



**HAL**  
open science

**Prise en compte des acteurs de la chaîne de valeur dans  
l'analyse de la performance environnementale pour  
éco-concevoir et inciter à une éco-utilisation : cas  
appliqué aux produits consommateurs d'énergie unités  
de réfrigération pour le transport routier.**

Charlotte Heslouin

► **To cite this version:**

Charlotte Heslouin. Prise en compte des acteurs de la chaîne de valeur dans l'analyse de la performance environnementale pour éco-concevoir et inciter à une éco-utilisation : cas appliqué aux produits consommateurs d'énergie unités de réfrigération pour le transport routier.. Eco-conception. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2017. Français. NNT : 2017ENAM0056 . tel-01701360

**HAL Id: tel-01701360**

**<https://pastel.hal.science/tel-01701360>**

Submitted on 5 Feb 2018

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

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

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

## Doctorat ParisTech

# THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

**Spécialité " Conception "**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Charlotte HESLOUIN**

le 11 décembre 2017

**Prise en compte des acteurs de la chaîne de valeur dans l'analyse  
de la performance environnementale pour écoconcevoir et inciter à  
une éco-utilisation.**

**Cas appliqué aux produits consommateurs d'énergie : unités de réfrigération pour le  
transport routier.**

Directeur de thèse : **Nicolas PERRY**

Co-encadrement de la thèse : **Véronique PERROT-BERNADET et Alain CORNIER**

### Jury

<b>M. Bernard YANNOU</b> , Professeur, Laboratoire Génie Industriel, Ecole Centrale Paris	Président
<b>Mme Tatiana REYES</b> , Maître de conférences HDR, CREIDD, Université de Technologie de Troyes	Rapporteur
<b>M. Patrick ROUSSEAU</b> , Professeur, Institut Pprime, Université de Poitiers	Rapporteur
<b>M. Emmanuel CAILLAUD</b> , Professeur, ICube, Université de Strasbourg	Examinateur
<b>Mme. Véronique PERROT-BERNADET</b> , Docteur, Arts et Métiers Chambéry	Examinateur
<b>M. Nicolas PERRY</b> , Professeur, I2M, Arts et Métiers	Examinateur
<b>M. Alain CORNIER</b> , Docteur, Arts et Métiers Chambéry	Examinateur
<b>M. Lionel POURCHERESSE</b> , Senior Manager, Carrier Transcold	Invité
<b>M. André STUMPF</b> , Docteur, Carrier Transcold	Invité

*« Les espèces qui survivent ne sont pas les espèces les plus fortes, ni les plus intelligentes, mais celles qui s'adaptent le mieux aux changements. »*

(Charles Darwin)

Depuis des millénaires, nos ancêtres ont su évoluer pour s'adapter à leur environnement. Saurons-nous faire évoluer nos comportements pour nous adapter aux changements qui s'annoncent ?



# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Nicolas Perry de m'avoir accordé sa confiance pour réaliser ces travaux et d'avoir toujours répondu présent malgré la distance entre Bordeaux et Chambéry. Je n'aurais pas pu espérer meilleur directeur de thèse. Je remercie Véronique Perrot-Bernardet de m'avoir guidé durant ces trois années, pour ses conseils, sa bonne humeur, et sa relecture minutieuse de ce manuscrit. Je la remercie aussi de m'avoir aidé à vivre des expériences enrichissantes. Mes remerciements vont également à Alain Cornier pour son expérience et ses conseils durant ses trois années.

J'ai réalisé ces travaux au sein de l'entreprise Carrier Transcold et je tiens à remercier les personnes rencontrées pour leurs échanges et leur accueil. Je tiens à remercier Lionel Pourcheresse pour la confiance qu'il m'a accordée, les échanges toujours constructifs, et de m'avoir permis de réaliser mes travaux de thèse dans d'excellentes conditions. Je remercie aussi André Stumpf pour son expérience, ses conseils et son aide, ainsi que sa bonne humeur.

Je remercie Bernard Yannou d'avoir accepté de présider mon jury de thèse. Je remercie également Patrick Rousseau et Tatiana Reyes d'avoir accepté de rapporter sur mes travaux. Enfin, je remercie Emmanuel Caillaud d'avoir pris part au jury et d'avoir examiné mon travail.

Je tiens à remercier les membres de l'institut des Arts et Métiers de Chambéry pour leur bonne humeur, les moments d'échanges et de gourmandise lors de la pause café de 10h. J'ai réellement apprécié l'ambiance familiale de l'institut. Je remercie Nathalie pour son aide et toutes les communications sur mon sujet de thèse. Je remercie Carole et Charlotte avec qui j'ai partagé mon premier bureau pour leur bonne humeur. Je remercie aussi mes collègues doctorants Rachel, Jorge, Guilhem, Hanna pour les moments passés ensemble. Je remercie Mylène, Marie-Hélène, Anne, Bouchera, Sophie, Jean-Marc, Roman, Bertrand, Suzanne, Marianne, Sabine...

Je remercie aussi d'anciens collègues des Arts et Métiers de Metz. Merci à Sandra de m'avoir poussé à faire mon doctorat et pour ta bonne humeur. Merci à Damien pour ta bonne humeur et nos fous rires.

Je remercie mes parents et ma famille de m'avoir soutenu et d'avoir été là pour moi. Je remercie aussi la famille de mon compagnon pour leur soutien.

Enfin, je remercie, Maxime, l'homme qui partage ma vie et qui m'a soutenu durant ces trois années. Il a accepté de quitter sa région natale pour me suivre et m'accompagner dans mes projets. J'ai hâte de ce savoir ce que l'avenir nous réserve.

Merci à tous !



# *Abréviations utilisées*

<b>ACV</b>	Analyse du Cycle de Vie
<b>BtoB</b>	Business to Business/Commerce entre entreprises
<b>BtoC</b>	Business to Consumer/Commerce avec le consommateur (grand public)
<b>CAO</b>	Conception Assistée par un Ordinateur
<b>CEE</b>	Certificat d'économie d'énergie
<b>CFC</b>	Chlorofluorocarbure
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de carbone
<b>COP</b>	Coefficient of Performance/Coefficient de performance
<b>ErP</b>	Energy Related Product/Produit lié à l'Énergie
<b>GES</b>	Gaz à Effet de Serre
<b>GIEC</b>	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
<b>HCFC</b>	Hydrochlorofluorocarbure
<b>HFC</b>	Hydrofluorocarbure
<b>HSE</b>	Hygiène, Sécurité, Environnement
<b>ICV</b>	Inventaire du Cycle de Vie
<b>IPE</b>	Indicateur de Performance Environnementale
<b>NO<sub>x</sub></b>	Oxyde d'azote
<b>PLM</b>	Product Life Cycle Management/Gestion du Cycle de Vie des Produits
<b>PM</b>	Particulate Matter/Particule fine
<b>PRC</b>	Pouvoir de Réchauffement Climatique
<b>R&amp;D</b>	Recherche et Développement
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de soufre
<b>SWOT</b>	Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats/Forces, Faiblesses, Opportunités, et Menaces
<b>TCO</b>	Total Cost of Ownership/Coût total de possession



# *Sommaire*

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>15</b>
<b>PARTIE 1 : CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUES .....</b>	<b>21</b>
<b>CHAPITRE 1. PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT DANS LE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS.....</b>	<b>23</b>
1. <i>Environnement et développement de produits.....</i>	23
2. <i>Evaluation de la performance.....</i>	26
3. <i>Outils d'écoconception existants .....</i>	27
4. <i>Facteurs de succès d'une démarche d'écoconception en entreprise .....</i>	31
5. <i>Bilan.....</i>	33
<b>CHAPITRE 2. MISE EN PLACE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE.....</b>	<b>33</b>
1. <i>Qu'est-ce qu'un indicateur ?.....</i>	33
2. <i>Les indicateurs de performance environnementale.....</i>	34
3. <i>Les types d'indicateurs de performance environnementale .....</i>	35
4. <i>Sélection des indicateurs de performance environnementale .....</i>	37
a. Critères de sélection des indicateurs.....	38
b. Méthodes de sélection des IPE existantes.....	39
c. Bilan des méthodes de sélection des IPE .....	43
5. <i>Gestion du multicritère et aide à la décision .....</i>	43
a. Gestion du multicritère.....	44
b. Méthodes d'analyse multicritère.....	44
c. Conclusions sur la gestion du multicritère.....	47
6. <i>Bilan.....</i>	48
<b>CHAPITRE 3. INTÉGRATION DES ACTEURS DE LA CHAÎNE DE VALEUR POUR L'AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE .....</b>	<b>48</b>
1. <i>Intégration des fournisseurs .....</i>	49
2. <i>Intégration des clients / utilisateurs .....</i>	50
a. Produits consommateurs d'énergie et utilisation.....	50
b. Modélisation de la phase d'utilisation .....	51
c. Stratégies d'éco-utilisation .....	53
d. La conception pour un comportement éco-responsable.....	55
3. <i>Bilan.....</i>	60
<b>CHAPITRE 4. PROBLÉMATIQUES ET MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>61</b>
1. <i>Définition des problématiques de thèse .....</i>	61
2. <i>Méthodologie opérationnelle, présentation globale .....</i>	63
<b>PARTIE 2 : IPE, ECOCONCEPTION ET ECO-UTILISATION .....</b>	<b>67</b>
<b>CHAPITRE 5. PROPOSITION D'UNE MÉTHODE DE SÉLECTION DES IPE PRENANT EN COMPTE TOUTE LA CHAÎNE DE VALEUR.....</b>	<b>69</b>
1. <i>Étape 1 : L'entreprise, le produit, l'environnement .....</i>	70
a. Aspects et impacts environnementaux du produit.....	71
b. Analyse du secteur d'activité .....	73
c. Réglementations environnementales.....	73
d. Maturité de l'entreprise par rapport à l'écoconception .....	74
e. Stratégie environnementale de l'entreprise.....	80
f. Bilan de l'étape 1 .....	80
2. <i>Étapes 2 et 3 : Définir les acteurs clés et leurs besoins .....</i>	80
a. Identifications des acteurs importants à considérer .....	81
b. Définition des besoins .....	81
c. Définition des objectifs .....	85

d. Bilan des étapes 2 et 3 .....	85
3. <i>Étape 4 : choix des IPE spécifiques aux différents acteurs</i> .....	86
a. Base de données des IPE .....	86
b. Outil de sélection des IPE .....	87
c. Bilan de l'étape 4 .....	92
4. <i>Étape 5 : Choix des IPE globaux</i> .....	92
5. <i>Gestion des IPE et prise de décision</i> .....	94
a. Comment utiliser la méthode .....	94
b. Définition des objectifs .....	96
c. Gestion du multicritère et prise de décision .....	96
6. <i>Synthèse de la méthode de sélection des IPE</i> .....	97
<b>CHAPITRE 6. INTÉGRATION DES IPE DANS LA DÉMARCHÉ D'ÉCOCONCEPTION</b> .....	<b>99</b>
1. <i>Sélection des stratégies d'écoconception</i> .....	99
2. <i>Utilisation des IPE pour intégrer la phase d'utilisation dans la chaîne de valeur</i> .....	101
a. L'entreprise .....	102
b. Approvisionnement (les fournisseurs) .....	102
c. Les distributeurs, autres entreprises du système global et intégrateurs de solution .....	103
d. Utilisation .....	103
e. Les filières de fin de vie .....	103
3. <i>Utilisation des IPE pour inciter à une utilisation éco-responsable des produits et servir d'avantage concurrentiel</i> .....	105
a. Collecte d'informations .....	110
b. Évaluation de la performance environnementale de l'usage/diagnostic .....	112
c. Identification des bonnes et mauvaises pratiques et proposition d'amélioration .....	113
d. Suivi de l'évolution de la performance environnementale .....	114
e. Retours aux concepteurs .....	114
4. <i>Conclusions</i> .....	114
<b>PARTIE 3 : APPLICATION AU CAS D'ÉTUDE</b> .....	<b>117</b>
<b>CHAPITRE 7. PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE</b> .....	<b>121</b>
1. <i>L'entreprise : Carrier Transcold</i> .....	121
a. Marché et flotte .....	121
b. La chaîne de valeur de l'entreprise .....	122
c. Objectifs et attentes de l'entreprise .....	123
2. <i>Les unités de réfrigération pour le transport routier</i> .....	125
a. La production de froid .....	125
b. Cas d'étude spécifique .....	126
<b>CHAPITRE 8. SÉLECTION DES IPE</b> .....	<b>127</b>
1. <i>Étape 1 : L'entreprise, le produit, l'environnement</i> .....	127
a. Analyse environnementale du produit .....	127
b. Des réglementations environnementales de plus en plus exigeantes .....	131
c. Les problématiques environnementales inhérentes au secteur d'activité .....	133
d. Maturité de l'entreprise .....	141
e. Stratégie de l'entreprise .....	143
f. Bilan .....	144
2. <i>Étapes 2 et 3 : Définition des acteurs et de leurs objectifs</i> .....	147
3. <i>Étape 4 : Sélection des IPE spécifiques</i> .....	150
4. <i>Étape 5 : Sélection des IPE globaux</i> .....	152
5. <i>Bilan de la sélection des IPE pour le cas d'étude</i> .....	156
<b>CHAPITRE 9. OUTILS MIS EN PLACE POUR AIDER À LA PRISE EN COMPTE DES IPE SUR TOUT LE CYCLE DE VIE</b> .....	<b>156</b>
1. <i>Standard d'exigences d'écoconception à destination des fournisseurs, associé à un format standard d'échange d'informations</i> .....	157

2.	<i>Fiche de déclaration environnementale produit</i> .....	158
3.	<i>Sensibilisation à l'écoconception et à l'analyse du cycle de vie (formation)</i> .....	158
4.	<i>Standard de travail pour les concepteurs, règles d'écoconception</i> .....	160
5.	<i>Base de données structurée des composants</i> .....	160
6.	<i>Guide démantèlement pour les unités de réfrigération en fin de vie</i> .....	160
7.	<i>Démonstrateur Excel de diagnostic et de suivi de l'usage en fonction des comportements de l'utilisateur</i> .....	161
8.	<i>Bilan</i> .....	161
<b>CHAPITRE 10. VERS UNE ÉCO-UTILISATION DES PRODUITS</b> .....		<b>162</b>
1.	<i>Collecte d'informations sur l'usage</i> .....	162
a.	<i>Collecte de données expérimentales</i> .....	164
b.	<i>Déclarations du client</i> .....	168
2.	<i>Diagnostic personnalisé</i> .....	172
3.	<i>Proposition d'amélioration comportement et/ou produit</i> .....	174
a.	<i>Recommandations sur le comportement</i> .....	174
b.	<i>Recommandations sur l'unité de réfrigération</i> .....	176
4.	<i>Évaluation et suivi des améliorations</i> .....	176
5.	<i>Retours sur l'utilisation aux concepteurs</i> .....	177
6.	<i>Avantage concurrentiel</i> .....	177
7.	<i>Bilan de la mise en place de l'éco-utilisation</i> .....	178
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....		<b>179</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....		<b>187</b>
<b>ANNEXES</b> .....		<b>203</b>
<b>ANNEXE 1 : EXTRAIT DE LA BASE DE DONNÉES DES IPE</b> .....		<b>205</b>
<b>ANNEXE 2 : RÉSULTATS D'ACV</b> .....		<b>207</b>
<b>ANNEXE 3 : RETOURS DE LA FORMATION ÉCOCONCEPTION/ACV</b> .....		<b>225</b>
<b>ANNEXE 4 : DÉTAILS DE LA RÉALISATION DES TESTS AVEC DEKRA</b> .....		<b>227</b>
<b>ANNEXE 5 : ANALYSE DES RÉSULTATS DES TESTS EXPÉRIMENTAUX</b> .....		<b>231</b>
<b>ANNEXE 6 : CALCULS DES IPE DU DÉMONSTRATEUR DE DIAGNOSTIC DE L'USAGE</b> .....		<b>237</b>
<b>ANNEXE 7 : LOGIQUE DE SÉLECTION DE L'UNITÉ DE RÉFRIGÉRATION LA PLUS ADÉQUATE</b> .....		<b>245</b>
<b>ANNEXE 8 : LISTE DES PUBLICATIONS</b> .....		<b>247</b>

# *Liste des figures*

<i>Figure [1] Processus de développement de produits inspiré de la norme ISO 9 001 (ISO 9001, 2015).....</i>	<i>23</i>
<i>Figure [2] Cycle de vie d'un produit dans le domaine de l'écoconception .....</i>	<i>24</i>
<i>Figure [3] Acteurs de la chaîne de valeur.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure [4] Les 3 composantes de la définition de la performance environnementale .....</i>	<i>26</i>
<i>Figure [5] Évolution du nombre d'outils d'écoconception recensés dans la littérature .....</i>	<i>27</i>
<i>Figure [6] Classification des outils d'écoconception.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure [7] Paradoxe d'écoconception (Bhandar, et al., 2003), (Poudelet, et al., 2012).....</i>	<i>29</i>
<i>Figure [8] Catégories des facteurs de succès à la mise en place de l'écoconception.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure [9] Exemples d'indicateurs issus du système Pression-Etat-Réponse (OECD, 2003).....</i>	<i>36</i>
<i>Figure [10] Méthode de la somme pondérée.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure [11] Échelle de comparaison pour la méthode d'analyse multicritère hiérarchique.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure [12] Méthode de surclassement.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure [13] Phase d'utilisation inspirée de Koskijoki, M. (1997) comme cité dans (Bhamra &amp; al. 2011).....</i>	<i>51</i>
<i>Figure [14] Sources d'Influences du comportement humain (Shu, et al., 2017).....</i>	<i>52</i>
<i>Figure [15] Sources influençant le comportement de l'utilisateur (Klößner &amp; Blöbaum, 2010).....</i>	<i>53</i>
<i>Figure [16] Liens entre comportements et stratégies de conception (Tang &amp; Bhamra, 2008).....</i>	<i>59</i>
<i>Figure [17] Récapitulatif des 3 challenges définis dans l'état de l'art, pour avoir une démarche d'écoconception efficace.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure [18] Méthodologie de thèse.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure [19] Méthode proposée de sélection des IPE.....</i>	<i>70</i>
<i>Figure [20] Étape 1 : connaître son produit et son contexte environnemental.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure [21] Exemples de définition d'un IPE à partir de la définition d'un aspect et objectif environnemental.....</i>	<i>72</i>
<i>Figure [22] Exemples de définition des acteurs de la chaîne de valeur importants à impliquer dans le processus d'écoconception.....</i>	<i>72</i>
<i>Figure [23] Processus d'état des lieux de la maturité de l'entreprise à la démarche d'écoconception.....</i>	<i>75</i>

<i>Figure [24] Exemples d'interactions entre les acteurs internes à l'entreprise de la chaîne de valeur et exemples d'informations échangées</i> .....	77
<i>Figure [25] Exemples d'interactions entre les acteurs externes et les acteurs internes à l'entreprise et exemples d'informations échangées</i> .....	78
<i>Figure [26] Exemples pour remplir une matrice SWOT</i> .....	79
<i>Figure [27] Logigramme de fonctionnement de l'outil de sélection des IPE</i> .....	88
<i>Figure [28] Capture d'image de l'outil de sélection des IPE : choix des acteurs de la chaîne de valeur</i> .....	88
<i>Figure [29] Capture d'image de l'outil de sélection des IPE : sélection des objectifs (intérêts)</i> .....	89
<i>Figure [30] Capture d'image de l'outil de sélection des IPE : Sélection des étapes du cycle de vie et des objectifs environnementaux</i> .....	90
<i>Figure [31] Exemples de résultats de la sélection des IPE selon un acteur (a) ou un intérêt (b)</i> .....	91
<i>Figure [32] Étape 4 : Exemples d'IPE spécifiques pour quelques acteurs lorsque l'objectif environnemental est la réduction de la consommation d'énergie</i> .....	91
<i>Figure [33] Étape 5 : Exemple de corrélation des indicateurs spécifiques à chaque acteur en un indicateur global</i> .....	94
<i>Figure [34] Synthèse de la méthode de sélection des IPE</i> .....	98
<i>Figure [35] Boucles de sélection de stratégies d'écoconception</i> .....	100
<i>Figure [36] Capture d'image de l'outil de proposition de stratégies d'écoconception</i> .....	101
<i>Figure [37] Intégration de la phase d'usage dans la chaîne de valeur</i> .....	104
<i>Figure [38] Infographie sur l'économie de la fonctionnalité et ses différents niveaux tel que proposé par (Plan C, s.d.)</i> .....	108
<i>Figure [39] Méthodologie pour une utilisation éco-responsable des produits avec un avantage concurrentiel</i> .....	109
<i>Figure [40] Comparaison des méthodes de collecte de données sur l'usage</i> .....	110
<i>Figure [41] Exemple d'un tableau de bord pour le diagnostic d'usage</i> .....	112
<i>Figure [42] Coût total de possession avant et après proposition d'un service d'accompagnement</i> .....	114
<i>Figure [43] Exemple d'un système de transport routier à température dirigée (cas d'un porteur rigide)</i> .....	121
<i>Figure [44] Segmentation du transport frigorifique en service, en France, en 2012 (Michineau, et al., 2014a)</i> .....	122
<i>Figure [45] L'entreprise dans la chaîne de valeur du produit et le périmètre qu'elle maîtrise</i> .....	124

<i>Figure [46] Fonctionnement d'un système à compression de vapeur à expansion directe</i>	125
<i>Figure [47] Produit spécifique au cas d'étude (Carrier Transicold Industries)</i>	126
<i>Figure [48] Exemple d'un système transport routier à température dirigée (cas d'une semi-remorque)</i>	126
<i>Figure [49] Types de cycle de livraison</i>	129
<i>Figure [50] Réglementations environnementales applicables au transport routier à température dirigée en 2017</i>	132
<i>Figure [51] Test ATP conditionnant la durée de vie moyenne d'utilisation d'un groupe froid</i>	135
<i>Figure [52] Réseau représentant les paramètres influant sur la consommation énergétique (les bulles grises montrent les choix de l'utilisateur)</i>	137
<i>Figure [53] Matrice SWOT d'identification des freins et leviers d'actions pour l'entreprise</i>	142
<i>Figure [54] Outils développés et mis en place chez Carrier Transicold et liens avec les acteurs de la chaîne de valeur</i>	157
<i>Figure [55] Programme de la formation en écoconception/ACV</i>	159
<i>Figure [56] Répartition des employés des différents services sensibilisés à l'écoconception/ACV</i>	159
<i>Figure [57] Déclarations du client sur son type d'activité</i>	168
<i>Figure [58] Cycles de livraison prédéfinis dans l'outil</i>	170
<i>Figure [59] Questionnaire sur les comportements de l'utilisateur</i>	171
<i>Figure [60] Exemple de diagnostic personnalisé</i>	173
<i>Figure [61] Exemple de recommandations sur le comportement de l'utilisateur</i>	175
<i>Figure [62] Exemple de recommandation adéquation produit/usage</i>	176



# Liste des tableaux

<i>Tableau [1] Catégories et facteurs de succès à la mise en place de l'écoconception.....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau [2] Comparaison des méthodes de sélection des indicateurs existantes .....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau [3] Avantages et inconvénients des méthodes d'analyse multicritère existantes (Velasquez &amp; Hester, 2013).....</i>	<i>47</i>
<i>Tableau [4] Acteurs internes à l'entreprise et leurs besoins en IPE.....</i>	<i>84</i>
<i>Tableau [5] Acteurs externes à l'entreprise et leurs besoins pour les IPE .....</i>	<i>85</i>
<i>Tableau [6] Objectifs environnementaux par étape du cycle de vie pour la sélection des IPE.....</i>	<i>87</i>
<i>Tableau [7] Evaluation des acteurs pour la sélection des jeux d'IPE globaux .....</i>	<i>93</i>
<i>Tableau [8] Potentiel d'accompagnement de l'utilisateur et d'avantage concurrentiel en fonction des stratégies d'utilisation pour un comportement éco-responsable.....</i>	<i>106</i>
<i>Tableau [9] Caractéristiques techniques des produits de la gamme des semi-remorques (Vector) pour le cas d'étude (Carrier Transicold, 2017).....</i>	<i>127</i>
<i>Tableau [10] Mode d'utilisation des systèmes frigorifiques pour le transport routier.....</i>	<i>130</i>
<i>Tableau [11] Bilan de l'étape 1 : aspects environnementaux à considérer pour la sélection des IPE et la définition des stratégies d'écoconception .....</i>	<i>145</i>
<i>Tableau [12] Définition des objectifs environnementaux à partir de l'identification des aspects environnementaux .....</i>	<i>146</i>
<i>Tableau [13] Définition des rôles et de l'importance des acteurs internes pour l'amélioration de la performance environnementale du produit en phase d'usage .....</i>	<i>148</i>
<i>Tableau [14] Définition des liens avec l'usage et de l'importance des acteurs externes pour l'amélioration de la performance environnementale du produit en phase d'usage.....</i>	<i>149</i>
<i>Tableau [15] Besoins et objectifs des acteurs clés pour la sélection des IPE.....</i>	<i>150</i>
<i>Tableau [16] Jeux d'IPE spécifiques pour chacun des acteurs clés par rapport aux objectifs environnementaux.....</i>	<i>151</i>
<i>Tableau [17] Répartition des acteurs et de leurs IPE dans les jeux d'IPE globaux.....</i>	<i>153</i>
<i>Tableau [18] Corrélation des IPE spécifiques pour le jeu d'IPE global pour le développement de produits.....</i>	<i>154</i>
<i>Tableau [19] Corrélation des IPE spécifiques pour le jeu d'IPE global pour le management et la communication.....</i>	<i>155</i>
<i>Tableau [20] Jeux d'IPE globaux pour l'entreprise .....</i>	<i>156</i>
<i>Tableau [21] Avantages et inconvénients des sources de données pour la collecte des données sur les fonctionnements des unités de réfrigération .....</i>	<i>163</i>

*Tableau [22] Liste des comportements analysés par les expérimentations ..... 166*  
*Table 23 Specifications of TRU (data from Carrier Transicold)..... 209*

# INTRODUCTION



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les entreprises sont des acteurs majeurs de la société, elles contribuent à son développement. Leurs actions ont des conséquences bénéfiques ou non sur cette dernière. Bien que du point de vue purement des économistes, elles aient pour objectif principal de maximiser leurs profits, elles doivent aussi participer au bien commun.

Depuis le début de l'ère industrielle, les entreprises ne cessent d'évoluer et intègrent de plus en plus d'aspects dans leur développement de produits : la réduction des coûts, l'augmentation de la qualité et de la satisfaction du client, l'innovation, l'intégration dans l'ère numérique, etc. Les entreprises font aujourd'hui face à une demande croissante des différentes parties prenantes concernant leur performance environnementale, par exemple des demandes des clients, des exigences des politiques au travers des réglementations ou encore des attentes de la société. En effet, l'environnement est, depuis quelques décennies, devenu un enjeu majeur de notre société et notamment les conséquences de nos activités sur ce dernier. Les entreprises ont dû et doivent encore trouver des solutions pour prendre en compte cette dimension, et satisfaire aux attentes de la société et de leurs clients. La satisfaction de ces demandes passe notamment par une bonne gestion de la performance, dans ce cas précis, de la performance environnementale.

Ces travaux de thèse sont développés pour des entreprises, en BtoB (Business to Business), mettant sur le marché des produits consommateurs d'énergie et qui souhaitent en améliorer leur performance environnementale. Pour ces produits, la phase d'utilisation est un aspect environnemental important à gérer. La consommation d'énergie est une problématique majeure due notamment à l'appauvrissement des réserves fossiles et aux émissions polluantes. Ces impacts peuvent être, par exemple, réduits en changeant la source d'énergie ou en diminuant la demande en énergie. La consommation énergétique peut être fortement influencée par les paramètres intrinsèques et extrinsèques du produit. Ces travaux s'appliquent plus particulièrement au produit à durée de vie longue (de l'ordre de 10 à 20 ans) et dont certains paramètres d'utilisation sont capables d'évoluer de manière dynamique.

De nombreux travaux ont déjà été menés sur la mise en place d'une démarche d'écoconception pour tous types de produits et de nombreux outils d'évaluation et d'amélioration ont été développés. L'usage réel des produits et ses répercussions sur la performance environnementale globale sont généralement peu abordés. Cette étape du cycle de vie est souvent prise en compte avec un scénario moyen devant s'adapter à toutes les situations d'usage. Or, pour certains produits, le scénario d'usage peut faire varier de manière importante la performance environnementale. Il est donc nécessaire d'évaluer cette performance environnementale et de s'en servir pour mettre en place des stratégies d'éco-utilisation. Le premier challenge consiste à définir le moyen le plus adéquat pour que l'entreprise puisse évaluer sa performance environnementale et trouver des solutions d'écoconception, tout en augmentant sa valeur.

L'emploi d'Indicateurs de Performance Environnementale (IPE) est un bon moyen pour échanger de l'information, évaluer et suivre la performance environnementale, et aider au

choix des stratégies d'amélioration. Ces observations nous amènent à nous poser la problématique principale à laquelle ces travaux veulent répondre : « comment l'analyse de la performance environnementale, au travers de la chaîne de valeur, peut-elle influencer la conception, et inciter aux bonnes pratiques d'utilisation des produits ? »

La bonne sélection des IPE est un facteur de succès à la mise en place d'une démarche d'écoconception. Au travers de l'analyse de la littérature présentée dans ce mémoire de thèse, un constat a été établi : ces indicateurs doivent être adaptés aux acteurs de la chaîne de valeur susceptibles d'être impliqués dans l'amélioration de la performance environnementale pour qu'ils soient efficaces. Cela signifie qu'ils doivent être adaptés aux différents acteurs internes à l'entreprise (décideurs, marketing, R&D, ingénierie, achats, etc.), mais aussi aux acteurs externes (fournisseurs, utilisateurs, acteurs des filières de fin de vie, etc.). Ces différents acteurs ont des besoins différents en matière d'information (détails, type) qui peuvent être contradictoires. Les méthodes de sélection existantes préconisent toutes de sélectionner un jeu d'indicateurs répondant à tous les objectifs environnementaux et à tous les besoins. Mais, aucune des méthodes ne propose de vraie solution pour choisir des indicateurs en fonction des différents besoins des divers acteurs de la chaîne de valeur.

Le second challenge repose donc sur la sélection des IPE. La sélection doit être orientée vers le développement de produits, permettre de prendre en compte tout le cycle de vie du produit et prendre en considération tous les acteurs de la chaîne de valeur. Elle permet de renforcer l'échange d'informations entre les différents acteurs, dans l'objectif d'améliorer la performance environnementale globale du produit. Ainsi, une problématique sous-jacente découle de la première problématique : « comment sélectionner des IPE pour suivre l'évolution des performances environnementales en prenant en compte les acteurs de la chaîne de valeur ? »

Cette problématique conduit à définir une nouvelle méthode de sélection des IPE en 5 étapes (détails dans le chapitre 5 et application au cas industriel dans le chapitre 8) :

1. un état des lieux du contexte environnemental du produit et de l'entreprise ;
2. la définition des acteurs de la chaîne de valeur impliqués ;
3. la définition de leurs besoins ;
4. la sélection d'un jeu d'IPE spécifique pour chaque acteur ;
5. la corrélation de ces jeux d'IPE en deux jeux globaux d'IPE : 1 pour l'amélioration des produits et 1 pour le management et la communication.

Une fois les IPE définis, ils doivent permettre d'évaluer la situation et de définir des stratégies d'écoconception. Les différents acteurs de la chaîne de valeur peuvent avoir une influence sur la performance environnementale, il faut les intégrer dans le développement de produits et dans la phase d'utilisation. Le troisième challenge, pour les entreprises mettant sur le marché des produits consommateurs d'énergie, concerne l'emploi d'indicateurs de performances environnementales judicieusement choisis pour : 1) améliorer la performance environnementale globale du produit dans une démarche d'écoconception et 2) communiquer avec l'utilisateur final du produit afin d'induire un

comportement environnemental éco-responsable en phase d'utilisation. Un focus est fait sur la mise en place de stratégies d'éco-utilisation (utilisation éco-responsable). Une entreprise ayant pour objectif majeur de faire du profit, il est nécessaire que les stratégies mises en place soient dans un objectif gagnant-gagnant pour l'entreprise et le client. Le client diminue ses impacts environnementaux et l'entreprise prend un avantage concurrentiel tout en améliorant la performance environnementale de ses produits. Ainsi, une deuxième problématique sous-jacente est définie : « comment exploiter les IPE en écoconception pour inciter à l'éco-utilisation des produits et servir d'avantage concurrentiel pour l'entreprise ? »

Dans ces travaux, cela se traduit par :

- l'adaptation d'outils d'écoconception existants pour l'intégration des acteurs de la chaîne de valeur dans la phase d'usage (détails au chapitre 6 et application au cas d'étude au chapitre 9) ;
- la définition d'une méthode pour un accompagnement personnalisé du client à l'usage des produits (détails au chapitre 6 et application au cas d'étude au chapitre 9).

Il s'agit, dans un premier temps, de collecter des données pour comprendre et maîtriser la phase d'usage. Une analyse est ensuite réalisée pour identifier les bonnes et mauvaises pratiques d'usage. Enfin, un accompagnement est proposé avec un suivi des gains obtenus au travers d'IPE. La compréhension de l'usage réel permet aussi à l'entreprise de collecter des données et d'améliorer la conception de ses produits.

Cette méthode a été appliquée et validée sur le cas d'étude des unités de réfrigération pour le transport routier, en partenariat avec l'entreprise Carrier Transicold. Il s'agit de produits avec une durée de vie relativement longue (plus d'une dizaine d'années), et dont la spécificité est qu'ils ne peuvent pas remplir seuls leur fonction. Ils doivent s'intégrer dans un système composé du véhicule (pour le déplacement) et de la caisse isotherme (pour le stockage des marchandises). Les aspects environnementaux majeurs de ses produits sont principalement présents en phase d'utilisation. Il s'agit de la consommation d'énergie fossile et des potentielles fuites de réfrigérant. Cependant, si ces dernières sont contrôlées, la consommation d'énergie fossile pour faire fonctionner le système devient la source majeure des impacts environnementaux sur tout le cycle de vie du produit. Cette consommation énergétique est dépendante de nombreux paramètres pas tous maîtrisés par Carrier Transicold, par exemple, le climat extérieur, l'isolation de la caisse isotherme, les équipements choisis par le client (rideaux au niveau des ouvertures, paroi amovible pour réduire le volume à réfrigérer, etc.) et les comportements des utilisateurs finals (les chauffeurs routiers). Ces comportements peuvent concerner le choix du mode de fonctionnement, le réglage de la température de consigne, l'arrêt ou non du système de réfrigération lors de l'ouverture des portes, etc. L'entreprise souhaite améliorer la performance environnementale de ses produits sur tout le cycle de vie et notamment en phase d'utilisation. Elle souhaite pouvoir accompagner ses clients dans une démarche d'éco-utilisation. Elle souhaite également agir sur les autres phases du cycle de vie en amont et en aval en interagissant avec ses fournisseurs et en améliorant la conception même de ses produits au travers de la mise

en place d'une démarche d'écoconception dans son processus de développement de produits.

Ces travaux apporteront des réponses pour relever les différents challenges et combler les manques identifiés.

Pour des raisons de praticité par rapport à l'entreprise (possibilité d'extraire et partager facilement tout ce qui se rapporte au cas industriel), le cas d'étude sera introduit et développé dans la troisième partie de ce mémoire. Les deux premières parties sont consacrées à l'analyse de l'existant et à la méthodologie mise en place pour répondre aux problématiques posées.

# PARTIE 1 : CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUES

Cette première partie a pour objectif de positionner le sujet de cette thèse dans son contexte, et de présenter la méthodologie utilisée pour répondre aux problématiques qui en découlent. Elle est construite en deux chapitres. Le premier présente l'état de l'art et les challenges à relever. Le second expose les problématiques et la méthodologie générale mise en place dans le cadre de ces travaux.



<b>CHAPITRE 1. PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT DANS LE DEVELOPPEMENT DE PRODUITS.....</b>	<b>23</b>
1. <i>Environnement et développement de produits.....</i>	23
2. <i>Evaluation de la performance.....</i>	26
3. <i>Outils d'écoconception existants .....</i>	27
4. <i>Facteurs de succès d'une démarche d'écoconception en entreprise .....</i>	31
5. <i>Bilan .....</i>	33
<b>CHAPITRE 2. MISE EN PLACE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE .....</b>	<b>33</b>
1. <i>Qu'est-ce qu'un indicateur ?.....</i>	33
2. <i>Les indicateurs de performance environnementale.....</i>	34
3. <i>Les types d'indicateurs de performance environnementale .....</i>	35
4. <i>Sélection des indicateurs de performance environnementale .....</i>	37
a. <i>Critères de sélection des indicateurs.....</i>	38
b. <i>Méthodes de sélection des IPE existantes.....</i>	39
c. <i>Bilan des méthodes de sélection des IPE.....</i>	43
5. <i>Gestion du multicritère et aide à la décision.....</i>	43
a. <i>Gestion du multicritère.....</i>	44
b. <i>Méthodes d'analyse multicritère.....</i>	44
c. <i>Conclusions sur la gestion du multicritère.....</i>	47
6. <i>Bilan .....</i>	48
<b>CHAPITRE 3. INTEGRATION DES ACTEURS DE LA CHAINE DE VALEUR POUR L'AMELIORATION DE LA PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE .....</b>	<b>48</b>
1. <i>Intégration des fournisseurs .....</i>	49
2. <i>Intégration des clients / utilisateurs .....</i>	50
a. <i>Produits consommateurs d'énergie et utilisation .....</i>	50
b. <i>Modélisation de la phase d'utilisation .....</i>	51
c. <i>Stratégies d'éco-utilisation .....</i>	53
d. <i>La conception pour un comportement éco-responsable .....</i>	55
3. <i>Bilan .....</i>	60
<b>CHAPITRE 4. PROBLEMATIQUES ET METHODOLOGIE .....</b>	<b>61</b>
1. <i>Définition des problématiques de thèse .....</i>	61
2. <i>Méthodologie opérationnelle, présentation globale .....</i>	63

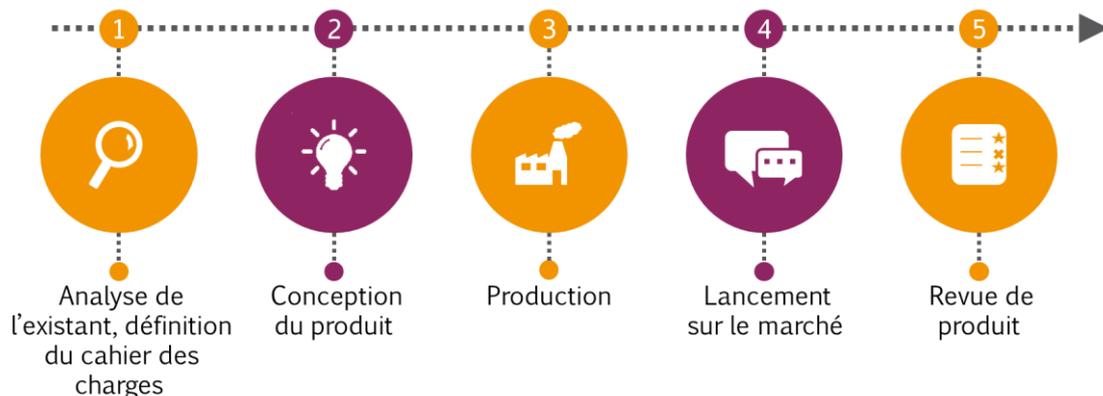
# Chapitre 1. Prise en compte de l'environnement dans le développement de produits

Ce chapitre présente de manière synthétique le contexte général dans lequel s'inscrivent ces travaux, et les différents challenges à relever. Il présente notamment l'écoconception, la place des Indicateurs de Performance Environnementale (IPE) et la prise en compte de la chaîne de valeur dans l'amélioration environnementale des produits. Au vu du cas d'étude industriel sur lequel s'appuient ces travaux, les unités de réfrigération pour le transport routier (cf. partie 3), nous nous intéressons plus particulièrement aux produits consommateurs d'énergie. La majorité des problématiques environnementales (c'est-à-dire des opportunités d'actions) de ces produits étant liée à la phase d'usage, un focus est fait sur l'intégration de l'écoconception dans cette phase du cycle de vie.



## 1. Environnement et développement de produits

De manière générale, le développement de produits industriels se compose de 5 étapes principales (figure 1) : l'analyse de l'existant et la définition du cahier des charges, la conception, la production, le lancement sur le marché et la revue de produit (ISO 9001, 2015).



**Figure [1]** Processus de développement de produits inspiré de la norme ISO 9 001 (ISO 9001, 2015)

De ces 5 étapes, la phase de conception est considérée comme la plus importante pour réduire les impacts environnementaux, car elle offre le plus grand degré de flexibilité pour des modifications avec un coût minimum (Wagner, et al., 2016). De plus en plus d'entreprises prennent donc en compte les problématiques environnementales dès les premières phases du développement de leurs produits, et adoptent une nouvelle approche de conception. On parle d'écoconception ou de conception pour l'environnement.

Le processus d'écoconception est principalement décrit dans la norme ISO 14 062 (ISO 14062, 2002). Il repose sur plusieurs principes qui sont :

- l'intégration au plus tôt des aspects environnementaux dans le développement de produits ;

- la prise en compte de la globalité du cycle de vie du produit ;
- la prise en compte de tous les aspects et impacts environnementaux et leur évaluation ;
- l'intégration de tous les acteurs internes et externes à l'entreprise de la chaîne de valeur ;
- la garantie de la fonctionnalité ;
- et, le compromis pour arriver à un objectif gagnant-gagnant entre les différents axes du développement de produits (le coût, la qualité, la faisabilité technique et l'environnement).

Lors de la mise en place d'une démarche d'écoconception, toutes les étapes du cycle de vie du produit, ou service, doivent être prises en compte : l'extraction des matières premières et leur transformation, la conception, la fabrication des composants et du produit, les phases de transport en amont et en aval, la phase de vente, la phase d'usage et le traitement en fin de vie. Tous les intrants et sortants de ce cycle de vie doivent être considérés, principalement les matières premières, les consommables, l'énergie, les émissions dans l'air, l'eau, le sol et la génération de déchets (figure 2).



Figure [2] Cycle de vie d'un produit dans le domaine de l'écoconception

Selon Porter (1985), la chaîne de valeur se définit comme étant l'ensemble des activités de l'entreprise et les services supports à l'entreprise apportant une valeur ajoutée et un avantage concurrentiel. Les activités de l'entreprise sont : la conception, la fabrication, la commercialisation, la distribution, le soutien au produit (dont les services d'installation, de maintenance, de réparation, de mise à disposition de pièces détachées, etc.). Les

services support sont la chaîne d'approvisionnement, la finance, le service R&D, les ressources humaines, l'infrastructure (Porter, 1985). L'entreprise est associée à une chaîne de valeur et chaque acteur externe à sa propre chaîne de valeur (Porter, 1985). Cependant, la définition de Porter reste centrée sur les activités de l'entreprise. Plus généralement, la chaîne de valeur se définit comme toutes les activités nécessaires pour amener un produit de sa conception, en passant par les phases de production, jusqu'au consommateur final et au traitement en fin de vie après utilisation (Kaplinsky & Morris, 2002). Cela correspond au cycle de vie défini précédemment.

La chaîne de valeur d'un produit est composée de différents acteurs dont les actions apportent de la valeur. La figure 3 recense ces différents acteurs.

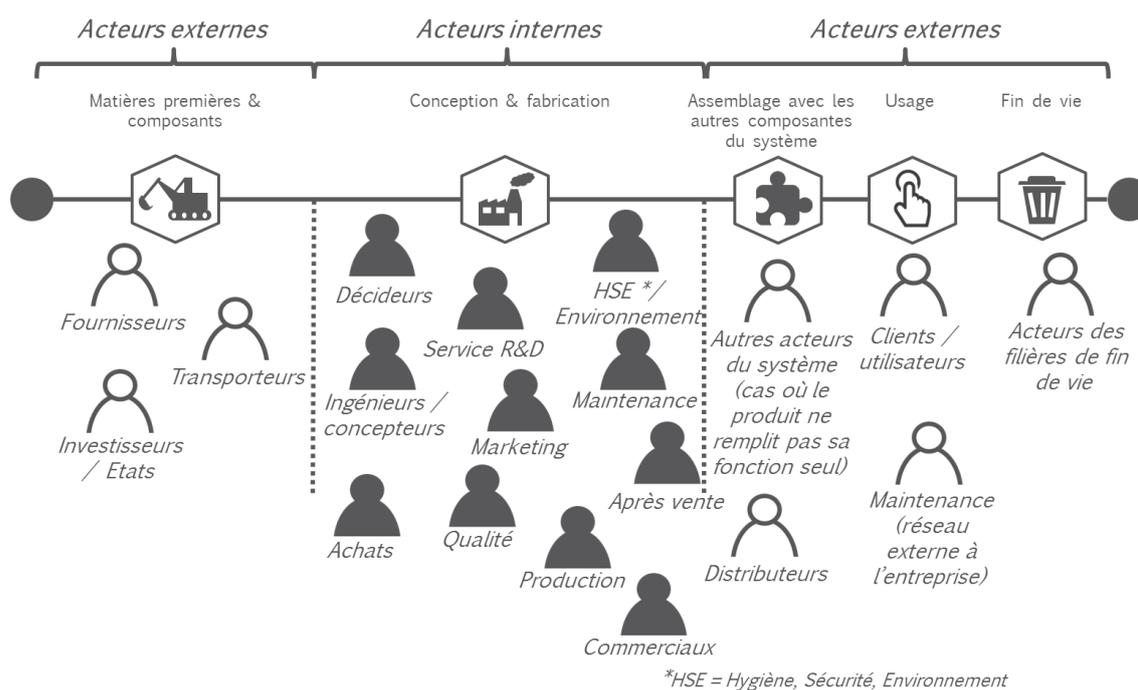


Figure [3] Acteurs de la chaîne de valeur

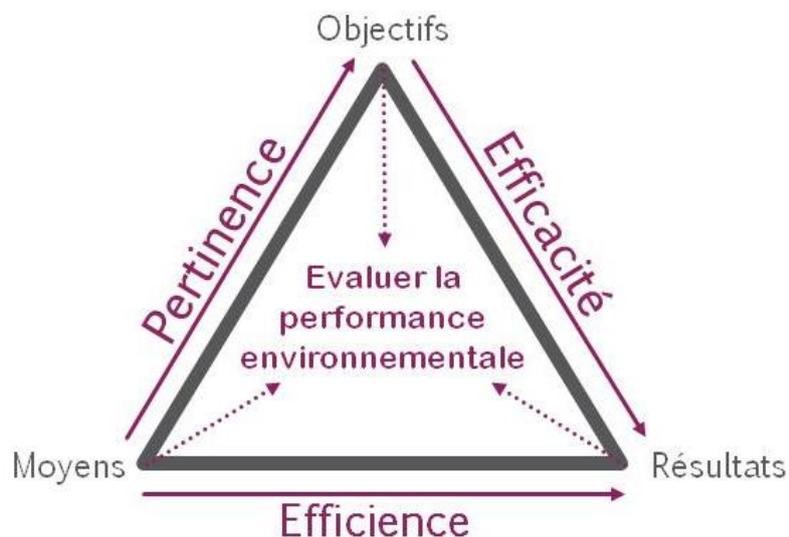
Parmi les acteurs de la chaîne de valeur, on retrouve les acteurs habituels internes à l'entreprise et les acteurs externes. Parmi les acteurs externes, il est possible de noter la présence des « autres acteurs du système ». Il s'agit d'autres entreprises mettant sur le marché une partie d'un système global. Cela s'applique pour les produits ne pouvant pas rendre seuls leur fonction comme dans notre cas d'étude (cf. page 121). Pour les acteurs de la maintenance, ils peuvent être internes à l'entreprise ou externes (franchisés par exemple). Pour la phase d'utilisation, il est possible de distinguer deux acteurs, le client qui achète le produit et l'utilisateur qui utilise effectivement le produit. Dans la majorité des cas en BtoC (Business to Consumer), il s'agit du même acteur. Cela n'est souvent pas le cas en BtoB.

L'écoconception repose donc sur l'évaluation de la performance environnementale au travers de la chaîne de valeur du produit et de toutes ses étapes du cycle de vie, et la mise en place de solutions pour l'améliorer.

L'intérêt principal de considérer toutes les étapes du cycle de vie et tous les acteurs de la chaîne de valeur est pour éviter ce que l'on appelle les transferts de pollution, d'une étape du cycle de vie à une autre ou d'un impact environnemental à un autre. L'évaluation de la performance environnementale permet de s'assurer qu'il n'y a pas de transferts de pollution ou si cela n'est pas possible les évaluer pour aider au choix à la décision.

## 2. Evaluation de la performance

L'évaluation de la performance se définit comme le processus de quantification de l'efficacité et de l'efficacités (Neely, et al., 2005)<sup>1</sup>. À ces deux composantes, on peut ajouter la pertinence (Marques, et al., 2010). L'efficacité mesure si les ressources ont bien été utilisées pour atteindre les résultats (Marques, et al., 2010). L'efficacités permet de mesurer si les résultats sont en accord avec les objectifs, et la pertinence mesure l'adéquation entre les moyens et les objectifs (Marques, et al., 2010). La mesure de la performance est donc fonction des objectifs, des résultats et des moyens (figure 4).



**Figure [4]** Les 3 composantes de la définition de la performance environnementale

Il s'agit d'un outil de prise de décision permettant de concevoir et/ou modifier un système, ou de contrôler un système existant (Marques, et al., 2010).

La performance est un moyen utilisé pour quantifier ces 3 composantes (Neely, et al., 2005), à l'aide d'indicateurs.

Il est difficile de définir un seul indicateur de performance qui répond à tous les besoins et qui permet toutes les prises de décisions, il est nécessaire d'avoir un jeu pertinent d'indicateurs (Marques, et al., 2010). On parle d'un système de mesure de la performance (Neely, et al., 2005). Pour aider à la décision, la définition d'un indicateur

---

<sup>1</sup> Cet article a été publié à l'origine, en 1995, dans le Journal International of Operations & Production Management Vol 15, Issue 4, pp 80-116. Il s'agit d'une réédition, dans le même journal.

de performance agrégé pour chaque partie prenante est un facteur important (Marques, et al., 2010). La mesure de la performance environnementale doit donc être adaptée et spécifique à chaque partie prenante concernée par celle-ci.

Il existe de nombreux outils pour évaluer la performance environnementale et orienter vers des stratégies d'écoconception. Ils sont présentés dans le paragraphe suivant.

### 3. Outils d'écoconception existants

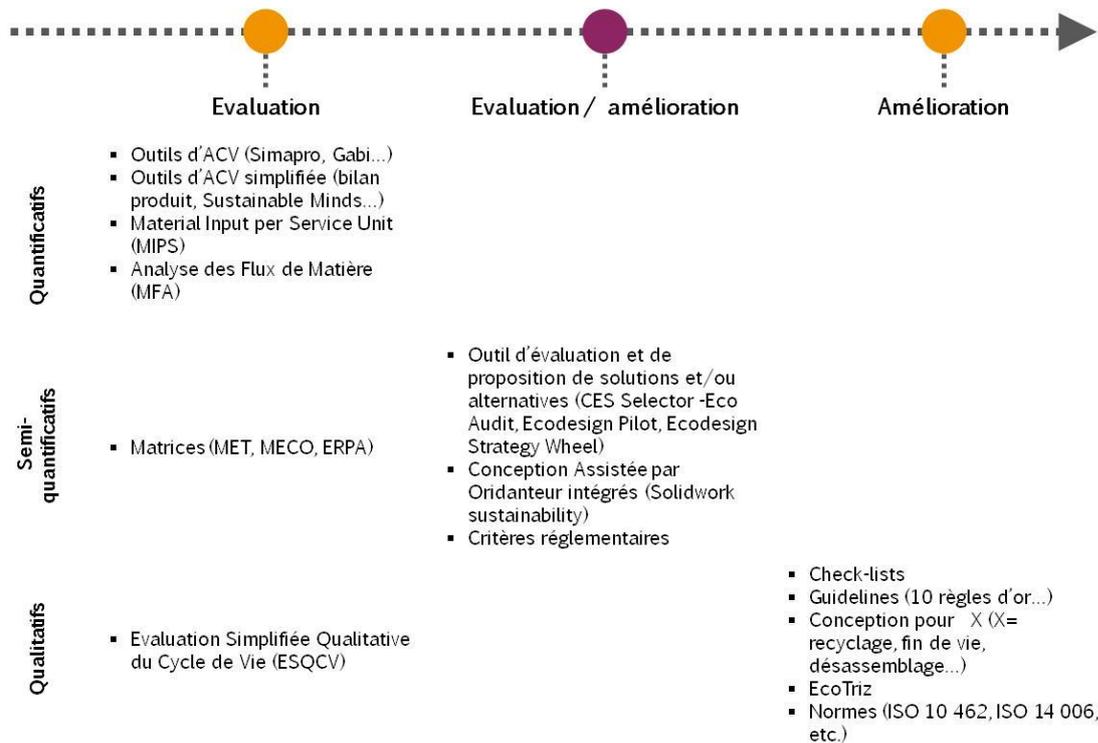
Le nombre d'outils d'écoconception recensés ne cesse d'augmenter au cours des années (figure 5). Il n'existe pas de définition standard d'un outil d'écoconception. En 2002, plus de 150 outils ont été identifiés dans la littérature (Baumann, et al., 2002). En 2015, ce sont 350 outils et méthodes qui ont été identifiés (Pigosso, et al., 2015). Pour ces deux analyses, un outil d'écoconception a été défini comme étant tout regroupement de moyens systématiques pour traiter les problématiques environnementales dans le développement de produits (Baumann, et al., 2002). On trouve des standards-cadres, des checklists, des lignes directrices (guidelines), des outils de classement et de notation, des outils analytiques, des logiciels et des systèmes experts et des outils organisationnels. En 2017, cette définition a été élargie et a permis d'intégrer plus d'outils qui peuvent se trouver généralement en dehors des outils des concepteurs. (Rousseaux, et al., 2017). Un outil d'écoconception est ainsi défini comme toute méthode ou procédure rationnelle visant à intégrer l'environnement dans la conception d'un système (produits, services et sites industriels) (Rousseaux, et al., 2017). On retrouve donc, en 2017, pas moins de 629 outils recensés (Rousseaux, et al., 2017). Ces outils intègrent notamment des réglementations, des méthodes scientifiques, des guides de communication, etc. pouvant être utilisés par toutes les fonctions et départements d'une entreprise.



**Figure [5]** Évolution du nombre d'outils d'écoconception recensés dans la littérature

Ces outils peuvent être classés suivant différentes caractéristiques : leur caractère qualitatif ou quantitatif, leur capacité à évaluer ou améliorer le produit, et l'étape à laquelle ils peuvent être utilisés dans le processus de développement de produits. Certains outils sont utilisables tôt par les concepteurs (comme les check-lists et guidelines qui sont des outils d'amélioration) alors que d'autres, comme l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) (outil d'évaluation), seront utilisés plus en aval, lorsque le produit est déjà bien défini, pour valider les choix opérés.

On retrouve des classifications de ces outils dans plusieurs travaux scientifiques, par exemple (Janin, 2000), (Baumann, et al., 2002), (Knight & Jenkins, 2009), (Bovea & Perez-Belis, 2012), (Pigosso, et al., 2015), (Rossi, et al., 2016), (Rousseaux, et al., 2017). La figure 6 propose une classification résumée des types d'outils, en fonction de leur capacité à évaluer ou à améliorer les performances environnementales de manière quantitative ou qualitative, basée sur les travaux cités précédemment. Les outils d'évaluation reposent principalement sur des IPE.



**Figure [6]** Classification des outils d'écoconception

Malgré cette profusion d'outils, pour les services de développement de produits (notamment pour les concepteurs), ils ne montrent pas suffisamment comment écoconcevoir (comment évaluer et améliorer) (Lofthouse, 2006). Ils sont soit trop généralistes, soit justes pour réaliser une évaluation, soit trop complexes à utiliser. Par exemple, les check-lists sont trop générales et/ou sont associées comme étant des listes supplémentaires de contraintes à prendre en compte.

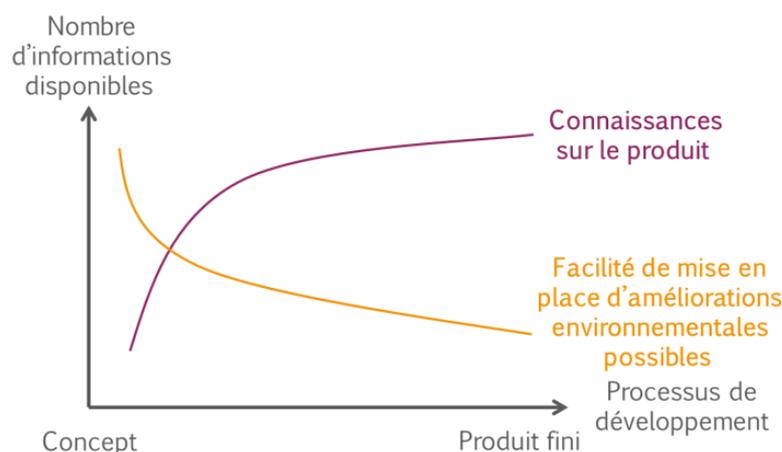
Pour réaliser l'évaluation de la performance environnementale du produit (aspect important du processus d'écoconception), l'outil le plus utilisé et considéré comme le plus robuste est l'ACV. Sa méthodologie est notamment décrite dans les normes internationales ISO 14 040 et ISO 14 044 et dans le guide européen pour l'ACV de l'ILCD (International Reference Life Cycle Data system) (ISO 14040, 2006), (ISO 14044, 2006), (European Commission, et al., 2010). Il existe de nombreux freins à l'utilisation de l'ACV par les concepteurs (Bhander, et al., 2003), dont :

- l'aspect chronophage ;
- la difficulté à être utilisée par les différents acteurs impliqués dans le développement de produits ;

- l'influence possible sur les résultats de la non-maîtrise des frontières du système ;
- le manque de dynamisme de l'analyse ;
- la communication difficile des résultats aux parties prenantes (fournisseurs, utilisateurs, etc.), car ils sont peu accessibles et compréhensibles par les non-initiés ;
- les aspects de confidentialité dans l'échange des données.

Cet outil est plus un outil d'expert du domaine qu'un outil pour les concepteurs (Millet, et al., 2005). L'ACV simplifiée permet de rendre plus accessible cet outil aux utilisateurs n'étant pas des experts du domaine. Mais, comme tous les outils visant à simplifier l'évaluation environnementale, elle peut conduire à une mauvaise interprétation des résultats et une perte d'informations, soit par la non-prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie. Cela est dû soit par le manque d'échanges aisés d'informations entre les différents outils et acteurs.

L'ACV n'est pas idéale pour les premières phases du développement de produits. Or, la majorité des impacts environnementaux est fixée dès ces premières phases, lors de la définition des concepts. À ce stade, peu de données sont disponibles, alors que pour réaliser l'analyse des performances environnementales, il est nécessaire d'avoir un grand nombre de données sur tout le cycle de vie. C'est ce que l'on appelle le paradoxe de l'écoconception (figure 7) (Bhander, et al., 2003), (Poudelet, et al., 2012). Ce paradoxe est directement inspiré du paradoxe de Ullman sur le développement de produits : « *Le paradoxe de la conception : plus vous en apprenez, moins vous avez de liberté pour utiliser ce que vous connaissez* »<sup>2</sup> (Ullman, 1992). Ce paradoxe peut aussi être mis en parallèle avec l'engagement des coûts dont 70 % sont fixés dès les premières phases du développement de produits (National Research Council, 1991).



**Figure [7]** Paradoxe d'écoconception (Bhander, et al., 2003), (Poudelet, et al., 2012)

Les besoins des concepteurs en matière d'outils d'écoconception ont déjà été étudiés (Lofthouse, 2006). Ils souhaitent :

<sup>2</sup> Traduit de l'anglais "A design paradox: The more you learn the less freedom you have to use what you know" (Ullman, 1992).

- une liste courte et efficace des problématiques environnementales en lien avec leur propre travail (spécialité) et liées à leurs produits ;
- des cibles simples pour réduire le nombre d'éléments auxquels ils doivent penser ;
- un outil qui combine guidage, information et éducation, avec des exemples d'écoconception et des informations spécifiques à leurs problématiques ;
- une communication très visuelle des informations et sans langage scientifique, donc adaptée à leurs connaissances et/ou compétences ;
- une utilisation individuelle sans brainstorming pour trouver des solutions d'écoconception.

Au vu des besoins exprimés par les concepteurs et des difficultés d'évaluation de la performance environnementale, il paraît nécessaire de combiner différents outils d'écoconception (évaluation et amélioration) de manière simple. Or, ces outils demandent des données d'entrée différentes. Les informations de sorties sont, elles aussi, différentes.

Plusieurs travaux ont proposé de combiner plusieurs outils. On trouve par exemple les travaux de (Hermann, et al., 2007), (Prinçaud, 2011), (Andriankaja, et al., 2015), (Ko, et al., 2016).

- Pour l'évaluation des performances environnementales, Hermann et al. (2007) proposent de combiner trois outils qui sont les IPE, l'ACV et l'analyse multicritère. La méthode repose sur : 1) la collecte de données à l'aide des IPE (le nombre d'IPE n'est pas indiqué), 2) la définition des objectifs et du cadre et l'évaluation des potentiels impacts environnementaux grâce à l'ACV et 3) l'agrégation des résultats en utilisant l'analyse multicritère pour l'aide à la décision. Les avantages sont l'approche globale du cycle de vie au travers de l'ACV et une démarche par étapes (collecte, évaluation, interprétation). L'analyse multicritère permet l'utilisation d'un score unique basé sur l'agrégation des résultats par la méthode de l'analyse multicritère hiérarchique, et donc une interprétation plus aisée. Cela permet une utilisation facile dans le cadre de comparaisons. Mais cela est également un inconvénient, l'emploi d'un résultat en score unique implique une perte d'information et une réduction de la transparence dans la communication des résultats, ce qui est vrai pour toutes les méthodes d'agrégation. L'utilisation d'un système d'agrégation implique aussi de donner une importance relative à un impact sur l'environnement par rapport à un autre, ce qui n'est pas justifié. Un autre inconvénient est la nécessité de réaliser une ACV même si celle-ci reste simplifiée.
- Prinçaud (2011) propose de décomposer les produits complexes en briques technologiques et de créer une base de données regroupant des informations environnementales pour chacune de ces briques. L'outil proposé permettrait ensuite de réaliser une ACV simplifiée, avec la possibilité de faire varier facilement les paramètres clés des différentes briques, et de donner potentiellement des pistes d'amélioration. Cette approche est intéressante, car elle permet de prendre en compte un certain nombre d'acteurs de la conception

et de s'adapter à eux. Elle permet de comparer facilement deux briques. Les inconvénients sont que la démarche reste basée sur la réalisation d'ACV (une pour chaque brique technologique) et les difficultés d'interprétation par tous les acteurs de la conception. Il faut avoir un grand nombre de données pour chaque brique. La décomposition par briques prédéfinies peut limiter l'innovation sauf si la démarche est appliquée très en amont. Enfin, si les briques ne sont pas existantes, il n'est pas possible d'avoir des recommandations d'amélioration.

- Andriankaja et al. (2015) proposent d'intégrer l'écoconception dans un PLM (Product Life cycle Management/Gestion du cycle de vie des Produits). Il comprend une évaluation environnementale simplifiée basée sur les indicateurs clés d'un produit et de ses alternatives, et un stimulateur d'idées d'amélioration et de génération de solutions au travers d'un guideline. L'intégration à un PLM permet d'avoir un grand nombre de données regroupées au même endroit. Cela permet aussi le partage simplifié de l'information entre les parties prenantes. L'avantage majeur de cet outil est la combinaison de l'évaluation environnementale et de la proposition de stratégies d'écoconception. Les inconvénients sont que l'emploi d'un guideline de stratégies d'écoconception peut être perçu comme trop généraliste, et la recherche de la solution optimale semble nécessiter une itération des solutions proposées en matière d'impacts environnementaux. À cette dimension, il faut ajouter la faisabilité technique et l'évaluation économique de la mise en place de la solution.
- Ko et al. (2016) proposent également de combiner l'ACV, un PLM et un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), afin d'exprimer la demande globale en ressources sur le cycle de vie comme une fonction de la conception. Cela permet de créer des conceptions alternatives avec une évaluation de l'efficacité dans la demande en ressources. L'inconvénient est là encore la nécessité de réaliser une ACV.

Après avoir posé les bases de l'écoconception, nous allons voir quels sont les facteurs de succès à la mise en place d'une telle démarche en entreprise.



## 4. Facteurs de succès d'une démarche d'écoconception en entreprise

Dans la littérature, différents facteurs de succès à la mise en place d'une démarche d'écoconception sont cités. Ils peuvent être regroupés en 6 catégories (figure 8) (Johansson, 2002), (Johansson & Magnusson, 2006), (Tingström & Karlsson, 2006), (Michelin, et al., 2014), (Issa, et al., 2015), (Dekoninck, et al., 2016), (Wagner, et al., 2016). Dans chaque catégorie, plusieurs leviers ont été identifiés. Ils sont recensés dans le tableau 1.



Figure [8] Catégories des facteurs de succès à la mise en place de l'écoconception

Tableau [1] Catégories et facteurs de succès à la mise en place de l'écoconception

Catégorie	Facteurs de succès
<b>Management</b> 	Engagement et support de la direction (considérations environnementales réelles dans la stratégie d'entreprise). Prise en compte de la dimension opérationnelle et stratégique de l'écoconception. Établissement d'objectifs environnementaux clairs pour les salariés et pour l'entreprise. Expression claire des responsabilités dans l'accomplissement des objectifs environnementaux.
<b>Relations avec les clients</b> 	Forte concentration sur l'utilisateur. Sensibilisation des utilisateurs aux problématiques environnementales.
<b>Relations avec les fournisseurs</b> 	Intégration au plus tôt dans le développement de produits. Échange d'informations.
<b>Processus de développement de produits</b> 	Prise en compte des problématiques environnementales dès le début du processus de développement de produits. Intégration dans tous les développements de produits. Utilisation des outils d'écoconception et des principes d'écoconception. Définition de règles et standards propres à l'entreprise. Équipe plurifonctionnelle. Communication des informations sous le même format que les informations déjà existantes en conception (tous les acteurs ne parlent pas le même langage). Définition d'indicateurs de performance environnementale.
<b>Compétences</b> 	Formation du personnel. Support d'un spécialiste. Utilisation d'exemples concrets d'écoconception.
<b>Motivation</b> 	Établissement d'un nouvel état d'esprit prenant en considération l'importance de l'environnement. Existence d'un « champion » de l'environnement ou d'un référent. Encouragement de tout le personnel à prendre part à la démarche d'écoconception.

Les facteurs de succès ne sont pas seulement techniques avec des compétences et un processus de développement bien formalisé, ils concernent aussi le management et les relations avec les parties prenantes externes à l'entreprise.

## 5. Bilan

Le premier challenge pour écoconcevoir repose sur l'évaluation de la performance environnementale et la mise en place de stratégies pour l'améliorer. Nous avons vu que la mesure de la performance nécessite des indicateurs et que l'évaluation environnementale des produits est une tâche qui peut être complexe au vu des outils existants. La personnalisation des IPE aux différentes parties prenantes est essentielle. Pour ce qui est de la recherche de solutions, il faut que les moyens mis en œuvre soient simples d'utilisation et spécifiques à l'entreprise. Les acteurs de la chaîne de valeur, internes et externes, doivent être intégrés et motivés par le processus d'écoconception. Il s'agit donc de sélectionner des IPE pour les différents acteurs impliqués dans l'amélioration de la performance environnementale, d'échanger des informations entre les parties prenantes, et de prendre des décisions quant aux meilleures solutions d'amélioration de la performance environnementale.

La suite de ce mémoire est consacrée à l'état de l'art sur la sélection des IPE pour l'évaluation environnementale puis à l'intégration des acteurs de la chaîne de valeur pour l'amélioration environnementale. Dans un premier temps, nous allons voir comment sont définis et sélectionnés les IPE.

## Chapitre 2. Mise en place des indicateurs de performance environnementale

### 1. Qu'est-ce qu'un indicateur ?

Les indicateurs sont devenus des moyens de mesures indispensables dans tous les domaines : économique, social, environnemental, etc. Ils permettent de s'assurer et de justifier du bien-fondé des actions mises en place, et ce à tous les niveaux : états, organisations internationales, entreprises, etc.

*Un indicateur donne une représentation simplifiée d'un système complexe*

Un indicateur est un outil d'évaluation d'une situation à un instant donné. Il peut représenter une valeur absolue (quantité de matière), une valeur relative (pourcentage d'amélioration), une valeur agrégée, une valeur pondérée ou encore une information quantitative. En cas de comparaison, les indicateurs relatifs sont plus robustes que les indicateurs absolus. Par exemple, des produits de tailles différentes peuvent être difficiles à comparer en masse totale d'acier (quantité absolue), mais pas en masse d'acier par rapport à la masse totale du produit (quantité relative) (Cerdan, et al., 2009).

Les indicateurs ont différentes fonctions, dont deux principales : managériale et éducationnelle. Ils permettent (UNEP, 1994), (Veleva & Ellenbecker, 2001), (Donnelly, et al., 2007) :

- de donner une information condensée d'un système complexe (réduction de la quantité de données) ;
- d'échanger des informations sur ce qu'ils mesurent ;
- d'identifier et caractériser les changements d'état dans un système ;
- de servir d'alertes ;
- de mesurer l'efficacité d'un processus ;
- d'aider à la décision ;
- de comparer des performances ;
- de rassurer sur la conformité réglementaire ;
- d'alerter le public par exemple sur les problématiques environnementales ;
- de développer des connaissances sur le management et l'organisation de l'entreprise ;
- d'impliquer les parties prenantes dans la prise de décision.

## 2. Les indicateurs de performance environnementale

Les IPE donnent des informations permettant de mesurer les impacts sur l'environnement à un instant donné, mais également l'influence (bénéfique ou négative) sur les impacts environnementaux des actions mises en place (stratégies d'écoconception). Cela se traduit par leur développement, leur suivi et leur utilisation pour atteindre des objectifs fixés. Ils peuvent être l'expression de l'entreprise à contribuer à la conservation ou la destruction des ressources naturelles (Azzone & Giuliano, 1996). Parmi leurs fonctions, on retrouve :

- la mesure de l'efficacité et de l'efficacités des actions mises en place ainsi que la pertinence des moyens utilisés (cf. page 26) ;
- la synthèse de l'ensemble des données environnementales en un nombre limité de groupes d'informations essentielles (Journal officiel de l'Union Européenne, 2003) ;
- une communication simplifiée (leur signification va généralement au-delà de ce qui peut être directement observé (Smeets & Weterings, 1999)) ;
- l'intégration des risques liés à l'environnement dans la prise de décision ;
- l'établissement d'un lien entre la performance environnementale et les gains en compétitivité (Johnson, 1998).

Un indicateur représente généralement une seule dimension d'un produit ou d'un service, sauf dans le cas particulier d'un indicateur combiné qui reflète plusieurs aspects. L'emploi d'un seul indicateur pour évaluer la performance environnementale peut cacher d'autres problématiques environnementales. Par exemple, l'emploi du seul indicateur de consommation énergétique dans le cas d'un réfrigérateur, qui reflète une problématique majeure (la consommation d'énergie durant son fonctionnement), ne met pas en lumière d'autres aspects comme l'emploi du réfrigérant, car il n'est pas directement lié à l'énergie (Svensson, et al., 2006). Il est nécessaire de définir un jeu d'indicateurs pour couvrir toutes les problématiques environnementales d'un produit.

Il existe une grande variété d'indicateurs permettant de quantifier et suivre tous les aspects pouvant générer des impacts environnementaux. Issa et al. (2015) ont référencé

261 indicateurs de performance environnementale. Ces indicateurs peuvent être le changement climatique, le taux de valorisation matière, la quantité de déchets industriels banals générés, etc. Ces indicateurs ont été classés dans un tableau en fonction d'objectifs environnementaux pour chaque étape du cycle de vie. Ce tableau est disponible sur le site web de l'Université du Danemark (Technical University of Denmark, 2015). Cependant, certains de ces indicateurs sont très spécifiques et ne sont pas interprétables et/ou utilisables par tous, comme l'indicateur d'acidification, la demande biochimique en oxygène ou encore l'indicateur de la persistance environnementale.

Rodrigues et al. (2016) ont identifié 787 indicateurs en lien avec les 3 piliers du développement durable (économique, social, environnemental). La majorité des indicateurs identifiés sont des indicateurs économiques. Ainsi, seulement 3,2 % (25/787) sont des indicateurs environnementaux (principalement liés aux réglementations), 2 % (16/787) considèrent les 3 dimensions du développement durable, 0,2 % (2/787) prennent en compte la dimension environnementale et sociale et enfin 0,2 % (2/787) prennent en compte la dimension environnementale et économique (Rodrigues, et al., 2016). Ils ont également classé ces indicateurs en fonction de leur usage dans les différentes phases du développement de produits. La majorité de ces 787 indicateurs (478/787) concerne des indicateurs d'activités génériques pouvant s'appliquer tout au long du processus de développement et l'autre majorité concerne des indicateurs s'appliquant principalement lors de la première phase du développement (la planification 114/787) et lors de la phase finale de suivi du produit (49/787). Il s'agit ici principalement d'indicateurs de management de l'écoconception. À partir de cette étude, 27 indicateurs adaptés typiquement à l'implantation de l'écoconception ont été identifiés, et 114 nouveaux indicateurs ont été proposés après avoir constaté qu'un certain nombre de pratiques liées à l'écoconception ne pouvaient pas être traduites avec les indicateurs existants ou que ces derniers étaient trop génériques (Rodrigues, et al., 2017).

Cette grande diversité d'indicateurs se trouve être une contrainte. Il devient de plus en plus difficile de comprendre le sens et l'importance des différents indicateurs existants, d'autant que de nouveaux indicateurs sont régulièrement mis en place et communiqués. Le grand nombre d'indicateurs rend la prise de décision plus difficile. Enfin, l'emploi d'indicateurs différents pour une même catégorie de produits peut gêner l'échange de l'information entre les parties prenantes.

Il est donc malaisé, au vu de la diversité des indicateurs, de sélectionner un jeu d'indicateurs adapté à sa situation. Et, il n'est pas possible d'avoir un jeu universel d'indicateurs pouvant s'appliquer à toutes les situations (Persson, 2001).

### 3. Les types d'indicateurs de performance environnementale

Les indicateurs peuvent être classés en quatre catégories : les indicateurs liés aux problématiques environnementales du produit, aux problématiques environnementales de l'usine, liés au management et économiques. Ces quatre catégories sont décrites ci-après.

1. Les indicateurs liés aux problématiques environnementales du produit sont des mesures physiques, telles que la production de déchets solides, qui ne font pas référence à un paramètre économique. Ils donnent des indications sur les performances opérationnelles, et décrivent la situation actuelle. On retrouve ici les indicateurs de pression, d'état et de réponse dans les différents compartiments eau, sol, air, et biodiversité (figure 9) (Azzone & Giuliano, 1996), (Smeets & Weterings, 1999), (Journal officiel de l'Union Européenne, 2003), (ISO 14031, 2013). Les indicateurs de pression représentent les pressions exercées par les activités humaines sur l'environnement (intensités d'émissions et d'utilisation des ressources). Les indicateurs d'état montrent la qualité de l'environnement et les quantités de ressources naturelles consommées. Les indicateurs de réponse sont des indicateurs permettant de suivre les actions mises en place pour répondre aux problématiques environnementales.

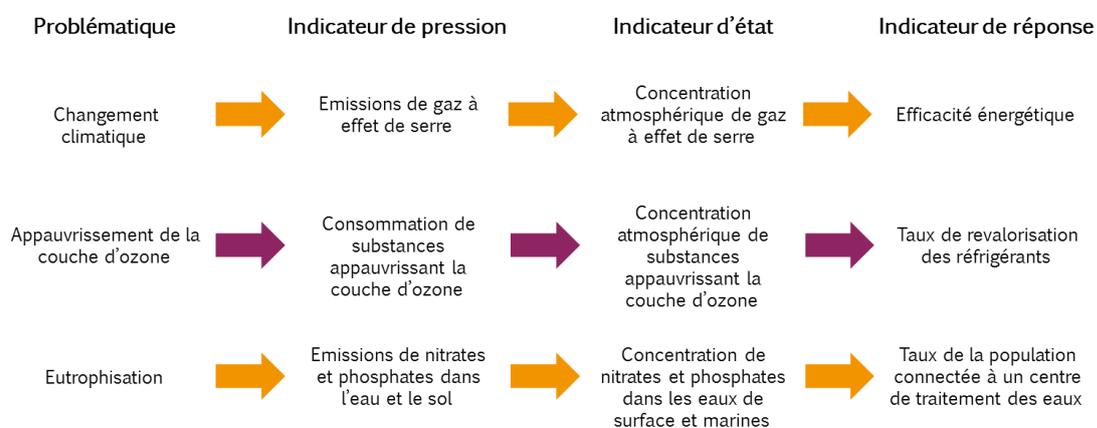


Figure [9] Exemples d'indicateurs issus du système Pression-Etat-Réponse (OECD, 2003)

Les indicateurs d'ACV, tels que l'acidification et le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone, etc., sont des indicateurs de pression. Ces indicateurs peuvent être parfois complexes à interpréter pour les concepteurs et sont généralement quantifiables et utilisables une fois le produit bien détaillé.

