



HAL
open science

Développement d'un outil d'aide à la décision environnementale basé sur l'analyse de cycle de vie intégré au processus de conception

Marion Prinçaud

► **To cite this version:**

Marion Prinçaud. Développement d'un outil d'aide à la décision environnementale basé sur l'analyse de cycle de vie intégré au processus de conception. Sciences de l'environnement. Arts et Métiers ParisTech, 2011. Français. NNT : 2011ENAM0006 . pastel-00589315

HAL Id: pastel-00589315

<https://pastel.hal.science/pastel-00589315>

Submitted on 28 Apr 2011

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

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

École doctorale n° 432 : SMI – Sciences et Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

THÈSE

Pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Génie Industriel "

Présentée et soutenue publiquement par

Marion PRINÇAUD

Le 11 Avril 2011

Développement d'un outil d'aide à la décision environnementale basé sur l'Analyse de Cycle de Vie intégré au processus de conception

Directeur de thèse : **Daniel FROELICH**
Co-encadrement de la thèse : **Alain CORNIER**

Jury

M. Mickael GARDONI , Professeur, Département Génie de la production automatisée, Ecole de Technologie Supérieure	Rapporteur
M. Dominique MILLET , Professeur, Département CSM, Supméca Toulon	Rapporteur
M. Gérard BLAKE , Professeur honoraire, Université de Savoie	Examineur
Mme Isabelle BLANC , Professeur, Centre Energétique et Procédés, MINES ParisTech	Examineur
M. André FALCHI , Docteur-Ingénieur, Pole Eco-Innovation, APESA Innovation	Examineur
Mme Catherine BONNARD , Responsable éco-conception, chef de projet ISO 14001, Direction Architecture d'Ensemble et systèmes de Plate-forme Ingénierie Systèmes Navals de Surface, DCNS	Invitée

RESUME

L'éco-conception est aujourd'hui une démarche qui interpelle de plus en plus le monde industriel. C'est l'un des meilleurs moyens pour prendre en compte les impacts d'un produit sur l'environnement, i.e. les évaluer et les améliorer. Or intégrer l'éco-conception dans un processus de conception et pouvoir en faire dès l'avant-projet, s'avère extrêmement difficile lorsque les produits sont très complexes car soumis à de nombreuses contraintes (réglementaires, techniques, technologiques,...). C'est à cette problématique qu'ont été confrontés les concepteurs de DCNS (constructeur naval), et à laquelle, par le biais de cette thèse, nous avons essayé de répondre.

En intégrant plus en amont les aspects environnementaux dans un processus de conception, grâce à la création de briques de données, basées sur le modèle de briques technologiques (concept très usité dans l'ensemble des entreprises), il devient plus aisé de déployer une démarche d'éco-conception qui s'appuie sur des outils d'aide à la décision adaptés, efficaces et efficaces. La méthodologie proposée permet alors de s'affranchir des habituels points faibles d'une démarche d'évaluation environnementale (l'accès aux bases de données) et d'amélioration environnementale (le manque de connaissances métiers spécifiques aux produits). Ainsi, un outil d'éco-conception « complet », l'OCEAN, basé sur l'ACV et dédié aux navires a été développé sur ce principe.

Mots clés : éco-conception, ACV (Analyse de Cycle de Vie), méthodologie, intégration, outil d'aide à la décision, paramètre environnemental, brique de données, évaluation environnementale, amélioration des performances, éco-indicateur spécifique, navire, océan.

Eco-design is an approach that is increasingly used in the industrial world today. It is one of the best ways to take into account the environmental impacts of a product on the environment, i.e. to assess and improve them. Yet integrating eco-design into the design process as early as the preliminary design stage is extremely difficult when products are very complex, since they are subjected to numerous constraints (regulatory, technical, technological...). The designers at the shipbuilding company DCNS were confronted with this problem, and we have tried to help them answer it in this paper.

When environmental aspects are integrated further upstream in the design process, through the creation of data bricks based on the technological brick model (a concept frequently used in most companies), it is easier to deploy an eco-design approach based on appropriate, effective and efficient tools. The methodology proposed here makes it possible to avoid the usual drawbacks of environmental assessment (access to data bases) and environmental improvement (the lack of specific professional knowledge specific to the products). Based on this principle, we developed a "complete" eco-design tool called OCEAN, designed for shipbuilding and based on lifecycle analysis (LCA).

Key words: eco-design, LCA (Life Cycle Analysis), methodology, integration, decision support tool, environmental parameter, data brick, environmental assessment, performance improvement, specific eco-indicator, ship, ocean.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui m'auront permis directement ou indirectement de mener à bien cette thèse.

Je remercie tout d'abord Alain CORNIER pour m'avoir proposé ce travail de thèse et donné l'opportunité de participer à un projet enrichissant aussi bien professionnellement que personnellement.

Je souhaite également remercier Daniel FROELICH pour avoir accepté d'être mon directeur de thèse.

Je remercie encore les membres de jury qui ont accepté de juger mon travail de thèse, et plus particulièrement, Mickael GORDONI et Dominique MILLET, ainsi qu'Isabelle BLANC, Gérard BLAKE et André FALCHI.

Je remercie aussi l'ensemble des partenaires du consortium. Chez DCNS, notre partenaire privilégié, je remercie Yves PIERSON, Catherine BONNARD, Patrick MAILLARD et Léonie ROLLAND, ainsi que toutes les personnes rencontrées à DCNS, sans qui le projet n'aurait pas pu aboutir. Chez Sita Suez, je remercie Laurent GALTIER et Anthony SIMAO, qui m'ont fait penser à Léonard et son disciple. Chez Ifremer, je remercie Olivier LEFORT, Daniel MASSON, Sarah DUDUYER et Medhi ABADANE, qui y fut de passage, mais avec qui j'ai beaucoup donné de mon temps pour obtenir un bon indicateur marin. Et enfin, chez Bureau Veritas, je remercie Philippe CORRIGNAN et Martial CLAUDE-PIERRE pour leurs remarques toujours pertinentes lors des débats en plénières.

Evidemment, je remercie tous mes collègues de l'institut ; je remercie en particulier Marianne, Mylène, Sébastien et Suzanne pour les moments de détente passés ensemble pendant les (mes) p'tites pauses goûter, Lisa pour quelques moments inoubliables, Sabine pour son « irremplaçabilité », et Bertrand pour sa disponibilité et sa serviabilité (avec un joli sourire, ça passe toujours mieux !).

Merci à tous les étudiants, du mastère aussi bien que les PFE, qui ont fait les petites mains pour ce projet. Avec une mention spéciale pour mon chouchou Guillaume.

Je remercie du fond du cœur tous mes collègues ou anciens collègues du « plateau thésards », qui sont devenus des amis. Merci à Marlène, Sophie, Manu, Simon, Gauthier et Félix. Merci à Claire et à Jade (qui est passé du côté obscur de la force, puisqu'elle était mon contact chez DCNS au début) qui ont bien voulu relire quelques morceaux de ce qui va suivre. Merci à Carole et à Yann, les docteurs diplômés, pour leurs conseils avisés, les débats lancés, leurs expériences qu'ils ont bien voulu partager avec moi. Merci enfin à Charlotte, qui je crois aura supporté mes humeurs plus que les autres ! Et merci à Olivier, sans qui l'outil tel qu'il est n'aurait jamais pu voir le jour. Ça a été laborieux, mais je crois que nous y sommes arrivés !

Merci à tous mes amis. A tous ceux de ma promo qui ont partagé cette expérience un peu folle de thésard. Merci entre autres à Eddy pour les nombreuses heures passées ensemble à discuter de nos problèmes de thèse respectifs et plus encore. Merci à Aurélie, ma « pinpine du nord » pour les discussions endiablées sur MSN, à refaire le monde, et pour le schéma ! Merci aussi à Thomas, à

Marie et à Christophe. Et une pensée pour Eugénie, ma « jumelle » de parcours qui elle aussi, galère, mais à Londres.

Et un très grand merci à toute ma famille qui m'a soutenue pendant ces trois années (bon, avant aussi c'est vrai, mais là, ça compte encore plus !). Merci à ma Nano pour ses appels du dimanche. Merci à ma Granny pour m'avoir bien fait rire. Merci à mon papou, qui a quand même réussi à venir me voir deux fois ! Merci à Ben pour ses conseils design. Merci à ma p'tite morue préférée pour avoir su me remonter le moral quand il le fallait ! Et surtout, merci à ma vieille biquette et à son acolyte. Merci pour leurs relectures assidues, leur soutien, et encore désolée qu'il ait fait si moche à chaque fois... mais heureusement, la raclette était là !

En un mot comme en mille : MERCI !

Et comme l'a dit Gandhi, « Sois le changement que tu veux voir dans le monde ».

