés

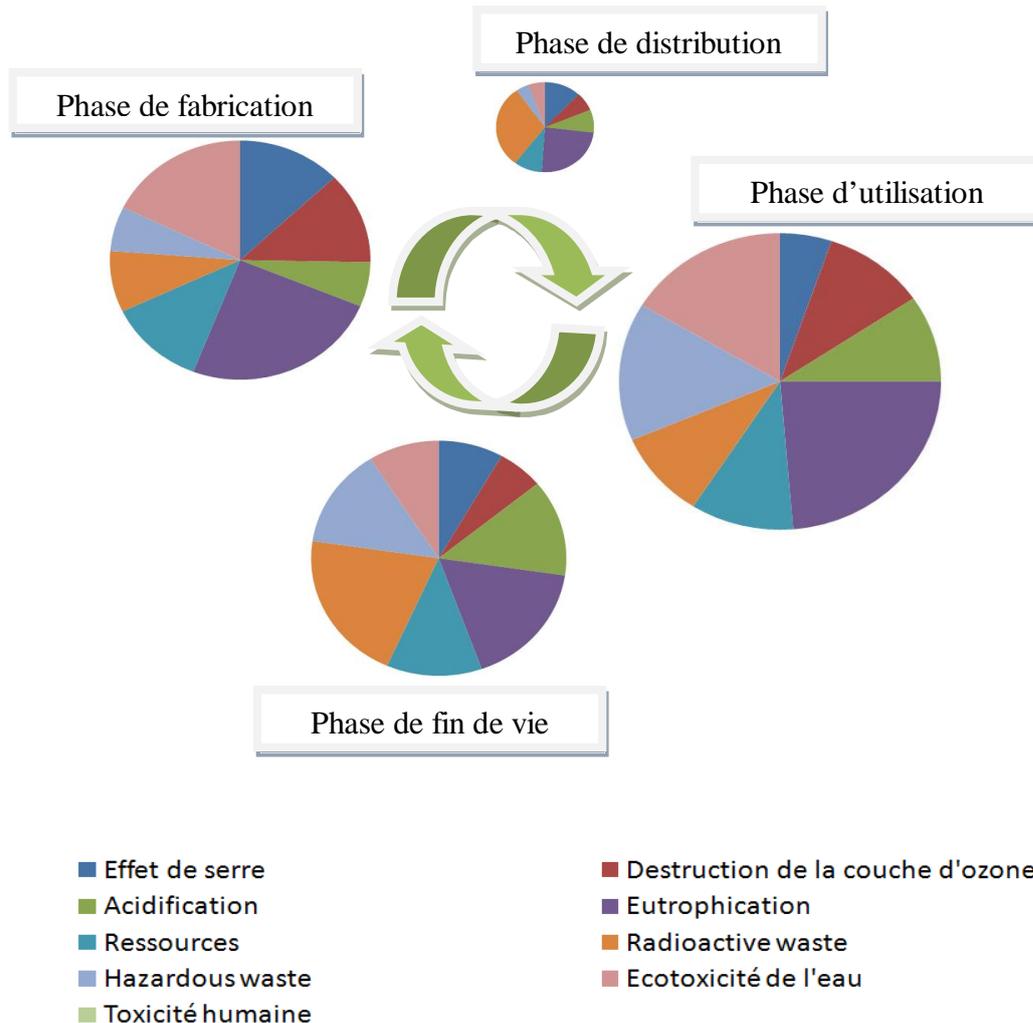


Figure 51. Exemple de présentation sphérolitique

4.6. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les étapes de la construction d'un outil d'aide à l'éco-conception orientée vers l'application électrique de moyenne tension. Cet outil est développé en tant qu'outil intégré de conception qui permet au concepteur de faire le choix entre plusieurs options de conception. Il répond à la fois à une demande du bureau d'études mais aussi à celle des autres acteurs de l'équipe de conception telle que le service commercial. Il sert aussi bien de support technique, économique qu'environnemental. Son utilisation et l'exploitation des résultats est simple et rapide. De plus, les données utilisées sont de bonne qualité. Par ailleurs, les essais réalisés avec cet outil sont cohérents et affichent des résultats homogènes. La difficulté principale rencontrée réside dans l'implémentation de la base de données environnementale où l'accès à certaines informations reste difficile voire impossible étant donné les problèmes de confidentialité. Le chapitre suivant met en avant une expérimentation de notre méthodologie au sein du bureau d'études. Un projet d'éco-conception d'une bielle isolante est pris comme exemple d'application.

**CHAPITRE 5 : EXPERIMENTATION DE LA
METHODE AU SEIN DU BUREAU D'ETUDES.
EXEMPLE DE LA BIELLE ISOLANTE**

5. CHAPITRE 5 : EXPERIMENTATION DE LA METHODE AU SEIN DU BUREAU D'ETUDE. EXEMPLE DE LA BIELLE ISOLANTE

5.1. INTRODUCTION

Au cours des chapitres précédents nous avons présenté notre méthodologie et un outil d'aide à l'éco-conception des appareillages de moyenne tension. Nous avons également montré que pour obtenir une meilleure intégration du paramètre environnemental au sein de l'entreprise, il faut tenir compte des performances environnementales de la gamme de produits concernée, de la stratégie environnementale de l'entreprise et du processus de conception. En effet, nous avons mis l'accent sur l'importance de la volonté de la direction de l'entreprise déterminant une stratégie d'éco-conception, de sorte qu'elle guide les orientations de conception et mette en place l'organisation et les moyens nécessaires pour l'application de cette stratégie. Par ailleurs, nous avons basé notre travail sur une approche orientée vers le besoin du « simple » concepteur, que nous considérons comme le principal acteur direct en termes d'amélioration environnementale.

Dans ce chapitre nous nous appuyons sur un exemple de projet de conception pour montrer les différentes étapes d'intégration de l'éco-conception et valider notre démarche, selon les paramètres que nous avons préalablement déterminés. La mise en application de notre méthodologie dans un tel projet est l'aboutissement d'un long processus qui a permis de mettre en place une démarche d'éco-conception au sein de l'entreprise. Nous n'allons pas détailler dans ce travail le côté organisationnel de ce déploiement (confère annexe 8). Succinctement, les principales étapes sont :

- Mise en place d'une politique environnementale produit,
- Organisation de formations en éco-conception,
- Organisation de réunions de concertation avec l'équipe de conception,
- Intégration des paramètres environnementaux dans le cahier des charges de conception,
- Intégration de l'éco-conception dans le manuel de qualité des projets de conception,
- Mise en place de supports de communication environnementale,
- Mise en place des outils d'éco-conception,
- Organisation d'audits d'éco-conception,
- Mise en application dans un projet de conception.

Ces étapes ne sont pas réalisées de manière chronologique, mais il est possible de constater globalement l'enchaînement des phases suivantes :

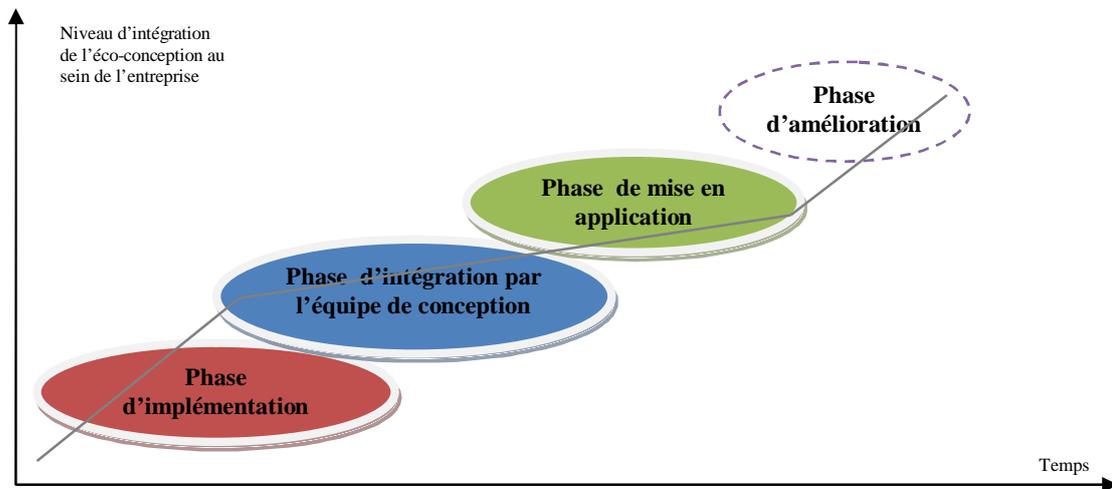


Figure 52. Phases de déploiement de notre démarche d'éco-conception

5.2. ETUDE DE CAS : BIELLE ISOLANTE

Dans ce paragraphe nous présentons l'intégration de l'éco-conception dans un projet de re-conception d'un produit de moyenne tension.

5.2.1. Présentation du produit

Le produit est un appareillage qui sert à contrôler le passage de courant électrique sur les lignes de chemin de fer. Il permet aussi de couper le courant en cas d'éventuels défauts sur le réseau électrique. Ce produit est rempli de gaz SF6 et scellé à vie. Le taux de fuite annuel est inférieur à 0,1%. Ce disjoncteur à coupure a été sélectionné parce qu'il est représentatif des équipements de moyenne tension et parce que l'agenda du projet s'accorde avec la mise en place de notre démarche d'éco-conception.

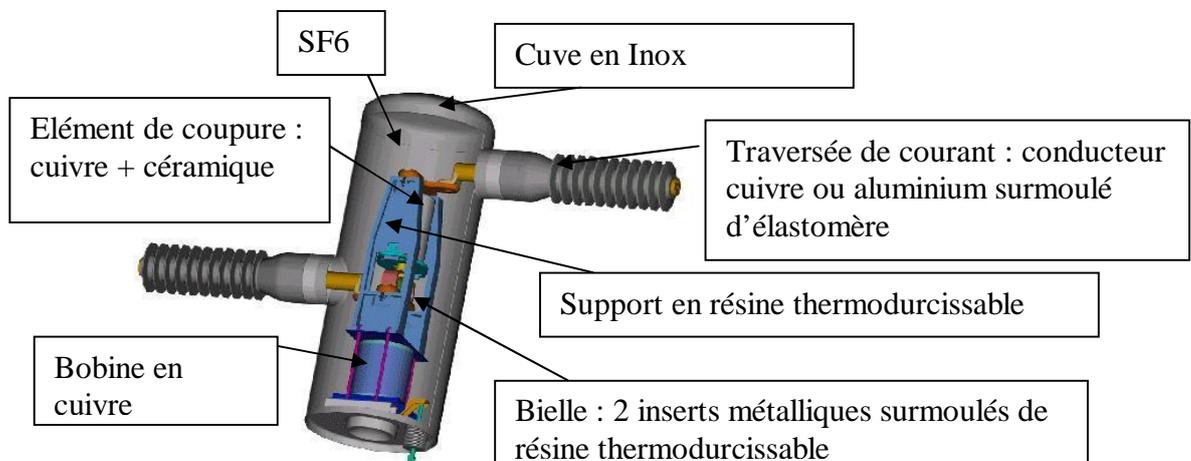


Figure 53. Principaux sous-ensembles de l'produite

5.2.2. Cahier des charges

Le cahier des charges de départ contient trois critères principaux. Le produit développé ;

- ne doit pas utiliser l'une de ces substances toxiques : CrVI, Cd, Pb, Hg, PBB, PBDE, amiante, trichloréthylène,
- doit présenter un meilleur profil écologique que le produit existant,
- ne doit pas présenter un coût de revient supérieur à celui du produit existant.

5.2.3. Phase de conception générale. Recherche des possibilités générales d'amélioration environnementale

Dans ce paragraphe nous analysons les sources de pollution du produit durant les phases de fabrication et de fin de vie et par impact environnemental.

Indicateur environnemental	Phase de fabrication	Phase de fin de vie
Toxicité	<ul style="list-style-type: none"> • Le Cr6 utilisé dans le traitement des surfaces métalliques, • Les additifs utilisés dans la fabrication de la résine thermodurcissable • Le trichloréthylène utilisé pour le nettoyage du cuivre 	<ul style="list-style-type: none"> • Eléments toxiques en cas de décomposition du SF6
Effet de serre	<ul style="list-style-type: none"> • L'utilisation du gaz SF6 • L'effet de serre du la consommation électrique 	<ul style="list-style-type: none"> • Récupération du gaz SF6 • L'effet de serre du la consommation électrique
Ressources naturelles	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de matières non recyclées 	<ul style="list-style-type: none"> • Récupération des résines thermodurcissables et des céramiques non recyclables
Consommation d'énergie	<ul style="list-style-type: none"> • Cuisson des céramiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Broyage pour la séparation des pièces surmoulées
Consommation d'eau	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement de surface 	<ul style="list-style-type: none"> • Nettoyage des pièces
Désassemblage	<ul style="list-style-type: none"> • Non concerné 	<ul style="list-style-type: none"> • Récupération de SF6 difficile (absence de vanne) • Désassemblage difficile : cuve soudée et éléments surmoulés

Tableau 16. Sources principales des impacts environnementaux du produit

De cette analyse nous avons dégagé différents axes de travail :

Actions de conception applicables	Actions de recherche à engager
Remplacer les résines thermodurcissables par d'autres matériaux moins polluants	Eliminer le chrome hexavalent des traitements de surface
Prévoir une vanne de récupération du SF6	Trouver une solution sans trichloréthylène pour le nettoyage des pièces en cuivre
Eviter les pièces surmoulées	Remplacer le SF6 par une autre technologie à moindre effet de serre
	Remplacer les céramiques par des matériaux moins énergivores

Tableau 17. Actions de conception et de recherche pour l'amélioration de l'impact environnemental du produit

Dans ce mémoire, nous allons nous focaliser sur l'action relative au remplacement des résines thermodurcissables dans les appareillages de moyenne tension. En effet, cette problématique touche un grand nombre de produits et permet d'exposer d'une manière simple le déroulement de l'application de notre méthodologie d'éco-conception

5.2.4.Phase de conception détaillée. Conception d'une nouvelle bielle isolante

Les résines thermodurcissables sont très largement utilisées dans l'application électrique de moyenne tension grâce à leurs propriétés mécaniques, électriques et chimiques, leur stabilité dans le temps, leur prix relativement bas et la disponibilité de la matière avec fournisseurs partout dans le monde. Ces matériaux ne sont pas toxiques en soi mais le procédé de fabrication utilise des additifs qui peuvent être nocifs pour l'homme et pour l'environnement. Néanmoins, le problème le plus important vient de la non recyclabilité de ce type de matériaux. En effet, à l'heure actuelle, il est quasiment impossible de les régénérer de manière industrielle. Il apparaît alors très important d'étudier les possibilités de remplacement des résines thermodurcissables dans les appareillages de moyenne tension.

5.2.4.1. Produit de référence : la bielle isolante

Pour les besoins de cette étude nous avons sélectionné le sous-ensemble « bielle isolante » comme pièce de référence. En effet, cet ensemble présente multiples avantages :

- Pièce surmoulée contenant deux inserts métalliques,
- Pièce soumise à des sollicitations mécaniques et électriques très fortes,
- Pièce sous contrainte continue,
- Pièce fonctionnant dans des plages critiques de température,
- Pièce de petite taille permettant un prototypage plus rapide et moins coûteux

La bielle isolante est une pièce qui assure à la fois la liaison mécanique et l'isolation diélectrique de l'élément de coupure du courant et de la commande mécanique.

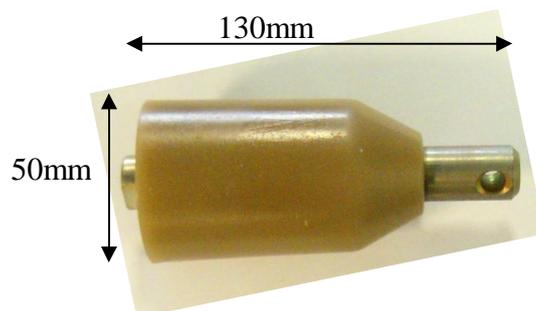


Photo 2. Bielle isolante en résine thermodurcissable

5.2.4.2. L'évaluation environnementale de la bielle isolante

Nous avons réalisé l'évaluation environnementale de la bielle isolante en utilisant le logiciel SIMAPRO et notre logiciel DECOD pour comparer les résultats obtenus par les deux outils.

Données d'entrée :

	Phase de fabrication			Phase de fin de vie			
	Matière		Procédés	Séparation	Valorisation	Décharge	
Corps de bielle	Résine thermo durcissable	300g	Injection GPA (15mn) Post cuisson (4h)	Broyage	Incinération	3MJ	
Inserts	Acier	170g	Usinage + traitement de surface : zingage et chromatation Cr6		Recyclage	161g	14g

Tableau 18. Données d'entrée pour l'évaluation environnementale de la bielle isolante

Evaluation environnementale par EDIP et CML :

Dans cette modélisation nous n'avons tenu compte que des indicateurs qui peuvent avoir une liaison avec les indicateurs de notre méthode DECOD.

Impact	Unité	Fabrication du corps de bielle	Fabrication des inserts	Fin de vie de la bielle	Total
Global warming (GWP 100)	g CO2	1,10E+03	3,60E+02	2,50E+02	1,71E+03
Hazardous waste	kg	3,80E-03	1,30E-05	8,10E-07	3,81E-03
Resources (all)	kg	4,90E-03	4,90E-03	1,80E-06	9,80E-03
human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,10E+01	1,10E+01	6,80E-02	2,21E+01

Tableau 19. Evaluation environnementale de la bielle isolante en résine thermodurcissable selon les méthodes EDIP/UMIP97 et CML 2000

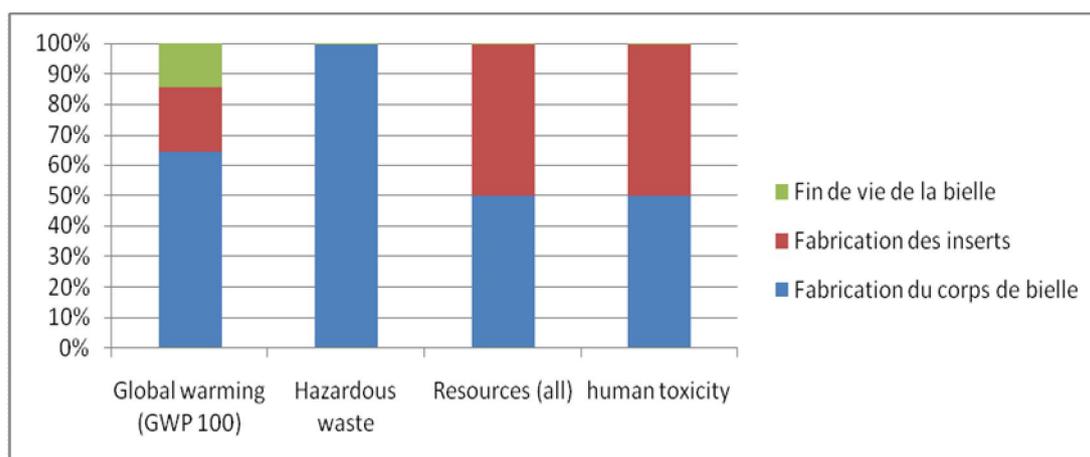


Figure 54. Distribution des impacts environnementaux de la bielle isolante en résine thermodurcissable

L'analyse des résultats de la méthode EDIP/UMIP097 montre que la phase de fabrication présente un impact environnemental prédominant par rapport à la phase de fin de vie. Seul, l'effet de serre dû à la consommation d'énergie de la phase de fin de vie semble être important. Il apparaît que les inserts participent de manière équivalente à la toxicité et à l'épuisement des ressources. Les déchets des inserts étant totalement recyclables (>95 %) et non toxiques, seuls les déchets de la résine thermodurcissable peuvent participer à cet impact. Nous notons que les méthodes du logiciel SIMAPRO ne permettent pas de calculer la consommation d'énergie et d'eau.

Evaluation environnementale par DECOD :

Impact	Unité	Total
Effet de serre	g CO2	1,71E+03
Ressources naturelles	kg	5,15E-03
Toxicité	Eq Ni	4,24E-04
Consommation d'énergie	MJ	1,4
Consommation d'eau	dm3	1774
Désassemblage	--	3

Tableau 20. Evaluation environnementale de la bielle isolante en résine thermodurcissable selon la méthode DECOD

L'objectif n'est pas de comparer les résultats des deux évaluations environnementales mais de comparer les tendances des impacts environnementaux engendrés par les nouvelles solutions de conception avec les deux méthodes (CML/EDIP et DECOD).

5.2.4.3. La recherche de solutions de remplacement des résines thermodurcissables

La recherche théorique

La recherche des solutions de remplacement des résines thermodurcissables se base sur la sélection de tous les matériaux qui peuvent satisfaire le cahier des charges de la pièce sans prendre en considération l'aspect économique. Pour ce faire, nous avons utilisé différentes bases de données de matériaux et nous nous sommes basés sur l'avis d'experts en matériaux d'isolation diélectrique.

La collecte de ces données nous a permis de dresser une liste qui contient essentiellement trois catégories de matières : les céramiques, les bois et les thermoplastiques.