On retrouve aussi dans cette catégorie des éco-indicateurs, tels que la quantité de matière utilisée, la consommation d'énergie, le temps de démontage, le taux de recyclage, etc. pouvant être utilisés dès les premières phases de conception (Cerdan, et al., 2009), (Persson, 2001). Ils transforment une problématique environnementale en une mesure accessible aux ingénieurs qui ne sont pas des experts des impacts environnementaux.

On peut utiliser deux types d'éco-indicateurs, ceux pour faciliter les améliorations et choisir entre plusieurs solutions techniques et ceux pour communiquer (Persson, 2001). Les indicateurs doivent se référer à la fonction du produit ou à son utilisation et non à la solution technologie mise en œuvre, notamment lorsqu'ils sont utilisés pour comparer différentes solutions technologiques. Ils doivent répondre à des objectifs d'amélioration précis, par exemple réduire de x % la consommation énergétique lors du fonctionnement.

**2. Les indicateurs liés aux problématiques environnementales de l'usine (site de production)** donnent des informations sur l'état de l'environnement susceptible d'être affecté par l'usine et sur la qualité environnementale des alentours de l'usine (ISO 14031, 2013), (Journal officiel de l'Union Européenne, 2003). Par exemple, il peut s'agir d'un indicateur mesurant la concentration spécifique d'un polluant dans l'air ambiant aux alentours de l'usine, la concentration d'un polluant spécifique dans un cours d'eau adjacent à l'usine, etc. On retrouve là aussi les indicateurs basés sur la chaîne de causalité (modèle pression-état-réponse) et d'éco-indicateurs liés aux problématiques des sites de production.

**3. Les indicateurs liés au management** sont des mesures décrivant les actions intangibles ou difficiles à quantifier telles que la stratégie environnementale mise en place par l'entreprise et la performance de management (Azzone & Giuliano, 1996), (Journal officiel de l'Union Européenne, 2003). On trouve, par exemple, le nombre de non-conformités réglementaires, le pourcentage d'employés formés à l'écoconception, etc.

**4. Les indicateurs économiques** sont des mesures environnementales pouvant être exprimées dans une unité monétaire (Azzone & Giuliano, 1996). Plusieurs indicateurs obtenus grâce à l'analyse du coût du cycle de vie peuvent être utilisés, dont l'indicateur de performance de réchauffement global (coût résultant des impacts sociaux et environnementaux des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES)) ou l'indicateur de performance économique (composé du coût payé pour la fabrication, du coût de la distribution, du coût de l'usage et du coût de la fin de vie) (Jeong & Lee, 2009).

Le choix du type d'indicateur dépend de l'utilisateur et de son objectif.

Il est également possible de faire la distinction entre trois types d'indicateurs applicables provenant des catégories précédentes (Alwaer & Clements-Croome, 2010).

- **Les requis.** Ils sont en accord avec les réglementations et les problématiques environnementales majeures, par exemple, le label énergétique pour les produits soumis à la réglementation ErP<sup>3</sup> (Energy related Product), qui concerne l'écoconception des produits consommateurs d'énergie.
- **Les désirés.** Ils évaluent des cibles idéales supérieures aux réglementations et intègrent la vision de l'utilisateur, par exemple, le taux de recyclabilité.
- **Les inspirés.** Ils sont fonction d'une vision à long terme des demandes des clients, par exemple, le pourcentage d'énergie renouvelable pour alimenter un bâtiment.

## 4. Sélection des indicateurs de performance environnementale

Communément, la méthode la plus utilisée pour sélectionner des IPE est d'identifier les sources majeures d'impacts environnementaux et d'en déduire des IPE. Il s'agit ensuite de fixer des objectifs d'amélioration.

---

<sup>3</sup> Directive 2009/125/CE établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicable aux produits liés à l'énergie

### a. Critères de sélection des indicateurs

On trouve de nombreux critères de sélection pour les indicateurs dans la littérature. Ces critères sont généralement tous basés sur les 5 grands principes suivants (ISO 14031, 2013) :

- la pertinence, lien entre la définition de l'indicateur et la problématique environnementale à mesurer ;
- l'exhaustivité, prise en compte de toutes les problématiques environnementales significatives ;
- la cohérence, comparabilité dans le temps ;
- la transparence ;
- la précision, valeur juste avec incertitude.

Ils doivent aussi être comparables, équilibrés, continus, intemporels et clairs (Journal officiel de l'Union Européenne, 2003). Ils doivent montrer une tendance (évolution), être fournisseurs d'alertes, et permettre d'identifier les conflits entre les actions mises en place et les enjeux stratégiques.

Le choix des indicateurs doit aussi prendre en compte l'échelle géographique de l'évaluation (Alwaer & Clements-Croome, 2010).

- Micro, problématique locale (ex. consommation d'eau dans un cours d'eau).
- Méso, problématique régionale (ex. l'utilisation des sols).
- Macro, problématique nationale ou à l'échelle d'un continent (ex. les émissions de GES).
- Global, problématique mondiale (ex. le changement climatique).

D'après la littérature, une fois les indicateurs sélectionnés, il est important de s'assurer de leur validité. Deux méthodes peuvent s'appliquer et reposent sur la validation scientifique, l'utilité et la représentativité.

La première est basée sur 3 niveaux d'évaluation (Bockstaller & Girardin, 2003).

1. La validation de la conception de l'indicateur : est-il scientifiquement fondé ? Il s'agit de la validation par les pairs et de la comparaison d'approche.
2. La validation de données : informe-t-il sur la réalité ? Est-il réaliste ? Il s'agit de la validation par comparaison (probabilité), et par un expert.
3. La validation de l'utilisation finale : est-il utile et utilisé ?

La seconde est basée aussi sur 3 niveaux d'évaluation (3 S) (Cloquell-Ballester, et al., 2006).

1. Sui Validatio → Validation personnelle de l'équipe projet.
2. Scienciatis Validatio → Validation scientifique par des experts indépendants.
3. Social Validatio → Validation sociale par les consommateurs.

Cette seconde méthodologie définit que les indicateurs doivent être évalués selon 3 critères : la cohérence conceptuelle (relation entre l'indicateur et l'objet à mesurer) ; la cohérence opérationnelle/scientifique (définition correcte de la formule, des unités, du protocole de mesure, de la précision et de la sensibilité) ; l'utilité (applicabilité, coût).

Il paraît donc nécessaire de bien s'appliquer à répondre aux besoins des différents utilisateurs. L'utilisateur doit valider les indicateurs retenus pour lui lors de la sélection des IPE. Ils doivent être représentatifs des objectifs environnementaux définis. Déjà en 1994, un rapport de l'UNEP avait identifié le besoin d'un jeu d'indicateurs adapté à un utilisateur spécifique. Celui-ci doit prendre en compte le niveau de sophistication ou de simplification nécessaire ainsi que le fait que différents types de décision requièrent différents niveaux d'information (UNEP, 1994).

#### b. Méthodes de sélection des IPE existantes

Plusieurs méthodes ont été proposées pour sélectionner des indicateurs environnementaux. Nous avons analysé les avantages et les inconvénients de 10 méthodes, afin de définir si l'une d'entre elles pouvait être appliquée dans notre cas (tableau 2).

Pour l'analyse, nous avons sélectionné 5 critères spécifiques qui ont été identifiés dans la littérature comme indispensables pour notre problématique :

- méthode orientée développement de produits, car ces travaux visent à implémenter une démarche d'écoconception sur tout le cycle de vie du produit ;
- prise en compte du cycle de vie du produit, idem que précédemment ;
- prise en compte des besoins des utilisateurs, car la prise en compte des besoins des différents acteurs de la chaîne de valeur et utilisateurs des IPE est un facteur de succès à la mise en place d'une démarche d'écoconception ;
- solution pour gérer le multicritère, elle est nécessaire pour aider à la prise de décision ;
- facilité d'utilisation, afin que la méthode soit réellement utilisée dans l'entreprise.

Tableau [2] Comparaison des méthodes de sélection des indicateurs existantes

Méthode basée sur	Description	Orientée développement de produits	Prise en compte du cycle de vie	Prise en compte des besoins des utilisateurs	Gestion du multicritère	Facilité d'utilisation
1. la chaîne de causalité (OECD, 2003), (Smeets & Weterings, 1999), (Niemeijer & S. de Groot, 2008)	<p>Définition des indicateurs de pression, d'état et de réponse selon 2 principes de chaîne de causalité :</p> <p>PER : Pression – État – Réponse ; (activité humaine → pression environnementale → état environnemental → réponse de la société)</p> <p>DSR (Driving force – State – Response) ; (force → pression → état environnemental → impact environnemental → réponse de la société).</p> <p>+ Prise en compte de tous les aspects environnementaux significatifs.</p> <p>+ Basée sur une méthode scientifique.</p> <p>- Interrelation entre les indicateurs (choisis indépendamment les uns des autres).</p> <p>- Complexité à mettre en place la chaîne de causalité (expertise et consommation de temps).</p>		x			
2. les objectifs environnementaux (Issa, et al., 2015), (Caeiro, et al., 2012) (Donnelly, et al., 2006)	<p>Étude des impacts environnementaux de son produit pour choisir des indicateurs en conséquence.</p> <p>Base de données d'indicateurs classés par étapes du cycle de vie et objectifs environnementaux (Issa, et al., 2015).</p> <p>- Nécessité d'avoir un niveau de connaissances élevé au préalable sur le produit et les objectifs d'améliorations.</p> <p>- Sélection des indicateurs indépendamment les uns des autres.</p> <p>- Nombre important d'indicateurs (10 à 20 recommandés).</p>	x	x			x
3. un questionnaire (Scherpereel, et al., 2001)	<p>Questionnaire détaillé soumis aux acteurs stratégiques de l'entreprise, afin de faire un inventaire des stratégies environnementales les plus appropriées et de définir un jeu d'indicateurs.</p> <p>+ Spécifique à la stratégie de l'entreprise/à un secteur d'activité.</p> <p>+ Favorise la communication.</p> <p>- Jugement potentiellement subjectif basé sur les connaissances et habitudes.</p> <p>- Chronophage.</p> <p>- Indicateurs choisis indépendamment les uns des autres.</p> <p>- Bien que faisant appel aux acteurs stratégiques de l'entreprise, les indicateurs ne sont pas choisis en fonction des besoins des différents acteurs/utilisateurs.</p>			x (suggéré)		x

Méthode basée sur	Description	Orientée développement de produits	Prise en compte du cycle de vie	Prise en compte des besoins des utilisateurs	Gestion du multicritère	Facilité d'utilisation
4. un comité d'expert (Donnelly, et al., 2007), (Kinderyte, 2010), (Puig, et al., 2014)	<p>Pondération par les experts des indicateurs les uns par rapport aux autres pour faire une sélection.</p> <p>+ Peut-être spécifique à un secteur.</p> <p>- Nécessite de proposer une liste d'indicateurs au préalable.</p> <p>- Nécessite un comité d'experts multidisciplinaire.</p> <p>- Jugement potentiellement subjectif basé sur les connaissances et habitudes.</p> <p>- Les indicateurs sont choisis indépendamment les uns des autres.</p>		x	x (suggéré)	x pondération des indicateurs	
5. un système de management environnemental orienté produit (Dewulf & Duflou, 2003)	<p>Définition de trois niveaux pour le choix des IPE :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1<sup>er</sup> niveau le secteur, standardisation pour le secteur d'activité des indicateurs généralisés.</li> <li>• 2<sup>e</sup> niveau l'entreprise, définition de cibles et d'indicateurs basés sur la politique environnementale de l'entreprise et sélectionnés dans le jeu d'indicateurs défini niveau 1.</li> <li>• 3<sup>e</sup> niveau le projet/produit individuel, implémentation de l'écoconception et définition des cibles et indicateurs spécifiques au projet/produit.</li> </ul> <p>+ Pas de réalisation d'ACV.</p> <p>+ Focus sur les aspects sur lesquels peut agir l'entreprise.</p> <p>+ Amélioration de la communication entre tous les acteurs.</p> <p>- Bonnes connaissances des problématiques du secteur au préalable.</p> <p>- La sélection d'IPE standardisés ne permet pas forcément d'analyser les innovations (besoin de nouveaux indicateurs).</p> <p>- Pas assez de collectes d'informations pour alimenter une future ACV.</p>	x	x			
6. un tableau de bord prospectif (Johnson, 1998)	<p>Lien entre la performance environnementale et la stratégie de l'entreprise.</p> <p>+ Sélection d'indicateurs stratégiques spécifiques à l'entreprise.</p> <p>+ Indicateurs standardisés par rapport à une référence.</p> <p>+ Indicateurs simples et compréhensibles.</p> <p>+ Basé sur un outil potentiellement déjà existant dans l'entreprise.</p>					x

Méthode basée sur	Description	Orientée développement de produits	Prise en compte du cycle de vie	Prise en compte des besoins des utilisateurs	Gestion du multicritère	Facilité d'utilisation
7. la considération des parties prenantes (Searcy, et al., 2005)	Intégration des parties prenantes à la sélection des indicateurs en fonction des sources majeures d'impact et des besoins et objectifs d'amélioration de ces parties prenantes. + Indicateurs utiles et utilisés. - Pas de lien direct avec la stratégie de l'entreprise. - Le développement des indicateurs spécifiques à l'entreprise est consommateur de temps. - Bien qu'intégrant les parties prenantes, pas d'indicateurs spécifiques aux différents acteurs de la chaîne de valeur.		x	x (suggéré)		x
8. la standardisation des indicateurs (Olsthoorn, et al., 2001)	Cette méthode se base sur 4 étapes : 1. Collecte de données des informations disponibles dans l'entreprise. 2. Établissement d'une base de données avec des indicateurs environnementaux qui requièrent des facteurs pour l'agrégation ultérieure. 3. Agrégation des indicateurs environnementaux (par catégorie) en un indicateur d'impact environnemental. 4. Standardisation qui permet de combiner les données en performance environnementale. + présente partiellement les besoins de chaque utilisateur par rapport aux indicateurs de performance environnementale. + Base de données d'indicateurs. - Indicateurs agrégés et normalisés.			x	x	x
9. l'analyse des risques (Diakaki, et al., 2006)	Sélection d'IPE à partir des aspects puis objectifs environnementaux. Les IPE sont ensuite évalués grâce à la méthode de l'analyse des risques pour les prioriser en un jeu final d'IPE. + Analyse des aspects environnementaux. + Aide à la décision avec l'analyse des risques (priorisation des IPE). - Méthode très générique.				x (priorisation des indicateurs)	x
10. l'identification des besoins de groupes d'utilisateurs et des objectifs environnementaux (Rice & Rochet, 2005)	Identification de 3 groupes d'utilisateurs (experts techniques, décideurs, grand public) puis identification d'indicateurs par rapport aux objectifs environnementaux. Les indicateurs et les besoins des utilisateurs sont évalués selon 9 critères (aspect concret, base théorique, sensibilisation du public, coût, mesure, données historiques, sensibilité, réponse, spécificité). Les indicateurs retenus sont ceux croisant les deux matrices d'évaluation. + Prise en compte et analyses des besoins spécifiques de 3 groupes d'utilisateurs. - Un seul jeu d'indicateur devant répondre à tous les besoins. - Difficulté de croiser les 2 matrices d'évaluation.			x (3 groupes distincts)	x	x

### c. Bilan des méthodes de sélection des IPE

Dix méthodes de sélection des IPE ont été identifiées. Certaines méthodes sont intéressantes, car basées sur le développement de produits (méthodes 2 et 5), mais nécessitent d'avoir une grande connaissance au préalable des problématiques environnementales de son produit. Certaines permettent de bien prendre en considération tous les aspects et impacts environnementaux, mais nécessitent d'avoir les compétences nécessaires à la réalisation d'un réseau de causalité et également une grande connaissance du produit (méthodes 1, 2, 4, 5 et 7). Certaines prennent en compte l'importance des indicateurs les uns par rapport aux autres par le biais de la pondération, mais peuvent être soumises à subjectivité du fait du choix par des individus (méthodes 4, 8, 9 et 10). Une seule se base sur un outil existant de stratégie d'entreprise (méthode 6), mais peut omettre certaines problématiques environnementales importantes. Enfin, cinq méthodes prennent en compte les parties prenantes externes lors du choix des indicateurs, mais elles ne sont pas orientées développement de produits et proposent de construire un jeu d'indicateurs qui doit répondre à tous les besoins (méthodes 3, 4, 7, 8 et 10). En ce qui concerne la prise en compte des besoins spécifiques des utilisateurs, les besoins des acteurs internes et des acteurs externes à l'entreprise sont différents, voire contradictoires (Janicot, 2007/1). Quelques auteurs soulèvent la variation de la fonction des indicateurs en fonction des utilisateurs (Jasch, 2000), (Olsthoorn, et al., 2001), (Rice & Rochet, 2005). Par exemple, un preneur de décision aura besoin d'indicateurs pour suivre la performance environnementale de l'entreprise par rapport aux objectifs environnementaux, tandis qu'une personne du marketing se servira des indicateurs pour identifier de nouvelles opportunités de marché. Ces auteurs ont commencé à soulever le problème de l'adéquation entre les indicateurs et les besoins sans pour autant s'intéresser à tous les acteurs de la chaîne de valeur qui utilisent ces indicateurs. Ils proposent seulement d'avoir un jeu d'indicateurs commun répondant à tous les besoins des différents acteurs. Nous savons que cela n'est pas optimal.

Il n'existe pas de nombre d'IPE idéal. Cependant, il est recommandé de réduire le nombre d'IPE à son minimum dans un même jeu d'indicateurs tout en répondant à tous les besoins. En effet, plus il y a d'IPE et plus la prise de décision sera difficile. Le jeu d'indicateurs retenu doit être le plus petit possible (Rice & Rochet, 2005).



## 5. Gestion du multicritère et aide à la décision

L'utilisation de plus d'un indicateur avec des unités différentes peut amener à des problèmes de comparaison et d'agrégation. La question suivante peut se poser : quel poids donner à un indicateur plutôt qu'à un autre ? Il est nécessaire d'aider les utilisateurs des IPE dans la prise de décision au vu des compromis indispensables.

Ici, différentes méthodes de gestion du multicritère que l'on peut retrouver dans la littérature sont présentées.

### a. Gestion du multicritère

Il existe deux manières principales de gérer le multicritère.

- La priorisation. Elle donne la priorité à un ou plusieurs indicateurs parmi tous les indicateurs évalués pour tenter de les minimiser ou les maximiser suivant les cas. Ici, on se concentre sur un ou quelques indicateurs parmi ceux utilisés pour la prise de décision. L'importance d'un indicateur peut être reliée à un scénario défini ou à un contexte (priorisation réglementaire, priorisation par rapport aux attentes clients, priorisation de la communication, etc.). Par exemple, une entreprise mettant sur le marché des produits soumis à la réglementation ErP peut prioriser des indicateurs liés à l'efficacité énergétique par rapport à des indicateurs de recyclabilité. La priorisation est relativement subjective et facilement mise en œuvre, car elle préconise de se focaliser que sur certains indicateurs. Wagner et al. (2016) recommandent de se concentrer sur les points sensibles de la chaîne de valeur pour faciliter la priorisation.

- L'analyse multicritère. Elle permet d'établir une comparaison et d'opérer un choix entre plusieurs options. Tous les indicateurs sont pris en considération pour faire un choix. Cela peut aboutir à la création d'un indicateur unique composite. L'intérêt principal de l'agrégation étant de donner une vue globale, immédiate, et interprétable par n'importe qui sans connaître les détails sous-jacents (Marques, et al., 2010). L'analyse multicritère repose généralement sur 6 grandes étapes (Roy, 1996), (San Cristobal, 2012) : 1) définir le problème, générer des alternatives et établir des critères d'évaluation, 2) donner un poids à chaque critère 3) construire la matrice d'évaluation entre les alternatives et les critères, 4) sélectionner la méthode d'analyse multicritère ,5) classer les alternatives et 6) l'analyse de la robustesse.

On peut notamment trouver des incertitudes sur les poids attribués aux critères et dans l'évaluation de la performance des scénarios (Buchholz, et al., 2009). En effet, le classement des scénarios est considéré comme robuste lorsque l'addition ou la suppression d'alternatives n'affecte pas la classification établie (Cinelli, et al., 2014). Cela n'est pas valable pour les méthodes d'agrégation car chaque alternative est évaluée séparément (Cinelli, et al., 2014).

### b. Méthodes d'analyse multicritère

L'analyse multicritère est de plus en plus utilisée dans les domaines de l'environnement comme outil d'aide à la décision (Hermann, et al., 2007), (Huang, et al., 2011), (Domingues, et al., 2015).

Elle repose sur 4 grandes méthodes : la somme pondérée, l'analyse multicritère hiérarchique, le surclassement, la méthode floue (Herva & Roca, 2013), (Communities and local government, 2009). Les méthodes, qui dominent le plus, sont l'analyse multicritère hiérarchique et le surclassement (Huang, et al., 2011).

Ces méthodes peuvent être réparties en 2 catégories : les méthodes compensatoires et les méthodes semi-compensatoires (parfois appelés non compensatoires) (Giarlotta, 2001), (Benoit & Rousseaux, 2003), (Rowley, et al., 2012), (Roy & Slowinski, 2013), (Cinelli, et al., 2014). Le phénomène de compensation est décrit comme étant la possibilité qu'une amélioration important sur un ou plusieurs critères puisse compenser

une détérioration par rapport à un ou plusieurs autres critères et vice-versa (Giarlotta, 2001), (Cinelli, et al., 2014). La compensation est liée à d'autres aspects tels que les interactions entre les critères, la redondance, la synergie (Giarlotta, 2001). Les méthodes d'agrégation telle que la somme pondérée sont des méthodes très compensatoires. Les méthodes visant à comparer les systèmes tels que l'analyse multicritère hiérarchique, le surclassement et la méthode floue sont des méthodes semi-compensatoires (Roy & Slowinski, 2013), (Cinelli, et al., 2014). Les méthodes compensatoires ne font sens que pour les problèmes où l'environnement est peu important. C'est le cas lorsque l'on considère les 3 piliers du développement durable, par exemple la perte d'un écosystème de forêt peut être compensée par le capital financier gagné par la construction d'infrastructures (Rowley, et al., 2012). Pour une implantation forte de l'environnement, il est préférable de choisir des méthodes non compensatoires (Rowley, et al., 2012).

Ces 4 grandes méthodes sont présentées ci-après.

**1. La méthode de la somme pondérée.** C'est la plus connue et la plus simple à mettre en œuvre. La pondération consiste à attribuer à chacun des indicateurs une note proportionnelle à son importance dans le but de développer un indice unique (figure 10). Pour rappel, l'utilisation d'un indicateur unique pondéré peut cacher potentiellement des problématiques environnementales. Les facteurs de pondération sont souvent subjectifs.

En ACV, cette méthode est généralement privilégiée. Les facteurs de pondération sont déterminés selon 4 grandes méthodes (Pré, s.d.).

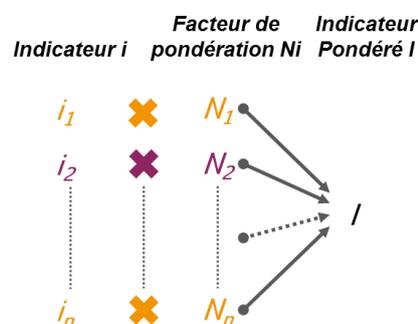


Figure [10] Méthode de la somme pondérée

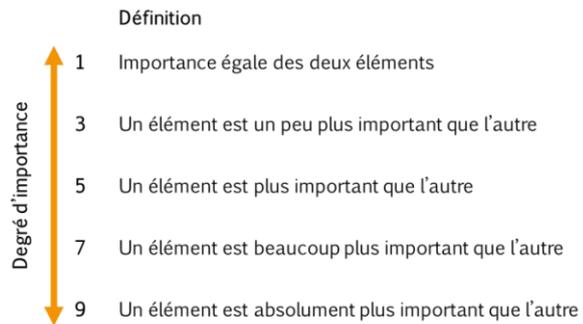
- **Distance par rapport aux objectifs politiques.** Par exemple si l'objectif est de réduire de 50 % les émissions nationales de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) responsable du changement climatique et de 20 % les émissions de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) responsable de l'acidification, alors l'empreinte carbone aura un facteur de pondération plus important. Cette méthode peut ne pas refléter les vraies problématiques environnementales, les objectifs politiques pouvant être influencés par des considérations économiques et/ou politiques.
- **Distance par rapport aux objectifs scientifiques.** Il s'agit de la même approche que précédemment, mais par rapport à des objectifs scientifiques. Par exemple si l'objectif d'émission de CO<sub>2</sub> est de 350 ppm au maximum, plus on va s'éloigner de cet objectif et plus le facteur de pondération sera important.
- **Monétisation.** Il s'agit de donner une importance monétaire à un indicateur. Celle-ci peut être basée sur les coûts associés à la prévention et/ou la réparation des dommages ou le montant que la population est prête à payer. Cette méthode est très subjective, car basée sur la valeur que l'on donne à un écosystème ou à la santé humaine.

→ **Pondération par panel.** Il s'agit de demander à un panel d'experts quelle importance donner à un indicateur plutôt qu'à un autre. Ici, les résultats sont subjectifs et basés sur les connaissances et habitudes personnelles du panel.

L'un des inconvénients est l'incertitude de l'évolution de l'importance de certains critères au fil du temps, ce notamment dans le cadre de produits à développement et durée de vie longs (Handfield, et al., 2002). Cela peut influencer sur le poids attribué aux différents indicateurs.

## 2. L'analyse multicritère hiérarchique.

Cette méthode, développée par Thomas L. Saaty, repose sur la comparaison par paires de critères de choix préétablis et sur un jugement d'experts pour donner une échelle de priorité (Saaty, 2008). Il s'agit de déterminer dans quelle mesure un élément en domine un autre. Saaty propose dans sa méthode une échelle de



comparaison des critères les uns par rapport aux autres (figure 11). La comparaison est qualitative. On retrouve également ici l'approche MACBETH (Bana E Costa, et al., 2012).

Figure [11] Échelle de comparaison pour la méthode d'analyse multicritère hiérarchique

Les principaux inconvénients sont qu'il est difficile de mettre en œuvre cette méthode lorsque les critères sont trop nombreux et qu'il faut considérer toutes les comparaisons possibles en faisant l'hypothèse que tout est comparable.

**3. Le surclassement.** Cette méthode repose sur l'élaboration d'un graphe orienté montrant les relations « au moins aussi important que » entre les critères (figure 12). Le principal désavantage est qu'elle ne donne pas une réponse claire sur le meilleur choix. On retrouve la méthode ELECTRE (Elimination Et choix Traduisant la REalité) inventée par Bernard Roy (Figueira, et al., 2013). La méthode ELECTRE III semble la plus adaptée au domaine environnemental. On retrouve également la méthode PROMETHEE (Brans & Vincke, 1985).

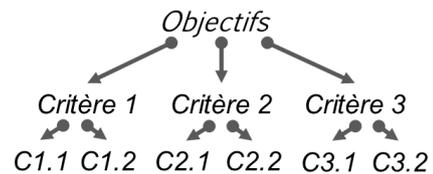


Figure [12] Méthode de surclassement

Dans le cas de l'ACV, Benoit & Rousseaux (2003) proposent un diagramme de sélection de la méthode de l'analyse multicritère de surclassement en fonction de plusieurs critères (l'objectif de l'étude, le type de critères, le type de données (cardinales ou ordinales), la pondération ou la hiérarchie).

**4. La méthode floue.** Cette méthode est basée sur l'utilisation de poids qui ont des quantités floues et qui peuvent être interprétés de différentes manières toutes justes. Cette méthode a été développée pour compenser les incertitudes des données. Elle est difficile à comprendre pour les non-spécialistes. On retrouve la méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity of Ideal Solution). Cette méthode a

notamment déjà été appliquée pour faire le choix de matériaux en fonction de plusieurs critères techniques et environnementaux dans le cadre de l'écoconception (Huang, et al., 2011).

Le tableau 3 présente un récapitulatif des différentes méthodes ci-dessus avec leurs avantages et inconvénients (Velasquez & Hester, 2013).

**Tableau [3]** Avantages et inconvénients des méthodes d'analyse multicritère existantes (Velasquez & Hester, 2013)

Méthode	Avantages	Inconvénients
Somme pondérée	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Capacité à compenser de nombreux critères</li> <li>+ Intuitive pour les décideurs</li> <li>+ Calculs simples ne nécessitant pas un programme de calcul complexe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les résultats obtenus peuvent ne pas être logiques et ne pas refléter les situations réelles</li> </ul>
Analyse Hiérarchique	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Facile d'utilisation</li> <li>+ La structure hiérarchique peut facilement être ajustée pour s'adapter à la taille du problème</li> <li>+ Pas intensif en données</li> <li>+ Peut être utilisée pour des problèmes avec des critères récents</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problèmes à cause des interdépendances entre les critères et alternatives</li> <li>- Peut conduire à des incohérences entre le jugement et les classements des critères</li> </ul>
Surclassement	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Prend en compte des incertitudes et des imprécisions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peut être difficile à expliquer en terme simple</li> <li>- Pas d'identification directe des forces et faiblesses des alternatives</li> </ul>
Méthode floue	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Autorise l'emploi de données d'entrées imprécises</li> <li>+ Permet de gérer les informations insuffisantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficile à développer</li> <li>- Peut nécessiter de nombreuses simulations avant de pouvoir être utilisé</li> </ul>

Afin de combler les inconvénients des méthodes existantes, il est de plus en plus commun de combiner plusieurs méthodes d'analyse multicritère (Velasquez & Hester, 2013).

### c. Conclusions sur la gestion du multicritère

Une problématique couramment rencontrée avec l'analyse multicritère est l'indépendance des indicateurs les uns par rapport aux autres. Par exemple, si j'ai deux indicateurs environnementaux qui sont les émissions de GES et l'impact sur le réchauffement climatique, comment gère-t-on le fait que les émissions de GES soient déjà prises en compte dans l'indicateur de réchauffement climatique ? Dans la majorité des cas, cela n'est pas considéré. Il est important également de considérer l'exhaustivité et la non-redondance des critères dans l'analyse multicritère, ainsi que la robustesse pour vérifier l'influence de la pondération des critères sur le résultat final.

Une autre problématique de l'analyse multicritère est le phénomène de compensation qui s'établit entre les impacts en admettant qu'un impact grave sur un critère soit compensé par un impact bénéfique sur un autre critère. Lorsqu'il s'agit d'environnement il est donc préférable d'éviter les méthodes compensatoires telles que la somme pondérée ou l'analyse multicritère hiérarchique (Benoit & Rousseaux, 2003), (Rowley, et al., 2012), (Cinelli, et al., 2014).

L'analyse multicritère repose le plus souvent sur des fonctions mathématiques qui peuvent soit être complexes à mettre en œuvre, soit être consommatrices de temps, même si de plus en plus d'outils sont développés pour remédier à ces problématiques.

Il est difficile de définir la méthode la plus adéquate. Cependant, nous pouvons identifier des critères à respecter pour gérer le multicritère. Elle doit être simple à mettre en place ou transparente pour les utilisateurs. Elle doit notamment prendre en compte l'indépendance/dépendance des indicateurs les uns par rapport aux autres.

## 6. Bilan

Au vu du contexte dans lequel s'inscrivent ces travaux, 2 critères sont primordiaux pour une bonne méthode de sélection des IPE : 1) elle doit être orientée développement de produits et considérer tout le cycle de vie du produit et 2) elle doit prendre en considération tous les acteurs de la chaîne de valeur et leurs besoins. Elle doit être simple à comprendre et à mettre en place. Elle doit permettre la prise de décision rapide avec la gestion du multicritère.

Le second challenge repose donc sur la mise en place d'une démarche de sélection des IPE en fonction des besoins des acteurs de la chaîne de valeur, internes et externes à l'entreprise, et qui permettent de faire un choix pertinent parmi tous les indicateurs existants.

Les méthodes existantes sont principalement concentrées sur la définition d'un seul jeu d'indicateurs pour toute l'entreprise ou une famille de produits. Ce jeu doit prendre en considération toutes les problématiques environnementales majeures et doit s'adapter à tous, et à leurs besoins qui peuvent être contradictoires. Elles ne différencient pas des jeux d'indicateurs en fonction des différents acteurs de la chaîne de valeur. Il est également important de noter que certaines de ces méthodes mentionnent de prendre en compte les besoins des acteurs sans donner de détails sur leurs besoins. Aucune méthode ne répond simultanément à l'approche produit et à la prise en compte de l'acteur.

Les jeux d'IPE retenus devront permettre la prise de décision. Une méthode de gestion du multicritère doit être utilisée pour aider à cette prise de décision. Elle devra être simple à utiliser.

## Chapitre 3. Intégration des acteurs de la chaîne de valeur pour l'amélioration de la performance environnementale

Pour rappel, l'intégration des fournisseurs et celle des clients/utilisateurs sont des facteurs de succès de la mise en place d'une démarche d'écoconception (cf. page 32). La nécessité d'un système de conception intégré avec les acteurs externes de la chaîne de valeur est d'autant plus vraie lorsque l'entreprise concernée est à la fois le client de fournisseurs et le fournisseur d'autres clients ou que les produits développés s'intègrent dans d'autres systèmes et qu'ils ne peuvent pas remplir seuls leur fonction.

D'un point de vue environnemental, l'intégration de la responsabilité sociétale des entreprises doit être perçue comme une valeur partagée et prise en compte dans l'analyse de la chaîne de valeur (Porter & Kramer, 2006). L'analyse de la chaîne de la valeur environnementale est une combinaison de la prise en compte de l'environnement, de la chaîne de valeur client et du management de la chaîne logistique (Rose & Stevels, 2000). Les flux environnementaux (monétaires ou physiques) sont intégrés afin d'avoir une valeur économique totale du produit au lieu d'une valeur marketing seule (Fasse, et al., 2011). Cela signifie donner une valeur par exemple aux impacts environnementaux. Les outils purement économiques de l'analyse de la valeur intègrent le coût environnemental et l'analyse des bénéfices ou des mesures physiques pouvant être converties en coûts (ex. l'énergie) (Fasse, et al., 2011). Les outils d'analyse environnementale intègrent des aspects économiques (ex. l'analyse des coûts du cycle de vie) (Fasse, et al., 2011).

Dans la suite, nous allons voir quelles sont les activités des fournisseurs et des clients/utilisateurs pouvant être intégrées au développement de produits pour créer de la valeur et améliorer la performance environnementale.

## 1. Intégration des fournisseurs

Les fournisseurs étant de plus en plus impliqués dans les premières phases du développement de produits, il est nécessaire d'avoir une forte relation avec certains d'entre eux pour améliorer la qualité et l'innovation (Goffin, et al., 2006), (Michelin, et al., 2014). Mais, dans la majorité des cas, l'environnement est géré comme une contrainte et non comme une composante du développement de produits (Tingström & Karlsson, 2006), (Michelin, et al., 2014).

Les fournisseurs peuvent devenir proactifs et par eux-mêmes proposer des solutions permettant d'améliorer les performances environnementales (ne plus se cantonner à respecter les réglementations) et valoriser leur démarche afin d'en tirer un bénéfice en matière de part de marché et d'image. En contrepartie, les demandes des clients doivent aussi évoluer dans le même sens et considérer leurs fournisseurs comme une force motrice pour atteindre leurs objectifs environnementaux (Michelin, et al., 2014). Certains clients intègrent dans leur cahier des charges des objectifs environnementaux que le fournisseur doit satisfaire autres que ceux poussés par les réglementations (Michelin, et al., 2014), mais cela reste marginal.

Plusieurs considérations environnementales peuvent être intégrées dans le choix des fournisseurs (Humphreys, et al., 2003) :

- le coût environnemental (coût du traitement des pollutions et coût des améliorations en matière de performance environnementale) ;
- le management des compétences ;
- l'image environnementale ;
- l'écoconception ;
- le système de management environnemental ;
- les compétences environnementales ;

- un système de décision développé.

Une des difficultés à traiter les problématiques environnementales entre fournisseurs et clients est le manque d'échange d'informations environnementales pour réaliser des analyses environnementales (Michelin, et al., 2014), (Aschehoug, et al., 2012). Cela est également vrai pour les autres acteurs de la chaîne de valeur. L'information est indispensable et provient en grande majorité des parties prenantes externes à l'entreprise (Aschehoug, et al., 2012). La majorité des données échangées concerne la conformité réglementaire (ex : REACH, RoHS, ErP) (Michelin, et al., 2014), (Rodrigues, et al., 2016). Aschehoug et al. (2012) ont montré que l'entreprise sous-estime les informations détenues par les parties prenantes. Cet écart entre les informations réellement détenues et les informations envisagées comme détenues par le client est induit par les pratiques courantes de demande d'information qui restent limitées. Les causes sont principalement le manque d'échanges, la non-visibilité du potentiel de l'information, le manque de connaissances et de compétences, le manque d'objectifs stratégiques environnementaux et le manque d'importance donnée à la partie prenante. Il peut être comblé par l'augmentation des engagements entre les différents partenaires et la mise en relation des bons interlocuteurs (Nakano & Hirao, 2011). L'intégration des fournisseurs devient donc un paramètre clé pour le partage des données nécessaires à l'évaluation environnementale (Prinçaud, 2011), (Aschehoug, et al., 2012).

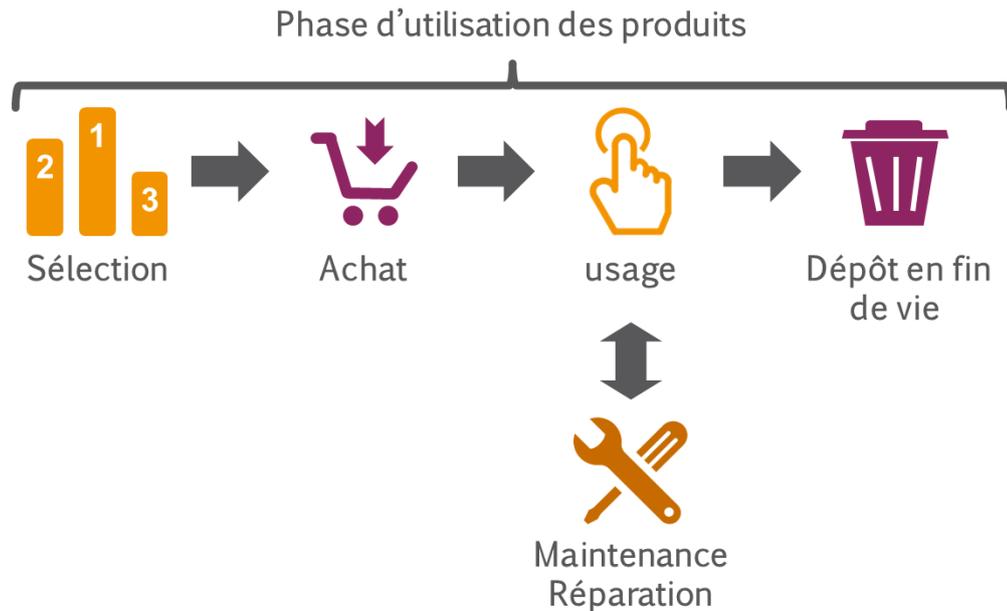


## 2. Intégration des clients / utilisateurs

### a. Produits consommateurs d'énergie et utilisation

Les produits consommateurs d'énergie lors de leur utilisation sont connus pour avoir la majorité de leurs impacts environnementaux liés à la phase d'utilisation (Brezet & Van Hemel, 1997), (Lockton, et al., 2008), (Wever, et al., 2008). Cela est notamment vrai pour les produits thermiques tels que les fours, les réfrigérateurs, les moteurs etc, mais cela peut être faux pour les produits à prépondérance électronique tels les ordinateurs, les téléviseurs etc pour lesquels l'impact des composants électroniques (matières premières, traitements en fin de vie) avec des durées de vie relativement courtes peut être plus important que l'impact de la phase d'usage (Rousseaux & Apostol, 2000).

La phase d'utilisation (figure 13) comprend la sélection, l'achat, l'utilisation, la maintenance, la réparation, et la mise au rebut des produits (Koskijoki, 1997) comme cité dans (Bhamra & al. 2011). Le client/utilisateur du produit a donc une influence sur le choix de l'équipement, les conditions d'utilisation du produit ainsi que sur la fin de vie de celui-ci, lorsqu'il prend la décision du choix du traitement en fin de vie son produit, ou de le revendre.



**Figure [13]** Phase d'utilisation inspirée de Koskijoki, M. (1997) comme cité dans (Bhamra & al. 2011)

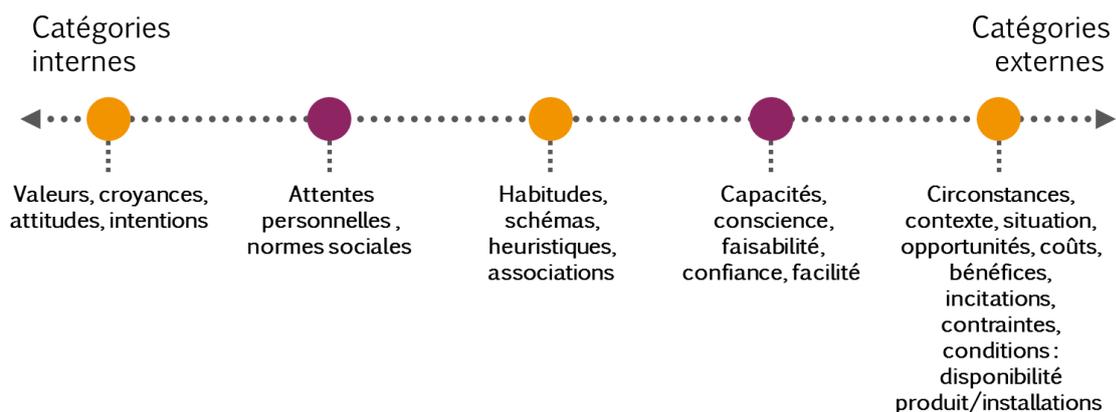
#### b. Modélisation de la phase d'utilisation

En ACV, la modélisation de l'usage se base souvent sur des données secondaires (génériques), des données agrégées et issues d'hypothèses de bases. Généralement, un scénario d'usage moyen est utilisé en ne prenant pas en compte l'importance du contexte d'usage (positif ou négatif) sur les performances environnementales. Il semble que cela soit principalement dû à la difficulté d'obtenir des données fiables et suffisantes et parfois à la grande diversité des paramètres influençant la performance d'usage. Or, pour bien modéliser la phase d'utilisation, il est indispensable d'avoir une bonne compréhension de l'usage réel du produit. L'intégration du comportement de l'utilisateur en ACV est considérée comme essentielle pour son développement (Hellweg & Mila i Canals, 2014). Il y a donc de plus en plus d'études qui intègrent l'usage en ACV (Eberle & Franz, 1998), (Yun, et al., 2009), (Telenko & Seepersad, 2014), (Ma & Kim, 2015). Mais, il y a peu d'études qui s'intéressent à l'intégration des sciences du comportement dans les analyses environnementales (Polizzi di Sorrentino, et al., 2016). Une des principales limites à l'utilisation de scénarios réalistes en ACV est l'effort à fournir pour collecter les données primaires, c'est-à-dire les données réelles d'utilisation.

Eberle & Franz (1998) ont été parmi les premiers à modéliser la phase d'utilisation en Inventaire du Cycle de Vie (ICV) pour une voiture et à identifier les paramètres importants. Pour améliorer la modélisation de l'usage, il est possible de considérer plusieurs scénarios (le meilleur scénario, le pire, par genre, par culture, etc.) et d'estimer la répartition des utilisateurs dans chacun de ces scénarios (Polizzi di Sorrentino, et al., 2016). En sciences sociales, on parle de segmentation lorsque l'on répartit les utilisateurs par type. La segmentation est aussi utilisée pour les études marketing. Il est également possible de simuler plusieurs scénarios à l'aide de la matrice SRI (Stranford Research Institute) (Cluzel, 2012). La matrice SRI consiste à élaborer différents scénarios

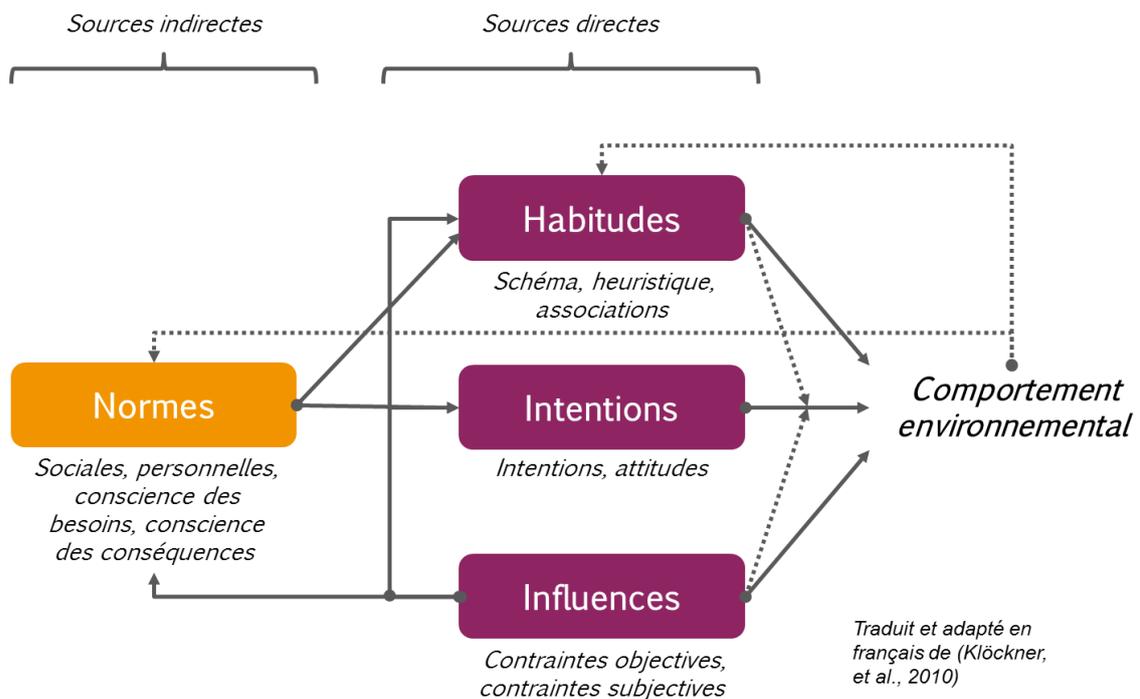
fixes (futur attendu, pire des cas, meilleur des cas, et une alternative très différente). Telenko & Seepersad (2014) proposent de modéliser le contexte d'usage en prenant en compte plusieurs facteurs d'utilisation : le facteur humain (qui ? Compétences et habitudes ?), le facteur situationnel (où ? Quand ? Pourquoi ?), le facteur produit (conception et spécification influençant l'usage). Ma & Kim (2015) proposent de prendre en compte l'influence de la durée de vie et montrent une forte variation sur les impacts environnementaux. Egede et al. (2015) analysent l'influence de facteurs internes et externes comme les caractéristiques du véhicule, le lieu d'utilisation et l'influence de l'utilisateur. Pour les produits dont la phase d'utilisation représente la majorité des impacts, la précision de la modélisation est primordiale. Les résultats d'une modélisation avec un scénario d'usage moyen peuvent être totalement éloignés de ceux obtenus en prenant en compte les usages réels du produit (Egede, et al., 2015). Ainsi, différentes utilisations peuvent conduire à différentes intensités d'impacts. Il est donc important de l'analyser et de le comprendre.

Shu et al. (2017) ont référencé les modèles du comportement humain en général et les modèles du comportement pro-environnemental, que l'on retrouve dans la littérature. Ainsi, les comportements dépendent de 5 grandes catégories internes et externes à l'humain (figure 14) : les valeurs, les normes, les habitudes, les capacités et les circonstances.



**Figure [14]** Sources d'Influences du comportement humain (Shu, et al., 2017)

Ces différentes sources du comportement interagissent entre elles pour donner le comportement final de l'utilisateur. Par exemple, pour Klöckner & Blöbaum (2010), le comportement écologique d'un utilisateur est influencé par trois sources directes qui sont les intentions et attitudes, les influences (objectives ou subjectives) et les habitudes (schéma d'habitude, heuristique, les associations d'habitudes), et une source indirecte qui concerne les normes (sociales, personnelles, conscience des besoins, conscience des conséquences) (figure 15).



**Figure [15]** Sources influençant le comportement de l'utilisateur (Klöckner & Blöbaum, 2010)

Tant que les différents comportements et leur pondération par rapport à une utilisation de base ne seront pas bien modélisés, il sera difficile de comprendre quel comportement ou combinaison de comportements est potentiellement le plus impactant. Une bonne compréhension des usages et de leur influence sur la performance environnementale permettra de mieux définir les stratégies d'amélioration.

### c. Stratégies d'éco-utilisation

La demande en énergie dépend à la fois de l'efficacité énergétique du produit et de la manière dont il est utilisé (Tang & Bhamra, 2008), (Wever, et al., 2008), (Bhamra, et al., 2011). He, et al. (2012) ont montré à l'aide de deux exemples (une scie sauteuse et un véhicule électrique hybride) que le contexte d'usage a une influence sur les préférences de l'utilisateur lors de l'usage et sur la performance du produit. Il existe un consensus dans la littérature sur le potentiel environnemental du comportement des utilisateurs et la manière dont ils interagissent avec les produits (Wever, et al., 2008), (Daae & Boks, 2015).

Plusieurs barrières comportementales à une utilisation efficace de l'énergie peuvent être définies (Tang & Bhamra, 2008) :

- la nature invisible de l'énergie ;
- la méconnaissance des liens entre l'utilisation d'énergie et ses impacts environnementaux ;
- le manque d'intérêt pour l'énergie ;
- la déresponsabilisation (un effort individuel ne peut pas faire la différence) ;

- le manque de confiance dans les informations données (exemple dans les labels énergie) ;
- et, le mode de vie (de plus en plus de produits consommateurs d'énergie sont utilisés).

La manière dont les utilisateurs interagissent avec les produits est également influencée par la manière dont ils sont conçus (Norman, 1988). Cette phase du cycle de vie n'est souvent pas considérée en détail par les concepteurs (Bhamra, et al., 2011). L'intégration de l'utilisateur dans le développement de produits est également une occasion d'amélioration de la performance environnementale globale du produit. Le produit est une interface entre l'utilisateur et l'utilisation et peut être conçu pour encourager un comportement pro-environnemental tout au long du cycle de vie (Cor & Zwolinski, 2014). Quatre facteurs jouent un rôle important dans les interactions humain/produit : le produit, l'utilisateur, son but et le contexte d'usage (Wever, et al., 2008). Attention cependant, l'intérêt d'écoconcevoir un produit peut être perdu, si un produit conçu, pour avoir moins d'impact en production, a de forts impacts en utilisation et vice-versa. Mais les habitudes des consommateurs sont aussi indépendantes de la conception et ont un effet direct sur la consommation énergétique (JRC, 2014). De ce fait, l'analyse des comportements des utilisateurs peut fournir des informations importantes au concepteur pour améliorer l'utilisation des produits et pour établir des stratégies d'écoconception efficaces (Cor & Zwolinski, 2014) (Bhamra, et al., 2011).

La plupart des solutions d'écoconception mises en place sont aujourd'hui axées sur l'amélioration des technologies des produits (Cor & Zwolinski, 2014) et ne considèrent pas suffisamment l'analyse des comportements des utilisateurs. Cela est renforcé par la directive ErP et celle sur l'étiquetage énergétique<sup>4</sup> des produits qui poussent les entreprises à l'action sur l'amélioration environnementale technologique.

La prise en compte de l'utilisateur dans le développement de produits peut se faire de 3 manières (Kaulio, 1998).

- La conception pour l'utilisateur/client : utilisation de données sur l'utilisateur et/ou de modèles génériques de comportement.
- La conception avec l'utilisateur/client : utilisation de données sur l'utilisateur, de modèles génériques de comportement et proposition de différents concepts à l'utilisateur pour analyser sa réaction.
- La conception par l'utilisateur/client : le client est acteur du développement de son propre produit.

Plusieurs méthodes peuvent être appliquées.

- Le design thinking. Cela consiste à faire de l'innovation en impliquant une démarche basée sur le retour des utilisateurs finals. Il consiste à donner une

---

<sup>4</sup> Directive 2010/30/UE du 19 mai 2010 concernant l'indication, par voie d'étiquetage et d'informations uniformes relatives aux produits, de la consommation en énergie et en autres ressources des produits liés à l'énergie (refonte)

expérience client unique à chaque utilisateur, pour répondre au mieux à ses besoins.

- L'innovation dirigée par l'utilisateur (user-driven innovation). Cela consiste à intégrer l'utilisateur dans le processus d'innovation, notamment dans la génération d'idées pour répondre à ses propres besoins (Riaz & Talib, 2010).
- La conception centrée sur l'utilisateur vise à adapter complètement le produit à l'utilisateur final plutôt que d'imposer une utilisation à l'utilisateur. Ici, par définition l'utilisateur est impliqué d'une manière ou d'une autre dans le processus de conception. On trouve, ici, la norme ISO 9241-210 qui spécifie que la conception centrée sur l'utilisateur « est fondée sur une compréhension explicite des utilisateurs, des tâches et des environnements » (ISO 9241-210, 2011).
- La conception pour un comportement éco-responsable qui vise à changer les comportements des utilisateurs soit par eux-mêmes, soit par la fonction du produit (Lilley, et al., 2005), (Rodriguez & Boks, 2005), (Tang & Bhamra, 2008), (Wever, et al., 2008), (Bhamra, et al., 2011).

En écoconception, Green, et al. (2006) ont été parmi les premiers à avoir proposé de prendre en compte le contexte d'usage pour être sûr que le produit rencontre son public et soit utilisé : comment et où est utilisé le produit ? Par qui ? Quel est le marché actuel ?

Nous nous intéressons plus en détail à la conception pour un comportement éco-responsable, car il est possible de définir des stratégies pour agir une fois le produit conçu et mis sur le marché. Cela est particulièrement intéressant pour les entreprises dont le processus de conception est long et dont les produits déjà sur le marché ont une durée de vie longue. Les autres méthodes s'appliquent lors du développement de produits. Il est aussi possible d'agir sur le comportement humain, ce qui fait partie des objectifs de ces travaux de thèse.

#### d. La conception pour un comportement éco-responsable

L'induction d'un comportement environnemental peut se faire au niveau de deux stratégies principales : l'adéquation entre les fonctions du produit et l'usage, et l'adaptation du comportement (Lilley, et al., 2005), (Rodriguez & Boks, 2005), (Tang & Bhamra, 2008), (Wever, et al., 2008), (Bhamra, et al., 2011).

- Adéquation produit/usage

La stratégie de correspondance des fonctions (Rodriguez & Boks, 2005), consiste à éliminer les non-correspondances entre les fonctions délivrées par le produit et les fonctions souhaitées par l'utilisateur. Ici, les changements se font au niveau du produit.

Pour déterminer les usages, Yannou et al. (2013) proposent un jeu de conception basé sur les usages par simulation de ceux-ci. Ils commencent par générer un espace de scénarios d'usage par questionnaire de marché ou par données déclaratives d'experts représentatifs d'un jeu d'utilisateurs. En utilisant la technique de résolution de problèmes par satisfaction des contraintes, ils en définissent les scénarios d'usage possibles.

Ensuite, ils définissent un indicateur d'usage qui mesure le potentiel à satisfaire la totalité de tous les scénarios d'usage possibles avec ceux attendus à la première étape. Cet indicateur permet de faire le choix du meilleur produit pour satisfaire les usages.

- Adaptation du comportement

La stratégie d'adaptation du comportement se décompose en trois niveaux. Le premier consiste à retourner à l'utilisateur des informations spécifiques sur son comportement et lui laisser le choix d'adapter ou non son comportement. Le second consiste à concevoir des produits qui par le biais d'obstacles vont éviter une utilisation non éco-responsable ou rendre l'utilisation éco-responsable tellement simple que cela sera difficile d'avoir un comportement non éco-responsable. Le troisième niveau est la conception de produits intelligents qui s'adaptent aux comportements des utilisateurs (Lilley, et al., 2005), (Tang & Bhamra, 2008), (Bhamra, et al., 2011).

Les stratégies de conception sont classées en fonction du degré de pouvoir de décision entre l'utilisateur et le produit :

- soit la stratégie implique que ce soit l'utilisateur qui change son comportement ;
- soit le produit force le changement d'utilisation.

Les stratégies peuvent aussi être antérieures à l'utilisation, c'est-à-dire que l'on agit sur le comportement de l'utilisateur avant l'usage (engagement, fixation d'objectifs, information, modélisation), ou postérieures à l'utilisation (retours d'informations, récompenses) (Abrahamse, et al., 2005). Elles peuvent aussi agir sur la motivation, la perception (information) et sur les circonstances du comportement (le contexte, l'environnement) (Steg & Vlek, 2009).

On retrouve 7 stratégies, qui peuvent être regroupées en 3 grandes catégories qui sont : guider le changement, maintenir le changement et assurer le changement (Lilley, et al., 2005), (Tang & Bhamra, 2008), (Wever, et al., 2008), (Lilley & Lofthouse, 2009), (Bhamra, et al., 2011), (Shu, et al., 2017).

### 1. Guider le changement par retour d'informations.

Pour encourager un comportement éco-responsable, il est important de donner un retour aux personnes concernées. En effet, l'impact environnemental n'est visible pour l'utilisateur qu'après avoir opéré une action, et ce dans un futur plus ou moins proche. Donner un retour d'information permet de réduire ce délai et de sensibiliser plus fortement l'utilisateur (Polizzi di Sorrentino, et al., 2016). Il s'agit de donner à l'utilisateur des informations spécifiques sur ses impacts environnementaux et de lui donner la possibilité d'adapter son comportement. Cela doit être accompagné d'une action éducative et de fixation d'objectifs réalistes. Les utilisateurs doivent faire le lien entre l'information reçue, leurs propres habitudes et les impacts environnementaux et sociaux, ce qui rend difficile le changement pour une majorité d'utilisateurs (Bhamra, et al., 2011). De plus, le fait de donner de l'information n'induit pas forcément un changement du comportement (Wilson, et al., 2016). Cette catégorie compte 3 stratégies.

- **Informer « Eco-Information ».** On éduque le consommateur en rendant des informations visibles et accessibles pour lui faire prendre conscience de ses

actions (Lilley & Lofthouse, 2009). Par exemple, Renault Truck (Renault Truck, 2012-2014) propose un outil en ligne permettant de calculer le coût de sa consommation énergétique et des émissions dans l'air du type CO<sub>2</sub>, particules fines (PM), oxydes d'azote NO<sub>x</sub>, etc. Cela est fait à partir de déclarations clients moyennes sur la consommation énergétique et permet d'estimer les gains potentiels sur ces mêmes informations à partir de l'objectif de réduction de consommation d'énergie (en l/h) que se fixe le client. L'outil proposé par Volvo Truck fonctionne sur le même principe (Volvo Trucks, 2016).

- **Choisir « Eco-Choice ».** On induit une prise d'initiative de la part du consommateur (Lilley & Lofthouse, 2009). Il s'agit de laisser le choix à l'utilisateur entre plusieurs options en lui donnant un certain nombre d'informations environnementales pour qu'il réfléchisse et agisse de lui-même.
- **Retour d'expérience « Eco-Feedback ».** Le but est d'informer directement (en temps réel) le consommateur des impacts sur l'environnement à la suite de son action (Lilley & Lofthouse, 2009). Cette stratégie provoque une prise de conscience réelle et une réflexion sur le comportement. L'eco-feedback est souvent utilisé pour réduire la consommation énergétique. Il sert d'outil pour illustrer le coût (temps, argent) de la consommation et génère des réflexions ou intentions d'attitude de l'utilisateur (Wilson, et al., 2015). L'information seule n'est pas suffisante. Il faut porter une attention sur le moyen dont l'information est transmise et comment cela motive les actions individuelles. Dans l'idéal, l'information doit être fournie lorsque l'utilisateur a une action sur la consommation énergétique et/ou lorsqu'il fait la demande de l'information. Le retour rapide après une action aide à améliorer le lien cognitif entre l'action et l'effet. Plus le retour est fréquent et plus il est effectif (Abrahamse, et al., 2005). L'information doit être succincte pour capturer l'intérêt immédiat, mais peut varier d'un utilisateur à un autre. Le retour de la consommation d'énergie peut, par exemple, être présenté avec différentes mesures (Wilson, et al., 2015).
  - L'unité d'énergie (ex kWh), généralement perçue comme trop abstraite ou trop difficile à relier aux activités journalières. Cette indication peut cependant servir à instaurer la confiance du fait de son côté scientifique et permet la comparaison par rapport à une donnée moyenne.
  - Le coût semble être plus utilisable sauf si le coût n'est pas une priorité par rapport à la consommation énergétique nécessaire pour satisfaire le besoin.
  - Les impacts environnementaux, ils aident à faire le lien entre l'action et les conséquences environnementales, mais la majorité des personnes ne savent pas comment interpréter l'information. Cette information est basée sur des estimations qui peuvent induire une non-responsabilité de l'utilisateur, et il faut faire face aux sceptiques de ce type de mesures.

Ces 3 stratégies sont les plus utilisées, car potentiellement les plus simples à mettre en œuvre et les moins coûteuses (Shu, et al., 2017).

## 2. Maintenir le changement par retour d'informations en forçant l'utilisateur à agir.

La conception du produit permet l'utilisation éco-responsable en créant des obstacles à une utilisation non éco-responsable ou en rendant l'utilisation éco-responsable si facile qu'elle en devient évidente. On trouve 2 stratégies.

- **Inciter « Eco-Spur ».** Le but est d'encourager l'utilisateur à adopter un comportement éco-responsable de son plein gré en lui fournissant de l'information et une motivation par le biais d'une récompense ou une punition, par exemple financière (Lilley & Lofthouse, 2009).
- **Guider « Eco-Steer ».** On facilite le changement du consommateur en contraignant directement la conception du produit (Lilley & Lofthouse, 2009). Le comportement désiré devient le choix évident à adopter. Cela se fait par l'analyse des comportements. L'utilisateur est souvent fortement influencé par le réglage par défaut (Polizzi di Sorrentino, et al., 2016). Il va avoir tendance à penser que le choix par défaut est meilleur et par conséquent choisir cette option. Les utilisateurs ne veulent pas prendre de décision et se contentent des bénéfices de ce qu'ils ont. Une étude montre que l'utilisation du recto verso par défaut sur une imprimante réduit de 15 % les consommations de papier, et que cela est plus efficace que d'augmenter de 10 % les taxes sur le papier (2 % de réduction) (Egebark & Ekström, 2013). Le salarié n'est pas directement concerné lors de l'application d'une taxe, car c'est transparent pour lui. C'est l'entreprise qui paye.

### 3. Assurer le changement par le produit.

Il s'agit du développement de produits intelligents qui s'adaptent automatiquement aux changements ou ayant d'importants obstacles à une utilisation non éco-responsable. L'utilisateur n'a pas de contrôle, ou très peu, sur l'utilisation éco-responsable. On trouve 2 stratégies.

- **Forcer « Eco-Technical Intervention ».** La conception du produit intègre des technologies avancées pour restreindre, ou contrôler automatiquement le comportement du consommateur (Lilley & Lofthouse, 2009).
- **Automatiser « Clever design ».** Le but est de rendre le comportement éco-responsable automatique sans changer les habitudes du consommateur ni augmenter sa conscience environnementale par l'innovation du design du produit (Lilley & Lofthouse, 2009).

Attention, lorsqu'une technologie est installée, par exemple un capteur de consommation, il est important de comparer les gains potentiels en phase d'utilisation et les impacts liés à la production, l'installation et la gestion en fin de vie de cette technologie ajoutée (Cor & Zwolinski, 2014). Cela peut être évalué par une ACV.

Tang & Bhamra (2008) proposent de classer les différentes sources d'influence du comportement des utilisateurs (cf. page 52) et les stratégies de conception pour un comportement éco-responsable (figure 16). Plus les stratégies laissent l'utilisateur maître du changement et plus il faut travailler sur ses intentions, et la sensibilisation à son comportement. On peut voir que le choix de la stratégie peut évoluer au cours du temps, aller de l'information au produit intelligent pour éduquer, puis maintenir, puis

assurer le passage à un comportement éco-responsable. C'est par exemple le cas de Scania Truck (Shu, et al., 2017), qui est passé d'un système de retour en temps réel sur la conduite (évaluation et recommandations) à un système automatisé qui a une action directe sur la vitesse et l'embrayage du camion en fonction de la topographie et du mode de conduite sélectionné par le client, dans le but de réduire la consommation énergétique.

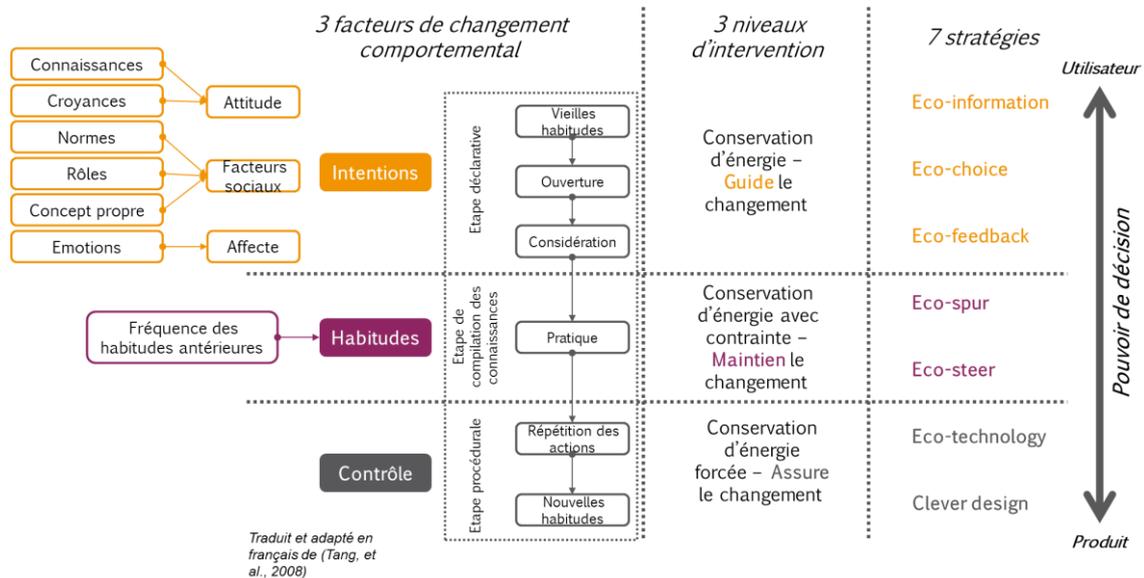


Figure [16] Liens entre comportements et stratégies de conception (Tang & Bhamra, 2008)

La collecte d'informations dans le cadre de la mise en place de stratégies pour adapter le comportement permet également d'être une source d'information pour adapter les fonctionnalités du produit souhaitées par le client à l'usage réel, et faire évoluer le choix de la stratégie pour un comportement éco-responsable.

Lors du choix et l'implémentation de stratégies pour induire un comportement environnemental, plusieurs indicateurs peuvent être utiles pour en évaluer la pertinence comme l'impact environnemental de la stratégie, l'efficacité sur les utilisateurs, etc. (Cor & Zwolinski, 2014).

Plusieurs motivations peuvent mener l'utilisateur à changer son comportement. Srivastava & Shu (2015) comme cité dans (Shu, et al., 2017) en identifient trois : égoïste, socioculturelle et altruiste. Ainsi, la motivation égoïste vise à minimiser les coûts, les temps, les étapes et à augmenter l'efficacité et le plaisir. La motivation socioculturelle vise à augmenter le prestige, le sentiment d'appartenance et à rejoindre la tendance. Et, la motivation altruiste vise à minimiser les impacts environnementaux et à améliorer la vie de tous. En fonction de la motivation de l'utilisateur, la manière dont la stratégie pour un comportement éco-responsable sera appliquée pourra être différente. Il est nécessaire de s'adapter à la motivation de l'utilisateur. Par exemple, pour favoriser le fait d'éteindre la lumière en quittant une pièce, si l'eco-feedback est appliqué : dans le cas de la motivation égoïste, il s'agira de montrer le potentiel d'argent gagné ou perdu en fonction de la bonne ou mauvaise pratique, pour la motivation socioculturelle de

montrer l'impact sur les réseaux sociaux de cette pratique, et pour l'altruiste de montrer les bénéfices écologiques sur les ressources naturelles.

Un autre élément à prendre en compte lorsque l'on souhaite induire un comportement éco-responsable ou modéliser l'usage en ACV est le potentiel effet rebond. L'effet rebond correspond à la réponse à une mesure prise pour réduire les impacts environnementaux qui contrebalance l'effet de la mesure prise (Hertwich, 2005). Cet effet rebond a depuis longtemps mis en évidence, notamment en 1865, par l'économiste W.S. Jevons (Jevons, 1866), (Polimeni, et al., 2008) qui a indiqué que l'emploi de technologie économique en carburant n'est pas équivalent à diminution de la consommation d'énergie. Les améliorations technologiques rendent la technologie plus rentable et donc on peut observer une utilisation plus importante de cette source d'énergie. Cela peut se produire lorsque l'on change la conception ou lorsque l'on donne un retour d'information. Par exemple, si l'information donnée rend compte à l'utilisateur qu'il consomme moins que la moyenne, il peut perdre de l'intérêt et augmenter sa consommation sans se sentir coupable. L'inclusion des effets rebond en ACV est toujours une problématique (Vivanco & Van der Voet, 2014). Les améliorations apportées par certaines stratégies d'éco-utilisation peuvent se perdre au fur et à mesure du temps, c'est pourquoi l'effet rebond doit s'intégrer dans la stratégie d'écoconception globale. Par exemple, pour l'eco-feedback, (Serna-Mansoux, et al., 2014) propose un modèle d'aide à la décision prenant en compte l'usage et les interactions usage/utilisateur lorsque celles-ci sont influencées par un retour. Un indicateur appelé taux d'atténuation est intégré pour modéliser les changements dans l'efficacité de l'eco-feedback au cours du temps. L'analyse et le suivi des comportements deviennent alors essentiels pour comprendre les impacts de l'effet rebond. En ACV, même si des analyses de sensibilité sont réalisées, c'est généralement sur des hypothèses de base. Il sera donc nécessaire de conduire une ACV complémentaire pour s'assurer qu'il n'y a pas eu de transferts de pollution. L'emploi de l'ACV conséquente peut s'avérer être nécessaire pour montrer les conséquences de la mise en place de stratégies d'éco-conception sur d'autres systèmes affectés indirectement (Mason Earles & Halog, 2011). L'efficacité de la mise en place d'un comportement éco-responsable repose donc sur l'identification des comportements à changer, la détermination des facteurs induisant ce comportement, la mise en place de la stratégie adéquate et l'évaluation de l'effet de la stratégie (Steg & Vlek, 2009).

### 3. Bilan

L'intégration de la composante environnementale dans la chaîne de valeur passe donc par la connaissance et l'échange d'informations. L'intégration de l'usage et du comportement humain est encore peu considérée dans le développement de produits et l'écoconception. De nombreuses barrières pour améliorer les impacts environnementaux en phase d'utilisation des produits consommateurs d'énergie sont liées à l'information, à son transfert, et à l'éducation.

Le troisième challenge, pour les entreprises mettant sur le marché des produits consommateurs d'énergie, concerne l'emploi d'indicateurs de performance environnementale judicieusement choisis pour aider les concepteurs à améliorer leurs

produits (échange avec les acteurs de la chaîne de valeur en amont de la conception) et à communiquer avec le client et/ou l'utilisateur final du produit afin d'induire un comportement environnemental en phase d'utilisation. La collecte d'informations sur l'usage va permettre d'améliorer les produits dans une démarche d'écoconception globale sur le cycle de vie. Cette action est d'autant plus importante pour les entreprises mettant sur le marché des produits ne pouvant pas remplir seuls leur fonction.

## Chapitre 4. Problématiques et méthodologie

Ce second chapitre permet de poser les problématiques de thèse auxquelles ces travaux s'efforcent de répondre. La dernière partie du chapitre présente de façon générale la méthodologie pour y parvenir. Elle sera développée dans la partie 2 et appliquée au cas industriel dans la partie 3.

L'état des lieux précédent montre les différents challenges à relever pour avoir une démarche d'écoconception efficace (figure 17). Ces trois challenges sont : la définition de moyens pour évaluer la performance environnementale et mettre en place des stratégies d'écoconception, la définition d'une méthode de sélection des IPE intégrant les besoins des acteurs de la chaîne de valeur, et la mise en place de stratégies d'éco-utilisation.



**Figure [17]** Récapitulatif des 3 challenges définis dans l'état de l'art, pour avoir une démarche d'écoconception efficace

### 1. Définition des problématiques de thèse

Pour répondre aux différents manques identifiés dans le chapitre 1, cette thèse tente de répondre à une problématique globale qui est :

*Comment l'analyse de la performance environnementale, au travers de la chaîne de valeur, peut-elle influencer la conception, et inciter aux bonnes pratiques d'utilisation des produits ?*

L'évaluation et le suivi de la performance environnementale sont nécessaires pour s'assurer des potentiels gains générés par les actions mises en place. Pour cela, il est utile de mettre en place des IPE. Or la construction de ce jeu d'IPE n'est pas aisée. Cela est d'autant plus vrai qu'en fonction des acteurs impliqués et de leurs besoins, l'utilité et la compréhension de ces indicateurs peuvent varier. Cela nous amène à nous poser une première problématique sous-jacente.

### *1. Comment peut-on sélectionner des IPE pour suivre l'évolution de la performance environnementale prenant en compte les acteurs de la chaîne de valeur ?*

Il est nécessaire de définir une méthode de choix des indicateurs de performance environnementale en fonction de chaque acteur de la chaîne de valeur, internes et externes à l'entreprise. Ces jeux d'indicateurs devront permettre de renforcer l'échange d'informations entre les différents acteurs, dans l'objectif d'améliorer la performance environnementale globale du produit. Dans cette étude, centrée sur les produits consommateurs d'énergie, une attention particulière est portée sur l'intégration des IPE pour l'amélioration environnementale de la phase d'usage. Il est nécessaire de déterminer quelles sont les meilleures stratégies à mettre en place pour une éco-utilisation, et quels outils utiliser pour renforcer l'échange d'informations, la compréhension et les potentiels bénéfiques environnementaux associés.

Nous pouvons définir une seconde problématique sous-jacente.

### *2. Comment peut-on exploiter ces indicateurs en écoconception pour inciter à une utilisation éco-responsable des produits et servir d'avantage concurrentiel ?*

Nous pensons qu'une différence doit être faite entre les cas en BtoC et en BtoB pour l'échange d'informations et les stratégies utilisées. En BtoC, le client est généralement l'utilisateur final, alors qu'en BtoB, le client et l'utilisateur final peuvent être différents. Dans le cas des produits en BtoC qui visent le grand public, le comportement personnel et l'affecte pourront avoir plus d'influence, c'est pourquoi de plus en plus de travaux intègrent ces dimensions dans le développement de produits. Dans le cas des produits en BtoB qui visent les industriels, le comportement pourra être plus pratique et automatique. Le client peut en plus challenger l'utilisateur final à avoir une démarche d'éco-utilisation. Le client et l'utilisateur final peuvent avoir des besoins différents en matière d'informations et d'outils pour mettre en place cette démarche. Il est également nécessaire de mettre en place des outils spécifiques à l'entreprise pour réaliser les analyses environnementales, calculer les IPE et suivre leur évolution, et les intégrer dans le processus de développement de produits. On souhaite passer de la mesure des IPE à la mise en place de solution d'amélioration.

Les enjeux de recherche pour répondre à ces deux problématiques sont de :

- définir une méthode de sélection des IPE prenant en compte les différents acteurs internes et externes à l'entreprise ;
- construire une base de données d'IPE associés aux acteurs et intérêts auxquels ils sont utiles ;
- intégrer l'usage dans toutes les étapes de la chaîne de valeur pour améliorer la performance environnementale globale ;

- définir une méthode permettant d'inciter à une démarche d'éco-utilisation chez le client/utilisateur ;

Comme précisé en introduction, cette thèse s'appuie sur un cas d'étude décrit en partie 3, dont les performances énergétiques et environnementales sont grandement influencées par le mode d'intégration (type de véhicule, technologie d'alimentation, isolation de la caisse isotherme) et le mode d'exploitation (pratiques d'utilisation des clients, type d'activité du client).

Les enjeux de cette thèse pour l'entreprise partenaire sont multiples.