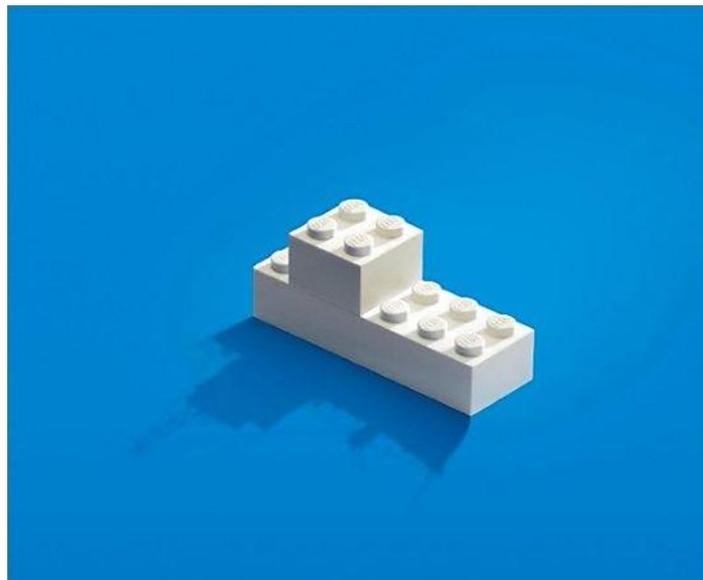


Image Lego ®



*« Parler rarement est conforme à la nature.
Un tourbillon ne dure pas toute la matinée.
Une averse ne dure pas toute la journée.
Qui les produit ? Le ciel et la terre.
Si les phénomènes du ciel et de la terre ne sont pas durables
Comment les actions humaines le seraient-elles ? »*

Extrait du chapitre XXIII, « Tao-tö king », LAO-TSEU (570-490 avant J.-C.)

SOMMAIRE

INDEX DES FIGURES

INDEX DES TABLEAUX

LISTE DES ACRONYMES UTILISES

INTRODUCTION **1**

CHAPITRE 1) VERS UNE CONCEPTION PLUS RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT **5**

1. LE CONTEXTE GLOBAL ACTUEL : LA PRISE DE CONSCIENCE ENVIRONNEMENTALE	5
1.1. UNE PRISE DE CONSCIENCE GENERALE	5
1.2. LA NECESSITE D'UN DEVELOPPEMENT DURABLE	6
1.3. DES ENJEUX ECONOMIQUES, SOCIAUX, SOCIETAUX	7
1.4. LA CREATION DE GROUPES DE TRAVAIL DEDIES A L'ENVIRONNEMENT : LES GRENELLE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MER	10
1.5. UNE REPONSE ENVIRONNEMENTALE	12
2. LA MISE EN PLACE DE LEGISLATIONS ENVIRONNEMENTALES	13
2.1. DES LEGISLATIONS « CURATIVES » : VERS UNE OBLIGATION DE REPARATION DES PREJUDICES ET DOMMAGES ENVIRONNEMENTAUX	14
2.2. DES LEGISLATIONS PREVENTIVES DEDIEES AUX PRODUITS	15
2.3. DES LEGISLATIONS PREVENTIVES DEDIEES AUX SUBSTANCES	18
2.3.1 La création d'une liste de substances dites prioritaires	18
2.3.2 Des substances anthropiques qui ont des conséquences sur l'environnement	19
2.3.3 Un exemple de bioaccumulation et de ses conséquences	20
2.4. L'EAU : UNE RESSOURCE ET UN ENVIRONNEMENT PARTICULIEREMENT CONCERNES PAR LES MECANISMES DE POLLUTIONS ANTHROPIQUES	21
2.4.1 L'eau, une ressource préservée par la mise en place de réglementations	21
2.4.2 Les peintures antifouling : un exemple de législation visant à protéger le milieu aquatique	23
2.5. LA NECESSITE D'ANTICIPER ET D'ETRE PROACTIF	23
3. LE CADRE DU PROJET CONVENAV	24
3.1. LES PROBLEMATIQUES INHERENTES A LA MER ET AUX NAVIRES	24
3.1.1 Le transport maritime	24
3.1.2 L'évolution de la flotte mondiale	27
3.2. LES REFLEXIONS SOULEVEES PAR CES CONSTATS	30
3.2.1 La nécessité de concevoir différemment	30
3.2.2 La problématique générale de cette thèse	31
3.3. UN CONSORTIUM POUR REpondre A DES BESOINS SPECIFIQUES	32
3.3.1 Le contexte du consortium	32
3.3.2 Des besoins et des exigences spécifiques : intégrer l'approche environnementale lors de la conception des navires	32

3.3.3	Le projet CONVENAV : un projet ambitieux, à double objectif	33
3.3.4	Un consortium multi-compétent	34

CHAPITRE 2) L'ECO-CONCEPTION EN ENTREPRISE – PLACE DU PARAMETRE ENVIRONNEMENTAL DANS LES DIFFERENTES APPROCHES **37**

1.	L'ECO-CONCEPTION ET SON INTEGRATION CLASSIQUE EN ENTREPRISE	37
1.1.	LE PROCESSUS DE CONCEPTION : BREF RAPPEL	37
1.2.	LES PROCESSUS DE RECONCEPTION ET D'INNOVATION	38
1.3.	L'ECO-CONCEPTION	41
1.3.1	Approche d'un aspect du développement durable par la conception	41
1.3.2	Le processus d'éco-conception	45
1.3.3	Les outils d'éco-conception	48
1.3.4	L'ACV, un outil d'éco-conception ?	53
1.4.	LES LIMITES DE L'ACV TELLE QU'ELLE EST UTILISEE AUJOURD'HUI	57
1.5.	QUELLES SONT LES CAUSES DE CETTE INADAPTATION DE L'ACV EN CONCEPTION ?	58
1.6.	L'APPROCHE PROPOSEE POUR POUVOIR UTILISER L'ACV LORS DE LA CONCEPTION D'UN PRODUIT	63
2.	EMERGENCE D'UN ENSEMBLE DE PRODUITS SUPPORTANT L'INTEGRATION DU PARAMETRE ENVIRONNEMENTAL VIA LA MISE EN PLACE D'UN OUTIL D'ECO-CONCEPTION BASE SUR L'ACV	66
2.1.	UNE DEMARCHE SYSTEMIQUE D'INTEGRATION DANS UN PROCESSUS DE CONCEPTION PREEXISTANT	66
2.2.	QUELQUES EXEMPLES D'INTEGRATION DE L'ECO-CONCEPTION DANS DES PROCESSUS DE CONCEPTION LONGS	69
2.2.1	L'intégration du paramètre environnemental chez VOLVO : l'implication des fournisseurs	70
2.2.2	L'intégration du paramètre environnemental chez RENAULT : vers un affichage de l'amélioration des produits	72
2.2.3	L'intégration du paramètre environnemental chez EUROCOPTER : une vision aide à la conception	74
2.3.	UNE DEMARCHE COMMUNE POUR REpondre A DES BESOINS SIMILAIRES	76
3.	L'INTEGRATION DE L'ECO-CONCEPTION CHEZ DCNS	78
3.1.	LES PROCESSUS DE CONCEPTION, DE RECONCEPTION ET D'INNOVATION CHEZ DCNS	78
3.1.1	Quelques notions sur la construction et la structuration d'un navire conçu par DCNS	78
3.1.2	Les acteurs de la conception chez DCNS	80
3.1.3	Les processus de conception, reconception et innovation de DCNS	82
3.2.	LA DEMARCHE ENVIRONNEMENTALE CHEZ DCNS	89
3.2.1	Ce qui existe déjà	89
3.2.2	Ce qu'attendent les équipes de conception DCNS de l'OCEAN	100

CHAPITRE 3) METHODOLOGIE POUR L'INTEGRATION DU PARAMETRE ENVIRONNEMENTAL DANS UN PROCESSUS DE CONCEPTION – CAHIER DES CHARGES DE L'OEC **103**

1.	QUELLES SONT LES CARACTERISTIQUES PERMETTANT A UN PRODUIT COMPLEXE DE SOUTENIR UNE ECO-CONCEPTION BASEE SUR L'ACV DES LA PHASE D'AVANT-PROJET ?	103
1.1.	UN PRODUIT COMPLEXE IMPLIQUANT UNE CONCEPTION STRUCTUREE	103

1.2.	LES CONDITIONS D'APPLICATION DE LA METHODE	105
1.3.	UNE DEMARCHE COLLABORATIVE ET PARTICIPATIVE GRACE A LA CREATION DE BRIQUES DE DONNEES	106
2.	LA CREATION DE L'OUTIL D'ECO-CONCEPTION BASE SUR L'ACV	112
2.1.	LES INFORMATIONS QUI DOIVENT ETRE CONTENUES DANS UNE BRIQUE DE DONNEES	112
2.1.1	Le type de données	112
2.1.2	Des informations saisies différentes en fonction des protagonistes	114
2.2.	LA CREATION ET L'INTEGRATION DU PARAMETRE ENVIRONNEMENTAL DANS LA DEMARCHE DE CONCEPTION : DEUX ETAPES NECESSAIRES	115
2.2.1	La création du paramètre environnemental	116
2.2.2	La cotation du paramètre environnemental	118
2.2.3	L'intégration du paramètre environnemental : initiation de la boucle synergique et collaborative	121
2.2.4	Utilisation du paramètre environnemental dans le processus de conception : Fonctionnement de la boucle synergique établie	124
3.	STRUCTURATION GENERALE DE L'OUTIL D'ECO-CONCEPTION BASE SUR L'ACV – UNE VISION DEVELOPPEMENT INFORMATIQUE DE L'OUTIL	127
3.1.	LA LOGIQUE DE FONCTIONNEMENT DE L'OUTIL	127
3.2.	L'OUTIL D'UN POINT DE VUE INFORMATIQUE – CAHIER DES CHARGES GLOBAL	128