La recherche expérimentale

Nous avons fait une sélection de matériaux dans chaque catégorie (céramique, bois et thermoplastique) pour réaliser une série de tests mécaniques, électriques, de vieillissement et de compatibilité chimique sur éprouvettes. Un protocole d'essai a été élaboré et suivi pour toutes les matières. Ces essais viennent compléter et valider les données collectées dans les fiches matières. Il en résulte que les céramiques et les bois ne sont pas adaptés pour notre application compte tenues des paramètres suivants :

- Résultats mécaniques peu satisfaisants,
- Manque d'adhésion entre les inserts et le corps de bielle,
- Prise d'humidité par le bois,
- Niveau d'isolation diélectrique bas,
- Difficulté d'industrialisation : usinage difficile,
- etc...

Nous avons donc éliminé le bois et la céramique de notre sélection de matériaux. Seuls certains thermoplastiques semblent donner des résultats intéressants.

La recherche économique

Etant donné la liste importante des matières thermoplastiques pouvant satisfaire notre cahier des charges et la disparité des coûts entre ces différents grades, il a été nécessaire de restreindre notre choix en intégrant le critère économique. Deux paramètres entrent en considération : le prix de la matière et le coût de la mise en œuvre. Il s'agit alors d'estimer la quantité de matière nécessaire pour la bielle isolante. Les propriétés mécaniques et la densité des thermoplastiques étant différents de celles de la résine thermodurcissable, nous ne pouvons pas considérer la même quantité de matière. Nous avons donc réalisé une modélisation mécanique simplifiée avec trois grades de thermoplastiques pour estimer le volume d'un cylindre entourant les deux inserts métalliques. Ce calcul permet de donner la quantité maximale de matière nécessaire à cette application et donc le temps d'injection associé :

- Quantité de matière thermoplastique : 100g
- Temps d'injection : 1 minute

Nous pouvons constater que la quantité de matière utilisée est trois fois moins importante que celle de la résine thermodurcissable et que le temps d'injection est très court ce qui réduit considérablement le coût de la fabrication.

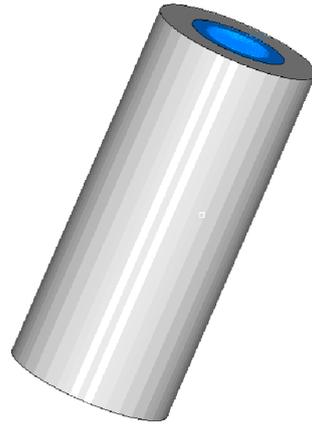


Figure 55. Modélisation mécanique simplifiée pour l'estimation de la quantité de matière thermoplastique pour la bielle isolante

Nous avons sélectionné tous les grades de thermoplastiques qui permettent d'avoir un coût inférieur ou égal à celui de la bielle en résine thermodurcissable, les inserts étant considérés inchangés.

5.2.4.4. La phase de conception détaillée de la nouvelle bielle

La première étape consistait à rassembler une équipe projet multidisciplinaire : matériaux, mécanique, électrique, plasturgie, moules, éco-conception, dessin technique et achat. L'objectif du groupe de travail était de concevoir une nouvelle bielle isolante en thermoplastique sans aucune considération de la bielle existante. Le point de départ étant le cahier des charges technique (voir annexe 6) auquel nous avons ajouté l'interdiction d'utilisation du chrome hexavalent.

La conception de la bielle isolante en thermoplastique est basée sur le principe d'enlèvement de la matière. On part d'un volume déterminé par l'encombrement du produit et on enlève de la matière jusqu'à atteindre un volume optimal qui permet de satisfaire le cahier des charges mécanique. Ensuite, le concepteur utilise les règles de conception des pièces plastiques pour affiner le dessin et proposer plusieurs options de conception différentes.

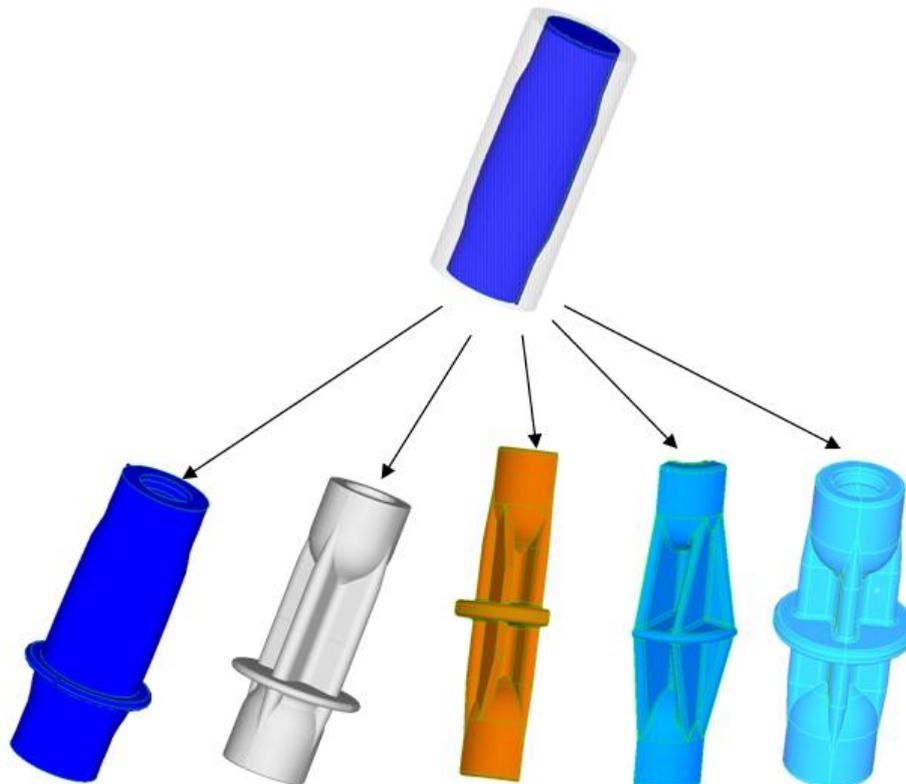


Figure 56. Différents modèles potentiels de conception de la bielle isolante en thermoplastique

Chaque option subit une modélisation mécanique, rhéologique et électrique afin de déterminer le comportement de la pièce face aux sollicitations prévues dans le cahier des charges.

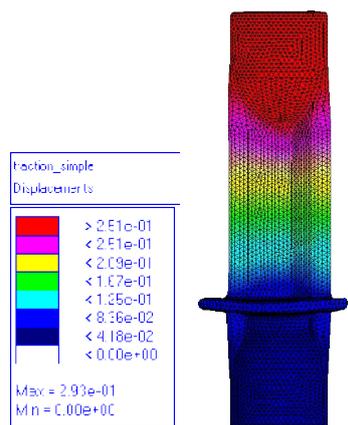


Figure 57. Exemple de modélisation mécanique de la bielle isolante en thermoplastique

Dans ce paragraphe nous n'allons pas détailler le processus de conception utilisé. Retenons simplement que plusieurs options de conception ont été développées et que pour des raisons économiques, une seule a été retenue. Remarquons que la forme des inserts métalliques a changé par rapport aux inserts de la bielle en résine thermodurcissable.

L'équipe de conception propose deux solutions pour éliminer le chrome hexavalent : utiliser un traitement à base de zingage électrolytique suivi d'une passivation au chrome trivalent et d'un revêtement organo-minéral, ou remplacer l'acier par du laiton plus cher mais plus facile à usiner. Il reste alors à choisir la matière thermoplastique appropriée et le traitement de surface adéquat pour les inserts selon les critères environnementaux tels que ceux indiqués dans notre méthodologie.

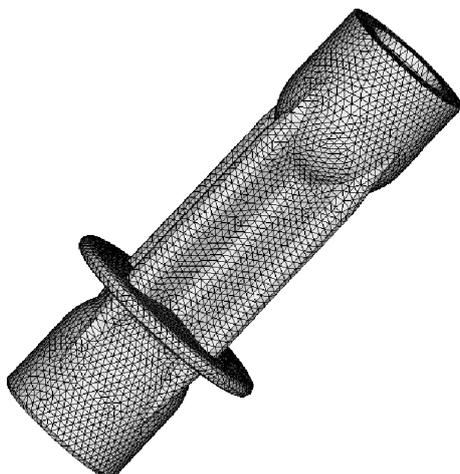


Figure 58. Modèle retenu de la bielle isolante en thermoplastique

5.2.4.5. Le choix de la matière plastique

Nous avons sélectionné cinq grades de thermoplastiques (TP 1 à TP5), qui répondent au cahier des charges technique et économique que nous avons comparé à la résine thermodurcissable (TD) selon les méthodes EDIP/UMIP et CML et ensuite DECOD. Nous avons considéré le total des impacts environnementaux des phases de fabrication et de fin de vie.

Données d'entrée :

	Phase de fabrication			Phase de fin de vie			
	Matière		Procédés	Séparation	Valorisation		Décharge
Corps de bielle	Thermoplastique	85g à 90g	Injection thermoplastique (2mn)	Broyage	Recyclage	65% (moyenne)	35%

Tableau 21. Données d'entrée pour l'évaluation environnementale du corps de la bielle en thermoplastique

Evaluation environnementale :

Impact	Unité	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TD (ref)
Global warming (GWP 100)	g CO2	1,7E+04	1,2E+04	1,2E+03	1,0E+03	2,0E+02	1,7E+03
Hazardous waste	kg	1,2E-04	1,2E-04	1,2E-04	1,2E-04	1,2E-04	3,8E-03
Resources (all)	kg	4,1E-05	4,1E-05	5,8E-05	5,5E-05	4,4E-05	9,8E-03
human toxicity	kg 1,4-DB eq	7,3E-02	6,6E-02	1,8E-01	1,6E-01	5,5E-02	2,2E+01

Tableau 22. Evaluation environnementale des grades de thermoplastiques selon les méthodes EDIP/UMIP et CML

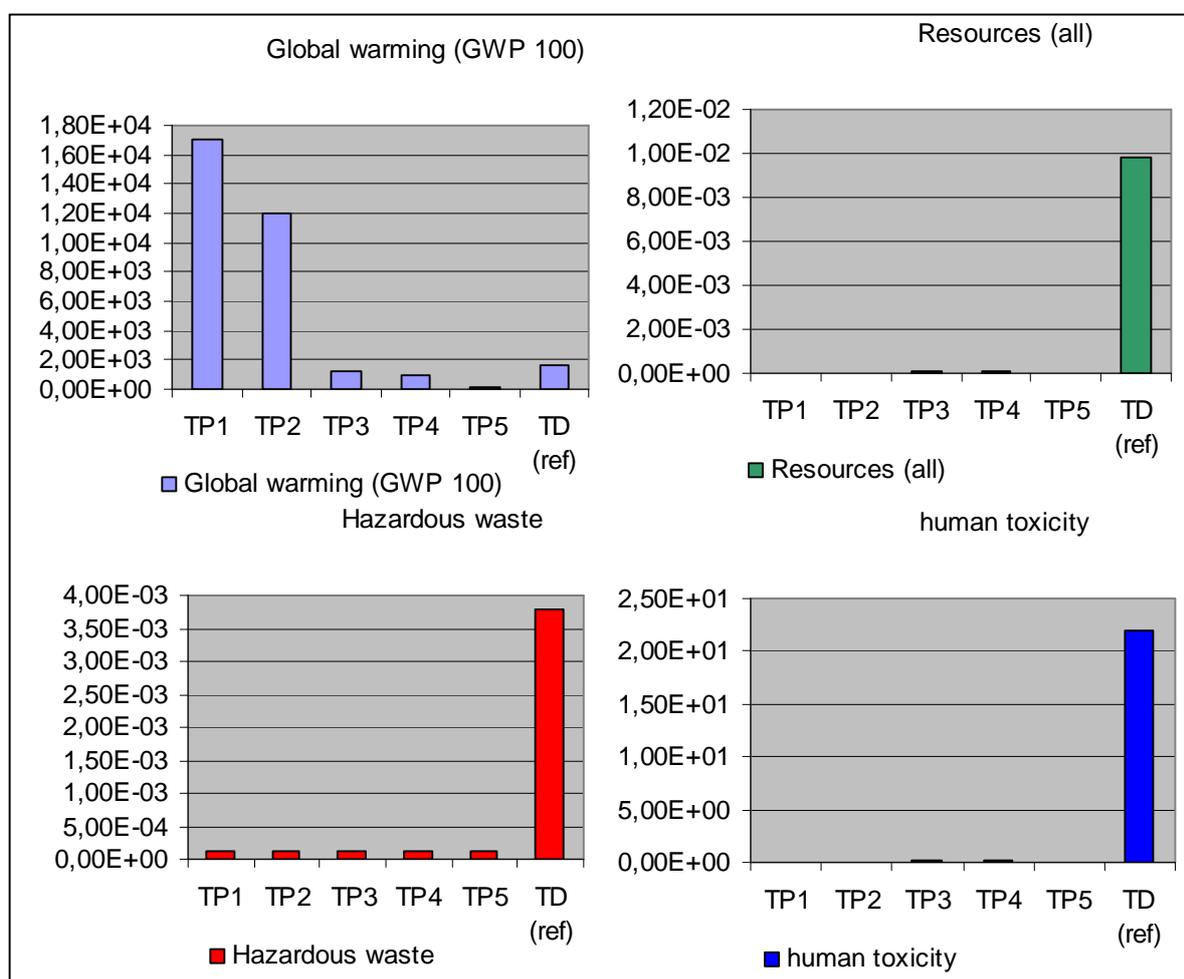


Figure 59. Dispersion des impacts environnementaux des thermoplastiques par rapport à la résine thermodurcissable selon les méthodes EDIP/UMIP et CML

Impact	Unité	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5
Effet de serre	g CO2	1,7E+04	1,2E+04	1,2E+03	1,0E+03	2,0E+02
Ressources naturelles	kg	8,55E-06	10,2E-06	15,5E-06	11,4E-06	18E-06
Toxicité	Eq Ni	5,95 E-06	5,76 E-06	6,59 E-06	5,74 E-06	5,82 E-06
Consommation d'énergie	MJ	12	13,5	1,4	1,16	1,95
Consommation d'eau	dm3	4,58	10,65	9,75	4,58	5,54
Désassemblage	--	--	--	--	--	--
Score environnemental		7,99	8,15	9,25	1,14	3,91

Tableau 23. Evaluation environnementale des grades de thermoplastiques selon la méthode DECOD

D'après la méthode DECOD, le thermoplastique TP4 est le grade le plus écologique, suivi par TP5, TP1, TP2 puis TP3.

5.2.4.6. Le choix des inserts

Nous avons comparé les inserts en laiton et les inserts en acier traités avec un traitement sans chrome hexavalent afin de choisir le modèle le plus écologique.

Données d'entrée :

	Fabrication			Fin de vie		
	Matière	Fabrication	Traitement de surface	Broyage	Recyclage	Décharge
Inserts en acier	115g	Usinage acier 6cm ²	Zingage + CrIII 5cm ²	115g	109g	6g
Inserts en laiton	133g	Usinage laiton 6cm ²	Sans traitement de surface	133g	120g	13g

Tableau 24. Données d'entrée pour l'évaluation environnementale des inserts de la bielle en thermoplastique

Evaluation environnementale :

Impact	Unité	Inserts en acier	Inserts en laiton
Global warming (GWP 100)	g CO2	344	279
Hazardous waste	kg	2,22E-08	1,02E-05
Resources (all)	kg	1,53E-05	3,8E-03
human toxicity	kg 1,4-DB eq	6,9E-02	8,56

Tableau 25. Evaluation environnementale des inserts de la bielle en thermoplastique selon les méthodes EDIP/UMIP et CML

Impact	Unité	Inserts en acier	Inserts en laiton
Effet de serre	g CO2	344	279
Ressources naturelles	kg	2,89E-06	3,76E-04
Toxicité	Eq Ni	1,34E-06	2,45E-04
Consommation d'énergie	MJ	0,08	0,061
Consommation d'eau	dm3	1,2	0,93
Désassemblage	--		
Score environnemental		7	10

Tableau 26. Evaluation environnementale des inserts selon la méthode DECOD

D'après la méthode DECOD, les inserts en laiton sont plus polluants que les inserts en acier traité. Cela confirme les tendances affichées par les méthodes EDIP/UMIP et CML.

Comparaison environnementale :

Il s'agit de comparer l'évaluation environnementale de la bielle en thermoplastique composée du plastique TP4 et de l'insert en acier avec celle de la bielle en résine thermodurcissable.

Impact	Unité	Bielle thermoplastique	Bielle en résine thermodurcissable
Effet de serre	g CO2	1,34E+03	1,71E+03
Ressources naturelles	kg	1,43E-05	5,15E-03
Toxicité	Eq Ni	7,08E-06	4,24E-04
Consommation d'énergie	MJ	1,24E+00	1,40E+00
Consommation d'eau	dm3	1,20E+03	1,77E+03
Désassemblage	--	3,00E+00	3,00E+00
Score environnemental		0	17

Tableau 27. Comparaison environnementale des bielles en thermoplastique et en résine thermodurcissable selon la méthode DECOD

Le résultat de l'évaluation environnementale obtenu par la méthode DECOD montre que la nouvelle bielle en thermoplastique TP4 avec des inserts en acier traités avec un zingage et une passivation au chrome trivalent est plus écologique que la bielle en résine en thermodurcissable avec des inserts en acier traités au chrome hexavalent. Ce résultat est conforme aux prévisions et aux méthodes d'ACV conventionnelles.

5.2.5. Comparaison avec le processus proposé

La figure suivante présente le parallèle entre notre processus proposé et la démarche utilisée au cours de ce projet pilote :

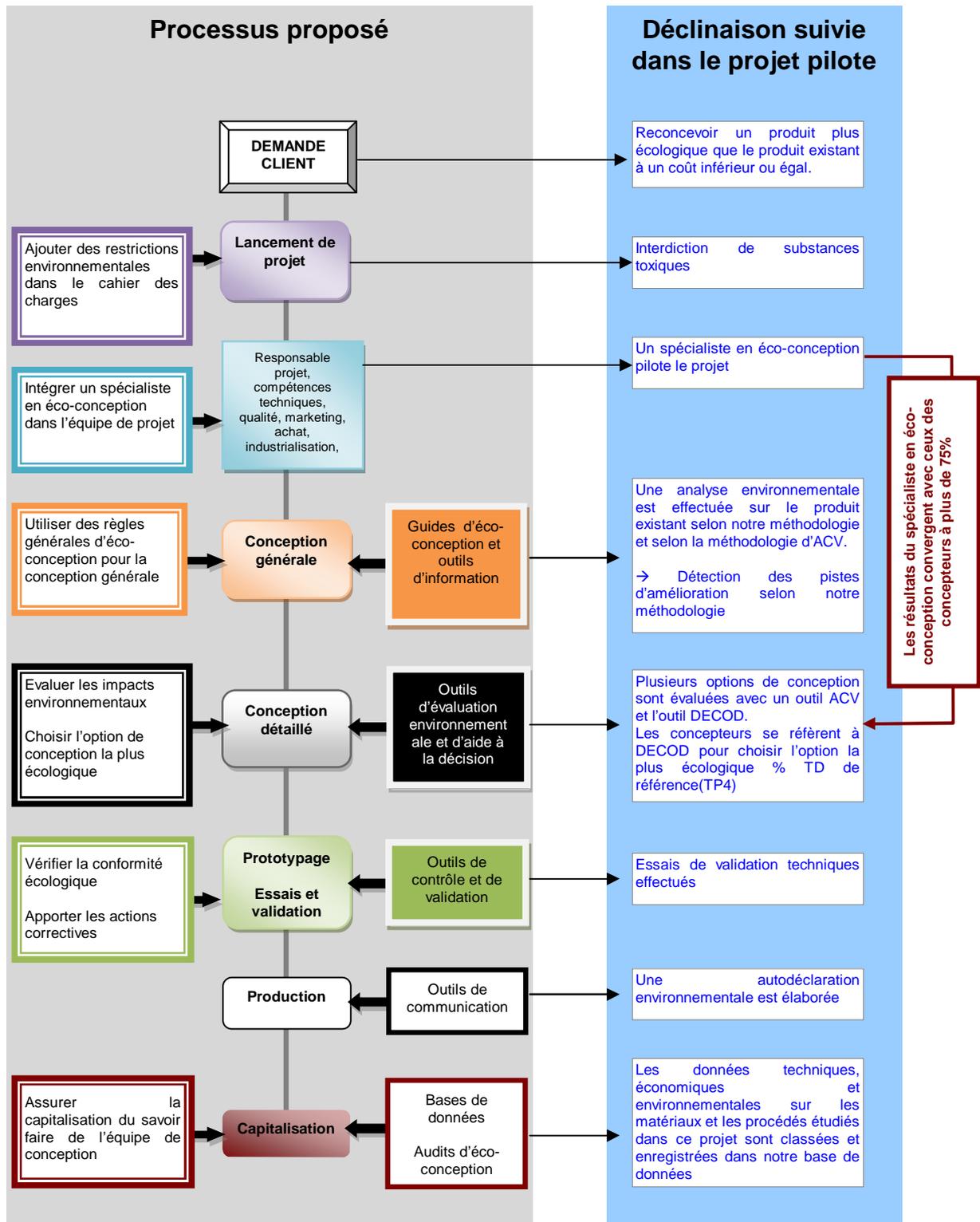


Figure 60. Comparaison entre notre approche théorique et l'approche suivie dans le projet pilote

5.3. CONCLUSIONS

L'utilisation de l'outil DECOD nous a permis d'orienter nos choix entre les différents grades de thermoplastiques et modèles d'inserts. Les résultats obtenus semblent cohérents et présentent les mêmes tendances que les méthodes EDIP/UMIP et CML sauf pour la toxicité. Ceci s'explique par la différence de référentiel et des coefficients utilisés.