- Fournir aux concepteurs et aux autres services de l'entreprise un outil afin d'intégrer une démarche d'écoconception. Des indicateurs devront leur permettre de ne pas baser leur conception uniquement sur les caractéristiques techniques ou économiques, mais aussi sur les performances environnementales. Les indicateurs doivent faciliter la communication des attentes des différents services.
- Avoir la possibilité pour l'entreprise de comprendre l'utilisation réelle de ses produits pour les faire évoluer.
- Fournir aux clients et utilisateurs finals des préconisations de bonnes pratiques d'utilisation des produits et leurs effets sur les impacts environnementaux.
- Permettre à l'entreprise d'accompagner ses clients dans la réduction de leurs impacts environnementaux et en faire un avantage concurrentiel.
- Intégrer les fournisseurs et autres acteurs de la chaîne de valeur dans le développement de produits. L'intégration des clients et des fournisseurs dans le développement de nouveaux produits a un effet positif sur les performances environnementales (He, et al., 2014).

## 2. Méthodologie opérationnelle, présentation globale

La méthodologie opérationnelle de ces travaux de recherche compte deux grandes étapes (figure 18) :

- création d'une méthode de sélection des IPE et d'une base de données d'IPE ;
- intégration des IPE dans le développement de produits, et pour l'utilisation proposition d'une méthode pour inciter à l'éco-utilisation.

Elles sont détaillées ci-dessous.

### ***1. Première étape : création d'une méthode de sélection des IPE et d'une base de données d'IPE (présentée en partie 2, chapitre 5, appliquée au cas d'étude partie 3, chapitre 8)***

Cette méthode est définie en 5 grandes étapes. Elle permet de sélectionner les IPE en s'adaptant aux différents acteurs de la chaîne de valeur, internes et externes à l'entreprise. La première étape consiste à bien connaître d'un point de vue environnemental son produit et son contexte industriel. La seconde et la troisième étape consistent à identifier les acteurs de la chaîne de valeur et leurs besoins (décider, améliorer, innover, communiquer, suivre et/ou anticiper les réglementations). La quatrième étape consiste à définir des jeux d'IPE utiles pour chaque acteur. La

cinquième étape vise à corréliser les différents jeux d'IPE dans 2 jeux globaux d'IPE (1 pour l'améliorer dans le développement de produits et 1 pour le management et la communication) et mettre en place un système d'aide à la décision. La première et la dernière étape sont habituelles dans les méthodes de sélection existantes (cf. tableau 2).

Cette méthode a donné lieu à la création d'une base de données où chaque indicateur est associé aux acteurs auxquels ils peuvent être utiles, aux objectifs auxquels ils répondent et aux étapes du cycle de vie et objectifs environnementaux à améliorer.

### ***2. Seconde étape : intégration des IPE dans le développement de produits, et pour l'utilisation proposition d'une méthode pour inciter à l'éco-utilisation (présentée en partie 2, chapitre 6, appliquée au cas d'étude partie 3, chapitre 9)***

Une fois les IPE déterminés, il est nécessaire de les intégrer dans le processus de développement de produits pour mettre en place une démarche d'écoconception. Dans un second temps, les IPE seront intégrés dans la phase d'utilisation pour induire une éco-utilisation du produit. Les problématiques environnementales étant principalement liées à la phase d'utilisation, il s'agit d'analyser comment l'usage peut être intégré tout au long de la chaîne de valeur.

Afin d'induire un comportement éco-responsable du client/utilisateur, une méthode est mise en place. Cette méthode se compose de 5 étapes. La première consiste à collecter des informations sur l'usage (fonctionnement du produit et comportements de l'utilisateur). Plusieurs sources de données peuvent être utilisées en fonction des attentes et moyens à disposition. La seconde étape est la réalisation d'un audit client, une première évaluation de la performance environnementale au travers d'IPE. La troisième étape consiste à fournir une proposition d'amélioration. Ici, l'entreprise pourra mettre à disposition un nouveau service d'accompagnement et prendre un avantage concurrentiel. Une fois ces propositions mises en place, une nouvelle évaluation de la performance environnementale est réalisée à l'aide des mêmes IPE afin de s'assurer du bien-fondé des actions mises en place. Finalement, les données collectées sur l'usage permettront de créer une base de données à destination des acteurs du développement de produits pour améliorer le produit en lui-même et ses fonctionnalités.

Les deux méthodes mises en place sont complémentaires. La première sert à définir les IPE et la seconde permet de collecter des informations réelles, indispensables pour une meilleure connaissance du produit, une conception plus efficace et une meilleure utilisation.

### ***3. Application au cas d'étude (présentée en partie 3)***

La méthode de sélection des IPE est testée et validée sur un cas d'étude industriel : les unités de réfrigération pour le transport routier (chapitre 8).

Différents outils ont été adaptés pour intégrer la démarche d'écoconception dans l'entreprise. Ces outils sont adaptés de l'existant (chapitre 9). Un outil d'accompagnement pour l'usage et d'induction d'un comportement éco-responsable a été développé (chapitre 9), basé sur la seconde méthode visant à intégrer les IPE dans une

démarche d'éco-utilisation. Des tests expérimentaux en conditions réelles ont été réalisés pour simuler des comportements et servir de base à la conception de l'outil (partie diagnostic) (chapitre 9).

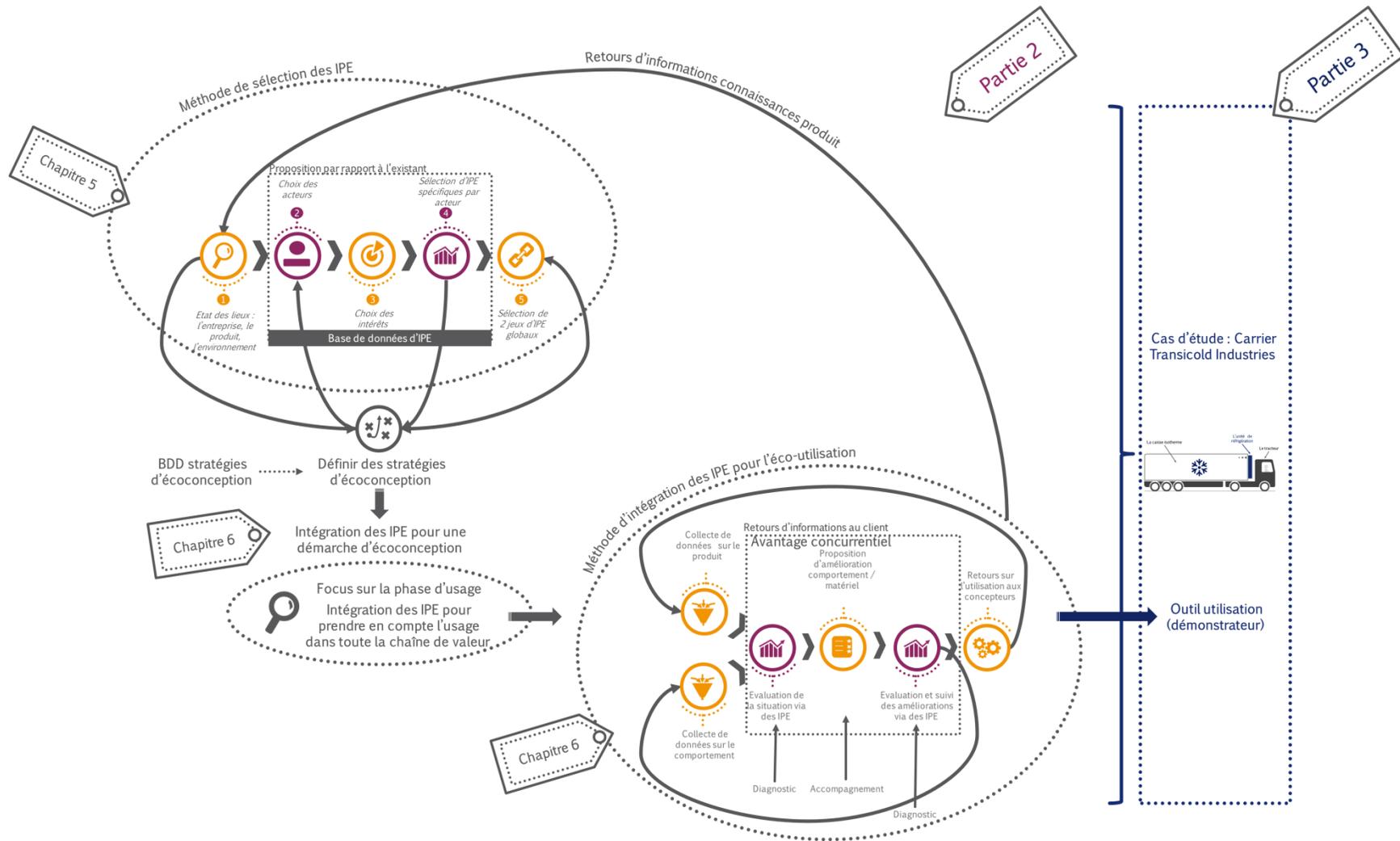


Figure [18] Méthodologie de thèse

# PARTIE 2 : IPE, ECOCONCEPTION ET ECO-UTILISATION

*Cette seconde partie présente la méthodologie développée dans ces travaux pour répondre aux problématiques posées. Le chapitre 5 vise à répondre à la première problématique sous-jacente qui est : comment sélectionner des IPE pour suivre l'évolution de la performance environnementale en prenant en compte toute la chaîne de valeur ? Le chapitre 6 vise à répondre à la seconde problématique sous-jacente qui est : comment exploiter ces IPE en écoconception et inciter à une utilisation éco-responsable des produits et servir d'avantage concurrentiel ?*



**CHAPITRE 5. PROPOSITION D'UNE MÉTHODE DE SÉLECTION DES IPE PRENANT EN COMPTE TOUTE LA CHAÎNE DE VALEUR** 69

- 1. *Étape 1 : L'entreprise, le produit, l'environnement*..... 70
  - a. Aspects et impacts environnementaux du produit.....71
  - b. Analyse du secteur d'activité.....73
  - c. Réglementations environnementales.....73
  - d. Maturité de l'entreprise par rapport à l'écoconception.....74
  - e. Stratégie environnementale de l'entreprise.....80
  - f. Bilan de l'étape 1 .....80
- 2. *Étapes 2 et 3 : Définir les acteurs clés et leurs besoins* ..... 80
  - a. Identifications des acteurs importants à considérer .....81
  - b. Définition des besoins .....81
  - c. Définition des objectifs.....85
  - d. Bilan des étapes 2 et 3.....85
- 3. *Étape 4 : choix des IPE spécifiques aux différents acteurs* ..... 86
  - a. Base de données des IPE .....86
  - b. Outil de sélection des IPE .....87
  - c. Bilan de l'étape 4 .....92
- 4. *Étape 5 : Choix des IPE globaux* ..... 92
- 5. *Gestion des IPE et prise de décision* ..... 94
  - a. Comment utiliser la méthode.....94
  - b. Définition des objectifs.....96
  - c. Gestion du multicritère et prise de décision.....96
- 6. *Synthèse de la méthode de sélection des IPE*..... 97

**CHAPITRE 6. INTÉGRATION DES IPE DANS LA DÉMARCHÉ D'ÉCOCONCEPTION**..... 99

- 1. *Sélection des stratégies d'écoconception* ..... 99
- 2. *Utilisation des IPE pour intégrer la phase d'utilisation dans la chaîne de valeur* ..... 101
  - a. L'entreprise.....102
  - b. Approvisionnement (les fournisseurs).....102
  - c. Les distributeurs, autres entreprises du système global et intégrateurs de solution.....103
  - d. Utilisation .....103
  - e. Les filières de fin de vie .....103
- 3. *Utilisation des IPE pour inciter à une utilisation éco-responsable des produits et servir d'avantage concurrentiel*..... 105
  - a. Collecte d'informations .....110
  - b. Évaluation de la performance environnementale de l'usage/diagnostic .....112
  - c. Identification des bonnes et mauvaises pratiques et proposition d'amélioration .....113
  - d. Suivi de l'évolution de la performance environnementale.....114
  - e. Retours aux concepteurs .....114
- 4. *Conclusions* ..... 114

## Chapitre 5. Proposition d'une méthode de sélection des IPE prenant en compte toute la chaîne de valeur

Rappels de l'état de l'art.

- L'information et son partage sont très importants. Celle-ci doit être facilement collectée et exploitable, d'où l'intérêt d'utiliser des IPE.
- La bonne sélection des IPE est un facteur de succès dans le cadre d'une démarche d'écoconception.
- Les méthodes existantes proposent de sélectionner un jeu d'indicateurs unique devant prendre en considération tous les aspects environnementaux significatifs, et dans la mesure du possible s'adapter à tous les acteurs de la chaîne de valeur pouvant être concernés. Ces méthodes ne définissent pas quels sont les acteurs et quels sont leurs besoins.
- Les acteurs de la chaîne de valeur peuvent avoir des besoins et des connaissances différentes des uns des autres en ce qui concerne les problématiques environnementales.
- La définition d'IPE spécifiques à chaque acteur est un facteur de succès.

Dans ces travaux, nous proposons une méthode de sélection des IPE qui répond aux manques identifiés précédemment, ainsi elle :

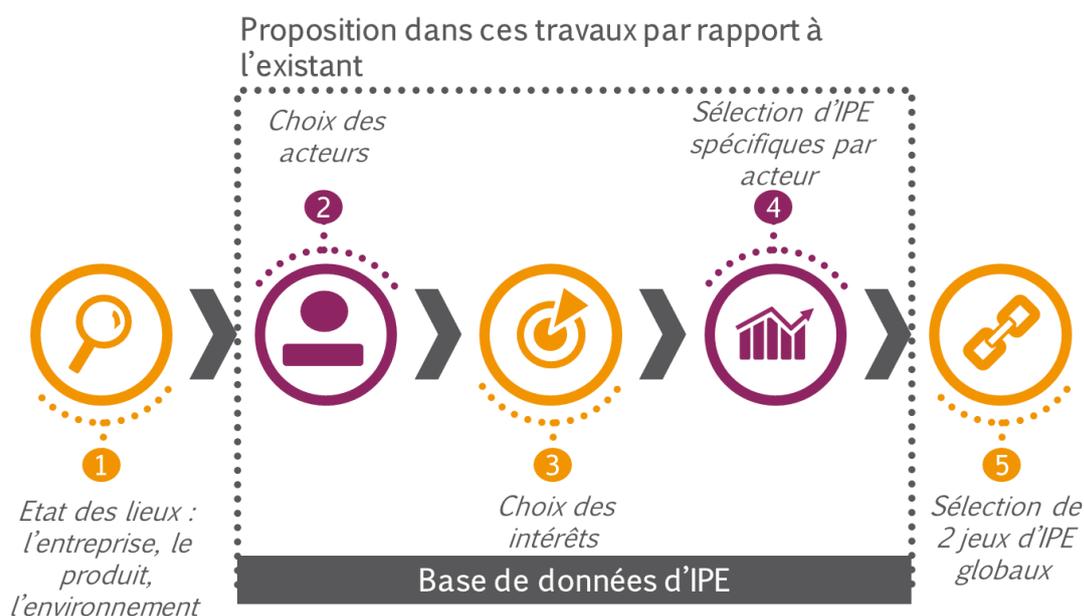
- est orientée développement de produit et considère toutes les étapes du cycle de vie ;
- prend en compte le contexte environnemental du produit et de l'entreprise ;
- s'adapte aux besoins spécifiques des différents acteurs de la chaîne de valeur (internes et externes à l'entreprise) ;
- permet de définir 1 jeu spécifique à chaque typologie d'acteur et 2 jeux globaux d'IPE pour améliorer les performances environnementales dans un objectif gagnant-gagnant.

Elle est basée sur 5 étapes (figure 19). Les étapes 1 et 5 se basent sur les méthodes de sélection des IPE existantes (tableau 2), c'est-à-dire la définition des objectifs environnementaux et d'un jeu d'IPE global. Cependant, ici, nous proposons pour l'étape 5, la construction de 2 jeux d'IPE globaux.

Avant de présenter en détail les 5 étapes de la méthode, voici une présentation générale. La première étape se base sur la définition des objectifs environnementaux. Elle consiste à réaliser une analyse environnementale du produit sur tout le cycle de vie (par exemple, une ACV). Elle est complétée par une analyse du contexte environnemental du produit et de l'entreprise, dont une analyse des réglementations environnementales et des aspects environnementaux spécifiques au secteur d'activité du produit, ainsi que l'état de maturité de l'entreprise et la stratégie de l'entreprise.

Il a été identifié que les méthodes existantes ne comportaient pas de spécifications quant aux besoins des différents acteurs de la chaîne de valeur en matière

d'informations nécessaires et d'indicateurs de suivi de la performance environnementale. Cet aspect est relativement important, car l'implication des différents acteurs de la chaîne de valeur est un paramètre clé de l'amélioration environnementale des produits. La seconde étape consiste donc à définir les acteurs de la chaîne de valeur (internes et externes à l'entreprise) tout au long du cycle de vie du produit comme discuté dans le contexte. Chaque acteur a des besoins et des finalités différentes. L'étape 3 consiste à définir quels sont les intérêts de chacun. L'étape quatre consiste en l'analyse du contexte environnemental, des acteurs et de leurs besoins et la définition des jeux d'IPE spécifiques à chaque acteur. Ces trois étapes ont donné lieu à la construction d'une base de données d'IPE auxquels des utilisateurs, des besoins et des objectifs environnementaux pour chaque étape du cycle de vie ont été affectés. Afin d'améliorer la performance environnementale du produit et de simplifier la réalisation de rapports environnementaux par les entreprises et la communication entre les différentes parties prenantes, 2 jeux globaux sont définis. Il reprend des indicateurs définis dans les différents jeux spécifiques à chaque acteur (étape 4) afin de les corrélés. Cela permettra d'éviter de devoir collecter d'autres informations. Il s'agit de l'étape cinq. Nous proposons de définir 2 jeux d'IPE globaux pour répondre à deux besoins distincts : améliorer le produit d'un côté et piloter/communiquer de l'autre. Pour ces deux dernières étapes de sélection d'IPE (spécifiques et globaux), des recommandations pour la gestion du multicritère sont définies, afin d'aider à la prise de décision une fois les IPE sélectionnés et utilisés.



**Figure [19]** Méthode proposée de sélection des IPE

Chaque étape de la méthode de sélection est détaillée dans les paragraphes suivants.

## 1. Étape 1 : L'entreprise, le produit, l'environnement

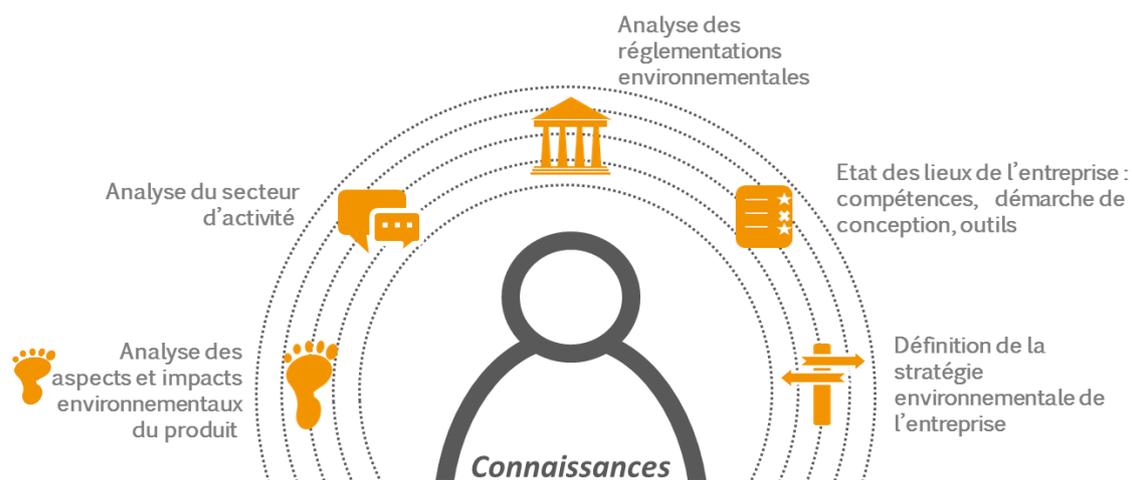
Afin de déterminer les IPE pertinents, il est important de bien analyser le contexte environnemental de l'entreprise et du produit. Cela permet :

- d'identifier les objectifs environnementaux majeurs et de concentrer le choix des IPE sur ces objectifs ;
- d'aider à bien déterminer les acteurs clés de la chaîne de valeur et leurs besoins quant à l'utilisation des IPE ;
- de définir les aspects environnementaux sur lesquels communiquer et de sélectionner les IPE en conséquence.

Il s'agit d'augmenter ses connaissances sur cinq points (figure 20) :

- les aspects et impacts environnementaux du produit à améliorer ou du nouveau produit à concevoir à l'aide d'une analyse environnementale ;
- les considérations environnementales du secteur d'activité ;
- les réglementations environnementales du secteur d'activité (actuelles ou futures) ;
- la maturité de l'entreprise par rapport à l'écoconception ;
- la stratégie environnementale de l'entreprise.

Ces cinq points sont liés les uns aux autres. Les intérêts à capitaliser des informations sur ces 5 points sont présentés dans les paragraphes suivants.



**Figure [20]** Étape 1 : connaître son produit et son contexte environnemental

#### a. Aspects et impacts environnementaux du produit

La réalisation d'une analyse environnementale permet de déterminer les aspects et impacts environnementaux du produit. Un aspect environnemental est un « élément des activités, des produits ou des services d'une organisation susceptibles d'interagir avec l'environnement » (ISO 14031, 2013). Un impact environnemental représente « toute modification de l'environnement, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des aspects environnementaux d'une organisation » (ISO 14031, 2013).

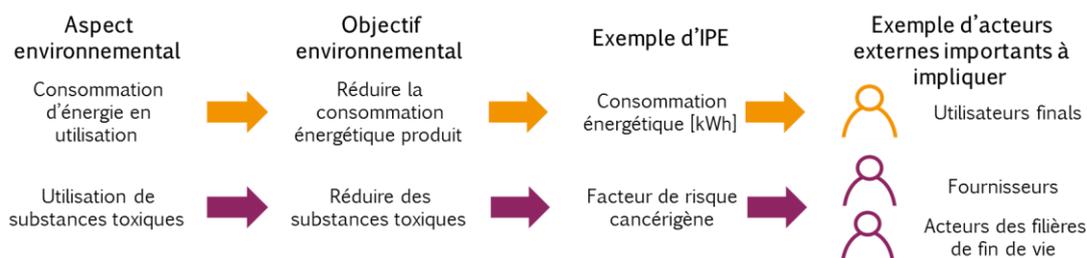
Elle doit être réalisée sur tout le cycle de vie du produit, de la conception au traitement en fin de vie (cf. figure 2), et d'identifier toutes les problématiques environnementales. Nous avons vu qu'il y avait un nombre important d'outils d'évaluation environnementale. Nous n'imposons pas un outil spécifique. Le choix de l'outil dépend du secteur, de la maturité de l'entreprise et de ses attentes.

À partir de l'identification des aspects environnementaux significatifs du produit, des objectifs d'améliorations environnementales pour certaines phases du cycle de vie du produit ou pour des composants sont définis. Nous recommandons de limiter le nombre d'objectifs environnementaux à sélectionner pour la suite de la démarche. Il n'est pas envisageable de vouloir tout améliorer d'un coup, il est préférable d'être dans une démarche d'amélioration continue. Ils serviront à identifier les IPE spécifiques aux acteurs et les IPE globaux (étapes 4 et 5). Ainsi, pour chaque aspect environnemental, un ou plusieurs objectifs environnementaux peuvent être définis et un ou plusieurs IPE peuvent être associés à chaque objectif. La figure 21 donne deux exemples de déclinaison : aspect environnemental, objectif environnemental et IPE associé. La définition de ces aspects et objectifs environnementaux permet également de définir certains points de la stratégie environnementale de l'entreprise (voir point e).



**Figure [21]** Exemples de définition d'un IPE à partir de la définition d'un aspect et objectif environnemental

L'analyse environnementale aide aussi à déterminer les acteurs externes de la chaîne de valeur importants et à impliquer dans le processus d'écoconception pour l'étape 2 (figure 22). Dans le premier exemple, les acteurs de fin de vie n'ont pas une influence majeure contrairement aux utilisateurs. Dans le second exemple, les acteurs des filières de fin de vie doivent avoir des IPE spécifiques, car ils sont en lien direct avec le traitement des substances/matières toxiques, tout comme les fournisseurs qui doivent utiliser des IPE pour rendre compte des substances toxiques dans leurs produits.



**Figure [22]** Exemples de définition des acteurs de la chaîne de valeur importants à impliquer dans le processus d'écoconception

Il faut garder à l'esprit que l'écoconception est une démarche d'amélioration continue. L'évaluation environnementale doit donc être mise à jour de manière régulière à la suite de la mise en œuvre d'une stratégie d'écoconception pour s'assurer de l'identification des éventuels transferts de pollution.

Ce premier point permet :

- de déterminer les aspects environnementaux significatifs du produit ;
- de déterminer les objectifs d'amélioration ;
- d'identifier certains IPE pertinents (spécifiques ou globaux) au produit qui devront faire partie des sélections ;
- d'identifier certains acteurs de la chaîne de valeur importants à impliquer dans la démarche d'écoconception ;
- d'identifier des pistes pour la définition de la stratégie environnementale de l'entreprise.

#### b. Analyse du secteur d'activité

Les analyses de la concurrence et du secteur (livres blancs, rapports, etc.) servent à déterminer quels sont les aspects environnementaux sur lesquels il est nécessaire de communiquer pour informer le client, soit pour se démarquer et prendre un avantage concurrentiel, soit parce qu'il s'agit d'une exigence réglementaire. Les écolabels, les déclarations environnementales produits (EPD Environmental Product Declaration), les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) peuvent être des contributeurs à cette analyse.

Des IPE doivent être définis pour qu'ils puissent servir de base d'information et de comparaison pour les clients. Il est possible que les considérations environnementales du secteur ne se concentrent que sur certains aspects environnementaux et n'englobent pas tous les aspects et impacts environnementaux identifiés grâce à l'évaluation environnementale (point précédent a). Par conséquent, l'analyse seule du secteur et de ses problématiques environnementales peut ne pas être suffisante. Les résultats de ces 2 premiers points peuvent être différents. Ils sont donc complémentaires pour être exhaustif.

Ce second point permet :

- de déterminer les aspects environnementaux significatifs du secteur d'activité ;
- de déterminer des objectifs d'amélioration liés aux réglementations ou pour prendre un avantage concurrentiel ;
- d'identifier certains IPE pertinents, qui devront faire partie du jeu d'IPE global pour communiquer, à destination principalement des clients/utilisateurs ;
- d'identifier des pistes pour la définition de la stratégie de l'entreprise.

#### c. Réglementations environnementales

L'analyse de la réglementation est indispensable pour définir des indicateurs requis qui devront faire partie de la sélection des IPE spécifiques et globaux (cf. page 34). Ils servent à suivre et à s'assurer de la conformité réglementaire pour les entreprises et les parties prenantes externes telles que l'état, les associations de consommateurs, les clients, etc. Il est nécessaire de regarder également les potentielles réglementations futures et ce qu'elles impliquent. Cela permettra d'avoir une démarche proactive. Ainsi, une veille réglementaire doit être mise en place sur les aspects environnementaux du produit. Elle peut s'intégrer dans un système de veille déjà existant dans l'entreprise.

Si l'entreprise décide d'anticiper la réglementation, la mise en place d'IPE avec des objectifs plus contraignants que les exigences réglementaires similaires existantes pourra servir d'avantage concurrentiel.

La réglementation européenne d'écoconception (ErP) est un bon exemple de réglementation environnementale qui évolue et englobe de plus en plus de produits dans son champ d'application. Les entreprises doivent la respecter pour pouvoir vendre leurs produits sur le marché européen. Cette réglementation est relativement exigeante en ce qui concerne l'efficacité énergétique et peut amener à revoir le management de cet aspect dans le développement de produits (innovation/amélioration technologique), le suivi des exigences, leur évaluation et leur communication à l'aide des IPE.

Ce troisième point permet :

- de définir les aspects environnementaux significatifs liés aux exigences réglementaires ;
- d'identifier certains IPE requis, que l'entreprise doit obligatoirement prendre en compte dans la sélection des IPE ;
- de déterminer des objectifs cibles pour certains IPE liés aux réglementations ;
- de se servir de l'anticipation des exigences réglementaires comme d'un avantage concurrentiel, et pour définir des stratégies d'écoconception ;
- d'identifier des pistes pour la définition de la stratégie environnementale de l'entreprise.



#### d. Maturité de l'entreprise par rapport à l'écoconception

La maturité de l'entreprise vis-à-vis de la démarche d'écoconception concerne :

- la présence ou non d'une expérience préalable en écoconception ;
- le processus de développement de produits ;
- les outils utilisés pour le développement de produits ;
- les interactions entre les acteurs internes et externes de la chaîne de valeur (parties prenantes) ;
- les compétences dans l'entreprise et l'identification des besoins en formation ;
- l'identification des freins et des leviers d'action à la mise en place d'une démarche d'écoconception.

Ce point vise à faire un diagnostic de la maturité de l'entreprise.

La figure 23 illustre le processus de diagnostic. Chaque élément est défini ci-après.

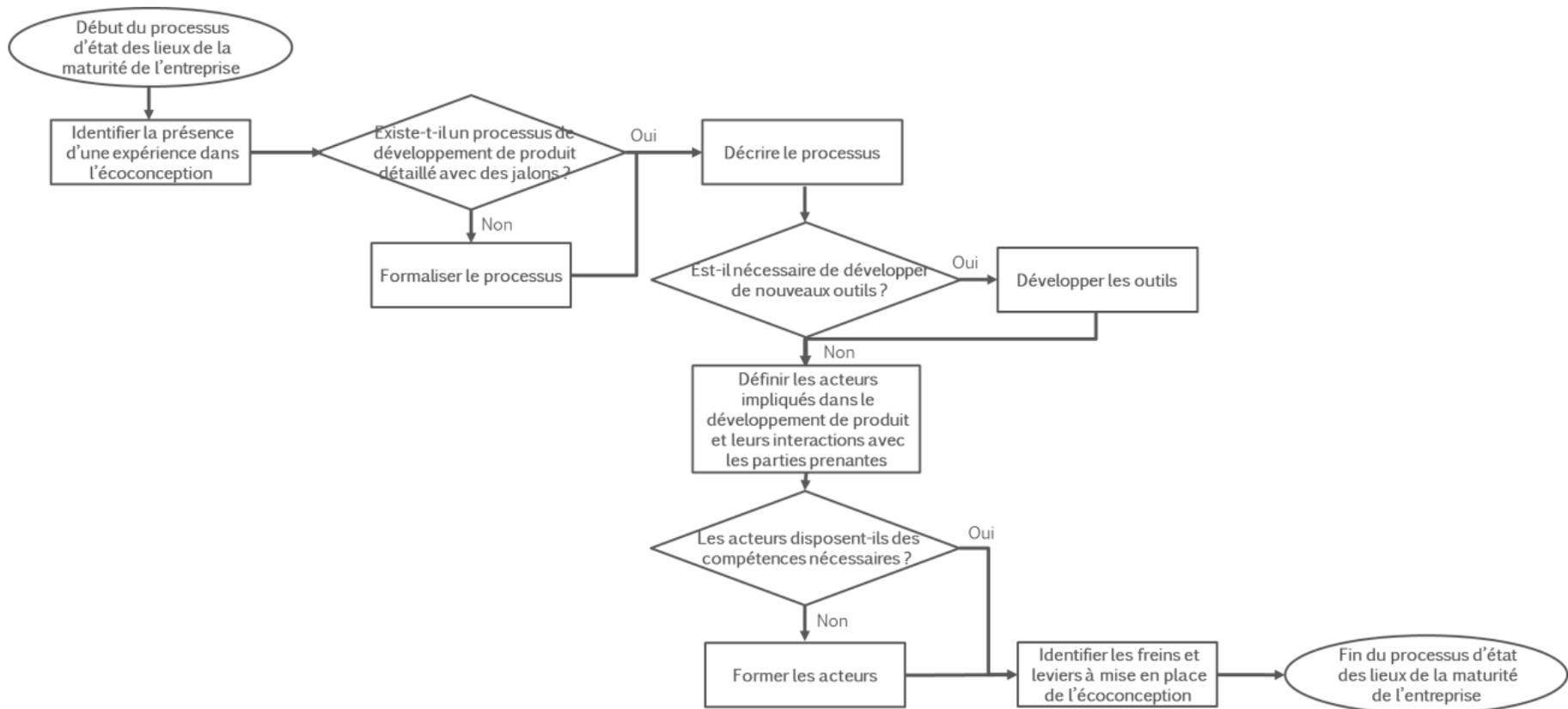


Figure [23] Processus d'état des lieux de la maturité de l'entreprise à la démarche d'écoconception

L'analyse du niveau de maturité commence par un diagnostic sur la présence ou non d'une expérience en écoconception.

L'étape suivante est d'identifier ou non la présence d'un processus de développement de produits structuré. Les entreprises disposant d'un système de management type de la qualité (ISO 9001) ont généralement ce type de processus structuré. Il est connu qu'un processus de conception structuré avec des jalons permet de mieux considérer les IPE dans le développement de produits (cf. page 32). Les jalons peuvent servir de base pour l'évaluation et le suivi des IPE retenus. La performance environnementale doit faire partie de chaque étape qui structure le développement de produits au même titre que la qualité, le coût, la faisabilité technique, le temps.

La maturité de l'entreprise se mesure aussi par la présence d'outils adaptés. Ces outils peuvent être utilisés pour suivre, évaluer et gérer les IPE et en tirer des actions d'amélioration. À partir du descriptif du processus de développement de produits, les outils existants peuvent être analysés et ainsi définir s'il est possible d'intégrer des principes d'écoconception dans ces outils en totalité ou partiellement ou s'il est nécessaire de développer de nouveaux outils. Il est important de regarder s'il y a déjà des indicateurs existants et quelles sont les données déjà collectées afin d'éviter les redondances et d'identifier les sources connues d'information.

L'étape suivante est l'identification des interactions entre les acteurs internes à l'entreprise et de leurs interactions avec les parties prenantes externes. Quelles sont les données échangées ? Quelles sont les actions mises en place entre les acteurs internes et externes ? Cela se fait en partie avec un descriptif du fonctionnement interne du développement de produits et le positionnement des acteurs. Les figures 24 et 25 permettent d'identifier le positionnement des acteurs internes et leurs interactions et les informations pouvant être échangées entre eux (figure 24) et les avec les acteurs externes (figure 25). Elles permettent aussi d'identifier les acteurs avec un rôle de décision stratégique/tactique et ceux ayant plus un rôle opérationnel au sein de l'entreprise. Ces figures sont à adapter au cas particulier de l'entreprise.

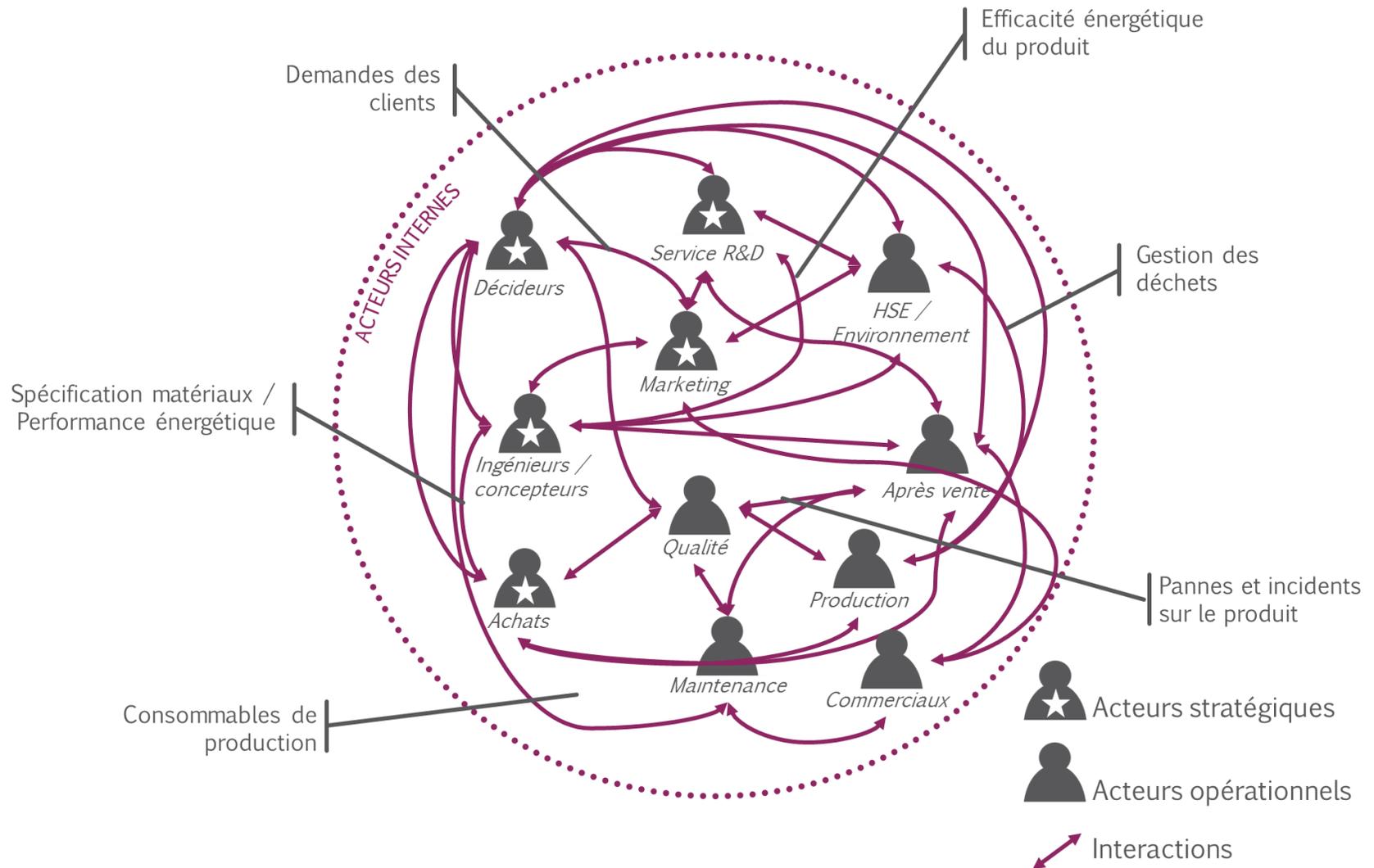


Figure [24] Exemples d'interactions entre les acteurs internes à l'entreprise de la chaîne de valeur et exemples d'informations échangées

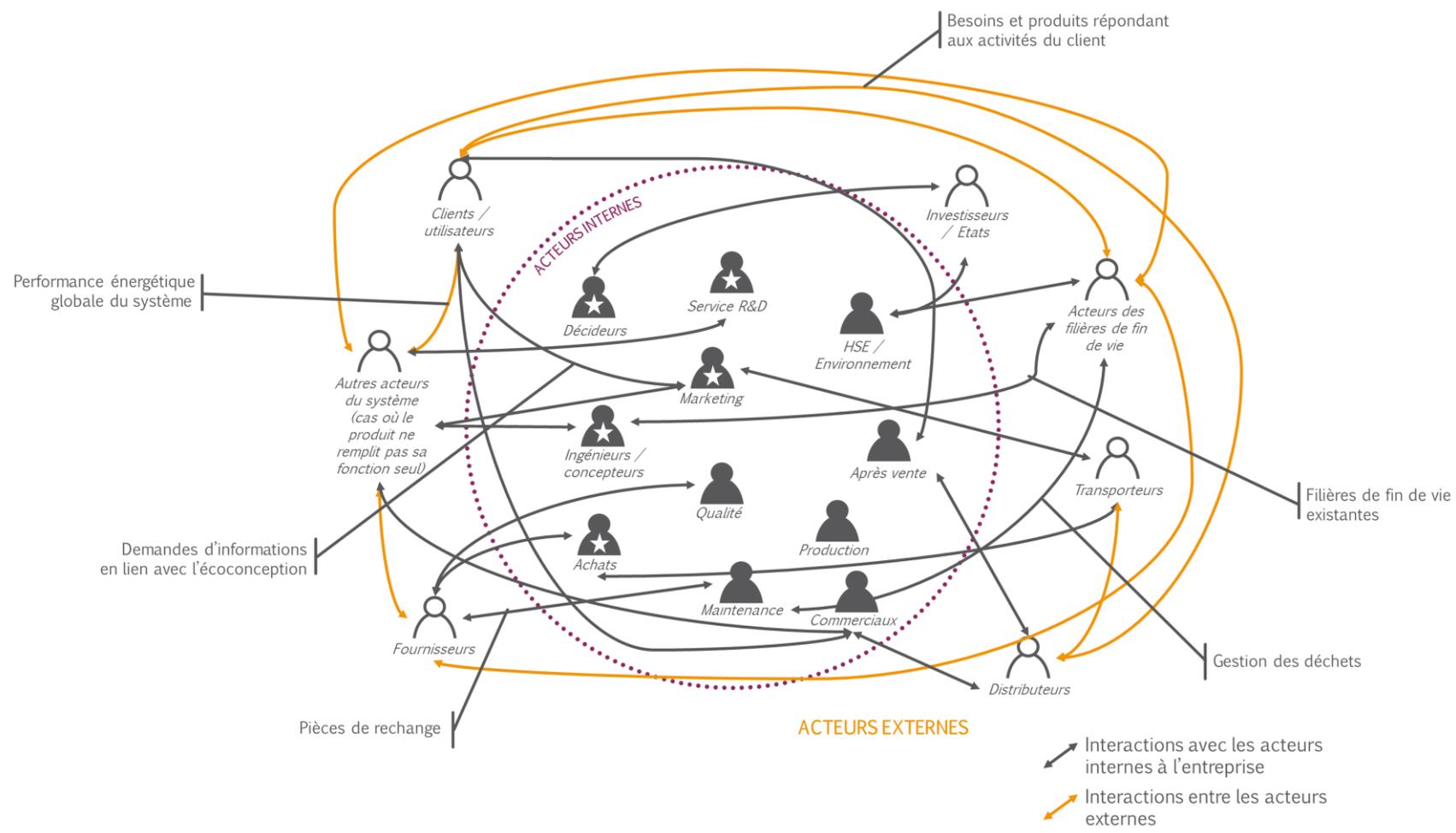


Figure [25] Exemples d'interactions entre les acteurs externes et les acteurs internes à l'entreprise et exemples d'informations échangées

Cela permet aussi d'avoir une première vue des besoins et objectifs des acteurs de la chaîne de valeur par rapport à l'utilisation des IPE pour l'étape 3.

L'état des lieux permet de déterminer les compétences et les besoins en formation des acteurs internes. Il s'agit de les sensibiliser aux problématiques environnementales, de les aider à l'utilisation des IPE et à leur compréhension, et de les aiguiller/rassurer dans la mise en place d'une démarche d'écoconception. Cela permet de définir le niveau de sophistication ou de simplicité des IPE à sélectionner et le niveau de prise de décision de chacun. Ils doivent être sensibilisés à l'utilisation et aux bénéfices des outils d'écoconception et techniques disponibles, et être sûr dans le choix de l'outil, il doit y avoir un référent environnement disponible (McAloon & Evans, 1997). La formation du personnel et la présence d'un référent environnemental sont les derniers leviers pour déployer l'écoconception.

En fonction de l'expérience de l'entreprise, il est possible d'identifier les forces, faiblesses, menaces et opportunités de l'entreprise, vis-à-vis de la démarche d'écoconception. La figure 26 les définit à l'aide d'une matrice SWOT. Chaque analyse SWOT est spécifique à l'entreprise concernée. Cette analyse aidera à définir la stratégie environnementale de l'entreprise.

 <p><b>Forces</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Leçons apprises des expériences précédentes</li> <li>▪ Capacité d'innovation, etc.</li> </ul>	 <p><b>Faiblesses</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Manques d'informations /connaissances</li> <li>▪ Manque d'implication du management</li> <li>▪ Manque de méthodologie et d'outils, etc.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Positionnement sur le marché</li> <li>▪ Anticipation des réglementations</li> <li>▪ Innovation</li> <li>▪ Interaction avec les parties prenantes, etc.</li> </ul>  <p><b>Opportunités</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Evolution réglementaire</li> <li>▪ Concurrence</li> <li>▪ Demandes des parties prenantes, etc.</li> </ul>  <p><b>Menaces</b></p>

Figure [26] Exemples pour remplir une matrice SWOT

Ce quatrième point permet de :

- définir les interactions entre les acteurs de la chaîne de valeur ;
- définir les besoins en sophistication ou simplicité des IPE ;
- d'identifier les indicateurs déjà existants ;
- d'aider à définir la stratégie de l'entreprise.

## e. Stratégie environnementale de l'entreprise

La stratégie de l'entreprise est à prendre à compte dans la définition des IPE spécifiques et les besoins des décideurs. Nous avons vu que les 4 points précédents donnent des éléments pour aider à définir la stratégie environnementale de l'entreprise. La stratégie peut être volontaire ou liée à une obligation. Elle peut s'appliquer à l'ensemble des produits ou à un produit/une gamme en particulier.

La stratégie environnementale de l'entreprise peut être guidée par plusieurs facteurs.

- Les demandes des investisseurs. La stratégie est descendante et elle est portée par les preneurs de décision.
- Les demandes clients. La stratégie est ascendante. Elle est portée par le marketing dans l'entreprise.
- Les exigences réglementaires. L'entreprise peut ne pas avoir d'exigences réglementaires fortes ni de demandes clients, et décider comme stratégie d'entreprise d'anticiper de potentielles réglementations.
- Les préoccupations majeures du secteur d'activité.
- Les résultats de l'analyse environnementale.
- L'analyse de la concurrence et son positionnement, etc.

La sélection des IPE doit permettre de s'assurer d'être en accord avec la stratégie environnementale de l'entreprise.

## f. Bilan de l'étape 1

Ces 5 points d'analyse sont complémentaires. Ils permettent de faire un état des lieux des problématiques environnementales du produit, mais également de son contexte environnemental et celui de l'entreprise. Ils permettent d'identifier les aspects et objectifs environnementaux significatifs et les premiers acteurs de la chaîne de valeur pouvant être importants pour l'amélioration de la performance environnementale et les interactions entre eux. Ils permettent également de définir la stratégie environnementale de l'entreprise. Cet état des lieux permettra de définir les stratégies d'écoconception à mettre en place par la suite. Les résultats de cette étape sont donc :

- l'identification des aspects environnementaux significatifs ;
- la définition des objectifs environnementaux sur lesquels travailler dans un premier temps (démarche d'amélioration continue) ;
- la collecte d'informations sur les acteurs de la chaîne de valeur, leurs besoins, et le niveau de sophistication des IPE pour les étapes suivantes.

## 2. Étapes 2 et 3 : Définir les acteurs clés et leurs besoins

Les deux étapes suivantes consistent à identifier les utilisateurs des IPE et dans quel objectif :

- décider de la stratégie de l'entreprise ou piloter un projet (management) ;
- améliorer une solution existante et faire des choix entre plusieurs options. Ici, on s'assure qu'il n'y a pas de transferts de pollution ;
- innover ;

- communiquer en interne à l'entreprise ou en externe et échanger des informations entre les différents acteurs. La communication en interne consiste à échanger des informations entre des personnes dans une organisation (entreprise) tandis que la communication externe vise à communiquer entre 2 organisations, ou avec des groupes ou individus extérieurs à l'organisation. Le rôle de la communication externe est principalement de faciliter la coopération avec des groupes tels que les fournisseurs, les investisseurs, les parties prenantes et de présenter une image favorable de l'organisation et de ses produits ou services aux clients potentiels et actuels (IACACT, 2016)
- suivre et/ou anticiper les réglementations.

#### a. Identifications des acteurs importants à considérer

L'étape précédente a déjà permis d'identifier le fonctionnement et les interactions entre les acteurs de la chaîne de valeur (cf. figure 24 et 25). Dans un premier temps, il ne sera pas nécessaire de considérer tous les acteurs de la chaîne de valeur dans la sélection des jeux d'IPE spécifiques. Le choix des acteurs se fait aussi en fonction de leur importance dans le processus d'écoconception et des objectifs environnementaux définis à l'étape 1. Nous proposons d'identifier leur importance selon trois niveaux :

- faible : l'acteur a peu voire pas d'influence sur l'objectif environnemental ;
- forte : l'acteur a une influence sur l'objectif environnemental, mais n'est pas forcément en lien direct ;
- très forte : l'acteur a une forte influence sur l'objectif environnemental et/ou fait partie intégrante de cet objectif environnemental.

Par exemple, l'utilisateur sera un acteur important pour les produits consommateurs d'énergie. Il en est de même dans l'entreprise, selon son fonctionnement, les acteurs internes importants pourront être différents. Ainsi, dans certaines entreprises c'est le marketing qui sera leader et donc un acteur très important, dans d'autres ce sera le bureau d'études, ou un service d'écoconception. Cela est propre à chaque entreprise et cela va dépendre du contexte. Ainsi, il faudra se focaliser sur ces acteurs. Ici, une analyse de tous les acteurs de la chaîne de valeur est proposée.

Pour les acteurs internes, il est nécessaire d'identifier leur rôle dans l'entreprise et par rapport aux objectifs environnementaux définis.

Pour les acteurs externes, il faut identifier leurs liens par rapport aux objectifs environnementaux de l'entreprise et comment ils peuvent y contribuer.

#### b. Définition des besoins

Une fois les acteurs identifiés, il faut identifier leurs besoins pour l'utilisation des IPE.

Les outils habituels d'analyse des besoins peuvent être utilisés pour les définir (enquêtes, questionnaires, analyses des tâches, brainstormings, etc.). Les IPE devront permettre de répondre à ces besoins. L'étape précédente de l'état des lieux a également permis de collecter des informations sur ces besoins.



### *i. Besoins des acteurs internes*

Les acteurs internes à l'entreprise utilisent des IPE pour :

- suivre les améliorations environnementales du développement du produit et choisir des alternatives de conception ;
- suivre la performance globale de l'entreprise ;
- communiquer les performances environnementales aux acteurs externes.

Les indicateurs pour les acteurs impliqués dans la gestion de l'entreprise et des projets devront être plus qualitatifs et liés avec la performance globale de l'entreprise, la stratégie environnementale, et liés avec le secteur d'activité, la réglementation, etc.

Les acteurs, impliqués dans le processus de développement de produits ou dans le cycle de vie de produit, doivent avoir des IPE qui sont, dans la mesure du possible, quantitatifs. Leurs IPE doivent être techniquement liés avec les spécifications du produit comme le poids, la composition matière, la consommation d'énergie, le taux de recyclabilité, etc.

Le tableau 4 répertorie des besoins pour chaque acteur interne. Ce tableau est partiellement inspiré de (Olsthoorn, et al., 2001), (Jasch, 2000). Il peut évoluer d'une entreprise à l'autre et d'un produit à un autre.



### *ii. Besoins des acteurs externes*

Les acteurs externes de l'entreprise utilisent les IPE pour :

- obtenir des informations environnementales sur le produit ;
- faire des choix informés ;
- améliorer leur propre performance environnementale ;
- communiquer leur performance environnementale ;
- faire l'évaluation environnementale globale du système, pour les produits ne pouvant pas rendre seuls leur fonction ;
- échanger des informations avec l'entreprise.

Pour les décideurs et les parties prenantes externes comme les investisseurs/l'état, les IPE doivent être des indicateurs macroscopiques et/ou globaux, et montrer la performance de l'entreprise. Dans leur cas, l'IPE n'est pas spécifique à un produit ou à une solution technologique.

Pour les acteurs impliqués dans le cycle de vie du produit, ce sont des indicateurs en lien avec la solution technologie et leur propre influence sur la performance environnementale.

Pour les acteurs de la phase d'utilisation, en BtoB, nous définissons plusieurs niveaux. Les besoins et compétences/connaissances de ces différents utilisateurs peuvent être différents, ainsi leurs IPE seront différents et spécifiques à leurs besoins. Il y a trois cibles possibles.

- Le client qui décide d'acheter la solution globale. Les intérêts seront le choix entre plusieurs produits, le suivi de la performance environnementale de ses utilisateurs finals, le coût associé à la performance environnementale, etc.

- L'utilisateur final qui va réellement utiliser le produit. Les besoins seront liés à ses propres comportements et l'influence que cela peut avoir.
- L'intégrateur qui achète le produit pour l'intégrer dans une solution plus complexe (cas des produits ne pouvant pas rendre seuls leur fonction). Ici, les besoins seront liés à la performance environnementale globale du système.

Le tableau 5 répertorie des besoins pour chaque acteur externe. Ce tableau est partiellement inspiré de (Olsthoorn, et al., 2001), (Jasch, 2000). Il peut évoluer d'une entreprise à l'autre et d'un produit à un autre.

Les IPE sont à destination des acteurs externes, mais peuvent être fournis par l'entreprise. Il est donc nécessaire de définir qui va évaluer les IPE en interne et les communiquer à l'aide des interactions définies précédemment.

**Tableau [4]** Acteurs internes à l'entreprise et leurs besoins en IPE

Acteurs	Besoins spécifiques par rapport à l'utilisation des IPE
 <i>Décideurs**</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Suivre la performance environnementale de l'entreprise par rapport aux objectifs environnementaux fixés</li> <li>■ Avoir des informations pour prendre des décisions sur la stratégie environnementale de l'entreprise</li> <li>■ Communiquer les performances environnementales aux parties prenantes</li> <li>■ Donner des retours d'informations pour informer et motiver les forces de travail</li> <li>■ Fixer des objectifs aux forces de travail</li> </ul>
 <i>Service R&amp;D*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Suivre les bénéfices potentiels des innovations environnementales (suivi de sous-système et pas forcément du produit complet)</li> <li>■ Evaluer une fonction donnée et non une solution technologique</li> <li>■ Suivre la performance environnementale des produits tout au long du cycle de vie</li> <li>■ Identifier des stratégies d'écoconception</li> </ul>
 <i>Ingénieurs / concepteurs*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Suivre la performance environnementale des produits tout au long du cycle de vie</li> <li>■ Identifier des stratégies d'écoconception</li> <li>■ Evaluer des solutions technologiques</li> </ul>
 <i>HSE / Environnement**</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Suivre la performance environnementale du site de l'usine</li> <li>■ Suivre les pollutions dans l'air, l'eau et le sol</li> <li>■ Gérer les déchets</li> <li>■ Suivre les impacts locaux et mondiaux</li> <li>■ Suivre les résultats des évaluations environnementales</li> </ul>
 <i>Marketing**</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Identifier de nouvelles opportunités de marché</li> <li>■ Défendre sa position sur le marché</li> <li>■ Montrer les avantages par rapport aux concurrents</li> </ul>
 <i>Achats*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Aider au choix des fournisseurs</li> <li>■ Suivre les performances environnementales des fournisseurs.</li> <li>■ Echanger des informations avec les fournisseurs</li> </ul>
 <i>Qualité*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ S'assurer du maintien de la qualité</li> <li>■ Suivre les exigences de l'entreprise envers les fournisseurs</li> <li>■ Suivre la performance environnementale et technologique du produit</li> </ul>
 <i>Après vente*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Suivre les exigences environnementales des clients</li> <li>■ Suivre les retours sur la performance environnementale liée à l'utilisation des produits (pannes, défaillances, réclamations, etc.)</li> </ul>
 <i>Production*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Suivre la performance environnementale liée à la production</li> </ul>
 <i>Maintenance*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Suivre la défaillance technologique,</li> <li>■ Suivre l'utilisation des consommables</li> <li>■ Suivre le taux de retours</li> <li>■ Gérer les déchets</li> <li>■ Echanger des informations avec la qualité, les services après-vente et HSE</li> </ul>
 <i>Commerciaux*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Avoir des informations à propos de la performance environnementale des produits</li> <li>■ Aider à la proposition entre plusieurs produits</li> <li>■ Accompagner le client</li> </ul>

\*impliqué dans le développement de produit ; \*\* impliqué dans le management

**Tableau [5]** Acteurs externes à l'entreprise et leurs besoins pour les IPE

Acteurs	Besoins spécifiques par rapport à l'utilisation des IPE
 <i>Fournisseurs*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Echanger des informations avec l'entreprise pour améliorer les impacts environnementaux des composants</li> <li>Donner des informations à propos de la performance environnementale</li> </ul>
 <i>Transporteur*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suivre la performance environnementale en lien avec la logistique</li> </ul>
 <i>Clients / utilisateurs*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Avoir des informations à propos de la performance environnementale des produits</li> <li>Suivre leurs propres impacts environnementaux pendant l'utilisation</li> <li>Aider aux choix entre différents produits</li> <li>Améliorer leur propre performance environnementale en utilisation</li> <li>Communiquer leur performance environnementale</li> </ul>
 <i>Distributeurs/ Autres acteurs du système (cas où le produit ne rempli pas sa fonction seul)*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Avoir des informations à propos de la performance environnementale des produits</li> <li>Aider à la proposition entre plusieurs produits</li> <li>Conseiller sur des accessoires</li> <li>Evaluer la performance environnemental du système global</li> <li>Echanger avec l'entreprise</li> </ul>
 <i>Maintenance* (filière extérieure à l'entreprise)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suivre la défaillance technologique,</li> <li>Suivre l'utilisation des consommables</li> <li>Gérer les déchets</li> </ul>
 <i>Acteurs des filières de fin de vie*</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Obtenir des informations sur la composition matière et les assemblages</li> <li>Obtenir des informations sur les traitements en fin de vie</li> <li>Donner des informations aux entreprises</li> </ul>
 <i>Investisseurs / Etats / Société**</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Avoir des informations à propos de la performance environnementale</li> <li>S'assurer de la conformité réglementaire</li> <li>Avoir des informations sur les performances financières</li> <li>Indiquer les obligations environnementales pouvant affecter les performances financières de la compagnie</li> <li>Développer une base de données utile pour le développement et l'implémentation de politiques environnementales gouvernementales</li> </ul>

\*impliqué dans le cycle de vie du produit ; \*\* impliqué dans le management

### c. Définition des objectifs

Une fois les besoins de chaque acteur évalué comme important pour l'atteinte des objectifs d'améliorations environnementales, il faut leur définir un ou plusieurs objectifs généraux à l'utilisation des IPE. Ces objectifs sont à sélectionner parmi la liste suivante :

- manager (décider de la stratégie entreprise et de la stratégie produit) ;
- améliorer/suivre la performance environnementale ;
- communiquer en interne à l'entreprise ou en externe ;
- échanger des informations entre les différents acteurs ;
- suivre et/ou anticiper les réglementations.



### d. Bilan des étapes 2 et 3

L'étape 2 permet d'identifier qui sont les acteurs de la chaîne de valeur à prendre en considération par rapport aux objectifs environnementaux définis à l'étape 1 et par rapport aux autres composantes de l'état des lieux. Elle permet également de donner une importance relative à ces différents acteurs par rapport aux objectifs d'amélioration.

L'étape 3 permet, pour chacun des acteurs sélectionnés, de déterminer quels sont leurs besoins et objectifs à utiliser des IPE.

L'étape suivante est la sélection des jeux d'IPE spécifiques à chaque acteur.

### 3. Étape 4 : choix des IPE spécifiques aux différents acteurs

Pour rappels de l'état de l'art.

- L'IPE doit être utilisé et utile pour l'utilisateur, fondé scientifiquement, et doit montrer une tendance d'évolution des résultats.
- Une multitude d'IPE ont été référencés dans la littérature : 261 en lien avec la performance environnementale (Issa, et al., 2015) et 141 directement en lien avec l'écoconception et son management (Rodrigues, et al., 2017).

Les résultats de cette étape sont un jeu d'IPE pour chaque acteur (défini à l'étape 2) en réponse aux besoins et objectifs définis lors de l'étape 3. Plusieurs critères doivent être pris en compte lors du choix des IPE : pertinence, exhaustivité, cohérence, exactitude et transparence (cf. page 38).

Afin de rendre plus accessible et de faciliter la tâche de sélection des IPE pour l'entreprise en fonction des différents acteurs et de leurs besoins, une base de données a été créée.



#### a. Base de données des IPE

Elle est construite à l'aide des bases de données existantes (Issa, et al., 2015) et (Rodrigues, et al., 2017) pour la liste des indicateurs. La base de données est constituée de 404 indicateurs. La base de données est générique et vise à s'adapter à toutes les entreprises. Elle est à destination de l'équipe chargée de la mise en place de la démarche d'écoconception dans l'entreprise.

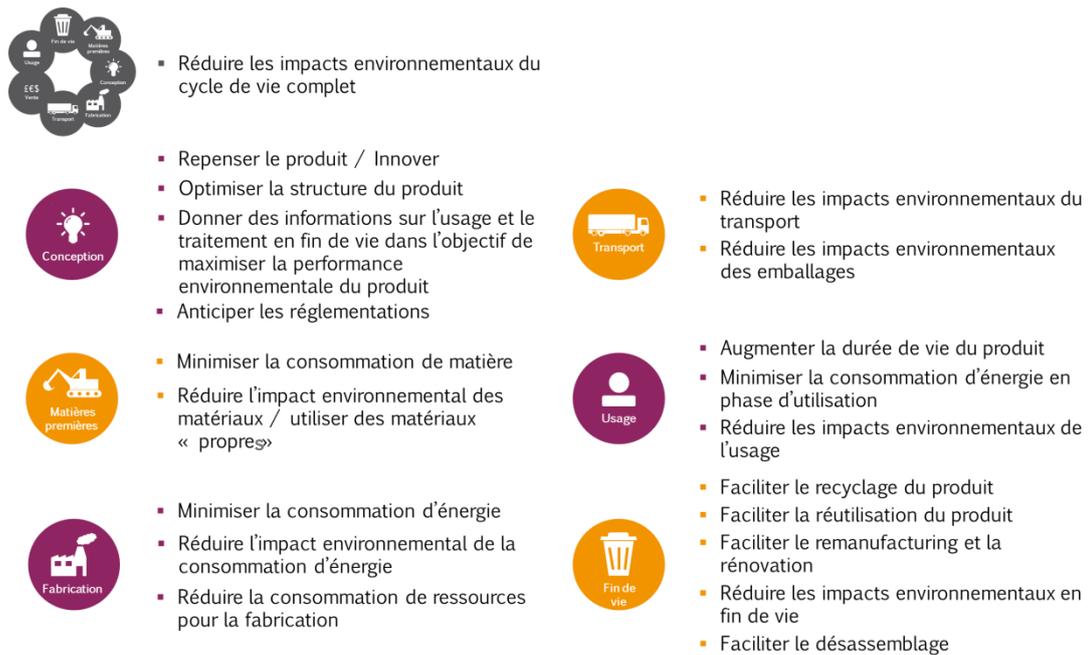
À chaque indicateur, nous avons associé plusieurs informations nécessaires pour leur sélection.

- Une catégorie afin de faciliter le tri des indicateurs (indicateurs d'ACV, d'usage, de fin de vie, de management, etc.).
- Une description de l'indicateur (ce qu'il représente).
- Une formule de calcul si nécessaire. Certains indicateurs sont qualitatifs, par exemple l'indicateur permettant d'évaluer la présence d'un système de management environnemental.
- Une unité. Les indicateurs peuvent être sans dimension.
- Une étape du cycle de vie (cf. figure 2).
- Un objectif environnemental (tableau 6). Chaque objectif environnemental est déclinable en stratégies d'écoconception plus précises pour la suite. La liste des objectifs environnementaux est issue de la littérature (Brezet & Van Hemel, 1997), (Crul & Diehl, 2006), (Belletire, et al., 2014), (Issa, et al., 2015).
- Les acteurs susceptibles de les utiliser.

- Les objectifs des acteurs : suivre et/ou améliorer les performances environnementales, communiquer, échanger des informations, suivre et/ou anticiper les réglementations environnementales, piloter.
- Les réglementations auxquelles ils peuvent être associés.

Un extrait de la base de données est présenté en annexe 1 avec quelques exemples d'IPE et les informations associées.

**Tableau [6]** Objectifs environnementaux par étape du cycle de vie pour la sélection des IPE



Le premier objectif environnemental est de réduire les impacts environnementaux sur tout le cycle de vie, cela permet d'identifier des IPE que l'on souhaite mesurer en prenant en compte toutes les étapes du cycle de vie ou qui ne sont pas spécifiques à une étape du cycle de vie, par exemple des IPE de management.

En couplant cette base de données avec un outil de sélection (démonstrateur développé sur Excel), nous proposons de faire une sélection des IPE.

## b. Outil de sélection des IPE

L'outil est composé de la base de données des IPE, d'une interface de communication avec l'utilisateur et de logiques de sélection des IPE.

Le fonctionnement de l'outil de sélection des IPE est décrit à l'aide d'un logigramme (figure 27).

L'intérêt majeur de cet outil est de croiser les 3 aspects : acteurs, intérêts et objectifs environnementaux par étape du cycle de vie.

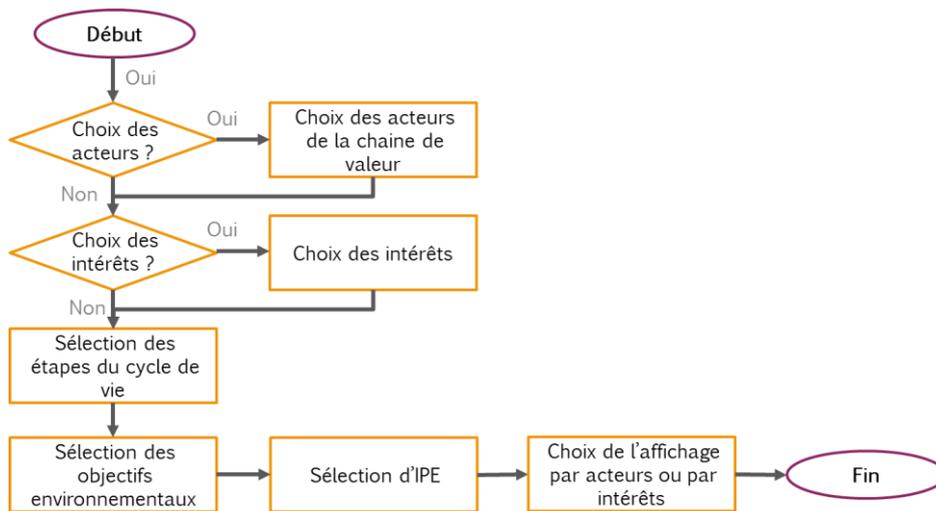


Figure [27] Logigramme de fonctionnement de l'outil de sélection des IPE

Il s'agit dans un premier temps de déterminer si l'entreprise souhaite avoir des IPE pour des acteurs spécifiques (figure 28). Si la réponse est oui, il est nécessaire de sélectionner les acteurs définis à l'étape précédente. Si la réponse est non, tous les acteurs sont pris en compte.

Figure [28] Capture d'image de l'outil de sélection des IPE : choix des acteurs de la chaîne de valeur

Une fois les acteurs sélectionnés, l'entreprise peut sélectionner les objectifs (intérêts) à utiliser des indicateurs dans la liste citée précédemment (figure 29). Si elle ne souhaite pas sélectionner des intérêts spécifiques, ils sont tous sélectionnés par défaut.

Figure  
Capture  
d'image  
l'outil

**Criteria of choice for Environmental Performance Indicators**

Do you want to precise interest of the use of environmental performance indicators ?

Yes  No

**Next**

**Criteria of choice for Environmental Performance Indicators**

**Select interests of using EPI**

- Follow environmental performance
- Communication
- Exchange of information
- Improve environmental performance
- Follow or anticipate environmental regulation

**Next** **Back**

[29]

de  
de

sélection des IPE : sélection des objectifs (intérêts)

Après le choix des acteurs et des intérêts, l'entreprise doit sélectionner les étapes du cycle de vie et objectifs environnementaux qu'elle souhaite améliorer à partir d'une sélection prédéfinie (tableau 6). Ces objectifs environnementaux ont été déterminés à l'étape 1. Il s'agit de la dernière étape de sélection (figure 30).

Criteria of choice for Environmental Performance Indicators

**1. Select the life cycle stage(s) that you want to work about**

<input checked="" type="checkbox"/> Product development	<input checked="" type="checkbox"/> Raw material extraction and transformation	<input checked="" type="checkbox"/> Manufacturing	<input checked="" type="checkbox"/> Entire life cycle
<input checked="" type="checkbox"/> Distribution / Packaging	<input checked="" type="checkbox"/> Usage / Maintenance	<input checked="" type="checkbox"/> End of life	

**2. Select environmental objective(s) depending on previous choice**

<b>Product development</b>	<input type="checkbox"/> Rethink the product - Innovate <input type="checkbox"/> Optimize product structure <input type="checkbox"/> Give information about use and end of life treatment in order to maximize environmental performance of the product <input type="checkbox"/> Anticipate laws and regulations
<b>Raw material extraction</b>	<input type="checkbox"/> Minimize material consumption <input type="checkbox"/> Reduce environmental impact of materials / Use "clean" materials
<b>Manufacturing</b>	<input type="checkbox"/> Minimize energy consumption during manufacturing <input type="checkbox"/> Reduce environmental impact of energy use <input type="checkbox"/> Ensure to minimize resources consumption during manufacturing
<b>Distribution / Packaging</b>	<input type="checkbox"/> Reduce transport environmental impact <input type="checkbox"/> Reduce packaging environmental impact
<b>Usage / Maintenance</b>	<input type="checkbox"/> Increase lifespan of the product <input type="checkbox"/> Minimize energy consumption in use phase <input type="checkbox"/> Reduce environmental impacts from usage
<b>End of life</b>	<input type="checkbox"/> Facilitate recycling of the product <input type="checkbox"/> Facilitate reuse of the product <input type="checkbox"/> Facilitate remanufacturing or renovation <input type="checkbox"/> Reduce environmental impacts at the end of life stage <input type="checkbox"/> Facilitate disassembling

**Figure [30]** Capture d'image de l'outil de sélection des IPE : Sélection des étapes du cycle de vie et des objectifs environnementaux

Le résultat est une proposition d'indicateurs selon les acteurs sélectionnés, ou les intérêts sélectionnés. Il s'agit de plusieurs tableaux prenant la forme suivante (figure 31) :

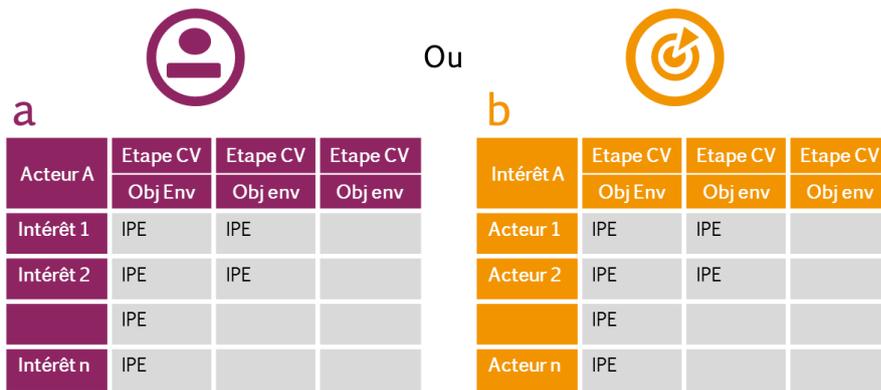


Figure [31] Exemples de résultats de la sélection des IPE selon un acteur (a) ou un intérêt (b)

Ainsi, pour un même objectif d'écoconception, chaque acteur impliqué pourra avoir des indicateurs différents (figure 32). Par exemple, pour réduire la consommation d'énergie de la phase d'utilisation, un IPE peut être la consommation d'énergie annuelle réelle pour les utilisateurs finals ; le coefficient de performance pour les concepteurs, l'indicateur d'appauvrissement des ressources fossiles pour l'expert ACV, etc.

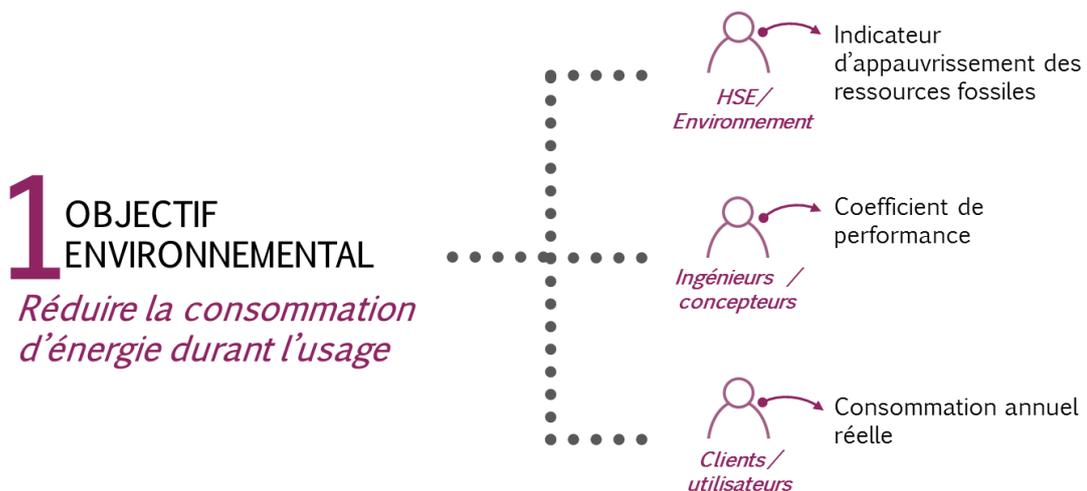


Figure [32] Étape 4 : Exemples d'IPE spécifiques pour quelques acteurs lorsque l'objectif environnemental est la réduction de la consommation d'énergie

En fonction des filtres choisis, de nombreux IPE peuvent être proposés. L'utilisateur doit ensuite faire un tri dans les IPE proposés. Pour les acteurs internes, les indicateurs sont à sélectionner en fonction de leur capacité à piloter ou affiner le développement de produit et cela suivant les étapes du développement de produit (du planning au détail du produit, en passant par la définition du concept). La sélection dépend également des moyens à disposition : temps, coût, facilité d'obtention de la donnée. Dans leur méthode, Issa et al. (2015), qui définissent aussi un outil de sélection des IPE mais uniquement basé sur les aspects environnementaux, recommandent de s'assurer :

- que l'IPE est compatible avec le produit de l'entreprise ;
- du nombre de données nécessaires à l'évaluation de l'IPE, la difficulté d'obtention de ces données et le temps nécessaire pour sa mesure ;

- du coût nécessaire à la collecte de la donnée et le budget ;
- de la facilité d'utilisation de l'IPE, et les attentes (précisions) dans la mesure ;
- de la nécessité d'être expert ou non pour la mesure, l'évaluation et l'interprétation.

Les mêmes questions peuvent se poser la sélection des IPE de chaque acteur et en fonction de leurs compétences et niveau de prise de décision (besoin de sophistication ou simplicité).

Une fois la sélection des IPE faite à l'aide de l'outil, il peut être nécessaire pour l'entreprise d'ajouter des indicateurs personnalisés qui ne seraient pas présents dans la base de données.

Il est fortement recommandé de limiter au maximum le nombre d'indicateurs spécifiques, tout en couvrant toutes les problématiques environnementales pour chacun des acteurs de la chaîne de valeur. Il est difficile et semble non approprié de définir un nombre maximal d'indicateurs. En effet, aucune des méthodes analysées (cf. tableau 2) ne donne des indications sur ce point. Le nombre d'indicateurs va notamment dépendre du nombre d'objectifs environnementaux et des composantes de cet objectif (Rice & Rochet, 2005). Cependant, un nombre trop important peut conduire à avoir des difficultés à gérer le multicritère. La gestion des IPE et celle du multicritère sont abordées au paragraphe 5. Par conséquent, nous recommandons de minimiser le nombre d'indicateurs et de veiller à éviter les redondances. Nous recommandons également de limiter le nombre d'objectifs environnementaux qui permettra de limiter le nombre d'indicateurs dans une démarche d'amélioration continue.



#### c. Bilan de l'étape 4

Les résultats de cette étape sont un jeu d'IPE pour chaque acteur en réponse aux besoins et objectifs définis lors de l'étape 3. La bonne sélection des IPE va permettre d'évaluer les cibles fixées, de communiquer et d'échanger des informations simplement.



### 4. Étape 5 : Choix des IPE globaux

L'étape précédente a permis de sélectionner des jeux d'IPE spécifiques pour chaque acteur en fonction de ses besoins et attentes. Même si chaque acteur doit avoir un jeu spécifique d'indicateurs, ces jeux d'IPE doivent être corrélés pour aider les concepteurs, les dirigeants, etc., à choisir la meilleure solution durable dans le développement de produits et communiquer des informations globales.