**CHAPITRE 4) APPLICATION DE LA DEMARCHE - CREATION D'UN OUTIL D'ECO-CONCEPTION DEDIE
AUX NAVIRES : L'OCEAN** **133**

1.	IDENTIFICATIONS DES BESOINS SPECIFIQUES A L'OCEAN	133
2.	DU CHOIX D'UNE METHODE DE CALCUL D'IMPACT VERS LA NECESSITE D'UN INDICATEUR MARIN SPECIFIQUE : L'ECO-INDICATEUR MER	137
2.1.	LES ECO-INDICATEURS ET LES METHODES D'EVALUATION D'IMPACTS EXISTANTS	137
2.1.1	Identification des critères à évaluer pour réaliser l'ACV d'un navire	137
2.1.2	Les éco-indicateurs : définition	137
2.1.3	Le choix d'une méthode de calcul d'impact	139
2.2.	LES LIMITES DE LA METHODE CML 2001 POUR L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES NAVIRES	142
2.3.	UN NOUVEL ECO-INDICATEUR : L'EIM	143
2.3.1	La logique de l'EIM	143
2.3.2	Les modules utilisés dans l'EIM	145
2.3.3	Le calcul des impacts sur les nouveaux compartiments	148
3.	LA CONSTRUCTION DE L'OUTIL DE CONCEPTION, EVALUATION ET AMELIORATION DES NAVIRES : L'OCEAN	152
3.1.	LES MODULES DE L'OCEAN	152
3.2.	L'OCEAN DU POINT DE VUE DEVELOPPEMENT INFORMATIQUE – QUELQUES INFORMATIONS PRATIQUES.	154
3.3.	L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE	155
3.3.1	Un calcul d'impact similaire à celui réalisé par un logiciel d'ACV	155
3.3.2	Une simplification de la saisie des données	159
3.3.3	Des résultats du type ACV	163
3.4.	LES MOYENS D'AMELIORATION DE LA EN CONCEPTION ET D'AIDE A L'ECO-CONCEPTION	169
3.4.1	La nécessité d'une bonne définition de l'UF	169
3.4.2	L'aide à l'amélioration du produit	170

3.4.3	L'aide à l'éco-conception du produit	172
4.	LES LIMITES DE L'OCEAN	176
CHAPITRE 5) PERSPECTIVES DE L'OUTIL ET DE LA DEMARCHE		179
1.	LES PERSPECTIVES DE L'ECO-INDICATEUR MARIN	179
2.	LES PERSPECTIVES DE L'OCEAN	180
2.1.	UN OUTIL UTILISABLE DES LA FIN DE SON DEVELOPPEMENT	180
2.2.	LA POSSIBILITE DE LOCALISER LES IMPACTS SUR UN MODELE 3D	181
2.3.	LA POSSIBILITE D'ACCOMPAGNER LE NAVIRE JUSQU'A SON DEMANTELEMENT	182
3.	LES PERSPECTIVES D'APPLICATION D'UN OUTIL COMME L'OCEAN A DES PRODUITS DIFFERENTS	184
3.1.	UNE DEMARCHE APPLICABLE A L'ENSEMBLE DES PRODUITS COMPLEXES	184
3.2.	VERS LA CREATION DE STOCK DE BRIQUES DE DONNEES AU FORMAT UNIQUE	184
4.	LES PERSPECTIVES D'APPLICATION DE CETTE DEMARCHE D'INTEGRATION DU PARAMETRE ENVIRONNEMENTAL DANS UN PROCESSUS DE CONCEPTION DE PRODUITS DIFFERENTS	187
4.1.	UNE DEMARCHE PERMETTANT LA MISE EN PLACE D'UN OUTIL D'ECO-CONCEPTION COMPLET	187
4.2.	DES CRITERES TRANSPOSABLES A D'AUTRES PRODUITS	189
CONCLUSION GENERALE		191
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		195
ANNEXES		205

INDEX DES FIGURES

Figure 1-1. Evolution de l’empreinte écologique mondiale entre 1961 et 2005. La biocapacité de la planète a été dépassée dans les années 80, i.e. pour subvenir à l’ensemble des besoins de la population mondiale, il faudrait plus d’une planète.....	6
Figure 1-2. Le développement durable, un équilibre entre trois principes fondamentaux : stabilité économique, responsabilité sociétale et protection de l’environnement.....	7
Figure 1-3. Graphique montrant la date d’épuisement des richesses exploitables au rythme actuel de consommation, et d’après les stocks actuels prouvés (SCIENCES&VIE, 2008).	8
Figure 1-4. Origine de la pollution des océans : 75% proviennent des effluents industriels et urbains, et 15% directement des activités maritimes (pêche, navigation,...) (FNH, 2006a).....	11
Figure 1-5. Schéma d’un cycle de vie classique (CIRAIG, 2010).....	12
Figure 1-6. Emissions moyennes de CO ₂ par km des voitures neuves immatriculées en France chaque mois, de janvier 2003 à juillet 2009 (PAPPALARDO, et al., 2010). Cette diminution peut être imputée au bonus/malus.	16
Figure 1-7. L’étiquette environnementale classique ; elle permet au consommateur de choisir l’équipement le plus énergétiquement performant.	16
Figure 1-8. Evolution des émissions de gaz à effet de serre en France depuis 1990 et objectif à 2050 (PAPPALARDO, et al., 2010).....	17
Figure 1-9. Le phénomène de bioaccumulation : plus le niveau de la chaîne trophique est important plus la concentration en substances est importante. Dans ce modèle trophique, c’est le Beluga qui est le réceptacle final.....	21
Figure 1-10. Comparaison des émissions de CO ₂ entre différents modes de transport (ARMATEURS-de-FRANCE, 2010)	24
Figure 1-11. Emissions annuelles relatives au transport : émissions de CO ₂ en Tg(C), de NO _x en Tg(N), de SO ₂ en Tg(S), et en PM ₁₀ en Tg(PM). Et consommations de fuel en MT estimées pour l’an 2000 (EYRING, et al., 2005).....	25
Figure 1-12. Observation et prévision du phénomène d’acidification des océans via le niveau de saturation en aragonite des organismes planctoniques de 1765 à 2100. Ce phénomène est dû principalement à l’augmentation du CO ₂ (qui est transféré de l’atmosphère vers l’eau) mais aussi des émissions de NO _x . CO ₂ et NO _x acidifient les eaux et ce faisant, dissolvent les tests du Plancton, appauvrissant l’océan en ressource primaire, et donc ayant potentiellement le pouvoir de toucher l’ensemble des chaînes trophiques liées à cette ressource (ORR, et al., 2005).....	26
Figure 1-13. Une plage bretonne lors d’un phénomène de marée verte. La plage est recouverte par un tapis d’algues.	26
Figure 1-14. Indices de croissance économique mondiale (PIB), production industrielle de l’OCDE, exportations mondiales de marchandises (en volume) et trafic maritime (en volume), 1994-2006 (1994=100) (CNUCED, 2007).	28
Figure 1-15. Evolution de la flotte mondiale de navires démolis (pour les navires de 100 Gt et plus) (ISEMAR, 2010). On constate que contrairement à ce qui pourrait être attendu, le nombre de navires démolis n’augmente pas avec le nombre de navire construits.....	28
Figure 1-16. Représentation schématique d’une analyse des besoins (WIGUM, 2004)	33

Figure 2-1. Schéma des étapes d'un processus de conception et de développement classique d'un produit (ISO-14062, 2003).....	39
Figure 2-2. Schéma d'une <i>supply chain</i> classique, associée aux contraintes liées les plus fréquents	40
Figure 2-3. Evolution en fonction des phases de conception de l'incertitude sur les contraintes et les opportunités lors du cycle de vie d'un produit, en parallèle des coûts et du délai qu'engendrent une action corrective. Traduit de (WIGUM, 2004).....	41
Figure 2-4. Les 4 grands niveaux de reconception/innovation avec le temps nécessaire à leur mise en place et leur efficacité. Modifié d'après (TEULON, 2008) et (LAGERSTEDT, 2003).	41
Figure 2-5. La recherche en conception et ses relations avec les phases d'un projet, traduit et modifié d'après (WIGUM, 2004).	42
Figure 2-6. Les contraintes à prendre en compte lors de la conception d'un produit. L'environnement est la petite dernière de la liste, mais compte autant que les autres. Si l'une d'elles n'est pas respectée, toute la conception peut être remise en cause (LUTTROP, et al., 2006).....	44
Figure 2-7. Applications possibles pour prendre en compte la notion de durabilité (et donc de l'éco-conception) durant un processus de conception (WIGUM, 2004).....	45
Figure 2-8. Schéma du cycle de vie d'un produit : la fin de vie est peu considérée, sinon du point de vue mise en décharge ou incinération. Le lien entre la FdV d'un produit et la possibilité de créer une nouvelle source de matériaux est assez peu exploité. La gestion des ressources naturelles et de la FdV sont les axes de réflexion majeure à développer pour réellement mettre en place un cycle de vie fonctionnant en boucle fermée.	46
Figure 2-9. Le schéma du cycle de vie avec ses entrants et ses sortants. Quelle que soit l'étape de ce cycle de vie, il peut exister : des consommations de matières premières et d'énergies, ainsi que des rejets dans l'air, dans l'eau ou encore sous forme de déchets.	48
Figure 2-10. Les 4 grands niveaux d'éco-conception en fonction du temps nécessaire à leur mise en place et leur efficacité. En parallèle, la correspondance de ces niveaux d'éco-conception et des systèmes étudiés. Modifié d'après (TEULON, 2008), image Gingko21.	49
Figure 2-11. Innovation et éco-conception. Un juste équilibre et une dynamique à trouver (TEULON, 2008) (image Ginkgo 21).....	49
Figure 2-12. Exemple de modèle générique de prise en compte des aspects environnementaux dans le processus de conception et de développement de produit, d'après la norme (ISO-14062, 2003).....	51
Figure 2-13. Classement des outils d'éco-conception en fonction de leurs performances d'évaluation et d'amélioration environnementales. D'après (LE POCHAT, 2005a).....	53
Figure 2-14. Place d'un OEC (Outil d'Eco-Conception) idéal par rapport aux outils existants. Modifié d'après (LE POCHAT, 2005a)	54
Figure 2-15. La démarche classique d'utilisation de l'ACV : un produit existant est virtuellement découpé en sous-ensembles, puis analysé selon une méthode de calcul d'impact. A partir de ces résultats, certains composants sont « repensés » en vue d'améliorer leurs impacts (images LEGO ®).	61
Figure 2-16. La constitution d'une brique technologique : un accès limité aux informations concernant les composants de rang N.	63
Figure 2-17. La difficulté à prendre en compte le paramètre environnemental lorsqu'il n'est pas intégré à la conception.....	64
Figure 2-18. Le processus de la thèse.	66