La bielle isolante en thermoplastique a été alors fabriquée et testée. Suite à deux modifications de géométrie, elle répond parfaitement au cahier des charges initial technique et économique et présente un impact environnemental plus faible que celui de la bielle existante. A ce jour, elle est en phase de validation finale avant le lancement en production. La suite de ce projet consiste à appliquer notre méthode d'éco-conception à d'autres types de produits afin de tester la convergence des résultats.



Photo 3. Prototype de la bielle isolante en thermoplastique

D'un point de vue pratique, les utilisateurs de notre outil d'aide à l'éco-conception « DECOD » apprécient la facilité d'accès et la simplicité et la rapidité du résultat. La prise en main de notre méthodologie d'éco-conception est rapide et les différents participants de l'équipe de projets ont adhéré à cette approche. Nous nous en servons depuis comme projet de référence pour la formation d'autres équipes de conception. En effet, nous défendons le fait que l'éco-conception au niveau industriel doit tenir compte à la fois des performances techniques, économiques et environnementales du produit et prendre en considération les capacités humaines et financières de l'entreprise. Nous avons montré à travers ce projet de conception que l'intégration des critères environnementaux au cours de la conception ne constitue pas obligatoirement un frein à l'innovation et à l'économie. Bien au contraire, elle présente une nouvelle forme de réflexion qui permet de dépasser les formes de conception usuelles habituellement utilisées dans un domaine industriel donné.

En effet, le fait d'obliger le concepteur à revoir la conception de la bielle isolante lui a permis d'investiguer d'autres types de matériaux qu'il n'a pas l'habitude d'utiliser. Par ailleurs, ce projet constitue un point de départ pour l'application de notre méthodologie dans d'autres projets de conception. A titre d'exemple, le bureau d'études a conçu un nouveau déflecteur d'air qui pèse 4 kg, fabriqué en plastique, pour remplacer le déflecteur existant en béton de 120 kg, utilisé dans des postes préfabriqués de moyenne tension.

Par ailleurs, nous estimons que l'appropriation définitive de notre démarche d'éco-conception nécessite la mise en place d'autres projets similaires. C'est pour cela que nous continuons le travail sur d'autres voies d'amélioration évoquées au début de ce chapitre à savoir : le remplacement du gaz SF₆ dans l'isolation diélectrique, la substitution des traitements de surface toxiques, etc.

Tel que présenté dans le chapitre 4, nous estimons que la validation finale de notre méthodologie d'éco-conception et de notre outil DECOD nécessite une étude de convergence entre le choix des concepteurs et les choix d'un expert en éco-conception. L'application sur une dizaine de projets devrait permettre de mesurer la fiabilité de notre approche.

CONCLUSION

6. CONCLUSION

6.1. BILAN DE NOTRE RECHERCHE

Les travaux présentés dans ce mémoire répondent aux besoins industriels exprimés par l'entreprise AREVA T&D/DRC à savoir :

- L'élaboration d'une méthodologie d'éco-conception simplifiée et adaptée aux appareillages électriques de moyenne tension,
- Le développement d'un outil d'aide à l'éco-conception approprié à la même application,
- L'organisation de la mise en place de cette méthodologie et de cet outil au sein d'une unité de référence.

Le premier chapitre nous a permis de poser le contexte de recherche dans lequel s'inscrit cette thèse, à savoir, une situation environnementale inquiétante, une pression sociétale, réglementaire et commerciale croissante alors que certaines catégories de produits n'ont pas encore fait l'objet de recherches en éco-conception. En effet, nous avons montré que les appareillages de moyenne tension forment une catégorie de produits différente des autres produits électriques de par leurs caractéristiques :

- Techniques : fonction, forme, matériaux utilisés, durée de vie,
- Commerciales : aucune pression explicite de la part des clients pour apporter des améliorations environnementales,
- Réglementaires : aucune exigence réglementaire équivalente aux équipements de grande consommation.

En résumé, il s'agit d'élaborer une méthodologie d'éco-conception qui s'inscrit dans une démarche totalement volontaire. Cela nous a amenés à considérer la problématique d'une manière différente de celle des appareillages électriques domestiques.

Pour ce faire, nous proposons dans le deuxième chapitre, une démarche d'élaboration de notre méthodologie d'éco-conception qui prenne en compte à la fois l'analyse des besoins de l'équipe de conception mais aussi la politique environnementale de l'entreprise ainsi que l'analyse environnementale des produits existants. Il s'agit d'orienter notre recherche vers une méthodologie qui s'adapte au contexte de travail et qui s'intègre plus facilement dans l'entreprise. L'analyse des besoins de l'équipe de conception montre à la fois un besoin méthodologique et un besoin d'outils d'éco-conception : guides, communication, aide à la décision et contrôle de conception. L'évaluation environnementale des produits de moyenne tension permet de constater que la phase d'utilisation est la phase la plus polluante du cycle de vie à cause de la consommation électrique sur une durée de vie supérieure à vingt ans.

De plus, la phase de fabrication, la fin de vie et la phase de distribution présentent un impact environnemental très faible. La politique environnementale de l'entreprise concerne particulièrement la pollution environnementale des sites de production. Néanmoins, nous avons constaté une incitation forte en faveur de l'intégration de l'éco-conception dans les projets de développement. La seule restriction affichée concerne une série de substances dangereuses équivalente à celles de la directive européenne RoHS. Nous avons aussi remarqué que l'application d'une telle directive interne ne peut pas se faire de manière automatique ni systématique. Il s'agit d'abord de préparer les solutions alternatives à ces interdictions afin d'en faciliter l'application. Nous estimons que, dans ce cas, l'implication des équipes de recherche de l'entreprise est indispensable et la participation des fournisseurs est requise afin de développer leur force de proposition et d'innovation et de réduire les coûts de développement. En résumé, ce deuxième chapitre nous a permis d'approfondir nos connaissances relatives aux appareillages de moyenne tension et de faire une analyse complète du contexte de travail afin de proposer d'abord une approche d'intégration de l'éco-conception dans le processus de conception utilisé par AREVA T&D/DRC et ensuite un outil d'aide à l'éco-conception.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié les possibilités d'intégration des critères environnementaux dans le processus de conception utilisé par l'entreprise pour le développement des appareillages de moyenne tension. Ainsi, nous avons positionné les outils d'éco-conception nécessaires à chaque étape de conception. L'approche générale suivie est informative avant la conception, restrictive au début, sélective en cours de la conception et vérificative après la fin de la conception. Nous avons montré que les possibilités les plus importantes d'amélioration environnementale concernent la phase de conception détaillée. En effet, les restrictions environnementales du cahier des charges initial étant limitées, la marge opérationnelle du concepteur est large. Nous avons également constaté que le concepteur finit par s'approprier les règles d'éco-conception et les adopte dans la phase de conception générale. Toutefois ce dernier manifeste un besoin d'assistance au cours de la phase de conception détaillée. En effet, face à différentes options de conception, le concepteur ne dispose pas des moyens nécessaires à la sélection de l'option la plus écologique. Dans ce cas, il est amené à demander l'assistance d'un spécialiste en environnement. En pratique, le concepteur ne prend pas en compte le critère environnemental et choisit arbitrairement une des solutions possibles, ou encore il se base sur un choix de « bon sens » qui ne correspond pas toujours au produit le plus « propre ». C'est pour pallier ce manque d'outils dédiés au concepteur que nous avons développé un outil d'aide à la décision spécifique aux appareillages de moyenne tension que nous développons dans le quatrième chapitre.

Le chapitre en question présente notre démarche de développement d'un outil intégré d'aide à l'éco-conception centré sur l'aide à la décision environnementale et baptisé DECOD. L'élaboration de cet outil suit l'axe directeur de notre travail de recherche qui consiste à privilégier les actions simples à forte marge d'amélioration environnementale. En effet, la première étape considère la simplification de l'évaluation environnementale des appareillages de moyenne tension en ne sélectionnant que les phases du cycle de vie et les impacts environnementaux qui présentent de fortes possibilités d'amélioration environnementale.

Cela nous a conduits à positionner notre outil au niveau des phases de fabrication et de fin de vie.

Nous avons par la suite sélectionné un certain nombre d'indicateurs environnementaux qui reflètent les impacts relatifs à ces deux phases et qui sont en accord avec l'anticipation réglementaire et la politique environnementale de l'entreprise. La hiérarchisation de ces indicateurs se base sur notre proposition de stratégie d'éco-conception développée en prenant en compte l'évaluation environnementale des produits et les capacités techniques et économiques de l'entreprise. La dernière étape consiste à évaluer et comparer les options de conception selon un algorithme de calcul et de comparaison multicritères.

Afin de consolider cet outil, nous avons élaboré une base de données environnementale spécifique aux matériaux et des procédés utilisés dans l'industrie électrique de moyenne tension. Par ailleurs, DECOD contient d'autres bases de données techniques, économiques, réglementaires et bibliographiques. Aussi, nous avons intégré un outil de calcul de coût de fabrication et un support de communication. En résumé, DECOD répond aux besoins de l'équipe de conception en termes d'éco-conception et offre un support technique et économique solide. La mise en place de cet outil et de notre méthode d'éco-conception dans l'entreprise passe par plusieurs phases que nous mentionnons dans le cinquième chapitre.

Dans ce dernier chapitre, nous présentons un exemple de projet pilote qui utilise notre approche méthodologique et l'outil DECOD pour la re-conception d'un appareillage de moyenne tension. Nous avons montré que l'application de notre approche permet d'apporter une véritable aide technique et environnementale au concepteur et aboutit à une amélioration environnementale significative du produit existant. Ainsi, les résultats de cette étude sont cohérents avec l'étude effectuée par un spécialiste en éco-conception et présente à un taux de fiabilité supérieur à 75%. A ce stade, nous ne pouvons juger de la fiabilité réelle de notre outil. Nous jugeons qu'il faut réitérer cette démarche sur une dizaine de projets avant de mesurer le taux de convergence de notre méthode simplifiée avec la méthode experte.

6.2. APPORT ET ORIGINALITE DE NOTRE TRAVAIL

L'originalité de notre travail consiste à proposer une démarche d'éco-conception pour une catégorie de produits peu considérée jusqu'à maintenant par cette problématique. Cela revient d'une manière plus générale à étudier un produit particulier qui ne subit aucune obligation ou moteur d'amélioration environnementale. Les difficultés essentielles de ce travail proviennent d'abord des particularités techniques du produit, ensuite, de la réticence de certains acteurs de conception vis-à-vis de notre démarche puis de l'équilibre à trouver entre la satisfaction du besoin de la direction et celle de l'équipe de conception et l'apport environnemental.

Le principal intérêt de notre approche est de simplifier l'éco-conception et de la rendre accessible au concepteur sans pour autant perdre de vue la notion de qualité. En effet, nous avons porté un intérêt particulier à la qualité des données et des résultats proposés afin de garantir une information tangible.

Nous avons constaté que la mise en place de notre démarche d'éco-conception permet d'apporter une approche de réflexion différente nous autorisant ainsi à nous orienter vers de nouvelles solutions technologiques sans coût supplémentaire voire même plus économiques (confère l'exemple de la bielle isolante, Chapitre 5).

Par ailleurs, notre outil d'aide à l'éco-conception apporte une réponse à un besoin général des concepteurs industriels qui ne sont pas capables d'interpréter les résultats des outils « experts » d'éco-conception. En effet, nous estimons qu'il est indispensable que le concepteur dispose d'un outil intégré de conception qui contient entre autres un outil d'éco-conception et non le contraire.

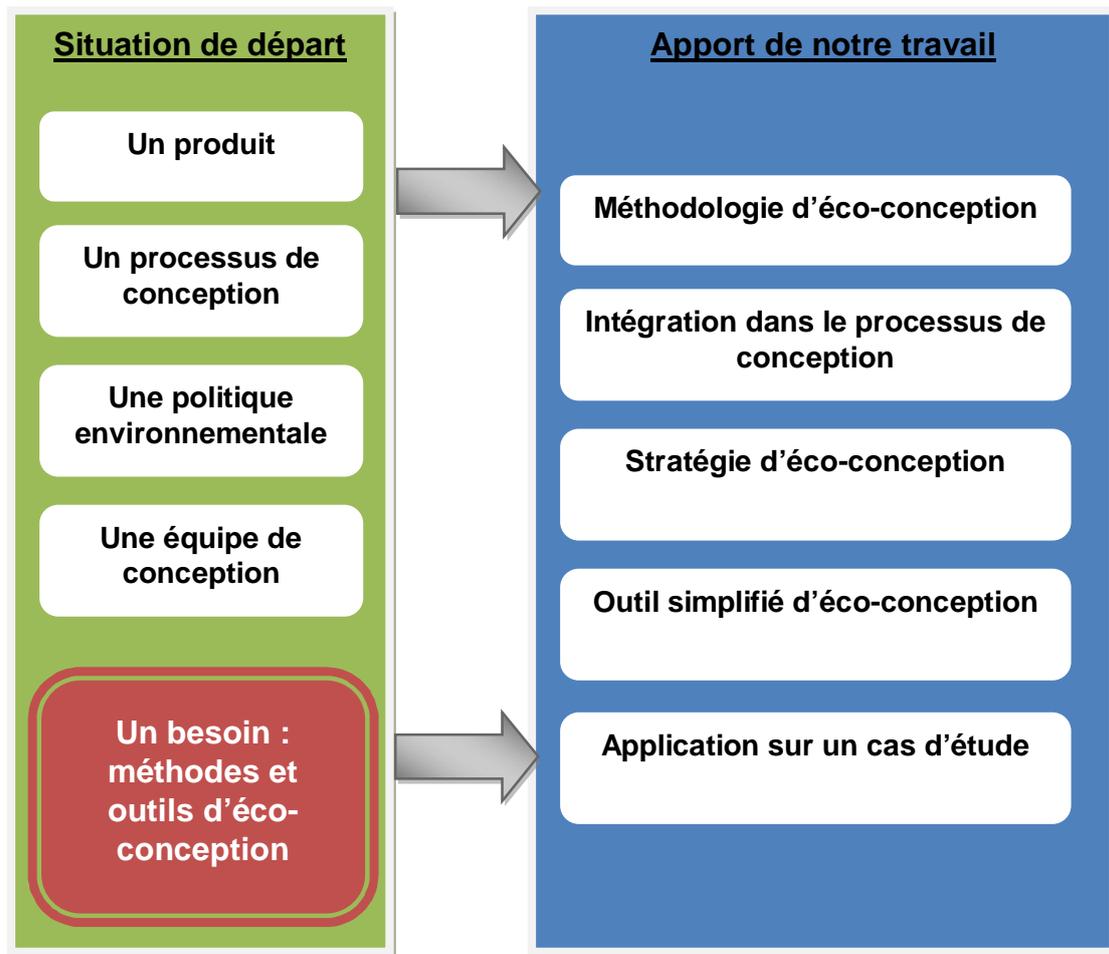


Figure 61. Principaux apports de notre travail de recherche

6.3. LIMITES DE NOTRE TRAVAIL

La présente approche s'est focalisée sur la partie fabrication et fin de vie. Au vu de l'importance de la phase utilisation, il est important pour ces appareils de compléter l'approche proposée par une analyse détaillée d'un point de vue environnemental de la phase utilisation et des possibilités d'améliorations. On comparera en particulier les impacts liés à la réduction de consommation avec ceux générés lors de la fabrication ou la fin de vie de ces améliorations potentielles. Nous considérons que le fait de travailler sur une catégorie particulière de produits d'une seule entreprise limite le champ de recherche et d'application. Du point de vue de la recherche, nous

estimons que toute méthodologie d'éco-conception est discutable étant donné la part d'approximation et de choix stratégiques. En effet, notre méthodologie reste tributaire de l'adoption par l'entreprise de notre proposition stratégique.

Par ailleurs, cette stratégie est amenée à évoluer au cours du temps mais une évolution trop rapide peut mettre en échec l'application de notre méthodologie. Nous estimons que les changements doivent accompagner des cycles de développement de deux à trois ans qui correspond à la durée moyenne pour la conception d'un nouveau produit. Ainsi, l'approche que nous proposons impose un certain niveau de formation environnemental de l'équipe de conception.

En fait, nous supposons que les règles standards d'éco-conception sont assimilées et adoptées par les concepteurs. Ceci requiert la mise en place d'un plan de formation spécifique à toute nouvelle personne qui rejoint le bureau d'études ; ce qui n'est pas aisé dans la pratique. L'outil DECOD que nous avons développé présente quelques lacunes de calcul. Il semble que l'algorithme de calcul ait besoin d'être affiné. Néanmoins, la difficulté principale de cet outil consiste à élaborer et mettre à jour les bases de données. Cela peut constituer une tâche de travail importante, particulièrement au début. Enfin, nous jugeons que cet outil est intéressant pour des choix de conception simples. La présence d'un spécialiste en éco-conception semble être indispensable comme fonction support pour des projets plus complexes.

6.4. PERSPECTIVES

Nous estimons que plusieurs perspectives sont possibles suite à notre travail :

La première consiste à élargir le champ de notre démarche à d'autres catégories de produits ayant des caractéristiques similaires telles que les machines outils ou encore les équipements industriels ou aussi le mobilier. Notre méthodologie est ajustable à la nature du produit, à l'organisation de la conception et à la stratégie environnementale de l'entreprise.

La deuxième perspective est relative à l'intégration de notre outil d'éco-conception dans les outils existants de conception assistée par ordinateur (CAO) [MATHIEUX et Al ; 2005). Ceci éviterait au concepteur d'assurer le renseignement des données d'entrée de ses options de conception et d'avoir un accès centralisé de tous les outils et bases de données annexes.

La troisième consiste à affiner les indicateurs de désassemblage et de recyclabilité selon les travaux de FROELICH (2004 et 2007) et de créer des indicateurs de suivi coût/efficacité environnementale. Il serait possible de se baser sur l'expérience capitalisée dans les bases de données de notre outil.

La quatrième est relative à l'intégration de la notion de l'incertitude sur la qualité les données et des résultats des évaluations environnementales. Il est alors envisageable d'appliquer la méthodologie d'évaluation des incertitudes développée par ROUSSEAU et Al. (2008).

BIBLIOGRAPHIE

7. BIBLIOGRAPHIE

Références réglementaires

1. Directive 2002/95/CE du parlement européen et du conseil du 27 janvier 2003 pour la Limitation d'utilisation de Substances Dangereuses dans les équipements électriques et électroniques LSDEEE (ou RoHS).
2. Directive 2002/96/CE du parlement européen et du conseil du 27 janvier 2003 pour les déchets des équipements électriques et électroniques DEEE.
3. Directive 2005/32/CE du parlement européen et du conseil du 6 juillet 2005 portant sur l'éco-conception des appareils consommateurs d'énergie EuP.
4. VHU. Directive 2000/53/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux Véhicules Hors d'Usage
5. REACH : Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, proposition de règlement adoptée par la Commission européenne le 29 octobre 2003
6. RGES : Règlement (CE) no 842/2006 du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 2006 relatif à certains gaz à effet de serre fluorés
7. Politique intégrée des produits. Développement d'une réflexion environnementale axée sur le cycle de vie, 18 juin 2003, Non publié au Journal officiel
8. Council Regulation (EEC) No. 1836/93 of 29 June 1993 Allowing Voluntary Participation by companies in the Industrial Sector in a Community Eco-Management and Audit Scheme 1993. Official Journal of the European Communities, No. L 168, 10 July, HMSO, 1993, London, pp. 1±18.
9. Department of the Environment, Transport and the Regions, U.K. Implementation of EC Directive 96/61 on Integrated Pollution Prevention and Control, Second Consultation Paper, DETR, London, 1998.

Références normatives

10. Norme XP R10-402 : Véhicules routiers – Conception des véhicules en vue de l'optimisation de la valorisation en fin de vie. AFNOR, juillet 1996.
11. Norme NF EN ISO 14040. Management environnemental. Analyse du cycle de vie – Principes et cadres. AFNOR, septembre 1997.
12. Norme FD X 30-310. Management environnemental. Prise en compte de l'environnement dans la conception des produits – Principes généraux et application. AFNOR, mai 1998.
13. Norme NF EN ISO 14041. Management environnemental. Analyse du cycle de vie – Définition de l'objectif et du champ de l'étude et analyse de l'inventaire. AFNOR, décembre 1998.
14. Norme NF EN ISO 14043. Management environnemental. Analyse du cycle de vie – Interprétation du cycle de vie. AFNOR, mai 2000.
15. Norme XP ISO/TR 14025. Marquage et déclarations environnementaux. Déclarations environnementales de type III. AFNOR, décembre 2000.
16. Norme NF EN ISO 14024. Marquage et déclarations environnementaux. Etiquetage environnemental de type I – Principes et méthodes. AFNOR, mai 2001.
17. Norme NF EN ISO 14021. Marquage et déclarations environnementaux. Auto-déclarations environnementales (Etiquetage de type II). AFNOR, octobre 2001.
18. Norme XP ISO/TR 14062. Management environnemental – Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit. AFNOR, janvier 2003.
19. Norme NF EN ISO 14001. Système de management environnemental. Exigences et lignes directrices pour son utilisation. AFNOR, décembre 2004.
20. Norme AFNOR X30-110, Matières premières et énergie - Vocabulaire et méthodologie de la détermination du contenu énergétique - Équivalences énergétiques, août 1983.
21. Norme allemande VID 2243, 2002-07, Conception de produit orientée recyclage.