Le jeu général doit être défini pour répondre aux questions du contexte (principalement réglementaire, du secteur et des attentes des clients) et aussi aux problématiques environnementales majeures analysées dans la première étape. Les indicateurs corrélés doivent prendre en compte toute la chaîne de valeur. Ils doivent être représentatifs de tous les aspects environnementaux identifiés. Ils doivent permettre de s'assurer de suivre la stratégie de l'entreprise et de la réévaluer au cours du temps. Par exemple, Xerox connu pour avoir mis en place une économie de fonctionnalité et donc une chaîne de valeur intégrée, a une vue globale de sa chaîne de valeur de l'acquisition à la fin de vie

en utilisant 3 indicateurs (la consommation d'énergie, l'intensité en matériaux, et les polluants émis) évalués à toutes les étapes du cycle de vie et lui permettant d'établir les « points chauds » à améliorer (McIntyre, et al., 1998).

Comme mentionné précédemment, les besoins internes et externes peuvent être en conflit (Janicot, 2007/1). Nous proposons donc la création de deux jeux d'IPE. Chaque acteur doit partager le contexte et le cadre de leurs besoins afin de trouver la meilleure solution par un compromis gagnant-gagnant. Le résultat de cette dernière étape de la méthode aboutit donc à la création de deux jeux d'indicateurs globaux pour l'entreprise ou pour un projet/produit.

- Un jeu d'IPE lié au développement de produits utile pour comparer les solutions alternatives ou suivre les améliorations potentielles (interne à l'entreprise).
- Un jeu d'IPE spécifique pour le management environnemental de l'entreprise et la communication externe avec les parties prenantes et l'échange d'informations.

Pour faire le choix des indicateurs corrélés, nous proposons d'identifier qui sont les acteurs importants pour chacun des jeux d'IPE. Nous proposons de se baser sur le même principe d'évaluation que précédemment (à l'étape 2) pour la définition de l'importance avec 3 niveaux : faible, fort, très fort. Ainsi, chaque acteur est placé dans un des 2 jeux d'IPE globaux, ou dans les deux jeux, ou dans aucun. S'il est évalué comme faible, l'acteur n'est pas identifié dans le jeu d'IPE global. S'il est évalué comme très fort, il est pris en compte par défaut. S'il est évalué comme fort, il est pris en compte, mais ces indicateurs ne seront pas prioritaires dans la sélection des IPE globaux. Chaque évaluation des acteurs doit être justifiée (tableau 7). Cela peut se faire à l'aide des étapes précédentes.

**Tableau [7]** Evaluation des acteurs pour la sélection des jeux d'IPE globaux

 Jeu d'IPE global pour l'amélioration produit		 Jeu d'IPE global pour le management et la communication	
Faible	L'acteur a peu voire pas d'implication dans les choix technologiques par rapport aux objectifs environnementaux	Faible	L'acteur a peu voire pas d'implication dans les choix stratégiques, et/ou pas un lien important avec les objectifs environnementaux (niveau fort à l'évaluation pour l'étape 2)
Fort	L'acteur a une influence mais ses actions et son rôle ne sont pas prioritaires par rapport aux objectifs environnementaux (niveau fort à l'évaluation pour l'étape 2)	Fort	L'acteur a un rôle stratégique mais n'est pas prioritaire dans la prise de décision et/ou n'est pas un acteur cible de la communication entreprise par rapport aux objectifs environnementaux
Très fort	L'acteur a une très forte influence, et ses actions et décisions sont en lien direct avec la conception du produit par rapport aux objectifs environnementaux	Très fort	L'acteur a une très forte position stratégique et/ou est un acteur cible de la communication par rapport aux objectifs environnementaux

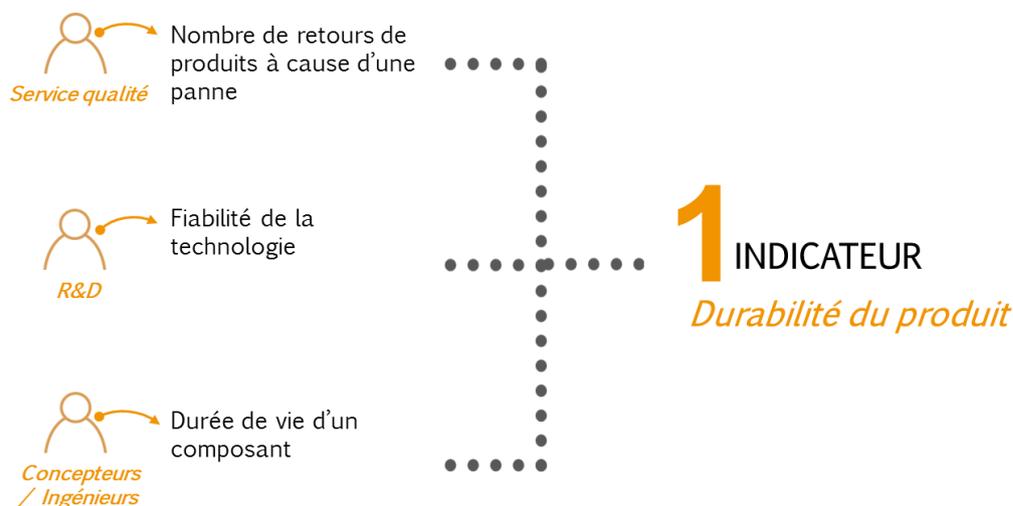
Pour le jeu d'indicateurs lié avec le développement de produits, les besoins différents de chaque acteur interne impliqué dans le développement et le cycle de vie du produit doivent être pris en considération, ainsi que les problématiques environnementales

majeures. Il s'agit de définir un jeu d'indicateur pour mesurer la performance environnementale d'actions précises et pour s'assurer de l'atteinte d'objectifs fixés.

Pour le jeu d'indicateurs liés avec le management/communication, il doit permettre de guider le choix de la stratégie environnementale de l'entreprise et la prise de décision. Il doit permettre d'informer de la performance environnementale pour assurer les besoins des utilisateurs externes (exemple, émissions de CO<sub>2</sub> annuelles liées aux activités de l'entreprise). Pour ce jeu, nous nous intéressons uniquement aux acteurs internes stratégiques avec un rôle de décision et aux acteurs externes.

Une fois les acteurs évalués, il faut corréliser leurs indicateurs et éviter les redondances.

Des liens doivent être trouvés entre les informations données par chaque jeu spécifique d'indicateurs. Par exemple (figure 33), pour suivre l'évolution de la durabilité d'un produit, l'IPE global du jeu pour l'amélioration produit peut être la durée de vie du produit et les IPE spécifiques peuvent être : le nombre de retours de produits à cause d'une panne pour le service qualité ; la fiabilité de la technologie pour le service R&D ; la durée de vie d'un composant pour les concepteurs/ingénieurs.



**Figure [33]** Étape 5 : Exemple de corrélation des indicateurs spécifiques à chaque acteur en un indicateur global

Ces liens permettront d'éviter d'avoir des IPE redondants. Les indicateurs corrélés ne doivent pas mesurer la même dimension. En effet, la mesure, le suivi et l'évaluation des IPE sont associés à des coûts (Rice & Rochet, 2005).

Des formules mathématiques peuvent être définies pour évaluer les nouveaux indicateurs corrélés à partir des informations précédemment collectées pour les indicateurs spécifiques.

## 5. Gestion des IPE et prise de décision

### a. Comment utiliser la méthode

Nous avons défini une méthode de sélection des IPE avec un outil de sélection parmi les IPE existants, voyons comment l'implanter dans l'entreprise.

### *i. Equipe projet*

Il est nécessaire de définir une équipe projet. Elle peut être pilotée par le service de l'entreprise le plus amène à conduire la démarche. Selon le fonctionnement de l'entreprise, il peut s'agir du département marketing, car les stratégies d'écoconception proviennent des demandes clients et que le service marketing a un rôle de définition de la stratégie produit, l'ingénierie ou le service HSE, etc. Il peut s'agir également d'une entité extérieure du type un cabinet de conseil, car l'entreprise ne dispose pas de connaissances/compétences par rapport à ce sujet. L'équipe projet pourra être étendue aux acteurs internes importants sélectionnés dans l'étape 2 pour aider au choix des jeux d'IPE spécifiques.

Afin de s'assurer de l'utilisation, il doit y avoir une implication de la direction (facteur de succès, cf. page 32). La mesure des IPE, le suivi et l'atteinte des valeurs cibles doivent faire partie des objectifs des différents services de l'entreprise qui se chargeront de challenger leurs collaborateurs. Ainsi pour les indicateurs des acteurs internes chaque service sera chargé de collecter et suivre les IPE, et de mettre en place des actions. Pour les IPE à destination des acteurs externes, il est nécessaire de définir en interne qui se charge de les évaluer et les suivre et les communiquer. L'identification des interactions entre les acteurs internes et externes réalisée dans l'étape 1 aide à les définir.

Afin de s'assurer de l'utilisation des IPE et de leur suivi, la mise en place de formation/sensibilisation peut être nécessaire, tout comme le développement d'outils (identifiés à l'étape 1).

### *ii. Gestion des IPE : mesure et suivi*

Il est nécessaire de construire un système de management des données cohérent, dans le but de s'assurer que le système de performance est bien suivi, que les données nécessaires sont bien collectées (que les personnes qui doivent collecter les informations en aient connaissance) et que les personnes concernées sont formées pour les analyser (Alwaer & Clements-Croome, 2010).

L'existence d'une base de données, structurée et alimentée de manière régulière permettant une évaluation automatisée des indicateurs, est un des facteurs de la réussite de l'intégration des indicateurs en conception.

La base de données devra être centralisée et contenir toutes les informations nécessaires à l'évaluation des IPE retenus. Afin de créer cette base de données, il est indispensable d'identifier :

- quelles sont les données nécessaires ?
- où les trouve-t-on ?
- comment seront-elles collectées ?
- qui se charge d'alimenter la base de données ?
- quelles sont les ressources nécessaires à la collecte ?

Les informations à collecter sont soit détenues en interne (dans l'entreprise), soit par les parties prenantes externes, notamment les fournisseurs et clients/utilisateurs.

Dans le cas des données détenues en interne, il est relativement facile de les obtenir, mais cela implique une bonne communication des services et un accès centralisé. Pour les données à collecter en dehors de l'entreprise, plusieurs moyens peuvent être mis en œuvre : mise en place d'un standard de collecte de données, audit client, expérimentations, simulations numériques ou encore le suivi en temps réel. L'analyse de la maturité de l'entreprise, en étape 1 de la méthode de sélection des IPE, permet en partie de répondre à ces différents points.

#### **b. Définition des objectifs**

Une fois les IPE définis, des objectifs d'amélioration doivent être mis en place. La définition des objectifs est personnelle à l'entreprise. Elle va dépendre de l'état des lieux fait à l'étape 1 et de la stratégie environnementale de l'entreprise. Les objectifs peuvent ainsi être basés sur les résultats de l'évaluation environnementale, sur des exigences réglementaires, sur des demandes clients, etc.

Il est possible que pour certains IPE, il ne soit pas possible de définir une valeur cible, mais juste une tendance, soit parce qu'il n'est pas chiffrable (qualitatif), soit par manque de données historiques et de recul pour le fixer dans un premier temps. Les valeurs cibles peuvent être réévaluées au cours du temps dans une démarche d'amélioration continue.

Les objectifs peuvent être fixés sur les objectifs globaux puis répercutés sur les IPE spécifiques ou inversement à l'aide de formules mathématiques.

#### **c. Gestion du multicritère et prise de décision**

Les étapes 4 et 5 amènent à se poser la question de la gestion du multicritère. En effet, chaque acteur important dans le processus d'écoconception aura plusieurs indicateurs à gérer, et devra faire des choix pour atteindre les objectifs. Nous avons vu dans l'état de l'art (cf. page 43) qu'il existait plusieurs méthodes de gestion du multicritère. Nous choisissons des méthodes compensatoires car bien que la dimension environnementale soit importante dans ces travaux, la réalité industrielle fait qu'elle ne peut pas prévaloir sur les autres dimensions qui sont économiques et sociales mais doivent être intégrées.

Nous proposons d'utiliser plusieurs méthodes.

- L'analyse multicritère hiérarchique pour les indicateurs spécifiques lorsqu'il s'agit de faire le choix entre plusieurs solutions pour les acteurs opérationnels. En effet, l'analyse multicritère hiérarchique est simple à mettre en œuvre et permet de comparer plusieurs alternatives selon différents critères à l'aide de matrices d'évaluation. Ces critères peuvent être environnementaux, mais pas seulement, ils peuvent être économiques, techniques, etc.
- La somme pondérée pour la gestion des indicateurs liés au management/pilotage. L'idée est d'arriver à un indicateur unique. La pondération doit être définie en fonction des objectifs de l'entreprise. Cette méthode a été retenue, car elle est intuitive pour les décideurs et les critères de pondération peuvent être définis en fonction de la stratégie de l'entreprise.

- Les indicateurs servant à l'échange d'informations sont gérés de manière individuelle.

La sélection des IPE doit être associée à leur management, à la prise de décision et à la mise en place de stratégies d'écoconception. La mise en place de stratégies d'écoconception doit être associée à la réalisation d'une évaluation environnementale pour s'assurer qu'il n'y a pas eu de transferts de pollution d'une étape du cycle de vie à une autre ou d'une catégorie d'impact à une autre. Si cela est le cas, les IPE doivent permettre d'arbitrer ces transferts de pollution.

Cette méthode de sélection des IPE sera illustrée dans la partie 3, cas d'étude.

## 6. Synthèse de la méthode de sélection des IPE

La figure 34 synthétise la méthode de sélection des IPE en décrivant chaque étape et en précisant les résultats attendus.

Il serait intéressant de mettre également en parallèle dans la sélection des IPE le niveau de maturité des acteurs de la chaîne de valeur et leur capacité à collecter/échanger de l'information. En effet, comme nous l'avons vu les acteurs internes et externes à l'entreprise ont des besoins et des niveaux de connaissances différents. Cela peut amener à se poser la question de la continuité de l'information et la capacité des acteurs externes à répondre aux besoins des acteurs internes (et vice versa ?). Ces éléments peuvent être identifiés lors de l'étape 1 et de l'analyse du niveau de maturité de l'entreprise et notamment du niveau de maturité d'échange d'informations avec les acteurs externes. Ces différents éléments permettront de sélectionner des IPE spécifiques aux différents acteurs de la chaîne de valeur pour répondre à leurs besoins spécifiques mais aussi de définir des IPE globaux pour le management et la communication en interne et en externe.

Définition de l'équipe projet (service pilote)

Intégration des acteurs internes importants à l'équipe projet

Proposition de ces travaux par rapport à l'existant

Fixation des objectifs et suivi des IPE

Prise de décision / action (gestion du multicritère)

Formation, développement d'outils, etc.

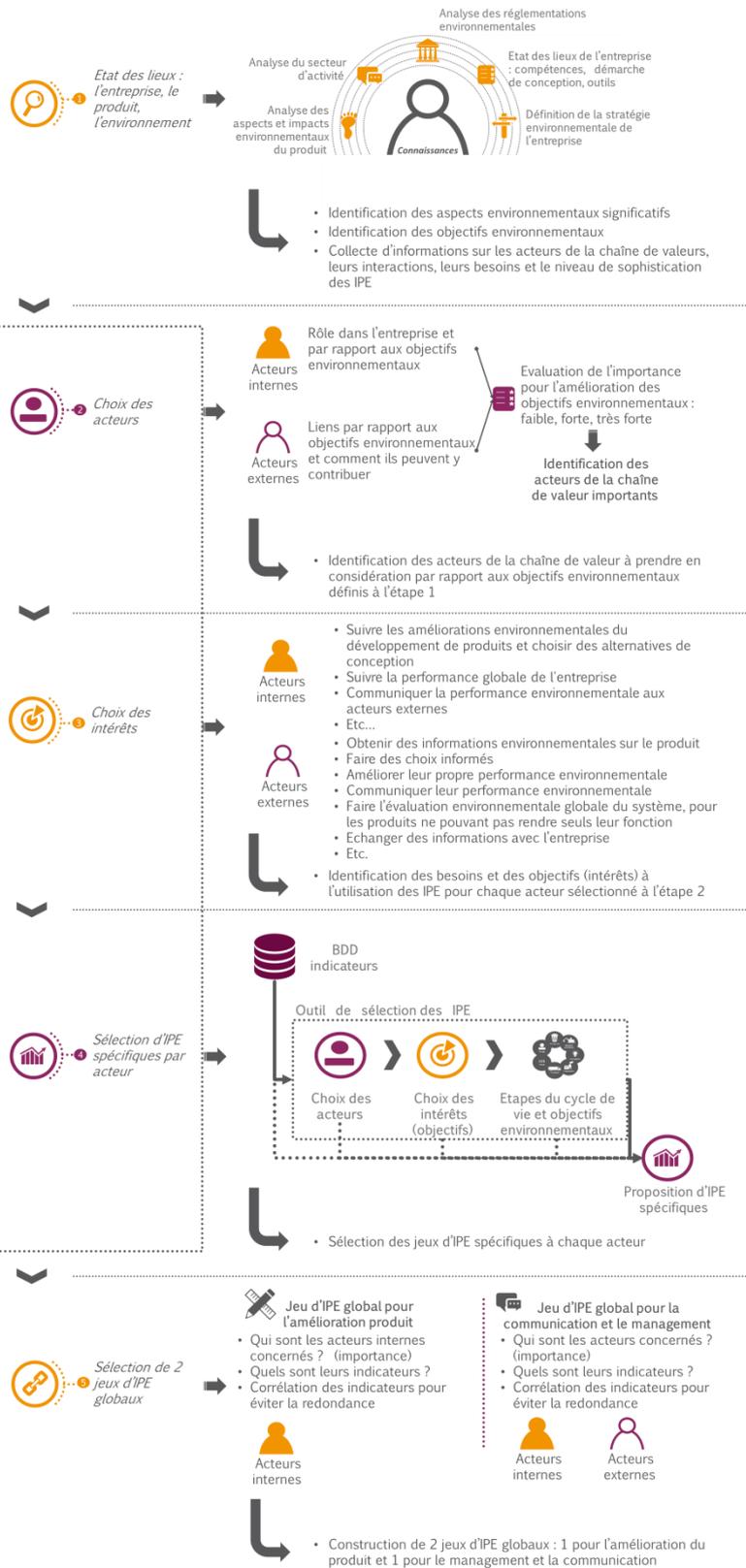


Figure [34] Synthèse de la méthode de sélection des IPE

## Chapitre 6. Intégration des IPE dans la démarche d'écoconception

Une fois les IPE sélectionnés, il est nécessaire de s'en servir pour mettre en place une démarche d'écoconception. Un focus est fait sur la mise en place de stratégies pour induire un comportement éco-responsable en phase d'utilisation. Pour rappel, l'appropriation et la personnalisation des outils d'écoconception à son utilisateur sont définies comme des facteurs de succès (cf. page 29).

### 1. Sélection des stratégies d'écoconception

À partir des objectifs environnementaux et des IPE définis précédemment, il est possible de définir des stratégies d'écoconception. Il s'agit d'un premier chemin, que nous proposons, pour la définition des stratégies d'écoconception (figure 35).

1. Définition des objectifs environnementaux → Définition des acteurs et objectifs → Sélection des IPE spécifiques → Sélection des IPE globaux → **Sélection des stratégies d'écoconception** (boucle 1).

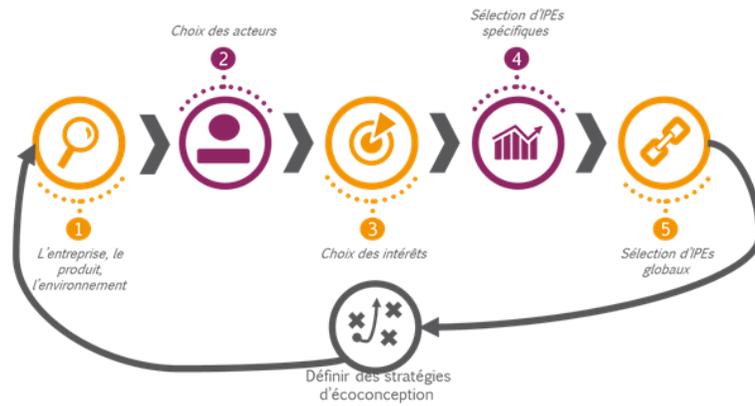
Mais la sélection des stratégies d'écoconception et des IPE peut se faire selon trois autres chemins (figure 35) :

2. Définition des objectifs environnementaux → Définition des acteurs et objectifs → Sélection des IPE spécifiques → **Sélection des stratégies d'écoconception** (boucle 2).
3. Définition des objectifs environnementaux → **Sélection des stratégies d'écoconception** → Définition des acteurs et objectifs → Sélection des IPE spécifiques → Sélection des IPE globaux (boucle 3).
4. Définition des objectifs environnementaux → **Sélection des stratégies d'écoconception** → Sélection des IPE globaux (boucle 4).

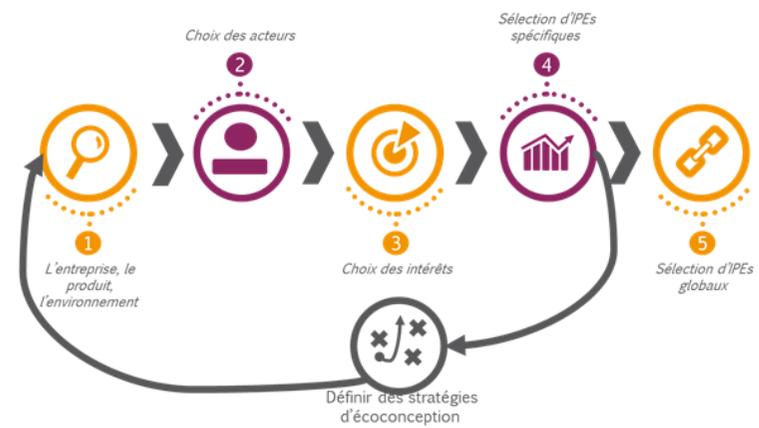
Pour les boucles 1 et 2, il s'agit d'une approche « bottom-up » qui passe de la mesure de la réalité terrain au diagnostic et à la mise en place de stratégies. Pour les boucles 3 et 4, on part d'une approche « top-down » avec la définition de la stratégie pour arriver à la définition d'indicateurs pour s'assurer de la performance environnementale des stratégies (efficacité, efficacité, pertinence).

Ces différentes boucles impliquent toutes de réaliser la première étape de la méthode de sélection des IPE, définie précédemment, et donc d'avoir fait un état des lieux du contexte environnemental du produit et de l'entreprise.

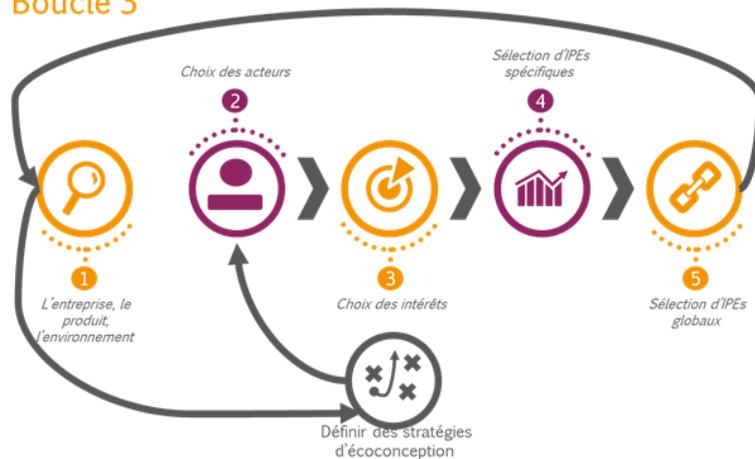
### Boucle 1



### Boucle 2



### Boucle 3



### Boucle 4

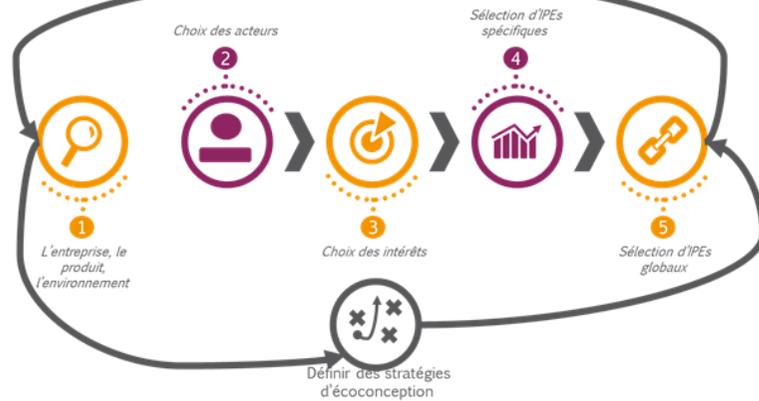


Figure [35] Boucles de sélection de stratégies d'écoconception

Afin d'aider à sélectionner les stratégies d'écoconception, nous proposons de compléter la base de données des IPE avec une base de données de stratégies d'écoconception.

La base de données des stratégies d'écoconception est définie à partir de la littérature existante (Brezet & Van Hemel, 1997), (Crul & Diehl, 2006), (Belletire, et al., 2014), (Issa, et al., 2015). Nous avons ajouté des stratégies spécifiques au cas d'étude. Elle est intégrée dans l'outil de sélection des IPE (cf. page 87). Avant la sélection des acteurs, il est possible de faire le choix de sélectionner des stratégies d'écoconception plutôt que des IPE (figure 36). Cela conduit directement à la sélection des étapes du cycle de vie et des objectifs environnementaux (cf. figure 30) et à la proposition de stratégies d'écoconception applicables.



Figure [36] Capture d'image de l'outil de proposition de stratégies d'écoconception

Nous avons vu dans la première partie que ces travaux de thèse sont axés sur les produits consommateurs d'énergie en utilisation dans le cadre d'une relation en BtoB. Ces produits ont principalement des impacts environnementaux en phase d'utilisation. Nous faisons donc un focus sur les stratégies d'écoconception visant à améliorer la performance environnementale de la phase d'usage. Dans un premier temps, nous allons voir comment intégrer tous les acteurs de la chaîne de valeur à l'aide d'IPE et comment cela peut aider à améliorer la performance environnementale. Dans un second temps, un focus est fait sur la mise en place d'une méthode pour l'éco-utilisation à l'aide d'IPE et donc un focus sur les clients/utilisateurs.

## 2. Utilisation des IPE pour intégrer la phase d'utilisation dans la chaîne de valeur

Tous les acteurs de la chaîne de valeur peuvent interagir avec la phase d'utilisation, directement ou non. Ici, le périmètre de la phase d'utilisation comprend, la sélection, l'achat, l'usage, la maintenance et le dépôt en fin de vie, comme il a été défini en figure 13. La figure 37 montre les liens entre les phases du cycle de vie et l'usage. L'information et son échange entre les différents acteurs de la chaîne de valeur sont primordiaux pour suivre et améliorer la performance environnementale globale du produit et mettre en place une démarche d'écoconception. Les IPE définis précédemment à l'aide de la méthode de sélection peuvent permettre à chaque acteur de la chaîne de valeur de communiquer des informations, d'évaluer la performance environnementale, et de mettre en place des leviers d'action. Chaque phase du cycle de vie et les leviers pouvant être mis en place sont détaillés ci-après. Il s'agit d'une proposition basée sur la réflexion menée dans le cadre du cas d'étude, mais pouvant s'appliquer à d'autres

entreprises. Ces leviers peuvent être complétés en fonction du cas particulier, du contexte environnemental du produit et de l'entreprise.

### a. L'entreprise

L'entreprise mettant sur le marché son produit a un rôle primordial. Elle peut sensibiliser, évaluer, encadrer et améliorer les pratiques des autres acteurs de la chaîne de valeur dans l'optique d'améliorer la performance environnementale de son produit. Elle a des liens directs avec les clients/utilisateurs et avec les autres acteurs de la chaîne de valeur.

À l'aide d'IPE, elle peut proposer des diagnostics d'usage. Elle peut ensuite donner des recommandations sur les bonnes pratiques d'utilisation et sur l'adéquation entre les produits et l'usage désiré. Elle peut se servir de l'analyse des comportements des utilisateurs et des fonctionnements de ses produits pour faire évoluer ses produits (fonctionnalité, design) (cf. page 105). Cette partie est développée dans le point suivant avec un focus sur la mise en place de stratégies pour un comportement éco-responsable à l'aide des IPE.

L'entreprise peut se servir d'IPE dans différents outils d'écoconception avec les autres acteurs de la chaîne de valeur. Avec les fournisseurs, elle peut mettre en place des standards d'exigences en matière de performance environnementale et d'écoconception. Elle peut fixer des objectifs par rapport à des IPE par exemple sur la performance énergétique, sur la composition matière, le taux de recyclabilité des composants, la disponibilité des pièces de rechange, etc. Elle peut utiliser des standards permettant l'échange d'informations.

Avec les distributeurs, les autres entreprises du système global et les intégrateurs de solution, l'entreprise peut fournir des informations sur l'analyse des comportements qu'elle a réalisée et échanger des informations pour améliorer la performance environnementale globale du système à l'aide des IPE. Ainsi, ces acteurs seront à même de proposer la meilleure solution pour le client et évaluer la performance environnementale globale.

Avec les acteurs de la fin de vie, l'entreprise peut proposer un guide de démantèlement, à partir des données collectées auprès des filières de fin de vie sur les taux de recyclabilité réels, les technologies existantes, etc. Cela pourra aider les utilisateurs à choisir le meilleur traitement en fin de vie et l'entreprise à améliorer la conception de son produit pour que celui-ci soit traité au mieux en fin de vie.

### b. Approvisionnement (les fournisseurs)

Nous avons vu que l'échange d'informations entre les fournisseurs et l'entreprise est important notamment pour l'innovation et l'amélioration de la performance environnementale. Leur interaction avec la phase d'usage sera liée à la performance énergétique et environnementale (proposition du fournisseur, cf. page 49), mais aussi à la mise à disposition facilement de pièces de rechange et le développement de programme de reconditionnement des pièces en fin de vie. L'emploi d'IPE, sur les taux de pièces les plus souvent remplacées ou défectueuses, peuvent aider à orienter ses

programmes de mise à disposition des pièces de rechange, de remanufacturing et d'améliorer la durabilité du produit.



#### c. Les distributeurs, autres entreprises du système global et intégrateurs de solution

Dans le cadre des produits ne pouvant pas remplir seuls leur fonction, les intégrateurs ont un rôle important à jouer. La solution complexe peut modifier les performances environnementales voulues par l'entreprise initiale. Une distinction doit être faite entre le cas où il y a un « architecte » qui gère la solution complexe finale (cas d'un constructeur automobile, chaque élément est sélectionné par lui pour être intégré dans le système global) et le cas où il n'y a pas d'« architecte » (ici, chacun des éléments est sélectionné séparément par le client/l'utilisateur pour être assemblé). Dans ce dernier cas, il est intéressant d'avoir un échange entre l'entreprise et les autres entreprises du système complet pour améliorer la performance globale du produit. Cela peut se faire notamment à l'aide d'IPE tel que l'efficacité énergétique globale du système, le taux de recyclabilité total, etc.

Les distributeurs et les intégrateurs doivent interagir avec l'entreprise pour proposer à l'utilisateur la meilleure solution disponible par rapport à son usage. Cela peut également se faire au travers de la proposition d'accessoires. L'utilisateur doit être sensibilisé et avoir les informations nécessaires pour sélectionner au mieux le produit et les accessoires. Cela peut se faire à l'aide d'IPE sur les gains environnementaux que cela peut générer.



#### d. Utilisation

La phase d'usage est directement liée au client/utilisateur final, ainsi la prise de conscience de l'utilisateur sur ses propres comportements et les conséquences que cela peut avoir sont importantes. Cette prise de conscience passe par toutes les informations données par les différents acteurs de la chaîne de valeur, à l'aide d'IPE.

Ici, nous nous intéressons à des produits utilisés en BtoB. Comme mentionnée précédemment, une différenciation doit être faite entre le client qui décide d'acheter le produit et l'utilisateur final. La prise de conscience sera différente et les informations à échanger ne seront pas forcément les mêmes. Ainsi, l'utilisateur final sera moins sensible à son propre comportement, car les répercussions seront directement pour le client. Or paradoxalement, c'est son comportement à lui qui pourra avoir le plus de répercussions.



#### e. Les filières de fin de vie

Les acteurs de fin de vie jouent aussi un rôle dans la phase d'usage. Pour rappel, la phase d'usage va du choix d'achat à la mise au rebut du produit par l'utilisateur. Les acteurs de la fin de vie doivent donc communiquer des informations soit directement au client/utilisateur, soit à l'entreprise mettant sur le marché le produit ou aux intégrateurs, sur les possibilités de traitement en fin de vie, les filières existantes et les difficultés dans le cadre de produits multi-matériaux et assemblages. Cela peut également se faire à l'aide d'IPE sur les taux de recyclabilité, la performance énergétique de la filière de recyclage, etc.

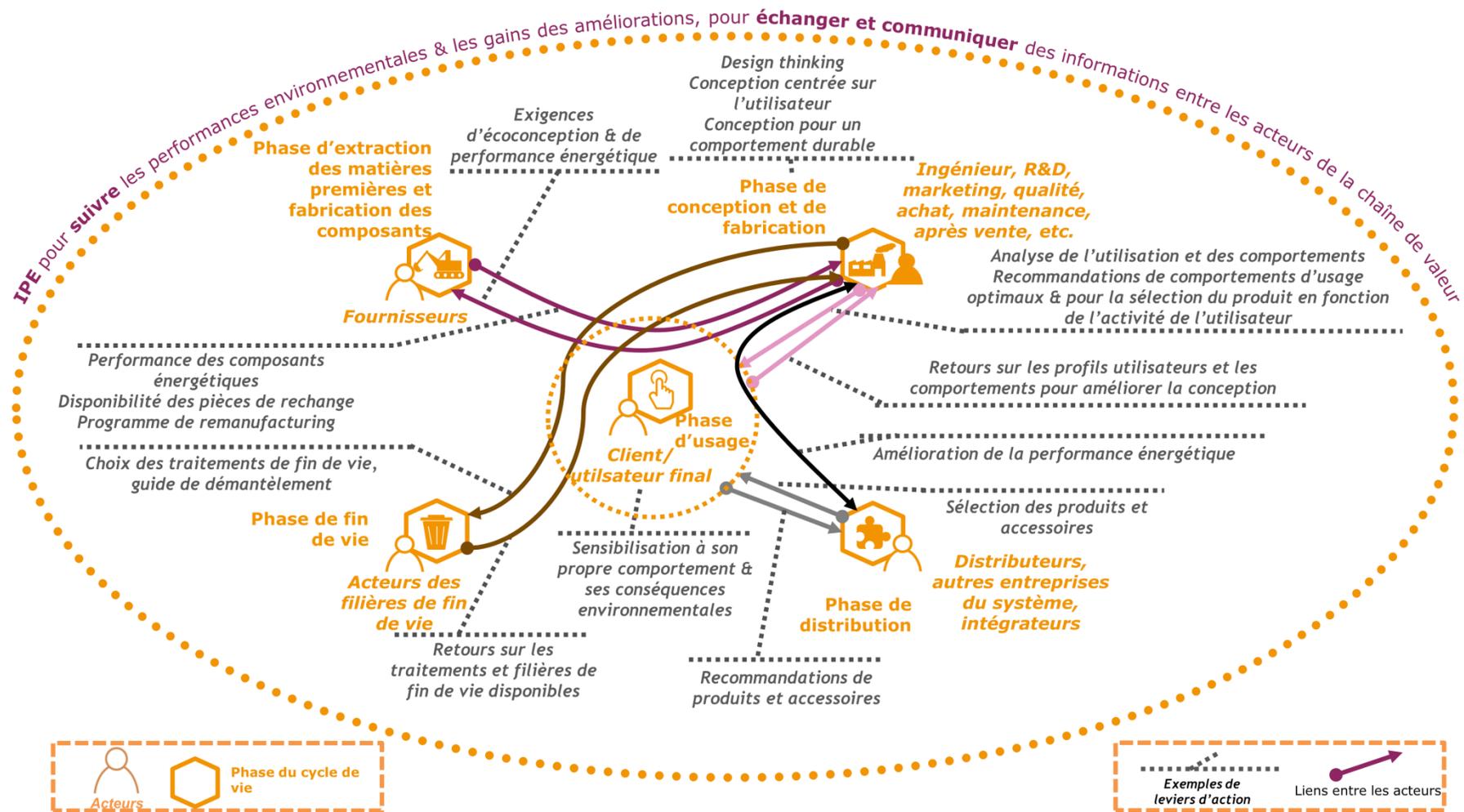


Figure [37] Intégration de la phase d'usage dans la chaîne de valeur

Bien que toutes les phases du cycle de vie soient importantes à considérer, dans la suite de ce chapitre, un focus est fait sur une stratégie d'écoconception qui vise à inciter le client/utilisateur à avoir une utilisation éco-responsable des produits tout en utilisant cet accompagnement comme un avantage concurrentiel.

### 3. Utilisation des IPE pour inciter à une utilisation éco-responsable des produits et servir d'avantage concurrentiel.

L'intégration de l'utilisation en conception et la compréhension de l'usage et du contexte d'usage sont importantes pour s'assurer que le produit est effectivement utilisé de manière éco-responsable. Or, il y a très peu d'informations sur les réels comportements utilisateurs et leur impact sur la performance environnementale du produit.

La stratégie à mettre en place doit être dans un objectif gagnant-gagnant pour le client/utilisateur et l'entreprise. Il est important que cette dernière puisse tirer un avantage concurrentiel de cette stratégie et augmenter sa valeur. La valeur se définit comme le montant que l'acheteur est prêt à payer pour ce que fournit l'entreprise (Porter, 1985). Ainsi, une entreprise est rentable si la valeur créée dépasse le coût de création de celle-ci. Pour obtenir un avantage concurrentiel, l'entreprise doit soit réduire le coût de ses activités, soit créer plus de valeur par la différenciation et un prix premium (Porter & Millar, 1985). La différenciation provient de la façon dont le produit est utilisé ou consommé par le client (Porter, 1985). Une des activités associées à l'analyse de la valeur est le soutien au produit, notamment la proposition de services lors de l'usage.

Toutes les activités de la chaîne de valeur utilisent de l'information. L'information permet de créer des liens entre les différents acteurs et donc de la valeur et un avantage concurrentiel (Porter & Millar, 1985). En effet, l'information est un coproduit des activités de l'entreprise et peut être vendue (Porter & Millar, 1985). Les différentes activités à l'intérieur de l'entreprise sont liées entre elles par des liens, mais ces liens sont aussi extérieurs et créent des interdépendances entre les différents acteurs (Porter & Millar, 1985). Une entreprise peut créer un avantage concurrentiel en optimisant ou coordonnant ces liens.

L'analyse de la chaîne de valeur repose sur l'analyse de l'échange d'informations, des flux d'argent et de produits (Rose & Stevels, 2000). Il est important d'inclure des liens entre toutes les étapes de la chaîne de valeur et les acteurs plutôt que de se concentrer sur une étape du cycle de vie ou un groupe d'acteurs (Fasse, et al., 2011). L'échange d'informations avec les acteurs externes permet aussi de créer de la valeur et un avantage concurrentiel.

À partir des stratégies de conception pour une utilisation éco-responsable des produits et leur potentiel de liberté d'action de l'utilisateur (cf. page 55), nous avons évalué le potentiel d'accompagnement par l'entreprise et donc le potentiel d'avantage concurrentiel

(tableau 8). L'objectif est d'améliorer la performance environnementale tout en augmentant les profits de l'entreprise.

**Tableau [8]** Potentiel d'accompagnement de l'utilisateur et d'avantage concurrentiel en fonction des stratégies d'utilisation pour un comportement éco-responsable.

	Stratégies pour une utilisation durable basées sur la littérature	Potentiel d'accompagnement de l'utilisateur	Description
<i>Pouvoir de décision</i> 	Eco-information (informer)	Fort	Retour d'information possible à l'utilisateur mais l'utilisateur va chercher l'information de lui-même pas d'analyse particulière des comportements ou de recommandations
	Eco-choix (choisir)	Fort	Retour d'information possible à l'utilisateur mais l'utilisateur va chercher l'information, il doit de par lui-même faire ses propres choix de comportement
	Eco-retour (retour d'expérience)	Très fort	Retour d'information à l'utilisateur, possibilité de réaliser un diagnostic utilisateur et d'alerter en temps réel lors d'une mauvaise pratique d'utilisation
	Eco-spur (inciter)	Très fort	Retour d'information à l'utilisateur et système de récompense négative ou positive, possibilité de réaliser un diagnostic utilisateur et de lui montrer les gains potentiels
	Eco-steer (guider)	Faible	Modification sur l'équipement, une fois la modification faite peu de possibilité d'accompagnement. L'entreprise paramètre les réglages par défauts pour un comportement durable. Peu de contrôle sur les cas particuliers
	Correspondance des fonctions	Très faible	Nécessite d'avoir un usage similaire pour tous les produits et tous les utilisateurs, ou la possibilité de proposer des fonctions en option en fonction des besoins des clients. Modification sur l'équipement, une fois la modification faite pas de possibilité d'accompagnement.
	Fonctionnalité forcée (forcer)	Très faible	Modification sur l'équipement, une fois la modification faite pas de possibilité d'accompagnement. L'utilisation durable est transparente pour l'utilisateur
	Design intelligent (automatiser)	Très faible	Modification sur l'équipement, une fois la modification faite pas de possibilité d'accompagnement. L'utilisation durable est transparente pour l'utilisateur

Les stratégies avec le plus fort potentiel d'accompagnement et d'avantage concurrentiel sont les stratégies éco-retour et eco-spur, qui reposent directement sur un retour à l'utilisateur, et donc la proposition d'un service. La stratégie d'éco-retour d'informations nous semble idéale, mais peut-être contraignante à mettre en place. Elle nécessite un équipement des produits permettant un retour en direct et un système d'alerte. La stratégie eco-spur est basée sur la récompense négative ou positive. Dans le cadre de relations en BtoB le comportement de l'utilisateur est égoïste (il souhaite faire du profit), un système de récompense basé sur des gains financiers pourra l'encourager à changer. Cela peut être aussi vrai en BtoC.

Ces deux stratégies sont basées sur le retour d'informations. Les utilisateurs peuvent avoir un comportement conservateur et ne pas changer même dans le cas d'un retour d'information en temps réel. Elles donnent toutes les deux un retour par alertes. Elles font un diagnostic, mais ne donnent pas de recommandations. Il y a de nombreux acteurs experts en évaluation, mais peu en recommandations de stratégies concrètes d'écoconception et d'éco-utilisation dans ce cas. Les autres stratégies sont principalement basées sur la mise à disposition à l'utilisateur d'informations pour faire des choix éclairés qui peuvent permettre un accompagnement sur un instant donné, mais pas sur toute la durée d'usage, ou sur la modification de la conception du produit et ses fonctionnalités. Ces dernières ne permettent pas d'accompagner le client. Une fois la modification faite, le comportement éco-responsable qu'elle est censée appliquer est automatique.

Nous proposons d'inciter un comportement éco-responsable et servir d'avantage concurrentiel en faisant la proposition d'un accompagnement à l'aide d'un diagnostic basé sur des IPE (gestion de la performance environnementale) puis d'un système d'améliorations (prévention des impacts).

Cet accompagnement vise à réduire les impacts environnementaux en utilisation tout en augmentant la valeur de l'entreprise. Nous entrons ici dans un premier niveau d'économie de la fonctionnalité. Il existe plusieurs niveaux dans l'économie de la fonctionnalité : des stratégies orientées produit, des stratégies orientées usage, des stratégies orientées résultat et des services purs (figure 38) (Plan C, s.d.), (Tukker, 2004). Dans les stratégies orientées produit, on retrouve deux possibilités, vendre un produit avec un service relatif au produit (par exemple un contrat de maintenance) ou vendre un produit avec service relatif à l'usage. C'est dans cette deuxième catégorie que s'intègre notre proposition.

Il est ensuite possible de passer à des stratégies orientées usage, l'entreprise ne vend plus un produit, mais un service. Le client n'est pas forcément propriétaire du produit et utilise soit le produit pour lui seul soit en partage. Les stratégies orientées résultat visent à vendre un service sans que le client se soucie de la manière dont le service est rendu. Enfin, le dernier niveau consiste à vendre un service sans l'utilisation d'un produit. Ces options n'ont pas été développées, car elles ne sont pas aujourd'hui envisageables avec le cas d'étude (voir partie 3) qui ne remplit pas seul sa fonction et nécessiterait d'intégrer les autres acteurs du système global dans la solution de service. Il s'agit d'une des perspectives de notre étude.

# PRODUCT SERVICE SYSTEMS: MAIN AND SUB-CATEGORIES

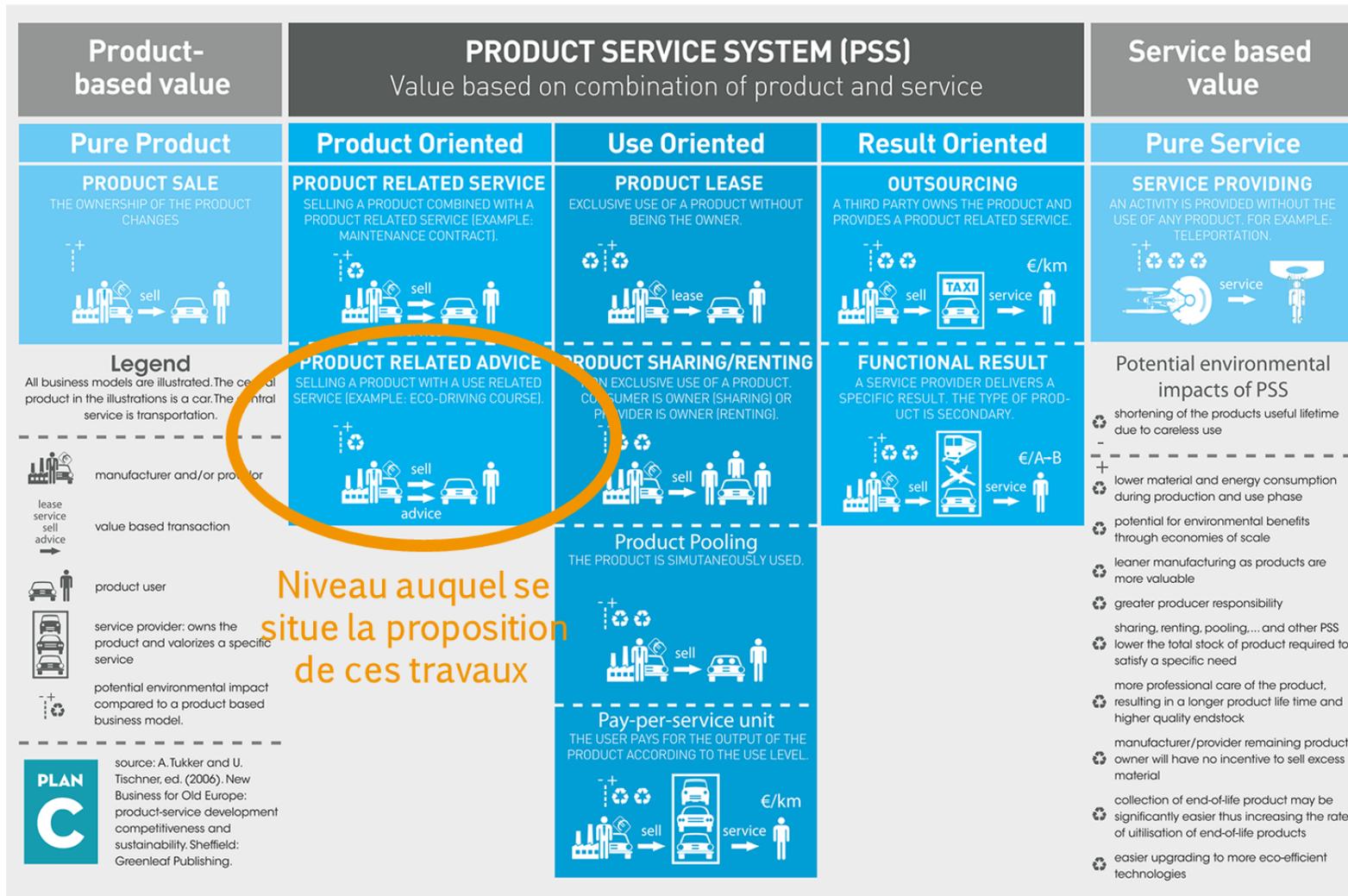
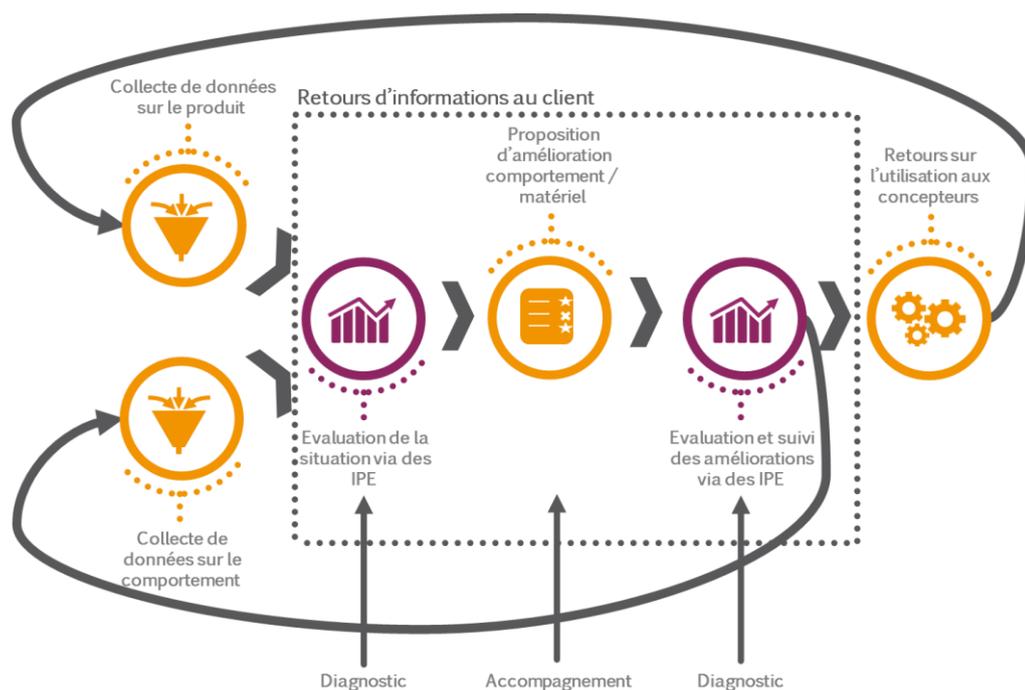


Figure [38] Infographie sur l'économie de la fonctionnalité et ses différents niveaux tel que proposé par (Plan C, s.d.)

Pour mettre en place cet accompagnement, une méthode a été définie (figure 39).



**Figure [39]** Méthodologie pour une utilisation éco-responsable des produits avec un avantage concurrentiel

Elle repose sur :

- la collecte de données (produit et comportements de l'utilisateur), pour informer le client, mais aussi pour avoir des données pour optimiser la conception ;
- le retour d'information au client de l'évaluation de la performance environnementale par des IPE à l'aide d'un tableau de bord (audit client/diagnostic) ;
- l'identification des bonnes et mauvaises pratiques d'utilisation ;
- la proposition de recommandations pour l'amélioration du comportement de l'utilisateur final et pour le choix du matériel le plus adapté pour le client (proposition d'un service au client/avantage concurrentiel). La proposition de ce service au client est un premier pas dans l'économie de la fonctionnalité orientée produit ;
- la réévaluation de la performance environnementale grâce aux mêmes IPE que précédemment et la présentation des gains potentiels (gains en énergie consommée et gains financiers potentiels) ;
- la collecte de données sur l'usage pour faire des retours d'informations aux concepteurs et adapter le design du produit et les fonctionnalités pour s'orienter vers une stratégie pour un comportement éco-responsable basée sur un design intelligent.

Ces différents points sont détaillés ci-après.

Le retour d'informations se fait principalement au client (BtoB) qui sera chargé de challenger ses utilisateurs finals sur leurs comportements.



### a. Collecte d'informations

L'information est primordiale pour établir un diagnostic et s'assurer de la performance des solutions mises en place. L'accumulation d'informations sur l'utilisation peut aider l'entreprise à mettre en place des stratégies pour une utilisation optimale.

La collecte de données concerne deux types de données.

- Les données sur le produit qui concernent toutes les informations liées aux fonctionnements du produit qui ne sont pas directement imputables à l'utilisateur. En fonction du produit et plus spécifiquement dans le cas d'étude des unités de réfrigération pour le transport routier, cela concernera notamment, les alarmes, les pannes, les couples moteurs et toutes autres données physiques lors de l'utilisation.
- Les données sur les comportements qui concernent toutes les données d'usage directement liées à l'utilisateur, autrement dit la manière dont le produit est utilisé.

Pour obtenir ces 2 types de données, il est important de définir quels sont les données disponibles sans effort, la précision voulue des résultats et les moyens disponibles pour collecter les données dans le choix de la source.

Pour ce faire, différentes sources de données et moyens peuvent permettre de collecter les informations (figure 40) :

- l'acquisition de données en temps réel ;
- la réalisation de tests pour obtenir des données expérimentales ;
- la simulation numérique pour aboutir à des données théoriques ;
- l'analyse des données existantes pour obtenir des données moyennes de la littérature ou des déclarations clients.

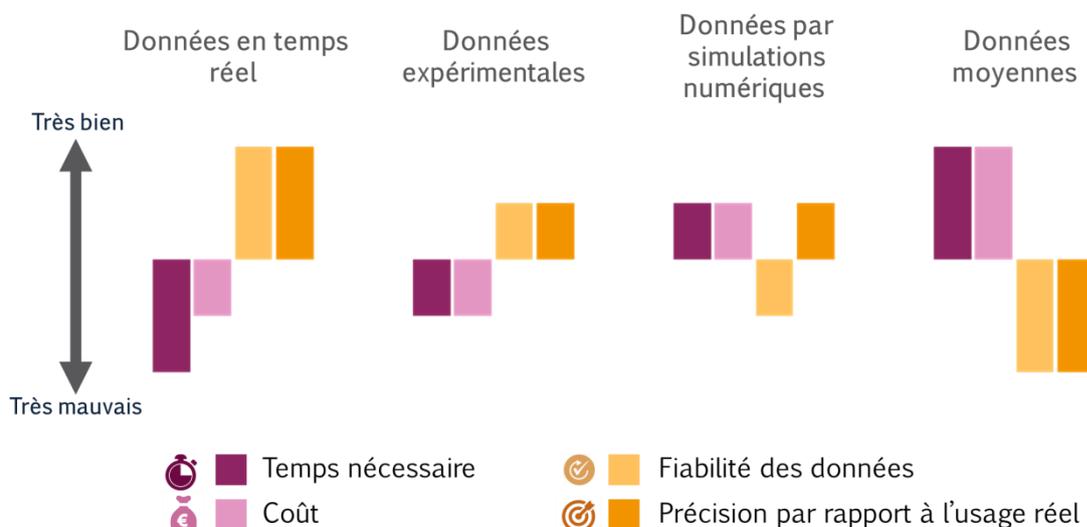


Figure [40] Comparaison des méthodes de collecte de données sur l'usage

Pour les données en temps réel, l'évolution des technologies peut permettre de suivre en direct les habitudes des consommateurs et peut donner des informations à plus grande échelle. Mais cette solution peut s'avérer relativement coûteuse, car il s'agit d'instrumenter chaque équipement avec plusieurs capteurs et de mettre des moyens pour analyser ces données. Il s'agit pourtant de la solution qui nous semble la plus fiable, car la plus réaliste sur la collecte de données des comportements. La solution de collecte en temps réel nécessite aussi de devoir faire un retour d'information sur les comportements en temps réel. Le retour d'information sera fiable pour un utilisateur, mais peu pour un autre. Cela nécessite d'avoir un système perfectionné pour collecter, stocker et analyser les données et de fournir un diagnostic. Ces données peuvent aider à créer des scénarios d'utilisation en identifiant des catégories d'utilisateurs, par exemple des clients avec des activités similaires.

Les données expérimentales peuvent être très consommatrices de temps et coûteuses à collecter, en fonction des moyens mis en œuvre et du produit considéré. La grande diversité de paramètres influençant l'usage pour certains produits peut rendre ses expérimentations difficiles. Cette méthode nécessite donc de déterminer des paramètres précis à analyser et un peu d'expérience sur les comportements utilisateurs pour avoir des données fiables. Les données peuvent être relativement précises si les conditions réelles d'usage peuvent être reproduites.

Les données provenant de simulations numériques peuvent nécessiter d'avoir un nombre important de connaissances pour la modélisation (fonctionnement logiciel, règles de calcul, capacité d'interprétation, nécessité d'avoir des modèles existants ou de les créer). Tout comme les données expérimentales, la grande diversité de paramètres influençant l'usage pour certains produits peut rendre la modélisation difficile. Dans ce cas, il est aussi indispensable de déterminer des paramètres précis à analyser pour avoir des données proches de la réalité.

Les scénarios moyens sont les vecteurs de collecte les moins fiables, notamment si le nombre d'informations pour créer le scénario est trop faible. Ce scénario moyen peut être très éloigné de la réalité. Mais, ce type d'information est relativement rapide à obtenir et à traiter. Ils peuvent être établis à partir d'une méta-analyse de la littérature ou par sondage auprès des clients. Les sondages permettent à la fois de poser des questions sur le comportement, mais aussi sur la psychologie, les attitudes, les croyances et les attentes. Ils donnent accès à un important panel de personnes, mais la manière dont sont posées les questions peut influencer les résultats. Ils sont intéressants en ACV, car ils peuvent donner une bonne représentation des habitudes d'une population et leur distribution générale. L'une des problématiques de l'utilisation des sondages est qu'ils mesurent les intentions et non les actuels usages et peuvent être biaisés par les contraintes sociales (Polizzi di Sorrentino, et al., 2016). On peut aussi mentionner les déclarations clients qui permettent comme les sondages de créer des scénarios moyens.

Cependant, il est possible de combiner plusieurs sources de données pour évaluer la performance environnementale de l'utilisation.

Pour les sources de données autres qu'en temps réel, il est nécessaire d'avoir une connaissance au préalable des comportements pouvant survenir. Cela permet de définir les expérimentations à conduire mais aussi les sondages pouvant être utilisés.

Les données intrinsèques au produit doivent être collectées pour permettre de calculer les IPE.

À la fin de ce point, nous disposons de données sur le comportement de l'utilisateur et de données intrinsèques au produit. Dans le cas d'étude (cf. partie 3), les données collectées sur le produit sont collectées de manière expérimentale et les données sur le comportement sont collectées par les déclarations des clients.

## b. Évaluation de la performance environnementale de l'usage/diagnostic

La seconde étape vise, à partir des informations collectées (fonctionnement du produit selon les usages et les comportements de l'utilisateur), à faire un état des lieux de la performance environnementale. Il s'agit de faire un diagnostic client. Ici, les IPE sélectionnés à l'aide de la base de données (méthode de sélection des IPE) à destination des acteurs de la phase d'utilisation seront utilisés. Il s'agit d'IPE spécifiques. Ces informations peuvent être données sous la forme d'un tableau de bord (exemple en figure 41) avec le cas du client et son positionnement par rapport à une utilisation optimale et une utilisation non optimale.

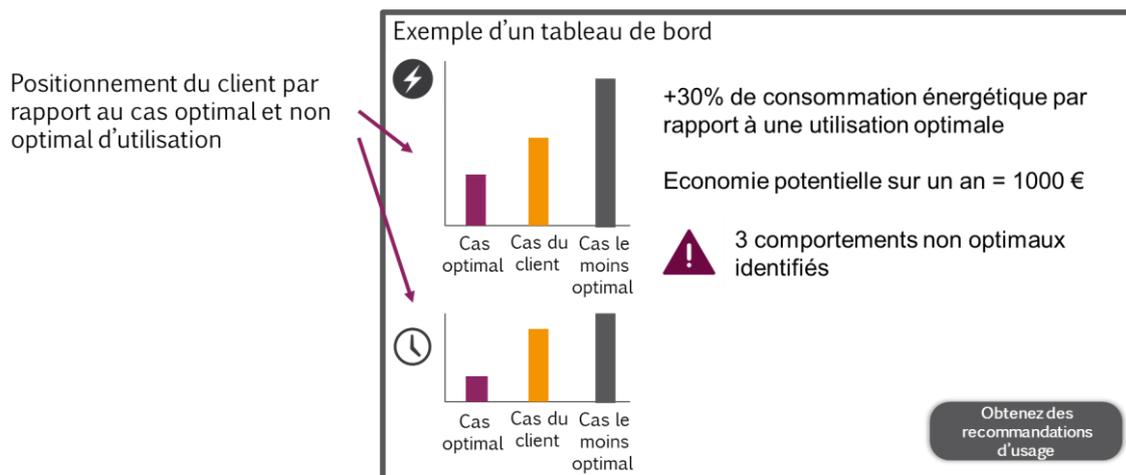


Figure [41] Exemple d'un tableau de bord pour le diagnostic d'usage

Des formules mathématiques doivent être définies pour calculer les IPE à partir des données collectées.

Pour modéliser l'usage et réaliser le diagnostic, nous prenons en compte les activités commerciales du client, les caractéristiques techniques intrinsèques du produit (mode de fonctionnement, consommation énergétique, etc.) et les comportements de l'utilisateur.

Cette analyse permettra au client d'avoir une analyse de la performance environnementale personnalisée, liée à son propre comportement ou à celui de ses utilisateurs. Il pourra également se servir des informations obtenues sous forme d'indicateurs pour communiquer ses résultats à d'autres parties prenantes. C'est par exemple le cas des transporteurs qui doivent communiquer sur les émissions de CO<sub>2</sub>

liées à leurs trajets. Les IPE utilisés doivent permettre au client d'avoir une représentation des problématiques environnementales majeures et de convertir ces informations en gains potentiels financiers.



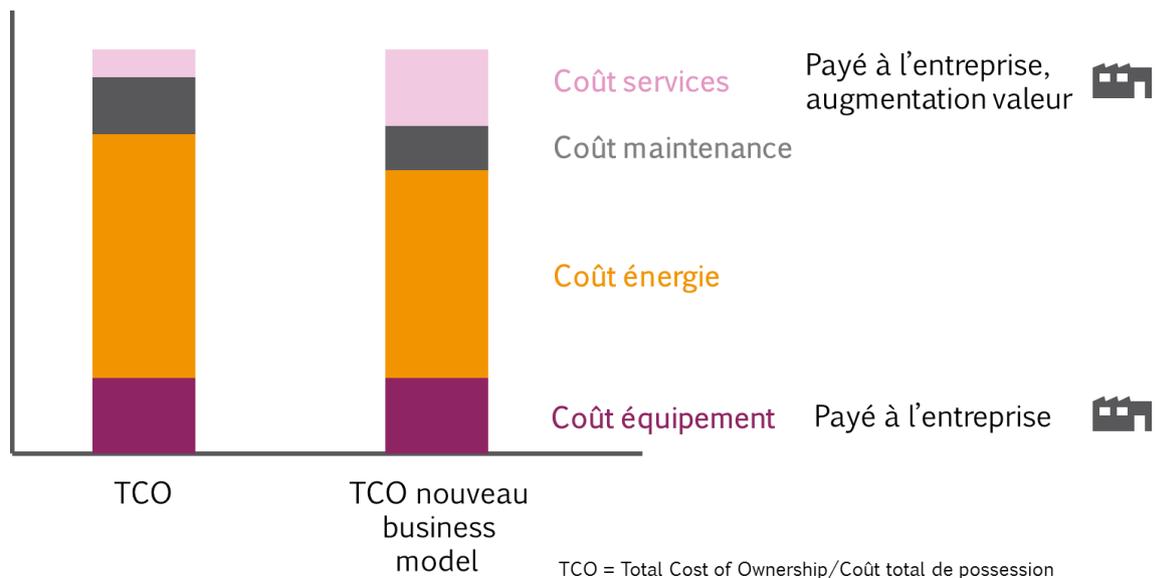
### c. Identification des bonnes et mauvaises pratiques et proposition d'amélioration

Une fois l'état des lieux réalisé et la performance de l'usage mesurée suivant différents IPE, il est nécessaire d'analyser les causes de cette performance environnementale. Ici, on parle d'identification des bonnes et mauvaises pratiques d'utilisation par le client/utilisateur final.

C'est à cette étape que l'analyse de la performance devient un avantage concurrentiel, car l'entreprise propose un service sur l'usage. A cet instant, l'entreprise est en possibilité de fournir à ses clients dans un premier lieu une analyse de sa propre performance environnementale, il s'agit d'une première étape de diagnostic. Mais, l'entreprise peut aller plus loin et proposer un service permettant au client d'améliorer sa performance environnementale par le biais de recommandations d'usage complètement personnalisées à l'activité du client. Le diagnostic peut se faire également sur le matériel en lui-même, grâce aux données physiques collectées sur le produit et notamment des recommandations sur le suivi des maintenances. L'analyse des activités du client peut aussi permettre de s'assurer de l'adéquation entre le produit souhaité/acheté et son réel usage.

Il s'agit aussi de donner des recommandations sur les accessoires pouvant être utilisés, car ils peuvent avoir une influence sur la performance environnementale. On peut prendre en compte le troisième type d'acteur impliqué dans la phase d'usage qui est l'intégrateur/le distributeur. L'entreprise du produit n'est pas forcément celle qui développe et fournit les accessoires pour les autres éléments du système.

On entre dans un nouveau business model d'amélioration environnementale de l'utilisation, où l'on vend un service de diagnostic et de prévention. Le TCO (Total Cost of Ownership, coût total de possession en français), pour un produit à durée de vie longue et consommateur d'énergie, peut se définir comme le coût de l'énergie, plus le coût de l'équipement, auquel on additionne le coût de l'entretien et de la maintenance. Dans le cadre de ce business model, on cherche à réduire les coûts en énergie et en entretien/maintenance pour le client tout en augmentant le coût de l'équipement grâce à l'addition d'un service d'accompagnement. Il faut cependant faire attention à ne pas passer à l'effet inverse où le coût du service d'accompagnement surpasse les gains en énergie et en entretien/maintenance sur la durée de vie du produit (figure 42).



**Figure [42]** Coût total de possession avant et après proposition d'un service d'accompagnement

#### d. Suivi de l'évolution de la performance environnementale

Afin de s'assurer des bénéfices liés à l'analyse personnalisée, le tableau de bord permet de suivre les évolutions des pratiques mises en œuvre et de s'assurer qu'il n'y a pas d'effet rebond. Il s'agira de suivre les IPE utilisés pour l'évaluation de la performance environnementale et de montrer les gains positifs ou négatifs liés aux recommandations proposées et appliquées ou non par le client/utilisateur final.

#### e. Retours aux concepteurs

L'analyse statistique des données d'usage des différents clients permet de constituer une base de données sur les modes d'utilisation les plus fréquents qu'ils soient optimaux ou non. Cela permet de réaliser une segmentation des comportements utilisateurs sur l'usage des fonctionnalités. Cette collecte d'informations évite à l'entreprise de devoir mener une analyse supplémentaire pour connaître les comportements des utilisateurs.

Il est nécessaire d'avoir un système de gestion des données collectées qui soit structuré.

On mettra ici en application les stratégies pour un comportement éco-responsable pilotées par le produit (Eco-steer, correspondance des fonctions, fonctionnalité forcée, design intelligent). Par exemple, il est possible de reconfigurer le software pour empêcher une mauvaise utilisation. Pour rappel, les utilisateurs ont tendance à utiliser les réglages par défaut (Egebark & Ekström, 2013).

## 4. Conclusions

Dans cette partie, le développement méthodologique a été présenté. Il consiste dans un premier temps à la réalisation d'une méthode de sélection des IPE axée sur la prise en compte des besoins des différents acteurs de la chaîne de valeurs. Ensuite, ces indicateurs ont été utilisés pour mettre en place des stratégies d'écoconception centrée sur la phase d'utilisation et à l'incitation d'un comportement éco-responsable. La phase

d'utilisation étant majoritaire, il est important d'intégrer toute la chaîne de valeur dans l'amélioration de la performance environnementale, en identifiant les interactions possibles entre les acteurs et leviers à mettre en place. Un focus est fait sur la mise en place d'une stratégie d'accompagnement à une éco-utilisation à l'aide des IPE. Cela a donné lieu au développement d'une méthode qui repose sur un diagnostic et des propositions d'amélioration personnalisées à chaque client, l'objectif étant de faire de cette stratégie d'éco-utilisation un avantage concurrentiel pour l'entreprise tout au long de la durée de vie du produit.

Cette méthodologie a été construite et généralisée à partir d'un cas d'étude industriel. Les solutions proposées ont été déployées sur ce cas. La partie suivante va reprendre les étapes de la méthodologie et montrer les apports et livrables pour le cas d'étude et l'entreprise.



# PARTIE 3 : APPLICATION AU CAS D'ETUDE

Cette thèse a été réalisée en partenariat avec l'entreprise Carrier Transicold pour qui les problématiques environnementales ont toujours été une préoccupation majeure, et ce dans un contexte réglementaire de plus en plus exigeant. L'entreprise souhaite répondre à une demande client de plus en plus axée sur l'environnement et améliorer son image de marque. Cette troisième partie se compose de quatre grands chapitres. Le chapitre 7 permet de présenter le cas d'étude et le contexte. Le chapitre 8 présente la sélection des IPE spécifiques au cas d'étude. Le chapitre 9 présente l'utilisation des IPE pour la mise en place d'actions pour un développement de produits axé sur l'écoconception. Le chapitre 10 présente l'outil spécifique à la phase d'utilisation développé à l'aide de la méthode pour induire une éco-utilisation et comment il est utilisé pour servir d'avantage concurrentiel.



<b>CHAPITRE 7. PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE .....</b>	<b>121</b>
1. <i>L'entreprise : Carrier Transicold</i> .....	121
a. Marché et flotte .....	121
b. La chaîne de valeur de l'entreprise .....	122
c. Objectifs et attentes de l'entreprise .....	123
2. <i>Les unités de réfrigération pour le transport routier</i> .....	125
a. La production de froid .....	125
b. Cas d'étude spécifique .....	126
<b>CHAPITRE 8. SÉLECTION DES IPE .....</b>	<b>127</b>
1. <i>Étape 1 : L'entreprise, le produit, l'environnement</i> .....	127
a. Analyse environnementale du produit .....	127
i. Les cycles de livraison .....	128
ii. Les produits transportés .....	129
iii. Le mode d'utilisation .....	129
iv. Résultats de l'ACV .....	130
v. Bilan .....	130
b. Des réglementations environnementales de plus en plus exigeantes .....	131
i. Réglementations applicables .....	131
ii. Potentielles réglementations futures .....	131
iii. Bilan .....	133
c. Les problématiques environnementales inhérentes au secteur d'activité .....	133
i. La consommation énergétique .....	134
ii. L'utilisation du réfrigérant .....	138
iii. Le bruit .....	139
iv. Les pertes dues au non-respect de la chaîne du froid .....	139
v. Bilan .....	140
d. Maturité de l'entreprise .....	141
i. Expérience en écoconception .....	141
ii. Processus de développement de produits .....	141
iii. Outils utilisés dans l'entreprise .....	141
iv. Compétences et besoins en formation .....	141
v. Identification des freins et des leviers .....	142
vi. Bilan .....	142
e. Stratégie de l'entreprise .....	143
f. Bilan .....	144

2.	<i>Étapes 2 et 3 : Définition des acteurs et de leurs objectifs</i>	147
3.	<i>Étape 4 : Sélection des IPE spécifiques</i>	150
4.	<i>Étape 5 : Sélection des IPE globaux</i>	152
5.	<i>Bilan de la sélection des IPE pour le cas d'étude</i>	156
<b>CHAPITRE 9. OUTILS MIS EN PLACE POUR AIDER À LA PRISE EN COMPTE DES IPE SUR TOUT LE CYCLE DE VIE</b>		<b>156</b>
1.	<i>Standard d'exigences d'écoconception à destination des fournisseurs, associé à un format standard d'échange d'informations</i>	157
2.	<i>Fiche de déclaration environnementale produit</i>	158
3.	<i>Sensibilisation à l'écoconception et à l'analyse du cycle de vie (formation)</i>	158
4.	<i>Standard de travail pour les concepteurs, règles d'écoconception</i>	160
5.	<i>Base de données structurée des composants</i>	160
6.	<i>Guide démantèlement pour les unités de réfrigération en fin de vie</i>	160
7.	<i>Démonstrateur Excel de diagnostic et de suivi de l'usage en fonction des comportements de l'utilisateur</i>	161
8.	<i>Bilan</i>	161
<b>CHAPITRE 10. VERS UNE ÉCO-UTILISATION DES PRODUITS</b>		<b>162</b>
1.	<i>Collecte d'informations sur l'usage</i>	162
a.	<i>Collecte de données expérimentales</i>	164
b.	<i>Déclarations du client</i>	168
2.	<i>Diagnostic personnalisé</i>	172
3.	<i>Proposition d'amélioration comportement et/ou produit</i>	174
a.	<i>Recommandations sur le comportement</i>	174
b.	<i>Recommandations sur l'unité de réfrigération</i>	176
4.	<i>Évaluation et suivi des améliorations</i>	176
5.	<i>Retours sur l'utilisation aux concepteurs</i>	177
6.	<i>Avantage concurrentiel</i>	177
7.	<i>Bilan de la mise en place de l'éco-utilisation</i>	178



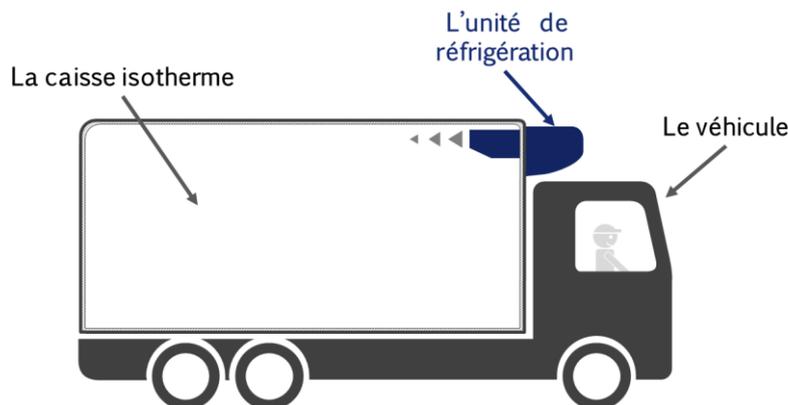
## Chapitre 7. Présentation du cas d'étude

Ce chapitre permet de présenter de manière synthétique l'entreprise partenaire, le cas d'étude et son fonctionnement. Les attentes et objectifs de l'entreprise sont présentés. Ce chapitre reste une présentation succincte, plus de détails sont donnés dans l'étape 1 du chapitre suivant visant à faire l'état des lieux du contexte environnemental de l'entreprise et de ses produits pour la définition des IPE.

### 1. L'entreprise : Carrier Transicold

Carrier Transicold développe des unités de réfrigération destinées au transport routier. Il s'agit de systèmes frigorifiques conçus pour maintenir tous types de produits à une température donnée. On parle de transport à température dirigée. Les températures de transport peuvent varier de  $-30\text{ °C}$  à  $+25\text{ °C}$  avec des températures extérieures pouvant varier de  $-40\text{ °C}$  à  $+60\text{ °C}$ . Cela concerne une grande variété de produits dont les plus communs sont les produits alimentaires, mais on trouve aussi des produits pharmaceutiques, des fleurs et plantes, des œuvres d'art, certains produits chimiques ou encore certains produits de haute technologie.

Les unités de réfrigération pour le transport routier ont la particularité de ne pas pouvoir remplir seules leur fonction. Elles s'intègrent dans un système composé de la caisse isotherme, où sont stockées les marchandises, et du véhicule qui permet le déplacement (figure 43). Ces deux éléments peuvent avoir une influence sur la performance environnementale de l'unité de réfrigération. Par exemple, la qualité de l'isolation de la caisse est un paramètre influant sur les besoins en énergie du système de réfrigération.

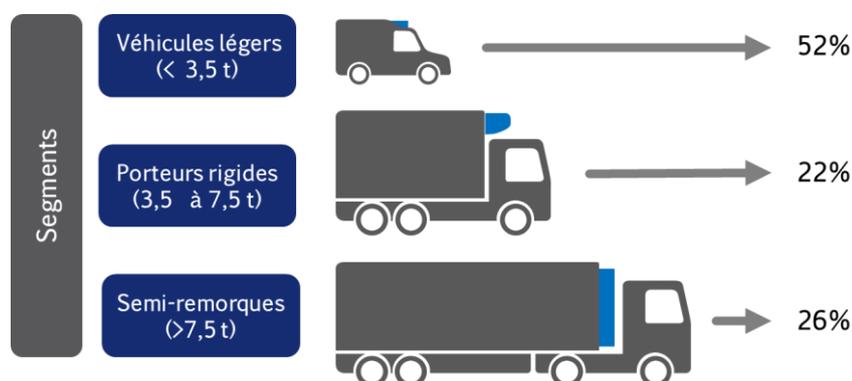


**Figure [43]** Exemple d'un système de transport routier à température dirigée (cas d'un porteur rigide)

#### a. Marché et flotte

Le marché du transport routier à température dirigée se décompose en 3 segments, selon la taille du véhicule (figure 44). Le premier segment des véhicules légers représentait 52 % du marché français en 2012, et concerne principalement la distribution urbaine et périurbaine. Le second segment des porteurs rigides, particulièrement utilisé pour la distribution urbaine et périurbaine, représentait 22 % du

marché. Le dernier segment des semi-remorques articulées, utilisées majoritairement pour la distribution longue distance, représentait 26 % du marché (Michineau, et al., 2014a).