Figure 2-19. Les caractéristiques du processus de conception « type ».....	67
Figure 2-20. Les différentes catégories de marchés de l'Environnement (BSR, 2007)	70
Figure 2-21. La transformation de facteurs limitant en conditions de succès (BSR, 2007).	71
Figure 2-22. La constitution du stock de briques de données par récupération des données fournisseurs, avec le contrôle des substances, et les actions nécessaires pour y parvenir.....	73
Figure 2-23. La valorisation des efforts en éco-conception pour interagir avec le client. Dans la fenêtre « évaluations environnementales », le schéma en haut à gauche est la cotation du label CO2, le graphique en haut à droite représente l'augmentation du taux de CO2 atmosphérique, le dessin en bas à gauche est une jauge à essence et le graphique en bas à droite représente le prix du baril de pétrole.....	75
Figure 2-24. Les phases de vie des aéronefs, objets d'études spécifiques dans le projet Clean Sky (CLEANSKY, 2010).....	76
Figure 2-25. L'évaluateur de technologies en développement dans le projet Clean Sky (CLEANSKY, 2010).....	77
Figure 2-26. Les fonctionnalités d'un OEC mises en avant chez Eurocopter	78
Figure 2-27. Les protagonistes nécessaires à l'intégration de l'OEC dans une entreprise, qu'elle soit une PME ou une grande entreprise. L'analyste environnemental est soit intégré dans l'équipe de conception (quand l'entreprise en a les moyens), soit externe (à titre de consultant). Il est l'élément indispensable au démarrage de l'intégration de l'éco-conception au sein d'une entreprise.	79
Figure 2-28. Quelques systèmes d'un navire armé DCNS.....	80
Figure 2-29. Schéma de la structure générale d'une frégate avec son découpage transversal (en anneaux) et longitudinal (en ponts) (image DCNS).....	82
Figure 2-30. Les protagonistes du processus de conception chez DCNS.	82
Figure 2-31. . La boucle de conception itérative appliquée à un navire. Chacune de ces étapes est répétée jusqu'à l'obtention d'un niveau de précision suffisant et acceptable. La conception ne peut avancer tant qu'une étape n'est pas satisfaite et satisfaisante.	85
Figure 2-32. Les différentes architectures nécessaires pour concevoir un NA.....	86
Figure 2-33. Cycle en V du processus NA (DCNS, 2007b) (image dégradée pour raison de confidentialité).....	88
Figure 2-34. Les premiers résultats de la modélisation ACV de la frégate La Fayette, selon la méthode de calcul d'impact CML 2001. La fabrication (en vert) est moins impactante que l'utilisation (en rouge).	92
Figure 2-35. Les résultats de l'ACV de la frégate La Fayette pour la phase de fabrication, selon la méthode de calcul d'impact CML 2001. La coque (en rouge), la vie à bord (en vert d'eau) et la propulsion (en jaune) sont les éléments les plus impactants.	93
Figure 2-36. Les résultats de l'ACV de la frégate La Fayette pour la phase d'utilisation, selon la méthode de calcul d'impact CML 2001. La production électrique de bord (en vert) et la propulsion (en jaune) sont les éléments les plus impactants.	94
Figure 2-37. ECOSHIP : un projet de navire éco-conçu : une coque en aluminium, une voile type kite surf, des panneaux solaires,... (Image mer et marine).....	95
Figure 2-38. Résultats en éco-points de l'ACV du navire BIS, par la méthode de calcul d'impact EI 99 (H).	95
Figure 2-39. L'optimisation du système de propulsion : un ensemble intégré hélice/safran ou « pod ».....	96

Figure 2-40. Les 3 étapes permettant de déterminer le niveau d'implication de la conception du produit par rapport à l'éco-conception.....	98
Figure 2-41. Un exemple de spécifications observables dans un cahier des charges DCNS.....	99
Figure 2-42. La classification des aspects réglementaires : respect des législations en vigueur, anticipation des législations à venir et démarche proactive.....	100
Figure 2-43. Les 3 grands niveaux d'intégration de l'éco-conception, basés sur le cahier des charges et l'état des législations : l'approche standard, l'approche volontariste et l'approche éco-conçue.	101
Figure 3-1. Définition d'un système ou produit complexe.	105
Figure 3-2. Les 4 grandes conditions rendant possible l'utilisation d'un OEC basé sur l'ACV dès l'avant-projet.....	107
Figure 3-3. Une démarche participative et collaborative pour intégrer le paramètre environnemental au processus de conception.	108
Figure 3-4. L'approche ACV classique : la difficulté de mettre en place une évaluation environnementale pour un produit fini composé de briques technologiques (images LEGO ®). Le découpage réalisé pour effectuer une ACV est de faible qualité.....	109
Figure 3-5. La proposition de la méthodologie de travail : le produit n'est assemblé qu'après avoir réuni l'ensemble des composants, des briques nécessaires (images LEGO ®).	110
Figure 3-6. Pour une même brique de données, la possibilité de moduler différents composants qui auront la même fonction.	110
Figure 3-7. L'assemblage de différents composants en un ensemble peut constituer une nouvelle brique de données.....	111
Figure 3-8. Les informations contenues par une brique de données : chaque phase de vie d'un produit se redécoupe en sous-phases, plus adaptées à la représentation « réelle ». Les informations contenues seront utilisables pour réaliser une analyse de cycle de vie soit de ce composant, soit du produit final dans lequel il s'insèrera.	115
Figure 3-9. Les étapes suivies par un concepteur pour intégrer le paramètre environnemental dans sa démarche de conception.....	117
Figure 3-10. Un affichage des impacts à 100% : tous les impacts sont caractérisés, et non normalisés. (« Comp. A » = « composant A »)	120
Figure 3-11. La méthodologie permettant de guider l'utilisateur vers les éléments à améliorer du point de vue impact environnemental. Il peut choisir de ne travailler que sur une catégorie d'impact, ou sur l'ensemble de catégories d'impacts. La classification des impacts ne tient pas compte de la valeur « réelle » de l'impact. Cela permet de hiérarchiser les impacts qualitativement (et non pas quantitativement, ce qui n'est possible que lorsque les catégories d'impact sont normalisées).	120
Figure 3-12. Initiation de la démarche d'intégration du paramètre environnemental.	124
Figure 3-13. Un double affichage pour aider le concepteur dans le choix de ses matériaux/éléments : une liste d'éléments déjà modélisés, et une liste d'éléments déjà comparés	125
Figure 3-14. Des ensembles de briques de données. Constitués de briques élémentaires, ils symbolisent des groupes d'éléments comme par exemple, une pompe et tout son système de tuyauterie.	126

Figure 3-15. L'utilisation du paramètre environnemental dans le processus de conception : une aide à la conception et à l'amélioration du produit.....	127
Figure 3-16. Le schéma global de la méthodologie : une synergie « vertueuse ».....	128
Figure 3-17. Extrait de l'interface du prototype de l'OEC développé : présentation de quelques-unes des fonctionnalités informatiques d'un OEC basé sur l'ACV.	130
Figure 3-18. Les modules permettant l'articulation de l'OEC.....	131
Figure 4-1. Des substances contributives à un (ou des) effets sur l'environnement vers la caractérisation des impacts.....	140
Figure 4-2. Représentation schématique de la modélisation selon Simple Box (BRANDES, et al., 1996) : plusieurs niveaux d'échelles spatiales sont pris en compte. Une substance peut interagir dans chacun des compartiments représentés.....	142
Figure 4-3. Le compartiment aquatique d'eau salée, tel que modélisé et pris en compte par la méthode de calcul d'impact CML 2001 VS la réalité du milieu : un panel très vaste de compartiments marins.....	144
Figure 4-4. L'impossibilité d'insérer des nouveaux compartiments marins dans les modèles existants.	145
Figure 4-5. Une nouvelle modélisation, basée sur les valeurs d'écotoxicités marines calculées d'après CML 2001.....	146
Figure 4-6. Graphique illustrant les impacts d'un navire (en fonction d'un profil de navigation) en potentiel de toxicité sur quelques-unes des nouvelles zones définies.....	152
Figure 4-7. Les modules permettant le bon fonctionnement de l'OCEAN. Les utilisateurs sont bien identifiés pour ce produit, les BDD et méthodes de calcul d'impacts définies, et le module spécifique au produit est pris en compte (l'EIM).	154
Figure 4-8. L'IHM de l'OCEAN : un outil fonctionnant sur un navigateur.	156
Figure 4-9. Les interfaces de saisie des données dans l'OCEAN et dans SimaPro.	157
Figure 4-10. Résultats de l'ACV du produit test sous SimaPro, par la méthode de calcul d'impact CML 2001.....	157
Figure 4-11. Comparaison des résultats obtenus selon SimaPro et l'OCEAN pour un même produit modélisé : les calculs donnent les mêmes valeurs d'impact. Pour une meilleure lisibilité, les résultats obtenus avec SimaPro ont été triés en fonction des catégories d'impact utilisées dans l'OCEAN.	159
Figure 4-12. Les valeurs d'impact comparées entre SimaPro et OCEAN, pour le module « electricity mix/AT S ».....	159
Figure 4-13. Exemple d'un fichier type pouvant être directement téléchargé dans l'OCEAN. L'utilisateur n'a qu'à renseigner les cellules correspondant aux premières lignes : du niveau d'AP, de la nomenclature et de la masse.	160
Figure 4-14. Accès à l'AP du navire dans l'IHM.....	161
Figure 4-15. Des onglets pour chaque phase et sous-phase de vie : une IHM plus intuitive ...	161
Figure 4-16. Les informations à renseigner dans chacun des onglets. Ce format est le même pour l'ensemble des onglets, sauf pour les onglets concernant les modes opérationnels, qui ne comportent que les consommations et rejets associés.....	162
Figure 4-17. L'accès à la BDD Eco Invent, et l'affectation du module sélectionné.	163