22. CEI 62430: intégration des aspects environnementaux dans la conception des appareillages électriques et électroniques, publication prévue pour juillet 2009.
23. CEI guide 114: intégration des aspects environnementaux dans la conception des appareillages électrotechniques, mai 2005.
24. CEI 62545: déclaration environnementale des appareillages électriques et électroniques, janvier 2008.
25. CEI 62474: déclaration environnementale des matériaux utilisés dans les appareillages électriques et électroniques, publication prévue pour décembre 2009.
26. CEI 62422 : caractérisation environnementale des matériaux d'isolation solide, mars 2007.
27. CEI guide 109 : aspects liés à l'environnement – Prise en compte dans les normes électrotechniques de produits, juin 2003.

Sites Internet

28. www.ademe.fr
29. www.assemblee-nationale.fr
30. www.eia.doe.gov
31. www.etsu.com
32. www.industrie.gouv.fr
33. www.mddep.gouv.qc.ca
34. www.unige.ch
35. www.universprojet.com

Références bibliographiques

36. ABRASSARD, C., AGERRI, F., 2001, La naissance de l'éco-conception : du cycle de vie du disjoncteur au management environnemental produit, responsabilité et environnement.
37. A Guide for EcoDesign Tools, 2005, EcoDesign Awareness Raising Campaign for Electrical & Electronics SMEs, Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Allemagne.
38. ALCAN (2005), Rapport de développement durable.
39. ANTONSSON, E. (2001) "Imprecision in Engineering Design", Engineering Design Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena.
40. AREVA T&D/DRC Distribution Research Centre, 2005, 73PG02 – G.
41. ARRHENIUS, S., 1896. "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground." London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. Cinquième série. Avril 1896. 41: 237–275.
42. AZAPAGIC, A., 1998, Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation, Chemical Engineering Journal 73 : 1-21.
43. AUSEN, D. (2002) Results from the Nordic environmental survey 2002.Green-Pack report 2002-01. Nordsisk Innovations Center.
44. AZAPAGIC, A., 1999, Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimization, Chemical Engineering Journal 73 (1999) 1-21.
45. BABUSIAUX, D. et COIFFARD, J., 2000, La Jaune et La Rouge.
46. BAUMANN, H., BOONS, F., BRAGD, A., 2002. "Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives", Journal of Cleaner Production, 10, pp409-425.
47. BEKKER, C., 1995, Environmental information for industrial designers, Delft University of Technology, Delft.
48. BELLINI, B., JANIN, M., 2002, Etat de l'art : outils d'éco-conception disponibles, techniques d'ingénieur G6010.
49. BENOIT, V., et ROUSSEAU, P., 2003, Aid for aggregating the impacts in Life Cycle Assessment. The international journal of life cycle assessment, vol.8, pp74-82.

50. BEY, N., (2000). The Oil Point Method - A tool for indicative environmental evaluation in material process selection. Department of Manufacturing Engineering, IPT, Technical University of Denmark.
51. BHAMRA, T. A., Evans, S., MCALOONE, T. C., SIMON, M., POOLE, S., and SWEATMAN A. (1999) Integrating Environmental Decisions into the Product Development Process: Part 1 - The Early Stages, In Ecodesign '99. 1st International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing conference proceedings, Waseda University International Conference Center, Tokyo, Japan.
52. BLANC, I., LABOUZE, E., 1999, Analyse de Cycle de Vie – Evaluation de la qualité des données, Techniques de l'ingénieur. Traité Environnement G1. Paris.
53. BOOTHROYD, G., DEWHURST, P., KNIGHT W. (1994). Product design for manufacture and assembly. Publié par Marcel Dekker.
54. BREZET, J.C., VAN HEMELC., (1994). Product Development with the Environment as Innovation Strategy - The PROMISE Approach. Delft University of Technology Report, Delft, Pays-Bas.
55. BREZET, J.C., CRAMER, J.M., STEVELS, A.L.N. (1995), From Waste Management to Environmental Innovation, Rathenau Institute Report, La Haye, Pays-Bas.
56. BREZET, J.C., (1997), Dynamics in ecodesign practice, UNEP Industry and Environment. Vol. 20, N° 1-2, pp. 21-24, Paris.
57. BREZET, J.C., VAN HEMEL C., (1997), Ecodesign : A Promising approach to sustainable production and consumption. PNUE, Paris.
58. BULLINGE, H-J., 1994, Methods and Tools to Support Design for Recycling, publication au congrès CIRP, RECY'94, Erlangen (Allemagne).
59. BRUN, E., SAILLET, F., 2005, étude sur l'éco-conception, ADEME et AFNOR.
60. CHATAIN, M., 1999, Conception d'un objet, Techniques de l'ingénieur AM3810.
61. CRAMER, J. M., TUKKER, A., 1998, Product innovation and eco-efficiency in theory, Kluwer Academic Publishers.
62. DAOUD, W., HASSANZADEH, H., TORTORICI, J-F., JAMES, I., 2006, Environmental evaluation of medium voltage insulation systems, Insulation Conference à Birmingham 270-275.

63. DAOUD, W., HASSANZADEH, H., FROELICH, D., CORNIER, A., 2007, Ecodesign methodology for medium voltage application, Life Cycle Engineering conference à Tokyo.
64. DAOUD, W., HASSANZADEH, H., 2007, Eco-selection of materials for medium voltage application, conférence MATPOST à Lyon.
65. DENEUX, D., 2002, "Méthodes et modèles pour la conception concourante", Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
66. DEWULF, W., 2003, A pro-active approach to Ecodesign : framework and tools. PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven.
67. Document interne AREVA T&D/DRCn°73PG02
68. DONNELLY, K., BECKETT-FURNELL, Z. TRAEGER, S., OKRASINSKI, T., HOLMAN, S., 2005, Eco-design implemented through a product-based environmental management system, Journal of Cleaner Production xx (2005) 1-11.
69. DUCHAMP, R., 1999. - "La conception de produits nouveaux" - Hermès Editions, Paris, ISBN 2-7462-0045-7, 191 p.
70. DUFOURNET, D., 2001, Appareillages électriques d'interruption haute tension, techniques d'ingénieurs D4690.
71. Eco-conscious design of electrical and electronic equipment, 2005, The Institute for Product Development (IPU), Danish Toxicology Centre (DTC), GN-Teknik.
72. Éco-design : présentation du cabinet O2 au colloque Offensiv'PME - CCI 79, 2006.
73. Eco-design guide (ECOLIFE) : environmentally improved product design, case studies of the European electrical and electronics industry, 2002, ECOLIFE Thematic Network.
74. Environmental design considerations for electronic products, 2002, Standard ECMA-341, Standardizing Information and Communication Systems.
75. Environmentally Oriented Product Design A Guide for Companies in the Electrical and Electronics Industry, 1998, Anna Kärnä, Federation of Finnish Electrical and Electronics Industry, ISBN 951-96362-4-2.

76. FERNEZ-WALCH, S., (1991) "L'innovation de disjoncteur isolé au quotidien en entreprise industrielle", Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.
77. FARGNOLI, M., et FUMIHIKO, K., 2007, The Optimization of the Design Process for an Effective Use in Eco-Design, recueil de la conférence "advances in Life Cycle Engineering for sustainable Manufacturing Businesses" p59-64, Tokyo, JAPON.
78. FROELICH, D., MARIS, E., CHEMINEAU, L., HAOUES, N., RENARD, H., ABRAHAM, F, LASSARTESSSES, R., State of the art of plastic sorting and recycling : Feedback to vehicle design, Material, Minerals, & Metal Ecology 06 congress Cape Town, Afrique du Sud, 14-15 novembre 2006.
79. FROELICH, D., HAOUES, N., RENARD, H., 2007, Development of a new methodology to integrate ELV's treatment limits into requirements for automotive design, Minerals Engineering Minerals Engineering 2007, 20(9): pp.891-901.
80. GAUCHERON, T., 2000, Intégration du recyclage en conception le modèle produit, thèse de doctorat de l'INP Grenoble.
81. GAUTHIER, R., 1995, Qualité en conception de produits nouveaux, thèse de doctorat en génie industriel ENSAM.
82. GIDEL, T., GAUTIER, R., DUCHAMP, R., 2004, Decision-Making Framework Methodology - An Original Approach to Project Risk Management in New Product Design , Journal of Engineering Design, Ed. Derek SHELDON du 01 December 2004.
83. HANDFIELD, RB., MELNYK, SA., CALANTONE, RJ., CUKOVIC, S., (2001) Integrating environmental concern into the design process : the gap between theory and practise. IEEE Transactions on Engineering Management 2001; 8(2) ; 189-208.
84. HANSEN. J., MAKIKO, S., RETO, R., KEN, L., DAVID, W.L., et MARTIN, M.E., 2006. "Global Temperature Change." Proceedings of the National Academy of Sciences 103 (39): 14288–14293.
85. HAOUES, N., 2006, Contribution à l'intégration des contraintes de désassemblage et de recyclage dès les premières phases de conception de produit, thèse de doctorat, ENSAM 2006 - 14.
86. HASSANZADEH, H., DAOUD, W., 2005, Ecodesign methodology and green guide, CIRED conference à Vienne.

87. HASSANZADEH, H., SUBREVILLE, C., DAOUD, W., 2007, .End of life management of medium voltage surge arrester, CIRED conference à Vienne.
88. HEMEL, V., CRAMER, J., 2002, Barriers and stimuli for ecodesign in SMEs, Journal of cleaner production.
89. HERNANDEZ, J., FROELICH, D., BESSEDE, J-L., TIPPER, D., HUET, I., DAOUD, W., HASSAZADEH, M., CORNIER, A., 2007, End of Life management in Equipments Used for Electricity Transmission and Distribution, ECODESIGN 2007 conference à Tokyo.
90. HOLLOWAY, L., 1998, "Materials selection for optimal environmental impact in mechanical design." Materials and design, 19: p.133-143.
91. HUR, T., JIYOUNG, L., RYU, J., KWON, E., 2005, Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system, Journal of Environmental Management, 75 : 229-237.
92. Institut français de l'environnement, 1994.
93. JAMES, I., DAOUD, W., HASSANZADEH, H., 2006, Methods for environmentally selection of dielectric materials, Insulation Conference à Birmingham 30-35.
94. JANCOVICI, J-M., 2005, Bilan Carbone d'une entreprise industrielle ou tertiaire, ADEME version 3.0 p°1 /61.
95. JANIN, M., 2000, Démarche d'éco-conception en entreprise, un enjeu : construire une cohérence entre outils et processus, thèse de doctorat, ENSAM 2000-10.
96. JEANTET, A., Boujut J.-F., Laureillard P., 1996, L'approche du processus de conception de produit par les objets intermédiaires - Le cas des pièces forgées à RVI, congrès IDMME 1996.
97. JESWIET, J., HAUSCHILD, M., 2005. Journal of Materials and Design, Vol 26/7 pp 629-634.
98. JINCHENG, X., WEICHANG, H., XINLI K., TIANMIN W., 2001, Research and development of the object-oriented life cycle assessment database, Materials and design, 22: 101-105.
99. JOHANSSON, G., MAGNUSSON, T., 2005, Organising for environmental considerations in complex product development projects : implications from introducing a "Green" sub-project, Journal of Cleaner Production xx (2005) 1-9.

100. JOLLIET O., MARGNI M., CHARLES R., HUMBERT S., PAYET J., REBITZER G., 2003, Impact2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment* 2003; 8(6):324 –30.
101. KARLSSON R., LUTTROPP, C., 2005, Ecodesign : what's happening ? An overview of the subject area of Ecodesign and of the papers in this special issue, *Journal of Cleaner Production* : 1-8.
102. KHALIFA F., 2002, Analyse du cycle de vie – méthodes d'évaluation des impacts, *Techniques de l'ingénieur G5615_10_2002*.
103. KOCH F., 2000, Deuxième conférence européenne sur les matériels électriques industriels et l'environnement MEIE '2000, Paris, FRANCE (24/01/2000)
, pp. 111-113, [Note(s) : XV, 191 p.,] (bibl.: dissem.) ISBN 2-912328-14-4.
104. KORTMAN J., VAN BERKEL R., LAFLEUR M., 1995, Environmental Design Toolbox for Complex Products ; Preliminary results and experiences from selected projects, *Proceedings of International Conference on Clean Electronics Products and Technology*, Edimbourg, Royaume-Uni, pp. 35-40.
105. LE BORGNE R., 1998, De l'usage des Analyses de Cycle de Vie. Thèse de doctorat, ENSAM Paris, 205 p.
106. LE COZ E., 2001, Méthodes et outils de la qualité, *techniques de l'ingénieur AG1770*.
107. LENNART Y.-L., 2007, Materials selection and design for development of sustainable products, *Materials and Design* Volume 28, Issue 2, 2007, Pages 466-479.
108. LENOX M., EHRENFELD J.R. 1997, Design for Environment: A New Framework for Strategy Decisions, *Moving Ahead with ISO 14000*. Chap. 22, pp. 211-225.
109. LEPOCHAT S., 2005, Intégration de l'éco-conception dans les PME, Thèse Génie Industriel, ENSAM, FRANCE.
110. Les déchets en chiffres, 2006. Publication ADEME.
111. LESTER R.-B., 2003, Eco-économie : Une autre croissance est possible, écologique et durable, seuil.
112. LOFTHOUSE V., 2006, Ecodesign tools for designers defining the requirement, *Journal of Cleaner Production* 14 (2006) 1386-1395.

113. LUTTROPP, C., LAGERSTEDT, J., 2006, EcoDesign and The Ten Golden Rules : generic advice for merging environmental aspects into product development, *Journal of Cleaner Production* xx (2006) 1-13.
114. MAITRE, P., MIQUEL, J. P., 1992, "De l'idée au Produit : guide de la valorisation industrielle de la recherche" EYROLLES, Paris.
115. MALTHUS, T.R., 1798, *Essai sur le principe de population*.
116. MARSOT, J., 2002 *Conception et Ergonomie, Méthodes et Outils pour intégrer l'ergonomie dans le cycle de conception des outils à mains*, INRS, Note scientifique et technique n° 219.
117. MATHIEUX, F., 2002, *Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit*, thèse de doctorat, ENSAM.
118. MATHIEUX, F., ROUCOULES, L., LESCUYER, L., et BOUZIDI, Y., 2005, Opportunities and challenges for connecting environmental assessment tools and CAD software. *Life Cycle Management (LCM) 2005*, 05-07 Septembre 2005, Barcelone (Espagne). 4p.
119. MCALOONE, T. C., 1998, *Industry Experiences of Environmentally Conscious Design Integration: An Exploratory Study*, Ph.D. thesis, The CIM Institute, Cranfield University, Cranfield, UK.
120. MEINDERS, H., 1997, Conférence "Towards sustainable product design", The Centre for Sustainable Design, Londres, Royaume-Uni.
121. MEINDERS, H., 1997, Point of no return. PHILIPS EcoDesign guidelines.
122. MEEUP Methodology report 2005, rapport final de la méthodologie de la commission européenne relative à l'éco-conception des appareillages consommateurs d'énergie.
123. MILLET, D., COPPENS, C., JACQUENSON, L., LE BORGNE, R., TONNELIER, P., 2003, *Intégration de l'environnement en conception : l'entreprise et le développement durable*, Hermes Lavoisier.
124. MISTREE, F., MUSTER, D., SRINIVASAN S., MUDALI S. 1990, "Design of Linkages : A Conceptual Exercise in Designing for Concept," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 25, no. 3, pp. 273-286.
125. *Module de sensibilisation à l'éco-conception*, 2001, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et de l'ADEME avec le concours du cabinet BECA Environnement.

126. OLUNDH, G., 2006, Modernising Ecodesign, Ecodesign for innovative solutions, Doctoral thesis, Department of Machine Design, Royal Institute of Technology, SE-100 44 Stockholm.
127. PARK, P., KIYOTAKA, T., 2006, Quantifying producer and consumer-based eco-efficiencies for the identification of key ecodesign issues, *Journal of Cleaner Production* 16 (2008) 95-104.
128. PNUD :Rapport mondial sur le développement humain 2007/2008
129. PNUELI, Y., ZUSSMAN, E., 1997, "Evaluating the end-of-life value of a product and improving it by redesign." *International Journal of Production Research*, 35(4): pp.921-942.
130. PLATCHECK, E.R., SCHAEFFER, L., KINDLEIN, JR. W., CANDIDO, L.H.A., 2008, Methodology of ecodesign for the development of more sustainable electro-electronic equipments, *Journal of Cleaner Production* 16 (2008) 75-86.
131. Product-related environmental attributes - Technical report 70, 1997, ECMA (Standardizing Information and Communication Systems).
132. QUARANTE, D., 1994, "Eléments de design industriel", 2ème édition, Editions Polytechnica, Paris.
133. Rapport Brundtland 1987, Commission mondiale sur l'environnement et le développement.
134. Rapport planète vivante 2006 de WWF.
135. Renewables, Global Status Report 2006. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Rapport du 03-04-2007.
136. REYMEN, I., 2001, "Improving design processes through structured reflexion. A domain-independent approach", Ph.D Thesis, Eindhoven, The Netherlands.
137. RIDOUX, M., 1999, AMDEC- Moyen, techniques de l'ingénieur AG4 220
138. RODENACKER, W. G., 1970, "Methodisches Konstruieren" Berlin
139. ROUSSEAU, P., 2005, L'analyse du cycle de vie, techniques d'ingénieur G5500.
140. ROUSSEAU, P., BENETTO, E., DUJET, C., 2008, Integrating fuzzy multicriteria analysis and uncertainty, *Environmental Modelling & Software* xxx (2008) 1–7.evaluation in life cycle assessment

141. RYDH, C.-J., MINGBO S., 2005, Life cycle inventory for materials grouped according to environmental and material properties, *Journal of Cleaner Production*, 13 : 1258-1268.
142. SANTOS, R., ANTUNES, P., BAPTISTA, G., MATEUS, P., MADRUGA, L., 2006, Stakeholder participation in the design of environmental policy mixes, *Ecological economics* 60 (2006) 100-110.
143. SCARAVETTI, D., 2004, Formalisation préalable d'un problème de conception pour l'aide à la décision en conception préliminaire, thèse de doctorat, ENSAM, Paris.
144. SHERWIN, C., EVANS, S., 2000, Ecodesign Innovation: Is Early Always Best? In, 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment conference proceedings, May 8-10, 2000, The Institute of Electrical and Electrical Engineers Inc. Computer Society, Technical Committee on Electronics and the Environment, San Francisco, California, pp. 112-117.
145. SIMON, M., EVANS, S., MCALOONE, T., SWEATMAN, A., BHAMRA, T., POOLE, S., 1998, Ecodesign Navigator. A Key Resource in the Drive towards Environmentally Efficient Product Design, Cranfield University, Manchester Metropolitan University and EPSRC.
146. STAMMINGER, R., BARTH, A., DORR S., 2005, Old Washing Machines Wash Less Efficiently and Consume More Resources
147. STEVELS, A.L.N., 1997, Moving companies towards sustainability through eco-design : conditions for success", *The Journal of Sustainable Product Design*, Vol. 3, Octobre 1997, p. 49.
148. SUH, N.P., 1990, "The principles of design", Oxford University Press, New York.
149. TANNER, T.M., HASSAN, A., ISLAM, K.M.N., CONWAY, D., MECHLER, R., AHMED, A.U., ALAM M., 2007. "ORCHID : Piloting Climate Risk Screening in DFID Bangladesh." Rapport d'étude. Institut des études de développement, Université du Sussex, Brighton.
150. TINGSTROM, J., SWANSTROM, L., KARLSSON, R., 2006, Sustainability management in product development projects - the ABB experience, *Journal of Cleaner Production* 14 (2006) 1377-1385.
151. TISCHNER, U., NICKEL, R., 2003, "Eco-design in the printing industry. Life cycle thinking : implementation of eco-design concepts and tools into the

- routine procedures of companies", *The Journal of Sustainable Product Design*, vol. 3, pp19-27.
152. THOUVENIN, E., 2002, Modélisation des processus de conception de produits et développement de la capacité d'innovation : application au cas des PME-PMI, thèse en génie industriel, ENSAM France.
153. TOMALA, F., 2000, "Proposition de modèles et méthodes pour l'aide à l'innovation des performances d'une innovation dès sa conception", Thèse de doctorat, Université de Valenciennes.
154. TONNELIER, P., 2002, thèse de doctorat « Proposition d'une démarche d'intégration d'une nouvelle contrainte en conception, ENSAM, Paris.
155. TSOULFAS, G T., PAPPIS C P., 2006, Environmental principles applicable to supply chains design and operation, *Journal of Cleaner Production* 14 (2006) 1593-1602.
156. TUKKER, A., EDER, P., 2000, Eco-design: European State of the Art Part II: Specific studies, October 2000.
157. TZORTZOPOULOS, P., 2004, The design and implementation of product development process models in construction companies, thèse de doctorat en philosophie, Université de Salford, Royaume Uni.
158. VADCARD, P., 1996, Aide à la programmation de l'utilisation des outils en conception de produit, thèse de doctorat en génie industriel, sciences des systèmes et des produits industriels, ENSAM, Paris, 167p.
159. VAN BERKEL, R., WILLEMS E., LAFLEUR M., 1997. "Development of an industrial ecology toolbox for the introduction of industrial ecology in enterprises – I", *Journal of Cleaner Production*, 5 (1-2), pp11-25.
160. VAN BERKEL, R., 2007, Eco-efficiency in primary metals production : Context, perspectives and methods, *Resources, Conservation and Recycling* 51 (2007) 511–540.
161. VAN DEN HOED, R., 1997, An exploration of approaches towards sustainable innovation, The greening of industry conference.
162. VAN NES, N., CRAMER, J., (1997) Eco-Efficiency Assessment for Strategic Product Planning. In : *Towards Sustainable Product Design 2 Conference Proceedings*, the Royal College of Pathologists, London, the Centre for Sustainable Design, Farnham, unpaginated.