**Figure [44]** Segmentation du transport frigorifique en service, en France, en 2012 (Michineau, et al., 2014a)

En 2014, on estimait une flotte de plus de 2 millions de véhicules de transport routier à température dirigée dans le monde (UNEP, 2015). Il est très difficile d'estimer la flotte mondiale pour trois raisons :

- un manque de base de données sur les mises en circulation ;
- un manque de suivi sur la revente (marché secondaire de l'occasion) ;
- un manque de suivi sur la fin de vie des équipements.

Néanmoins, différents facteurs contribuent à augmenter la demande en stockage et le transport à température dirigée :

- l'accroissement de la population ;
- l'accroissement du nombre des échanges internationaux, et des distances de transport<sup>5</sup> ;
- l'évolution des conditions de vie et du réseau routier des pays en voie de développement ;
- l'augmentation des demandes des consommateurs en produits frais et surgelés de plus en plus diversifiés et de qualité en toute saison.

#### b. La chaîne de valeur de l'entreprise

La figure 45 représente Carrier Transicold dans la chaîne de valeur de ses produits. Celui-ci n'est pas complètement maîtrisé par l'entreprise. L'entreprise conçoit et produit des unités de réfrigération, elle interagit directement avec ses fournisseurs de rang 1 pour la fabrication des composants. Elle n'a pas de contact avec les fournisseurs plus en amont (rang 2, 3, etc.).

Elle vend ses produits soit à des clients en direct (transporteur), soit à des intégrateurs qui se chargent d'assembler une solution complète pour les clients. Ces derniers

<sup>5</sup> A l'échelle mondiale, elles sont dues notamment à l'urbanisation grandissante et à l'augmentation des distances entre le producteur et le consommateur

assemblent la solution (unité de réfrigération + caisse isotherme + véhicule). Il n'y a pas d'« architecte » globale qui gère la solution complète pour avoir une performance environnementale optimisée. Contrairement à un constructeur automobile qui assemble différents systèmes pour obtenir un système global et le vendre sous une marque propre, dans le cas du transport routier à température dirigée, chaque partie (le véhicule, la caisse isotherme et l'unité de réfrigération) est assemblée, mais chacune sous sa marque propre (sauf exception de quelques entreprises qui produisent la solution complète). L'entreprise a donc une vision limitée de ce qui est fait.

L'unité de réfrigération est ensuite utilisée par le chauffeur routier, le temps de sa première vie. Durant la phase d'utilisation, le client a la possibilité d'avoir un contrat de service directement avec une agence Carrier Transicold pour les opérations de maintenance et de réparation, ou de faire appel à un franchisé indépendant habilité par Carrier Transicold. Il y a un commerce important qui se fait avec les pièces de rechange et les fournisseurs.

Il est possible que l'unité de réfrigération ait une seconde, voire une troisième vie grâce au marché secondaire (revente d'occasion) avant d'aller en traitement en fin de vie. Il n'y a pas de traçabilité. Il y a très peu d'informations sur le traitement en fin de vie, car il n'y a pas de filière dédiée et la revente sur le marché secondaire de client à client rend difficile le suivi des unités de réfrigération. Les unités de réfrigération d'abord vendues dans la zone européenne sont ensuite revendues pour finir leur vie, le plus souvent, dans les pays en voie de développement.

### c. Objectifs et attentes de l'entreprise

Carrier Transicold a souhaité participer à ces travaux de recherche afin d'identifier les différents paramètres qui impactent l'environnement et des solutions pour les réduire. Elle souhaite :

- prévoir et suivre la performance environnementale des unités de réfrigération au travers de la chaîne de valeur bien qu'elle ne soit pas complètement maîtrisée ;
- comprendre l'utilisation réelle de ses produits pour en améliorer la performance environnementale ;
- fournir à ses concepteurs et autres services de l'entreprise des outils/moyens pour intégrer une démarche d'écoconception ;
- faciliter l'échange des informations entre ses services, mais aussi avec les acteurs externes à l'entreprise tels que les fournisseurs et les clients/utilisateurs ;
- accompagner ses clients/utilisateurs dans la réduction de leurs impacts environnementaux et leur fournir de bonnes pratiques d'utilisation de ses produits. Cet accompagnement doit être dans un objectif gagnant-gagnant pour l'entreprise et le client ;
- intégrer ses fournisseurs dans le développement de produits.

Ses attentes sont des outils pour répondre à ses besoins notamment sur la mise en place d'une démarche d'écoconception et l'accompagnement des clients/utilisateurs.

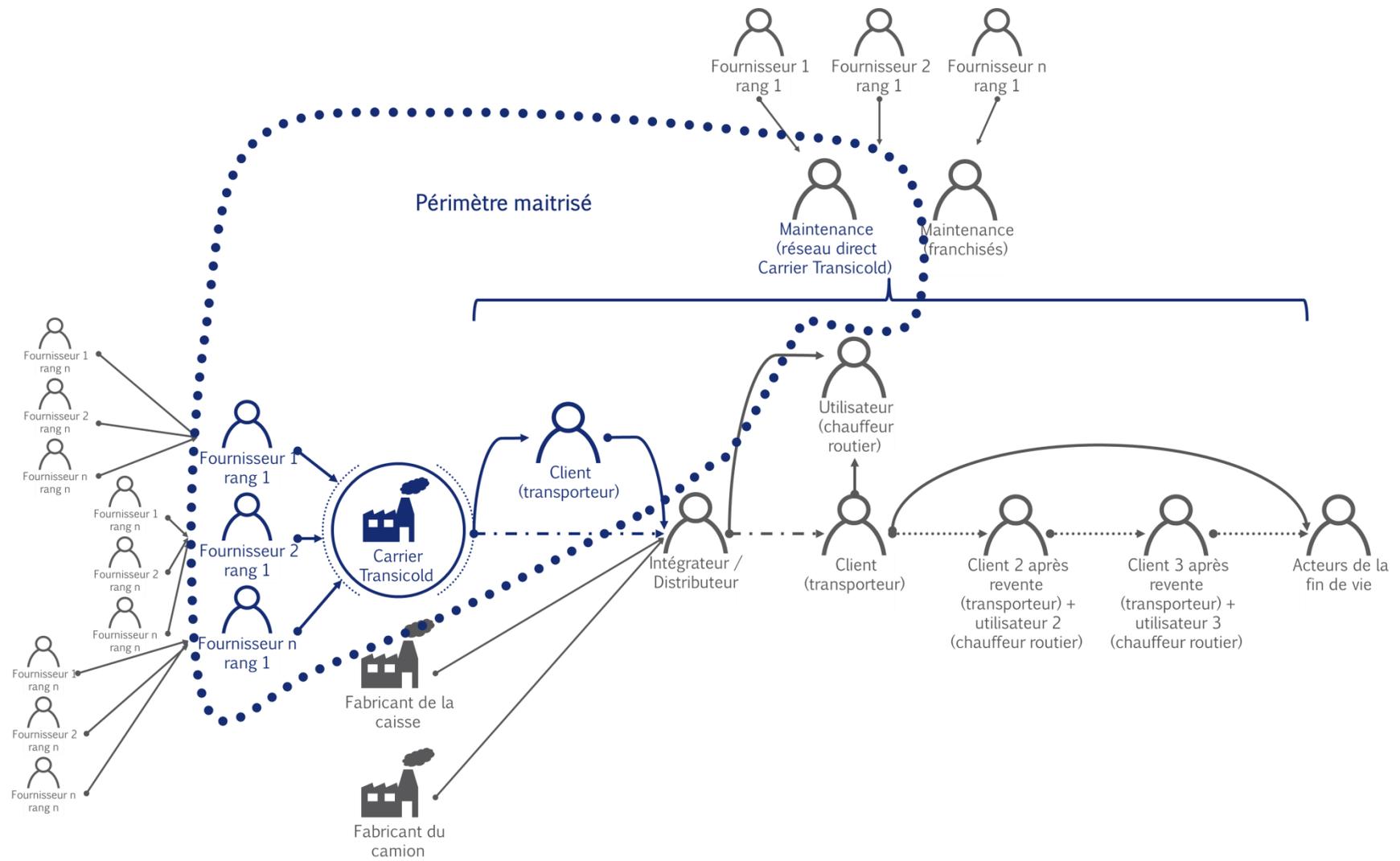


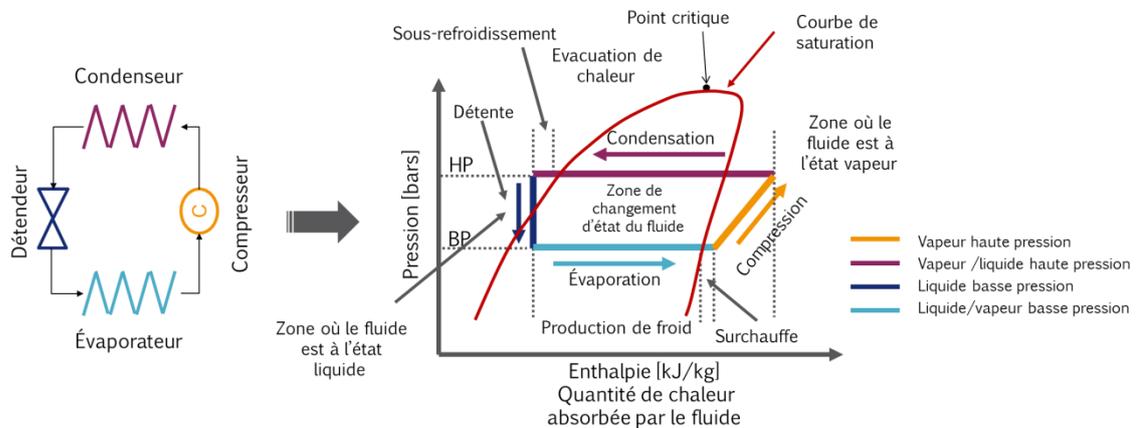
Figure [45] L'entreprise dans la chaîne de valeur du produit et le périmètre qu'elle maîtrise

## 2. Les unités de réfrigération pour le transport routier

### a. La production de froid

Deux technologies principales peuvent être mises en œuvre pour assurer la fonction de l'unité de réfrigération : 1) les systèmes à compression de vapeur et 2) les systèmes de stockage froid (ex : les plaques eutectiques, les systèmes cryogéniques, etc.). La technologie la plus utilisée est le système à compression de vapeur à expansion directe (96 % des équipements (Michineau, et al., 2014b)). On parle d'expansion directe lorsque la substance à refroidir est en contact avec le réfrigérant par l'intermédiaire de l'échangeur. Le système est indirect lorsque l'on utilise un fluide intermédiaire (fluide frigoporteur).

Un système de réfrigération à compression de vapeur est généralement composé de 4 éléments principaux qui sont : le condenseur (évacue les calories vers l'extérieur), l'évaporateur (récupère la chaleur à l'intérieur de la caisse), le compresseur (compresse le réfrigérant), et la valve d'expansion ou détendeur (permet d'abaisser la pression du fluide). À ces 4 éléments, on peut ajouter le système d'alimentation mécanique (moteur thermique) ou électrique (alimente le système), la ligne de liquide et le réservoir du réfrigérant. Le fluide réfrigérant se retrouve dans deux états tout au long de son parcours dans le système : à l'état vapeur lors de la compression et à l'état liquide lors de la détente, comme on peut le voir sur le cycle enthalpique de la figure 46 ci-après.



**Figure [46]** Fonctionnement d'un système à compression de vapeur à expansion directe

L'alimentation des unités de réfrigération peut se faire de différentes manières, les plus couramment utilisées pour les systèmes à compression de vapeur sont les suivants.

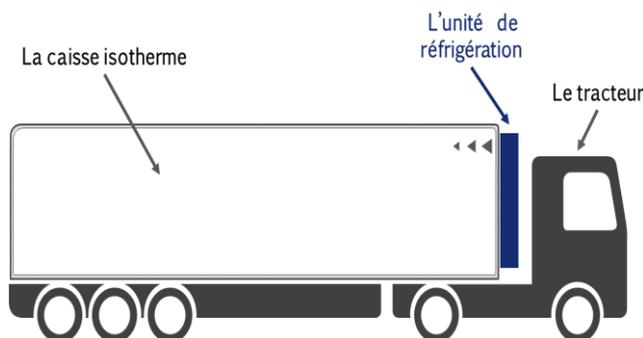
- Groupe non autonome (type poulie moteur) : système utilisé en majorité sur les véhicules légers. Il consiste à alimenter le groupe directement à l'aide du moteur du véhicule via une courroie. En France, cela représentait, en 2012, 39 % de la flotte (Michineau, et al., 2014b). En mode route, la production de froid se fait donc uniquement lorsque le véhicule est en fonctionnement. Il est possible d'avoir une alimentation sur secteur lorsque le véhicule est en stationnement prolongé.

- Groupe autonome : système utilisé sur les porteurs rigides et semi-remorques. L'unité de réfrigération est alimentée par un moteur indépendant. En France, cela représentait, en 2012, 60 % des équipements de la flotte (Michineau, et al., 2014b). La production de froid est dans ce cas assurée de manière continue en mode route ou lors de stationnements prolongés.
- Pour les systèmes à plaques eutectiques qui stockent une quantité limitée de froid, ils fonctionnent sur le principe de la glacière. Des plaques sont refroidies pendant une longue période (en général la nuit) pour ensuite restituer le froid progressivement durant l'utilisation de jour. La durée d'utilisation avant la phase de recongélation est dans ce cas le facteur limitant. Il est donc primordial d'être attentif à l'adéquation entre le temps d'utilisation désirée et de stockage froid. Cette solution ne se fait pas beaucoup à cause du poids lié au système.

Les systèmes de réfrigération peuvent être utilisés en mono-température ou en multi-températures (transport de différents produits à différentes températures). En France, en 2012, 24 % des équipements étaient en multi-températures. Si l'on considère dans le détail les segments, ce pourcentage est de 50 % pour les porteurs rigides et de 38 % pour les semi-remorques (Michineau, et al., 2014b).

#### b. Cas d'étude spécifique

Le cas d'étude présenté dans la suite de ce mémoire est la gamme des unités de réfrigération avec un système à compression de vapeur fonctionnant au réfrigérant HFC (HydroFluoroCarbure) R404A de la gamme des semi-remorques (figures 47 et 48).



**Figure [48]** Exemple d'un système transport routier à température dirigée (cas d'une semi-remorque)



**Figure [47]** Produit spécifique au cas d'étude (Carrier Transicold Industries)

Il s'agit d'unités de réfrigération autonomes possédant leur propre moteur diesel. Cette gamme de produits a été retenue, car elle est la plus intensive en consommation de matière, la plus lourde et l'une ayant potentiellement le plus d'impacts environnementaux. Il s'agit également de la gamme la plus représentative du marché de l'entreprise. Cette gamme est composée de 3 produits principaux dont les caractéristiques techniques sont données dans le tableau 9. Ces 3 produits se différencient principalement par leur puissance frigorifique à 0°C.

**Tableau [9]** Caractéristiques techniques des produits de la gamme des semi-remorques (Vector) pour le cas d'étude (Carrier Transicold, 2017)

Modèle		Vector 1350	Vector 1550	Vector 1950 MT
Puissance frigorifique route (diesel) [Watts]	0°C/+30°C	13 110	14 995	18 200
	-20°C/+30°C	8 305	8 285	9 410
Puissance frigorifique secteur (électrique) [Watts]	0°C/+30°C	8 000	13 200	15 345
	-20°C/+30°C	6 915	7 360	9 085
Puissance de chauffage en [Watts]		9 300	8 800	9 500
Débit d'air [m <sup>3</sup> /h]		5 435	5 700	5 700
Poids [kg]		645/690 (avec la version secteur)	704	911
Dimensions [mm]		2 050*430*2 227	2 050*430*2 227	2 050*430*2 227
Pression acoustique [dB(A)]	Standard	69	71,5	76
	Réduite	67	70,5	73

## Chapitre 8. Sélection des IPE

Nous avons vu que les IPE sont un bon moyen pour répondre aux besoins de l'entreprise : échanger de l'information, évaluer et suivre la performance environnementale et aider à définir des stratégies d'écoconception. Ce chapitre vise à identifier les IPE pour l'entreprise. La méthode développée dans le chapitre 5 est mise en application. Le service marketing est le service pilote de ce projet, car il est fortement impliqué dans la stratégie produit de l'entreprise et il dispose du référent développement durable de l'entreprise.



### 1. Étape 1 : L'entreprise, le produit, l'environnement

Comme identifié dans la méthode de sélection des IPE, la première étape consiste à bien connaître son produit.



#### a. Analyse environnementale du produit

Une analyse du cycle de vie a été réalisée sur les 3 produits de la gamme étudiée. Elle a été conduite selon les normes ISO 14 040 et ISO 14 044. Les détails de la modélisation de l'ACV et des résultats sont disponibles dans l'annexe 2. Les 3 ACV réalisées sur chacune des unités de réfrigération donnent des résultats très proches, les structures étant similaires.

Les principales conclusions sont les suivantes.

- Les impacts environnementaux sont en partie dus à la phase de fabrication. Lors de l'examen de cette phase, les composants qui ont le plus d'impacts sont les

composants les plus lourds (moteur thermique, compresseur) et les composants électroniques. La charge de réfrigérant génère également des impacts surtout pour sa production.

- La contribution majeure aux impacts environnementaux du produit est due à la phase d'utilisation. Il s'agit plus particulièrement de la consommation d'énergie et des potentielles fuites de réfrigérant. Par exemple pour l'indicateur changement climatique l'usage représente 93,5 % des impacts environnementaux (durée de vie 12 ans et taux de fuite annuel de réfrigérant 10 %) dont 85 % pour la consommation énergétique et 14,7 % pour les fuites de réfrigérant, le reste est dû aux opérations de maintenance. Plus de détails sur les autres indicateurs sont disponibles dans l'annexe 2. L'étude approfondie de la phase d'utilisation montre que la consommation d'énergie devient la principale source d'impacts environnementaux lorsque les fuites de réfrigérant sont maîtrisées. Plusieurs scénarios d'usage ont été modélisés en faisant varier 3 paramètres, deux paramètres commerciaux (le cycle de livraison et les produits transportés donc la température de transport) et un choix de l'utilisateur (le mode d'utilisation).

Nous avons modélisé 8 scénarios d'usage en faisant varier ces 3 paramètres à 2 variables.

#### *i. Les cycles de livraison*

On retrouve plusieurs cycles de livraison (figure 49).

- Le transport international caractérisé par de longs trajets sans arrêts fréquents, avec des temps de déplacement pouvant aller jusqu'à plusieurs jours. Cela implique que l'unité de réfrigération doit fonctionner pendant de longues périodes dont les temps de repos du chauffeur.
- Le transport national caractérisé par de longs trajets sans arrêts fréquents avec des temps de déplacement de l'ordre de la journée.
- La distribution urbaine caractérisée par de nombreux arrêts avec des intervalles de livraison fréquents et de nombreuses ouvertures de portes. La distribution en milieu urbain est plus consommatrice d'énergie, plus 16 % sur les consommations annuelles estimées par rapport à la distribution longue distance (Repice & Stumpf, 2007), (Ducoulombier, et al., 2011). Cela est principalement dû aux ouvertures de portes plus fréquentes et à une utilisation plus importante en mode continu pour retrouver la température souhaitée. L'ouverture des portes entraîne la production de givre au niveau de l'évaporateur (du fait de l'entrée d'air chaud et humide) et donc une surconsommation. Les phases de dégivrage peuvent avoir une influence sur la consommation énergétique (Fitzgerald, et al., 2011).

Ici, deux types de cycle de livraison ont été analysés : le transport national et la distribution urbaine pour des raisons de disponibilité des données.

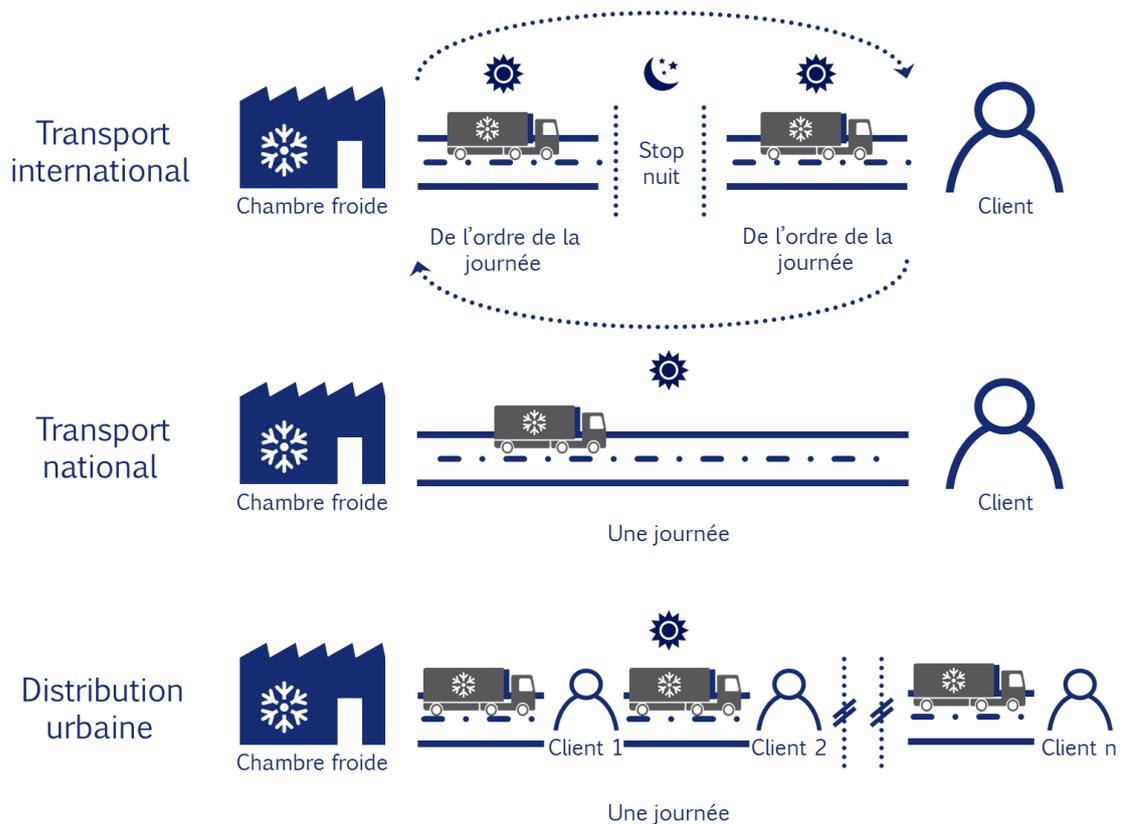


Figure [49] Types de cycle de livraison

### ii. Les produits transportés

Les produits transportés influent sur le réglage de la température de consigne de l'unité de réfrigération. Nous avons considéré pour notre étude, deux types de produits : les produits surgelés à  $-20^{\circ}\text{C}$  et les produits frais à  $0^{\circ}\text{C}$ . Ces deux températures ont été sélectionnées, car ce sont celles utilisées pour réaliser les tests de conformité de mise sur le marché (Accord ATP, cf. figure 51).

### iii. Le mode d'utilisation

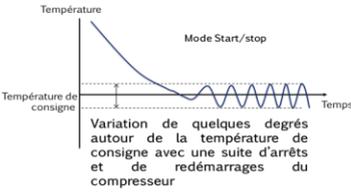
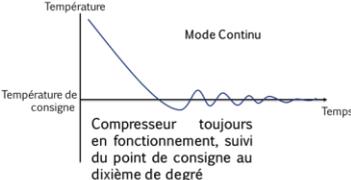
Le mode de fonctionnement est un paramètre important et l'efficacité énergétique de chaque mode diffère de manière significative (Repice & Stumpf, 2007). Le tableau 10 décrit chacun des modes de fonctionnement possibles (refroidissement, start/stop, continu, chauffage, dégivrage) (Cavalier & Stumpf, 2010).

Le mode start/stop est particulièrement recommandé pour les produits surgelés, car ils peuvent accepter des températures inférieures à leur point de congélation ou surgélation. Le mode continu, avec un flux d'air continu, est utilisé pour les produits sensibles aux variations de température et nécessitant une régulation précise de la température (Heap, 2003), (Tassou, et al., 2009), (Fitzgerald, et al., 2011). Le mode continu implique une consommation d'énergie plus importante à paramètres égaux.

Les deux modes start/stop et continu ont été analysés. Il s'agit des modes les plus utilisés et ils sont directement choisis par l'utilisateur. Le refroidissement est utilisé avant

le chargement, le chauffage et le dégivrage sont utilisés ponctuellement au cours de l'utilisation de manière automatique.

**Tableau [10]** Mode d'utilisation des systèmes frigorifiques pour le transport routier

<b>Refroidissement</b>	Mise à température de consigne de la caisse isotherme le plus rapidement possible. Requière un maximum de capacité de réfrigération.	
<b>Start/stop</b>	Maintien de la température de consigne en mettant en marche et en arrêtant alternativement l'unité de réfrigération.	 <p>Variation de quelques degrés autour de la température de consigne avec une suite d'arrêts et de redémarrages du compresseur</p>
<b>Marche continue</b>	Maintien de la température de consigne en faisant tourner le groupe frigorifique de manière continue et en alternant entre production de froid et de chaud. Le flux d'air est maintenu en permanence.	 <p>Compresseur toujours en fonctionnement, suivi du point de consigne au dixième de degré</p>
<b>Chauffage</b>	Maintien de la température en opérant en mode chauffage (utilisé lorsque la température extérieure est inférieure à la température de consigne).	
<b>Dégivrage</b>	Arrêt de l'unité de réfrigération pour dégivrer l'évaporateur par un système de chauffage. Cette opération peut être électrique ou réalisée grâce à des gaz chauds.	

#### iv. Résultats de l'ACV

Les résultats montrent qu'il existe beaucoup d'opportunités d'amélioration. La principale est en phase d'utilisation et concerne les comportements de l'utilisateur final. L'impact environnemental peut doubler, jusqu'à 54% (voir les résultats détaillés en annexe 2) en fonction de la façon dont l'utilisateur final utilise le produit (choix du mode d'utilisation). Il n'est pas possible de modifier les contraintes commerciales telles que les produits transportés (donc la température de conservation) ou encore le cycle de livraison. Il s'agit de paramètres intrinsèques aux activités du client. Cette étude souligne la nécessité d'avoir des détails sur la phase d'utilisation et de ne pas utiliser un scénario moyen (Heslouin, et al., 2016).

#### v. Bilan

Les IPE et stratégies d'écoconception sélectionnés devront donc considérer les éléments suivants pour permettre d'améliorer les performances environnementales du produit :

- la composition matière à cause de l'impact des composants ;
- la consommation énergétique en utilisation ;
- le comportement de l'utilisateur ;
- le taux potentiel de fuite de réfrigérant.



## b. Des réglementations environnementales de plus en plus exigeantes

### *i. Réglementations applicables*

On observe, depuis quelques décennies, de fortes améliorations pour la réduction des impacts environnementaux liés aux transports à température dirigée. Elles sont poussées par des réglementations de plus en plus exigeantes sur les émissions de GES et autres rejets (particules fines, oxydes d'azote, hydrocarbures, etc.) liés notamment à la consommation énergétique et à l'utilisation de gaz réfrigérants. On retrouve notamment la réglementation F-Gaz, le règlement n° 1005/2009, les protocoles de Montréal et Kyoto, et les règlements 2016/1628, REACH et RoHS. Ces différentes réglementations sont précisées dans la chronologie en figure 50.

On trouve aussi les certificats d'économie d'énergie (CEE)<sup>6</sup>, l'entreprise n'a pas d'obligations, mais vise à ce que tous ces nouveaux produits répondent aux exigences pour les obtenir.

### *ii. Potentielles réglementations futures*

L'entreprise et ses produits pourraient être soumis, à plus ou moins long terme, à d'autres réglementations dont la directive ErP fixant des exigences d'écoconception pour les produits consommateurs d'énergie, par exemple une limite de l'indice d'efficacité énergétique pour les réfrigérateurs. Les produits de réfrigération professionnelle ont récemment été ajoutés à son champ d'application et les unités de réfrigération pour le transport maritime sont à l'étude pour intégrer cette réglementation. On peut également mentionner la directive DEEE<sup>7</sup> (Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques) si le champ d'application venait à être étendu aux engins mobiles non routiers, ou encore la directive VHU<sup>8</sup> (Véhicules Hors d'Usage) si elle prenait en compte la totalité des équipements des véhicules lourds. Ces deux directives auraient principalement des impacts sur la fin de vie des produits et notamment les taux de valorisation et de recyclage, donc sur les matériaux et assemblages utilisés dans le développement de produits. L'emploi d'énergies alternatives (autre que diesel et électricité) pourra également amener à probablement prendre en considération d'autres exigences réglementaires, sur les émissions dans l'air par exemple.

---

<sup>6</sup> Articles 14 à 17 de la loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique (loi POPE).

<sup>7</sup> Directive 2012/19/UE du Parlement Européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) (refonte)

<sup>8</sup> Directive 2000/53/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage

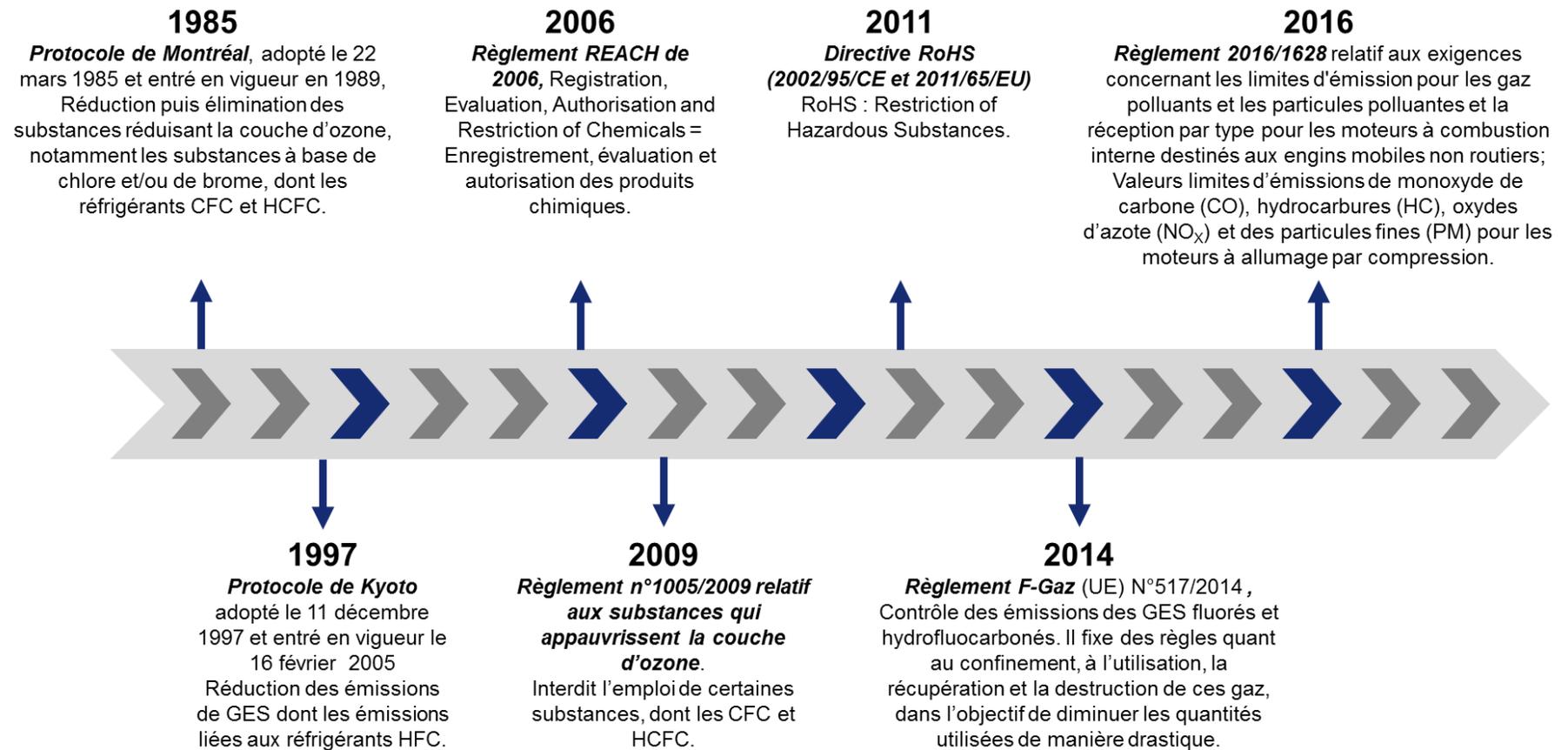


Figure [50] Réglementations environnementales applicables au transport routier à température dirigée en 2017

### iii. Bilan

Le recensement de ces réglementations permet d'identifier plusieurs aspects environnementaux sur lesquels il sera nécessaire d'avoir des IPE pour s'assurer de la conformité réglementaire et les évolutions à venir. Ces aspects sont :

- les émissions directes de GES lors du potentiel relâchement dans l'atmosphère du réfrigérant ;
- les émissions indirectes de GES dues à la consommation énergétique ;
- les émissions dans l'air liées à la consommation énergétique : particules fines (PM), oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>), monoxyde de carbone (CO), hydrocarbures (HC) ;
- les substances dangereuses utilisées ;
- les taux de valorisation ;
- le temps de démontage.



### c. Les problématiques environnementales inhérentes au secteur d'activité

Quelques chiffres :

- En 2010, la chaîne du froid (fixe et mobile) dans sa globalité représentait 1 % des émissions globales de CO<sub>2</sub> (James & James, 2010).
- La consommation d'énergie en phase d'utilisation représenterait plus de 80 % de la contribution aux émissions de GES d'un système de réfrigération fixe (Coulomb, 2008), (Kujak, et al., 2014).
- La réfrigération compte pour environ 40 % de l'énergie requise pour la distribution (stockage y compris) (McKinnon & Campbell, J., 1998), le reste est de la distribution non réfrigérée.

L'analyse du secteur du transport à température dirigée, permet d'identifier que les impacts environnementaux surviennent majoritairement en phase d'utilisation (consommation énergétique et utilisation de réfrigérant) et touchent notamment les indicateurs environnementaux du changement climatique et d'appauvrissement de la couche d'ozone (Kruse, et al., 2006), (Varzinskas, et al., 2007), (Coulomb, 2008), (Mudgal, et al., 2010), (Ma, et al., 2012), (JRC, 2014), (Kujak, et al., 2014). Cela a été confirmé par les résultats de l'ACV de cette étude, qui montrent que plus de 90 % des impacts sur l'indicateur changement climatique proviennent de la phase d'usage. Ainsi d'importantes réductions des émissions pourraient être réalisées facilement en utilisant et en maintenant l'efficacité énergétique des équipements correctement en phase d'utilisation (Forbes Pearson, 2003), (Bovea, et al., 2007), (James & James, 2010). Cela passe également par l'amélioration de l'isolation de la caisse isotherme et du rendement énergétique du compresseur (composant qui consomme le plus d'énergie) (Ciantar & Hadfield, 2000), (Borlein, 2010). Pour limiter ses impacts environnementaux, le secteur du transport routier à température dirigée peut aussi se consacrer à l'évolution des équipements (performance énergétique), au choix du réfrigérant et à la minimisation des potentielles fuites, à la sécurité alimentaire (pertes dues au non-respect de la chaîne du froid) et au management de la logistique

(logistique inverse, gestion des tournées) (Bovea, et al., 2007), (Michineau, et al., 2014a).

Les 4 points suivants vont être détaillés ci-après : la consommation énergétique, l'utilisation de réfrigérant, le bruit et les pertes dues au non-respect de la chaîne du froid. La logistique n'est pas abordée, car elle ne concerne pas directement le système de réfrigération.

#### *i. La consommation énergétique*

Ce paragraphe présente les différents paramètres ayant une influence sur la consommation énergétique. L'une des principales préoccupations environnementales du transport frigorifique routier est sa dépendance aux énergies fossiles pour la réfrigération, mais également pour la traction du véhicule. Il est donc important d'améliorer l'efficacité énergétique des produits. Cela réduira les coûts d'utilisation, mais aussi les émissions atmosphériques (James & James, 2010). La base de données environnementale Ecoinvent (Ecoinvent centre, 1998) estime que les besoins en température dirigée augmentent de 20 % la consommation d'énergie sur un même transport. Cette valeur est à challenger, car basée sur des approximations et ne prend pas en compte le contexte d'usage. Cependant, cette estimation est complexe à définir et trop générique pour être adaptable à toutes les situations. Les unités de réfrigération doivent fonctionner dans un environnement pouvant être difficile (température ambiante, hygrométrie, etc.) et dans de nombreuses configurations avec des contraintes sur la taille et le poids du système (Heap, 2003). Plusieurs facteurs peuvent venir influencer la consommation énergétique d'une unité de réfrigération pour le transport routier (Repice & Stumpf, 2007), (Tassou, et al., 2009), (Barnitt, et al., 2009), (Cavalier & Stumpf, 2010), (Shah, et al., 2008), (Fitzgerald, et al., 2011), (Wu, et al., 2013), (ADEME, 2012a).

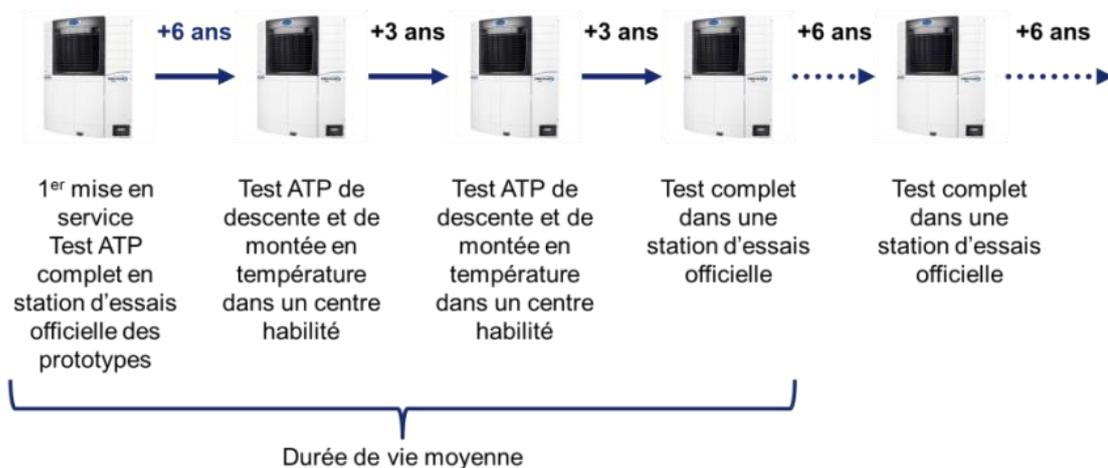
- Le comportement de l'utilisateur. Il existe une véritable corrélation entre le comportement de l'utilisateur et le besoin en énergie (Tereza, 2015), (voir paragraphe précédent sur l'analyse environnementale page 127). Le choix de l'utilisateur concerne le choix du mode de fonctionnement, le choix de laisser ou non l'unité de réfrigération allumée ou éteinte lors des ouvertures de porte, l'utilisation de rideaux au niveau des portes, d'une paroi amovible, etc. Les rideaux sont des rideaux d'air ou à lanières plastiques visant à limiter les échanges de chaleur lors de l'ouverture des portes.
- Le mode d'utilisation, voir paragraphe précédent sur l'analyse environnementale page 127.
- Le climat extérieur. Le climat influe sur la consommation énergétique. Le Coefficient de Performance<sup>9</sup> (COP) varie en fonction de la température ambiante (Wu, et al., 2013). Il existe une véritable corrélation entre la consommation énergétique et la température ambiante. Dans un climat continental, la

---

<sup>9</sup> Le coefficient de Performance est le rapport entre la chaleur extraite par l'échangeur et le travail mécanique absorbé par le compresseur.

consommation énergétique sera la plus importante lors des mois d'été et la moins élevée lors des mois d'hiver, car on se rapproche des températures de transport (Fitzgerald, et al., 2011).

- Le cycle de livraison (voir paragraphe précédent sur l'analyse environnementale page 127).
- Le type d'énergie pour l'alimentation. Les unités de réfrigérant fonctionnent grâce à l'énergie fossile (diesel), mais certaines peuvent fonctionner sur le secteur (électrique) lors de stationnements longs. D'autres types d'énergie sont aussi envisagés dont le gaz naturel.
- Le type de produit et la température de transport. La capacité de réfrigération varie de moins de 500 W à plus de 10 kW pour les températures surgelées et de moins de 1 kW à plus de 20 kW pour les produits frais (abstraction faite du type de véhicule et des conditions d'utilisation) (UNEP, 2015). La capacité de réfrigération varie en fonction de la température du chargement et influe donc sur les consommations.
- Le COP de l'unité de réfrigération et de la caisse isotherme. L'augmentation du COP et de l'efficacité énergétique des composants va réduire la consommation énergétique.
- Le vieillissement. Au fil du temps, les systèmes de réfrigération (unité + caisse) deviennent moins performants, principalement à cause de la dégradation de l'isolation de la caisse. Elles consomment de plus en plus d'énergie. On peut constater une augmentation de la consommation énergétique de plus de 30 % après 6 ans et de plus de 50 % après 9 ans (Chatzidakis & Chatzidakis, 2004). La durée de vie moyenne d'un groupe est de 12 ans (période avant de repasser une certification ATP complète, figure 51). Après ce laps de temps, pour des raisons économiques les unités de réfrigération ne repassent généralement pas une certification complète. En réalité, la plupart des unités de réfrigération sont revendues sur le marché secondaire (marché de l'occasion) dans les pays en voie de développement.
- Etc.



**Figure [51]** Test ATP conditionnant la durée de vie moyenne d'utilisation d'un groupe froid

Tous ces paramètres font qu'il est difficile de construire un modèle global les prenant tous en compte pour le calcul de la consommation énergétique (Tereza, 2015). La figure 52 donne une représentation schématique au travers d'un graphique acyclique des différents paramètres pouvant influencer la consommation énergétique. Il a été construit à partir de la littérature citée précédemment et d'experts de l'entreprise.

Certains paramètres ne peuvent pas être contrôlés, car directement liés aux activités du client (le cycle de livraison, le type de produit) et d'autres sont dépendants des acteurs externes à l'entreprise comme l'efficacité énergétique des composants de l'unité de réfrigération (fournisseurs), le COP de la caisse isotherme (fabricant de la caisse), ou encore les conditions dynamiques d'utilisation (climat), etc.

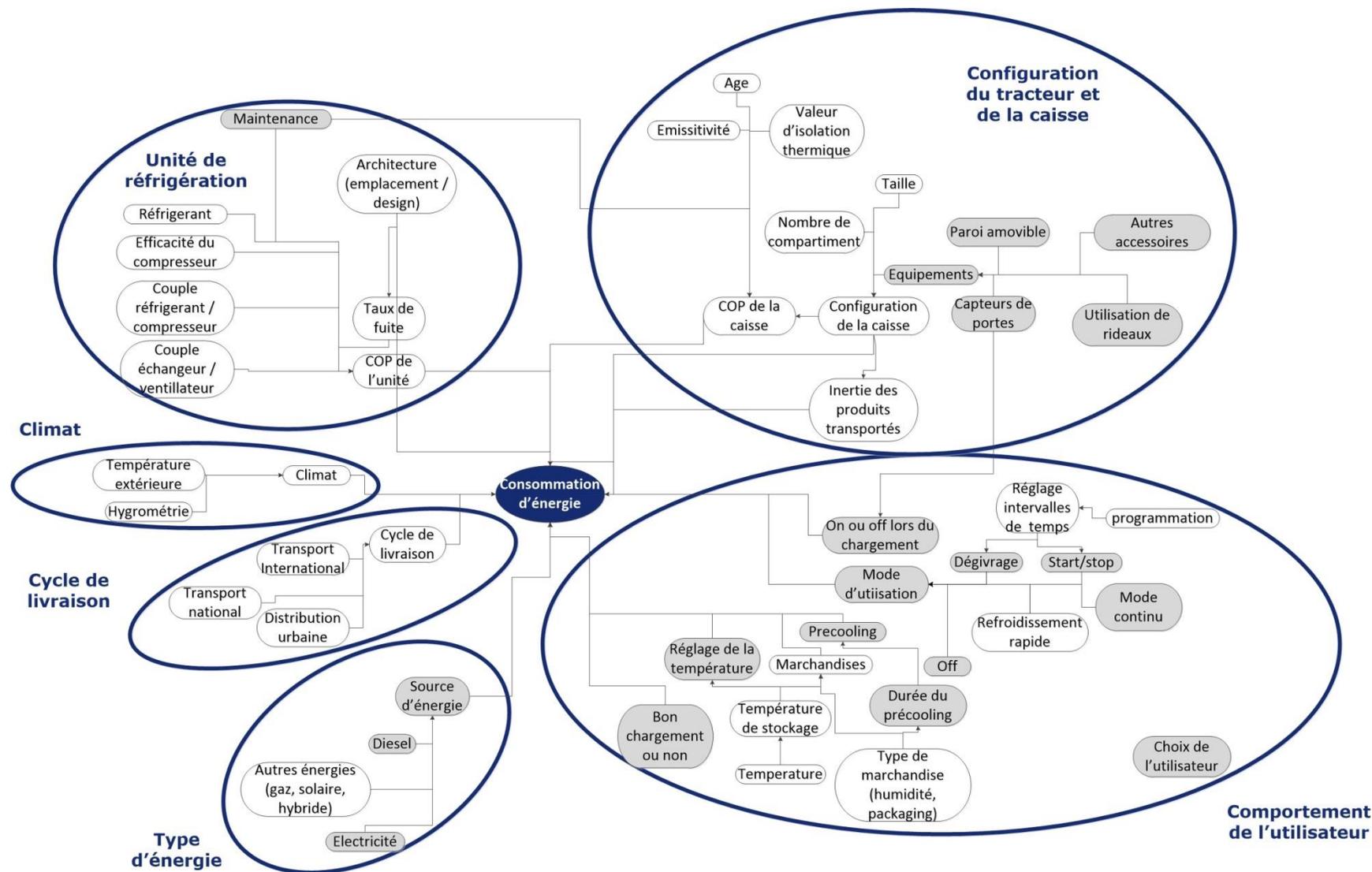


Figure [52] Réseau représentant les paramètres influant sur la consommation énergétique (les bulles grises montrent les choix de l'utilisateur)

## ii. L'utilisation du réfrigérant

La seconde source d'impact du secteur est l'utilisation du réfrigérant.

Un réfrigérant est une substance ou un mélange de substances, généralement un fluide, utilisé dans les systèmes de réfrigération et de pompe à chaleur.

Depuis le protocole de Montréal, les utilisations des réfrigérants CFC (ChloroFluoroCarbures) et HCFC (HydroChloroFluoroCarbures) sont interdites. Aujourd'hui, les réfrigérants utilisés sont du type HFC qui ont un pouvoir d'appauvrissement de la couche d'ozone nul en émission, mais un fort Potentiel de Réchauffement Climatique (PRC). On trouve aussi les réfrigérants naturels qui ont peu, voire pas d'impacts sur le réchauffement climatique. Le protocole de Kyoto réglemente l'utilisation de ces réfrigérants et les interdit pour certaines applications. L'effet sur le réchauffement climatique peut être maîtrisé et diminué si le réfrigérant utilisé est récupéré, traité et réutilisé en fin de vie (Yanagitani & Kawahara, 2000), (Tereza, 2015).

Les réfrigérants les plus utilisés, en France, dans les applications de transport routier à température dirigée, sont le HFC R404A<sup>10</sup> (85 % des cas) et le HFC R134a pour 15 % des cas (données 2012) (Michineau, et al., 2014b).

Le R404A est un mélange de 3 fluides fluoroéthanés.

- R143a : 1,1,1 – trifluoroéthane.
- R125 : 1,1,1,2,2 – pentafluoroéthane.
- R134a : 1,1,1,2 tétrafluoroéthane.

Avec les proportions suivantes :

$$R404A = R143a (52 \%) + R125 (44 \%) + R134a (4 \%)$$

Il n'existe quasiment pas d'études sur les impacts environnementaux des réfrigérants en production et lors de leur relâchement dans l'atmosphère (le PRC donné par les rapports du GIEC (Myhre, et al., 2013a)). Pour la production, la source de référence date d'avant les années 2000 et porte essentiellement sur le R134a pour la production (Frischknecht, 1999). Pour le relâchement dans l'air, seule l'information concernant le PRC est disponible et provient des rapports du GIEC<sup>11</sup>.

Pour ce qui est du PRC, celui du R404A a augmenté au fil des années. Il était en 2007 de 3 922 kg CO<sub>2</sub> eq, selon le 4<sup>e</sup> rapport du GIEC (Forster, et al., 2007), et de 3 943 ou 4 550 kg CO<sub>2</sub> eq en 2013 (cela dépend de l'inclusion ou non du paramètre « carbon feedback » dans la modélisation) selon le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC (Myhre, et al., 2013a), (Myhre, et al., 2013b).

Le remplacement de réfrigérants par des réfrigérants à plus faible PRC est à mettre en relation avec le coefficient de performance qui s'il est dégradé risque de contribuer à augmenter la consommation énergétique. Rappelons que la consommation énergétique

---

<sup>10</sup> Un réfrigérant avec un « A » majuscule correspond à un mélange de plusieurs réfrigérant. Un « a » minuscule indique un réfrigérant sans mélange.

<sup>11</sup> GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

est la principale source d'impacts environnementaux des systèmes frigorifiques (Calm, 2002), (Bovea, et al., 2007), (Wu, et al., 2013). Des réfrigérants avec un PRC faible (exemple le HFC R452A) vont réduire les émissions directes dues au réfrigérant, l'association réfrigérant et une efficacité énergétique plus importante vont réduire les émissions indirectes dues à la consommation d'énergie (JRC, 2014). Le compresseur est l'un des éléments le plus impacté par le changement du réfrigérant. Cela peut affecter la performance du système ainsi que sa durabilité (Ciantar & Hadfield, 2000).

L'importance à accorder au PRC d'un réfrigérant diminue avec le taux de fuite. Pour les réfrigérants avec un faible PRC, l'effet environnemental le plus dommageable dû à la fuite du réfrigérant sera une augmentation de la consommation d'énergie (Calm, 2002).

L'utilisation du réfrigérant est également problématique, notamment s'il est relâché dans l'atmosphère. Trois traitements peuvent avoir lieu en fin de vie.

- Le relâchement dans l'air. Il s'agit simplement du relâchement du réfrigérant dans l'air. Ce type de traitement est interdit dans une majorité de pays à cause du PRC du réfrigérant.
- La réutilisation. Elle consiste à traiter le réfrigérant pour qu'il soit réutilisé en un nouveau produit avec les mêmes spécifications.
- La mise au rebut final. Elle arrive lorsqu'il y a eu contamination du réfrigérant avec d'autres produits et/ou qu'il ne respecte plus la qualité nécessaire pour la réutilisation.

D'après Tereza (2015), le scénario de fin de vie moyen à l'échelle mondiale est que 50 % des réfrigérants sont relâchés dans l'air, 30 % sont réutilisés et 20 % sont mis au rebut. Cette répartition est à adapter aux réglementations et pratiques des lieux spécifiques de traitement. Le relâchement dans l'air peut survenir à la suite d'accidents.

### *iii. Le bruit*

Le bruit est une problématique environnementale importante des unités de réfrigération, mais il est peu considéré dans les publications scientifiques. Néanmoins, il est identifié comme un paramètre important par les clients, notamment pour les distributions urbaines qui peuvent avoir lieu la nuit, et les cycles de livraison longue distance qui impliquent que le chauffeur dorme dans sa cabine avec l'unité de réfrigération en fonctionnement.

Il existe un label qui permet de certifier que les produits ont un niveau sonore réduit. Ce label est le label Piek qui vise à limiter le niveau sonore d'un système à 60 dB(A) maximum la nuit pour les livraisons en milieu urbain.

### *iv. Les pertes dues au non-respect de la chaîne du froid*

Le transport à température dirigée est un maillon important de la chaîne du froid alimentaire dans sa globalité. Cela permet de préserver et garantir la sécurité alimentaire et permet de répondre aux besoins de plus en plus spécifiques des consommateurs. La réfrigération permet de protéger les aliments en stoppant ou en réduisant les changements pouvant survenir. Ces changements peuvent être microbiologiques,

physiologiques, biochimiques et/ou physiques. Actuellement, à l'échelle mondiale seulement 10 % des produits qui devraient être réfrigérés le sont réellement, ce qui représente une véritable problématique économique et environnementale. D'après la littérature, la réfrigération permettrait de réduire de 20 % à 30 % les pertes suite à la production (Coulomb, 2008). Une distinction est à faire entre les pays développés où le taux est de 9 % et les pays en voie de développement où le taux est de l'ordre de 23 % (International Institute of Refrigeration, 2009)) Une mauvaise gestion de la chaîne du froid en transport peut entraîner une surconsommation d'énergie, mais également une détérioration des biens transportés. Cette détérioration entraîne du gaspillage et donc des impacts environnementaux évitables. Le transport à température dirigée permet d'un point de vue plus global de ne pas gaspiller les impacts qui ont eu lieu pour la production des denrées alimentaires, lors de cette étape de la chaîne du froid. Par exemple, la production de viande de bœuf représente 22,6 kg d'émissions de CO<sub>2</sub> équivalentes<sup>12</sup> pour 1 kg de viande, ce qui équivaut aux émissions d'un parcours en voiture d'environ 160 km (UNEP, 2012).

Les pertes dues au non-maintien de la chaîne du froid concernent également toutes les détériorations des produits autres que périssables qui peuvent survenir, et les impacts environnementaux que leur production va générer sans qu'ils soient utilisés.

L'augmentation de la température ambiante globale causée par le réchauffement climatique aura un effet non négligeable sur le développement actuel de la chaîne du froid (James & James, 2010). Cela risque d'augmenter les risques sanitaires et les pertes, ce qui conduira à devoir améliorer la chaîne du froid et par conséquent le transport à température dirigée. Les besoins en équipements de transport frigorifique vont donc continuer à augmenter tout comme les impacts environnementaux globaux associés.

#### v. *Bilan*

Le recensement des considérations environnementales du secteur permet d'identifier plusieurs aspects environnementaux sur lesquels il sera nécessaire d'avoir des IPE pour communiquer avec les parties prenantes externes telles que les clients, les instances réglementaires, les associations professionnelles, etc. Ces aspects sont :

- la consommation énergétique et les comportements des utilisateurs ;
- le coefficient de performance du système de réfrigération ;
- la charge de réfrigérant utilisée (quantité) ;
- le taux potentiel de fuite de réfrigérant dans l'atmosphère ;
- le niveau de bruit en utilisation ;
- la qualité de la chaîne du froid.

---

<sup>12</sup> CO<sub>2</sub> équivalent est une unité utilisée pour comparer les émissions provenant de différents gaz à effet de serre sur la base de leur potentiel de réchauffement climatique.



## d. Maturité de l'entreprise

### *i. Expérience en écoconception*

L'entreprise n'a pas de réelle expérience antérieure dans le domaine de l'écoconception et l'ACV. Une ACV a déjà été menée sur un produit de la gamme des porteurs rigides, mais les résultats n'ont pas donné lieu à la mise en place d'une démarche d'écoconception.

L'entreprise communique déjà sur les émissions de CO<sub>2</sub> eq, en phase d'utilisation, calculées à partir d'une consommation de diesel moyenne sur 1 500 heures d'utilisation et un taux de fuite moyen de réfrigérant.

### *ii. Processus de développement de produits*

Le processus de développement de l'entreprise est très structuré avec des jalons et des « go »/« no go » à différentes étapes en fonction du respect ou non de certains critères. L'entreprise souhaite intégrer des considérations environnementales dans le développement de produits. La direction a notamment ajouté une brique conception pour le développement durable dans le processus de développement. Cette brique est applicable lors de la phase de planification et de spécifications du développement des concepts. La limite de cette brique est qu'elle n'est pas continue dans le développement de produits. Les considérations environnementales ne sont pas évaluées au fur et à mesure du développement pour s'assurer qu'elles évoluent dans le bon sens. Ces considérations sont : l'emballage (type, quantité), le taux de matériaux recyclés, les émissions dans l'air, les émissions de GES, le bruit, la quantité de matière utilisée, la présence/quantité de substances dangereuses restreintes, les substances dans les procédés chimiques, la fin de vie et la consommation d'eau. Ces évaluations sont soit qualitatives, soit quantitatives et restent relativement génériques. Il n'y a pas d'objectifs précis sur les améliorations à apporter. Il n'y a pas d'outils dédiés pour aider à l'amélioration environnementale des produits, sauf un guide lié à la brique qui n'indique pas précisément comment écoconcevoir. Cette brique n'est pas non plus connue des différents services de l'entreprise et pas mise en application.

### *iii. Outils utilisés dans l'entreprise*

De nombreux outils sont utilisés tout au long du développement de produits, cependant aucun outil n'aide à mettre en place une démarche d'écoconception ou d'évaluation environnementale.

### *iv. Compétences et besoins en formation*

L'entreprise a un service hygiène, sécurité, environnement avec des compétences pour gérer les aspects environnementaux liés au site de l'entreprise, mais pas de compétences en écoconception et/ou ACV. Elle dispose d'un référent développement durable qui ne dispose pas non plus de compétences en ACV et pour aider à la mise en place de l'écoconception. Les acteurs internes les plus susceptibles d'être impliqués dans l'écoconception (R&D, ingénierie, achats, marketing, etc.) ne disposent pas de compétences nécessaires.

#### v. Identification des freins et des leviers

Différents freins et leviers peuvent être identifiés à la suite de cet état des lieux, ils sont répertoriés dans la figure 53.

 <p><b>Forces</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Volonté de la direction (objectifs 2020 + brique conception pour le développement durable)</li> <li>▪ Processus de développement de produits structuré</li> </ul>	 <p><b>Faiblesses</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Manque de compétences</li> <li>▪ Pas d'outils internes dédiés</li> <li>▪ Pas de référent écoconception/ACV</li> <li>▪ Novice, très peu d'expérience dans le domaine</li> <li>▪ Pas d'exigences réglementaires fortes en écoconception</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Existence de nombreux outils d'écoconception utilisables</li> <li>▪ Besoins et demandes des clients (par exemple les transporteurs doivent communiquer leurs émissions de CO<sub>2</sub> liées aux transports et les réduire)</li> <li>▪ Volonté de l'entreprise d'accompagner le client dans l'utilisation et mieux comprendre l'usage de ses produits</li> <li>▪ Volonté d'améliorer son image de marque</li> </ul> <p> <b>Opportunités</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Réglementations sur les émissions</li> <li>▪ Potentielle future réglementation ErP</li> <li>▪ Concurrence</li> </ul> <p> <b>Menaces</b></p>

Figure [53] Matrice SWOT d'identification des freins et leviers d'actions pour l'entreprise

#### vi. Bilan

L'analyse de la maturité permet d'identifier les outils qu'il faut mettre en place pour s'assurer de la bonne utilité des IPE qui seront définis. Ces outils sont :

- sensibilisation/formation des acteurs internes de l'entreprise aux problématiques environnementales, à leur évaluation, leur interprétation et aux principes d'écoconception ;
- définition d'un standard de travail donnant des directives pour intégrer l'écoconception dans les services R&D et bureau d'études ;
- outil pour accompagner le client/utilisateur dans l'usage des produits.

On peut lier ces 3 besoins aux aspects environnementaux qui sont : la sensibilisation/formation des employés aux problématiques environnementales ; l'implémentation de l'écoconception dans le développement de produits ; et le comportement de l'utilisateur.

Cela a permis aussi d'identifier des aspects environnementaux sur lesquels des informations doivent être collectées et/ou sur lesquels des IPE sont déjà communiqués :

- la quantité de matière utilisée (collecte) ;
- la présence/quantité de substances dangereuses restreintes (collecte/communication) ;

- les substances dans les procédés chimiques (collecte) ;
- la consommation d'eau (collecte) ;
- les emballages (collecte) ;
- les émissions de GES (collecte/communication) ;
- les émissions dans l'air autres que les GES (collecte/communication) ;
- le taux potentiel de fuite de réfrigérant (collecte/communication) ;
- le bruit (collecte/communication) ;
- le taux de recyclabilité (collecte/communication) ;
- la fin de vie (collecte).



#### e. Stratégie de l'entreprise

L'entreprise n'est pas soumise à la directive ErP pour l'efficacité énergétique, mais prend en compte le dispositif des CEE, visant à réaliser des économies d'énergie, dans tous les développements de nouveaux produits. Les réglementations applicables sont en lien avec les émissions atmosphériques dues à l'utilisation du diesel et les émissions liées aux fuites potentielles de réfrigérant.

Elle a pour stratégie d'augmenter ses profits et prendre un avantage concurrentiel tout en améliorant son image de marque d'un point de vue environnemental. Elle souhaite également avoir une démarche proactive et anticiper les potentielles réglementations futures. Cela est d'autant plus vrai que le temps de développement et la durée de vie des produits sont relativement longs (12 ans pour la durée de vie).

L'entreprise s'est également fixé des objectifs environnementaux à l'horizon 2020. Ces objectifs sont à la fois liés à la gestion du site (réduction des déchets, élimination de certaines substances dangereuses, réduction des émissions de GES et de consommation d'eau), mais également et surtout liés à l'écoconception des produits. Ces objectifs sont :

- implémenter le concept de conception pour un développement durable dans tous les développements des nouveaux produits ;
- réaliser une analyse du cycle de vie pour chacun de ses nouveaux développements ;
- inciter les principaux fournisseurs à mettre en œuvre 11 mesures de durabilité spécifiques.

Les aspects environnementaux importants pour la sélection des IPE sont donc :

- l'image environnementale (les récompenses accordées par exemple)
- l'implication des fournisseurs dans la démarche d'écoconception ;
- l'intégration de préoccupations environnementales dans le développement de produits (évaluation et actions) ;
- l'efficacité énergétique ;
- la charge de réfrigérant (quantité) ;
- le taux de valorisation.

## f. Bilan

Il existe déjà des indicateurs de performances environnementales en logistique, secteur dans lequel s'inscrivent les produits étudiés (Mintcheva, 2005), (Tsoulfas & Pappis, 2008), (Turi, et al., 2014), (ADEME, 2012b). Le transport à température dirigée étant tout petit, ces indicateurs ne sont pas représentatifs des problématiques liées au transport à température dirigée. On retrouve, par exemple, les indicateurs suivants :

- nombre de compagnies de transport avec un système de management environnemental ;
- volume transporté par mode de transport par rapport au volume total transporté ;
- logistique inverse, qui représente les efforts de la compagnie pour réduire les déchets ;
- réduction de la consommation d'énergie, qui reflète les efforts réalisés pour réduire la consommation d'énergie par année ;
- émissions de CO<sub>2</sub> par palette, qui mesure la moyenne des émissions par unité générée par la compagnie de transport et ses activités ;
- rapport entre les émissions de CO<sub>2</sub> de l'entreprise et une donnée représentative de son activité.

Des indicateurs spécifiques ont été développés pour le transport à température dirigée. Ils sont principalement liés à l'utilisation d'énergie pour l'alimentation du groupe frigorifique en phase d'utilisation. On retrouve principalement des indicateurs de consommation de ressources énergétiques, d'émissions de gaz à effet de serre ou l'indicateur de réchauffement climatique, la destruction de la couche d'ozone et les émissions de particules fines (Barnabe, et al., 2003), (Barnabe & Bensafi, 2007), (Tassou, et al., 2009), (Barnitt, et al., 2009), (Fitzgerald, et al., 2011), (Wu, et al., 2013), (Oro, et al., 2014).

L'étape 1 est une étape importante bien qu'elle soit consommatrice de temps. Elle permet de bien restituer le contexte environnemental de l'entreprise et de ses produits. De cet état des lieux, plusieurs aspects ont été identifiés pour lesquels des IPE et des stratégies d'écoconception doivent être définis (tableau 11).

Ces aspects environnementaux peuvent être regroupés en 9 grandes catégories qui sont :

- la composition matière ;
- les procédés de fabrication ;
- les emballages ;
- la consommation énergétique en utilisation ;
- l'utilisation d'un réfrigérant ;
- la chaîne du froid ;
- le bruit ;
- la fin de vie ;
- le processus de développement de produits.

**Tableau [11]** Bilan de l'étape 1 : aspects environnementaux à considérer pour la sélection des IPE et la définition des stratégies d'écoconception

Aspect environnemental à considérer		Analyse environnementale du produit 	Réglementations environnementales 	Problématiques environnementales du secteur 	Maturité de l'entreprise 	Stratégie de l'entreprise 
Composition matière	La composition matière (quantité par matériau)	x			x	
	Les substances dangereuses utilisées dans le produit		x		x	
Procédés de fabrication	Les substances dangereuses utilisées dans les procédés de fabrication		x		x	
	La consommation d'eau pour la fabrication				x	
Emballages	Les emballages				x	
Consommation énergétique	Le coefficient de performance du système de réfrigération (efficacité énergétique)			x		x
	La consommation énergétique en utilisation	X		x		
	Le comportement de l'utilisateur	x		x	x	
	Les émissions de GES liés à la consommation énergétique		x			x
	les émissions dans l'air liées à la consommation énergétique (particules fines PM, oxydes d'azote NOx, oxydes de soufre SOx, monoxyde de carbone CO, hydrocarbures HC)		x			x
Utilisation de réfrigérant	La charge de réfrigérant			x		x
	Le taux de fuite potentiel de réfrigérant	x		x	x	
	Les émissions de GES liées aux fuites potentielles de réfrigérant		x		x	
Chaîne du froid	La qualité de la chaîne du froid			x		
Bruit	Le niveau de bruit			x	x	
Fin de vie	Les traitements en fin de vie				x	
	Les taux de valorisation		x		x	x
	Le temps de démontage		x		x	
Processus de développement de produits	La sensibilisation/formation des employés aux problématiques environnementales				x	
	L'implémentation de l'écoconception dans le développement de produits				x	x
	L'intégration des fournisseurs					x
	L'image environnementale de l'entreprise					x

À partir de l'identification de ces aspects environnementaux, nous pouvons définir des objectifs environnementaux d'écoconception. Ces objectifs environnementaux nous aideront à identifier les acteurs clés de la chaîne de valeur pour l'étape 2 ainsi que les stratégies d'écoconception qui seront mises en place ensuite.

À partir du tableau 6 (cf. page 87) et des aspects environnementaux, nous pouvons définir les objectifs environnementaux (tableau 12).

**Tableau [12]** Définition des objectifs environnementaux à partir de l'identification des aspects environnementaux

Aspects environnementaux		Objectifs environnementaux	
Composition matière	➔	Minimiser la consommation de matière	
		Réduire l'impact environnemental des matériaux	
		Optimiser la structure du produit	
Procédés de fabrication	➔	Réduire la consommation de ressources pour la fabrication	
Emballages	➔	Réduire les impacts environnementaux des emballages	
Consommation énergétique en utilisation	➔	Minimiser la consommation d'énergie en phase d'utilisation	
Utilisation d'un réfrigérant	➔	Réduire les impacts environnementaux de l'usage	
Chaîne du froid	➔	Réduire les impacts environnementaux de l'usage	
Bruit	➔	Réduire les impacts environnementaux de l'usage	
Fin de vie	➔	Faciliter le recyclage	
		Réduire les impacts environnementaux en fin de vie	
Processus de développement de produit	➔	Repenser le produit / innover	
		Réduire les impacts environnementaux du cycle de vie global	

Il n'est pas envisageable de se concentrer sur la mise en place de stratégies d'écoconception pour répondre à tous les aspects environnementaux et à tous les objectifs environnementaux.

À l'aide de l'état des lieux du contexte environnemental du produit et de l'entreprise, il est évident qu'il est nécessaire de travailler en priorité sur la phase d'utilisation avec 4 aspects environnementaux à considérer : la consommation énergétique en utilisation, le réfrigérant, la chaîne du froid et le niveau de bruit.

Nous allons donc faire un focus sur les 2 objectifs environnementaux suivants qui prennent en compte les 4 aspects environnementaux cités ci-dessus :

- minimiser la consommation d'énergie en phase d'utilisation ;
- réduire les impacts environnementaux de l'usage.

Les autres aspects et objectifs environnementaux pourront être améliorés en parallèle ou ultérieurement dans une démarche d'amélioration continue.

## 2. Étapes 2 et 3 : Définition des acteurs et de leurs objectifs

Nous allons identifier les acteurs clés pour les 2 objectifs environnementaux liés à la phase d'usage définis à l'étape 1. Pour chacun de ces acteurs, les besoins seront identifiés en étape 3.

Pour chaque acteur de la chaîne de valeur, nous avons défini leur rôle par rapport à la phase d'usage puis leur niveau d'importance par rapport à cette phase et leur potentiel à améliorer la performance environnementale. Le potentiel à améliorer la performance environnementale est analysé suivant 3 niveaux :

- faible : l'acteur a peu voire pas d'influence sur la phase d'usage ;
- forte : l'acteur a une influence sur la phase d'usage, mais n'a pas forcément un lien direct ;
- très forte : l'acteur a une forte influence sur la phase d'usage et/ou fait partie intégrante de la phase d'usage.

Les tableaux 13 et 14 résument ces informations pour chaque acteur de la chaîne de valeur (internes et externes).

Les rôles pour les acteurs internes ont été définis à partir de l'analyse du fonctionnement de l'entreprise et le processus de développement de produits. Les liens pour les acteurs externes avec la phase d'usage ont été définis à partir de l'analyse de la chaîne de valeur.

Nous choisissons les acteurs identifiés avec un potentiel fort et très fort pour la définition des acteurs clés. Les acteurs clés à prendre en considération sont donc :

- en interne : les décideurs, les ingénieurs/le service R&D, le marketing, le service après-vente, la distribution (commerciaux), et la maintenance ;
- en externe : les fournisseurs, les clients/utilisateurs, les distributeurs/intégrateurs, les autres entreprises du système global, la maintenance, et les acteurs de fin de vie.

**Tableau [13]** Définition des rôles et de l'importance des acteurs internes pour l'amélioration de la performance environnementale du produit en phase d'usage

Acteurs internes de l'entreprise	Rôle	Importance pour l'amélioration de la performance environnementale du produit en phase d'usage
 Décideur	Choisit l'orientation stratégique de l'entreprise et des développements de produits Pilote les projets	Forte
 Ingénieur - concepteur/ Service R&D	Développe et conçoit les produits Apporte des améliorations technologiques Choisit les matériaux/donne des spécifications Influe sur l'efficacité énergétique du produit	Très forte
 HSE	S'assure de la conformité réglementaire environnementale du site Gère les aspects environnementaux de l'usine et tous les aspects en lien avec la sécurité et l'hygiène dans les procédés de fabrication S'assure de l'ergonomie des produits	Faible
 Marketing	Pilote le développement de produits Dispose d'un référent développement durable produit Analyse la concurrence et la position sur le marché Analyse et transmet les demandes clients	Très forte
 Achats	Communique et échange en direct avec les fournisseurs Sélectionne les fournisseurs Peut imposer aux fournisseurs des exigences d'écoconception Collecte des informations sur les composants	Faible
 Qualité	S'assure de la qualité des composants achetés et des produits fabriqués à l'usine Procède aux contrôles de qualité des fournisseurs	Faible
 Après/vente	Analyse les retours des clients/utilisateurs Analyse les problèmes pouvant survenir en phase d'usage (pannes, défaillances, réclamations, etc.)	Forte
 Production	Produit les unités de réfrigération Participe à l'innovation des procédés de fabrication	Faible
 Distribution (commerciaux)	Vend la solution au client Propose des accessoires (capteurs de portes, système d'acquisition, etc.) Conseille le client	Forte
 Maintenance	Maintient l'efficacité du système (consommation énergétique, charge de réfrigérant, entretien) Doit gérer les réfrigérants usagés Doit gérer les pièces de rechange et les consommables (phase de maintenance incluse dans la phase d'utilisation)	Forte

**Tableau [14]** Définition des liens avec l'usage et de l'importance des acteurs externes pour l'amélioration de la performance environnementale du produit en phase d'usage

Acteurs externes de la chaîne de valeur	Lien avec la phase d'usage	Importance pour l'amélioration de la performance environnementale du produit en phase d'usage
 Fournisseur	Développe des composants intégrés dans le produit final Peut optimiser l'efficacité énergétique de ses composants et par répercussions du système global	Forte
 Transporteur	Livre les composants à l'usine Livre les produits finis aux clients	Faible
 Client/ utilisateur	Choisit le produit et les accessoires Utilise l'unité de réfrigération (importance de l'influence des comportements de l'utilisateur) Choisit de faire effectuer les maintenances	Très forte
 Distributeur/ Intégrateur / Autre acteur du système	Assemble la solution complète (unité de réfrigération avec caisse isotherme) Propose des accessoires Vend la solution complète au client	Très forte
 Maintenance (franchisé)	Maintient l'efficacité du système (consommation énergétique, charge de réfrigérant, entretien) Doit gérer les réfrigérants usagés Doit gérer les pièces de rechange et les consommables (phase de maintenance incluse dans la phase d'utilisation)	Forte
 Acteur de la fin de vie	Gère les réfrigérants en fin de vie Gère les consommables usagés et les pièces défectueuses pendant la phase d'usage Gère l'unité de réfrigération en fin de vie	Forte
 Investisseur / Etat / Société	S'assure de la conformité réglementaire S'assure de la performance de l'entreprise suivant toutes les dimensions (financière, sociale, environnementale)	Faible

Pour l'acteur client/utilisateur, dans ce cas d'étude c'est principalement le client qui est visé par les IPE et qui est la cible des outils qui sont développés. C'est ensuite au client de challenger ses utilisateurs (chauffeurs routiers) pour améliorer les IPE.

Une fois les acteurs clés identifiés, nous avons analysé leurs besoins et objectifs pour la sélection des IPE. Le tableau 15 récapitule ces informations. Il a été construit à l'aide de l'étape 1, des tableaux 4 et 5 (cf. page 81) et personnalisé à la suite de différents échanges avec chaque service de l'entreprise.

Tableau [15] Besoins et objectifs des acteurs clés pour la sélection des IPE

Acteurs		Besoins et objectifs pour la sélection des IPE	Intérêts généraux pour le choix dans la base de données d'IPE
 Décideurs	<b>Décideur</b>	Communiquer la performance environnementale aux parties prenantes Respecter les réglementations Définir la stratégie produit de l'entreprise Définir des objectifs d'amélioration des performances environnementales	Suivre la performance environnementale Communiquer Suivre et/ou anticiper les réglementations environnementales
 Ingénieur - concepteur / Service R&D	<b>Ingénieur-concepteur / service R&amp;D</b>	Évaluer les potentiels bénéfiques des innovations développées Évaluer les performances environnementales du produit sur tout son cycle de vie et plus particulièrement en phase d'usage Identifier des stratégies d'écoconception	Suivre et améliorer la performance environnementale Échanger des informations
 Marketing	<b>Marketing</b>	Définir des objectifs d'amélioration des performances environnementales Communiquer des informations aux clients Défendre sa position sur le marché	Suivre et améliorer la performance environnementale Communiquer Suivre et/ou anticiper les réglementations environnementales
 Après-vente	<b>Après-vente</b>	Analyser les retours des utilisateurs Échanger les informations des opérateurs de maintenance et des réclamations des clients	Échanger des informations
 Distribution	<b>Distribution</b>	Communiquer des informations au client sur la performance environnementale Aider pour la sélection entre plusieurs produits	Communiquer des informations Suivre la performance environnementale
 Maintenance	<b>Maintenance</b>	Suivre l'utilisation des consommables Suivre les fuites de réfrigérant Échanger des informations avec la qualité, le service après-vente et HSE Suivre la gestion de ses déchets	Suivre la performance environnementale Échanger des informations
 Fournisseurs	<b>Fournisseur</b>	Répondre aux exigences de l'entreprise en matière de la performance environnementale sur les composants Échanger des informations pour améliorer la performance environnementale globale du produit	Échanger des informations
 Clients / Utilisateur	<b>Client / Utilisateur</b>	Connaître sa propre consommation énergétique en fonction de son utilisation S'assurer de la qualité de la chaîne du froid en consommant le moins d'énergie Minimiser le bruit Communiquer sur sa performance environnementale (émissions liées au diesel) Avoir le moins de défaillances possible	Suivre et améliorer la performance environnementale Communiquer
 Distributeur / Intégrateur / Autre acteur du système global	<b>Distribution / Intégrateur / Autre acteur du système global</b>	Évaluer et suivre la performance environnementale du système complet Proposer un produit répondant aux usages du client	Suivre la performance environnementale Communiquer
 Acteurs de la fin de vie	<b>Acteur des filières de fin de vie</b>	Connaître les compositions matières et l'architecture du produit Échanger des informations avec l'entreprise sur les possibilités existantes	Suivre la performance environnementale Échanger des informations

### 3. Étape 4 : Sélection des IPE spécifiques

Pour rappel des étapes 1, 2 et 3. Nous avons défini les objectifs environnementaux suivants : minimiser la consommation d'énergie en phase d'utilisation et réduire les

impacts environnementaux de l'usage. Cela doit prendre en compte les 4 aspects environnementaux suivants : la consommation énergétique en utilisation, le réfrigérant, la chaîne du froid et le niveau de bruit. Nous avons également défini les acteurs clés et leurs besoins objectifs pour la sélection des IPE.