Figure 4-18. Des BDD Eco Invent aux Briques de Données : une « transformation des données technologiques en données environnementales.	164
Figure 4-19. La possibilité d'afficher les résultats soit par phases de vie, soit par AP.....	165
Figure 4-20. La possibilité de visualiser les résultats sous forme d'histogrammes et de tableaux de valeurs.	166
Figure 4-21. Le résultat graphique de l'évaluation par l'EIM associé à l'évaluation des impacts par CML 2001	167
Figure 4-22. La possibilité de tracer les impacts : en cliquant sur un contributeur (la phase de fabrication ici, avec le rectangle noir du haut), l'outil affiche un nouveau graphique montrant l'ensemble des contributeurs inférieurs (les matériaux + les procédés + les consommations ici, avec le rectangle noir du bas).....	168
Figure 4-23. Le guidage de l'utilisateur vers les contributeurs les plus impactants.	169
Figure 4-24. Les étapes permettant la définition d'une UF.	171
Figure 4-25. Les étapes permettant l'amélioration d'un élément.....	172
Figure 4-26. Les étapes permettant de mettre à disposition d'aide à la conception.	173
Figure 4-27. Les étapes 1 à 4 permettant l'aide à la conception.	174
Figure 4-28. L'étape 5 permettant l'aide à la conception.....	175
Figure 4-29. Les étapes 7 à 9 permettant l'aide à la conception.	176
Figure 4-30. La non implication de l'un des protagonistes impliquera nécessairement un échec de la démarche d'intégration de l'outil d'éco-conception dans le processus de conception.	178
Figure 5-1. La possibilité de saisir un code permettant la localisation des éléments.....	181
Figure 5-2. La possibilité de localiser les impacts à bord du navire grâce à l'intégration du paramètre de localisation des éléments (image : N. BRADBEER, 2010, "Wind Turbine Assisted Frigate", Marine Unconventional Design Symposium 2010, London, University College London). ...	182
Figure 5-3. La possibilité de localiser les substances dangereuses, toxiques et / ou nocives. .	183
Figure 5-4. La possibilité de localiser les éléments pouvant / devant être extraits en amont du démantèlement global, en vue d'une FdV spécifique (réutilisation ou recyclage en filière spécifique).	183
Figure 5-5. Des briques de données spécifiques à chaque type de produit, mais une démarche identique pour les mettre en place.....	184
Figure 5-6. Les données concernant la phase de fabrication : des données renseignées par les fournisseurs, quelle que soit la destination de la brique.	185
Figure 5-7. Les fournisseurs au centre de la démarche pour la création des briques de données	186
Figure 5-8. Les fournisseurs au cœur de la démarche d'intégration du paramètre environnemental dans le processus de conception.....	186
Figure 5-9. Les fournisseurs et les concepteurs, et leur apport spécifiques, pour permettre la bonne intégration et le bon fonctionnement d'un outil d'éco-conception complet.....	188
Figure 5-10. L'ensemble des paramètres permettant d'accroître les performances d'un OEC pour ses capacités à évaluer et à améliorer les produits. Modifié d'après (JANIN, 2000).	188

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1-1. Chiffrage (en dollars US) des services rendus par les différentes zones humides (COSTANZA, et al., 2007).....	9
Tableau 1-2. Extrait de la liste des substances prioritaires dans le domaine de l'eau (PARLEMENT-EUROPEEN, 2001b).	19
Tableau 1-3. Estimation des volumes (en millions de tonne – lège) de démolition futurs des navires civils (MIDN, 2006). Le pic de 2010 correspond à l'année butoir pour le retrait définitif des pétroliers à simple coque.....	30
Tableau 2-1. Différents outil d'éco-conception avec les fonctions et leurs caractéristiques (LE POCHAT, et al., 2007b).....	53
Tableau 2-2. Quelques exemples de logiciels d'ACV complète (PONS, 2008). Les comparaisons entre logiciels ont été réalisées entre : Umberto VS TEAM, SimaPro VS Gabi et KCL Eco VS EcoLab VS GEMIS (ces deux derniers n'ayant pas été repris lors de la synthèse).....	56
Tableau 2-3. Extrait de l'Arborescence Produit d'un NA de DCNS : la frégate FREMM	79
Tableau 2-4. Les étapes du processus de conception de DCNS (UE : Unités Emménagement, RFP : Request For Proposal, RFI : Request For Information, RFQ : Request For Quotation) (image floutée pour raison de confidentialité)	85
Tableau 2-5. Les étapes du processus de conception et les acteurs concernés par chacune d'entre elles.....	87
Tableau 2-6. Les acteurs de la conception chez DCNS, et leurs liens avec l'intégration de l'OEC ; leurs objectifs, leurs contraintes, le résultat et les gains attendus, et leur apport nécessaire pour une bonne intégration de l'OEC.	102
Tableau 3-1. L'origine des renseignements entrés dans l'OEC. Exemple d'application pour les navires.	115
Tableau 4-1. Extrait du cahier des charges définissant les fonctionnalités à créer dans l'OCEAN, d'un part dans la version démonstrateur, mais aussi qui devront être présentes dans une version définitive de l'outil (version commercialisable).	135
Tableau 4-2. Extrait de la liste des substances caractérisées pour l'EIM. La caractérisation des substances est en « potentiel de toxicité ».	146
Tableau 4-3. Les compartiments aquatiques définis et leur indice de vulnérabilité. Cet indice est pondéré par le profil d'usage du navire (donné en pourcentage du temps passé dans chaque zone) (ABADANE, et al., 2009).....	148
Tableau 4-4. La caractérisation des substances par un potentiel de toxicité, en fonction des quantités émises selon le calcul d'impact réalisé par CML 2001	149
Tableau 4-5. Les étapes de calcul permettant de quantifier les impacts d'un navire sur l'eau et sur les sédiments associés, en fonction des compartiments marins, de leur vulnérabilité, du temps de navigation passé dans chacun, des substances en jeu et de leur toxicité. La valeur de l'impact peut être lue selon l'unité « potentiel de toxicité ».	150

LISTE DES ACRONYMES UTILISES

ACV : Analyse de Cycle de Vie

ANR : l'Agence Nationale de la Recherche

BDD : Base De Données

CONVENAV : CONception et cycle de Vie Environnemental des NAVires

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

DD : Développement Durable

EB : Expression de Besoins

EC : éco-conception

EI : Eco-Indicateurs ou indicateurs environnementaux

EIM : Eco-Indicateur Mer

FdV : Fin de Vie

GES : Gaz à Effet de Serre

IHM : Interface Homme Machine

ISD : Inventaire des Substances Dangereuses

NQE : Norme Qualité Environnementale

OCEAN : Outil de Conception, Evaluation et Amélioration des Navires

OEC : Outil d'Eco-Conception

PEC : Concentration Environnementale Prévisible

PNEC : Concentration Environnementale Non Prévisible

PRECODD : PRogramme de Recherche sur les Ecotechnologies et le Développement Durable

R&D : Recherche et Développement

TGD : *Technical Guidance Document*

UF : Unité Fonctionnelle

INTRODUCTION

« *Nous n'avons pas hérité la Terre de nos ancêtres, mais l'empruntons à nos enfants.* » Antoine De SAINT EXUPERY.

Aujourd'hui, en l'an 2010, la population mondiale se trouve dans un contexte de crise. Crise économique, crise sociale, crise sociétale, crise politique, crise géopolitique, crise environnementale. L'avenir semble sans importance pour certains, ou incertain pour d'autres. Il est pourtant clair que si rien n'est fait, la situation ne pourra pas s'améliorer d'elle-même. Le mode de vie actuel mène la population vers une impasse. Les gens, les collectivités, les pouvoirs publics, les entreprises assistent et participent plus ou moins directement et volontairement à une prise de conscience : le monde tel que nous le connaissons, dans lequel nous avons grandi, change. Il ne suffit plus à satisfaire l'ensemble de nos besoins et de nos désirs. Selon les modèles « empreintes carbone », il y a déjà vingt ans que la planète est surexploitée, et que les Hommes lui prennent plus que ce qu'elle peut effectivement produire. Notre société est bâtie sur le pétrole. Or nous sommes dépendants de cette ressource amenée inexorablement vers son épuisement. Il devient donc urgent de revoir nos modes de vie, nos modes de pensées. Un proverbe chinois dit « *Si vos projets portent à un an, plantez du riz ; à dix ans, plantez un arbre* » ; c'est dans cette vision durable que nous devons nous orienter.