163. VEZZOLI, C., SCIAMA, D., Life Cycle Design : from general methods to product type specific guidelines and checklists : a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines, *Journal of Cleaner Production* 14 (2006) 1319-1325.
164. VIGNERON, J., PATINGRE, J.-F., 2001, *Eco-conception ; concept, méthodes, outils, guide et perspectives*, Economica.
165. WCED, 1987, *Our common future*, London, Oxford University Press, World Commission on Environment and development.
166. *World Consumption of Primary Energy by Energy Type and Selected Country Groups, 1980-2004*, 2006, Energy Information Administration, U.S. Department of Energy (July 31, 2006). Rapporté le 20-01-2007.
167. *World Energy Intensity: Total Primary Energy Consumption per Dollar of Gross Domestic Product using Purchasing Power Parities, 1980-2004*, 2006, Energy Information Administration, U.S. Department of Energy (August 23, 2006). Rapporté le 03-04-2007
168. Y.LJUNGBERG, L., 2007, *Materials selection and design for development of sustainable products*, *Materials and Design* 28 (2007) 466-479.
169. YANNOU, B., 2001, *"Préconception de produits"*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des recherches, INPG.
170. ZANIN, J.-P., 1997, *Cahier des charges fonctionnel*, Techniques de l'ingénieur AGC2.
171. ZUIDWIJK, R., KRIKKE H., 2007, *Strategic response to EEE returns: Product eco-design or new recovery processes ?*, *European Journal of Operational Research* (sous presse).

ANNEXES

ANNEXE 1

Les principaux appareillages électriques de moyenne tension

Sectionneurs

Ce sont avant tout des organes de sécurité utilisés pour ouvrir ou fermer un circuit lorsqu'il n'est pas parcouru par un courant, et prévus pour isoler, par rapport au reste du réseau, un ensemble de circuits, un appareil, une machine, une section de ligne ou de câble, afin de permettre au personnel d'exploitation d'y accéder sans danger. En principe, les sectionneurs n'ont pas à interrompre de courants ; cependant, certains sectionneurs peuvent être amenés à couper des courants de transfert de barres (jusqu'à 1 600 A sous 10 à 300 V) et les sectionneurs de terre doivent être capables de couper les courants induits qui peuvent circuler dans les circuits hors tension par couplage capacitif et inductif avec les circuits adjacents sous tension (jusqu'à 160 A sous 20 kV).



Interrupteurs

Les interrupteurs sont des appareils destinés à établir et à interrompre un circuit dans des conditions normales de charge. Certains interrupteurs sont prévus pour remplir également les fonctions de sectionneur. Leurs performances sont limitées car, s'ils sont capables d'éliminer les surcharges sur le réseau, ils ne peuvent en aucun cas interrompre un courant de court-circuit.



Contacteurs

Les contacteurs ont un rôle comparable à celui des interrupteurs, mais ils sont capables de fonctionner avec des cadences très élevées. Ils possèdent une grande endurance électrique combinée avec une grande endurance mécanique. Ils sont généralement utilisés pour la commande de fours, de moteurs à haute tension ou d'équipements industriels divers qui nécessitent des manœuvres fréquentes. Ils ne peuvent jamais être utilisés comme sectionneurs et ne restent fermés que si leur bobine de commande est alimentée.



Coupe-circuit à fusibles

Les fusibles permettent d'interrompre automatiquement un circuit parcouru par une surintensité pendant un intervalle de temps donné. L'interruption du courant est obtenue par la fusion d'un conducteur métallique calibré. Ils sont surtout efficaces pour la protection contre les courts-circuits, vis-à-vis desquels ils agissent, le plus souvent, en limiteurs de la valeur crête du courant de défaut. Ils sont assez souvent générateurs de surtensions à la coupure et exigent malheureusement d'être remplacés après chaque fonctionnement. En régime triphasé, ils n'éliminent que les phases parcourues par un courant de défaut, ce qui peut présenter un danger pour le matériel et le personnel. Leur calibre doit être bien adapté pour éviter un fonctionnement intempestif en cas de surcharge momentanée. Pour pallier cet inconvénient potentiel, les fusibles peuvent être associés à des interrupteurs ou à des contacteurs avec lesquels ils constituent des combinés capables d'assurer la protection en cas de surcharges ou de courts-circuits. Les combinés présentent, en outre, l'avantage d'interrompre en triphasé en cas de fusion d'un seul ou de deux fusibles.



Disjoncteurs

Un disjoncteur est destiné à établir, supporter et interrompre des courants, sous sa tension assignée (tension maximale du réseau), dans les conditions normales de service et dans les conditions anormales spécifiées (court-circuit, discordance de phases...). C'est l'appareil de protection par excellence, capable d'une totale capacité d'intervention sans provoquer de surtension excessive sur le réseau. À un disjoncteur est très généralement associée une "intelligence", système de protection et de relayage, détectant un défaut et élaborant des ordres au disjoncteur pour éliminer automatiquement le défaut ou pour remettre en service un circuit lorsque le défaut présente un caractère fugitif ou a été éliminé par un autre disjoncteur.

Les disjoncteurs peuvent être équipés de matériels électroniques permettant à tout moment de connaître leur état (usure, pression de gaz pour la coupure...), ce qui permet à l'exploitant de programmer les opérations de maintenance et éventuellement de détecter, par des dérives de caractéristiques, et de prévenir un risque de défaillance. Ils peuvent aussi être équipés de dispositifs de synchronisation des ordres de fermeture et d'ouverture pour permettre de manœuvrer des lignes, des transformateurs, des réactances ou des condensateurs, sans provoquer de surtensions ou de courants d'appels susceptibles d'endommager les composants du réseau. Tous les types de relais et de systèmes de protection peuvent lui être associés pour assurer, dans les meilleures conditions, l'élimination des défauts qui surviennent dans les circuits qu'il protège.



Parafoudres

Les parafoudres sont des dispositifs statiques chargés de limiter, en un point donné du réseau, l'amplitude des surtensions qui peuvent se produire. La limitation de surtension est faite en écoulant l'énergie à la terre. Ces surtensions peuvent être soit d'origine atmosphérique, c'est-à-dire externes, soit consécutives à des manœuvres de l'appareillage ou à des phénomènes de résonance, auquel cas elles sont dites internes.

- Les appareils les plus simples sont les éclateurs qui présentent cependant l'inconvénient de rester conducteurs après amorçage et nécessitent donc l'intervention d'un disjoncteur pour l'élimination du courant de défaut qui résulte de leur fonctionnement.
- Les appareils plus perfectionnés, tels les parafoudres à oxyde métallique (ZnO par exemple) sans éclateur, sont connectés en permanence au réseau car ils sont pratiquement isolants à la tension assignée. En cas de surtension, leur résistance devient temporairement très faible, mais ils redeviennent automatiquement isolants dès que la tension retrouve sa valeur normale. Ce sont des appareils très précieux, car ils jouent un rôle d'écrêteur sans entraîner d'interruption de service.



Transformateurs

Un transformateur électrique est un convertisseur qui permet de modifier les valeurs de la tension et de l'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative en un système de tension et de courant de valeurs différentes mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement. Il est analogue à un engrenage en mécanique (le couple sur chacune des roues dentées étant l'analogue de la tension et la vitesse de rotation étant l'analogue du courant).

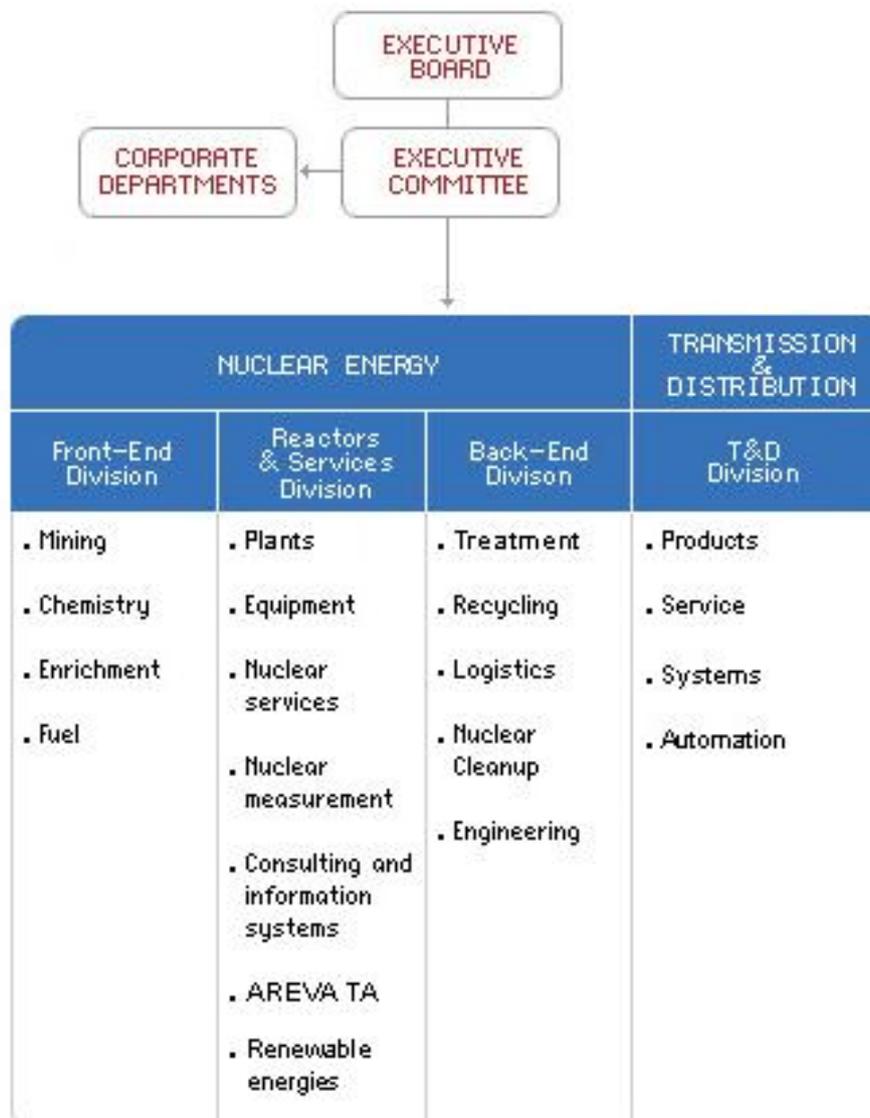
L'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique que constitue la carcasse du transformateur. Ces deux circuits sont alors magnétiquement couplés. Ceci permet de réaliser un isolement galvanique entre les deux circuits.

Un transformateur de distribution comporte généralement un noyau de fer, auquel sont rattachées des tiges, chacune correspondant à l'une des trois phases de transformation.

Deux bobines sont enroulées autour de chaque tige : une bobine comporte plusieurs spires qui sont reliées au réseau à haute tension, l'autre bobine comporte moins de spires, reliées à la tension plus basse. Les deux spires sont séparées par un matériau isolant. La différence de potentiel dans l'une des bobines crée un champ magnétique dans le noyau de fer, et ce champ magnétique crée un courant électrique dans l'autre bobine. La différence de tension entre les deux bobines est déterminée par la différence du nombre de spires. L'une des principales façons de classer les transformateurs de distribution est de les répartir selon leur technique de refroidissement. La plupart des transformateurs sont placés dans une citerne remplie d'huile. L'huile refroidit les bobines et sert en même temps d'isolant électrique.

ANNEXE 2

Organigramme AREVA



ANNEXE 3

Ecodesign Road Map de AREVA T&D

	ECODESIGN OF PRODUCTS MANAGEMENT
	x.1.1: Environmental policy for products
1	An environmental policy is defined for the design of products with objectives and targets identified.
2	Environmental policy on products known throughout the organisation and responsibilities are defined and carried out for some projects or products.
3	Environmental policy on products is systematically carried out on all projects and products. Environmental impacts on the life cycle of products examined at gate reviews.
4	Eco-declarations for all new projects and continuous improvement in place for Eco-design processes.
	ECODESIGN OF PRODUCTS MANAGEMENT
	x.1.2: Integration of the H & S
1	Some rules are known for minimising H&S impacts.
2	H & S tools made available to designers.
3	The application of H & S rules and tools is examined in gate reviews.
4	Continuous improvement processes in place to reduce H & S impacts during the life cycle of products.
	ECODESIGN OF PRODUCTS MANAGEMENT
	x.1.3: Training on environmental impact of products
1	Awareness training on environmental impacts of products for relevant personnel.
2	Plan for in-depth training in Eco-design for project team members (courses adapted to functions) and training of an expert (in the field).
3	Training plans in action and their effectiveness verified by internal audits.
4	Continuous review and realignment of training plans.
	ECODESIGN OF PRODUCTS MANAGEMENT
	x.1.4: Watch on technology and EHS regulations
1	Identification of regulations applicable to products.
2	Application of regulations in products and immediate closing-out of non-conformities.
3	Identification of regulations in preparation and emerging technologies that could reduce EHS impacts of products. Action plans in place to deal with anticipated changes.
4	Products systematically incorporate technical and regulatory evolutions.
	ECODESIGN OF PRODUCTS DESIGN PROCESSES
	x.2.1: Selection of materials and processes

1	Limited knowledge and account taken of regulations (controlled substances; banned or limited), and AREVA T&D/DRC rules (list of banned substances). Some familiarity with design rules (dismantling, compatibility of materials etc).
2	Tools (databases, associated procedures, guides) made available as needed for evaluating the environmental impact of materials and processes.
3	Environmental impacts arising from the manufacture of products and on their recycling are identified and taken into account (at gate reviews).
4	Environmental aspects are taken into account systematically in design for all developments. The evaluation tools are regularly brought up to date and optimised.
ECODESIGN OF PRODUCTS MANUFACTURING PROCESSES	
x.3.1: Fabrication processes	
1	EHS impacts associated with the fabrication of new products are identified.
2	Action plans launched for reducing EHS impacts of fabrication processes for new products.
3	The EHS impacts of fabrications processes are taken into account and optimised at GR5.
4	Products are designed in a manner systematically to optimise the EHS impacts of fabrication processes.
ECODESIGN OF PRODUCTS MANUFACTURING PROCESSES	
x.3.2: Suppliers / sub-contractors	
1	Environmental clauses included in purchase specifications.
2	Environmental criteria considered in the selection of suppliers (choice dependent on the extent of their engagement with environmental and EHS issues).
3	Integration of suppliers into the procedure on Environmental Impact of Products. Partnering for continuous improvement.
4	Systematic selection of suppliers according to their EHS performance.
ECODESIGN OF PRODUCTS MANUFACTURING PROCESSES	
3.3 Management & Use of Green-house fluorinated gasses (Solvents, coolents, SF6, etc	
1	Fluorinated gasses is used, and their environmental impact are identified and taken into account
2	The environmental impacts are well known within the company. Escape of fluorinated gasses to the atmosphere and consumption of fluorinated gasses are well identified and managed
3	Consumption and release are taken to a minimum. Accidental releases are registered and documented. R&D actions are developing less impacting solutions.
4	Systematic action plans are running to detect and implement any improvement possible to decrease escape of fluorinated gasses to the atmosphere
ECODESIGN OF PRODUCTS USE AND END OF LIFE	

	x.4.1: Environmental impact in normal use (including maintenance)
1	Identification of environmental impacts.
2	Action plans launched for the improvement of environmental impact in use of new products.
3	Environmental impact in use is taken into account from the start of projects and optimised during the process of concurrent engineering.
4	Environmental impact in use is systematically optimised for all new products and improvements are proposed for existing products.
	ECODESIGN OF PRODUCTS USE AND END OF LIFE
	x.4.2: Safety and ergonomics in normal use (including maintenance)
1	Products conform to relevant regulations and problems on safety and ergonomics have been identified.
2	Action plans launched for improved safety and ergonomics for new products.
3	There is organised feedback of experience for improved safety and ergonomics of products in development or in production.
4	The design process is systematically reviewed to eradicate any problem of safety and ergonomics.
	ECODESIGN OF PRODUCTS USE AND END OF LIFE
	x.4.3: End-of-Life, dismantling, recyclability
1	Identification of : Impacts generated at end-of-life (waste, air/water/land pollution) ; regulatory constraints on disposal ; routes available for recycling.
2	Design includes constraints associated with dismantling of products at end-of-life and the options for waste treatment.
3	Defined procedure for end-of-life dismantling and treatment for new products and for existing products at the customer's request ; included in technical literature.
4	End-of-life waste treatment is systematically optimised for new products. Recyclability plus the proportion of recycled materials used are higher than 95%.

ANNEXE 4

Méthodologie de gestion de fin de vie pour les appareillages de moyenne tension

Notre approche intègre les différents paramètres liés au traitement en fin de vie des appareillages de moyenne tension et présente une méthodologie générale de qui se décline en trois étapes principales :

Etape 1 : débranchement

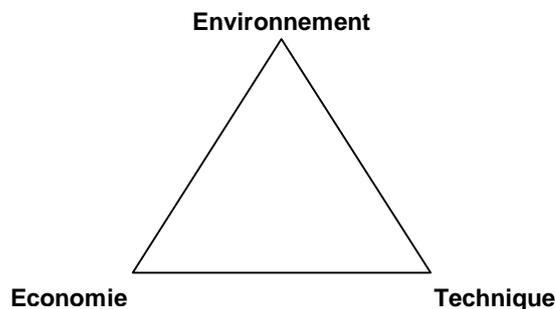
Arrivé en fin de vie, le produit doit être mis hors tension et démonté de son support et débranché des autres équipements du réseau.

Etape 2 : dépollution

Il faut commencer par traiter les éléments particuliers : matières nocives, gaz, éléments sous pression. Exemple du SF6. Ces éléments doivent être traités puis, soit recyclés soit mis en décharge appropriée.

Etape 3 : Démantèlement et destination

Avant de commencer le démantèlement de l'appareillage, il faut effectuer une étude environnementale, technique et économique qui se base sur une optimisation des scénarii de démantèlement.



Approche multicritères pour la gestion de fin de vie

Approche environnementale :

Les filières de gestion de fin de vie par ordre de priorité :

1. recyclage matière
2. réutilisation
3. valorisation énergétique
4. incinération
5. mise en décharge

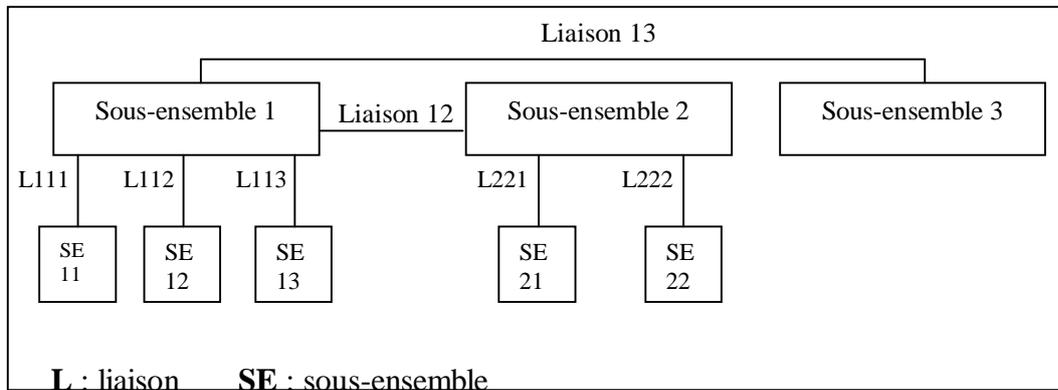
Après une longue période d'utilisation, certains matériaux sont dégradés et perdent leurs propriétés d'origine. Il s'avère alors difficile de réutiliser une partie des produits en fin de vie. Certains produits peuvent être révisés pour prolonger leur durée de vie. Toutefois, cette opération se heurte à des contraintes économiques et techniques

liées au coût de la révision et de la logistique et à la validation pour l'utilisation du produit révisé. Actuellement, cette option n'est pas suivie mais constitue une voie de réflexion potentielle.