Ces 3 éléments (la définition des objectifs environnementaux, des acteurs clés et leurs intérêts) nous permettent, à l'aide de l'outil de sélection développé en partie 2 (cf. page 87), de définir des jeux d'IPE spécifiques.

Le tableau 16 présente les résultats de la sélection des IPE spécifiques basés sur la proposition à l'aide de l'outil et l'opération de tri conseillée ensuite.

**Tableau [16]** Jeux d'IPE spécifiques pour chacun des acteurs clés par rapport aux objectifs environnementaux

Acteurs		Jeux d'IPE spécifiques
 Décideurs	<b>Décideur</b>	Nombre de demandes des parties prenantes sur les questions environnementales Taux de nouveaux produits développés avec une démarche d'écoconception [%]
 Ingénieur - concepteur/ Service R&D	<b>Ingénieur-concepteur/ service R&amp;D</b>	Efficacité énergétique du produit Coefficient de performance du produit Taux de recyclabilité globale du produit [%] par rapport à la masse totale Empreinte environnementale globale sur le cycle de vie (indicateurs de l'ACV) Niveau de bruit du système de réfrigération [dB(A)] Taux de fuite potentielle de réfrigérant [%]
 Marketing	<b>Marketing</b>	Gain en émissions de CO <sub>2</sub> en utilisation pour chaque nouveau produit développé [kg CO <sub>2</sub> eq] Taux de recyclabilité du produit [%] Nombre de demandes des clients pour un accompagnement Taux de clients ayant effectué des améliorations sur son comportement [%]
 Après-vente	<b>Après-vente</b>	Nombres des pannes /défaillances Taux de retours des plaintes clients [%]
 Distribution	<b>Distribution</b>	Nombre de clients accompagnés sur l'éco-utilisation des produits Consommation énergétique moyenne des produits [en l/h]
 Maintenance	<b>Maintenance</b>	Taux de fuite moyen [%] Quantité de réfrigérant récupérée et envoyée pour traitement en fin de vie [kg] Nombre de défaillances/pannes Quantité de consommables utilisés [kg par consommable]
 Fournisseurs	<b>Fournisseur</b>	Efficacité énergétique du composant Taux de recyclabilité par composant [%]
 Clients/ utilisateurs	<b>Client / Utilisateur</b>	Consommation énergétique spécifique à son usage [l/an] Heure de fonctionnement de l'unité de réfrigération par an [h/an] Émissions associées de CO <sub>2</sub> , PM, NO <sub>x</sub> , HC et CO [kg eq] Niveau de bruit en utilisation [dB(A)] Qualité de la chaîne du froid
 Distributeurs / Intégrateurs / Autres acteurs du système	<b>Distribution/ Intégrateur Autre acteur du système global</b>	Efficacité énergétique globale du système Consommation énergétique moyenne des produits [en l/h] Taux d'accessoires ayant une action sur le comportement environnemental associé [%]
 Acteurs de la fin de vie	<b>Acteur des filères de fin de vie</b>	Présence d'un guide de démantèlement

#### 4. Etape 5 : Sélection des IPE globaux

Comme défini dans la méthodologie, deux jeux d'IPE globaux sont ensuite définis à partir des jeux d'IPE spécifiques : 1 pour le développement de produits et 1 pour la communication et l'échange d'informations (tableau 18).

À partir du tableau 16 et du tableau 7 (cf. page 93) permettant d'évaluer les acteurs par rapport aux jeux d'IPE globaux, nous classons chaque acteur dans un des 2 jeux d'IPE globaux ou les deux. Les résultats sont donnés dans le tableau 17. Chaque acteur est associé à un niveau faible, fort, très fort. Seuls les acteurs avec un niveau fort et très fort sont retenus pour la corrélation des IPE.

Tableau [17] Répartition des acteurs et de leurs IPE dans les jeux d'IPE globaux

 <b>Jeu d'IPE global pour le développement de produits</b>		 <b>Jeu d'IPE global la communication et l'échange d'informations</b>	
Ingénieur-concepteur/ service R&D  <b>Très fort</b>	Efficacité énergétique du produit Coefficient de performance du produit Taux de recyclabilité globale du produit [%] par rapport à la masse totale Empreinte environnementale globale sur le cycle de vie (indicateurs de l'ACV) Niveau de bruit du système de réfrigération [dB(A)] Taux de fuite potentielle de réfrigérant [%]	Décideur  <b>Très fort</b>	Nombre de demandes des parties prenantes sur les questions environnementales Taux de nouveaux produits développés avec une démarche d'écoconception [%]
Maintenance  <b>Fort</b>	Taux de fuite moyen [%] Quantité de réfrigérant récupérée et envoyée pour traitement en fin de vie [kg] Nombre de défaillances/pannes Quantité de consommables utilisés [kg par consommable]	Marketing  <b>Très fort</b>	Gain en émissions de CO <sub>2</sub> en utilisation pour chaque nouveau produit développé [kg CO <sub>2</sub> eq] Taux de recyclabilité du produit [%] Nombre de demandes des clients pour un accompagnement Taux de clients ayant effectué des améliorations sur son comportement [%]
Fournisseur  <b>Très fort</b>	Efficacité énergétique du composant Taux de recyclabilité par composant [%]	Distribution  <b>Fort</b>	Nombre de clients accompagnés sur l'éco-utilisation des produits Consommation énergétique moyenne des produits [en l/h]
		Après-vente <b>Faible</b>	Nombres des pannes/défaillances Taux de retours des plaintes clients [%]
		Client / Utilisateur <b>Très fort</b>	Consommation énergétique spécifique à son usage [l/an] Heure de fonctionnement de l'unité de réfrigération par an [h/an] Émissions associées de CO <sub>2</sub> , PM, NOx, HC et CO [kg eq] Niveau de bruit en utilisation [dB(A)] Qualité de la chaîne du froid
		Distribution/ Intégrateur / Autre acteur du système global <b>Fort</b>	Efficacité énergétique globale du système Consommation énergétique moyenne des produits [en l/h] Taux d'accessoires ayant une action sur le comportement environnemental associé [%]
		Acteur des filiales de fin de vie <b>Faible</b>	Présence d'un guide de démantèlement

A partir de ce tableau 17, nous corrélons les IPE pour arriver aux jeux d'IPE globaux (tableaux 18 et 19).

**Tableau [18]** Corrélation des IPE spécifiques pour le jeu d'IPE global pour le développement de produits

 <b>Jeu d'IPE global pour le développement de produits</b>	
Indicateurs spécifiques des acteurs	Indicateurs corrélés
Efficacité énergétique du produit Coefficient de performance du produit Efficacité énergétique du composant	Efficacité énergétique de l'unité de réfrigération Capacité de froid fournie [W]
Taux de recyclabilité globale du produit [%] par rapport à la masse totale Quantité de réfrigérant récupérée et envoyée pour traitement en fin de vie [kg] Taux de recyclabilité par composant [%]	Taux de recyclabilité [%]
Quantité de consommables utilisés [kg par consommable]	Quantité de consommables utilisés [kg par consommable]
Empreinte environnementale globale sur le cycle de vie (indicateurs de l'ACV)	Empreinte environnementale par étapes du cycle de vie [indicateurs ACV]
Niveau de bruit du système de réfrigération [dB(A)]	Niveau de bruit en utilisation [dB(A)]
Taux de fuite potentielle de réfrigérant [%] Taux de fuite moyen [%]	Taux de fuite potentielle [%]
Nombre de défaillances/pannes	Nombre de défaillances/pannes

**Tableau [19]** Corrélation des IPE spécifiques pour le jeu d'IPE global pour le management et la communication

Jeu d'IPE global la communication et l'échange d'informations	
Indicateurs spécifiques des acteurs	Indicateurs corrélés
Taux de nouveaux produits développés avec une démarche d'écoconception [%]	Taux de produits avec une démarche d'écoconception [%]
Nombre de demandes des parties prenantes sur les questions environnementales Nombre de demandes des clients pour un accompagnement Taux de clients ayant effectué des améliorations sur son comportement [%] Nombre de clients accompagnés sur l'éco-utilisation des produits Taux d'accessoires ayant une action sur le comportement environnemental associé [%]	Nombre de clients accompagnés dans une démarche d'éco-utilisation
Gain en émissions de CO <sub>2</sub> en utilisation pour chaque nouveau produit développé [kg CO <sub>2</sub> eq] Émissions associées de CO <sub>2</sub> , PM, NOx, HC et CO [kg eq]	Émissions associées de CO <sub>2</sub> , PM, NOx, HC et CO [kg eq pour 1500 h de fonctionnement]
Taux de recyclabilité du produit [%]	Déjà pris en compte dans le jeu d'IPE pour le développement de produits
Consommation énergétique moyenne des produits [en l/h] Consommation énergétique spécifique à son usage [l/an] Heure de fonctionnement de l'unité de réfrigération par an [h/an] Efficacité énergétique globale du système Consommation énergétique moyenne des produits [en l/h]	Consommation diesel moyenne du produit [en l/h]
Niveau de bruit en utilisation [dB(A)]	Niveau de bruit [dB(A)]
Qualité de la chaîne du froid	Qualité de la chaîne du froid

Les jeux d'IPE globaux sont soit directement alimentés par les IPE spécifiques lorsque ceux-ci sont identiques, soit calculés à partir des IPE spécifiques.

Certains des IPE sont utiles pour les 2 jeux d'IPE globaux (tableau 20).

Tableau [20] Jeux d'IPE globaux pour l'entreprise

 Jeu d'IPE global pour le développement de produits	 Jeu d'IPE global la communication et l'échange d'informations
Efficacité énergétique de l'unité de réfrigération Capacité de froid fournie [W] Taux de fuite potentielle [%] Niveau de bruit en utilisation [dB(A)] Empreinte environnementale par étapes du cycle de vie [indicateurs ACV] Taux de recyclabilité [%] Nombre de défaillances/pannes Quantité de consommables utilisés [kg par consommable]	Consommation diesel moyenne du produit [en l/h] Niveau de bruit [dB(A)] Émissions associées de CO <sub>2</sub> , PM, NO <sub>x</sub> , HC et CO [kg eq pour 1 500 h de fonctionnement] Qualité de la chaîne du froid Nombre de clients accompagnés dans une démarche d'éco-utilisation Taux de produits avec une démarche d'écoconception [%]

## 5. Bilan de la sélection des IPE pour le cas d'étude

Un état des lieux du contexte environnemental du produit et de l'entreprise a été réalisé, cela a permis de collecter un nombre important d'informations pour inciter une démarche d'écoconception dans l'entreprise. Pour chaque acteur important par rapport aux deux objectifs environnementaux identifiés, des jeux d'IPE spécifiques ont été proposés puis ces jeux d'IPE ont été corrélés en 2 jeux d'IPE globaux.

Nous n'avons pas pu aujourd'hui disposer de suffisamment de recul pour mettre en place la prise de décision et la gestion du multicritère par rapport aux IPE.

## Chapitre 9. Outils mis en place pour aider à la prise en compte des IPE sur tout le cycle de vie

La figure 54 place les différents livrables développés avec l'entreprise pour répondre au mieux à ses besoins et permettre l'utilisation des IPE et l'intégration de la démarche d'écoconception avec les acteurs de la chaîne de valeur concernés. Elle met en évidence les différents utilisateurs des livrables développés. Ces livrables sont :

- un standard d'exigences d'écoconception à destination des fournisseurs, associé à un format standard d'échange d'informations ;
- une fiche de déclaration environnementale produit ;
- une sensibilisation à l'écoconception et à l'analyse du cycle de vie (formation) ;
- un standard de travail pour les concepteurs, règles d'écoconception ;
- une base de données structurée des composants pour identifier les besoins en information ;
- un guide démantèlement pour les unités de réfrigération en fin de vie ;
- un démonstrateur Excel de diagnostic et de suivi de l'usage en fonction des comportements de l'utilisateur.

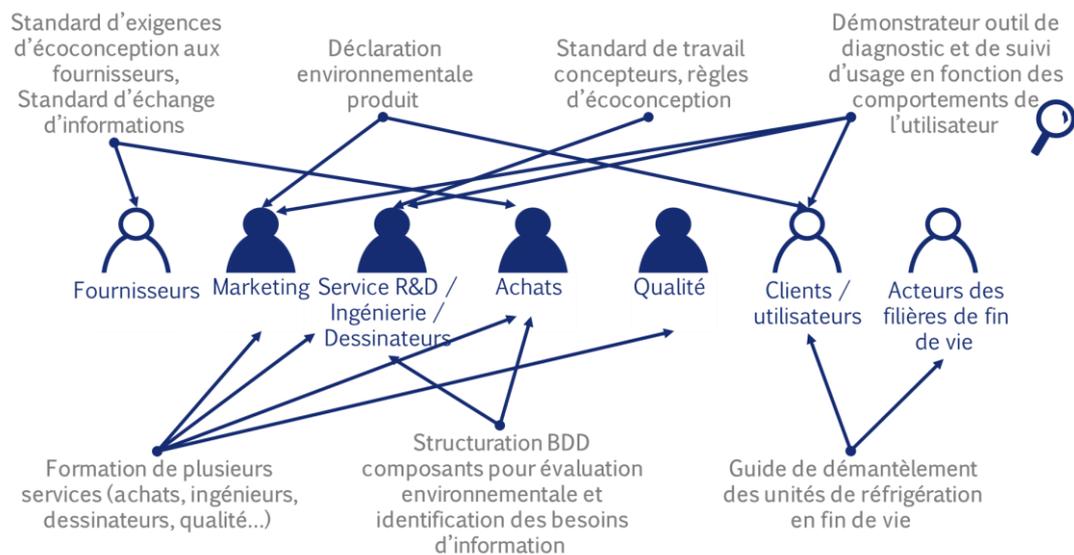


Figure [54] Outils développés et mis en place chez Carrier Transicold et liens avec les acteurs de la chaîne de valeur

Chacun des livrables est détaillé dans la suite de ce mémoire. Certains de ces outils étant inspirés d'outils existants, une description sommaire est proposée. Ces outils ont tous un impact de plus ou moins près sur les performances en phase d'utilisation. Un focus est fait dans le paragraphe 2 sur l'outil dédié à l'usage mettant en application la seconde méthode développée (outil de diagnostic et de suivi d'usage en fonction des comportements de l'utilisateur).

## 1. Standard d'exigences d'écoconception à destination des fournisseurs, associé à un format standard d'échange d'informations

Il s'agit d'un guide inspiré des exigences demandées par les constructeurs automobiles à leurs fournisseurs (Renault, 1994), (PSA, 1997), (Volvo, 1997), (BMW, 1999). Il est composé d'une liste d'exigences d'écoconception obligatoires ou facultatives. Chaque étape du cycle de vie dispose d'une liste d'exigence. Ces exigences obligatoires sont par exemple :

- donner des informations sur la composition matière des composants ;
- être capable de donner des informations sur leurs actions environnementales ;
- concevoir les composants électriques/électroniques pour être facilement désassemblés ;
- marquer les matériaux polymères suivant le standard le plus approprié, par exemple le standard ISO 11 469 ;
- éviter les emballages quand cela est possible ;
- donner le taux de recyclabilité du produit.

Les exigences facultatives sont par exemple :

- faciliter la localisation des équipements devant être vidangés ;

- utiliser les meilleures technologies disponibles pour la fabrication ;
- avoir une distribution de densité différente de 0,03 g/cm<sup>3</sup> pour faciliter la séparation mécanique des plastiques en fin de vie.

Ce document a été réalisé avec le service achat de l'entreprise qui a un lien direct avec les fournisseurs pour définir les exigences devant être obligatoires et celles facultatives. Ce guide donne également des exigences sociales.

Il est accompagné d'un fichier de collecte de données à remplir par le fournisseur sur tout le cycle de vie du produit.

En plus de ces exigences, les IPE définis dans le tableau 16 sont utilisés par les fournisseurs pour échanger des informations et par le service achat pour suivre l'implication des fournisseurs.

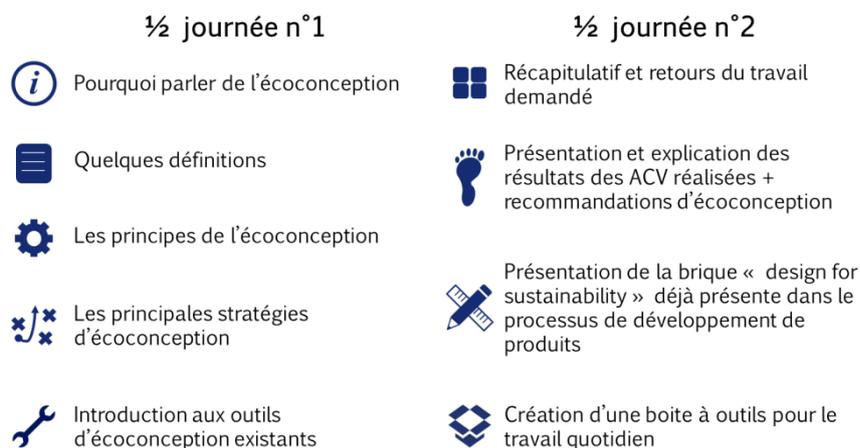
## 2. Fiche de déclaration environnementale produit

Il s'agit d'un document marketing visant à communiquer un nombre important d'informations environnementales, sur les outils et actions mis en place par l'entreprise à chacune des étapes du cycle de vie du produit. Ce document vise à communiquer une partie des résultats de l'ACV à l'aide d'IPE. Il s'agit ici de sensibiliser le client et de l'aider à faire un choix informé entre plusieurs solutions, en prenant en compte notamment l'aspect environnemental.

## 3. Sensibilisation à l'écoconception et à l'analyse du cycle de vie (formation)

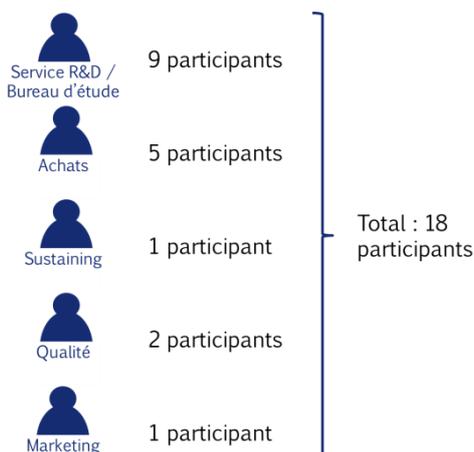
Il s'agit d'une formation permettant de sensibiliser différents services de l'entreprise à l'écoconception/ACV. Cette formation a pour but d'aider à l'utilisation des IPE et de donner des pistes de réflexion pour atteindre les valeurs cibles. Ces services sont en lien direct avec le développement de produits et les acteurs détenant des informations utiles pour la réalisation des ACV.

Le programme de la formation sur 2 fois 2 demi-journées (figure 55) consistait en une première demi-journée pour présenter les concepts généraux et la démarche d'écoconception. La seconde demi-journée a été consacrée à la mise en place de la démarche dans l'entreprise avec comme cas d'étude un des produits de l'entreprise. Un exercice simple d'évaluation environnementale et de recherche de solutions avait été proposé entre les 2 demi-journées pour inciter les participants à se questionner sur leurs besoins et les difficultés qu'ils pourraient rencontrer pour évaluer les IPE et atteindre les valeurs cibles.



**Figure [55]** Programme de la formation en écoconception/ACV

Cette formation a permis de former 18 personnes de l'entreprise de différents services : R&D, bureau d'études, achats, sustaining, qualité et marketing. La figure 56 donne la répartition du nombre de participants par service.



**Figure [56]** Répartition des employés des différents services sensibilisés à l'écoconception/ACV

À la suite de cette formation, un retour a été demandé aux participants afin d'avoir leur ressenti sur le contenu, ce que leur a apporté la formation et comment ils pourraient l'intégrer dans leur travail quotidien. Ce questionnaire était basé sur la base du volontariat, le taux de réponse est de 7/18. Ce taux de réponse étant faible, les résultats suivants sont à titre informatif. Ils ne peuvent pas être statistiques. Le détail des résultats est présenté dans l'annexe 3.

- Les employés sont satisfaits de la présentation, voire très satisfaits.
- Ils trouvent que le sujet est pertinent pour leur travail.
- Ils pensent qu'il est nécessaire d'avoir plus d'exemples concrets appliqués à l'entreprise (ils doivent être intégrés dans le guide à destination des concepteurs).

- Ils pensent que la mise en place de l'écoconception/ACV nécessite d'avoir une base de données précise d'informations, notamment pour les évaluations environnementales.

Ce dernier point montre l'intérêt à utiliser les IPE pour la collecte d'informations.

#### **4. Standard de travail pour les concepteurs, règles d'écoconception**

Ce standard de travail est un guide d'exigences imposées aux concepteurs pour intégrer l'écoconception. Il s'agit d'un complément aux exigences de la brique « design for sustainability » déjà intégrée dans le processus de développement de produits par les preneurs de décisions, mais qui n'est pas connue des acteurs internes de l'entreprise. Il reprend également une partie des exigences demandées aux fournisseurs. Il donne des indications d'écoconception spécifiques à l'entreprise pour améliorer les IPE définis précédemment.

L'entreprise dispose déjà de guides destinés aux concepteurs avec des exigences à respecter, notamment pour l'ergonomie, la sécurité, etc. Ce guide est réalisé dans le même format.

#### **5. Base de données structurée des composants**

Il s'agit d'une base de données regroupant tous les composants contenus dans tous les produits de l'entreprise. Cette base de données regroupe environ 5 000 composants. Elle a pour objectif d'identifier :

- quels sont les composants directement achetés auprès des fournisseurs et ceux conçus par l'entreprise et fabriqués par les fournisseurs ? ;
- si les composants sont mono-matériau ou multi-matériaux ;
- quels sont les composants pour lesquels il est nécessaire de collecter des informations en dehors de l'entreprise.

La collecte des informations peut être faite par une entreprise externe. L'objectif final est d'avoir une base de données avec tous les composants et toutes les informations nécessaires pour réaliser une ACV. Cela permet aussi d'évaluer les IPE liés à la composition matière et d'échanger avec les fournisseurs pour collecter des informations.

#### **6. Guide démantèlement pour les unités de réfrigération en fin de vie**

Il s'agit d'un guide visant à donner des informations générales pour le démantèlement et le traitement en fin de vie de nos produits, et de s'assurer que tous les composants et les substances sont traités de manière adéquate dans le respect de l'environnement et de la santé humaine. Ce manuel reste général. Cela permet de laisser une certaine flexibilité aux opérateurs de la fin de vie dans l'application de leur propre méthode de travail.

L'entreprise a peu d'informations et de suivi sur la fin de vie de ses produits une fois ceux-ci sur le marché secondaire, et il n'existe pas de filière de fin de vie dédiée. Un guide de recommandation est donc la méthode la plus simple pour donner de l'information au plus grand panel d'utilisateurs possible.

Il vise à donner des indications générales sur la composition des unités de réfrigération, des instructions sur la possibilité de retourner certains composants tels que les moteurs, compresseurs et cartes électroniques qui font partie d'un programme de remanufacturing direct avec les fournisseurs de l'entreprise. Il donne également des instructions sur la gestion des substances dangereuses et le désassemblage des principaux groupes fonctionnels.

Ce guide est inspiré de l'existant notamment le guide de démantèlement de Volvo Truck (Volvo Truck Corporation, 2012).

## 7. Démonstrateur Excel de diagnostic et de suivi de l'usage en fonction des comportements de l'utilisateur

La phase d'usage et les comportements des utilisateurs sont primordiaux, au vu de l'analyse de la première étape. Un focus est donc porté sur la stratégie visant à inciter à une éco-utilisation des produits. L'entreprise souhaite améliorer la performance environnementale de ses produits, mais aussi accompagner ses clients dans un objectif gagnant-gagnant pour l'entreprise et ses clients. Cet outil est défini en détail dans le chapitre suivant.

## 8. Bilan

Plusieurs outils d'écoconception ont été développés pour créer une boîte à outils. Cette boîte à outils permet à l'entreprise de mettre en place une démarche d'écoconception dans son développement de produits et améliorer la performance environnementale de ses produits sur tout le cycle de vie.

Elle se compose :

- d'une base de données d'IPE et de stratégies d'écoconception ;
- d'un guide d'exigences à fournir à ses fournisseurs et un document standard de collecte de données ;
- d'un standard de travail pour les services R&D et le bureau d'études fixant des exigences d'écoconception à respecter ;
- d'une fiche de communication environnementale sur les produits ;
- de supports de sensibilisation/formation à l'écoconception et l'ACV ;
- de trois rapports d'ACV sur 3 produits de la gamme des semi-remorques pour servir de base aux évolutions des produits. La définition d'IPE en accord avec les résultats des ACV et leur suivi permettra de s'assurer du non-transfert de pollution ;
- d'une base de données structurée des composants et les besoins en informations nécessaires pour évaluer les produits ;

- d'un guide de démantèlement à destination des clients et des acteurs de la filière de fin de vie ;
- d'une base de données de mesures expérimentales sur le comportement en utilisation des produits ;
- d'une base de données (construite au fur et à mesure à l'aide des déclarations clients) sur l'usage réel de ses produits.

## Chapitre 10. Vers une éco-utilisation des produits

L'analyse du cycle de vie réalisée avec des scénarios moyens et l'état des lieux réalisés à l'étape 1 nous montrent que la phase d'utilisation est le principal aspect environnemental des produits étudiés et plus particulièrement les comportements des utilisateurs. Ces comportements sont les réglages de la température, du mode de fonctionnement, les pratiques lors du chargement/déchargement, mais également les opérations de maintenance.

Les objectifs pour l'entreprise sont :

- de définir un outil de suivi des pratiques d'utilisation des clients à l'aide des IPE définis précédemment ;
- d'établir un diagnostic personnalisé des pratiques d'utilisation à chacun des clients ;
- de pouvoir justifier de bonnes pratiques recommandées par l'entreprise en matière de bénéfices environnementaux ;
- de suivre l'évolution des impacts lors de la modification des pratiques ;
- de servir de retour pour améliorer le produit dès la phase de conception ;
- d'avoir un avantage concurrentiel dans un objectif gagnant-gagnant pour l'entreprise et le client.

Afin de mettre en place une démarche d'éco-utilisation auprès des clients/utilisateurs, un démonstrateur a été créé (sous Excel) et permet de réaliser un diagnostic personnalisé de l'usage et des propositions d'amélioration sur les comportements, mais aussi sur les produits. Il s'agit dans un premier temps de collecter de l'information, de faire une évaluation de la situation puis des propositions d'amélioration et de suivre l'évolution de l'impact environnemental du client à la suite des changements de comportements. Concrètement, un outil a été développé qui consiste à partir de déclarations du client sur ses activités et les comportements de ses utilisateurs à évaluer des IPE et positionner l'usage du client par rapport à l'utilisation optimale et non optimale. Il s'agit ensuite d'évaluer les gains pouvant être réalisés à partir de recommandations d'usage personnalisées sur le comportement et sur le produit.



### 1. Collecte d'informations sur l'usage

Afin d'établir un diagnostic personnalisé, il est nécessaire de collecter un certain nombre d'informations de la part du client sur ses utilisateurs et leurs comportements, mais aussi que l'entreprise collecte des informations sur le fonctionnement des unités de réfrigération.

Dans un premier temps, nous avons collecté des données sur les fonctionnements des unités de réfrigération. Ces données ont été collectées sur 9 pratiques d'utilisations identifiées au préalable.

Afin d'évaluer les IPE définis pour l'utilisateur, il a été nécessaire d'obtenir des informations sur la consommation d'énergie, les modes de fonctionnement du moteur, les heures de fonctionnement du moteur et le nombre de dégivrages. Après analyse des avantages et des inconvénients (tableau 21) des différentes sources pour collecter ces données. Nous avons décidé de les collecter par des expérimentations en extérieur. Elles ont l'avantage de permettre d'obtenir des données proches de la réalité de la manière la plus simple. Ce choix a été conforté par les mesures réalisées par Bagheri et al. (2017). Ils ont réalisé des expérimentations en extérieur avec des cycles de livraison par expérimentation et les ont ensuite validées avec des simulations numériques. Les comportements des utilisateurs n'étaient pas simulés.

**Tableau [21]** Avantages et inconvénients des sources de données pour la collecte des données sur les fonctionnements des unités de réfrigération

Sources de données	Avantages	Inconvénients
Données en temps réel (instrumentation chez le client)	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Représentatif de vraies conditions d'usage</li> <li>+ Collecte de données sur une période longue</li> <li>+ Représentativité des conditions climatiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessite l'accord du client pour faire des tests destructifs ou mettant en péril la chaîne du froid</li> <li>- Difficultés pour la mise en place et la réalisation de certains tests</li> <li>- Non répétable</li> </ul>
Expérimentation à l'extérieur	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Représentativité des conditions climatiques</li> <li>+ Possibilité de simuler des tests destructifs</li> <li>+ Pas de contrainte de durée des tests</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficilement répétable à cause des variations climatiques</li> <li>- À réitérer 2 fois (été, hiver) pour voir l'influence de la température extérieure</li> <li>- Peut différer de la réalité (chargement caisse, durée de fonctionnement...)</li> <li>- Difficilement répétable</li> </ul>
Expérimentation en tunnel	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Répétable</li> <li>+ Possibilité de réitérer les essais et de les dupliquer sur d'autres groupes</li> <li>+ Adaptabilité</li> <li>+ Possibilité de simuler des tests destructifs</li> <li>+ Contrôle de l'environnement extérieur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disponibilité des tunnels pour une période permettant de réaliser tous les tests (disponibilité courte des tunnels mais tests longs)</li> <li>- Peut différer de la réalité (charge caisse, durée de fonctionnement, variabilité climatique...)</li> <li>- Coût</li> </ul>
Simulation numérique	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Possibilité de simuler une infinité de scénarios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Connaissances des modèles mathématiques</li> </ul>
Analyse de la littérature	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Obtention rapide de certaines données</li> <li>+ Validation scientifique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de données sur les pratiques d'utilisation</li> <li>- Manque d'informations sur les conditions d'obtention des données</li> </ul>

### a. Collecte de données expérimentales

Nous avons simulé des pratiques d'utilisation. Cela a consisté à reproduire le comportement optimal et le comportement le moins optimal. Ces mesures sur ces pratiques d'utilisation permettent de construire une base de données de références sur différents aspects liés à diverses pratiques d'utilisation. Cette base de données permettra d'alimenter la partie diagnostic faite à l'utilisateur.

Les essais ont été réalisés en partenariats avec la société Dekra. Cette société est notamment spécialisée dans les mesures de consommation énergétique des véhicules. Les essais ont été réalisés à Narbonne en octobre et novembre. Cette localisation a été choisie pour son taux de pluviométrie faible et sa température relativement constante à cette période de l'année.

De nombreuses contraintes ont été associées à la réalisation de ces essais.

- La difficulté d'avoir un environnement extérieur stable. En raison de la durée des essais et du budget alloué, la solution du tunnel n'a pas été retenue. Les tests ont eu lieu en extérieur, donc sans contrôle des conditions climatiques. Pour tenter de remédier aux incertitudes engendrées, les tests des comportements optimaux et non optimaux ont été réalisés en parallèle avec 2 semi-remorques similaires.
- La période, en raison de la nécessité de louer deux semi-remorques avec des caisses et des unités de réfrigération quasi jumelles. Les essais ont été réalisés en octobre 2016 au lieu de juillet/août comme cela était prévu. Cela implique que les consommations énergétiques et les potentiels effets sur la chaîne du froid mesurés sont moins importants.
- La durée et le budget alloué. Les tests réalisés sont des tests longs en raison de l'inertie thermique et coûteux. Pour assurer un minimum de répétabilité, chaque test a été répété deux fois dans des conditions climatiques similaires.

Les essais ont consisté en l'analyse de 9 comportements. Ces comportements intègrent les recommandations d'usage émises par l'entreprise et l'analyse des pratiques d'utilisation (une tournée avec un client en condition réelle a été réalisée). Ils influent tous sur la consommation d'énergie entre autres, le bruit, la chaîne du froid. Certains de ces comportements ne sont pas directement liés à l'utilisation de l'unité de réfrigération, mais au système complet (par exemple l'utilisation de rideaux), cependant ils doivent être considérés, car ils influent sur la consommation d'énergie de l'unité de réfrigération.

La plupart des 9 comportements ont été mesurés une première fois pour des produits frais et une seconde fois pour des produits surgelés. Le tableau 22 présente les différents essais réalisés. Plus de détails sur le déroulement des essais et leur réalisation sont disponibles dans l'annexe 4. Chaque test (9 comportements sur chaque type de produit) a été répété deux fois pour la fiabilité des mesures en inversant à chaque fois les systèmes de réfrigération pour la bonne et la mauvaise pratique, sauf pour le test 5 qui a été réalisé deux fois sans inverser les pratiques à cause d'un équipement (rideau) disponible que sur une seule semi-remorque. Le rideau n'a pas été utilisé pour les autres tests. Pour des raisons budgétaires, les tests n'ont pas pu être répétés plus de 2

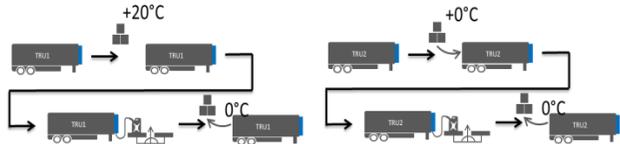
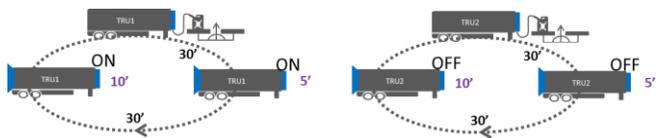
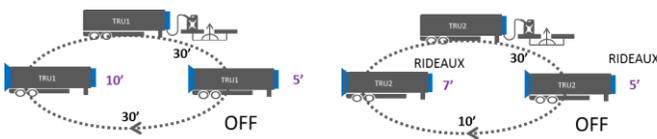
fois pour s'assurer de la reproductivité des mesures. Au final, ce sont 32 tests qui ont été réalisés.

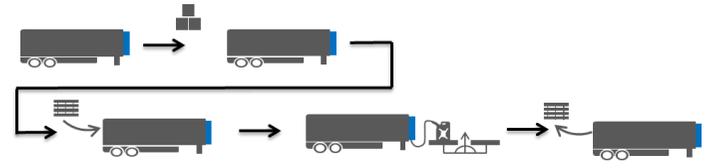
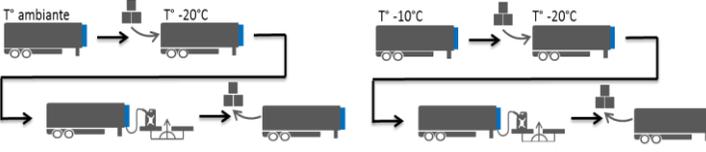
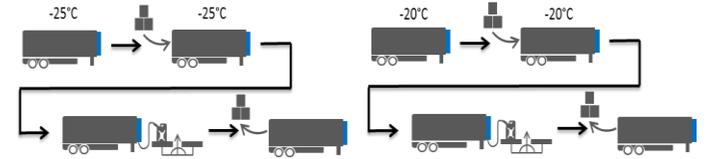
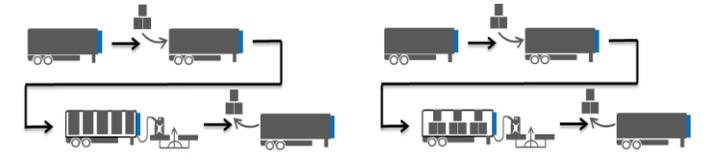
Lors de ces essais, plusieurs mesures ont été réalisées (un exemple des résultats est disponible dans l'annexe 5). Le détail de la réalisation des mesures est disponible dans l'annexe 4.

- La mesure de la consommation énergétique (diesel et électrique). Deux outils de mesure ont été utilisés pour la mesure de consommation de diesel : un débitmètre par unité de réfrigération et la pesée en début et fin de test pour vérification. Pour la mesure de la consommation électrique, une pince ampèremétrique a été utilisée.
- La collecte des modes de fonctionnement moteur. Ils sont enregistrés dans la mémoire de l'unité de réfrigération.
- Les temps de fonctionnement de l'unité de réfrigération.
- Les températures intérieures et extérieures sur la surface de la caisse.
- Le nombre de dégivrages.
- La température ambiante extérieure et l'hygrométrie.
- La température à l'intérieur du chargement à l'avant et l'arrière de la caisse.
- La température au niveau de l'évaporateur à l'aide d'une sonde à inertie installée et la mesure de retour d'air au niveau de l'évaporateur enregistré par l'unité de réfrigération.

Ces mesures servent à calculer les IPE à destination du client pour son diagnostic.

Tableau [22] Liste des comportements analysés par les expérimentations

#	Essai		
1	Mode carburant VS secteur	Lors des stationnements longs, il est recommandé aux utilisateurs d'utiliser l'électricité comme source d'énergie pour le groupe froid. Ce test a pour but de montrer le bénéfice environnemental de l'énergie électrique.	
2	Mode start/stop VS continu	Le mode continu est conseillé pour les produits sensibles, le mode start/stop pour les autres cf. page 129. Ce test a pour but d'évaluer la différence de consommation pour ces différents modes d'utilisation. Il permettra aussi de montrer l'impact sur la qualité de la chaîne du froid.	
3	Chargement des produits à une température différente de la température de consigne	Ce test est réalisé uniquement en frais. Ce cas peut se présenter lorsque des produits sont chargés à la sortie du champ (melon par exemple) directement dans un camion réfrigéré. Ce test a pour but d'estimer la surconsommation énergétique et la défaillance de la chaîne du froid lors d'un chargement à mauvaise température.	
4	Unité de réfrigération en fonctionnement (ON) ou non (OFF) lors de l'ouverture des portes	Il est recommandé d'éteindre l'unité de réfrigération lors de l'ouverture des portes. Ce test a pour but de montrer que le mode ON n'est pas obligatoire pour le maintien de la chaîne du froid, et la surconsommation engendrée.	
5	Utilisation d'un rideau VS pas de rideau	L'utilisation de rideaux est conseillée pour limiter l'entrée d'air chaud dans la caisse lors de l'ouverture des portes. Ce test a pour but de chiffrer les bénéfices (énergétiques et thermiques) de l'utilisation d'un rideau.	

6	Utilisation de paroi amovible VS pas de paroi amovible	<p>L'utilisation d'une paroi amovible permet de réduire le volume à réfrigérer. Les parois servent aussi de séparation lors du chargement de produits à température ambiante comme des palettes vides.</p> <p>Ce test a pour but de montrer les bénéfices énergétiques possibles en équipant la caisse.</p>	
7	Prérefroidissement avant le chargement VS pas de prérefroidissement	<p>Le prérefroidissement est recommandé avant le chargement pour limiter les risques sur la chaîne du froid.</p> <p>Ce test a pour but de montrer la nécessité du prérefroidissement pour le maintien de la chaîne du froid même s'il induit une consommation énergétique supplémentaire au préalable.</p>	
8	Réglage du point de consigne inférieur à la température recommandée VS réglage du point de consigne à la température recommandée	<p>Ce test est réalisé uniquement pour les produits surgelés.</p> <p>Certains clients pour s'assurer une bonne température dans la caisse règlent le point de consigne à une température inférieure.</p> <p>Ce test a pour but de montrer que ce réglage engendre une surconsommation énergétique sans réels bénéfices sur le maintien de la chaîne du froid</p>	
9	Chargement bloquant le flux d'air VS chargement optimal	<p>Il est recommandé de laisser l'air circuler dans la caisse. Bloquer le flux d'air peut causer une défaillance au niveau de la chaîne du froid particulièrement pour les produits chargés au fond de la caisse.</p> <p>Ce test a pour but de montrer la surconsommation (besoin de dégivrages) et l'impact sur la qualité de la chaîne du froid lors d'un mauvais chargement.</p>	

## b. Déclarations du client

Une fois que nous avons des informations sur le fonctionnement de nos unités de réfrigération en utilisation, nous pouvons évaluer l'usage du client par rapport à ces données de référence (diagnostic). Dans un premier temps, le client doit répondre ou donner un certain nombre d'informations sur son type d'activité (le type d'unité de réfrigération actuellement utilisée, le cycle de livraison, les produits transportés, les heures travaillées, etc.), puis dans un second temps répondre à une série de questions sur ses comportements. Ce questionnaire est soit rempli directement par le client, soit avec un commercial de l'entreprise.

**Carrier Transicold**

### Describe your own business:

Choose your model of refrigeration unit:  *Please select a model of unit*

Select the sound level of refrigeration unit:  Standard  Low Noise *Please specify sound type*

In which country do you operate?  *Please select a country in the list*

Describe the climate of operation:

Warm	<input type="checkbox"/>	%
Temperate	<input type="checkbox"/>	%
Cold	<input type="checkbox"/>	%
Total	0	%

*Please fill the hatched cells with your percentage breakdown - Attention total must be equal to 100%.*

Which kind of product do you transport?

Fresh not sensitive	<input type="checkbox"/>	%
Fresh sensitive	<input type="checkbox"/>	%
Frozen	<input type="checkbox"/>	%
Dry	<input type="checkbox"/>	%
Total	0	%

*Please fill the hatched cells with your percentage breakdown - Attention total must be equal to 100%.*

Describe your business:

Long haul international	<input type="checkbox"/>	%
Long haul national	<input type="checkbox"/>	%
Urban distribution	<input type="checkbox"/>	%
Total	0	%

*Please fill the hatched cells with your percentage breakdown - Attention total must be equal to 100%.*

You can modify the distribution scenarios by clicking on the details button **Details**

Do you make night delivery?  Yes  No

Do you make multi temperature delivery?  Yes  No

What is the lifetime of your product?  Years *You can use the average value: 12 years*

How many days per year the product is running?  Days/yr *You can use the average value: 360 days/yr*

Hours per year the product is running:  Hrs/year

Hours per year the unit is working while the vehicle is parked:  Hrs/year

Which kind of energy do you use when the vehicle is parked?

Diesel mode	<input checked="" type="checkbox"/>	%
Standby mode (electric energy)	<input type="checkbox"/>	%
	0.0	Hrs
	0.0	Hrs

*Please fill the hatched cells with your percentage breakdown - Attention total must be equal to 100%.*

Others assumptions: Fuel cost  1.45 €/L *You can change the value if necessary*

**Next Step** **Reset**

[www.carriertransicold.eu](http://www.carriertransicold.eu)

Figure [57] Déclarations du client sur son type d'activité

La figure 57 donne un aperçu des informations que doit déclarer le client sur son type d'activité. Ces informations sont multiples.

1. Le modèle d'unité de réfrigération actuellement utilisé ou envisagé à l'achat. Cette information nous permettra ensuite de nous assurer que le produit sélectionné correspond le mieux au type d'activité du client. Dans cette version de l'outil, seuls les produits de la gamme des semi-remorques sont disponibles

car il s'agit du cas d'étude. À terme, tous les produits de l'entreprise seront intégrés.

2. Le niveau de bruit de l'unité de réfrigération. Deux types sont proposés par l'entreprise, cette information nous permettra aussi ensuite de nous assurer de l'adéquation produit/activités et également de calculer le niveau de bruit dans le diagnostic. Cet aspect de l'utilisation est important pour les clients.
3. Le pays où le client fait la majorité de son activité et le climat dans lequel il travaille. Ces informations nous permettent d'ajuster les émissions liées à la consommation d'énergie.
4. Les produits transportés (frais non sensibles, frais sensibles, surgelés, secs). Le type de produit nous permet de calculer les consommations énergétiques et les heures de fonctionnement à partir des tests expérimentaux.
5. Le type de cycle de livraison (longue distance internationale, longue distance nationale, distribution urbaine). Des cycles sont prédéfinis dans l'outil, mais l'utilisateur a la possibilité de modifier la durée de chaque phase (figure 58). Les cycles de livraison nous servent à calculer l'énergie, les heures de fonctionnement et le bruit.
6. La réalisation de livraison de nuit ou non et la réalisation de livraison en multi-températures. Ces données nous permettent de définir l'adéquation du produit avec les activités du client.
7. La durée de vie moyenne de l'unité de réfrigération que le client utilise (uniquement la première vie) ainsi que le nombre de jours par an travaillés, afin de faire un diagnostic sur toute une utilisation. Le nombre d'heures par an en fonctionnement et le nombre d'heures par an en fonctionnement en stationnement de longue durée sont déterminés de manière automatique à l'aide de la description des cycles de livraison (point 5).
8. Le type d'énergie utilisée lorsque le véhicule est en stationnement long et le coût moyen de l'énergie diesel. Cela permet d'avoir une première réponse à un comportement et sert au calcul des indicateurs lors du diagnostic.

**Carrier**  
TRANSCOLD  
Solid Technologies

### Define your distribution:

You can modify all the light green cells

#### International long haul

Departure | Arrival

Pulldown | Loading | Refrigeration running hours | Unloading

hours of use: 1 | 0.5 | 18 | 0.5 *please modify the number of hours*

Duration vehicle parked: 8 while the refrigeration system is running

#### National long haul

Departure | Arrival

Pulldown | Loading | Refrigeration running hours | Unloading

hours of use: 1 | 0.5 | 8 | 0.5 *please modify the number of hours*

Duration vehicle parked: 0 while the refrigeration system is running

#### Urban distribution

Departure | Arrival

Pulldown | Loading | Freeway | Cycles | Freeway | Unloading

hours of use: 1 | 0.5 | 0.5 | 8 | 0.5 | 0 *please modify the number of hours*

Number of delivery: 12 *please modify the number of delivery and the duration*

Duration of delivery: 10 minutes

Unit works on freeway return?  Yes  No *please select yes or no*

**Go back** **Reset**

[www.carriertranscold.eu](http://www.carriertranscold.eu)

Figure [58] Cycles de livraison prédéfinis dans l'outil

Une fois les informations sur les activités du client renseignées, il doit répondre à une série de questions sur les comportements des utilisateurs (figure 59). Le client peut répondre :

- par « oui », ce qui signifie qu'il réalise une bonne pratique ;
- par « non », ce qui signifie qu'il réalise une mauvaise pratique ;
- par « cela dépend », ici le client doit indiquer le pourcentage moyen de cas où la réponse est non.

Il y a une exception, pour une des questions, la réponse doit être une température.

Ces questions ont été définies pour couvrir toute la série de comportements identifiés comme non optimaux lors de l'usage des produits et utilisés pour les tests expérimentaux.

## Analysis of your own usage:

If the answer is "it depends", please indicate the percent of cases when the answer will be "no"

When it is possible (especially for frozen product or non sensitive fresh product) do you use the Start/stop mode?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No <input type="radio"/> It depends	<input type="checkbox"/> %
Do you perform proper precooling before loading the box?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No <input type="radio"/> It depends	<input type="checkbox"/> %
In case of frozen product what is your set point?	<input type="checkbox"/> °C	
When doors are open, do you switch off the unit?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No <input type="radio"/> It depends	<input type="checkbox"/> %
Do you use a doors sensor to automatically switch off the unit ?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No	
Is your box equipped with curtain (plastic curtain or air curtain)?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No	
Do you use a partition wall to reduce refrigerated compartment size when possible and separate refrigerated load to dry load (including returnable packages)?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No <input type="radio"/> It depends	<input type="checkbox"/> %
When you load the box, are you always sure that the product is at the right temperature? (especially in the case of field products)	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No <input type="radio"/> It depends	<input type="checkbox"/> %
Do you perform proper check-up service in time ?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No	

Go back

Your results

Reset

[www.carriertransicold.eu](http://www.carriertransicold.eu)

Figure [59] Questionnaire sur les comportements de l'utilisateur

Ces questions sont les suivantes.

- Lorsque cela est possible (spécialement pour les produits surgelés, frais non sensibles et secs) utilisez-vous le mode start/stop ? Ces produits peuvent supporter une légère variation de température d'où la recommandation du mode start/stop pour économiser de l'énergie.
- Réalisez-vous un prérefroidissement de la caisse avant le chargement ? Il peut arriver que la marchandise soit chargée directement dans la caisse qui se trouve être à température ambiante ce qui provoque un échange de chaleur et de l'humidité.
- Quel est le réglage du point de consigne pour les produits surgelés ? Il peut arriver que pour s'assurer du maintien de la chaîne du froid des clients règlent une température de consigne inférieure à ce qui est recommandé.
- Lors de l'ouverture des portes, arrêtez-vous l'unité de réfrigération ? Êtes-vous équipé avec un capteur de porte pour couper automatiquement l'unité de réfrigération lors de l'ouverture des portes ? L'ouverture des portes entraîne une entrée d'air chaud et d'humidité, le fonctionnement du groupe à ce moment-là peut générer des dégivrages supplémentaires et une augmentation de la consommation énergétique pour maintenir la température souhaitée.
- La caisse est-elle équipée d'un rideau (d'air ou à lanière) au niveau des portes ? L'utilisation d'un rideau permet de retarder l'entrée d'air chaud et limiter l'évaporation de l'air frais pendant quelques minutes.
- Utilisez-vous une paroi amovible pour réduire le volume à transporter et séparer les éléments secs de la marchandise, par exemple lors du chargement

d'emballages retournables ? Cette recommandation s'applique surtout à la distribution urbaine avec plusieurs points de livraison.

- Lorsque vous chargez la caisse, êtes-vous toujours sûr que la marchandise est à la bonne température ? Cette pratique s'applique surtout dans les cas où la marchandise vient de l'agriculture. Les produits peuvent parfois être directement chargés du champ dans la caisse isotherme sans étape de réfrigération au préalable. Cela entraîne une surconsommation d'énergie pour atteindre la température de consigne du fait du dégagement de chaleur.
- Réalisez-vous les opérations de maintenance et de contrôle à intervalles réguliers comme recommandé par l'entreprise ? Cette pratique permet de s'assurer de la performance énergétique de l'unité de réfrigération.

À partir de ces déclarations du client, nous allons calculer le jeu d'IPE défini précédemment pour l'acteur client/utilisateur (cf. page 151) dans la méthode de sélection des IPE.

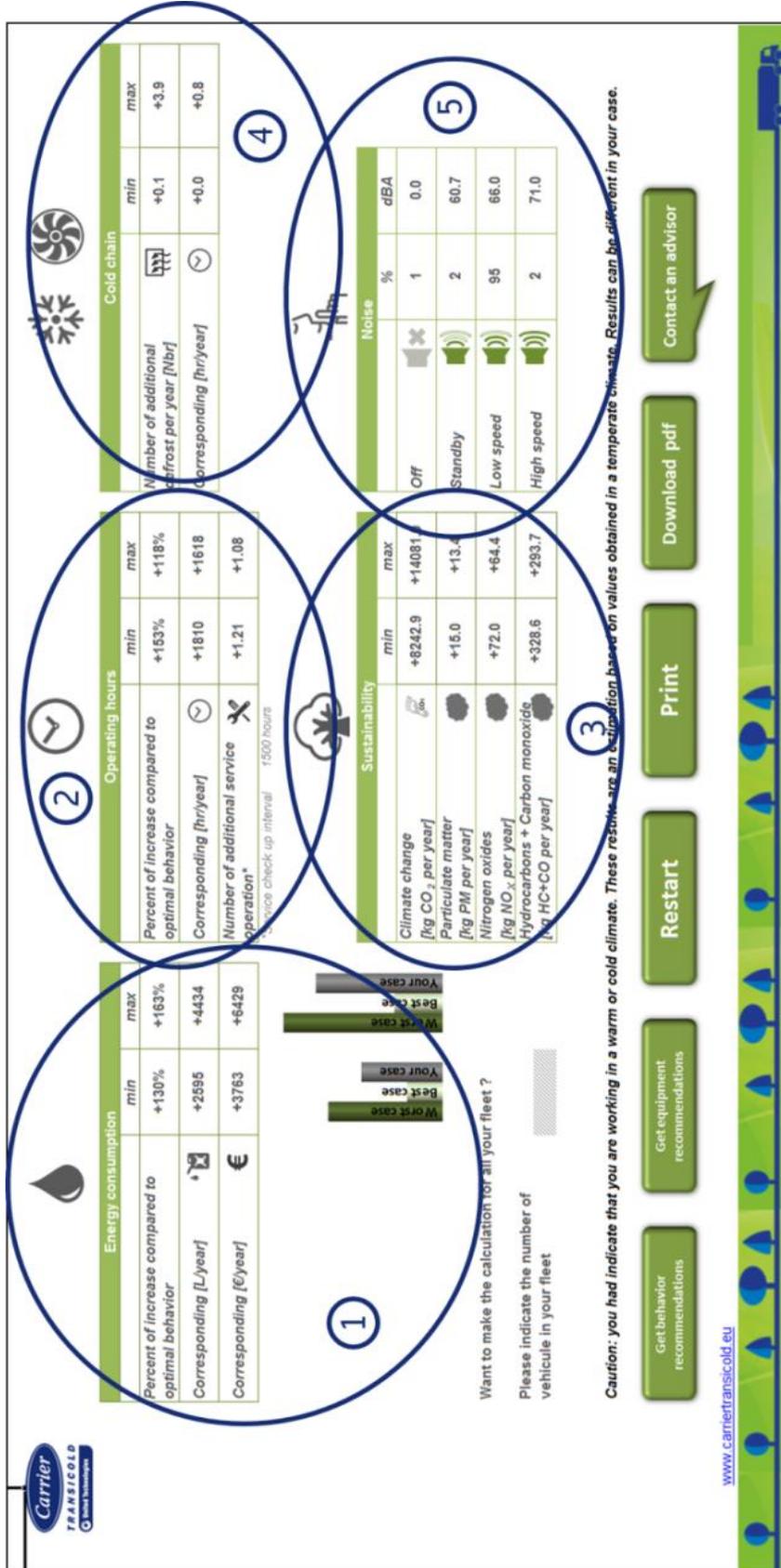
## 2. Diagnostic personnalisé

À partir des réponses des déclarations du client et en corrélation avec les mesures expérimentales, le diagnostic est réalisé. Il consiste à calculer les gains potentiels que le client pourrait réaliser en ayant un comportement optimal. Il se base sur l'estimation des résultats pour le cas spécifique du client et sa position entre le cas le plus favorable et le cas le plus défavorable, afin de mesurer les gains potentiels. Il s'agit d'évaluer l'augmentation des IPE par rapport au cas le plus optimal.

Cinq aspects ont été considérés et illustrés pour le client, chacun de ces aspects est décomposé de plusieurs IPE (figure 60).

1. La consommation de carburant se décompose en 3 IPE : % de surconsommation potentielle par rapport au comportement idéal ; le nombre de litres de diesel équivalents ; le coût correspondant en euros.
2. Le nombre d'heures de fonctionnement se décompose en 3 IPE : % d'heures de fonctionnement supplémentaires potentielles par rapport au comportement idéal ; le nombre d'heures équivalentes par an ; le nombre d'opérations de service (maintenance) supplémentaires par an.
3. Les impacts environnementaux se décomposent en 4 IPE : le changement climatique (kg CO<sub>2</sub> eq par an) ; les émissions de particules fines (kg PM par an), les émissions d'oxydes d'azote (kg de NO<sub>x</sub> par an), les émissions d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone (kg HC + CO par an). Toutes ces mesures sont calculées en émissions potentielles supplémentaires par an par rapport au comportement optimal.

Figure [60] Exemple de diagnostic personnalisé



4. La chaîne du froid se décompose en 2 IPE : le nombre additionnel de dégivrages supplémentaires par an ; le nombre d'heures de fonctionnement par an correspondant.
5. Le bruit se décompose en 2 IPE : le pourcentage de temps par mode de fonctionnement du moteur ; les décibels équivalant à chaque mode.

Les formules de calcul des différents IPE sont définies dans l'annexe 6. Les valeurs données sont une fourchette avec un minimum et un maximum par manque de répétabilité des mesures. Il ne serait pas juste de donner une valeur précise en raison des conditions extérieures dynamiques d'utilisation qui influe sur le système.

Il est ensuite possible de calculer les résultats des IPE pour une flotte complète et/ou toute la durée de vie du produit.

Étant donné que les tests ont été réalisés dans un climat continental, un message d'avertissement est affiché si le client a déclaré opérer dans un climat froid ou chaud.

L'objectif futur est de compléter les données sur le fonctionnement produit pour calculer les IPE dans d'autres conditions extérieures et pour d'autres produits afin de fournir un diagnostic plus précis. Il s'agit d'une des limites du diagnostic actuel. Cela permet aussi aux équipes de développement de produits d'en apprendre plus sur le fonctionnement de l'unité de réfrigération.



### 3. Proposition d'amélioration comportement et/ou produit

Une fois le diagnostic effectué, deux options sont possibles : obtenir des recommandations sur le comportement et/ou des recommandations sur l'unité de réfrigération à utiliser pour répondre au mieux aux besoins du client (prenant en compte les contraintes liées à ses activités).

#### a. Recommandations sur le comportement

Les recommandations sur le comportement sont déterminées à partir des déclarations clients. Il s'agit d'une liste de recommandations expliquant les bénéfices potentiels pouvant être réalisés si cette recommandation est utilisée. Le client peut sélectionner les recommandations qu'il souhaite appliquer. La figure 61 donne la liste des recommandations pour le comportement et un exemple du détail d'une recommandation pour le choix du mode d'utilisation.



### Recommendations for sustainable behaviors

- Use the start/stop mode for frozen and no sensitive products
- Perform a precooling before loading
- Set the temperature at the optimal temperature for the cold chain integrity as recommended in the following table

#### Frozen product

-25°C	Liver and liver serum
-18°C	Deep frozen product
-18°C	Fishery product
-14°C	Duller and edible fats, including serum to be used for butter making
-12°C	Egg product, offal, rabbit, poultry and game
-18°C	Meat

#### Chilled products

-2°C	Fresh fish (in ice), sea larvae and shellfish (excluding live oyster)
-3°C	Cooked dishes and prepared foods, poultry carcasses, fresh pastries, cereal dishes and egg product
-3°C	Meat and cooked animal pre-packaged for consumer use
-3°C	Offal
-3°C	Poultry, rabbit and game
-4°C	Non-sterilized, unacidified, unpasteurized or fermented milk, fresh serum, milk, cheese and yeast
-5°C	Milk for industrial processing
-5°C	Cooked animal other than those which have been killed, smoked, dried or sterilized
-5°C	Chilled eggs in their shells
-5°C	Duller, seal or blue cheese
-7°C	Meat

#### Without prior chilling

-4/5°C	Fresh fruit and vegetables
-4/5°C	Flourish
-2/3°C	Dishes
-18°C	Non-sterilized animal fats other than butter
-18°C	Prepared or smoked cheese

This above information is given for reference purposes only, and may be overridden at the transporter or the consignee's advice. More detailed information may be obtained from your Carrier Transcold distributor

- Turn off the unit while doors openings
- Use doors sensors to turn off automatically the unit while doors openings
- Use curtains while doors openings
- Use partition wall to reduce refrigerated volume or separate refrigerated product from returnable packaging
- Be sure that the product is at the right temperature before loading (especially for field products)
- Respect check up service intervals

Want more details, click on the corresponding picture



### Operating mode ✕

For no sensitive product, you can use start/stop operation mode of your refrigeration unit instead of continuous run. In continuous run the unit runs all the time to reach and maintain a precise temperature. In this mode the temperature and air flow are permanently maintained. This results in higher energy consumption. In start/stop mode, the unit will run until it reaches the pre-defined temperature, then it will turn off. An inadequate end-user choice, use of continuous run instead of start/stop when it is possible, can lead to overconsumption of energy. It has been shown that for a storage at the setting temperature of -20°C, the use of the start/stop mode can reduce the energy consumption and environmental footprint (kg CO2 eq) up to 50% compared with continuous run and reduce operating time and particulate matter emission up to 70%. And for a storage à 0°C, the use of the start/stop mode can reduce the energy consumption and environmental footprint (kg CO2 eq) up to 72% compared with continuous run and reduce operating time and particulate matter emission up to 85%.\*

\*Disclaimer : These results have been obtained in specific condition of tests realized by a third-party company. They have been obtained when simulating usage behavior with a Vector 1950MT unit. They give an indication of potential saving, but cannot be directly used to your own usage.

Figure [61] Exemple de recommandations sur le comportement de l'utilisateur

## b. Recommandations sur l'unité de réfrigération

La recommandation sur l'unité de réfrigération à utiliser est, elle aussi, déterminée à partir des déclarations clients. À l'aide d'un algorithme simple (logique en si alors) et les informations sur l'utilité des différents produits de la gamme, il est possible de déterminer l'unité de réfrigération la plus adéquate (voir annexe 7 pour les logiques de définition de la meilleure unité de réfrigération).

Plusieurs informations sont reportées afin de déterminer si l'adéquation entre le produit choisi et les activités du client est bonne (figure 62).

1. Le type d'unité de réfrigération actuellement utilisée et l'option du niveau sonore.
2. Le ou les cycles de livraison les plus représentatifs.
3. Le ou les types de produits les plus transportés.
4. Si le client fait des livraisons de nuit ou non.
5. Si le client fait des livraisons en multi-températures ou non.

Le résultat est déterminé à partir des informations définies en 2, 3, 4 et 5. Dans l'exemple présenté en figure 62, le produit initialement sélectionné/utilisé par le client ne correspond pas totalement à son type d'activité. Il correspond pour le type de cycle de livraison, le type de produit et la non-utilisation en multi-températures, mais la réalisation des livraisons de nuit fait ressortir que le choix de la version city avec un niveau sonore plus faible de cette unité de réfrigération correspond mieux à ses besoins.

**Carrier Transicold**

### Recommendations for equipment selection

Your actual refrigeration unit type: **Vector 1550** Low Noise

Analysis of your needs from your previous answers :

Type of distribution	Long haul distribution and Urban distribution Few or frequent door openings
Type of product	Fresh not sensitive, Fresh sensitive, Frozen and Dry products
Night delivery	Yes
Multi-temperature	No

Recommended refrigeration unit for your case:

**Vector 1550 city**

Résultat de la meilleure unité de réfrigération à utiliser

Get behavior recommendations | Go Back to results | Print | Download pdf | Contact an advisor

www.carriertransicold.eu

Figure [62] Exemple de recommandation adéquation produit/usage

## 4. Évaluation et suivi des améliorations

Cette étape fait suite à la sélection de recommandations d'amélioration du comportement par le client. Il s'agit ici de calculer les gains potentiels par rapport à son comportement actuel sur une année de fonctionnement avec les mêmes IPE que

précédemment, en fonction de s'il applique ou non les recommandations. Les mêmes formules (annexe 6) sont appliquées, puis la différence est faite entre l'évaluation précédente et la nouvelle évaluation. À l'aide de ce diagnostic, nous donnons des recommandations au client, c'est à lui ensuite de se charger que ses utilisateurs appliquent les recommandations pour ensuite permettre d'évaluer les gains obtenus.



## 5. Retours sur l'utilisation aux concepteurs

L'analyse des unités de réfrigération à l'aide des expérimentations (mode de fonctionnement moteur, variation des températures) et des comportements de l'utilisateur permettent d'agir directement sur le design même du produit et le software permettant de régler les dégivrages, les modes de fonctionnement moteur, etc.

Ces données permettent de construire une base de données sur l'utilisation réelle des produits et de réaliser une analyse statistique pour déterminer les usages les plus présents et notamment les mauvais comportements. La conception pourra alors agir pour empêcher les mauvais comportements les plus fréquents. Il s'agit ici d'utiliser les stratégies de fonctionnalité forcées, design intelligent et correspondance des fonctions. Le client n'aura plus d'influence directe sur l'amélioration de la performance environnementale en utilisation.

Les retours ne sont pas aujourd'hui disponibles pour mettre en place des modifications au niveau du produit.

## 6. Avantage concurrentiel

Un des objectifs de l'entreprise en plus d'utiliser les IPE pour instaurer une démarche d'écoconception est la volonté de prendre un avantage concurrentiel dans un objectif gagnant-gagnant pour elle et ses clients. Dans sa stratégie d'augmenter sa valeur, l'entreprise propose donc à ses clients un service unique d'accompagnement dans une démarche d'éco-utilisation. L'entreprise peut commercialiser ce service à deux niveaux, un premier niveau de diagnostic puis un second niveau d'accompagnement. Ici, l'entreprise facture ce nouveau service à son client (augmentation des profits) tout en veillant à s'assurer que le coût total de possession n'augmente pas de manière significative pour le client. Le client paye un service supplémentaire, mais ce service lui permet de réduire ses coûts de possession en utilisation (coût de l'énergie, de la maintenance, etc.) tout en améliorant son image de marque. Pour rappel, le coût de possession peut se calculer à l'aide du coût d'achat, du coût de l'énergie, du coût des maintenances/réparation et des coûts des services associés. L'entreprise, elle augmente sa valeur tout en améliorant la performance environnementale de ses produits et son image de marque.

L'outil de diagnostic n'a pas pu être testé et commercialisé pour le moment pour permettre de calculer des retours sur l'avantage concurrentiel (prix du service par rapport au prix de possession pour le client).

## 7. Bilan de la mise en place de l'éco-utilisation

La mise en place de la stratégie d'éco-utilisation a donné lieu à la création d'un démonstrateur Excel de diagnostic de l'utilisation pour accompagner les clients. Ce démonstrateur est opérationnel et permet à l'aide d'un tableau de bord d'évaluer les IPE spécifiques de l'acteur client/utilisateur. Il permet également de donner des recommandations d'usage sur le comportement et sur l'adéquation entre le produit et les activités du client. L'outil permet également de suivre les gains obtenus à la suite de la mise en place des recommandations.

Nous n'avons pas pu tester le démonstrateur chez des clients pour nous assurer que les recommandations d'usage sont prises en compte grâce aux IPE, obtenir des informations pour modifier la conception du produit, et faire une étude sur l'avantage concurrentiel.

# CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES



# CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

## Apports de la thèse

Dans ces travaux de thèse, nous avons mis en lien les Indicateurs de Performance Environnementale (IPE) avec la mise en place de stratégies d'écoconception et plus particulièrement la mise en place de stratégies d'éco-utilisation. Ces travaux ont répondu à la problématique principale : *comment l'analyse des performances environnementales, au travers de la chaîne de valeur, peut-elle influencer la conception, et inciter aux bonnes pratiques d'utilisation des produits ?* Nous avons développé une méthode outillée que nous avons testée sur un cas d'étude industriel.

Cette thèse a notamment permis de mettre en place une méthode de sélection des IPE dont la particularité est de prendre en compte les besoins des différents acteurs de la chaîne de valeur, internes et externes à l'entreprise. Elle a permis de répondre à la première problématique sous-jacente : *comment sélectionner des IPE pour suivre l'évolution des performances environnementales en prenant en compte les acteurs de la chaîne de valeur ?*

Une fois ces IPE sélectionnés, il a fallu les exploiter dans une démarche d'écoconception et notamment dans une démarche d'éco-utilisation pour répondre à la seconde problématique sous-jacente : *comment exploiter les IPE en écoconception et inciter à « éco-utilisation » (une utilisation éco-responsable) des produits et servir d'avantage concurrentiel pour l'entreprise ?*

Les travaux menés ont permis, au travers du cas d'étude, d'apporter une vision en BtoB (entreprise vers entreprise) de l'éco-utilisation, les travaux existants étant le plus souvent orientés en BtoC (entreprise vers consommateurs). Cela implique de raisonner différemment dans l'analyse des comportements utilisateurs et leurs motivations. Les outils et stratégies à mettre en place peuvent aussi être différents. Ces travaux ont permis de montrer comment il était possible d'amener l'utilisateur à avoir un comportement éco-responsable tout en permettant à l'entreprise d'augmenter sa valeur en proposant notamment un service d'accompagnement dans un objectif gagnant-gagnant pour les deux parties.

D'un point de vue purement pratique, ces travaux ont permis de développer des outils pour l'entreprise Carrier Transicold, pour l'aider à améliorer la performance environnementale de ses produits tout au long du cycle de vie.

### ***Méthode de sélection des IPE prenant en compte les besoins de la chaîne de valeur***

Ces travaux ont donné lieu à une méthode de sélection des IPE prenant en compte les besoins des différents acteurs de la chaîne de valeur pour mieux les intégrer dans une démarche d'écoconception globale. Cette méthode repose sur 5 étapes qui sont :

- 1) un état des lieux du contexte environnemental du produit et de l'entreprise ;
- 2) une identification des acteurs de la chaîne de valeur importants ;
- 3) une analyse de leurs besoins ;

- 4) une sélection de jeux d'IPE spécifique pour chaque acteur ;
- 5) une sélection de 2 jeux d'IPE globaux pour tous les acteurs de la chaîne de valeur.

Les étapes 1 et 5 sont partiellement basées sur les méthodes de sélection existantes qui consistent à avoir une analyse environnementale du produit pour en définir un jeu d'IPE global. Nous avons complété les méthodes de sélection des IPE existantes avec une sélection intermédiaire de jeux d'IPE spécifiques à chaque acteur de la chaîne de valeur important pour l'amélioration de la performance environnementale et avec deux jeux d'IPE globaux ayant chacun une finalité différente.

Une base de données d'IPE et un outil de sélection combinant les 3 aspects que sont les acteurs, leurs besoins et les objectifs environnementaux ont été créés pour simplifier la sélection des jeux d'IPE. Cette base de données peut s'appliquer pour la sélection des IPE spécifiques et des IPE globaux.

### ***Mise en place d'une démarche d'écoconception avec un focus sur l'utilisation***

Une méthode d'analyse de l'usage et d'accompagnement de l'utilisateur a été mise en place avec pour objectif d'aider l'utilisateur à améliorer la performance environnementale tout en permettant à l'entreprise de prendre un avantage concurrentiel. Il s'agit d'une méthode de diagnostic et de recommandations en 2 étapes : 1) la première étape consiste à collecter de l'information sur l'usage. Plusieurs sources de données peuvent être utilisées en fonction des attentes et des moyens à disposition. 2) Après la collecte, il faut évaluer l'impact des comportements à l'aide des IPE et identifier les leviers d'actions. Une série de recommandations peut être proposée en assurant un suivi des IPE. Les recommandations concernent le comportement, mais aussi l'adéquation produit utilisé/activité du client. Une gamme de produits peut être composée de plusieurs produits similaires, mais répondants à des activités différentes. Il s'agit donc de proposer des stratégies où le client/utilisateur est maître de son comportement et doit l'adapter pour améliorer la performance environnementale. En complément, les informations d'usage, de comportement et de performance des systèmes sont aussi collectées pour agir directement sur la conception du produit et ses fonctionnalités.

Pour ces produits dont la phase d'usage est la principale source d'impacts environnementaux, l'usage doit être intégré tout au long de la chaîne de valeur (cycle de vie) au travers de plusieurs leviers et outils qui font le lien entre l'entreprise et les autres acteurs de la chaîne de valeur, dont les utilisateurs. Cela est dans l'optique d'améliorer la performance environnementale globale de cette phase. L'entreprise, mettant le produit sur le marché, a un rôle central à jouer.

### ***Apports pour l'entreprise***

En pratique, pour l'entreprise partenaire dans ces travaux, cela s'est traduit par un état des lieux du contexte environnemental de l'entreprise et de ses produits, la mise en place d'outils simples d'écoconception pour améliorer la performance environnementale sur tout le cycle de vie et la réalisation d'un outil (démonstrateur Excel) permettant de réaliser un diagnostic personnalisé de l'usage de ses clients et de donner des recommandations pour une bonne utilisation. La prise en compte de l'utilisation pour les

produits de l'entreprise et l'échange d'informations permettent de s'intégrer dans les démarches existantes visant à réduire les impacts environnementaux du transport routier du type de la charte CO<sub>2</sub> de l'ADEME ou encore des propositions d'écoconduite des constructeurs de véhicules lourds.

## Perspectives

### *Pistes d'amélioration méthodologiques*

Plusieurs améliorations liées au développement des méthodes peuvent être identifiées.

La première amélioration possible concerne la méthode de sélection des IPE. Cette méthode permet de mieux définir les IPE en fonction des besoins des acteurs et ainsi contribuer à ce qu'ils soient utilisés de manière plus efficace. Elle repose sur la construction d'une base de données et d'un outil permettant de simplifier la sélection, mais la construction de la base de données nécessite d'être validée par des experts pour l'attribution des acteurs et intérêts à chaque IPE. Autre point, la gestion du multicritère reste à approfondir, que ce soit au niveau des jeux spécifiques à chaque acteur ou des jeux globaux. Cela est d'autant plus vrai pour le niveau global où différents acteurs peuvent avoir des objectifs différents et donc la volonté de favoriser un IPE plutôt qu'un autre. Il est également nécessaire d'approfondir la corrélation des IPE et les développements mathématiques à mettre en place. Un autre aspect qu'il sera intéressant de développer est les moyens de motivation pour impliquer les différents acteurs dans la démarche d'écoconception. On sait que la personnalisation des outils est un levier intéressant, mais cela est-il suffisant, notamment pour les acteurs externes à l'entreprise.

La seconde amélioration possible concerne le périmètre de l'étude. Nous nous sommes intéressés aux produits consommateurs d'énergie et nous nous sommes concentrés sur la phase d'utilisation. Il aurait été intéressant d'étendre à toutes les étapes du cycle de vie et d'approfondir les moyens pouvant être mis en place pour améliorer la performance globale. L'aspect particulier du cas d'étude s'intégrant avec un autre produit pour remplir sa fonction est un aspect qu'il serait intéressant d'approfondir. Il faudrait analyser la possibilité d'une collaboration étroite entre les fournisseurs, l'entreprise et les intégrateurs, tout comme l'action sur le comportement du client/utilisateur, lorsque celui-ci doit choisir quoi faire de son produit en fin de vie.

Cette analyse reste centrée sur les produits en BtoB pour la proposition d'une méthode d'induction d'un comportement éco-responsable. Il est possible de se poser la question suivante : « cette proposition de diagnostic personnalisé est-elle envisageable à plus grande échelle ? Est-elle envisageable à l'échelle des consommateurs grand public ? » Ces utilisateurs peuvent avoir des motivations plus basées sur l'affecté dans leur choix de consommation et leur comportement, les moyens à mettre en œuvre peuvent donc être différents.

### *Pistes d'amélioration pour l'application au cas d'étude*

Une des améliorations concerne la mise en place du diagnostic client/utilisateur et les retours sur son efficacité. Bien que l'outil ait été développé, il n'a pas pu être testé durant cette thèse, pour des raisons de timing et de stratégie de l'entreprise, sur des clients en réel pour observer les changements effectifs de comportement, ou non, et les retours en matière de gains environnementaux et économiques que ce soit pour le client ou pour l'entreprise. Le retour aux concepteurs sur les usages est également encore insuffisant pour mettre en œuvre de réelles stratégies d'éco-utilisation directement pilotées par le produit.

Les tests expérimentaux ont été réalisés à l'extérieur à l'automne. Bien que les tests aient été réalisés à Narbonne pour son climat favorable même en automne et un taux de pluviométrie parmi les plus bas de France, il serait intéressant de réaliser une seconde série de tests en été pour confirmer l'influence du climat extérieur. Aussi, les tests ont été réalisés sur un seul produit de la gamme, il serait intéressant d'étendre ces tests aux autres produits de la gamme et aux autres gammes de produits de l'entreprise.

Il en va de même pour les outils d'écoconception pour lesquels le recul n'est pas suffisant pour permettre d'avoir un retour sur leur utilisation et leur efficacité.

Nous n'avons pas pu aller jusqu'à la prise de décision pour les IPE des autres acteurs et la mise en place de solutions. Nous n'avons pas non plus appliqué le multicritère.

#### ***Prise en compte de toute la chaîne de valeur***

Ces travaux se concentrent sur la phase d'utilisation des produits et plus particulièrement le comportement des utilisateurs. Afin d'améliorer de manière globale la performance environnementale du produit sur tout le cycle de vie, il serait intéressant d'intégrer toute la chaîne de valeur et tous les acteurs. Cela peut notamment se faire au travers de l'amélioration technologique du produit suite à l'analyse des comportements (implication des concepteurs, ingénieurs de recherche), de l'amélioration de la performance environnementale par l'innovation en partenariat avec les fournisseurs, mais aussi avec les acteurs fabricants les autres parties du système complet, et la maîtrise de la fin de vie. On pourra ainsi aller plus loin et intégrer ce diagnostic à une application pour smartphone afin de rendre l'éco-utilisation encore plus directe.

#### ***Internet of things (l'internet des objets)***

Nous avons vu que les données collectées pour l'application au cas d'étude sont des données expérimentales, mais que la meilleure solution serait de collecter des données en temps réel. On pourrait ainsi développer le diagnostic et le suivi pour chaque utilisateur, chaque véhicule de la flotte et ainsi pousser la démarche d'éco-utilisation à un niveau supérieur. On pourrait aider le client à challenger ses utilisateurs pour qu'ils changent leur comportement d'utilisation. Cela nécessiterait d'instrumenter tous les équipements et de repenser leur développement pour intégrer ce service personnalisé en temps réel.