Comme Jacques ROUGERIE l'a si bien dit « *C'est de l'océan que naîtra le destin des civilisations à venir* ». En effet, il représente 71% de la superficie de la Terre. Il a été jusque-là assez peu considéré tant au niveau de l'espace de vie qu'il peut offrir, qu'en terme de ressources minérales et vivantes. Comme l'a ironisé Ambrose BIERCE, l'océan est une « *masse d'eau occupant à peu près les deux tiers d'un monde destiné à l'homme - lequel est dépourvu de branchies* ». Ce n'est pas notre milieu de prédilection même si nous en sommes dépendants à bien des égards. Ressources minérales, ressources vivantes, il permet la survie d'un grand nombre d'entre nous. Il est aussi au cœur du système climatique, car c'est un important régulateur thermique. Or nos actions produisent des effets sur l'environnement, et sur l'océan. Changement climatique, diminution des ressources biotiques, augmentation de la pollution... sont autant d'impacts que nous créons sur cet océan et qui doivent être étudiés et évalués en vue de les diminuer. C'est justement le point de départ de cette thèse qui s'appuie sur un projet ANR, le projet CONVENAV (acronyme pour CONception et cycle de Vie Environnemental des NAVires) dans le cadre des projets PRECODD (PRogramme de Recherche sur les Ecotechnologies et le Développement Durable). La question initiale était : « comment évaluer les impacts d'un navire sur l'environnement, et en particulier sur le milieu marin, et comment en améliorer la conception pour diminuer les impacts sur l'environnement ? ». Elle peut se résumer à la question « comment éco-concevoir un navire ? ». C'est à partir de là que tout a commencé et que la réflexion a pris forme. L'intérêt s'est ainsi porté sur l'ensemble des produits similaires aux navires en ce qui concerne leur conception : des produits très structurés, complexes et devant répondre à de fortes contraintes qui nécessitent un processus de conception tout aussi complexe et structuré, comme le sont les navires, les trains ou encore les avions.

« *Design will always be about creating something that yet does not exist.* » Nelson STOLTERMANN

En chinois, le mot « crise » (危机) se compose de deux caractères signifiant : « danger » et « opportunité ». Et effectivement, la population est en danger, elle est menacée. Mais cela a toujours été lors de défis majeurs que les avancées technologiques les plus importantes ont été réalisées. C'est un formidable moteur à la conception, à la créativité, à l'imagination. Car il faut de l'imagination, des idées nouvelles voire des idées folles pour réussir à relever un des plus gros challenges lancé à l'humanité. C'est une véritable opportunité qui nous est offerte.

Ainsi, pour répondre à la question initiale, il faut s'en poser une autre : « comment arriver à prendre en compte les impacts d'un produit sur l'environnement, dès sa conception ? ». Par « prendre en compte », il faut entendre « évaluer les impacts pour les diminuer le plus possible ». C'est tout l'objet de cette thèse qui se peut se résumer selon la question suivante : « comment développer un outil d'aide à la décision environnementale basé sur l'Analyse de Cycle de Vie et intégré au processus de conception ? ». Toute la difficulté consiste à trouver les moyens et les outils pour intégrer ce paramètre environnemental dans des processus de conception. Comme l'a écrit Stéphane LE POCHAT, « *la difficulté de l'appropriation réside donc dans la simplification de la complexité du sujet de l'éco-conception* ». Ou comment intégrer un nouveau paramètre de prise de décision, dans un processus de conception très établi prenant déjà en compte bon nombre de critères tels le coût, la qualité ou les réglementations ? Comment intégrer les bons acteurs, au bon moment et avec les bons outils ?

« *La connaissance est une navigation dans un océan d'incertitudes à travers des archipels de certitudes* » Edgar MORIN

Dans cette thèse, nous essayerons de répondre à ces questions en développant une méthodologie adéquate.

Dans le premier chapitre, nous verrons pourquoi il est nécessaire de se diriger vers une conception plus respectueuse de l'environnement. Les enjeux sociaux, sociétaux, économiques et environnementaux poussent l'ensemble des acteurs sociaux à créer des groupes de discussion permettant de débattre et surtout de mettre en place des législations pour préserver l'environnement des impacts anthropiques. Progressivement, une prise de conscience générale meut les réflexions vers la notion de développement durable. Economique, social et environnemental ne sont plus antagonistes. La nécessité d'anticiper sur le futur, qu'il soit proche ou lointain, et de devenir proactif apparait. Et c'est cette nécessité qui a permis de réunir les participants du consortium CONVENAV : Arts et Métiers ParisTech, DCNS constructeur naval, Ifremer, et Sita Suez.

Dans le deuxième chapitre, nous verrons comment l'éco-conception est classiquement intégrée, avec quels outils, et quelles en sont les limites. Ceci permettra de proposer une nouvelle approche, avant de réaliser un benchmark pour faire le point sur ce qui existe déjà en intégration du paramètre environnemental. Le cas d'étude, DCNS, nous permettra de clairement visualiser

l'ensemble des étapes pouvant mener à l'intégration de ce paramètre dans le processus de conception.

Dans le troisième chapitre, nous verrons l'identification des caractéristiques permettant à un produit complexe de soutenir une éco-conception basée sur l'ACV (Analyse de Cycle de Vie) et ce, dès la phase d'avant-projet. Puis nous amènerons la notion de briques de données, basée sur les briques technologiques. Les briques de données sont la base de la réflexion pour cette méthodologie d'intégration du paramètre environnemental dans un processus de conception. Elles sont le point-clé déterminant la création du paramètre environnemental. Nous verrons à quel point l'implication des fournisseurs et des concepteurs est capitale dans cette démarche, et comment il est possible et indispensable de mettre en place une démarche en synergie qui soit à la fois collaborative et participative. Enfin, cette partie décrira la structuration générale de l'outil d'éco-conception, ce qui correspond au cahier des charges pour le développement d'un outil d'éco-conception complet.

Dans une quatrième partie, c'est l'application au cas d'étude qui sera présentée. Comment l'OCEAN, l'Outil de Conception, d'Evaluation, et d'Amélioration de Navires, a été construit, avec en particulier la création d'un indicateur spécifique, l'EIM (Eco-Indicateur Marin) évaluant plus particulièrement les impacts sur le milieu marin. Comment cet outil évalue les impacts à la manière d'un outil d'ACV, mais surtout, comment il aide les concepteurs lors de la conception, à améliorer leurs produits.

Enfin, dans une cinquième et dernière partie, nous discuterons des perspectives que peuvent offrir l'OCEAN en premier lieu, puis un outil tel que l'OCEAN mais dédié à d'autres produits et appliqué dans d'autres processus de conception.

Le processus général de la thèse peut se résumer selon le schéma suivant (*Figure 1*) :

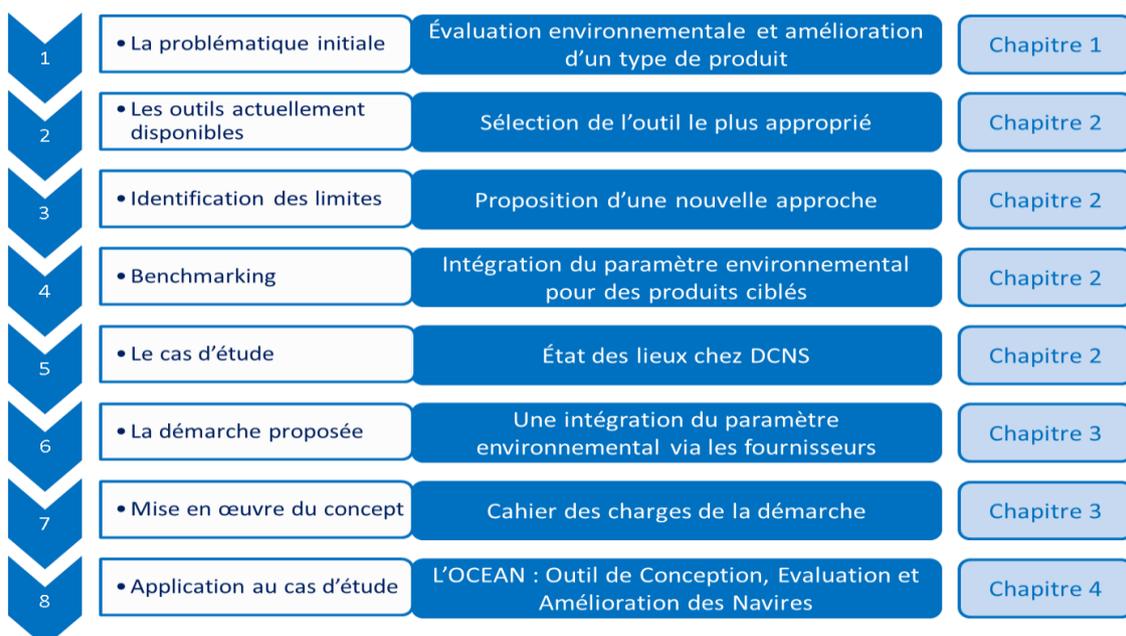


Figure 1. Le processus général de la thèse.