Approche technique :

Elle consiste à :

1. étudier le produit par sous-ensemble



Structure en sous-ensembles d'un produit

2. effectuer un bilan massique

	Matière 1	Matière 2	Matière m
Sous-ensemble 1	Masse ₁₁	Masse ₂₁	Masse _{m1}
Sous-ensemble 2	Masse ₁₂	Masse ₂₂	Masse _{m2}
Sous-ensemble n	Masse _{1n}	Masse _{2n}	Masse _{mn}

Travail par sous-ensemble massique

3. établir un procédé de désassemblage

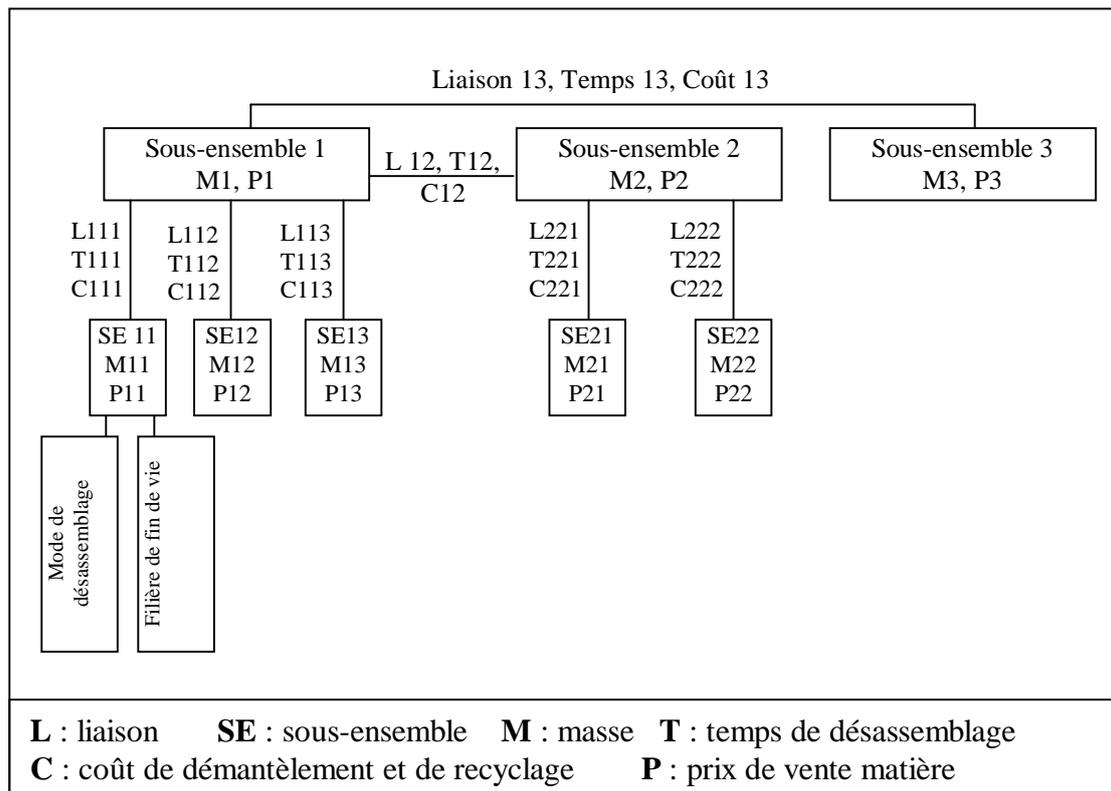
Le choix d'un scénario de désassemblage est guidé par :

- a. la facilité du démontage. Par ordre croissant :
 - I. les assemblages clipsés, vissés
 - II. les assemblages rivetés, emmanchés
 - III. les assemblages soudés, collés, surmoulés
- b. le coût du démontage. Par ordre croissant :
 - I. la destruction mécanique
 - II. le démontage manuel
- c. le coût du tri. Par ordre croissant :
 - I. le tri manuel
 - II. le tri automatique : magnétique > flux d'air > densimétrique > courant de Foucault > optique

- d. l'efficacité du tri :
 - I. Si le démontage est manuel, le tri manuel plus efficace que le tri automatique
 - II. Si le démontage est mécanique (broyage, cisaillement) le tri automatique est plus efficace que le tri manuel
- e. le coût de la valorisation de la matière. Par ordre croissant :
 - I. la réutilisation
 - II. la valorisation énergétique
 - III. l'incinération
 - IV. la mise en décharge
 - V. le recyclage
- f. le prix de vente de la matière récupérée. Par ordre croissant :
 - I. les gaz
 - II. les matières thermoplastiques
 - III. les matières céramiques et les verres
 - IV. les matières métalliques

Règles générales

- a. Il faut favoriser le recyclage de la matière
- b. Il est conseillé de combiner les différents modes de démontage et les différentes filières de fin de vie :
 - I. Commencer par un désassemblage manuel ou semi-manuel pour séparer les grands sous-ensembles et trier le maximum de pièces, puis compléter par un démontage mécanique suivi par un tri automatique.
 - II. Envoyer les pièces composées d'un seul matériau en métal, thermoplastiques et céramiques ou de matériaux compatibles au recyclage
 - III. Envoyer le reste des composants au démontage mécanique
 - IV. Trier les différents matériaux par les procédés adéquats
 - V. Si nécessaire, effectuer un deuxième broyage plus fin suivi par un tri automatique
 - VI. Envoyer le reste à l'incinérateur
- c. La répartition entre démontage manuel et mécanique se fait sur une base économique. Le désassemblage manuel s'arrête quand son coût de revient dépasse le prix de vente de la matière récupérée. Il est à noter qu'une matière récupérée manuellement est moins polluée qu'une matière récupérée mécaniquement donc présente une meilleure valorisation. Aussi certaines matières sont difficilement triables après broyage tels que certains thermoplastiques.
- d. Il est conseillé de procéder à une mesure chronométrée du désassemblage manuel afin d'évaluer le temps mis pour séparer les différents sous-ensembles. Ce temps se traduit par un coût horaire de main d'œuvre (moyenne 2005 : 20 euros/h)

Conclusions**Structure de gestion de fin de vie d'un produit**

- Il n'existe pas une approche unique de démantèlement possible c'est pour cela que le meilleur choix consiste à s'adapter au produit et à créer un manuel de gestion de fin de vie pour chaque équipement.
- Les techniques de démantèlement et de recyclage évoluent. Il est donc important de mettre à jour les manuels de gestion de fin de vie en prenant en considération ces évolutions.
- Les appareillages de moyenne tension présentent pour la majorité un potentiel de recyclabilité supérieur à 65%. Cela permet une forte valorisation économique de ces équipements en fin de vie.

ANNEXE 5

Méthodes d'analyse multicritères

Les méthodes d'analyse multicritères sont des outils d'aide à la décision développés depuis les années 1960. De nombreuses méthodes ont été proposées afin de permettre aux décideurs de faire un « bon » choix. Pour certains experts du domaine, ce choix existe dans l'esprit du décideur, et le processus d'aide à la décision doit le faire ressortir. Pour d'autres, le processus d'aide à la décision doit créer ce choix. Le concept d'analyse multicritères n'étant pas toujours très clair, l'exemple suivant permettra de mieux comprendre le contexte, les acteurs et le vocabulaire de l'analyse multicritères.

Un ou plusieurs décideurs sont face à un problème et disposent pour cela de plusieurs solutions possibles (qui seront aussi appelées « actions » par la suite). Le décideur prend en compte plusieurs critères (des points de vue) pour juger ces actions. Mais aucune action ne se dégage du lot (c'est à dire qu'aucune action n'est la plus performante pour tous les critères). De plus, les critères sur lesquels sont jugées ces actions sont conflictuels.

L'objectif des méthodes multicritères est ainsi d'aider à prendre une décision (ou à évaluer entre elles plusieurs solutions, sans avoir forcément de choix à effectuer au final) dans les situations de choix où aucune possibilité n'est parfaite et où différents critères entrent en conflit. L'idée de base est de considérer tous les critères entrant en compte ; leur attribuer un poids lié à leur importance relative ; de noter chaque action par rapport à tous les critères; et finalement d'agréger ces résultats.

Les méthodes de sur-classement

1) Les méthodes ELECTRE

Ces méthodes ont été développées par Bernard Roy au début des années 1970. Il a ainsi initié toute une série de méthodes, dites de sur-classement, basées sur des comparaisons d'actions deux à deux. Celles-ci demandent peu d'information pour pouvoir être implémentées; de plus cette information est facilement accessible au décideur (en effet, il est plus facile de comparer deux actions, que de donner une évaluation précise de leurs performances); elles fournissent donc des résultats solides, mais pauvres.

a) ELECTRE I

Comme pour toute méthode multicritères, un premier travail consiste à poser correctement le problème. Cela se fait par la détermination d'un choix cohérent de critères. Cette étape permet également au décideur d'appréhender le problème auquel il est confronté avec une structure plus solide. On attribue ensuite des poids aux différents critères qui ont été considérés.

Différentes méthodes sont possibles pour fixer une pondération; on peut, par exemple, citer la méthode des cartes de SIMOS (on range tous les critères par ordre de préférence, puis on insère des cartes entre eux. Un écart d'une carte vaudra une différence de 1 sur la pondération, un écart de 0 carte vaudra une différence de 1, etc.). Notons que l'étape de pondération numérique est facultative avec ELECTRE I. Par contre, on doit ranger les

critères en 3 catégories de poids : fort, moyen et faible.

Ensuite, vient le moment de l'évaluation de chaque action par rapport à chacun des critères. Les notes disponibles pour cette évaluation sont limitées et vont dépendre du poids du critère. Si on évalue une action sur un critère de poids fort, on ne pourra mettre à cette action qu'une note appartenant à la série de valeurs : {10, 7.5, 5, 2.5, 0}. De même, si le critère est de poids moyen, la note devra appartenir au barème : {8, 6.5, 5, 3.5, 2}. Finalement, si le critère est de poids faible, on ne pourra mettre à l'action qu'une note appartenant à : {7, 6, 5, 4, 3}. Ainsi, toutes les notes attribuées ont la même base de notation, et il n'y a pas à normer les résultats, ni à tenir compte des poids lors de l'agrégation des résultats.

Grâce à cette notation, on peut construire une matrice d'évaluation, avec en ligne les actions, et en colonnes les critères. De cette matrice, on va pouvoir tirer les indices de concordance et de discordance. Il faut ici comprendre que l'on désigne l'indice de concordance de l'hypothèse « l'action A est meilleure que l'action B », et l'indice de discordance de l'hypothèse « l'action A est meilleure que l'action B ». L'indice de concordance mesure la confiance que l'on a que A soit meilleur que B. L'indice de discordance mesure le regret que l'on a, à voir A devant B. Voyons comment les calculer.

En comparant les notes des actions A et B, pour un critère quelconque, on observe immédiatement si A se comporte mieux que B ou non (on dit que A surclasse B pour le critère considéré). On retient ensuite tous les critères pour lesquels A surclasse B. On additionne les poids de tous les critères retenus. Notons n le résultat. En divisant n par la somme totale des poids de tous les critères (cette opération est destinée à normer), on obtient l'indice de concordance de l'hypothèse « l'action A est meilleure que l'action B ». La valeur obtenue sera comprise entre 0 et 1.

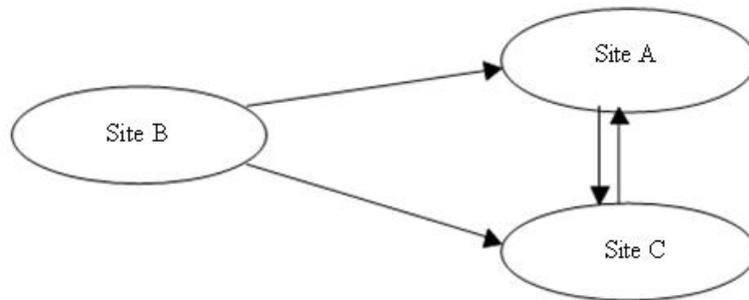
Pour calculer l'indice de discordance, on considère tous les critères pour lesquels A ne surclasse pas B; et on retient le critère pour lequel la différence de note entre les deux actions est la plus grande. On divise ensuite ce nombre (la différence de note) par la longueur de la plus grande échelle de notation (dans notre cas, la plus grande échelle de notation est 10, que l'on trouve pour la notation de poids fort). Le résultat est l'indice de discordance.

Les créateurs de cette méthode ont pensé que cette manière de noter pouvait parfois être trop sévère. Ainsi, ils ont proposé un autre indice, l'indice de discordance de sévérité 2, qui se calcule comme l'indice de discordance, mais en retenant le critère pour lequel la différence de note entre les deux actions est la deuxième plus grande.

On fixe ensuite des seuils de tolérance pour les indices de concordance et de discordance (notons les s et t). On dira ainsi que A surclasse B (au sens global) si l'indice de concordance de l'hypothèse A surclasse B est supérieur à s , et si l'indice de discordance de cette même hypothèse est inférieur à t . Dans le cas où ces deux conditions ne sont pas remplies, on dira que l'action A est indifférente à l'action B. Ces seuils doivent fixer des limites pour lesquelles on ne peut supporter qu'une action soit aussi bonne qu'une autre. En passant ainsi en revue tous les couples possibles d'actions, on déduit un sous-ensemble d'actions qui ne sont surclassées par aucune autre. Ce sont les actions préférables. On peut représenter le résultat de ce passage en revue par un graphe, le

graphe de dominance.

On peut ainsi imaginer des seuils tels que l'on obtienne le graphe suivant :



→ : indique que l'action située à la base de la flèche surclasse l'action pointée. Deux flèches allant en sens inverse indiquent l'équivalence entre les deux actions.

Notons que l'on peut également trouver des situations qui ne permettent pas de trouver de meilleure solution (des circuits du type paradoxe de Condorcet par exemple, en boucle fermée). En faisant varier ces seuils de concordance et de discordance, on peut déduire de nouveaux graphes de dominance, et évaluer la robustesse du résultat. Le danger en prenant des valeurs trop laxistes (ou trop sévères resp.) est d'avoir trop (plus assez resp.) d'information disponible pour en tirer un résultat clair. La force du résultat pourra aussi s'évaluer en changeant (dans les limites définies par les préférences du décideur) les notes et les poids. Ceci s'appelle « analyse de sensibilité ». Une analyse de sensibilité complète est l'observation des changements de résultat, lorsqu'on fait varier les poids et les notes des actions (dans la limite des préférences du décideur).

Quelques remarques s'imposent. Notons ainsi qu'ELECTRE I ne doit être prise que comme une méthode permettant de dégager un sous-ensemble de meilleures solutions. Notons aussi que l'on peut ajouter des nouvelles règles discriminantes sur les indices de concordance et de discordance. Le fait d'utiliser une échelle finie pour la notation est un manque de souplesse.

b) ELECTRE III

Les critères considérés dans l'analyse multicritères doivent tout d'abord être pondérés. Une fois la matrice des évaluations remplies, on peut calculer la différence de notes d entre deux actions pour un critère quelconque. On peut calculer cette différence pour tous les couples d'actions, relativement à tous les critères. On fixe également pour tous les critères des seuils de préférence forte (notons le p) et de préférence faible (notons le q). Considérons un critère quelconque et deux actions A et B évaluées sur ce critère (d sera ici « note de A » moins « note de B »).

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 d \geq p & \text{A est fortement préféré à B} \\
 p \geq d \geq q & \text{A est faiblement préféré à B} \\
 q \geq d \geq 0 & \text{A et B sont indifférents} \\
 -q \leq d \leq 0 & \text{A et B sont indifférents} \\
 -p \leq d \leq -q & \text{B est faiblement préféré à A} \\
 d \leq -p & \text{B est fortement préféré à A}
 \end{array} \right.$$

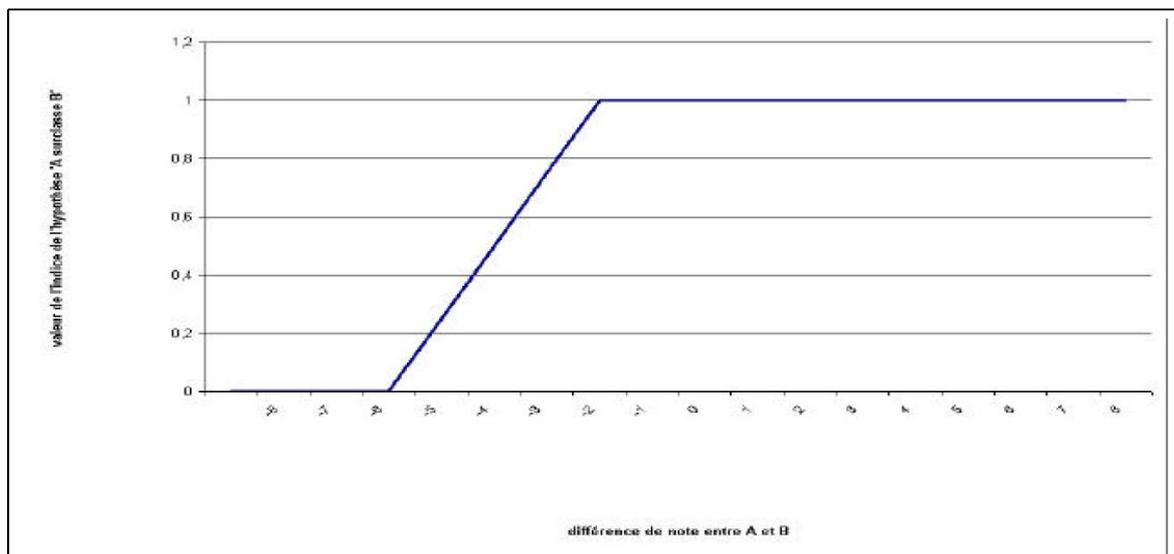
On peut également considérer un seuil de

veto, tel que si la différence de notes soit en valeur absolue supérieure à ce seuil, on exclut l'action qui se comporte mal sur ce critère. On accorde ensuite un indice de crédibilité à l'hypothèse « A surclasse B pour le critère considéré », en fonction du niveau de préférence défini par les seuils de préférence.

On va ensuite considérer un indice de crédibilité de l'hypothèse « A surclasse B » relativement à un critère quelconque. Cet indice de crédibilité est fonction de d . Un d négatif indique que l'action B se comporte mieux que A relativement au critère considéré.

Cet indice de crédibilité est une image de la certitude que l'on a que « A soit au moins aussi bon que B ». On considère ainsi que dans la zone d'indifférence, cela est réalisé (l'indice vaut 1). Si B est fortement préféré, on considère alors que A ne peut être meilleur que B (l'indice vaut 0). Entre ces deux zones, on suppose que cet indice varie linéairement.

La figure ci-dessous en est une représentation graphique pour $p = 6$ et $q = 2$.

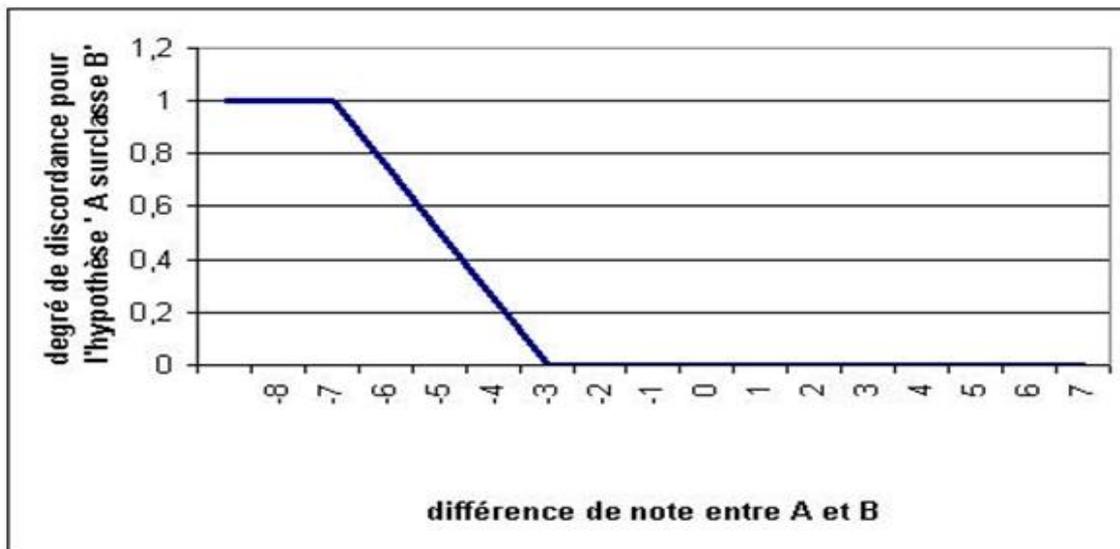


On va ensuite pouvoir définir un indice de concordance global pour l'hypothèse « A surclasse B ». Son calcul est simple : il s'agit de sommer les indices de crédibilité de cette hypothèse, pour tous les critères, pondérés par les poids respectifs des critères.

On cherche donc un indice de discordance global pour l'hypothèse « A surclasse B ». On procède comme suit, successivement pour tous les critères.

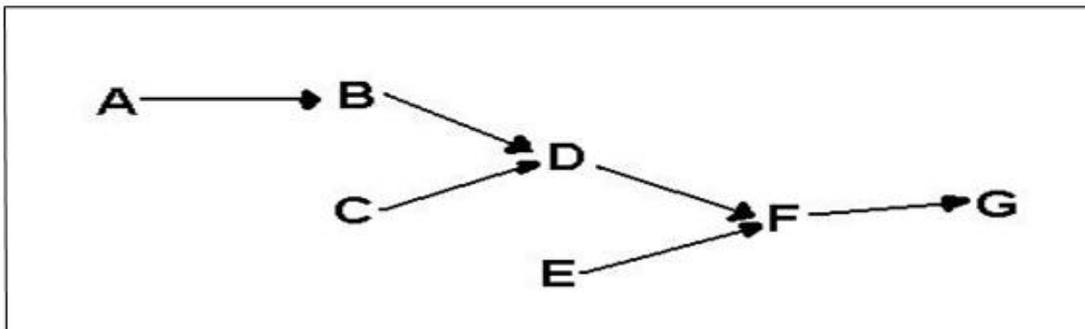
On définit un seuil de veto, que l'on note v . Si la différence de note entre A et B est inférieure à v , le degré de discordance (c'est à dire le regret) de l'hypothèse « A surclasse B » vaut 1. Si cette différence de notes est supérieure à p , le degré de discordance vaudra 0. Entre les deux, on impose au degré de discordance de varier linéairement.