#### ***Vers un nouveau business model pour l'entreprise***

Comme nous l'avons vu, l'entreprise souhaite pouvoir accompagner ses clients pour améliorer la performance environnementale de leur activité. Mais, une des problématiques de l'entreprise et de ses produits et la non-maîtrise de la fin de vie de ceux-ci. En effet une fois les produits vendus, le client nouveau propriétaire revend dans la majorité des cas le produit sur le marché de l'occasion, Carrier Transicold perd alors le suivi de ses produits et ne contrôle pas le traitement en fin de vie. Cela est d'autant plus vrai qu'il n'y a pas de filière de fin de vie pour ce type de produit. Ces deux aspects combinés nous amènent à réfléchir à un nouveau business model basé sur l'économie de la fonctionnalité.

Avec l'économie de la fonctionnalité, il serait envisageable que l'entreprise puisse inciter à un comportement éco-responsable en gardant le contrôle sur la majorité des opérations de la phase d'utilisation, notamment les opérations de maintenance, les réparations, mais aussi sur la fin de vie en restant propriétaire des produits et en s'assurant de leur traitement en fin de vie.

L'entreprise était déjà dans une stratégie de vente d'un produit avec un service, notamment un contrat de maintenance. Dans ces travaux de thèse, nous proposons de mettre en œuvre une solution complémentaire de l'économie de fonctionnalité où l'entreprise vend un produit et un service lié à l'utilisation. Ces deux stratégies sont orientées produit et sont complémentaires. Mais, l'entreprise n'a pas de réel moyen pour maîtriser la fin de vie étant donné qu'elle n'est plus propriétaire du produit. Il pourrait alors être judicieux de passer à un niveau supérieur où l'entreprise met à disposition du client son produit et ses services en restant propriétaire de celui-ci. Elle peut par exemple proposer de vendre du froid. Il y a déjà des exemples d'entreprises ayant mis en place ce système et dont le business model est une réussite, on peut par exemple citer Xerox (location du matériel d'impression, vente d'un nombre d'impressions et non plus de la machine), Michelin (ne vend plus des pneus, mais un service de kilomètres parcourus pour les camions), les constructeurs automobiles (Renault, Peugeot, etc.) qui eux proposent des véhicules en leasing avec des contrats de service, etc.

Dans notre cas, les produits de l'entreprise ne remplissent pas seuls leur fonction et la performance environnementale est directement liée aux autres éléments que sont la caisse isotherme et pour certains systèmes le véhicule. Cela peut être un frein au déploiement de l'économie de la fonctionnalité. Il n'y a pas « d'architecte » global chargé de combiner les différentes parties et de s'assurer de la performance environnementale globale du système complet et qui vend la solution sous une marque propre. Cela questionne sur les liens à créer avec certains acteurs de la chaîne de valeur que sont les intégrateurs, les fabricants de la caisse et du véhicule et les acteurs des filières de fin de vie. Une analyse de la valeur devra être effectuée ainsi qu'une réflexion sur l'organisation des centres de services et de l'offre. Il est important de se questionner aussi sur la valeur pour l'entreprise et les autres partenaires au travers d'une analyse de la valeur et comment cela peut être partagé.



# BIBLIOGRAPHIE

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abrahamse, W., Steg, L., Vlek, C. & Rothengatter, T., 2005. A review of intervention studies aimed at household energy conservation. *Journal of Environmental Psychology*, Volume 25, pp. 273-291.

ADEME, 2012a. Fiches actions Charte Objectifs CO2. Transport routier de marchandises. Fiche n°10 : Température dirigée : choix du système de production de froid. *Objectifs CO2 les transporteurs s'engagent*, pp. 83-108.

ADEME, 2012b. Guide général de la démarche objectif CO2. *Objectif CO2 les transporteurs s'engagent*.

Alwaer, H. & Clements-Croome, D., 2010. Key performance indicators (KPIs) and priority setting in using the multi-attribute approach for assessing sustainable intelligent buildings. *Building and Environment*, Volume 45, pp. 799-807.

Andriankaja, H., Vallet, F., Le Duigou, J. & Eynard, B., 2015. A method to ecodesign structural parts in the transport sector based on product life cycle management. *Journal of cleaner production*, Volume 94, pp. 165-176.

Aschehoug, S. H., Boks, C. & Storen, S., 2012. Environmental information from stakeholder supporting product development. *Journal of Cleaner Production*, Volume 31, pp. 1-13.

Azzone, G. & Giuliano, N., 1996. Defining environmental performance indicators: an integrated framework. *Business strategy and the environment*, Volume 5, pp. 60-80.

Bagheri, F., Fayazbakhsh, M. & Bahrami, M., 2017. Real-time performance evaluation and potential GHG reduction in refrigerated trailers. *International Journal of Refrigeration*, Volume 73, pp. 24-38.

Bana E Costa, C. A., De corte, J.-M. & Vansnick, J.-c., 2012. Macbeth. *International journal of information technology & descision making*, 11(02), pp. 359-387.

Barnabe, F. & Bensafi, A., 2007. *LCA of a transport refrigeration unit and development of an HVAC&R equipment ecodesign tool*. Beijing, International Congress of Refrigeration.

Barnabe, F., Khalifa, K. & Malek, A., 2003. *Life cycle analysis: First stage in the development of new-eco-tools for air conditioning systems designers*. Washington, D.C., International Congress of Refrigeration.

Barnitt, R. et al., 2009. *Emissions of transport refrigeration units with CARB Diesel, Gas-to-liquid Diesel, and Emissions Control Devices*. San Antonio, Texas, SAE Powertrain, Fuels, and Lubricants Meeting.

Baumann, H., Boons, F. & Bragd, A., 2002. Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. *Journal of Cleaner Production*, Volume 10, pp. 409-425.

Belletire, S., St. Pierre, L. & White, P., 2014. *Okala, the ecodesign strategy wheel*. s.l.:Okala.

- Benoit, V. & Rousseaux, P., 2003. Aid for Aggregating the Impacts in Life Cycle Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(2), pp. 74-82.
- Bhamra, T., Lilley, D. & Tang, T., 2011. Design for sustainable behaviour: using products to change consumer behaviour. *The Design Journal*, 14(4), pp. 427-445.
- Bhander, G. S., Hauschild, M. & McAloone, T., 2003. Implementing life cycle assessment in product development. *Environmental Progress*, 22(4), pp. 255-267.
- BMW, 1999. *Specification "Environmental Compatibility of BMX Products" - Ecodesign Interactive Tool*. s.l.:s.n.
- Bockstaller, C. & Girardin, P., 2003. How to validate environmental indicators. *Agricultural systems*, Volume 76, pp. 639-653.
- Borlein, C., 2010. *Economie d'énergie dans les centrales frigorifiques : la haute pression flottante*. *White Paper*, Rueil Malmaison: Schneider Electric.
- Bovea, M., Cabello, R. & Querol, D., 2007. Comparative life cycle assessment of commonly used refrigerants in commercial refrigeration systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5), pp. 299-307.
- Bovea, M. & Perez-Belis, V., 2012. A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. *Journal of Cleaner Production*, Volume 20, pp. 61-71.
- Brans, J. & Vincke, P., 1985. A preference ranking organisation method: (The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making). *Management Science*, 31(6), pp. 647-656.
- Brezet, H. & Van Hemel, C., 1997. *Ecodesign: A promising approach to sustainable production and consumption*. Paris: UNEP.
- Buchholz, T., Rametsteiner, E., Volk, T. A. & Luzadis, V. A., 2009. Multi Criteria Analysis for bioenergy systems assessments. *Energy Policy*, Volume 37, pp. 484-495.
- Caeiro, S., Ramos, T. B. & Huisingh, D., 2012. Procedures and criteria to develop and evaluate household sustainable consumption indicators. *Journal of Cleaner Production*, Volume 27, pp. 72-91.
- Calm, J., 2002. Emissions and environmental impacts from air conditioning and refrigeration systems. *International journal of refrigeration*, 25(3), pp. 293-305.
- Carrier Transicold, 2017. *Truck / Trailer Refrigeration Europe - Trailer refrigeration units*. [En ligne] Available at: <http://www.carrier.com/truck-trailer/en/eu/products/eu-truck-trailer/trailer/> [Accès le 20 Septembre 2017].
- Cavalier, G. & Stumpf, A., 2010. *Measurement and simulation of energy consumption of transport refrigerated equipment*. Cambridge, s.n.
- Cerdan, C. et al., 2009. Proposal for new quantitative eco-design indicators: a first case study. *Journal of Cleaner Production*, Volume 17, pp. 1638-1643.
- Chatzidakis, S. & Chatzidakis, K., 2004. Refrigerated transport and environment. *Int. J. Energy Res.*, Volume 28, pp. 887-897.

- Ciantar, C. & Hadfield, M., 2000. An environmental evaluation of mechanical systems using environmentally acceptable refrigerants. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(4), pp. 209-220.
- Cinelli, M., Coles, S. R. & Kirwan, K., 2014. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological indicators*, Volume 46, pp. 138-148.
- Cloquell-Ballester, V.-A., Cloquell-Ballester, V.-A., Monterde-Diaz, R. & Santamarina-Siurana, M.-C., 2006. Indicators validation for the improvement of environmental and social impact quantitative assessment. *Environmental impact assessment review*, Volume 26, pp. 79-105.
- Cluzel, F., 2012. *Eco-design implementation for complex industrial system: From scenario-based LCA to the definition of an eco-innovation R&D projects portfolio*, s.l.: s.n.
- Communities and local government, 2009. *Multi-criteria analysis: a manual*, London: Communities and local government Publications.
- Cor, E. & Zwolinski, P., 2014. *A procedure to define the best design intervention strategy on a product for a sustainable behavior of the user*. s.l., Procedia CIRP, pp. 425-430.
- Coulomb, D., 2008. Refrigeration and cold chain serving the global food industry and creating a better future: two key IIR challenges for improved health and environment. *Trends in Food Science & Technology*, Volume 19, pp. 413-417.
- Crul, M. & Diehl, J., 2006. *Design for sustainability a practical approach for developing economies, DAS*, s.l.: s.n.
- Daae, J. & Boks, C., 2015. A classification of user research methods for design for sustainable behaviour. *Journal of cleaner production*, Volume 106, pp. 680-689.
- Dekoninck, E. A. et al., 2016. Defining the challenges for ecodesign implementation in companies: development and consolidation of a framework. *Journal of Cleaner Production*, Volume 135, pp. 410-425.
- Dewulf, W. & Duflou, J., 2003. *Simplifying LCA using Indicator approaches - A framework*. Copenhagen, Denmark, s.n.
- Diakaki, C., Grigoroudis, E. & Stabouli, M., 2006. A risk assessment approach in selecting environmental performance indicators. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 17(2), pp. 126-139.
- Directive 2009/125/CE, s.d. *Du parlement européen et du conseil du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie (refonte)*. s.l.:s.n.
- Domingues, A. R. et al., 2015. Applying Multi-Criteria Decision Analysis to the Life-Cycle Assessment of vehicles. *Journal of Cleaner Production*, Volume 107, pp. 749-759.
- Donnelly, A., Jones, M., O'Mahony, T. & Byrne, G., 2006. Decision-support framework for establishing objectives, targets and indicators for use in strategic environmental assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 24(2), pp. 151-157.

- Donnelly, A., Jones, M., O'Mahony, T. & Byrne, G., 2007. Selecting environmental indicator for use in strategic environmental assessment. *Environmental impact assessment review*, Volume 27, pp. 161-175.
- Ducoulombier, M., Sartre, V. & Bonjour, J., 2011. *Experimental investigation of the infiltration heat load during the opening of a refrigerated truck body*. Prague, s.n.
- Eberle, R. & Franz, H., 1998. Modelling the use phase of passenger cars in LCI. *SAE Tech Paper*.
- Ecoinvent centre, 1998. *Ecoinvent*. [En ligne] Available at: <https://ecoquery.ecoinvent.org> [Accès le 10 juin 2016].
- Egebark, J. & Ekström, M., 2013. Can indifference make the world greener ?. *IFN Work paper*.
- Egede, P., Dettmer, T., Herrmann, C. & Kara, S., 2015. Life cycle assessment of electric vehicles - A framework to consider influencing factors. *Procedia CIRP - The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering*, Volume 29, pp. 233-238.
- European Commission, Joint Research Centre & Institute for Environment and Sustainability, 2010. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance..* First edition éd. Luxembourg: Publications of the European Union .
- Fasse, A. C., Grote, U. & Winter, E., 2011. Recent developments in applying environmental value chain analysis. *Environmental Economics*, 2(3), pp. 74-86.
- Figueira, J. R., Greco, S., Roy, B. & Slowinski, R., 2013. An overview of ELECTRE Methods and their recent extensions. *Journal of Multi-criteria decision analysis*, Volume 20, pp. 61-85.
- Fitzgerald, W., Howitt, O., Smith, I. & Hume, A., 2011. Energy use of intergral refrigerated containers in maritime transportation. *Energy policy*, Volume 39, pp. 1885-1896.
- Forbes Pearson, S., 2003. *How to improve energy efficiency in refrigerating equipment, 17th informatory note on refrigeration technologies.*, Paris: International Institute of Refrigeration.
- Forster, P. et al., 2007. *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Frischknecht, R., 1999. *Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel. Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen.*, Bern: Bundesamt für Energie.
- Giarlotta, A., 2001. Multicriteria compensability analysis. *European Journal of Operational Research*, Volume 133, pp. 190-209.
- Goffin, K., Lemke, F. & Szwejczewski, M., 2006. An exploratory study of the "close" supplier-manufacturer relationships.. *Journal of Operation Management*, Volume 24, pp. 189-209.

- Grant, R. M., 2010. *Contemporary strategy analysis*. 7ème éd. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Green, M. G. et al., 2006. Frontier design: a product usage context method. *ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Volume 4a: 18th International Conference on Design Theory and Methodology, pp. 99-113.
- Gwanpua, S. et al., 2015. The FRISBEE tool, a software for optimising the trade-off between food quality, energy use, and global warming impact of cold chains. *Journal of Food Engineering*, Volume 148, pp. 2-12.
- Handfield, R., Walton, S. V., Sroufe, R. & Melnyk, S. A., 2002. Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the Analytical Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, Volume 141, pp. 70-87.
- Heap, R., 2003. *Refrigerated transport: progress achieved and challenges to be met*. 16th informatory note on refrigerating technology, Paris: International Institut of Refrigeration.
- He, L., Chen, W., Hoyle, C. & Yannou, B., 2012. Choice modeling for usage context-based design. *Journal of Mechanical Design, American Society of Mechanical Engineers*, 134(3), pp. 1-26.
- Hellweg, S. & Mila i Canals, L., 2014. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Sciences*, 344(6188), pp. 1109-1113.
- Hermann, B., Kroeze, C. & Jawjit, W., 2007. Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators. *Journal of Cleaner Production*, Volume 15, pp. 1787-1796.
- Hertwich, E. G., 2005. Consumption and the rebound effect. An industrial ecology perspective. *Journal of industrial ecology*, 9(1-2), pp. 85-98.
- Herva, M. & Roca, E., 2013. Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. *Journal of Cleaner production*, Volume 39, pp. 355-371.
- Heslouin, C. et al., 2016. Effects of product usage scenarios on environmental performance for road transport refrigeration units. *Proceeding 4th International Conference on Sustainability and the Cold Chain*, p. 8.
- He, Y., Lai, K., Sun, H. & Chen, Y., 2014. The impact of supplier integration on customer integration and new product performance: The mediating role of manufacturing flexibility under trust theory. *International Journal Production Economics*, Volume 147, pp. 260-270.
- Huang, H., Zhang, L., Liu, Z. & Sutherland, J. W., 2011. Multi-criteria decision making and uncertainty analysis for materials selection in environmentally conscious design. *Int J adv Manuf Technol*, Volume 52, pp. 421-432.
- Huang, I. B., Keisler, J. & Linkov, I., 2011. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the total environment*, 409(19), pp. 3578-3594.

Humphreys, P., Wong, Y. & Chan, F., 2003. Integrating environmental criteria into the supplier selection process. *Journal of materials processing technology*, Volume 138, pp. 349-356.

IACACT, 2016. *External communication*. [En ligne] Available at: [www.iacact.com/?q=intcomm](http://www.iacact.com/?q=intcomm) [Accès le 12 Janvier 2018].

Ilinitch, A. Y., Soderstrom, N. S. & Thomas, T. E., 1998. Measuring corporate environmental performance. *Journal of Accounting and Public Policy*, Volume 17, pp. 383-408.

International Institute of Refrigeration, 2009. *The role of refrigeration in worldwide nutrition. 5th informatory note on refrigeration and food*, Paris: International Institute of Refrigeration.

ISO 14031, 2013. *Management environnemental - Evaluation de la performance environnementale - lignes directrices*. s.l.:s.n.

ISO 14040, 2006. *Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre*. s.l.:s.n.

ISO 14044, 2006. *Management environnemental - Analyse du cycle de vie - exigences et lignes directrices*. s.l.:s.n.

ISO 14062, 2002. *Management environnemental - Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit*, s.l.: s.n.

ISO 9001, 2015. *Systèmes de management de la qualité - Exigences*. s.l.:s.n.

ISO 9241-210, 2011. *Ergonomie de l'interaction homme-système Partie 210 : Conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs*. s.l.:s.n.

Issa, I. I., Pigosso, D. C., McAlloone, T. C. & Rozenfeld, H., 2015. Leading product-related environmental performance indicators: a selection guide and database. *Journal of Cleaner Production*, Volume 108, pp. 321-330.

James, S. & James, C., 2010. The food cold-chain and climate change. *Food Research International*, Volume 43, pp. 1944-1956.

Janicot, L., 2007/1. Les systèmes d'indicateurs de performance environnementale (IPE), entre communication et contrôle. *Comptabilité - Contrôle - Audit*, Volume 13, pp. 47-67.

Janin, M., 2000. *Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus*. Thèse en Sciences de l'ingénieur: Arts et Métiers ParisTech.

Jasch, C., 2000. Environmental performance evaluation and indicators. *Journal of Cleaner Production*, Volume 8, pp. 79-88.

Jeong, I.-T. & Lee, K.-M., 2009. Assessment of the ecodesign improvement options using the global warming and economic performance indicators. *Journal of Cleaner production*, Volume 17, pp. 1206-1213.

Jevons, W., 1866. *The coal question: An inquiry Concerning the progress of the Nation, and the Probably Exhaustion of our Coal-mines*. London: Macmillan and Co.

Johansson, G., 2002. Success factors for integration of ecodesign in product development: A review of state of the art. *Environmental Management and Health*, 13(1), pp. 98-107.

Johansson, G. & Magnusson, T., 2006. Organising for environmental considerations in complex product development projects: implications from introducing a "Green" sub-project. *Journal of Cleaner Production*, Volume 14, pp. 1368-1376.

Johnson, S. D., 1998. Identification and selection of environmental performance indicators: application of the balanced scorecard approach.. *Corporate Environmental Strategy*, 5(4), pp. 34-41.

Journal officiel de l'Union Européenne, 2003. *Recommandation de la commission du 10 juillet 2003*. s.l.:s.n.

JRC, 2014. *Ecodesign for Commercial Refrigeration. Preparatory study update final report*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Kaplinsky, R. & Morris, M., 2002. *A handbook for value chain research*, s.l.: IDRC.

Kaulio, M., 1998. Customer, consumer and user involvement in product development: A framework and a review of selected methods. *Total Quality Management*, 9(1), pp. 141-149.

Kinderyte, L., 2010. Methodology of sustainability indicators determination for enterprise assessment. *Environmental Research, Engineering and Management*, 2(52), pp. 25-31.

Klößner, C. A. & Blöbaum, A., 2010. A comprehensive action determination model: Toward a broader understanding of ecological behaviour using the example of travel mode choice. *Journal of environmental psychology*, Volume 30, pp. 574-586.

Knight, P. & Jenkins, J. O., 2009. Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective. *Journal of cleaner production*, Volume 17, pp. 549-558.

Ko, N. et al., 2016. Assessment of a product's life cycle resource efficiency by combining LCA and PLM in the product development. *Procedia CIRP. 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016)*, Volume 57, pp. 669-673.

Koskijoki, M., 1997. 'My favourite things. In Van Hinte, E. Eternally Yours: Visions on Product Endurance. pp. 132-143.

Kruse, H., Jakobs, R. & Riva, M., 2006. European Supermarket Refrigeration Systems Eco-Efficiency considerations. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, p. Paper 738.

Kujak, S., Srichai, P. & Schultz, K., 2014. Assessment of Life Cycle Climate Performance (LCCP) tools for HVAC&R applications with the latest next generation refrigerant technology. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, p. Paper 1442.

Lilley, D. & Lofthouse, V., 2009. Sustainable design education - considering design for behavioural change. *Engineering education*, 4(1), pp. 29-41.

- Lilley, D., Lofthouse, V. & Bhamra, T., 2005. Towards instinctive sustainable products use. *Paper presented at: 2nd international conference: Sustainability creating the culture*, 2-4 November.
- Lockton, D., Harrison, D. & Stanton, N., 2008. Making the user more efficient: Design for sustainable behaviour. *International journal of sustainable engineering*, 1(1), pp. 3-8.
- Lofthouse, V., 2006. Ecodesign tools for designers: defining the requirements. *Journal of cleaner production*, Volume 14, pp. 1386-1395.
- Ma, J. & Kim, H. M., 2015. Predictive usage mining for life cycle assessment. *Transportation Research Part D*, Volume 38, pp. 125-143.
- Ma, J., Yin, F., Liu, Z. & Zhou, X., 2012. The eco-design and green manufacturing of a refrigerator. *Procedia Environmental Sciences*, Volume 16, pp. 522-529.
- Marques, G., Gourc, D. & Lauras, M., 2010. Multi-criteria performance analysis for decision making in project management. *International Journal of Project Management*, Volume 29, pp. 1057-1069.
- Mason Earles, J. & Halog, A., 2011. Consequential life cycle assessment: a review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Volume 16, pp. 445-453.
- McAloone, T. & Evans, S., 1997. How good is your environmental design process ? Self assessment technique. *International conference on engineering design*.
- McIntyre, K., Smith, H., Henham, A. & Pretlove, J., 1998. Environmental performance indicators for integrated supply chains: the case of Xeros Ltd. *Supply chain management: An international journal*, 3(3), pp. 149-156.
- McKinnon, A. & Campbell, J., 1998. Quick-response in the frozen food supply chain: The manufacturers' perspective. *Christian Salvesen logistics research paper no.2*.
- Michelin, F. et al., 2014. Integration of environmental criteria in the co-design process: case study of the client/supplier relationship in the french mechanical industry. *International design conference - design 2014*, 19-22 May .
- Michineau, T., Cavalier, G. & Devin, E., 2014a. Evaluation of french fleet of refrigerated equipment. *3rd IIR International Conference on sustainability and the cold chain*.
- Michineau, T., Cavalier, G. & Devin, E., 2014b. F-Gases in refrigerated transport. *3rd IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain*.
- Millet, D. et al., 2005. Does the potential of the use of LCA match the design team needs ?. *Journal of Cleaner Production*, Volume 15, pp. 335-346.
- Mintcheva, V., 2005. Indicators for environmental policy integration in the food supply chain (the case of the tomato ketchup supply chain and the integrated product policy). *Journal of Cleaner Production*, Volume 13, pp. 717-731.
- Mudgal, S., Bain, J. & Liput, M., 2010. *Ecodesign of refrigeration products*. Cambridge, s.n.
- Myhre, G. et al., 2013a. *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth*

*Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Myhre, G. et al., 2013b. *Antropogenic and natural radiative forcing supplementary material. In: Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Nakano, K. & Hirao, M., 2011. Collaborative activity with business partners for improvement of product environmental performance using LCA. *Journal of Cleaner Production*, Volume 19, pp. 1189-1197.

National Research Council, 1991. *Improving Engineering Design: Design for Competitive Advantage*, Washington, DC: The national Academies Press.

Neely, A., Gregory, M. & Platts, K., 2005. Performance measurement system design - A literature review and research agenda. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(12), pp. 1228-1263.

Niemeijer, D. & S. de Groot, R., 2008. A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. *Ecological indicators*, Volume 8, pp. 14-25.

Norman, D. i. D. J. B. C. 2., 1988. *The design of everyday things*. USA: First MIT Press.

OECD, 2003. *OECD environmental indicators, development, measurement and use - Reference Paper*, Paris: OECD.

Olsthoorn, X., Tyteca, D., Wehrmeyer, W. & Wagner, M., 2001. Environmental indicators for business: a review of the literature and standardisation methods. *Journal of Cleaner Production*, Volume 9, pp. 453-463.

Oro, E. et al., 2014. Energy management and CO<sub>2</sub> mitigation using phase change materials (PCM) for thermal energy storage (TES) in cold storage and transport. *International Journal of Refrigeration* , Volume 42, pp. 26-35.

Persson, J., 2001. Eco-indicators in product development. *Proc Instn Mech Engrs Part B*, Volume 215, pp. 627-635.

Pigosso, D. C. A., McAlloone, T. C. & Rozenfeld, H., 2015. Characterization of the State-of-the-art and Identification of Main Trends for Ecodesign Tools and Methods: Classifying Three Decades of Research and Implementation. *Journal of Indian Institute of Science*, 95(4), pp. 405-427.

Plan C, s.d. *Product service systems*. [En ligne] Available at: <http://www.plan-c.eu/en/infographics/product-service-systems> [Accès le 29 septembre 2017].

Polimeni, J. M., Mayumi, K., Giampietro, M. & Alcott, B., 2008. *The Jevons paradox and the myth of resource efficiency improvements*. Research Edition éd. London: Earthscan.

Polizzi di Sorrentino, E., Woelbert, E. & Sala, S., 2016. Consumers and their behavior: state of the art in behavioral science supporting use phase modeling in LCA and eco-design. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Volume 21, pp. 237-251.

- Porter, M. E., 1985. *Competitive advantage. Creating and sustaining superior performance*. New York: The Free Press.
- Porter, M. E. & Kramer, M. R., 2006. Strategy and society: the link between competitive advantage and corporate social responsibility. *Harvard Business Review*, pp. 78-93.
- Porter, M. E. & Millar, E., 1985. How information gives you competitive advantage. *Harvard Business Review*, July.
- Poudelet, V. et al., 2012. A process-based approach to operationalize life cycle assessment through the development of an eco-design decision-support system. *Journal of Cleaner production*, Volume 33, pp. 192-201.
- Pré, s.d. *Weighting: Applying a value judgement to LCA results*. [En ligne] Available at: <https://www.pre-sustainability.com/weighting-applying-a-value-judgement-to-lca-results> [Accès le 13 juin 2016].
- Prinçaud, M., 2011. *Développement d'un outil d'aide à la décision environnementale basé sur l'analyse du cycle de vie intégré au processus de conception*, Institut de Chambéry: Thèse de doctorat Arts et Métiers Paristech.
- PSA, 1997. *Normes Véhicules B20-0200 Conception en vue du recyclage*, s.l.: s.n.
- Puig, M., Wooldridge, C. & Darbra, R. M., 2014. Identification and selection of environmental performance indicators for sustainable port development. *Marine Pollution Bulletin*, Volume 81, pp. 124-130.
- Renault Truck, 2012-2014. *EcoCalculator*. [En ligne] Available at: <http://www.ecocalculator.renault-trucks.com/en> [Accès le 22 Septembre 2017].
- Renault, 1994. *Norme 00-10-060/A Conception en vue du recyclage*, s.l.: s.n.
- Repice, C. & Stumpf, A., 2007. Energy efficiency in transport refrigeration. *International Congress of Refrigeration*.
- Riaz, T. & Talib, K., 2010. *User-Driven Innovation - Investigating the ways to involve users at local companies*, Sweden: s.n.
- Rice, J. & Rochet, M., 2005. A framework for selecting a suite of indicators for fisheries management. *Journal of Marine Science*, Volume 62, pp. 516-527.
- Rodrigues, V. P., Pigosso, D. C. & McAlloone, T. C., 2016. Process-related key performance indicators for measuring sustainability performance of ecodesign implementation into product development. *Journal of Cleaner Production*, Volume 139, pp. 416-428.
- Rodrigues, V. P., Pigosso, D. C. & McAlloone, T. C., 2017. Measuring the implementation of ecodesign management practices: a review and consolidation of process-oriented performance indicators. *Journal of Cleaner Production*, Volume 156, pp. 193-309.
- Rodriguez, E. & Boks, C., 2005. How design of products affects user behaviour and vice versa: the environmental implications. *Proceedings of Ecodesign 2005*.
- Rose, C. M. & Stevels, A., 2000. Applying Environmental Value Chain Analysis to Product Take-Back Systems. *7th CIRP Life Cycle Engineering*.

- Rossi, M., Germani, M. & Zamagni, A., 2016. Review of ecodesign methods and tools. Barriers and strategies for an effective implementation in industrial companies. *Journal of cleaner production*.
- Rousseaux, P. & Apostol, T., 2000. *Valeur environnementale de l'énergie*. Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Rousseaux, P. et al., 2017. "Eco-tool-seeker": A new and unique business guide for choosing ecodesign tools. *Journal of Cleaner Production*, Volume 151, pp. 546-577.
- Rowley, H. V., Peters, G. M., Lundie, S. & Moore, S. J., 2012. Aggregating sustainability indicators: Beyond the weighted sum. *Journal of Environmental Management*, Volume 111, pp. 24-33.
- Roy, B., 1996. *Multicriteria methodology for decision aiding*. s.l.:Kluwer Academic Publishers.
- Roy, B. & Slowinski, R., 2013. Questions guiding the choice of a multicriteria decision aiding method. *EURO J Decis Process*, Volume 1, pp. 69-97.
- Saaty, T. L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 1(1), pp. 83-98.
- San Cristobal, J., 2012. Multi criteria analysis. Dans: *Multi criteria analysis in the renewable energy*. London: Springer-Verlag, pp. 7-10.
- Scherpereel, C., Van Koppen, K. & Heering, F., 2001. Selecting environmental performance indicators. The case of Numico. *Greener management international*, Volume 33, pp. 97-115.
- Searcy, C., Karapetrovic, S. & McCartney, D., 2005. Designing sustainable development indicators: analysis for a case utility. *Measuring Business Excellence*, 9(2), pp. 33-41.
- Seow, Y., Goffin, N., Rahimifard, S. & Wooley, E., 2016. A 'Design for Energy Minimization' approach to reduce energy consumption during the manufacturing phase. *Energy*, Volume 109, pp. 894-905.
- Serna-Mansoux, L., Popoff, A. & Millet, D., 2014. A simplified model to include dynamic product-user interaction in the eco-design process. The paper towel dispenser case study. *Journal of Industrial Ecology*, 18(4), pp. 529-544.
- Shah, V., Col Debella, D. & Ries, R., 2008. Life cycle assessment of residential heating and cooling systems in four regions in the United States. *Energy and Buildings*, Volume 40, pp. 503-513.
- Shi, J. et al., 2015. Energy consumption and environmental emissions assessment of a refrigeration compressor based on life cycle assessment methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Volume 20, pp. 947-956.
- Shu, L. et al., 2017. Design for reduced resource consumption during the use phase of products. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 66, pp. 635-658.
- Smeets, E. & Weterings, R., 1999. *Environmental indicators: Typology and overview Technical report N°25*, Copenhagen: European Environment Agency.

- Srivastava, J. & Shu, L., 2015. Considering different motivations in design for consumer-behavior change. *ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2-5 August .Volume 7: 27th International Conference on Design Theory and Methodology.
- Steg, L. & Vlek, C., 2009. Encouraging pro-environmental behaviour: An integrative review and research agenda. *Journal of Environmental Psychology*, Volume 29, pp. 309-317.
- Svensson, N., Roth, L., Eklund, M. & Martensson, A., 2006. Environmental relevance and use of energy indicators in environmental management and research. *Journal of Cleaner Production*, Volume 14, pp. 134-145.
- Tang, T. & Bhamra, T., 2008. Changing energy consumption behaviour through sustainable product design. *International Design conference*.
- Tassou, S., De-Lille, G. & Ge, Y., 2009. Food transport refrigeration - Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport. *Applied Thermal Engineering*, Volume 29, pp. 1467-1477.
- Technical University of Denmark, 2015. *Ecodesign and implementation at DTU - EPIs*. [En ligne] Available at: <http://www.ecodesign.dtu.dk/KPIs> [Accès le 29 September 2017].
- Telenko, C. & Seepersad, C. C., 2014. Probabilistic graphical modeling of use stage energy consumption: a lightweight vehicle example. *Journal of Mechanical Design*, October, Volume 136, pp. 1-11.
- Tereza, L., 2015. *Freight transport with intermodal shipping containers and transport of goods in need of atmosphere control*, Zürich: Ecoinvent Centre.
- Tingström , J. & Karlsson, R., 2006. The relationship between environmental analyses and the dialogue process in product development. *Journal of Cleaner Production*, Volume 14, pp. 1409-1419.
- Tsoufias, G. & Pappis, C., 2008. A model for supply chains environmental performance analysis and decision making. *Journal of Cleaner Production*, Volume 16, pp. 1647-1657.
- Tukker, A., 2004. Eight types of product-service system: eight ways to sustainability ? Experience from Suspronet. *Business Strategy and the Environment*, Volume 13, pp. 246-260.
- Turi, A., Goncalves, G. & Mocan, M., 2014. Challenges and competitiveness indicators for the sustainable development of the supply chain in food industry. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 124, pp. 133-141.
- Ullman, D. G., 1992. *The mechanical design process*. USA: The McGraw Hill Companies.
- UNEP, 1994. An overview of environmental indicators. State of the art and perspectives. *Environmental assessment sub-program*.
- UNEP, 1994. An overview of environmental indicators. State of the art and perspectives. *Environmental assessment sub-program*.
- UNEP, 2012. *Growing greenhouse gas emissions due to meat production*, s.l.: United Nations Environmental Programme.

- UNEP, 2015. *2014 Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps technical options committee*, s.l.: United Nations Environmental Programme.
- Ussui, P. & Borsato, M., 2013. Sustainability indicators for the product development process in the auto parts industry. *20th ISPE International Conference on Concurrent Engineering*, pp. 481-493.
- Varzinskas, V., Gurauskiene, I. & Pipinyte, L., 2007. Improvement in Environmental Performance of Vapour Compression Refrigeration System by the Model for Environmental Product Development. *Environmental Research, Engineering and Management*, 2(40), pp. 59-69.
- Velasquez, M. & Hester, P. T., 2013. An analysis of Multi-criteria decision making methods. *International Journal of Operations Research*, 10(2), pp. 56-66.
- Veleva, V. & Ellenbecker, M., 2001. Indicators of sustainable production: framework and methodology. *Journal of Cleaner Production*, Volume 9, pp. 519-549.
- Vivanco, D. F. & Van der Voet, E., 2014. The rebound effect through industrial ecology's eyes: a review of LCA-based studies. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Volume 19, pp. 1933-1947.
- Volvo Truck Corporation, 2012. *Service Information - Disassembly instructions, complete vehicle*, Göteborg, Sweden: Volvo Truck Corporation.
- Volvo Trucks, 2016. *Environmental footprint calculator*. [En ligne] Available at: <http://footprintcalculator.volvotrucks.com/> [Accès le 22 Septembre 2017].
- Volvo, 1997. *Environmental requirements for suppliers and contractors - A holistic approach Issue 2*, s.l.: s.n.
- Wagner, E. et al., 2016. Evaluation of indicators supporting the sustainable design of electronic systems. 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use. *Procedia CIRP*, Volume 40, pp. 469-474.
- Wever, R., van Kujik, J. & Boks, C., 2008. User-centred design for sustainable behaviour. *International journal of sustainable engineering*, 1(1), pp. 9-20.
- Wilson, G. T., Bhamra, T. & Lilley, D., 2015. The considerations and limitations of feedback as a strategy for behaviour change. *International Journal of Sustainable Engineering*, 8(3), pp. 186-195.
- Wilson, G. T., Bhamra, T. & Lilley, D., 2016. Evaluating Feedback Interventions: A Design for Sustainable Behaviour Case Study. *International Journal of Design*, 10(2), pp. 87-99.
- Wu, X., Hu, S. & Mo, S., 2013. Carbon footprint model for evaluating the global warming impact of food transport refrigeration systems. *Journal of Cleaner Production*, Volume 54, pp. 115-124.
- Yanagitani, K. & Kawahara, K., 2000. LCA study of Air Conditioners with an alternative refrigerant. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(5), pp. 287-290.
- Yannou, B., Yvars, P.-A., Hoyle, C. & Chen, W., 2013. Set-based design by simulation of usage scenario coverage. *Journal of Engineering Design*, 24(8), pp. 575-603.

Yun, G. Y., Tuohy, P. & Steemers, K., 2009. Thermal performance of a naturally ventilated building using a combined algorithm of probabilistic occupant behaviour and deterministic heat and mass balance models. *Energy and Buildings*, 41(5), pp. 489-499.



# ANNEXES

<b>ANNEXE 1 : EXTRAIT DE LA BASE DE DONNÉES DES IPE .....</b>	<b>205</b>
<b>ANNEXE 2 : RÉSULTATS D'ACV .....</b>	<b>207</b>
<b>ANNEXE 3 : RETOURS DE LA FORMATION ÉCOCONCEPTION/ACV .....</b>	<b>225</b>
<b>ANNEXE 4 : DÉTAILS DE LA RÉALISATION DES TESTS AVEC DEKRA .....</b>	<b>227</b>
<b>ANNEXE 5 : ANALYSE DES RÉSULTATS DES TESTS EXPÉRIMENTAUX.....</b>	<b>231</b>
<b>ANNEXE 6 : CALCULS DES IPE DU DÉMONSTRATEUR DE DIAGNOSTIC DE L'USAGE .....</b>	<b>237</b>
<b>ANNEXE 7 : LOGIQUE DE SÉLECTION DE L'UNITÉ DE RÉFRIGÉRATION LA PLUS ADÉQUATE .....</b>	<b>245</b>
<b>ANNEXE 8 : LISTE DES PUBLICATIONS.....</b>	<b>247</b>

## Annexe 1 : Extrait de la base de données des IPE

Le tableau suivant est un extrait de la base de données des IPE. Il reprend les catégories définies à la page 86 associées à chaque IPE pour permettre leur sélection :

- Une catégorie afin de faciliter le tri des indicateurs (indicateurs d'ACV, d'usage, de fin de vie, de management, etc.).
- Une description de l'indicateur (ce qu'il représente).
- Une formule de calcul si nécessaire. Certains indicateurs sont qualitatifs, par exemple l'indicateur permettant d'évaluer la présence d'un système de management environnemental.
- Une unité. Les indicateurs peuvent être sans dimension.
- Une étape du cycle de vie (cf. figure 2).
- Un objectif environnemental (tableau 6). Chaque objectif environnemental est déclinable en stratégies d'écoconception plus précises pour la suite. La liste des objectifs environnementaux est issue de la littérature (Brezet & Van Hemel, 1997), (Crul & Diehl, 2006), (Belletire, et al., 2014), (Issa, et al., 2015).
- Les acteurs susceptibles de les utiliser.
- Les objectifs des acteurs : suivre et/ou améliorer les performances environnementales, communiquer, échanger des informations, suivre et/ou anticiper les réglementations environnementales, piloter.
- Les réglementations auxquelles ils peuvent être associés.

Catégorie	Norm de l'PE	Description	Comment le calculer	Unité	Etape du cycle de vie	Objectif environnemental	Intérêts					Acteurs*							Réglementation*			
							Améliorer/suivre la performance environnementale	Echanger de l'information	Communiquer	Suivre/anticiper les réglementations	Piloter	Décideurs	Service R&D	Marketing	..	Fournisseurs	Clients/Utilisateurs	Acteurs de la fin de vie	ERP (Ecodesign)	..	DEEE	NRMM
Management	Rate of customer demands related to ecodesign	Assess market trend and customer requirements related to ecodesign	Percentage of customer demands in relation to the total number of trends	%	Entire life cycle	Reduce environmental impact of entire life cycle	0	1	1	0	1	1	0	1	...	0	0	0	0	...	0	0
Conception	Active functions	Number of active functions in the product	Number of active functions in the product	- dimensionless	Product development	Optimize product structure	1	0	0	0	0	0	1	0	...	0	0	0	0	...	0	0
Matériaux	Total Material Consumption	Measures the absolute mass of material input to manufacture the product.	Total material input absolute mass in manufacturing	kg	Raw material extraction	Minimize material consumption	1	1	1	1	0	0	1	0	...	1	1	1	0	...	1	0
Energie	Total Energy Consumption	Measure the total energy consumption of the manufacturing process.	Total energy consumed	J	Manufacturing	Minimize energy consumption during manufacturing	1	0	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	...	0	0
Usage	Noise during usage	Measure the noise emitted from the use phase. The impact of the noise can be evaluated by a sound level meter	Noise measure standard (ISO)	dB(A)	Usage Maintenance	Reduce environmental impacts from usage	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1	1	0	0	...	0	0
Désassemblage	Disassembly time of the product	Measure of the disassembly time of the product / sum of the disassembly time of each component, indicator "Disassembly Time of Each component".	Sum of the disassembly time of each component of the product	temporal units (min, s)	End of life	Facilitate disassembling	1	1	1	1	0	0	1	1	...	1	0	1	0	...	1	0
ACV	Acidification potential	Reflect the acidification potential for substances having effects in reflection of acidification	Sum of (mass of substance * acidification equivalent factor)	kg of SO <sub>2</sub> eq	Entire life cycle	Reduce environmental impact of entire life cycle	1	0	0	0	0	0	1	0	...	0	0	0	0	...	0	1

\* Pour des raisons de mise en page, tous les acteurs ne sont pas représentés dans ce tableau ni toutes les réglementations.

## Annexe 2 : Résultats d'ACV

Ici, un résumé avec les principales conclusions est présenté. Les 3 ACV réalisées sur chacune des unités de réfrigération (Vector 1350, Vector 1550 et Vector 1950 MT) donnent des résultats très similaires, les structures étant très similaires.

La contribution majeure aux impacts environnementaux du produit est due à la phase d'utilisation. Il s'agit plus particulièrement de la consommation d'énergie et des potentielles fuites de réfrigérant. L'accent mis sur la phase d'utilisation montre que la consommation d'énergie devient la principale source d'impacts environnementaux lorsque les fuites de réfrigérant sont sous contrôle. Plusieurs scénarios d'usage ont été modélisés en faisant varier 3 paramètres, deux paramètres commerciaux (le cycle de livraison et le type de produit donc la température de transport) et un choix de l'utilisateur (mode d'utilisation). Les impacts environnementaux sont également dus à la phase de fabrication. Lors de l'examen de cette phase, les composants qui ont le plus d'impacts sont les composants les plus lourds (moteur thermique, compresseur) et les composants électroniques.

Il en résulte la modélisation de 8 scénarios d'usage.

Les résultats montrent qu'il y a beaucoup d'opportunités d'amélioration. La principale est en phase d'utilisation et concerne les comportements de l'utilisateur final. L'impact environnemental peut doubler en fonction de la façon dont l'utilisateur final utilise le produit (choix du mode d'utilisation). Il n'est pas possible de modifier les contraintes commerciales telles que le type de produit (donc sa température de conservation) ou encore le cycle de livraison. Il s'agit de paramètres intrinsèques aux activités du client. Cette étude souligne la nécessité d'avoir des détails sur la phase d'utilisation et de ne pas utiliser un scénario moyen.

- **\*Heslouin, C., Pourcheresse, L., Perrot-Bernardet, V., Perry, N. *Life cycle assessment of road transport refrigeration unit. (Rédigée, en cours de validation avant soumission au journal : International Journal of Life Cycle Assessment.)***

### Abstract

*Purpose* Road Transport Refrigeration Unit (TRU) is a system which allows transport of products at a suitable temperature from -30°C to +30°C. TRUs are an important contributor to reduce the food wastage. However, it also has environmental impacts from their operation. From literature, major environmental contributions come from the use phase and are linked to the use of energy and refrigerant with high global warming potential. To improve the sustainability of TRU, it is necessary to evaluate their environmental impact throughout their entire life cycle and identify improvement opportunities. This study presents the global LCA results of a TRU in order to quantify main

environmental impact and a proposal of improvement solutions.

*Methods* This is a cradle to grave attributional LCA. This study was carried out with respect to ISO 14040 standard. Environmental impacts are evaluated using 10 indicators selected to be representative to the environmental issues of this kind of product (based on literature review) and are modeled in Simapro software. The selected functional unit is "to maintain the transported product at the suitable temperature for the 12 year lifetime of the equipment". This study makes a focus on the use phase, which is often modelled with an average scenario. Data were collected from a TRU manufacturing plant and from their suppliers.

*Results and discussion* The manufacturing step (raw material and manufacturing operations) is an important opportunity for improvement. But, it can be useless to make an effort on the environmental footprint of the manufacturing if these efforts are lost during the other life cycle phases, like the use phase. LCA results of TRU show that the major environmental impacts come from the use phase and more especially the energy consumption and the refrigerant leakages. When the refrigerant leakages are under control, energy consumption becomes the major source of impacts. End-users behaviors can have a high influence on the global environmental footprint of the product. When considering the end of life, refrigerant treatment is an important issue that can reduce or increase the global product footprint.

*Conclusions* This study confirms that the major improvement of TRU must be done on energy efficiency and refrigerant. But, results highlight the importance of the end-users behaviors on environmental performance and that if the refrigerant containment is well managed; it is not a major issue. Results highlight also the need to improve the manufacturing phase (choice of components, structure, materials, etc.), which is generally not considered.

**Keywords** Road transport – Refrigeration unit - Life cycle assessment - Refrigerant – Usage – Energy related product

## 1. Introduction

Road Transport Refrigeration Units (TRU) are used to transport at a suitable temperature, perishable food and other products like flowers, high technology products (wheels, composite materials, etc.), medicine, etc. TRU are an important link in the cold chain. They allow preserving from food wastage and assuring food security when transporting perishable food. This is particularly true in a context of the increase of the world population, the international exchanges, the travel distances, and the improvement of life conditions of developing countries. At the same time the demand in fresh and frozen products more and more diversified all the year increases. All these factors contribute to increase the demand for storage and refrigerated transport.

The total world number of TRU fleet is difficult to estimate for two obvious reasons: i) it does not exist or very rare database referencing TRU; ii) it is difficult to determine when TRU are no more on the market because of the lack of statistical data

on the market of the secondary resale. The world fleet was estimated at 2,000,000 vehicles in 2014 (UNEP, 2015). TRU concern three segments of sales: light commercial vehicles, trucks and trailers. The product study here is a TRU from the trailer sector.

Considering the regulatory context and the existing scientific literature from HVAC-R (Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration), this kind of products has two major environmental issues: i) use of refrigerant with high Global Warming Potential (GWP) (and potential leakage linked); and ii) the energetic consumption (mainly diesel and/or electricity). Both are linked to the use phase of the product. The most used refrigerant, of the product under this study, is the HFC R404A (85% of equipment in France, in 2012 (Michineau, et al., 2014)) with a GWP equal to 3943 kg CO<sub>2</sub> eq (IPCC, 2013). By consequence, environmental analyses of refrigeration product mainly focus on these two aspects (refrigerant leakages and their CO<sub>2</sub> emissions and energy consumption and their emissions during the use phase) (Nasuta, 2014, Tassou *et al*, 2009, Fitzgerald *et al*, 2011; Wu *et al*, 2013). Indeed, the principal tool used by the transport refrigeration sector for environmental assessment is the Life Cycle Climate Performance (LCCP), like in (Nasuta, 2014). This tool is mainly focused on the use phase and takes into consideration only environmental impact linked to the energy consumption (express in MJ) and use of refrigerant on the climate change (express in kg CO<sub>2</sub> eq). Two studies, however, give first elements on the realization of LCA for this kind of product. The first one is a LCA of a truck segment product (Barnabe, 2003), but this analysis does not go deep into modeling the use phase and do take into account only three environmental indicators: climate change, ozone depletion and energy consumption, which is a small view of all environmental aspects of all the life cycle phase. In fact, TRU by the use of energy (in most of the case diesel) and refrigerant, have other environmental impacts, for example, particulate matter, human toxicity, photochemical smog, etc. The second one is the ecoinvent database report (Tereza, 2015) on the transport refrigeration system, which take average life cycle inventory data for the construction of an environmental data. These two studies have gaps, which this analysis will try to fix.

During the use phase of this product, a lot of parameters can influence the environmental performance like settings and end-users behaviors

(Heslouin *et al.*, 2016). These parameters can be: trailer specification, size and packaging of product loaded, outside climate conditions (temperature, humidity), operating mode (continuous run vs. start/stop), start/stop parameters, type of product (fresh or frozen), type of transport (urban distribution vs. long haul), speed of the engine, coefficient of performance (COP) of the unit, refrigerant efficiency, etc. (Repice and Stumpf, 2007; Tassou *et al.*, 2009; Barnitt *et al.*, 2009; Cavalier and Stumpf, 2010; Fitzgerald *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2013).

The relationship between product's usage and environmental performance is rarely considered when using LCA, because of the lack of data and study on end-user behavior. Generally, an average usage scenario is used and does not take into account the weight of the usage context on environmental performance, which can be positive or negative. For example, Tereza (2015) only considers an average value of several literature sources, one for freezing and one for cooling. However, the effect of usage, and its modeling, has been recognized among LCA researchers and practitioners (Telenko and Seepersad, 2014), (Ma and Kim, 2015) (Egede *et al.* 2015). They all show the importance to go further in the modelling of usage when performing LCA. This is why, this study consider multi-factors influencing the use phase.

This study is a cradle-to-grave life cycle assessment for a typical trailer refrigeration unit based on industrial data. The results of this study will help to understand the global life cycle environmental impact of TRU and create a

scientific basis in this field. A special focus is given to the use phase to well understand the potential variability of the environmental impact depending of different parameters. It also gives opportunities of improvement for an ecodesign approach.

## 2. Methods

This study was conducted in accordance with the LCA standards ISO 14040 (ISO 14040, 2006) and ISO 14044 (ISO 14044, 2006). The objectives of this study are to:

- quantify resources, energy consumption and environmental emissions during the entire life cycle of a TRU,
- highlight the environmental hotspots and explore improvement opportunities,
- highlight the influence of the end-user behaviors (settings) on the environmental impacts of the use phase
- create a baseline study for TRU.

### 2.1 Product description

For this study, a trailer refrigeration unit was selected. This segment was chosen because it is the most complete in term of functionality and the most energy and resource consuming. Also, it is an autonomous TRU powered by its own diesel engine. When the vehicle is parked, the TRU can be used in standby mode (electrical mode). Technical details of the selected TRU are given in table 1.

Table 23 Specifications of TRU (data from Carrier Transicold)

Dimensions [mm]	2,227*2,050*430				
Weight [kg]	704				
Airflow [m <sup>3</sup> /h]	5,700				
Kind of refrigerant	R404A				
Refrigerant nominal load [kg]	5				
Type of compressor	Scroll				
Type of engine	Diesel 4 cylinder – 1,498 cm <sup>3</sup>				
Cooling capacity [W]	Box temperature	Cooling capacity [W]			
		Diesel high speed	Diesel low speed	Standby	
		273.15K/303.15K (0/30°C)	14,995	11,830	13,200
	253.15K/303.15K (-20/30°C)	8,285	6,850	7,360	

### 2.2 Functional unit

The Functional Unit is described as “maintain the transported product at the suitable temperature for the 12 year lifetime of the equipment”. These kinds of products are not subject to the European Energy Related product regulation or in the field of the European Product Environmental Footprint Guide. A lifetime of 12 years has been selected in accordance with the ATP (Agreement on the international carriage of perishable foodstuff and on the special equipment to be used for such carriage) rules. In fact, after 6 years the TRU must do a partial certification, same after 9 years. After 12 years, the TRU must go back for a complete certification to be used, which is expensive. And again after 18 years a complete certification must be done. By consequence, experts estimate that after 12 years the TRU is sent to end of life treatment.

### 2.3 System boundaries

Figure 1 shows the life cycle of the TRU under study and the limits of the field of study. The life cycle has been divided into a manufacturing stage (including raw material extraction, parts production, transport from suppliers and assembly), a usage stage (energy consumption, refrigerant leakage and maintenance) and a disposal stage (end of life of the product and refrigerant). Particular attention has been paid to the use phase. In fact, the advantages gained in production can be easily wiped out by a not optimal usage of the product. The transport from suppliers to the company is taken in consideration. After a first screening LCA, the other transport steps were not significant and data about the travel and the precise type of vehicle (especially euro regulation) were not good quality enough to be used. So, the transport to

the customers was not taken into account in this paper.

Considering use phase, as previously mentioned, a lot of external and internal parameters of the system influence the energy consumption, which made the use phase complicated to model (Tereza et al, 2015). Based on the graph theory, a directed acyclic graph is built in order to define all of the parameters that can influence energy consumption of a TRU (Figure 2) (Repice and Stumpf, 2007; Tassou *et al*, 2009; Barnitt *et al*, 2009; Cavalier and Stumpf, 2010; Fitzgerald *et al*, 2011; Wu *et al*, 2013 and expert knowledges). The graph shows the complexity of energy consumption modelling and the number of parameters that have to be taken into consideration to have a real usage scenario. There is almost no data or information considering the end of life of TRU.

### 2.4 Impact assessment

SimaPro software (version 8.2) with Ecoinvent database version 3 (allocation recycled content) was used to model the life cycle of TRU. For the purposes of the LCA, we used the environmental impact calculation methods recommended by the ILCD method (JRC-IES, 2011). The 10 following impact categories (table 2) were selected to evaluate the environmental impact of the product under study: climate change, ozone depletion, acidification, photochemical oxidant formation, particulate matter, human toxicity, ecotoxicity, nonrenewable energy, renewable energy, and mineral depletion. These impact categories are representatives of environmental issues of TRU of the literature and cover a large spectrum of environmental aspects.

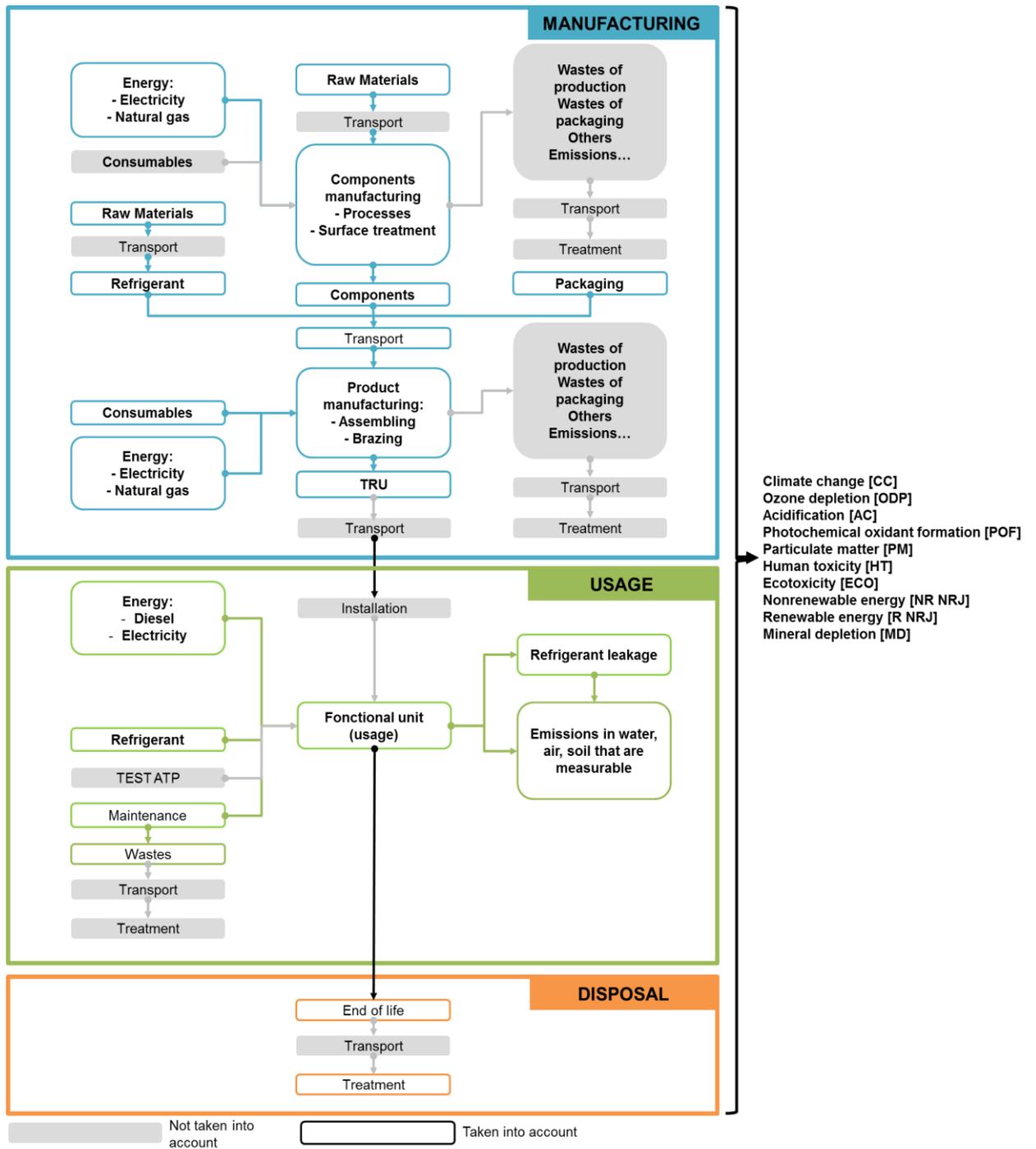


Fig. 1 System boundary of the LCA of the TRU



This TRU is a vapor compression refrigeration system. It is composed of four main elements which are: the condenser (removes the heat to the outside), the evaporator (recovers heat to the interior of the body), the compressor (compress the refrigerant fluid), and the expansion valve or regulator (lowers the fluid pressure). To these four elements, the engine to run the system and the fluid line and the refrigerant tank can be added. For the inventory of the refrigeration unit production, all the components were taken into account except of components which contribute for less than 2% of the total mass and for which the inventory is not complete enough or has a bad quality (sensors, adhesives, some cables) and for which there is no critical materials (especially: RoHS and Reach substances). It means that 0.6% of the total mass of the TRU has been not modelled in this LCA. When it was possible data came directly from suppliers and company database. When it was not possible, average data was chosen in Ecoinvent database. If the data in the Ecoinvent database were evaluated as bad or medium quality, data were taken in scientific literature. This is the case for the life cycle inventory of the scroll compressor which comes from a scientific paper (Shi et al., 2015).

For the production phase, the product is composed with 14 functional blocks: kit platform (engine, compressor, generator, etc.), kit evaporator, kit frame, kit refrigerant, kit cover, kit packaging, kit battery, kit electronic devices, kit exhaust, kit air filter, kit oil circuit, kit diesel circuit, kit cooling system, kit water circuit. The material weight sharing is given in figure 3. For the initial charge of refrigerant, a rate of 0.75% (consistent with (Barnabe & Bensafi, 2007)) of the leak was taken in consideration.

### 3.1.2 Production of refrigerant

In this study, the R404A refrigerant is used. The study from (Frischnecht, 1999) was used for environmental impacts linked to the production of the refrigerant. There is no recent study as we know and this is the study used in the Ecoinvent database to build the life cycle inventory of the refrigerant R134a. The hypothesis that the refrigerant production has the same impact than the HFC R134a has been used which is consistent with the (Frischnecht, 1999) rapport and Ecoinvent database. Air emissions of R404A are modeled with the emission of pure substances: 54% R143a (1.1.1.1-trifluoroethane), 44% R125

(pentafluoroethane) and 4% R134a (1.1.1.2-tetrafluoroethane).

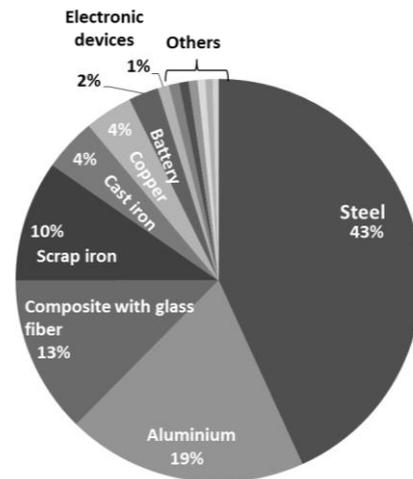


Fig. 3 Material weight sharing for the production

### 3.1.3 Transport from suppliers

As there were no available data for transport from suppliers, it was modelled with the calculation of kilometers covered between the supplier and the company. For road transport in Europe an average type of truck of 16-32t. was used with Euro 4 regulation from Ecoinvent database. For boat transport an average type of transoceanic freight ship was chosen from Ecoinvent database.

## 3.2 The use phase

The use phase is about 3 main aspects: energy consumption, refrigerant leakage and maintenance.

### 3.2.1 Energy consumption

This phase includes energy consumed for the use phase that can be diesel energy or electrical energy. As mentioned previously, energy consumption depends on several parameters choose or not by the end-user.

For this study, experimental measures were conducted to determine diesel energy consumption depending on the different parameter on the type of product, the type of delivery and the operating mode (see table 3)

- Two transported product profiles are considered which correspond to the setting temperature: fresh and frozen products. Fresh products are transported

at 273.15°K and frozen product at 253.15°K.

- Two main types of delivery are analyzed: long haul transportation and urban distribution. During long haul, the unit will run over long periods, including during driver breaks. Very few door openings will occur. During urban distribution, several door openings occur in short intervals. Hot air gets inside the trailer and creates frost on the evaporator requiring defrosting, which consumes more energy. Frequent door openings can also alter the food quality (Ducoulombier *et al.*, 2011). Both of the transport types occur for a period of eight hours per day, 260 days per year, for 12 years. Eight hours per day were chosen for both scenarios in order to allow the scenario comparison. In real operation, long haul transportation is most often eighteen hours per day.

- Two operating modes are studied: continuous run and start and stop

mode. In the continuous run, the unit runs all the time to reach and to maintain a precise temperature. In this mode the temperature and air flow are permanently maintained. This results in higher energy consumption. In start/stop mode, the unit will run until it reaches the pre-defined temperature, then it will turn off. An inadequate end-user choice, use of continuous run instead of start/stop, can lead to overconsumption of energy. Continuous mode is used for sensitive product or product which require precise temperature otherwise start/stop mode can be used.

This paper presents the modeling of 9 usage scenarios. There are eight scenarios of usage depending on the three previous factors and one average European scenario, which is a mix of utilization of the 3 parameters (table 3).

Table 3 Usage scenario and energy consumption associated (data from Carrier Transicold)

Influencing factor	Product profile	Type of transport profile	Operating mode	Normalized fuel consumption*
Scenario 1	Fresh	Urban distribution	Continuous	0.61
Scenario 2	Fresh	Urban distribution	Start/stop	0.43
Scenario 3	Fresh	Long haul	Continuous	0.56
Scenario 4	Fresh	Long haul	Start/stop	0.35
Scenario 5	Frozen	Urban distribution	Continuous	0.63
Scenario 6	Frozen	Urban distribution	Start/stop	0.50
Scenario 7	Frozen	Long haul	Continuous	0.57
Scenario 8	Frozen	Long haul	Start/stop	0.43
European average	20% fresh continuous run, 49% fresh start/stop, 0% frozen continuous run, 15% frozen start/stop, 16 % full capacity			0.47

\*Fuel consumption of TRU is expressed as a relative value depending on fuel consumption of TRU measured during ATP for max cooling at 0/30°C and equal to 1. Normalized fuel consumption = Measured (fuel consumption) /ATP (reference value for fuel consumption, worst case fuel consumption of the unit).

For operation in standby mode (electricity), three countries were considered: France, Germany, and Poland (it represents the major sales countries for this type of product in number). Table 4 is showing energetic mix for each country from the Ecoinvent database.

Table 4 Energy mix of country for standby use (2011) (data from Ecoinvent database 3.2) (Itten et al, 2014)

Energy mix	Fossil %	Nuclear %	Hydro %	Renewable %	Waste %
France	9.08	76.30	12.49	1.39	0.73
Germany	59.59	23.76	5.51	10.37	1.74
Poland	94.93	0.00	2.06	2.68	0.34

### 3.2.2 Refrigerant leakage

This stage includes refrigerant leakage (emissions in the air) and the quantity of refrigerant needed to refill (input and output for production). The refrigerant leakage can vary during the lifetime depending on the maintenance, accident, etc. Four annual leakage rates were chosen for sensitive analysis: 3, 5, 10 and 15 %. Also, in order to keep the TRU performance, it was assumed that there is a refill when the leakage reached 10% of the initial charge and a refill refrigerant leakage rate of 0.75% (data from expert and literature (Barnabe and Bensafi, 2007)).

### 3.2.3 Maintenance

The maintenance planning recommended by the company was used for a lifespan of 12 years. This stage includes all materials and fluids necessary for a 12 year lifetime. The potential failure of components was not taken into consideration, as there is not enough reliable data about it. Only the components which are included in the maintenance planning have been considered.

### 3.3 Disposal scenarios

It is difficult to obtain information from the end of life treatment of TRU. Most of the time after a first period of use the TRU is resold in other countries for a second period of use, it can occur after 6 or 12 years. Currently, the manufacturing company lost information about the future treatment of the TRU. The end of life treatment will depend on the choice of the end-user about disposal. End life treatments depend on location of the product, local regulations on waste treatment and the available technologies. Moreover, there are no specific regulations about end of life of this kind of product as the WEEE regulation (Directive, 2012/19/EU), except for the refrigerant. Three disposal scenarios were modeled as shown in table 5. The parameters take into account the recyclable rate of metals and the treatment of the refrigerant (venting, reclamation, final disposal). This study considers that other materials are incinerated. Recycling rates are taken from UNEP rapport with the highest rates mentioned of the range (UNEP, 2011). For the recycling benefice, the cutoff method has been used because there is currently no consensus in literature about the method to apply between avoided impact and boundary expansion.

Table 5 Scenarios of end of life used in this study

	Baseline scenario	Optimist scenario	Pessimist scenario
Recycling of steel (%)	90	90	0
Recycling of aluminum (%)	70	70	0
Recycling of copper (%)	53	53	0
Treatment of used refrigerant			
Venting (%)	50	0	100
Reclamation (%)	30	90	0
Final disposal (%) (incineration)	20	10	0
Others	Incineration*	Incineration*	Incineration*

\*data from Ecoinvent database

When considering refrigerant end of life treatment there are 3 possible scenarios: venting, final disposal (incineration), and reclaim. Venting is simply releasing of refrigerant to air without any pre-treatment. This treatment is forbidden in some countries due to global warming potential (R404A = 3943 (IPCC, 2013)), but can occur by accident. Final disposal (incineration) refers to the destruction of used refrigerant. Reclamation (recycling) refers to the processing of used refrigerant to new product with the same quality. This disposal may be necessary when the refrigerant has become badly contaminated with other products and no longer meets the acceptance to be reclaimed. From (Tereza, 2015), the world refrigerant end of life treatment is sharing as 50% venting, 30% reclaim and 20% to final disposal (Ecoinvent scenario). This sharing is used as baseline scenario. For optimistic scenario, 90% of the refrigerant is reclaimed and 10% incinerated. There is no venting. In the pessimistic scenario, the entire load of refrigerant is released into the atmosphere.

## 4. Results

For European average diesel scenario, with a 10% leakage rate and baseline end of life scenario,

when looking at the overall life cycle of the product, use phase and manufacturing phase are the major contributors to environmental impacts.

Table 6 gives, for each indicator, the environmental impact in percent at each life cycle stage. As we can see, environmental impacts are also due to the manufacturing phase.

Table 6 Life cycle environmental results express as percent of the global results by the 3 steps defined previously (average European diesel scenario, 10% leakage rate, and baseline end of life scenario)

Indicator	Manufacturing (%)	Usage (%)	End of life (%)
CC	4.1	93.5	2.4
ODP	40.0	60.0	0.0
AC	10.3	89.7	0.0
POF	5.3	94.7	0.0
PM	25.2	74.7	0.1
HT	63.4	36.4	0.2
ECO	48.9	50.6	0.6
NR NRJ	4.5	95.5	0.0
R NRJ	77.3	22.6	0.1
MD	96.1	3.9	0.0

For indicators, climate change, ozone depletion, acidification, photochemical oxidant formation, particulate matter and non-renewable energy, the major environmental impacts come from the use phase, which is mainly due to energy consumption during the entire product's lifetime. Indicators human toxicity, renewable energy and mineral depletion are linked to manufacturing step (raw material extraction, manufacturing and transport from suppliers). For the indicator ecotoxicity is not easy to conclude, both usage and manufacturing are contributing to this aspect.

Compare to manufacturing and usage phase, end of life is not either significant. In fact end of life is not more than 2.4% of the environmental impact of the indicator climate change and even less on others indicators.

#### 4.1 Manufacturing

When going through the manufacturing phase (raw material extraction + components and product manufacturing + transport from supply), environmental impacts of transport from suppliers

are negligible (see table 7). Although, transport from suppliers is not significant, some improvements can be made.

When going into the detail of material and manufacturing, environmental impacts come from 7 major kit in 14 ranked by order of importance.

These 7 kit account for more than 98.3% (normalization factor from ILCD method and weightings of 1 for each indicator) of the total contribution of manufacturing phase and can be classified by order of contribution to the impact as:

- Kit refrigerant (stator, condenser, screw condenser, refrigerant initial charge, solenoid, motor condenser, brazing operation),
- Kit electrical (control box, microprocessor, display...),
- Kit evaporator (POD, evaporator, evaporator frame, fan, brazing operation...),
- Kit battery (battery charger, battery...),
- Kit platform (generator, engine, compressor, electromagnet...),
- Kit frame
- and kit cover.

Table 8 gives detailed information on contribution of environmental impacts for each kit.

Overall, heavy components and electronics have the greatest impacts.

When going through processes which have the greatest impact, the largest contributors are: i) electricity consumption from China and Portugal for components production, ii) R404A production (energy and material), iii) copper production (4% of the total weight) (energy and material) and iv) Sheet Molding composite production (SMC, used for cover kit, less than 1% of the total weight) (energy and material).

Table 7 Environmental results express as percent of the global results for manufacturing phase (average European diesel scenario, 10% leakage rate, and baseline end of life scenario)

Indicator	Raw material extraction + Manufacturing (%)	Transport from suppliers (%)
CC	4.0	0.1
ODP	40.0	0.0
AC	10.1	0.2
POF	5.1	0.2
PM	24.9	0.3
HT	63.1	0.3
ECO	48.2	0.7
NR NRJ	4.4	0.1
R NRJ	77.3	0.0
MD	96.1	0.0

#### 4.2 Use phase

As mentioned previously, energy consumption, refrigerant leakage and maintenance operation are the three aspects of the use phase. Results, in table 9, show that environmental impacts of the maintenance operation are negligible except for the indicator mineral depletion. This environmental impact is linked to the use of materials used for the components change, which is not the case for energy and refrigerant consumption. For ozone depletion indicator,

refrigerant leakage is the major source of environmental impacts. It is mainly due to the production of R404A for refilling when the load of refrigerant goes below the threshold of 90% of the initial load. On almost all others indicators, energy consumption is the major source of impact. It comes from the use of diesel energy for operating the TRU.

Table 9 Detailed results of the use phase (average European scenario of diesel consumption, 10% of refrigerant leakage rate, and a lifespan of 12 years)

Indicator	Energy consumption (%)	Refrigerant leakage (%)	Maintenance operation (%)
CC	85.0	14.7	0.3
ODP	27.7	72.1	0.2
AC	99.3	0.1	0.6
POF	99.4	0.0	0.5
PM	98.1	0.3	1.5
HT	91.9	0.4	7.7
ECO	97.0	0.1	2.9
NR NRJ	99.1	0.0	0.9
R NRJ	92.5	0.9	6.5
MD	0.6	1.5	97.9

Table 8 Environmental results express as percent of the global results for manufacturing phase per kit (average European diesel scenario, 10% leakage rate, and baseline end of life scenario)

Indicator	Kit refrigerant (%)	Kit electrical (%)	Kit evaporator (%)	Kit battery (%)	Kit platform (%)	Kit frame (%)	Kit cover (%)	Other kits (%)
CC	28.1	8.3	27.3	9.6	9.1	4.6	10.1	2.9
ODP	98.6	0.1	0.2	0.1	0.1	0	0.1	0.8
AC	20.9	8.7	23.2	10.4	24.8	2.5	7.8	1.7
POF	27.5	9.4	24	9.6	13.2	4.3	9.2	2.8
PM	24.4	9.4	23.7	10.8	19.9	4.3	4.8	2.7
HT	14.9	6.5	19.1	10.3	38.4	3.7	5.1	2.0
ECO	12.9	12.4	17.8	17.9	26.4	4.8	5.6	2.2
NR NRJ	23.1	8.9	28.6	10.2	8.5	4.6	11.5	4.6
R NRJ	19.2	5.6	41.5	6.5	4.8	1.4	19.1	1.9
MD	37.2	21.4	7.1	31.2	2.7	0.1	0.0	0.3

#### 4.2.1. Refrigerant leakage

Figure 4 shows the trend for a refrigerant leakage rate from 3 to 15% (3, 5, 10, and 15) with the percent of impact by usage aspect. This sensitive analyze of leakage rates shows that when refrigerant leakage are under control (leakage rate 3%), energy consumption is the major source of environmental impact of the use phase. It is especially remarkable for climate change and ozone depletion indicators. For the other ones, it is not significant, but the global trend is the same.

The reduction of refrigerant emissions in air drastically reduces the impact of refrigerant on climate change and ozone depletion. Concerning climate change, it is due to the high GWP of R404A.

For indicator ozone depletion, it is due to the R404A production, which has high impact on this indicator. So when leakages are reduced, there is less need to refill and so to produce the refrigerant. This study confirms that more the refrigerant leakage rate is low and more the energy consumption becomes the major environmental issue of the use phase.

#### 4.2.2. Energy consumption

There are two important points for energy consumption: influence of the type of energy (diesel or electricity), business parameters and end-users behaviors.

- **Type of energy**

Products studies allow using two kinds of energy: fossil energy (diesel) and electrical energy when the vehicle is parked (especially for a long time). From the average European scenario, the two kinds of energy have been compared. The European average scenario has been used for diesel energy for 8h of use. In other hand, always for 8h of use, 3 energetically country mixes (French, German, and Polish) have been compared for fresh and frozen application. Figure 4 presents detailed results for the comparison of diesel (100%) and electricity (100%) for each indicator. For almost all indicators, diesel is worst that electricity for country as France and Germany. We see that for country as Poland, electricity can be a bad solution. So, Results (figure 5) show that electrical energy tends to be beneficial from an environmental point of view. But these results vary by country and more specially energy

country mix. The advantages of electrical energy can be lost compared to diesel consumption. It is true for Poland energy mix for example. It is especially due to the use of hard coal and the lignite mining in the Poland energy mix. Indicator renewable energy is not relevant to compare electricity to diesel energy as diesel energy is obviously a non-renewable energy. This indicator has been voluntary not show on figure 8.

Fig. 4 Sensitivity analysis of refrigerant leakage on the use phase results for indicators, climate change and ozone depletion

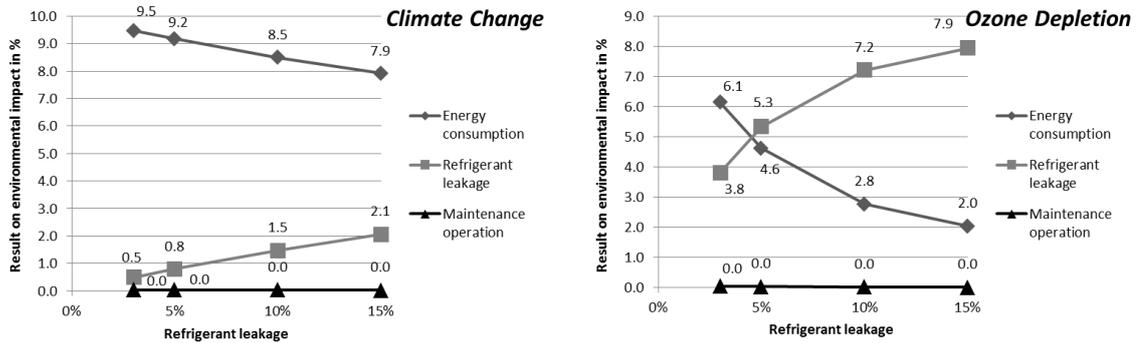
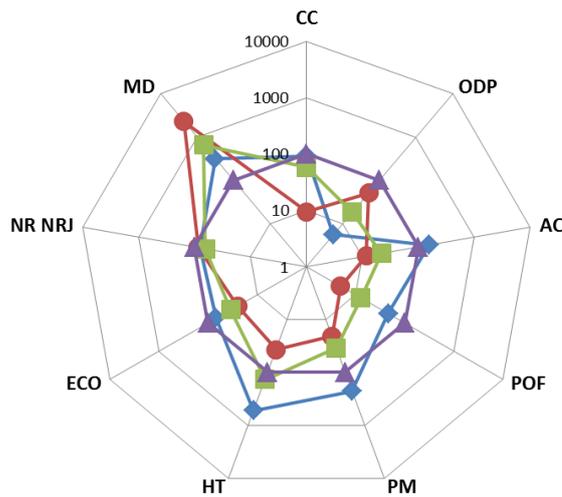


Fig. 5 Comparative analysis of diesel (▲) and electrical energy in three countries (France: ●; Germany: ■; Poland: ◆) for frozen product. Setting point: 253.15K - Operating mode: Start/stop - duration 8h.