Après avoir posé la problématique initiale, qui est celle de l'évaluation des impacts d'un navire sur son milieu, avec la possibilité d'en améliorer la conception, les outils d'éco-conception existants seront passés au crible pour déterminer celui qui serait le plus approprié à notre démarche, s'il en est. En identifiant les limites de ces outils, et en particulier de l'ACV, ainsi que les conditions d'utilisation nécessaires, il sera possible de trouver les conditions supplémentaires à mettre en œuvre pour créer un nouvel outil d'éco-conception basé sur l'ACV, qui intègre au mieux le paramètre environnemental. Un *benchmark* de l'intégration de l'éco-conception et/ou de la notion d'environnement dans des entreprises fonctionnant sur le même modèle, sur le même type de processus de conception que DCNS sera alors réalisé ; puis une étude du cas DCNS sera effectuée. Cela permettra de faire un état des lieux de la position de DCNS vis-à-vis de cette démarche, et de visualiser les opportunités d'intégration de la question environnementale au sein de leurs équipes de conception. A partir de toutes ces données et des constats faits, il sera alors possible de proposer une démarche d'intégration du paramètre environnemental dans un processus de conception et de le mettre en application pour le cas d'étude.

CHAPITRE 1) VERS UNE CONCEPTION PLUS RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT

1. LE CONTEXTE GLOBAL ACTUEL : LA PRISE DE CONSCIENCE ENVIRONNEMENTALE

1.1. Une prise de conscience générale

Chacun peut voir, mesurer, comprendre que tout acte a des conséquences non seulement sur le milieu qui le supporte directement (à une échelle locale voire régionale), mais aussi, et surtout, sur l'ensemble de la planète. Le Ministère français de la santé recommande de manger au moins cinq fruits et légumes par jour. Mais, manger des fruits comme les bananes cela signifie manger des produits qui ne poussent pas sous nos contrées. Dans le meilleur des cas, pour arriver jusque dans nos caddies ces bananes auront fait quelques 5000 km. Or, le fait de consommer des produits ayant parcouru trop de kilomètres est montré du doigt comme étant responsable, entre autres, du réchauffement climatique, car cela implique de fortes émissions de dioxyde de carbone. Le consommateur ne sait pas quelles informations il doit vraiment prendre en compte. Cette problématique peut être transposée à l'ensemble des biens, produits et services que tout un chacun consomme. Mais ce consommateur commence à (se) poser des questions. Quand, par curiosité le plus souvent, il calcule son empreinte écologique (*Figure 1-1*), il s'aperçoit que si tout le monde agissait comme lui, il faudrait presque l'équivalent de trois planètes pour subvenir à tous ses besoins et *desiderata* (en 2005 il fallait 2,38 Terres pour un européen moyen, 2,71 Terres pour un Nord-américain moyen (HAILS, et al., 2008)). Une empreinte écologique peut se définir comme étant « la mesure du volume de dioxyde de carbone (CO₂) émis par combustion d'énergies fossiles, par les entreprises ou les êtres vivants » (MELQUIOT, 2003). Cette empreinte écologique est un indicateur environnemental, qui, même s'il peut être soumis à discussion (PIGUET, et al., 2007), permet de faire un état des lieux actuels et d'en faire prendre conscience. La population mondiale consomme déjà plus que ce que peut lui fournir la Terre. Autrement dit, tous les ans, et de plus en plus tôt au cours de l'année, il y a un jour où la population atteint le seuil de dépassement écologique. Ce dépassement écologique est défini quand « la transformation des ressources en déchets est réalisée en moins de temps qu'il est nécessaire pour convertir ces déchets en ressources » (HAILS, et al., 2008). La biocapacité de la planète, définie comme « sa capacité à générer une offre continue en ressources renouvelables et à absorber les déchets découlant de leur consommation, compte tenu des technologies et de la gestion des ressources en vigueur » (GOODPLANET, 2010) est dépassée. Ce dépassement est un seuil au-delà duquel les consommations se transforment en emprunts sur la planète créant alors une dette écologique. Mais cet emprunt n'est jamais remboursé, car la population mondiale poursuit sa croissance démographique. Les habitants de la planète se dirigent donc vers un épuisement global des ressources aquatiques, énergétiques fossiles, minières, agricoles,...

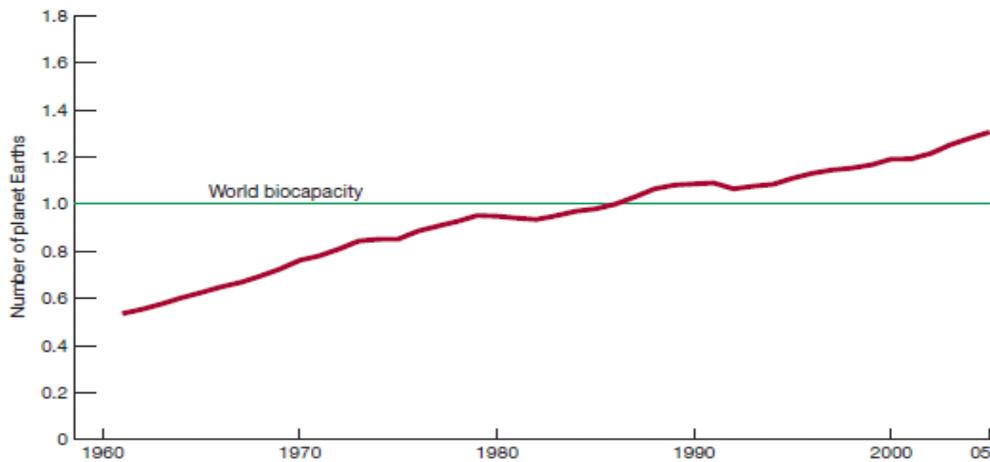


Figure 1-1. Evolution de l’empreinte écologique mondiale entre 1961 et 2005. La biocapacité de la planète a été dépassée dans les années 80, i.e. pour subvenir à l’ensemble des besoins de la population mondiale, il faudrait plus d’une planète.

1.2. La nécessité d’un développement durable

Economie, social et environnement sont les trois composantes qui doivent être mises en jeu pour assurer un développement durable (Figure 1-2). Avec ce concept, le développement n’est possible que s’il est économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement tolérable. La première définition du développement durable (DD) a été donnée lors de la commission de Brundtland, en 1987 (BRUNDTLAND COMMISSION, 1987), comme « étant un mode de développement répondant aux besoins actuels sans compromission des possibilités pour les générations futures à répondre à leurs propres besoins ». La communauté internationale a reconnu le DD comme étant un objectif à suivre lors de la conférence de Rio (1992), par la création de l’Agenda 21 (UNCED, 1992). Cet Agenda a pour but la mise en place d’un partenariat international pour un DD concerté permettant une gestion équilibrée entre environnement et développement. Il décrit les principes et actions à mener pour permettre une intégration du trio environnement, social et économie à toutes les échelles, de l’individu à l’international, en passant par les collectivités locales et régionales. Pour réussir un DD, il faut que les ressources naturelles renouvelables soient mieux gérées, et il faut que les citoyens et les pouvoirs publics soient responsabilisés économiquement et socialement parlant.



Figure 1-2. Le développement durable, un équilibre entre trois principes fondamentaux : stabilité économique, responsabilité sociétale et protection de l'environnement.

Le Sommet mondial sur le développement durable, tenu par l'ONU à Johannesburg du 26 août au 4 septembre 2002, a proposé l'adoption d'un plan de travail sur dix ans visant à changer les modèles de consommation et de production non durables.

Avant cette prise de conscience environnementale, les préoccupations majeures étaient surtout focalisées sur l'économie et le social, avec une vision très axée profits et bénéfices. Le fait de devoir inclure une nouvelle dimension lors des réflexions nécessite un remaniement du mode de pensée en général. Si l'Homme veut pouvoir assurer un avenir « décent » aux futures générations, il doit repenser, reconcevoir ses habitudes, son mode de vie, son mode de croissance. Il ne doit plus seulement viser un profit immédiat, mais il doit bien prendre en compte la dimension environnementale. Il faut bien prendre et faire prendre conscience que contrairement à une idée reçue, faire de l'environnement n'implique pas forcément une perte de profit. En se préoccupant de l'environnement, il est possible de réaliser des investissements, au même titre que lorsque la R&D fait de la recherche en avant-conception. Avoir une meilleure rentabilité sur le long terme et se rendre plus compétitif sur les courts et moyens termes sont certains des avantages de l'intégration de la question environnementale lors de la conception de produits ou de services.

1.3. Des enjeux économiques, sociaux, sociétaux

En cette années 2010, proclamée année de la biodiversité par l'Assemblée des Nations Unies le 20 décembre 2006, il semble que les questions de préservation de l'environnement ne soient plus autant prises à la légère. Les ressources planétaires, qu'elles soient énergétiques, minérales, aquatiques ou même alimentaires étant inéluctablement appelées à devenir des ressources en voie

de disparition (SCIENCES&VIE, 2008), qu'il va falloir gérer comme étant en stock très limité (Figure 1-3).