La figure ci-dessous illustre ces variations pour $v = 6$ et $p = 2$:



L'indice de discordance global de l'hypothèse « A surclasse B » sera calculé en sommant les degrés de discordance pour chacun des critères, pondérés par le poids de leurs critères respectifs.

Ensuite, on fixe différents seuils sur les indices de concordance et de discordance, afin de déterminer des relations de préférence (forte ou faible), et indifférence entre les actions. Un graphe peut en être déduit, et par suite un classement des actions (voir le graphe d'exemple ci-dessous)

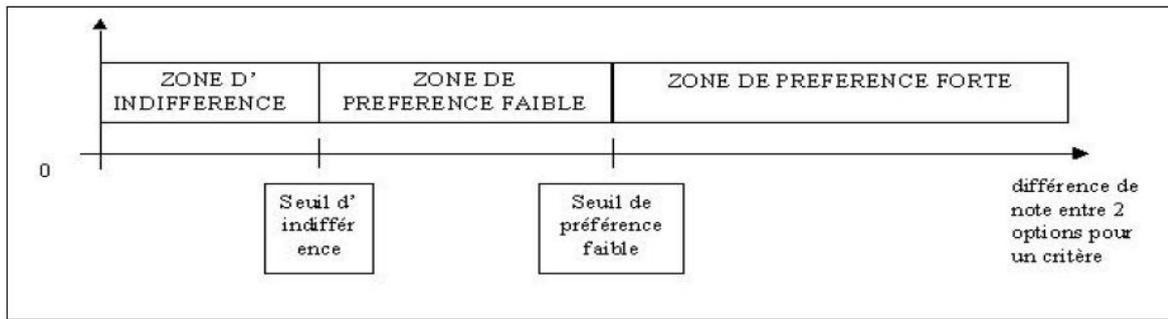


c) ELECTRE IV

Par rapport aux autres méthodes de cette famille, celle-ci abandonne l'étape de pondération. Il faut juste vérifier qu'aucun critère ne soit prépondérant face à un regroupement d'une moitié quelconque des critères. De même, aucun critère ne doit être négligeable face à un regroupement d'une moitié quelconque des critères. Ceci assure que tous les critères pris en compte ont le même ordre d'importance. Par contre, il faut toujours remplir la matrice d'évaluations des actions.

On calcule ensuite la différence de note deux à deux entre toutes les actions, relativement à tous les critères. On définit deux seuils relatifs à cette différence, pour chacun des critères. Un premier seuil va permettre de délimiter la zone d'indifférence entre les deux critères, des zones de préférence faible. Le second seuil (plus élevé en valeur absolue) doit définir la limite entre les zones de préférence faible et forte (voir figure ci-dessous).

On définit ensuite 2 règles qui permettent de distinguer les dominances fortes et faibles.



Ainsi, il y aura préférence forte (A surclasse fortement B) :

- s'il n'existe aucun critère donnant B strictement préféré à A
- et si le nombre des critères donnant B faiblement préféré à A est au plus égal au nombre des critères donnant A préféré (strictement ou faiblement) à B.

Il y aura préférence faible (A surclasse faiblement B) :

- s'il n'existe aucun critère donnant B strictement préféré à A et si la seconde condition ci-dessus n'est pas vérifiée
- ou s'il existe un unique critère donnant B strictement préféré à A, l'écart étant au plus égal au double seuil de préférence, et si trois critères au moins donnent A strictement préféré à B.

Les conditions de préférence forte et faible sont des conditions de bon sens. Une fois toutes les relations entre actions déterminées deux à deux, on peut tracer un graphe, avec des flèches distinguant les dominances fortes et faibles.

Définissons maintenant la qualification d'une action; qui est le nombre d'actions qu'elle surclasse fortement (sa puissance) moins le nombre d'actions par qui elle est surclassée fortement (sa faiblesse). On pratique alors une distillation ascendante. Cela consiste à retenir le groupe des actions à qualification maximale, qu'on peut ensuite départager en ayant recours aux sur-classements faibles. On retire toutes ces actions de l'ensemble global; puis on recalcule les qualifications de chacune des actions restantes, pour les distiller une nouvelle fois. Et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il ne reste plus d'actions. On a ainsi un classement de groupes d'actions équivalentes.

On pratique ensuite une distillation descendante. On retient le groupe des actions pour lesquelles la qualification est la plus faible. On les retire de l'ensemble, puis on recalcule les qualifications de chacune des actions restantes, pour les distiller une nouvelle fois ; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il ne reste plus aucune action. Un nouveau classement est ainsi établi. Il ne reste plus au décideur qu'à comparer les deux classements obtenus, et à en tirer les conclusions qui s'imposent.

Si l'on implémente les données relatives au choix d'un site d'enfouissement de déchets, avec les mêmes seuils que pour ELECTRE III, on obtient le même classement (pour une distillation ascendante et descendante). B domine A et C; et C domine A.

2) Les méthodes PROMETHEE

Les méthodes PROMETHEE sont des méthodes de sur-classement, basées sur les théories de Roy (développeur des méthodes ELECTRE) Elles ont été développées par Jean-Pierre Brans et Philippe Vincke à partir du milieu des années 80. Nous ne présentons ici que PROMETHEE I et II qui sont les plus utilisées.

a) Ossature générale

Les 2 méthodes ont le même cheminement initial, mais leurs buts sont différents. PROMETHEE I permet de dégager des relations partielles de classement; alors que PROMETHEE II fournit un classement de toutes les actions.

On commence par attribuer un poids et un type à chaque critère. Le type de ce critère est en quelque sorte une fonction de préférence. Ainsi, pour une différence de performance brute entre deux actions, le type va permettre d'avoir une différence de performance normée, prenant en compte les particularités d'évaluation relativement à un critère (si l'échelle d'évaluation des préférences est concave ou convexe, voire en puits). Six types de critères sont disponibles (voir le tableau ci-dessous). Notons que d est la différence de notes entre deux actions.

Critère	Nom du critère	Fonction retournée	Paramètres à fixer
I	Critère usuel	0 si indifférent ou pire; 1 sinon	aucun
II	Quasi-critère	0 si $d \leq q$; 1 sinon	q
III	Critère linéaire de préférence	0 si indifférent ou pire ; d / p si $d \leq p$; 1 sinon	p
IV	Critère de niveau	0 si $ d \leq q$; $1/2$ si $q \leq d \leq p$; 1 si $ d \geq p$	p, q
V	Critère linéaire avec zones de préférence et indifférence	0 si $ d \leq q$; $(d - q) / (p - q)$ si $q \leq d \leq p$; 1 si $ d \geq p$	p, q
VI	Critère gaussien	0 si $d \leq 0$; $1 - \exp(-d^2 / 2\sigma^2)$ si $d \geq 0$	σ

On attribue ensuite un indice de préférence global entre 2 actions A et B, $\Pi(A,B)$. En notant w_j , le poids attribué au critère j , cet indice est donné par :

$$\Pi(A, B) = \frac{\sum_{j \in K} w_j * P_j(A, B)}{\sum_{j \in K} w_j}$$

où K est l'ensemble des critères, et $P(A,B)$ est la valeur de retour (après le passage par la fonction de j type) de la différence de notation entre A et B pour le critère j . Une valeur proche de 0 indiquera que B est meilleur que A. Une valeur proche de 1 indiquera que A est meilleur que B. On calcule ensuite pour chacune des actions, la moyenne

des intensités des préférences sur toutes les alternatives $\frac{\sum_{i \in I} \Pi(A, B_i)}{\text{Card}(I)}$ (i.e

, où I est l'ensemble des actions pour lesquelles A surclasse B)

Ce nombre, noté ϕ_A est appelé flux de sortie de A. Le flux de sortie est en quelque sorte la confiance que l'on a dans le fait que A soit la meilleure solution.

On calcule ensuite le flux entrant de A :

$$A, \text{ défini par : } \frac{\sum_{i \in I} \Pi(A, B_i)}{\text{Card}(I)}$$

où i est l'ensemble des actions qui surclassent A. Le flux entrant peut être vu comme le regret de choisir A.

Finalement, on calcule aussi le flux net : $\Phi(A) = \tilde{A} - \tilde{A}$ Le flux net donne une valeur de la confiance que l'on a en A, mais prenant en compte le regret que l'on aurait si l'on choisissait A.

La différence entre les méthodes PROMETHEE I et II se trouve dans les différences de rangement des actions.

b) PROMETHEE I

Pour cette méthode, quatre relations sont fixées entre les actions :

- A P+ B si et seulement si $\Phi(A) > \Phi(B)$ (A domine plus d'actions que B)
- A P- B si et seulement si $\Phi(A) < \Phi(B)$ (A est dominé par moins d'actions que B)
- A I+ B si et seulement si $\Phi(A) = \Phi(B)$ (A et B dominent autant d'actions)
- A I- B si et seulement si $\Phi(A) = \Phi(B)$ (A et B sont dominées par autant d'actions)

On considère alors que A surclasse B si : A P+ B et A P- B, ou, A P+ B et A I- B, ou A I+ A et A P- B.

A sera indifférent à B si : A I+ B et A I- B.

Dans tous les autres cas, A et B seront incomparables.

Comme avec la méthode ELECTRE, on peut alors tracer un graphe de dominance entre les solutions et on pourra en déduire un classement des actions en différents groupes d'actions à performances équivalentes.

L'implémentation des données du choix du site d'enfouissement des déchets (avec les seuils définis pour ELECTRE III), retourne le même résultat qu'ELECTRE III : B domine C, qui domine A

c) PROMETHEE II

Avec cette méthode, on dira que :

- A surclasse B si et seulement si : $\Phi(A) > \Phi(B)$
- A est indifférente à B si et seulement si : $\Phi(A) = \Phi(B)$

On en déduira de même un graphe de dominance, qui permettra de dégager un classement des actions.

Les méthodes basées sur la théorie de l'utilité

1) MAUT

MAUT (MultiAttribute Utility Theory) est une méthode développée vers la fin des années 60 par Ralph Keeney et Howard Raiffa. Cette théorie est exposée dans un livre complet : *Decisions with multiple objectives : preferences and value tradeoffs* [KEENEY Ralph L. et RAIFFA H]; et se base sur les travaux des économistes Von Neumann et Morgenstern.

L'idée est assez simple : le décideur doit associer une utilité à chacune des actions considérées. Pour ce faire, il va considérer séparément chacun des critères et observer quelle utilité dégage chaque critère pour l'action considérée. En effet, l'utilité $V_A(x_1, x_2, \dots, x_n)$ associée à l'action A, évaluée sur les critères 1, 2, ..., n peut se décomposer sous la forme :

$$V_A(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n v_i(x_i) \quad (v_i(x_i) \text{ étant l'utilité générée au vu du critère } i)$$

si l'action considérée a la performance x_i ; à condition que les critères considérés soient indépendants.

En posant des questions au décideur, ou en le soumettant à des loteries, on peut extrapoler sa courbe d'utilité pour chacun des attributs. Il est ainsi possible d'intégrer l'incertitude du décideur (par l'intégration de probabilités, d'évènements conditionnels : l'additivité de la fonction n'est alors plus vérifiée). Nous ne développerons pas les formules en cas d'incertitude.

Notons que le concept d'utilité évite d'avoir à pondérer ; mais il faut porter une grande attention aux réponses fournies car tous les critères doivent être évalués sur une même échelle : l'utilité. Cette méthode est très peu employée à cause de sa complexité (surtout dans le cas où il y a incertitude), ainsi que de la difficulté pour le décideur de se représenter ce qu'est l'utilité associée à une performance sur un critère. Enfin, les bases théoriques de cette méthode sont ébranlées par quelques expériences sur des loteries : plus de 90% des gens ont un comportement contraire à celui prédit par la théorie de l'utilité.

2) Somme pondérée

Cette méthode n'est pas à proprement parler une théorie basée sur l'utilité mais elle s'en rapproche. Le fonctionnement de cette méthode est très simple : tout se passe comme si on évaluait les élèves d'une même classe en faisant la moyenne pondérée de leurs notes.

Cette méthode permet de se passer des difficultés inhérentes à MAUT et propose au décideur de noter directement les différentes actions relativement à tous les critères. Le décideur doit également décider de la pondération en prenant garde toutefois aux unités qu'il a utilisées pour les critères.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'obtenir un résultat numérique et un classement complet des actions, sans la lourdeur de MAUT. Si l'on dispose de données chiffrées sur les performances des actions, on peut les implémenter

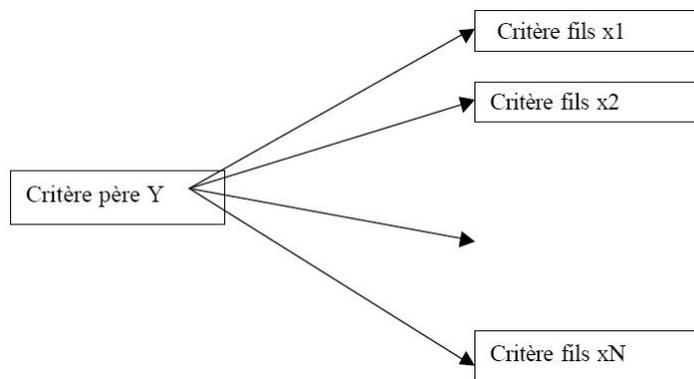
directement, sans avoir à convertir ces données sur une échelle abstraite. Toutefois, Somme pondérée demande beaucoup d'attention au décideur, notamment car elle est compensatoire.

C) Autres méthodes

1) AHP

La méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) a été développée par Thomas Saaty dans les années 1980. Elle vise à affiner le processus de décision en examinant la cohérence et la logique des préférences du décideur.

Le point de départ de la méthode est de définir une arborescence hiérarchique de critères et de sous-critères. La représentation de l'arborescence se fait sous la forme de couples père-fils :



Chaque critère doit être identifié, avec sa définition et son intensité. Il faut en effet que la somme des poids de tous les critères fils d'un même critère père, soit égale à 1. Cette expression des poids est appelée relation d'interdépendance.

La détermination des poids des facteurs se fait une fois que la hiérarchie complète du problème est posée. On va comparer deux à deux les différentes branches de même niveau, en attribuant une note chiffrée (sur une échelle prédéfinie : voir ci-dessous) à la façon dont on ressent la différence entre les deux critères. On commence par peser entre eux, les critères ayant les rangs les plus élevés (les plus hauts dans la hiérarchie).

INTENSITE DE LA PREFERENCE	VALEUR ASSOCIEE
La différence entre les deux actions est nulle, ou négligeable	1
On préfère légèrement le premier élément au second	3
On préfère le premier élément au second	5
On préfère de beaucoup le premier élément au second	7
On préfère beaucoup plus le premier élément au second	9

Dans un souci d'obtenir des réponses cohérentes, on peut également rajouter les évaluations suivantes :

INTENSITE DE LA PREFERENCE	VALEUR ASSOCIEE
On préfère un peu moins le premier élément au second	1/3
On préfère moins le premier élément au second	1/5
On préfère de beaucoup le second élément au premier	1/7
On préfère beaucoup moins le premier élément au second	1/9

Ainsi, on dispose de toute cette échelle de valeurs pour remplir une matrice de jugements, que nous noterons A dans les formules mathématiques. Notons aussi I la matrice identité d'ordre n , n_d étant le nombre d'actions prises en compte dans l'étude.

On va ensuite, une fois cette matrice remplie, normaliser par colonne cette matrice (on additionne les valeurs d'une même colonne, puis on divise chaque nombre de la colonne par cette somme). Puis, on calcule la moyenne arithmétique des nombres sur chaque ligne. Chaque ligne correspondant à un critère, la moyenne associée au critère définit le poids du critère relativement au critère père. La valeur « globale » du poids d'un critère en bout d'arbre est le transformateur, tous les poids aboutissant à ce critère.

Initialement, Saaty avait proposé une méthode basée sur les valeurs propres λ de la matrice des jugements. Ainsi, il avait montré que la valeur propre maximale λ du problème de recherche des m valeurs propres ($\det(-A\lambda I) = 0$) était réelle, et supérieure à la taille de la matrice. Puis, en résolvant le système $AV = \lambda V$ (V étant un vecteur propre de A), et en ajoutant la condition que la somme des poids doit être égale à 1 ; il en tirait les mêmes valeurs des poids que celles obtenues par la technique précédente. La cohérence des résultats doit également être vérifiée. Pour chacune des matrices d'évaluation A , on peut calculer un indice de cohérence. Pour une matrice donnée, on retient sa valeur propre maximale λ . L'indice de cohérence CI d'une matrice $n \times n$ est :

Le ratio de cohérence est $CI = \frac{\lambda_m - n}{n - 1}$ ensuite calculé en utilisant la formule $CR = CI/RI$

où RI est un indice de cohérence obtenu par un grand nombre de simulations.

Cette méthode a souffert des nombreuses critiques (voir [8] et [9]). Les plus basiques se contentaient de critiquer l'échelle trop restreinte des valeurs autorisées pouvant conduire à des erreurs (si A est noté 3 par rapport à B , B 5 par rapport à C , on a un problème car il n'est pas possible de noter A par rapport à C avec 8).

Les poids sont déterminés avant que les échelles de mesure des critères n'aient été fixées. Ainsi, le décideur est induit à faire des suggestions à propos de la relative importance des objets sans savoir, en fait, ce qui est comparé.

De plus, le fait de normaliser les poids à tous les niveaux de hiérarchie entraîne un phénomène d'inversement de rang (si l'on conduit deux études avec les mêmes actions, mais que l'on retire une action pour la seconde étude ; le classement final des actions sera profondément bouleversé). Finalement, une des erreurs les plus difficiles à corriger est le fait qu'AHP ne dispose pas de points d'ancrage pour relier entre eux les différentes échelles des critères (en effet, on ne peut pas contrôler si un point de

différence sur le critère puissance vaudra un point sur le critère prix). Ceci implique que les critères n'ont pas tous la même échelle (que l'on pourrait croire absolue) mais que tous les critères ont des échelles flottantes les unes par rapport aux autres.

2) MACBETH

La méthode MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) est une méthode assez récente, développée notamment par Carlos Bana e Costa. Cette approche itérative de questionnement du décideur a pour but de quantifier l'attractivité relative de chaque action par rapport à une autre. Elle ne requiert qu'un jugement qualitatif de préférence, ce qui lui permet de s'affranchir des critiques concernant les notations et leurs références. Le système est basé sur un programme, vérifiant la consistance des données fournies, et créant une échelle de poids.

La première étape est de rentrer tous les critères devant entrer en compte dans le processus de décision. On rentre ensuite également toutes les actions possibles.

On définit deux seuils pour chacun des critères qui vont servir d'ancrage. Le décideur doit ainsi imaginer deux niveaux abstraits pour chacun des critères. Un niveau devrait être considéré comme 'bon', et l'autre devra être considéré comme 'neutre'. On donne à ces deux niveaux les valeurs 100 et 0 respectivement.

On demande ensuite au décideur de ranger par ordre de préférence pour chacun des critères, les différentes actions, ainsi que les deux niveaux définis 'bon' et 'neutre'. Pour chacun des critères, on va ensuite demander au décideur d'évaluer la différence d'attractivité entre deux actions (les niveaux 'bon' et 'neutre' doivent aussi être évalués avec les actions). L'échelle disponible pour le décideur est : très faible, faible, modérée, fort, très forte et extrême. Si le décideur n'est pas sûr de son jugement, on peut l'autoriser à mettre deux jugements (par exemple, le décideur hésitant entre les niveaux modérés et fort est autorisé à donner une différence de type modéré-fort). Le décideur peut aussi considérer deux actions comme équivalentes. On commence par comparer l'action la plus attractive avec la moins attractive, puis la 2ème plus attractive avec la moins attractive, etc.

A chaque jugement, le programme vérifie la consistance de la nouvelle donnée avec les précédentes. Une fois tous les jugements rentrés, le logiciel crée une échelle (basée sur des nombres associés l'expression verbale de la préférence), et dispose sur cette échelle l'attractivité de l'action relativement au critère considéré. Cette échelle est ensuite proposée au décideur. Si cette échelle ne lui semble pas correcte, on ajuste les scores, en restant en accord avec les données de jugement fournies dans la notation. Ce processus est répété pour chacun des critères.

Puis, on va chercher à créer une échelle commune aux critères. On demande au décideur d'imaginer une action qui serait 'neutre' pour chacun des critères. Puis, on lui demande d'évaluer l'augmentation d'attractivité globale, si l'on passe pour un critère quelconque du niveau 'neutre' au niveau 'bon'. On répète ce processus pour une augmentation de 'neutre' à 'bon' pour chacun des critères. Une première base pour une échelle est alors proposée par le software. Cette échelle va être complètement remplie par l'étape suivante.

On évalue alors entre eux les critères. On pose au décideur la question : « Combien de fois est plus attractif l'élévation de niveau 'neutre' à 'bon' dans le critère A que dans le critère B ? ». On pose cette question pour chacun des couples possibles d'actions, en vérifiant la consistance de la réponse avec les données déjà entrées. Le logiciel va ensuite pouvoir créer une échelle de poids pour les critères. On demande bien évidemment au décideur de vérifier cette échelle de poids et on fait les modifications qui s'imposent si besoin. Pour

faciliter cette vérification, on montre comment un changement d'une des ses réponses va affecter le résultat global du modèle.

Des graphiques sont proposés, avec des tables de valeurs, pour résumer les résultats. Cela permet bien évidemment de pouvoir discuter et choisir avec plus de latitude, qu'avec un simple classement.