- **Business parameters**

In this study, two business parameters have been compared as previously mentioned: the type of product (fresh or frozen) and the type of delivery (urban distribution or long haul) (see table 3)

The results show that when comparing the temperature of the setting point (fresh or frozen) depending on the type of distribution and the operation mode the variations on indicators go from 1 to 20% including all the indicators (Heslouin *et al.*, 2016). For example (Table 10), for climate change indicator, transport of fresh product when considering and start/stop operating mode is 16.1% more impactful than transport of frozen product in the same conditions. It goes from 2.2% to 16.1% for this indicator when

comparing fresh and frozen product depending on the two other parameters. Difference under 20% is not significant in LCA due to uncertainties in data and calculation method. However, even if it can be difficult to conclude, the type of products transported has an impact on the global environmental performance, a business company which has only fresh transported product will have less impact than a business company which only do frozen product. And, the difference is more important when we are considering also the mode of operation.

In the type of delivery there is a variation from 2 to 20% (Heslouin *et al.*, 2016). For example (Table 10) on climate change indicator, urban distribution, transportation of frozen product in start/stop mode is 13.2% more impactful than long haul transportation with the same 2 others parameters. Again, this is not significant to conclude. But if the distribution has more environmental impact it is primarily due to the frequency of door openings and the consequential effect of hot air entering the trailer. As a result, more cooling capacity is needed to recap the setpoint and the hot air creates frost on the evaporator requiring defrosting, which consumes more energy. These working conditions require more energy to reach the setting temperature.

Moreover, these parameters depend on the business of the company and cannot be changed. They must be considered when calculating environmental performance and an average scenario cannot be used for all the company. It has to be adapted to their business.

Table 10 Increase of the environmental impact of climate change indicator when considering the type of products transported, the type of transportation or the operating mode

	Long haul / Start-stop mode	Long haul / Continuous mode	Urban distribution / Start-stop mode	Urban distribution / Continuous mode
Increase of environmental impact when transporting frozen product instead of fresh product	16.1%	2.9%	12.5%	2.2%
	Frozen / Start-stop mode	Fresh / Start-stop mode	Frozen / Continuous mode	Fresh / Continuous mode
Increase of environmental impact when doing urban distribution instead of long haul distribution	13.2%	16.8%	7.1%	7.8%

- **End user behaviors**

End user behaviors influence on the environmental footprint of the use phase. End-user behaviors are numerous when talking about the usage of the product. It can be the choice of the operating mode, the setting of the required temperature, the practice of turning off the product when loading or unloading cargo in the vehicle, etc. In this study, we only analyze one end-user behavior which is the operating mode (start/stop versus continuous run, see table 3). For the third factor, the operating mode, the variation goes from 5 to 54% for all the environmental indicators (Heslouin *et al.*, 2016). For example (table 11) on climate change indicator, continuous operating mode is 28.2% more impactful than start/stop mode when considering the two same other parameters (long haul transportation and fresh product), while the maintenance of the cold chain does not require it. On the other hand, in order to maintain the cold chain quality of fresh sensitive product, it is recommended to use the continuous mode even if it is 33.4% more impactful for urban distribution of fresh product. For other products start/stop can be used.

Table 11 Increase of the environmental impact of the climate change indicator when considering operating mode

	Long haul / Frozen	Long haul / Fresh	Urban distribution / Frozen	Urban distribution / Fresh
Increase of environmental impact when using continuous mode instead of start/stop mode	28.2%	44.6%	21.3%	33.4%

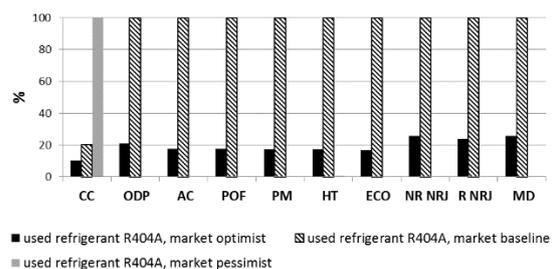
So, for same delivery, a user can have a different environmental footprint than another, and it must be taken into consideration when searching for environmental improvement solutions. The end-user has a role to play when selecting an operating mode. For example, if the end-user decides to use continuous mode for a reason or another, it can lead to an overconsumption of energy and increase of environmental impact. The same observation can be made when considering the type of energy used when the vehicle is parked. It is a choice of the end-user and it was shown above that using electrical energy can be beneficial (depending on the country energy mix). So end-users behaviors (settings of operating mode) have to be analyzed to be sure that the product is used with as less environmental impact as possible while at the same time respecting the cold chain. The best scenario will depend on the business (type of products transported and type of distribution).

### 4.3 Disposal

Disposal treatment impacts have to be considered with caution, because the cutoff method is used which is not representative of the real end of life of the products. However, some conclusions can be made, especially for the end of life treatment of the refrigerant.

#### 4.3.1 Disposal of refrigerant

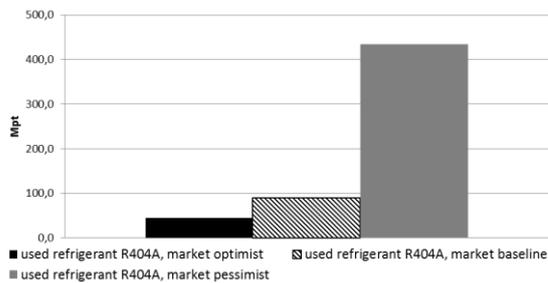
Fig. 6 Results of disposal of refrigerant considering 3 scenarios



As mentioned before, three disposal treatments have been modeled for the refrigerant (venting, reclamation and final disposal). Figure 6 shows that venting (market pessimist) has only a high impact on climate change indicators and a small impact on human toxicity. It is due to the model which is based on Frischnecht (1999) hypothesis, which shows only impacts on these 2 indicators when releasing refrigerant in atmosphere. The two other treatments, reclamation and disposal show impact on other indicators because of energy

needed and emissions generated from the treatment. Normalization highlights that venting treatment is the worst solution because of its high impact on climate change (figure 7). Optimistic scenario allows reducing up to 90% environmental impact due to refrigerant treatment compared to pessimistic scenario and up to 50% compared to the baseline scenario. It is not negligible, even if the end of life has a small contribution to the overall environmental performance of the product life cycle.

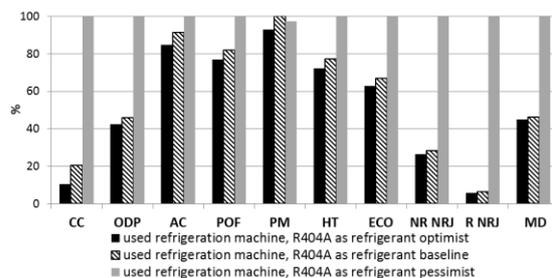
Fig. 7 Normalization results of disposal of the refrigerant



#### 4.3.2 Disposal of the whole product

As we could deduce, results (figure 8) show that optimist treatment of the refrigeration machine is the best solution on all indicators. It is due to the characteristic of the disposal. One limit, of this study, is the use of the cut-off method for recycling of metals. It means that no impacts are taking in consideration for the recycling of metals and this potential influence may reduce or increase the environmental footprint of the end of life for the two scenarios of disposal: optimist and baseline due to the recycling process.

Fig. 8 Results of disposal of refrigeration machine considering 3 scenarios



## 5. Discussion

### 5.1 Impact categories most relevant to road transport refrigeration unit

The most relevant impact categories, for the product, are linked to diesel consumption (climate

change, particulate matter, photochemical ozone formation). These categories are linked to air pollution.

The use of refrigerant fluid is also responsible of air pollution because of its high GWP and its bad management in end-of-life. Impact categories must also be linked to manufacturing (raw material, processes) even if it is rarely the case for cold chain/refrigeration product. Manufacturing has an important part of the environmental footprint, especially ozone depletion, human toxicity, freshwater ecotoxicity and energy and abiotic energy depletion.

### 5.2 Improvements opportunities

Environmental improvement opportunities for these products are numerous. Following improvement opportunities are linked to major source of impacts and cannot be comprehensive:

1. Action on end-user behavior in order to reduce energy consumption. In a way to induce a sustainable behavior, there is the concept design for sustainable behavior. This concept is based on the use of strategies that are retroactive or informative (by giving an ecofeedback), use positive stimulus, or that are obvious by particular design (Wever, et al., 2008), (Tang & Bhamra, 2008), (Bhamra, et al., 2011), (Rodriguez & Boks, 2005), (Lilley, et al., 2005). In fact, there is possible to define seven strategies depending on the involving of the user or the product in the decision-making (Tang, T. & Bhamra, T.A., 2008). There are also some other concepts of innovation, which are based on the usage to improve the product. These concepts are the design thinking and the user-centered design. By making the usage in the center of the development there are sure that they will be used well and meet their public. The product is completely adapted to the user and this is not the user which has to adapt to the product. For example the use of the start/stop mode instead of continuous run for long haul at 0°C (for products which are not sensitive) allows to reduce environmental impact of the use phase of 44.6 % (considering the lifespan of the product), when keeping the safety of the cold chain.
2. Change refrigerant in a refrigerant with a lower GWP or natural like CO<sub>2</sub> or ammonia. For example the use of refrigerant R452A (GWP = 1945) instead of R404A (GWP = 3943 (IPCC, 2013) allow to reduce impact to air emissions when the refrigerant is accidentally venting

without changing the refrigeration machine or the energy consumption.

3. Act on design to reduce and/or control refrigerant leakage, as shown in section 3.2.1 about refrigerant leakage. It should not occur to the detriment of more important impact on the manufacturing or disposal phase. Moreover, reduce refrigerant leakage allow to reduce environmental impact due to refrigerant venting.
4. Act at the end of life of the product by using design for end of life treatment and choice of material. It is also possible to give a dismantling and treatment manual. It should not occur to the detriment of more important impact on the manufacturing or use phase.
5. Act on the design to reduce the quantity of material and assembling, which are difficult to recycle together.

In order to justify these improvement opportunities it is necessary to use environmental indicators to evaluate their potential benefice based on this reference LCA.

### 5.3 To go further

This study does not consider assembling and disassembling/recycling impact, but obviously it will have impacts on environmental footprint. When we are talking of the use phase, it is also considered the choice of the disposal of the product. No specific regulation exists, except for refrigerant; it can be difficult to evaluate the real environmental impact.

Here, the potential benefits of recycling materials at the end of life treatment have not been considered, which can reduce the environmental footprint of the product.

Some inventory data come from literature, to improve the LCA results, it will interesting to have direct data from suppliers.

## 6. Conclusions

This study evaluated the environmental performance of road transport refrigeration unit along its life cycle. The major contribution to the overall impact of the product is due to the use phase and most especially due to the energy consumption and refrigerant leakages. But, environmental impacts are also due to the manufacturing phase. When considering this phase, the components which have the most impact are

the heaviest components and the electronic components. The choice of material and the use of thermoset composites have an impact and also the energetically country mix for the production. The focus on the use phase show that energy consumption becomes the major source of environmental impacts when refrigerant leakages are under control. When talking about refrigerant environmental impacts, companies always refer to GWP and climate change for air emissions, but as it was show production also have high impacts especially on ozone depletion. The environmental impacts of use phase can be influenced by the end-user behaviors. Here we only show the influence of two business parameter and one end-user choice but other analysis, especially on the use of the refrigeration unit can be made as the opening of doors, the temperature of loads, the use of a precooling or not, etc. There are a lot of improvement opportunities, but the major one will be on the use phase and the end-user behaviors, which can double the environmental impact depending on how end user uses the product. This study highlights the necessity to have details of the use phase and not use an average scenario.

## References

- Barnabe F, Khalifa K, Malek A (2003) Life cycle analysis: First stage in the development of new-eco-tools for air conditioning systems designers. International Congress of Refrigeration. - Washington, D.C.
- Barnabe F, Bensafi A (2007) LCA of a transport refrigeration unit and development of an HVAC&R equipment ecodesign tool. International Congress of Refrigeration, Beijing
- Barnitt RA, Chernich D, Burnitzki M et al (2009) Emissions of transport refrigeration units with CARB Diesel, Gas-to-liquid Diesel, and Emissions Control Devices. SAE Powertrain, Fuels, and Lubricants Meeting San Antonio, Texas
- Benini L, Mancini L, Sala S, et al. (2014) Normalisation method and data for Environmental Footprints Report EUR 26842 EN
- Bhamra T, Lilley D, Tang T (2011) Design for sustainable behaviour: using products to change consumer behaviour. The Design Journal 4,14:427-445.
- Cavalier G, Stumpf A (2010) Measurement and simulation of energy consumption of transport refrigerated equipment. 1st Cold Chain Conference. – Cambridge

- Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)
- Ducoulombier M, Sartre V, Bonjour J (2011) Experimental investigation of the infiltration heat load during the opening of a refrigerated truck body. International congress of refrigeration, Prague
- Egede P, Dettmer T, Herrmann C, Kara S (2015) Life cycle assessment of electric vehicles - A framework to consider influencing factors. *Procedia CIRP* 29:233-238
- Fitzgerald WB, Howitt OJA, Smith IJ, Hume A (2011) Energy use of integral refrigerated containers in maritime transportation. *Energy policy* 39:1885-1896
- Frischknecht R (1999) Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel. Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen. Bundesamt für Energie
- Heslouin C, Stumpf A, Pourcheresse L, Perrot-Bernardet V, Perry N, Cornier A (2016) Effects of product usage scenarios on environmental performance for road transport refrigeration units. *Proceeding 4th International Conference on Sustainability and the Cold Chain*, Auckland
- IPCC (2013) Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - Chapter 8*
- ISO 14040 (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework
- ISO 14044 (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines
- Itten R., Frischknecht R. and Stucki M. (2012) Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid. treeze Ltd., Uster, Switzerland, retrieved from: [www.lc-inventories.ch](http://www.lc-inventories.ch)
- Joint Research Center - Institute for Environment and Sustainability (JRC-IES), European Commission (2011) International Reference Life Cycle Data system (ILCD) Handbook - Recommendations for life cycle impact assessment in the European context. First edition. Publications office of the European union, Luxembourg. EUR 24571 EN
- Lilley D, Lofthouse V, Bhamra T (2005) Towards instinctive sustainable products use. 2nd international conference: Sustainability creating the culture. - Aberdeen, UK
- Ma J, Kim HM (2015) Predictive usage mining for life cycle assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 38:125-143
- Michineau T, Cavalier G, Devin E (2014) F-Gases in refrigerated transport. 3rd IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain. London
- Nasuta D, Srichai R, Martin C (2014) Life cycle climate performance model for transport refrigeration/air conditioning systems. ASHRAE Annual Conference. Seattle, WA, USA
- Repice C, Stumpf A (2007) Energy efficiency in transport refrigeration. *International Congress of Refrigeration*. Beijing
- Rodriguez E, Boks C (2005) How design of products affects user behaviour and vice versa: the environmental implications. *Proceedings of Ecodesign*, Tokyo
- Shi J, Li T, Zhang H, Peng S, Liu Z, Jiang Q (2015) Energy consumption and environmental emissions assessment of a refrigeration compressor based on life cycle assessment methodology. *Int J LCA*, 20:947-956. doi: 10.1007/s11367-015-0896-5
- Tang T, Bhamra TA (2008) Changing energy consumption behaviour through sustainable product design. *International Design conference - design 2008*. Dubrovnik - Croatia
- Tassou SA, De-Lille G, Ge YT (2009) Food transport refrigeration - Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport. *Appl Therm Eng* 29:1467-1477. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.06.027
- Telenko C, Seepersad CC (2014) Probabilistic graphical modeling of use stage energy consumption: a lightweight vehicle example. *Journal of Mechanical Design* 136:1-11
- Tereza L (2015) Freight transport with intermodal shipping containers and transport of goods in need of atmosphere control. Zürich : Ecoinvent Centre.
- UNEP (2011) Graedel TE, Allwood J, Birat J-P, Reck BK, Sibley SF, Sonnemann G, Buchert M, Hagelüken C, editors. *Recycling rates of metals - a status report, a report of the working*

group on the global metal flows to the international resource panel; 48 pp.

UNEP (2014) Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps technical options committee

Wever R, van Kujik J, Boks C (2008) User-centred design for sustainable behaviour. International journal of sustainable engineering 1,1:9-20

Wu X, Hu S, Mo S (2013) Carbon footprint model for evaluating the global warming impact of food transport refrigeration systems. J Clean Prod 54:115-124.

## Annexe 3 : Retours de la formation écoconception/ACV

Le tableau suivant présente les résultats des retours de la formation en écoconception et ACV réalisée chez Carrier Transicold. Il s'agit de réponses à plusieurs questions avec un système de notation sur les attentes de la formation, son contenu, le format et de questions ouvertes pour l'améliorer et aider à définir des outils pour combler les manques. Le taux de réponse des participants est de 7/18.

	Niveau de satisfaction (moyenne)	Note la plus basse	Note la plus haute	Échelle de notation
Format de la formation	5,8	5	6	1 : Extrêmement insatisfait 2 : Vraiment insatisfait 3 : Satisfait 4 : Neutre 5 : Satisfait 6 : Très satisfait 7 : Extrêmement satisfait
Temps de management durant la formation	6,1	6	7	
Valeur de la formation pour votre travail	5,7	5	7	
Durée de la formation	5,4	4	6	
Logique/clarté de la présentation et de la communication	6,1	6	7	
Expertise du formateur	6,1	5	7	
La formation a répondu à vos attentes	5,7	5	7	
La formation a été bien organisée	6,1	5	7	
La majorité des sujets sont pertinents pour votre travail	5,8	5	7	
Quels sont les points forts de la formation ?	Bonnes connaissances du sujet et apporte une bonne vision complète de l'écoconception Informations précises et très intéressantes Support de formation très complet Présentation très claire Sensibilisation à l'écoconception et aux impacts environnementaux Apport d'une nouvelle approche pour l'organisation Bonne introduction à l'écoconception			
Quels sont les points faibles de la formation ?	Ça serait mieux avec plus d'exemples Contenu très dense Beaucoup de théorie Plus d'exemples concrets dans nos produits Peur du temps d'implémentation, travail important sur la construction d'une base de données, besoin dans créer une avec les outils existants			
Quelle partie du programme avez-vous le plus appréciée ?	Les principes d'écoconception L'ACV Les principes d'écoconception et les stratégies			



## Annexe 4 : Détails de la réalisation des tests avec Dekra

Cette annexe présente les équipements utilisés et donne des détails sur le déroulement des tests. Les tests expérimentaux ont été réalisés par Dekra qui a certifié les résultats.

### 1. Equipements

Pour réaliser ces tests, 3 semi-remorques équipées d'unités de réfrigération ont été utilisées. Deux semi-remorques identiques ont été utilisées pour réaliser les tests, la troisième a servi de chambre froide. La figure annexe 1 donne un aperçu du positionnement des semi-remorques.

Afin de simuler le chargement 3 types d'équipement ont été utilisés (figure annexe 2) :

- 12 cuves d'eau de 1000 L sur palette remplies au  $\frac{3}{4}$  ;
- 12 palettes avec des cartons ;
- 4 palettes de cartons supplémentaires pour le test 9 ;
- 4 paquets de Tylose de 500 gr (la Tylose est un matériau spécifique utilisé dans les tests standards de réfrigération pour reproduire l'inertie de la viande) ;
- 16 palettes en bois supplémentaires pour le test 6.

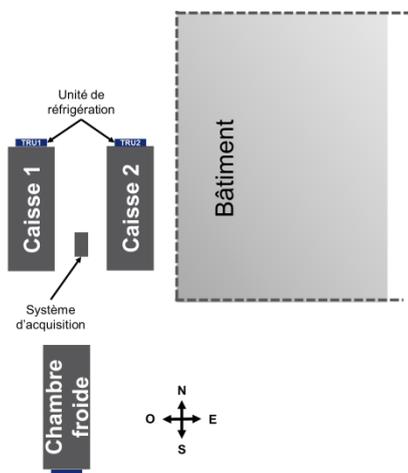


Figure annexe [1] Positionnement des semi-remorques



Figure annexe [2] Simulation du chargement

La figure annexe 3 donne une représentation des chargements dans les semi-remorques en fonction des tests réalisés.

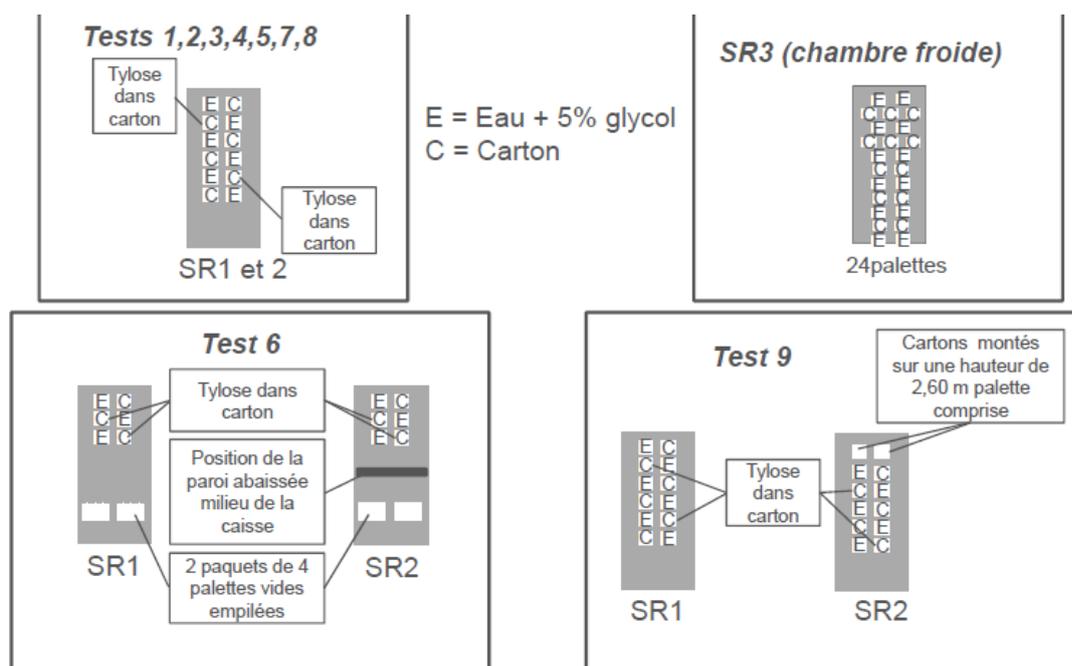


Figure annexe [3] Positionnement des chargements pour les différents tests

Pour l'acquisition des données, plusieurs équipements ont été utilisés (les valeurs données sont les valeurs totales pour les 2 semi-remorques) :

- 2 centrales d'acquisitions AGILENT (température) ;
- 2 centrales d'acquisitions GANTNER (carburant) ;
- 1 pince ampèremétrique (acquisition de la consommation électrique) ;
- 2 réservoirs annexes ;
- 4 débitmètres (2 pour le débit en entrée et 2 pour le débit en sortie) ;
- 1 balance ;
- 66 sondes de température (dont 52 sondes à l'intérieur de la caisse, 4 sondes pour les paquets de Tylose et 10 sondes sur les extérieurs de la caisse) ;
- 2 sondes à inertie ;
- 2 capteurs de portes ;
- 1 sonde de température protégée du vent pour la température ambiante ;
- 1 sonde d'hygrométrie protégée du vent pour l'hygrométrie ambiante.

Des équipements supplémentaires ont été utilisés pour la manutention : 3 transpalettes et 1 chariot élévateur.

#### Acquisition de la consommation de carburant :

L'acquisition des consommations de carburant (figure annexe 4) se fait à l'aide de centrales d'acquisitions de la marque GANTNER. Elles servent à enregistrer le débit (consommation de carburant). La fréquence d'acquisition est de toutes les minutes.

Des débitmètres sont installés en entrée et en sortie du moteur et des sondes de température sont mises en places. Les débitmètres sont de type Oval M-III-LSF45 de la gamme 7 à 500 l/h avec une précision de +/-1 %. La consommation de carburant correspond à la différence entre la mesure en entrée et la mesure en sortie et un coefficient de correction de température de 0,0009/litre/°C est appliqué.

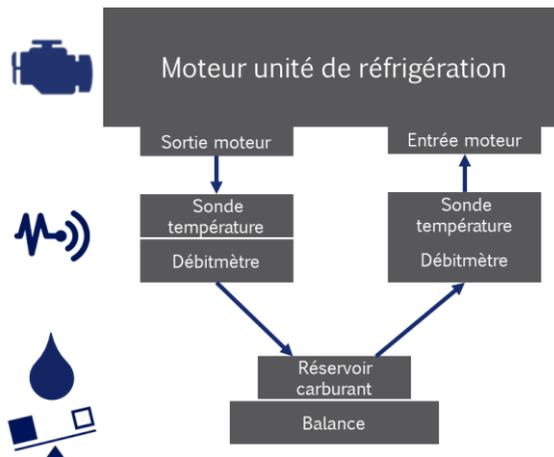


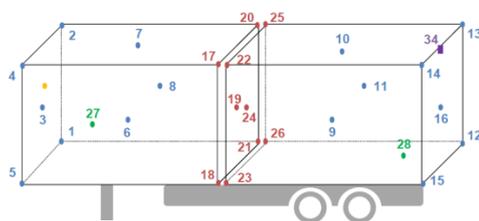
Figure annexe [4] Schéma d'acquisition de la consommation de carburant

En complément, une pesée des réservoirs de carburant est faite en début et fin de test pour vérifier la cohérence des résultats.

#### Acquisition des températures :

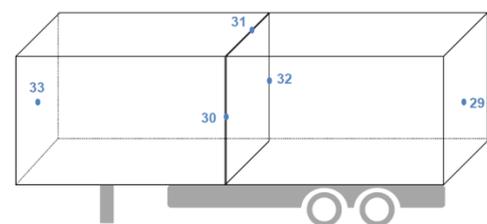
L'acquisition des températures se fait à l'aide des centrales d'acquisitions AGILENT. Elles servent à enregistrer les sondes de températures et les phases d'ouvertures/fermetures des portes à l'aide des capteurs de portes. La marque est AGILENT, le modèle 34972A et les numéros de série sont MY49010570 pour la semi-remorque numéro 1 et MY449020107 pour la semi-remorque numéro 2. La fréquence d'acquisition est de toutes les minutes avec un temps d'acquisition de l'ensemble des voies de moins de 1 seconde.

Les figures annexes 5 et 6 précisent les emplacements des sondes de température à l'intérieur et à l'extérieur selon la norme ISO 16440-1 (Méthodes d'essai des appareils de réfrigération pour moyens de transport isothermes), les sondes de température doivent être situées à 100 mm des parois, du plancher et du plafond dans les 8 coins et au centre des 4 faces internes les plus grandes et à 100 mm des parois pour les sondes extérieures.



- Sonde température
- Sonde à inertie (branché sur Gantner)
- Sonde température cas spécifique test 6
- Thermocouple dans la tylose
- Capteur de porte

Figure annexe [5] Positionnement des sondes de température intérieures



- Sonde température
- Hygrométrie (branché sur Gantner S2)
- Protection du vent

Figure annexe [6] Positionnement des sondes de température extérieures

## 2. Planning

Les tests ont eu lieu en octobre et novembre 2016, à Narbonne (France). La figure annexe 7 donne le planning du déroulement des tests avec une première phase de réception des semi-remorques et d'instrumentation, une seconde phase de réalisation des tests, puis une troisième phase de dés-équipement et de restitution des semi-remorques.

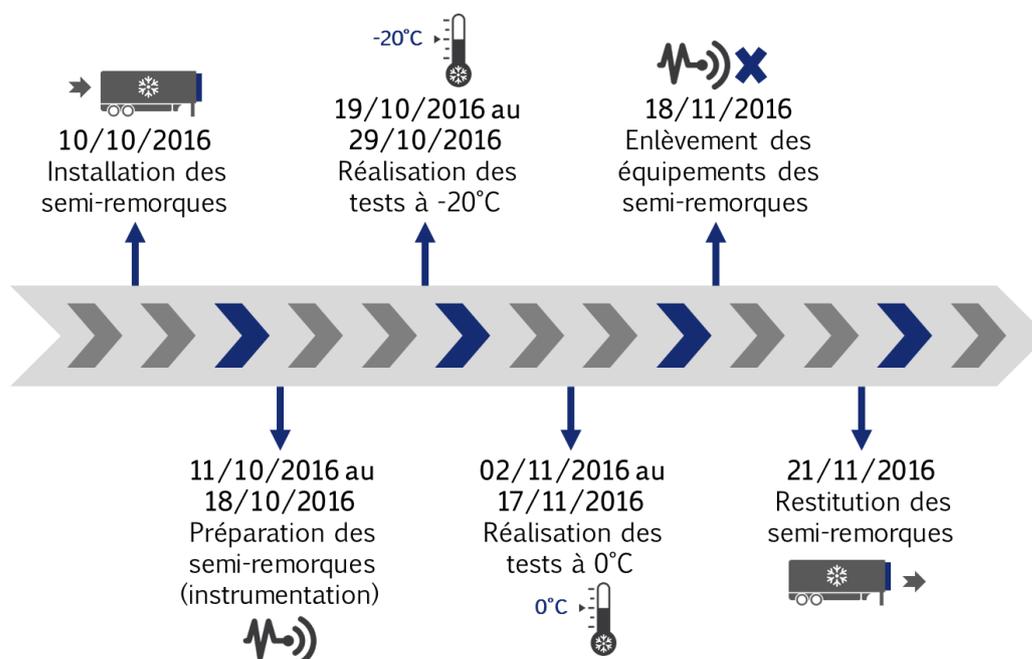


Figure annexe [7] Planning des tests expérimentaux

Lors de la phase de la réalisation des tests, le planning a été fait de manière à pouvoir enchaîner les tests en limitant les changements de température, et les opérations de chargement et déchargement afin de garder l'inertie des caisses. Chaque test a été réalisé deux fois en inversant à chaque fois les conditions (bonnes et mauvaises pratiques) sauf pour le test 5 répété 2 fois, mais sans inversement, car seule une semi-remorque était équipée d'un rideau (qui n'a été utilisé que pour ce test).

## Annexe 5 : Analyse des résultats des tests expérimentaux

L'analyse des tests expérimentaux (liste complète page 166) aboutit à plusieurs résultats.

Dans cette annexe, seul un exemple de résultat est donné pour des raisons de confidentialité. Mais, l'exploitation des autres résultats suit le même processus.

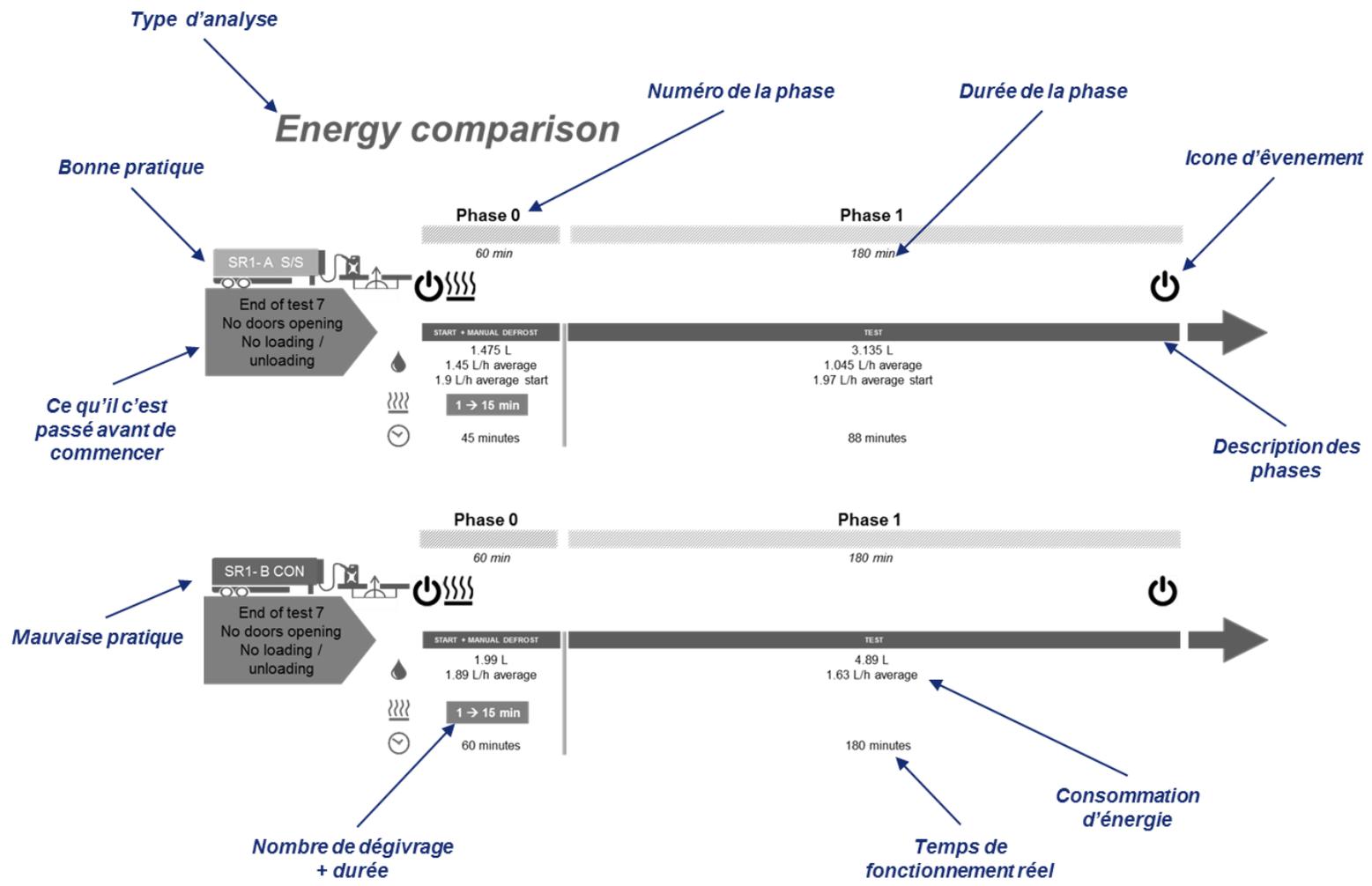
Les résultats se décomposent en plusieurs éléments.

- Une analyse du cycle du test pour la bonne et la mauvaise pratique avec la définition des phases (phase de démarrage et dégivrage manuel ; phase de fonctionnement, phase d'ouverture des portes, et phase de chargement/déchargement) (figure annexe 8). Chacune des phases est analysée avec :
  - sa durée ;
  - le volume de diesel ;
  - la consommation d'énergie moyenne en l/h ou en kWh ;
  - la consommation d'énergie en l/h uniquement sur les périodes de fonctionnement lors de l'utilisation du mode start/stop ;
  - le nombre de dégivrages et la durée ;
  - le temps réel de fonctionnement qui peut différer de la durée de la phase lors de l'utilisation du mode start/stop.
- Une analyse plus poussée des phases avec (figure annexe 9) :
  - une analyse de la consommation énergétique à l'instant t ;
  - une analyse des modes de fonctionnement du moteur thermique ;
  - une analyse des émissions environnementales en CO<sub>2</sub>, particules fines (PM), Monoxyde de Carbone (CO) et Oxydes d'azote + Hydrocarbure (NO<sub>x</sub>+HC) ;
  - une analyse du niveau sonore avec une répartition par mode de fonctionnement du moteur thermique ;
  - une estimation du delta en pourcentage entre la bonne et la mauvaise pratique.
- Une analyse de la température avec (figure annexe 10) :
  - une analyse statistique de la répartition de la température à l'intérieur de la caisse ;
  - une analyse statistique de la répartition de la température dans les paquets de Tylose ;
  - une analyse de la température extérieure ;
  - une validation de la répartition de la température pour la bonne pratique.

Pour l'analyse statistique de la température, les éléments suivants ont été calculés :

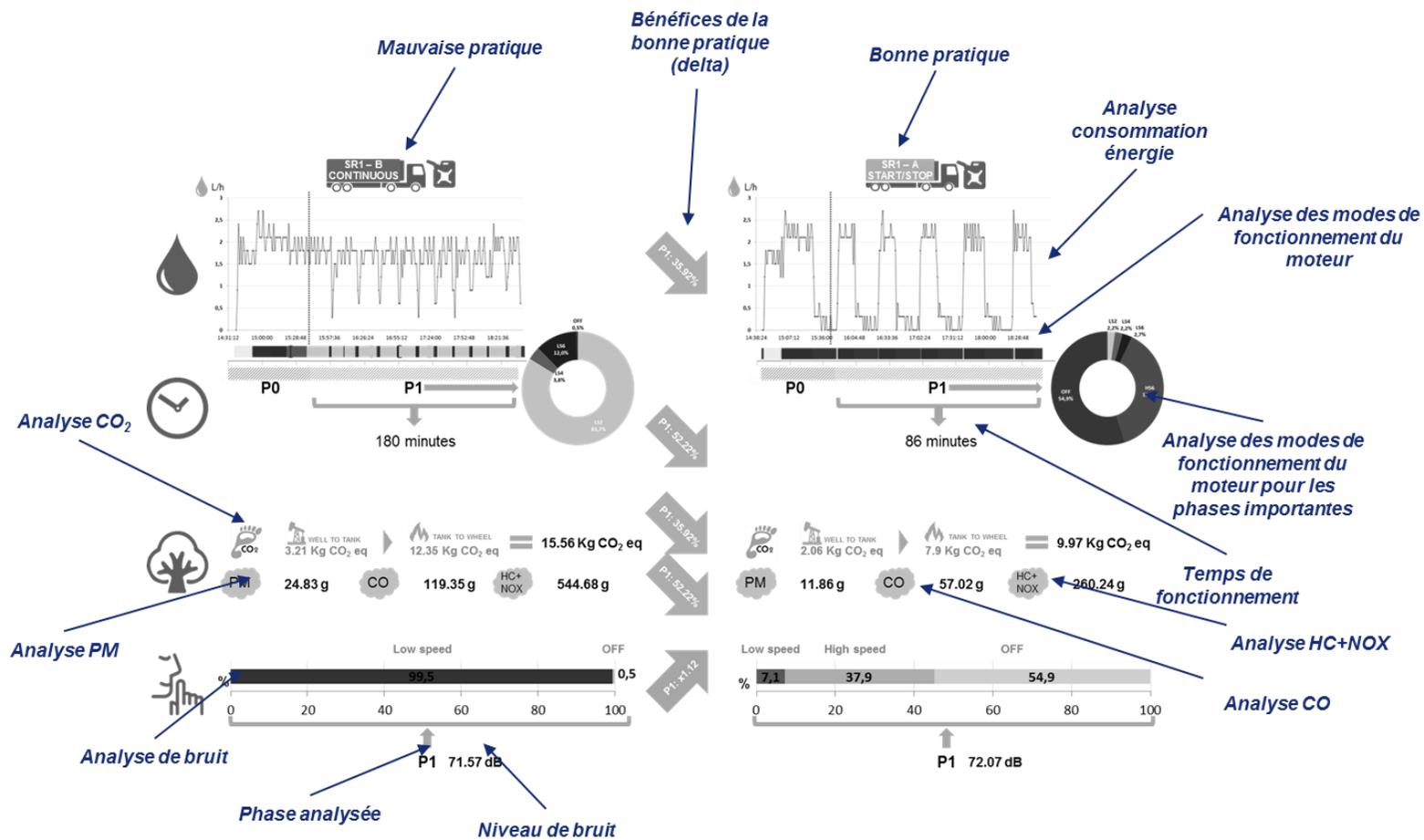
- Q1 : le premier quartile ;
- Min : la valeur minimum ;

- Med : la médiane ;
  - Max : la valeur maximum ;
  - Q3 : le troisième quartile ;
  - la moyenne ;
  - l'écart type.
- 
- Une seconde analyse de la température avec le suivi à l'instant t (figure annexe 11) :
    - de la température à la sonde à inertie ;
    - de la température dans le paquet de Tylose situé du côté de l'évaporateur et de la sonde RAT (retour d'air) incluse dans l'évaporateur ;
    - une identification des pics liés aux dégivrages ou aux ouvertures de portes.



CARRIER PROPRIETARY & CONFIDENTIAL

Figure annexe [8] Exemple d'analyse des cycles des tests



CARRIER PROPRIETARY & CONFIDENTIAL

Figure annexe [9] Exemple d'analyse consommation d'énergie

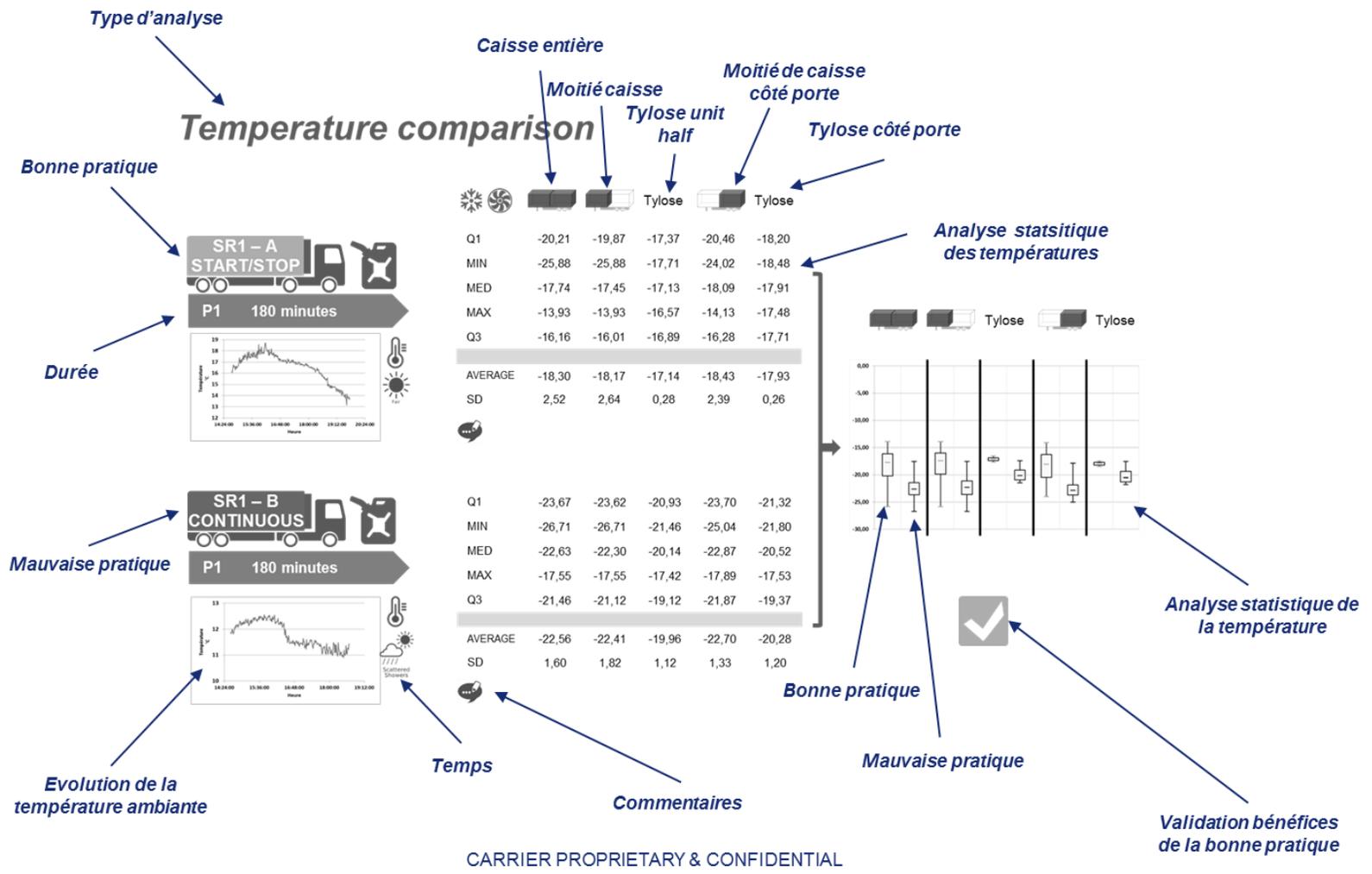
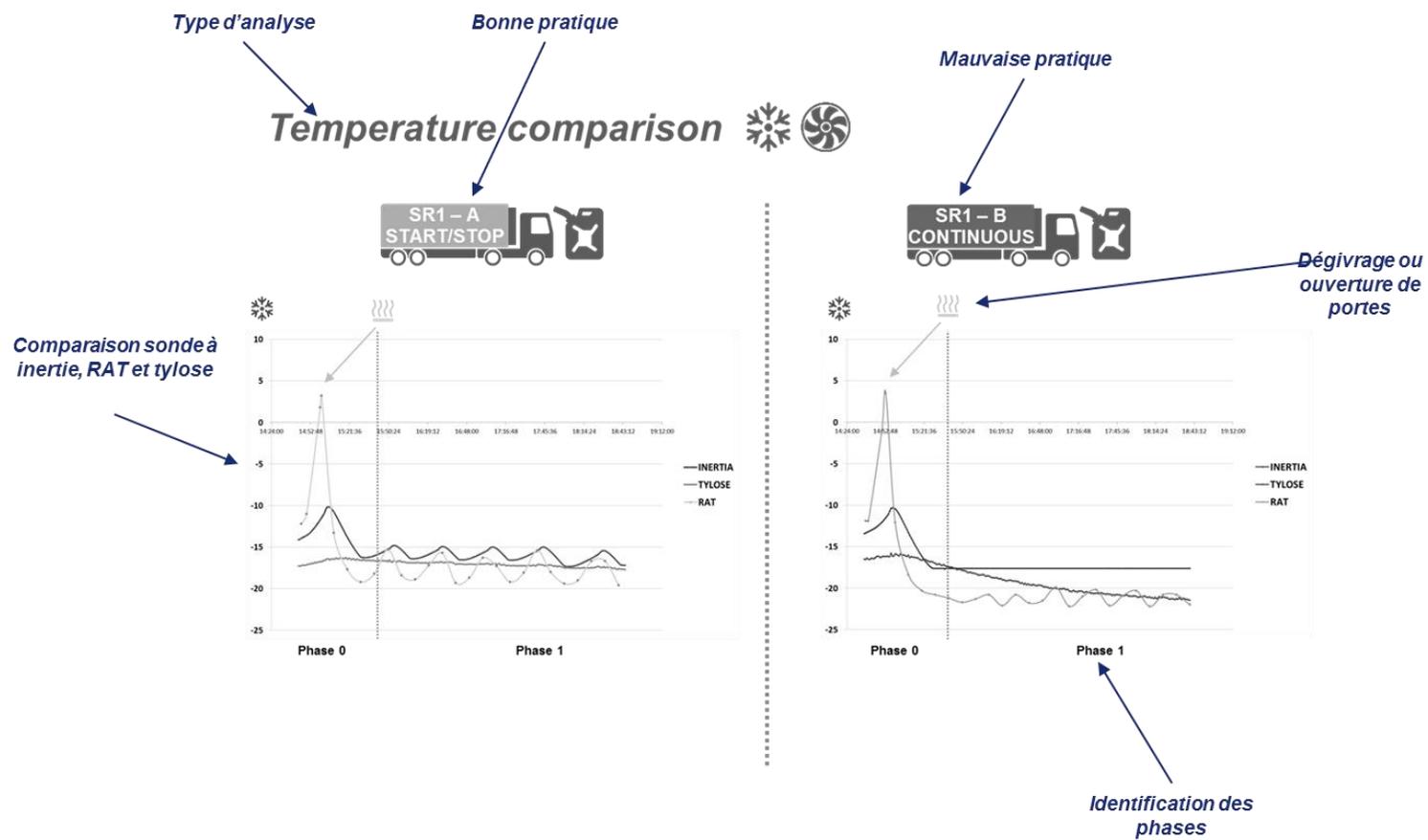


Figure annexe [10] Exemple d'analyse statistique de la température



CARRIER PROPRIETARY & CONFIDENTIAL

Figure annexe [11] Exemple d'analyse de la température à l'instant « t »

## Annexe 6 : Calculs des IPE du démonstrateur de diagnostic de l'usage

1. La consommation de carburant se décompose en 3 IPE : % de surconsommation potentielle par rapport au comportement idéal ; le nombre de litres de diesel équivalents ; le coût correspondant en euros.

- % de surconsommation potentielle par rapport au comportement idéal [%] :

$$\begin{aligned}
 l/an (cas optimal) = & \left[ Nb_{\text{cycle s longue distance international}} * \left( \frac{\%_{\text{produits surgelés transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{surgelés en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\%_{\text{produits frais sensibles transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{\%_{\text{produits frais et secs transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} \right) \right] + \left[ Nb_{\text{cycle s longue distance national}} * \left( \frac{\%_{\text{produits surgelés transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{surgelés en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\%_{\text{produits frais sensibles transportés}}}{100} * \right. \right. \\
 & \left. \left. \sum NRJ_{\text{frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\%_{\text{produits frais et secs transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} \right) \right] + \left[ Nb_{\text{cycle s urbains}} * \left( \frac{\%_{\text{produits surgelés transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{surgelés en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{\%_{\text{produits frais sensibles transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\%_{\text{produits frais et secs transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$l/an (cas client) = \left[ Nb_{\text{cycle s longue distance international}} * \left( \frac{\%_{\text{produits surgelés transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{surgelés en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\%_{\text{produits frais sensibles transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\%_{\text{produits frais et secs transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} \right) \right] + \left[ Nb_{\text{cycle s longue distance national}} * \left( \frac{\%_{\text{produits surgelés transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{surgelés en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\%_{\text{produits frais sensibles transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\%_{\text{produits frais et secs transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} \right) \right] + \left[ Nb_{\text{cycle s urbains}} * \left( \frac{\%_{\text{produits surgelés transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{surgelés en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\%_{\text{produits frais sensibles transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\%_{\text{produits frais et secs transportés}}}{100} * \sum NRJ_{\text{frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} \right) \right]$$

$$\%_{\text{surconsommation diesel}} = \frac{l/an (cas client) - l/an (cas optimal)}{l/an (cas optimal)}$$

Avec :

- $l/an (cas x)$  = la consommation en litres par an pour le fonctionnement de l'unité de réfrigération ;
- $Nb_x$  = nombre de cycles de livraison pour le cycle considéré ;
- $\%_{\text{produits } x}$  = le pourcentage de produits x transportés par le client par an ;
- $NRJ_x$  = consommation de diesel en litres calculée en fonction des comportements dans chacun des cas (optimal, client, non optimal) et des mesures expérimentales en frais ou en surgelés.

- le nombre de litres de diesel équivalents  $[l/an]$  :

$$\text{surconsommation diesel equivalent} = l/an (cas client) - l/an (cas optimal)$$

Avec :

- $l_{/an (cas x)}$  = la consommation en litres par an pour le fonctionnement de l'unité de réfrigération.
  - **le coût correspondant en euros [€/an] :**

$$\text{€/an} = l_{/an (cas client)} * \text{€}_{fuel}$$

Avec :

- $l_{/an (cas client)}$  = la consommation en litres par an pour le fonctionnement de l'unité de réfrigération dans le cas du client ;
- $\text{€}_{fuel}$  = le coût en euro de l'énergie diesel.

2. Le nombre d'heures de fonctionnement se décompose en 3 IPE : % d'heures de fonctionnement supplémentaires potentielles par rapport au comportement idéal ; le nombre d'heures équivalentes par an ; le nombre d'opérations de service (maintenance) supplémentaires par an.
  - **% d'heures de fonctionnement supplémentaires potentielles par rapport au comportement idéal [%] :**

$$\begin{aligned}
& h/an \text{ (cas optimal)} = \\
& \left[ Nb \text{ cycles longue distance internationale} * \left( \frac{\% \text{produits surgelés transportés}}{100} * \sum T \text{ surgelés en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} + \frac{\% \text{produits frais sensibles transportés}}{100} * \sum T \text{ frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} + \frac{\% \text{produits frais et secs transportés}}{100} * \sum T \text{ frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} \right) \right] \\
& + \\
& \left[ Nb \text{ cycles longue distance nationale} * \left( \frac{\% \text{produits surgelés transportés}}{100} * \sum T \text{ surgelés en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} + \frac{\% \text{produits frais sensibles transportés}}{100} * \sum T \text{ frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} + \frac{\% \text{produits frais et secs transportés}}{100} * \sum T \text{ frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} \right) \right] \\
& + \\
& \left[ Nb \text{ cycles urbains} * \left( \frac{\% \text{produits surgelés transportés}}{100} * \sum T \text{ surgelés en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} + \frac{\% \text{produits frais sensibles transportés}}{100} * \sum T \text{ frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} + \frac{\% \text{produits frais et secs transportés}}{100} * \sum T \text{ frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& h/an \text{ (cas client)} = \\
& \left[ Nb \text{ cycles longue distance internationale} * \left( \frac{\% \text{produits surgelés transportés}}{100} * \sum T \text{ surgelés en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} + \frac{\% \text{produits frais sensibles transportés}}{100} * \sum T \text{ frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} + \frac{\% \text{produits frais et secs transportés}}{100} * \sum T \text{ frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} \right) \right] \\
& + \\
& \left[ Nb \text{ cycles longue distance nationale} * \left( \frac{\% \text{produits surgelés transportés}}{100} * \sum T \text{ surgelés en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} + \frac{\% \text{produits frais sensibles transportés}}{100} * \sum T \text{ frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} + \frac{\% \text{produits frais et secs transportés}}{100} * \sum T \text{ frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} \right) \right] \\
& + \\
& \left[ Nb \text{ cycles urbains} * \left( \frac{\% \text{produits surgelés transportés}}{100} * \sum T \text{ surgelés en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} + \frac{\% \text{produits frais sensibles transportés}}{100} * \sum T \text{ frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} + \frac{\% \text{produits frais et secs transportés}}{100} * \sum T \text{ frais en fonction des comportements par phase du cycle de livraison} \right) \right]
\end{aligned}$$

$$\% \text{heures sup} = \frac{h/an \text{ (cas client)} - h/an \text{ (cas optimal)}}{h/an \text{ (cas optimal)}}$$

Avec :

- $h_{/an (cas x)}$  = le nombre d'heures par an pour le fonctionnement de l'unité de réfrigération ;
- $Nb_x$  = nombre de cycles de livraison pour le cycle considéré ;
- $\%_{produits x}$  = le pourcentage de produits x transportés par le client par an ;
- $T_x$  = heure de fonctionnement de l'unité de réfrigération calculée en fonction des comportements dans chacun des cas (optimal, client, non optimal) et des mesures obtenues à partir des tests en frais ou en surgelés.

- le nombre d'heures équivalentes par an [h/an] :

$$heures\ sup = h_{/an (cas\ client)} - h_{/an (cas\ optimal)}$$

Avec :

- $h_{/an (cas x)}$  = le nombre d'heures par an pour le fonctionnement de l'unité de réfrigération.

- le nombre d'opérations de service (maintenance) supplémentaires par an [nb/an] :

$$Nb\ maintenance\ supplémentaire = \frac{h_{/an (cas\ client)}}{Check\ up_{interval}}$$

Avec :

- $h_{/an (cas x)}$  = le nombre d'heures par an pour le fonctionnement de l'unité de réfrigération ;
  - Check up interval = l'intervalle en heure auquel il est recommandé de faire une maintenance de l'unité de réfrigération.
3. Les impacts environnementaux se décomposent en 4 IPE : le changement climatique (kg CO<sub>2</sub> eq par an) ; les émissions de particules fines (kg PM par an), les émissions d'oxydes d'azote (kg de NO<sub>x</sub> par an), les émissions d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone (kg HC + CO par an). Toutes ces mesures sont calculées en émissions potentielles supplémentaires par an par rapport au comportement optimal.
- le changement climatique [kg CO<sub>2</sub> eq par an] :

$$kg CO_{2,eq/an} = \text{surconsommation diesel equivalent} * F_{CO_2}$$

Avec :

- surconsommation diesel equivalent = le nombre de litres de diesel équivalents en litres/an ;
- $F_{CO_2}$  = facteur d'émissions de  $CO_2$  par litre de diesel consommé (émissions résultantes de la combustion et en amont).

- les émissions de particules fines [kg PM par an]

$$kg PM_{eq/an} = (\text{heures sup} * W_{engine}) * \frac{F_{PM}}{1000}$$

Avec :

- heures sup = le nombre d'heures équivalentes par an ;
- $W_{engine}$  = la puissance du moteur en kW ;
- $F_{PM}$  = facteur d'émissions de particules fines en g/kWh.

- les émissions d'oxydes d'azote [kg de  $NO_x$  par an]

$$kg NO_{x,eq/an} = (\text{heures sup} * W_{engine}) * \frac{F_{NO_x}}{1000}$$

Avec :

- heures sup = le nombre d'heures équivalentes par an ;
- $W_{engine}$  = la puissance du moteur en kW ;
- $F_{NOX}$  = facteur d'émissions d'oxydes d'azote en g/kWh.

- les émissions d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone [kg HC + CO par an]

$$kg HC, CO_{an} = (\text{heures sup} * W_{engine}) * \frac{F_{HC,CO}}{1000}$$

Avec :

- heures sup = le nombre d'heures équivalentes par an ;

- $W_{\text{engine}}$  = la puissance du moteur en kW ;
  - $F_{\text{HC,CO}}$  = facteur d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone en g/kWh.
4. La chaîne du froid se décompose en 2 IPE : le nombre additionnel de dégivrages supplémentaires par an ; le nombre d'heures de fonctionnement par an correspondant.
- le nombre additionnel de dégivrages supplémentaires par an [Nb/an]

$$Nb_{\text{dégivrage}}/\text{an} = \left[ \left( \frac{\% \text{produits surgelés transportés}}{100} * Nb_{\text{dégivrage supl en surgelés en fonction des comportements du client par an}} \right) + \left( \frac{\% \text{produits frais (sensibles, frais+secs) transportés}}{100} * Nb_{\text{dégivrage supl en frais en fonction des comportements du client par an}} \right) \right]$$

Avec :

- $\% \text{ produits } x$  = le pourcentage de produits x transportés par le client par an ;
- $Nb_x$  = le nombre de dégivrages supplémentaires par an calculé en fonction des comportements du client et des résultats des expérimentations.

- le nombre d'heures de fonctionnement par an correspondant [h/an]

$$h/\text{an dégivrage} = Nb_{\text{dégivrage}}/\text{an} * \frac{T_{\text{dégivrage}}}{60}$$

Avec :

- $Nb_{\text{dégivrage}/\text{an}}$  = le nombre additionnel de dégivrages supplémentaires par an ;
- $T_{\text{dégivrage}}$  = la durée moyenne d'un dégivrage en minute.

5. Le bruit se décompose en 2 IPE : le pourcentage de temps par mode de fonctionnement du moteur ; les décibels équivalant à chaque mode.

- le pourcentage de temps par mode de fonctionnement du moteur [%]

$$\begin{aligned}
T/\text{mode} = & \left[ \text{Nb}_{\text{Cycle longue distance internationale}} * \left( \frac{\% \text{produits surgelés transportés}}{100} * \sum T_{\text{de fonctionnement dans le mode en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\% \text{produits frais sensibles transportés}}{100} * \sum T_{\text{de fonctionnement dans le mode en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\% \text{produits frais et secs transportés}}{100} * \sum T_{\text{de fonctionnement dans le mode en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} \right) \right] \\
+ & \left[ \text{Nb}_{\text{Cycle longue distance nationale}} * \left( \frac{\% \text{produits surgelés transportés}}{100} * \sum T_{\text{de fonctionnement dans le mode en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\% \text{produits frais sensibles transportés}}{100} * \sum T_{\text{de fonctionnement dans le mode en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\% \text{produits frais et secs transportés}}{100} * \sum T_{\text{de fonctionnement dans le mode en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} \right) \right] \\
+ & \left[ \text{Nb}_{\text{Cycle longue urbains}} * \left( \frac{\% \text{produits surgelés transportés}}{100} * \sum T_{\text{de fonctionnement dans le mode en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\% \text{produits frais sensibles transportés}}{100} * \sum T_{\text{de fonctionnement dans le mode en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} + \frac{\% \text{produits frais et secs transportés}}{100} * \sum T_{\text{de fonctionnement dans le mode en fonction des comportements par phase du cycle de livraison}} \right) \right]
\end{aligned}$$

Avec :

- $T_{\text{mode}}$  = le temps de fonctionnement dans le mode considéré ;
- $Nb_x$  = le nombre de cycles de livraison (pour le cycle de livraison considéré) ;
- % produits x transportés = le pourcentage de produits considérés transportés par le client par an ;
- $T$  = le temps de fonctionnement dans le mode considéré pour le type de produits transportés en fonction des comportements du client et des résultats des tests expérimentaux.

$$\%_{T/\text{mode}} = \frac{T/\text{mode} * 100}{T_{\text{total}}}$$

Avec :

- $T_{\text{total}}$  = la somme de temps par mode pour tous les modes de fonctionnement considérés.

▪ les décibels équivalant à chaque mode [dB(A)]

Il s'agit de valeurs du niveau de bruit en dB(A) mesurées pour chaque mode de fonctionnement de l'unité de réfrigération (électrique, moteur diesel petite vitesse, moteur diesel grande vitesse).

## Annexe 7 : Logique de sélection de l'unité de réfrigération la plus adéquate

1. Logique de définition du type d'activité général du client à la suite de ses déclarations.

Logic to define type of distribution :  
In the spreadsheet « describe your own business »

IF Long haul international + long haul national >50% and urban distribution < 25% Then Long haul distribution, few doors openings

IF Long haul international + long haul national <25 % et urban distribution > 50% Then Urban distribution, frequent doors openings

Else Long haul distribution and Urban distribution, Few or frequent door openings

2. Logique de définition du type de produits transportés à la suite des déclarations du client.

Logic to define type of product :  
In the spreadsheet « describe your own business »

IF Fresh not sensitive >50% et fresh sensitive < 25% et frozen <25% et dry <25% then Fresh not sensitive products

IF Fresh not sensitive >50% et fresh sensitive > 25% et frozen <25% et dry <25% then Fresh not sensitive and Fresh sensitive products

IF Fresh not sensitive >50% et fresh sensitive < 25% et frozen >25% et dry <25% then Fresh not sensitive and Frozen products

IF Fresh not sensitive >50% et fresh sensitive < 25% et frozen <25% et dry >25% then Fresh not sensitive and dry products

IF Fresh sensitive >50% et fresh not sensitive > 25% et frozen >25% et dry <25% then Fresh not sensitive, fresh sensitive and frozen products

IF Fresh not sensitive >50% et fresh sensitive > 25% et frozen <25% et dry >25% then Fresh not sensitive, fresh sensitive and dry products

IF Fresh not sensitive >50% et fresh sensitive < 25% et frozen >25% et dry >25% then Fresh not sensitive, frozen and dry products

IF Fresh sensitive >50% et fresh not sensitive < 25% et frozen <25% et dry <25% then Fresh sensitive products

IF Fresh sensitive >50% et fresh not sensitive > 25% et frozen <25% et dry <25% then Fresh sensitive and Fresh not sensitive products

IF Fresh sensitive >50% et fresh not sensitive < 25% et frozen >25% et dry <25% then Fresh sensitive and Frozen products

IF Fresh sensitive >50% et fresh not sensitive < 25% et frozen <25% et dry >25% then Fresh sensitive and dry products

IF Fresh sensitive >50% et fresh not sensitive > 25% et frozen >25% et dry <25% then Fresh sensitive, fresh not sensitive and frozen products

IF Fresh sensitive >50% et fresh not sensitive > 25% et frozen <25% et dry >25% then Fresh sensitive, fresh not sensitive and dry products

IF Fresh sensitive >50% et fresh not sensitive < 25% et frozen >25% et dry >25% then Fresh sensitive, frozen and dry products

IF Frozen >50% et fresh not sensitive < 25% et Fresh sensitive <25% et dry <25% then Frozen products

IF Frozen >50% et fresh not sensitive > 25% et Fresh sensitive <25% et dry <25% then Frozen and Fresh not sensitive products

IF Frozen >50% et fresh not sensitive < 25% et Fresh sensitive >25% et dry <25% then Frozen and Fresh sensitive products

IF Frozen >50% et fresh not sensitive < 25% et Fresh sensitive <25% et dry >25% then Frozen and dry products

IF Frozen >50% et fresh not sensitive > 25% et Fresh sensitive >25% et dry <25% then Frozen, fresh not sensitive and Fresh sensitive products

IF Frozen >50% et fresh not sensitive > 25% et Fresh sensitive <25% et dry >25% then Frozen, fresh not sensitive and dry products

IF Frozen >50% et fresh not sensitive < 25% et Fresh sensitive >25% et dry >25% then Frozen, Fresh sensitive and dry products

IF dry >50% et fresh not sensitive < 25% et Fresh sensitive <25% et Frozen <25% then dry products

IF dry >50% et fresh not sensitive > 25% et Fresh sensitive <25% et Frozen <25% then dry and Fresh not sensitive products

IF dry >50% et fresh not sensitive < 25% et Fresh sensitive >25% et Frozen <25% then dry and Fresh sensitive products

IF dry >50% et fresh not sensitive < 25% et Fresh sensitive <25% et Frozen >25% then dry and frozen products

IF dry >50% et fresh not sensitive > 25% et Fresh sensitive >25% et Frozen <25% then dry , fresh not sensitive and Fresh sensitive products

IF dry >50% et fresh not sensitive > 25% et Fresh sensitive <25% et Frozen >25% then dry , fresh not sensitive and frozen products

IF dry >50% et fresh not sensitive < 25% et Fresh sensitive >25% et Frozen >25% then dry , Fresh sensitive and frozen products

Else Fresh not sensitive, fresh sensitive, frozen and dry products

3. Logique de définition du type d'unité de réfrigération recommandé à l'aide des déclarations du client et de l'analyse du type d'activité et du type de produits transportés.

## Logic to define recommended unit : In the spreadsheet « calcul sheet »

IF Long haul and multi and night delivery and not sensitive products then Vector 1950 MT city  
IF Long haul and multi and night delivery and sensitive products then Vector 1950 MT city  
IF Long haul and multi and not night delivery and not sensitive products then Vector 1950 MT  
IF Long haul and multi and not night delivery and sensitive products then Vector 1950 MT  
IF Long haul and mono and night delivery and not sensitive products then Vector 1550 city  
IF Long haul and mono and night delivery and sensitive products then Vector 1550 city  
IF Long haul and mono and not night delivery and not sensitive products then Vector 1950 or 1350  
IF Long haul and mono and not night delivery and sensitive products then Vector 1350

IF urban distribution and multi and night delivery and not sensitive products then Vector 1950 MT city  
IF urban distribution and multi and night delivery and sensitive products then Vector 1950 MT city  
IF urban distribution and multi and not night delivery and not sensitive products then Vector 1950 MT  
IF urban distribution and multi and not night delivery and sensitive products then Vector 1950 MT  
IF urban distribution and mono and night delivery and not sensitive products then Vector 1550 city  
IF urban distribution and mono and night delivery and sensitive products then Vector 1550 city  
IF urban distribution and mono and not night delivery and not sensitive products then Vector 1950  
IF urban distribution and mono and not night delivery and sensitive products then Vector 1950 or 1550

IF long haul/urban distribution and multi and night delivery and not sensitive products then Vector 1950 MT city  
IF long haul/urban distribution and multi and night delivery and sensitive products then Vector 1950 MT city  
IF long haul/urban distribution and multi and not night delivery and not sensitive products then Vector 1950 MT  
IF long haul/urban distribution and multi and not night delivery and sensitive products then Vector 1950 MT  
IF long haul/urban distribution and mono and night delivery and not sensitive products then Vector 1550 city  
IF long haul/urban distribution and mono and night delivery and sensitive products then Vector 1550 city  
IF long haul/urban distribution and mono and not night delivery and not sensitive products then Vector 1550  
IF long haul/urban distribution and mono and not night delivery and sensitive products then Vector 1550

Else « »

## Annexe 8 : Liste des publications

Les communications précédées d'un astérisque sont des communications internationales. Pour les présentations orales, l'auteur en gras est l'auteur qui a présenté.



### Conférences avec une communication orale

- **\*Heslouin, C.**, Stumpf, A., Pourcheresse, L., Perrot-Bernardet, V., Perry, N., Cornier, A. *Effects of product usage scenarios on environmental performance for road transport refrigeration units*. 4th International Conference on Sustainability and the Cold Chain, Auckland, 7-9 April 2016.
- **\*Heslouin, C.**, Perrot-Bernardet, V., Cornier, A., Perry, N. *A user oriented framework to support environmental performance indicators selection*. The 24<sup>th</sup> CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Kamakura, Japan, 8-10 March 2017
- **Heslouin, C.**, Perrot-Bernardet, V., Cornier, A., Perry, N. *Méthode orientée acteurs de la chaîne de valeur pour la sélection d'indicateurs de performances environnementales*. 15<sup>e</sup> Colloque National AIP-Priméca, La Plagne, France, 12-14 Avril 2017
- **\*Heslouin, C.**, Pourcheresse, L., Perrot-Bernardet, V., Perry, N. *Is it useful to improve modelling of usage scenarios to improve the environmental footprint of energy-using product?* Poster Highlight. 8<sup>th</sup> International Conference on Life Cycle Management, Luxembourg, 3-6 September 2017



### Conférences avec une communication par affiche

- **Heslouin, C.** *Comment l'analyse des performances environnementales via des indicateurs peut-elle influencer la conception et inciter aux bonnes pratiques d'utilisation des produits ? Cas appliqué au transport routier à température dirigée*. Poster de fin de 2<sup>nd</sup> année doctorale. Arts et Métiers Paristech, juin 2016.
- **\*Heslouin, C.**, Pourcheresse, L., Perrot-Bernardet, V., Perry, N. *Is it useful to improve modelling of usage scenarios to improve the environmental footprint of energy-using product?* 8<sup>th</sup> International Conference on Life Cycle Management, Luxembourg, 3-6 September 2017
- **\*Heslouin, C.**, Pourcheresse, L., Perrot-Bernardet, V., Perry, N. *Integration of environmental performance of usage in the value chain of product*. 8<sup>th</sup> International Conference on Life Cycle Management, Luxembourg, 3-6 September 2017



### Articles avec comité de relecture

- **\*Heslouin, C.**, Stumpf, A., Pourcheresse, L., Perrot-Bernardet, V., Perry, N., Cornier, A. *Effects of product usage scenarios on environmental performance for road transport refrigeration units*. Proceeding 4th International Conference on Sustainability and the Cold Chain, Auckland, April 2016.  
<http://dx.doi.org/10.18462/iir.iccc.2016.0026>

- **\*Heslouin, C.,** Perrot-Bernardet, V., Cornier, A., Perry, N. *A user oriented framework to support environmental performance indicators selection.* The 24<sup>th</sup> CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Procedia CIRP, Vol 61, 2017, pp 709-714.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.211>
- **Heslouin, C.,** Perrot-Bernardet, V., Cornier, A., Perry, N. *Méthode orientée acteurs de la chaîne de valeur pour la sélection d'indicateurs de performances environnementales.* Proceeding 15<sup>e</sup> Colloque National AIP-Priméca, La Plagne, France, 12-14 Avril 2017  
<https://aip-primeca2017.sciencesconf.org/127112>
- **\*Heslouin, C.,** Pourcheresse, L., Perrot-Bernardet, V., Perry, N. *Is it useful to improve modelling of usage scenarios to improve the environmental footprint of energy-using product?* Proceeding. 8<sup>th</sup> International Conference on Life Cycle Management, Luxembourg, 3-6 September 2017 (*publication en cours*)
- **\*Heslouin, C.,** Pourcheresse, L., Perrot-Bernardet, V., Perry, N. *Life cycle assessment of road transport refrigeration unit. (Rédigée, en cours de validation avant soumission au journal : International journal of Life Cycle Assessment).*



#### Article sans comité de relecture

- **Heslouin, C.** *Améliorer les performances environnementales des TRU.* Revue générale du froid et du conditionnement d'air. N°1158, Juillet/Août 2016, pp41-47.



#### Autres communications

- **Heslouin, C.** *Comment l'analyse des performances environnementales peut-elle influencer la conception et l'utilisation des produits dans l'optique de les améliorer ?* Séminaire de recherche Institut des Arts et Métiers Chambéry, Chambéry, 07 décembre 2015.
- **Heslouin, C.** *Comment l'analyse des performances environnementales peut-elle avoir une influence sur la conception et inciter aux bonnes pratiques d'utilisation des produits ? Cas appliqué au transport à température dirigée.* Séminaire laboratoire IMC, Bordeaux, 27 mars 2017.
- **Heslouin, C.** Concours Ma Thèse en 180 s, final HeSAM. Paris, 26 avril 2017. (*finaliste pour les Arts et Métiers, participation à la final HeSAM*)
- **Heslouin, C.** *Comment l'analyse des performances environnementales peut-elle avoir une influence sur la conception et inciter aux bonnes pratiques d'utilisation des produits ? Cas appliqué au transport à température dirigée.* Séminaire EcoSD, Paris, 21 juin 2017.

## PRISE EN COMPTE DES ACTEURS DE LA CHAÎNE DE VALEUR DANS L'ANALYSE DE LA PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE POUR ECOCONCEVOIR ET INCITER A UNE ECO-UTILISATION.

### CAS APPLIQUE AUX PRODUITS CONSOMMATEURS D'ÉNERGIE : UNITES DE REFRIGERATION POUR LE TRANSPORT ROUTIER.

**RESUME :** Pour mettre en place des stratégies d'écoconception, il est nécessaire d'évaluer la performance environnementale. L'emploi d'Indicateurs de Performance Environnementale (IPE) est le meilleur moyen pour y parvenir. Ces IPE doivent être adaptés aux différents acteurs de la chaîne de valeur, internes et externes à l'entreprise, susceptibles d'être impliqués dans l'amélioration de la performance environnementale pour qu'ils soient efficaces. Ces différents acteurs ont des besoins différents en matière d'information (détails, type d'information) et ces besoins peuvent être contradictoires. Nous proposons, dans ces travaux, une méthode de sélection des IPE prenant en compte tous les acteurs de la chaîne de valeur et leurs besoins. Une fois les IPE définis, ils doivent permettre d'évaluer la situation, de définir des stratégies d'écoconception et de suivre l'évolution de la performance environnementale. Pour certains produits consommateurs d'énergie en phase d'utilisation, le scénario d'usage peut faire varier de manière importante la performance environnementale. Un focus est donc fait sur la mise en place de stratégies d'éco-utilisation. Il est nécessaire que les stratégies mises en place permettent aux clients/utilisateurs de diminuer leurs impacts environnementaux et à l'entreprise de prendre un avantage concurrentiel tout en améliorant la performance environnementale de ses produits. Dans ces travaux, cela se traduit par : 1) l'adaptation d'outils d'écoconception existant pour l'intégration des acteurs de la chaîne de valeur ; 2) la définition d'une méthode de diagnostic personnalisé de l'usage des produits. Ces méthodes ont été appliquées et validées sur le cas d'étude des unités de réfrigération pour le transport routier à température dirigée.

**Mots clés :** Ecoconception - Eco-utilisation - Indicateurs de Performance Environnementale - Consommation d'énergie - Chaîne de valeur - Diagnostic et mesure de l'usage

## CONSIDERATION OF VALUE CHAIN ACTORS IN THE ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL PERFORMANCE FOR ECODSIGN AND INCENTIVE FOR SUSTAINABLE BEHAVIOR. CASE STUDY OF ENERGY-USING PRODUCTS: ROAD TRANSPORT REFRIGERATION UNITS

**ABSTRACT:** To implement ecodesign strategies, it is necessary to evaluate the environmental performance. The use of Environmental Performance Indicators (EPI) is a good way to achieve this. These EPI, to be effective, must be adapted to the various value chain actors, internal and external to the company, susceptible to be involved in the improvement of the environmental performance. These different actors have different needs regarding information (details, type of information) and these needs may be contradictory. In this work, we propose a method for selecting EPI that take into account the value chain actors and their needs. Once the EPI have been defined, they must be able to assess the situation, define ecodesign strategies and monitor the evolution of environmental performance. For some energy-using products, the usage scenario can significantly vary the environmental performance. A focus is thus put on the development of sustainable behavior strategies. It is necessary that the strategies put in place allow customers/users to reduce their environmental impact and that the company takes a competitive advantage while improving the environmental performance of its products. In this study, this is reflected in: 1) the adaptation of existing ecodesign tools for the integration of value chain actors; 2) the definition of a method of personalized diagnosis of the use of products. These methods have been applied and validated by the case study of road transport refrigeration units.

**Keywords :** Ecodesign - Sustainable behavior - Environmental Performance Indicators - Energy consumption - Value chain - Usage diagnosis