Il est bien évidemment très difficile de pouvoir évaluer des niveaux abstraits et de les relier entre eux. C'est néanmoins une étape très importante, qui assure la validité du raisonnement. De plus, aucune méthode ne permet de pondérer facilement des critères. Au vu des essais effectués, l'appréhension du problème est toutefois améliorée par l'introduction de ces niveaux abstraits.

ANNEXE 6

Cahier des charges techniques d'une bielle isolante en thermoplastique

1. Objectif :

Développer une bielle isolante en thermoplastique pour appareillages « top line ».

2. FONCTIONS :

Garantir l'isolation diélectrique et assurer la liaison mécanique entre deux sous-ensembles.

3. NORMES :

Elle doit être conforme aux normes CEI et ANSI régissant les équipements électriques qu'elle équipe : CEI 60056 et ANSI C37.09.

4. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES :

4.1 Dimensions :

- $128 < h < 130 \text{ mm}$ et $r < 50 \text{ mm}$
- défaut de coaxialité $< 0.7 \text{ mm}$

4.2 Caractéristiques électriques :

La tension nominale est $\leq 38 \text{ kV}$ mais plusieurs niveaux d'isolation sont requis.

		$U_n \leq 38 \text{ kV}$
Tenue en fréquence industrielle 50 Hz		95 kV eff / 72 s
Tenue en choc de foudre	Onde pleine : 1,2 / 50 μs , 15 +/15-	255 kVc
Intensité maximale des décharges partielles		$\leq 10 \text{ pC}$ à 45 kV

4.3 Caractéristiques mécaniques :

Les tenues mécaniques ci-dessous sont à respecter pour une plage de température : $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ / $+90 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Traction : Choc dynamique de 1300 daN
- Compression : Choc dynamique de 1300 daN
- Fluage (à chaud : 90°C) : Effort permanent de compression de 300 daN

- Fatigue : 30 000 manœuvres d'endurance mécanique sur disjoncteur de type VOX.

5. ENVIRONNEMENT :

5.1 Utilisation :

- Utilisation sous cuve étanche.
- Atmosphère propre de SF6 sous 0.5 bar relatif à 20 °C (SF6 non pollué).
- Pas d'exposition aux UV en utilisation.
- Pas de substances chimiques particulières.
- Température d'utilisation permanente : -40 °/+90 °C
- Radiations ionisantes : Rayon X ou autres négligeables.
- Humidité : < 5 d'humidité relative.

6. INSTALLATION ET STOCKAGE :

- Vide industriel : -0.999 bar relatif à 20 °C / 12 heures maximum.
- Humidité : jusqu'à 50 % d'humidité relative (stockage).
- Lumière artificielle en exposition directe (possible lors du stockage).

7. DUREE DE VIE :

Durée de vie souhaitée > 30 ans

ANNEXE 7

Equivalents Ni de la méthode CML proposés par la méthode MEEUP

Source : MEEUP Methodology report 2005

MEEUP (VHK)		CML(Guinée et al., 2002)				
air pollutant ranked by factor from EU legislation	weighting factor (calculated in Ni. Equivalent)	air pollutant ranked as MEEUP (all recalculated to Ni. Equivalent)	Human toxicity potential (HTP)	Eco- toxicity potential Fresh Water Aquatic (FAETP)	Eco- toxicity potential Fresh Water Sediment (FSETP)	Eco- toxicity potential Terrestrial (TETP)
carbon monoxide	0.000002	carbon monoxide	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
benzene	0.004	benzene	0.05	0.00	0.00	0.00
zinc*	0.04	zinc*	0.00	0.03	0.03	0.10
lead	0.04	lead	0.01	0.00	0.00	0.13
chromium (III)*	0.5	chromium (III)*	0.02	0.00	0.00	25.00
copper*	0.5	copper*	0.12	0.35	0.35	0.06
nickel	1	nickel	1.00	1.00	1.00	1.00
arsenic	3.33	arsenic	10.00	0.08	0.08	13.33
cadmium	5	cadmium	4.29	0.46	0.46	0.68
mercury*	5	mercury*	0.17	0.51	0.51	233.33
Carc. PAHs	20	Carc. PAHs	16.29	0.27	0.35	0.01
chromium VI	n.a.	chromium VI	97.14	0.01	0.01	25.00
2,3,7,8-TCDD	n.a.	2,3,7,8-TCDD	54285.71	3333.33	4250.00	100.00

*= from EPER, rest AAQD; all values normalised to index Nickel=1

ANNEXE 8

Etapes de mise en place de notre système de management de l'éco-conception

Mise en place d'une politique environnementale produit

La première étape de la mise en place de notre démarche d'éco-conception consistait à proposer à la direction une politique environnementale orientée « produit ». Cela permettait d'afficher la volonté de l'entreprise d'intégrer l'éco-conception dans la conception de ces produits. Cette politique d'éco-conception est basée sur quatre axes : le respect de la réglementation, l'élimination des substances toxiques, l'intégration de la fin de vie lors de la conception des nouveaux produits et l'amélioration de la communication environnementale. La mise en place d'une telle politique nécessite l'organisation de sessions d'information et de sensibilisation de tout le personnel de l'entreprise.

Organisation de sessions de formation en éco-conception

Nous considérons que la formation des acteurs de conception est un facteur indispensable à l'adoption de la démarche d'éco-conception mise en place dans l'entreprise. Nous avons alors organisé différentes sessions de formation suivant un plan sur trois ans, voir figure suivante.



Organisation de réunions de concertation avec l'équipe de conception

Le premier objectif de ces réunions de concertation est de comprendre le fonctionnement de l'équipe de conception de manière générale et d'étudier avec elle les possibilités d'intégration de paramètres environnementaux dans la conception des appareillages électriques de moyenne tension. Cela nous a permis, entre autre, de mesurer l'écart qui existe entre le procédé de conception théorique et la démarche pratiquée et de connaître les difficultés que rencontrent les concepteurs pendant les différentes phases de conception.

Le deuxième objectif est d'élaborer un cahier des charges de notre démarche d'éco-conception qui correspond à la demande de l'équipe de conception en termes de méthodes et d'outils d'éco-conception.

Le troisième objectif est de faire adhérer les acteurs de cette équipe à notre démarche en les impliquant dès le début dans nos travaux. Il nous apparaissait essentiel d'avoir leurs points de vue au fur et à mesure de l'évolution de notre travail.

Intégration des paramètres environnementaux dans le cahier des charges de conception

Cette étape correspond à la première action d'intégration des paramètres environnementaux au processus de conception. Il s'agit de créer des restrictions environnementales valables pour tous les produits de la moyenne tension. Nous avons alors proposé deux critères environnementaux : l'élimination des substances dangereuses de la directive RoHS et le marquage de toutes les pièces plastiques de plus de 100g.

Intégration de l'éco-conception dans le manuel de qualité des projets de conception

La mise en place d'une rubrique éco-conception dans le manuel de qualité relatif aux projets permet d'attirer l'attention des responsables des projets de conception sur l'intégration des paramètres environnementaux lors du développement de nouveaux produits. Désormais, le lancement d'un nouveau produit ne peut se faire sans avoir, au préalable, préparé une évaluation environnementale, une fiche de gestion de fin de vie et une check-list d'Hygiène Sécurité et Environnement.

Mise en place de supports de communication environnementale

Comme présenté dans le chapitre 4, nous avons adopté deux supports de communication en éco-conception : l'auto-déclaration environnementale et la fiche de gestion de fin de vie. Au fur et à mesure du déploiement de la démarche d'éco-conception dans l'entreprise, nous avons remarqué un accroissement important de ces documents. Au départ, seuls quelques produits étaient ciblés tandis qu'aujourd'hui cette action se fait de manière systématique sur tous les produits.

Mise en place des outils d'éco-conception

Le premier outil élaboré et mis à la disposition de l'équipe de conception est le guide « vert » d'éco-conception. Les réunions avec l'équipe de conception ont montré que son utilisation est très rare étant donné son format et la densité des informations que contient cet outil. Nous avons alors fourni un guide simplifié contenant les principales règles d'éco-conception et les outils d'intégration de la fin de vie dans la conception.

Le deuxième outil est une check-list d'Hygiène, Sécurité et Environnement qui permet au concepteur de vérifier la conformité de son disjoncteur avec les normes correspondantes. Cet outil est aussi utilisé en fin de projet en tant qu'outil de contrôle par le responsable du projet et le comité de validation du produit. Son application ne pose pas de difficultés particulières.

Le troisième outil est l'outil d'aide à l'éco-conception DECOD. La mise en place de cet outil n'est pas définitive. Elle se fait en trois étapes :

1. La mise à disposition de DECOD pour un nombre d'utilisateurs afin de mesurer les principales difficultés et erreurs.
2. La mise à disposition d'une version corrigée pour l'ensemble de l'équipe de conception afin d'affiner les corrections.
3. La mise à disposition d'une version définitive pour tous les utilisateurs

Aujourd'hui nous en sommes à la seconde étape.

Organisation d'audits d'éco-conception

Les audits d'éco-conception concernent tous les services participant aux projets de conception. Ils permettent d'évaluer le degré de prise en considération des critères environnementaux au moment de la conception des nouveaux produits. A la suite de cette évaluation, un plan d'action est mis en place pour apporter des actions correctives qui permettent d'atteindre un meilleur niveau d'intégration de l'éco-conception. Ces audits se basent sur un document interne à l'entreprise (Ecodesign Roadmap) présenté dans le chapitre 4.

Mise en application dans des projets de conception

La mise en application de notre outil d'éco-conception dans les projets de conception permet d'orienter le concepteur vers des choix de conception plus écologiques et de mesurer l'adéquation des orientations données avec les résultats d'outils plus complexes. Dans le paragraphe suivant nous présentons le cas d'un projet de re-conception d'un produit dans l'objectif d'améliorer son impact environnemental.

ANNEXE 9

Configuration informatique de l'outil d'aide à l'éco-conception DECOD

Nous avons baptisé notre outil d'aide à l'éco-conception « DECOD » pour Distribution ECODesign. Après la première phase de construction théorique, nous avons développé un logiciel informatique qui permet une utilisation simplifiée de notre outil. Dans ce paragraphe, nous présentons la configuration de ce logiciel et son mode d'utilisation.

La construction de ce logiciel respecte les mêmes critères de notre cahier des charges initial à savoir : simplicité, rapidité, clarté, partage de l'information, mise à jour facile et multi compétences.

Nous avons séparé le logiciel DECOD en quatre fonctions connectées :

- évaluation environnementale
- calcul de coût
- bases de données
- compte rendu

Fonction d'évaluation environnementale

Phase de renseignement

La première étape consiste à renseigner le produit : nom du produit, nom du projet, numéro de plan, commentaires, etc.

Fichier / File	Editer / Edit	Calculer / Calculate	Aide / Help
Nom / Name <input type="text"/>	Commentaires / Comments <input type="text"/>		
N° de plan / N° of drawing <input type="text"/>			
Réf Produit / Product ref <input type="text"/>			
<input type="button" value="Nouvelle option/ New option"/>			

Ensuite, l'utilisateur construit les sous-ensembles de ses options de conception. Pour chaque sous-ensemble, il peut sélectionner les données d'entrée (matières et procédés) qui se trouvent dans des listes de choix. Il est à noter que ces données sont normalisées selon les références internes à l'entreprise qui sont les mêmes utilisées sur les plans des pièces. L'utilisateur peut alors écrire directement la référence correspondant à la donnée. Une fois les sous-ensembles renseignés, l'utilisateur peut choisir un niveau de difficulté de désassemblage ou compléter une matrice de liaison qui permet de choisir les modes d'assemblage entre les différents sous-ensembles. Cette étape est facultative selon le choix de l'utilisateur

Option 1

Nom / Name	Commentaires / Comments	Image / Photo
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
N° de plan / N° of drawing		
<input type="text"/>		

Nouveau sous-ensemble / New sub-assembly

Matériaux / Materials	Norme AREVA AREVA standard	Norme Iso Iso standard	Quantité Quantity (kg)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Ajouter matériau / Add material

Processus / Process	Réf AREVA AREVA ref	Quantité Quantity (kg)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Ajouter procédé / Add process

Ajouter sous-ensemble enregistré / Add saved sub-assembly

Matrice de liaison / links matrix (Facultatif)

Niveau de difficulté de désassemblage
Disassembly hardness level (0 → 5)



Matrice de liaison/ links matrix 

Option 1

	Sous-ensemble 1	Sous-ensemble 2	Sous-ensemble 3
Sous-ensemble 1		assemblage ▼	assemblage ▼
Sous-ensemble 2	assemblage ▼		assemblage ▼
Sous-ensemble 3	assemblage ▼	assemblage ▼	

Phase d'évaluation environnementale

Une fois qu'une ou plusieurs options sont renseignées, l'utilisateur peut accéder à la phase d'évaluation environnementale. Il peut alors choisir soit d'évaluer soit de comparer différentes options de conception (voir figure 55).

Evaluation environnementale/ Environmental evaluation

Calculer / Calculate Comparer / Compare

Option 1 Option 1

Option 2 Option 2

Option 3 Option 3

	Option 1	Option 2	Option 3
Consommation énergétique / energy depletion			
Consommation de l'eau / Water depletion			
Ressources naturelles / Natural resources			
Effet de serre / Global warming			
Toxicité / Toxicity			
Désassemblage : Disassembly			

	Option 1	Option 2	Option 3
Score environnemental / Environmental score			
Classification			



Fonction calcul de coût

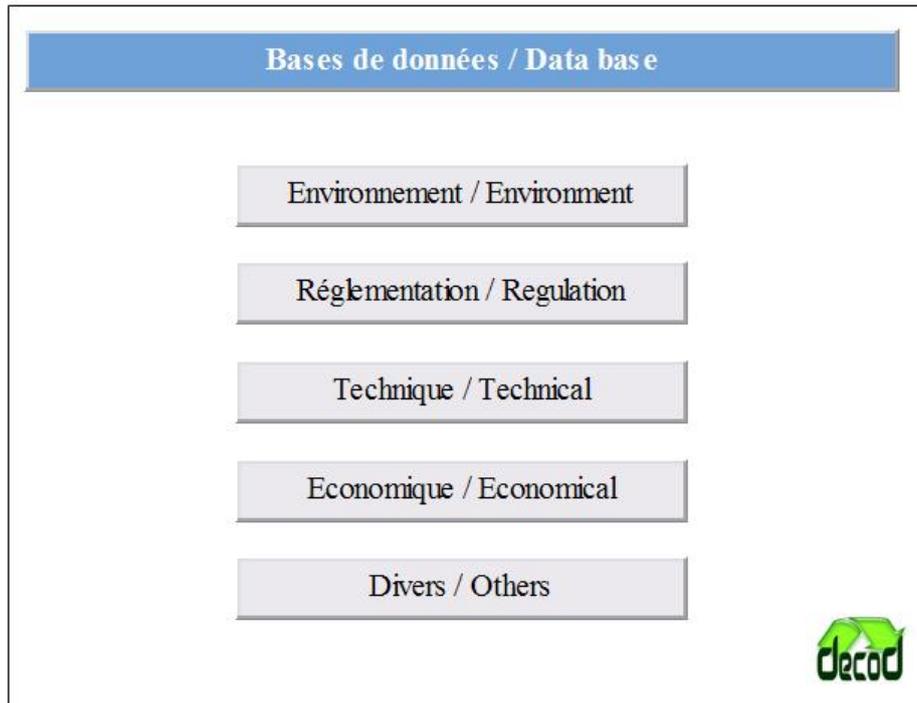
Nous avons créé un lien avec le logiciel de calcul de coût de fabrication des pièces métalliques développé chez AREVA T&D. Pour cela, nous proposons un calculateur de coût de pièces en plastiques. A ce jour, cet outil est en cours de développement, l'objectif étant de compléter les outils existants afin d'intégrer cette fonction à notre outil d'éco-conception. Par ailleurs, l'utilisateur peut accéder à la base de données économique qui contient les informations nécessaires au chiffrage de ses options de conception.

REVISION G	ISSUER P.LEROY	DATE 04/12/2006	Mp: pl2006	<input checked="" type="checkbox"/> STEEL	<input type="checkbox"/> STAINLESS STEEL
CURRENCY CHOICE France				<input type="checkbox"/> ALUMINIUM	<input type="checkbox"/> COPPER
MATERIAL FILE	Choice	ISO-Cu-ETP Xhard	394	Type	BAR / PROFIL
	Matériau	Copper		MF standard	Cu-ETP X hard
	Density	8,9 Kg / dm3		Code DB	ST200-301-000
				Price / Kg	6,50 EUR
CLEAR ALL		CHARACTERISTICS OF DRAWING		<input checked="" type="checkbox"/> MACHINING	<input checked="" type="checkbox"/> OTHERS
				<input type="checkbox"/> SHEET METAL	<input type="checkbox"/> WELDING
				<input type="checkbox"/> MILLING	<input type="checkbox"/> DRILLING
APPARATUS		NUMBER	ORC005304-04	Material price	
DESIGNATION Douille de contact		REVISION	00	EUR	
INSTRUCTIONS		PRINT INSTRUCTIONS		END OF USE	
BORER MACHINING	SHEET METAL	OTHER MACHINING	ASSEMBLY WELDING	OPERATIONS ANNEX	
ESTIMATE OF COST	MILLING	DRILLING	MATERIAL CHOICE	WELDING	
Quantity of parts		20	50	100	300
Unit Price : (EUR)				1000	1500

Fonction bases de données

Cette fonction est intégrée aux fonctions d'évaluation environnementale et économique mais peut être utilisée séparément. En effet, l'utilisateur peut utiliser le logiciel DECOD en tant que source d'information ou moyen de partage d'information. Nous considérons que ces bases de données partagées par tous les utilisateurs forment un très bon outil de capitalisation de savoir-faire de l'équipe de conception (confère annexe 9).

A ce stade nous préconisons de restreindre l'accès à la mise à jour des bases de données à un nombre d'administrateurs limité afin de contrôler les modifications et les évolutions apportées et veiller au respect de la qualité des données. Les autres utilisateurs peuvent se référer aux administrateurs pour toute demande de modification.



- Aptitude = Non.
- Donnée "inconnu" ou pas assez spécifique.
- Données guide de choix de matière parlent de soudabilité sans spécifications sur le type de soudage (cf en rouge).
- Donnée Norme en désaccord avec TI. (TI = non en englobant "famille" de matériaux et Norme = oui pour soudabilité sans spécification).
- Si soudabilité Norme = Non, peu importe TI.
- Matériaux existant aussi sur guide de choix de matière.

	Indication sur les plans	MVB			Désignation	Soudage par résistance		Soudage à l'arc	
		Norme	Code	NF		Soudage effectué par la fusion du matériau des pièces à assembler, mise l'une à côté de l'autre, dû à la chaleur produite par le courant de forte intensité les traversant.		Soudage effectué au moyen d'une électrode fondant au fur et à mesure et qui se solidifiera en formant une liaison continue sur le métal des pièces à assembler. La fusion rendu possible par l'arc électrique établi entre les pièces et l'électrode.	
						Aptitude	Commentaires	Aptitude	Commentaires
Aciers									
Fonderie	EN-GJMV-400 S/ST1026	ST1026	ST200-026-000	-	Fonte malléable à cœur blanc	Non	Donnée Norme.	Non	Donnée Norme.
	EN10293G34 CrMo4+QT1	ST1038	ST200-038-000	35 CD 4 M	Acier moulé faiblement allié	Oui	Bonnes aptitudes au soudage. Donnée Norme.	Oui	Bonnes aptitudes au soudage. Donnée Norme.
	EN10025 – S235JR	ST1104	ST200-104-000	E24-2	Acier de construction non allié	Oui	Donnée Norme.	Oui	Donnée Norme.
	EN20227- S235JRG2C+ C	ST1105	ST200-105-0001)	E24-2 NE	Acier de construction non allié	Oui	Donnée Norme.	Oui	Donnée Norme.
	EN10277- E235GC+C	ST1107	ST200-107-000	-	Acier de construction mécanique non allié				

Fonction compte rendu

Tel que présenté dans notre cahier des charges, l'outil DECOD peut servir de support de communication pour les différents acteurs de l'équipe de conception. En effet, un rapport automatisé est généré par le logiciel. L'utilisateur peut choisir entre un rapport standard ou un rapport personnalisé où il sélectionne les informations à communiquer.

Le rapport standard se présente selon la figure suivante :

Rapport environnemental / Environmental report

Option 1
Option 2
Option 3

Enregistrer / Save
Imprimer / Print

Nom du produit / Name of the product :

Numéro de plan du produit / Product drawing n° :

Nom de l'option de conception / Design option name :

Numéro de plan de l'option de conception / Design option drawing n° :

Commentaires / Comments :

Photo

Bilan de matériaux / Bill of material

	Total		Recyclage Recycling		Incinération Incineration		Décharge Landfill		
	Quantité Quantity	Prix / Cost	% recyclé % recycled	Prix / Cost	% incinéré % incinerated	Energie recuperee Recovered energy	Prix / Cost	% mis en décharge % landfilled	Prix / Cost
Mat 1									
Mat 2									
Mat 3									
Mat n									
Total									

Evaluation environnementale / Environmental evaluation :

	Option n
Consommation énergétique / ennergy depletion	
Consommation de l'eau / Water depletion	
Ressources naturelles / Natural resources	
Effet de serre / Global warming	
Toxicité / Toxicity	
Désassemblage : Disassembly	

Représentation graphique / Graphical representation :

Organigram
Spherolitic

Non conformités / Non conformances:

Voies d'amélioration / Improvement ways :