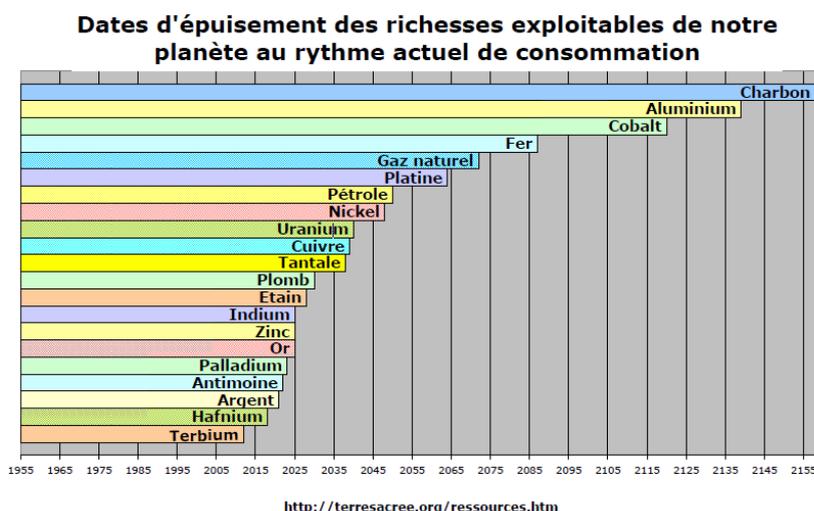


Figure 1-3. Graphique montrant la date d'épuisement des richesses exploitables au rythme actuel de consommation, et d'après les stocks actuels prouvés (SCIENCES&VIE, 2008).

Au rythme actuel de consommation et selon les ressources prouvées, un grand nombre des métaux couramment utilisés seront épuisés d'ici 2050, soit pour la prochaine génération.

La conscience collective d'une planète finie, incapable physiquement et matériellement de soutenir l'ensemble de sa population émerge. Les scientifiques ont fait entendre leur voix sur la réalité d'un réchauffement climatique, mais aussi sur la pollution de l'ensemble de la planète visible jusqu'aux pôles pourtant inhabités, ainsi que sur la finitude des ressources disponibles au regard de la croissance démographique mondiale. Des économistes se sont à leur tour penchés sur cet état des lieux. Comme STERN a pu le démontrer dans de nombreux rapports (STERN, et al., 2007), (HEPBURN, et al., 2008), l'utilisation des ressources et le rythme de croissance industrielle actuelle finiront par coûter cher à la société. Si aucune action ni aucun investissement ne sont pas immédiatement lancés pour lutter contre les effets néfastes prévus à long terme, la compensation des dégâts occasionnés risque de coûter beaucoup plus cher qu'un apport financier qui serait réalisé aujourd'hui. Le coût de cette inaction face aux changements climatiques pourrait s'élever à 5 à 20% du produit intérieur brut mondial annuel, soit jusqu'à 5 500 milliards d'euros (STERN, et al., 2007). Par exemple, aider à diminuer les rejets de gaz à effet de serre permettrait d'éviter un réchauffement climatique trop important, donc de minimiser l'augmentation du niveau de la mer et par conséquent, de limiter les migrations des populations dues aux réfugiés climatiques. Ainsi, une évaluation du coût potentiel de l'inaction a mis en avant que de nombreux impacts, directs ou indirects, sur l'environnement seraient occasionnés. Et ceci n'est qu'un exemple parmi tant d'autres.

L'épuisement de ces ressources signifie qu'à un moment donné, elles n'existeront plus, ou seront tellement rares que leur prix en sera d'autant plus prohibitif. Cette raréfaction prévisible pousse la Recherche à trouver des solutions alternatives en particulier pour tous les consommateurs

d'énergie. Le gaz pour le chauffage ou l'essence des voitures sont des énergies non durables qui vont coûter de plus en plus cher au fur-et-à-mesure de leur raréfaction.

Un autre exemple de bilan économique concerne les zones humides. L'intérêt croissant porté sur ces zones se justifie du simple fait que près de 80% de la population mondiale vit dans ces zones humides, dans les vallées fluviales, les plaines alluviales, ou sur les côtes, rappelant aussi que l'Homme dépend de l'eau pour vivre. Sachant que cette population s'urbanise actuellement à hauteur de 50% (ce taux est en constante augmentation), la pollution et la dégradation du milieu générées par l'urbanisation ne font qu'augmenter. Les services rendus par les différentes zones humides définies par la convention de Ramsar ont pu être chiffrés (COSTANZA, et al., 2007) ([Tableau 1-1](#)). Les littoraux sont les zones ayant subi la plus forte croissance de pression démographique depuis trois siècles. Et cela s'explique : elles sont le siège d'une forte biodiversité, offrent à l'Homme un accès à la mer et de nombreux biens et services. Selon la FAO (Food and Agricultural Organisation, Fondation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation) 75% des ressources halieutiques sont surexploitées. Or quand on sait que « pour 43% de la population mondiale la pêche représente la principale voire l'unique source de nourriture et d'emploi » (FNH, 2008b), il est capital de préserver cet environnement et l'ensemble des ressources qu'il génère.

Tableau 1-1. Chiffrage (en dollars US) des services rendus par les différentes zones humides (COSTANZA, et al., 2007)

Évaluation des zones humides	Valeur totale	Valeur totale du flux monétaire mondial
	(USD) par hectare, par an	(USD par an)
Estuaires	22 382	4 100 000 000 000
Herbiers marins/lits d'algues	19 004	3 801 000 000 000
Récifs coralliens	6 075	375 000 000 000
Marais cotidaux/mangroves	9 990	1 648 000 000 000
Marécages/plaines d'inondation	19 580	3 231 000 000 000
Lacs/cours d'eau	8 498	1 700 000 000 000

**La catégorie «plateau continental» est exclue de l'étude car une partie seulement de cette catégorie pourrait être définie en tant que zone humide au sens de la Convention de Ramsar.*

Concrètement, l'individu, la collectivité, mais aussi l'Etat, entreprennent de plus en plus d'actions environnementales. Ces actions permettent, par exemple, l'initiation de projets innovants en ce qui concerne les énergies renouvelables. On y retrouve le photovoltaïque, mais aussi les éoliennes, ou encore l'énergie thermique. A chaque fois, l'innovation a pour but de trouver des alternatives aux énergies fossiles, non renouvelables, et très polluantes. Il y a aussi la création d'aires marines protégées, qui sont là pour préserver l'ensemble de la biodiversité d'une zone qui était menacée par des pollutions ou encore par une surexploitation des ressources vivantes ou abiotiques.

1.4. La création de groupes de travail dédiés à l'environnement : les Grenelle de l'Environnement et de la Mer

Dès lors que l'enjeu économique est mis dans l'équation environnementale, comme STERN a pu le démontrer dans ses rapports, les personnes se sentant concernées deviennent plus nombreuses. Au niveau international, une réelle prise de conscience environnementale est en train de voir le jour. Des sessions de réflexions autour de ces thématiques sont organisées, non plus seulement pour et par les spécialistes du sujet, mais bien pour inclure toutes les éventuelles parties prenantes. En France, les Grenelle de la Mer (PERROT, et al., 2010) et de l'Environnement (GUESNERIE, et al., 2008), travaillent actuellement sur différentes thématiques, mais quelles qu'elles soient (GAILL, et al., 2010) (SCHINDLER, et al., 2010), tous les participants en sont arrivés aux mêmes types de conclusions. Entre autres, trois axes de réflexion sur l'environnement ont été mis en avant :

- Il faut renforcer la connaissance, l'observation, la recherche et l'innovation. En ayant une meilleure connaissance, il est possible d'agir pour mieux préserver les ressources.
- Il faut améliorer l'éducation, la communication et la sensibilisation à propos de l'environnement. Cela peut être réalisé en sensibilisant les acteurs de demain par l'éducation et l'enseignement, mais aussi en communiquant sur ces sujets à l'ensemble des populations, par le biais de spots télévisés qui communiquent par exemple sur les engagements et les actions conséquentes au Grenelle de l'environnement.
- Il est nécessaire de développer le principe de gouvernance. Selon le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), la notion de gouvernance peut être considérée comme « l'exercice des pouvoirs économiques, politiques et administratifs pour gérer les affaires des pays à tous les niveaux. Il comprend les mécanismes, procédés et institutions par lesquels les citoyens et les groupes articulent leurs intérêts, exercent leurs droits légaux, remplissent leurs obligations et gèrent leurs différences. La bonne gouvernance est, entre autres, participative, transparente, responsable, efficace et équitable. Elle assure que les priorités politiques, sociales et économiques sont fondées sur un large consensus dans la société et que les voix des plus pauvres et des plus vulnérables sont au cœur du processus de décision sur l'allocation des ressources pour le développement ». En parallèle de cette notion générale, cette gouvernance peut se voir appliquée plus spécifiquement à l'environnement. D'après (MELQUIOT, 2003), « la gouvernance environnementale désigne une conduite collective décisionnelle réunissant tous les acteurs territoriaux selon un mode partenarial en vue d'une planification et d'une gestion mieux intégrées des ressources et d'une prise en considération des conséquences environnementales et sociales des changements planifiés ».

Lors de ces Grenelles, les scientifiques, le public, les collectivités, l'Etat, mais aussi les ONG (Organisations Non Gouvernementales) sont mis à contribution dans un effort de réflexion global sur les différents aspects de l'environnement. Il est apparu que la mer n'a jamais été un thème de préoccupation majeure, et qu'il n'avait été que très peu traité lors du Grenelle de l'Environnement. Les enjeux économiques, politiques et écologiques liés à la mer ayant été évalués comme très importants pour l'avenir de l'Homme, un Grenelle de la Mer a vu le jour. Entre autres causes, ce Grenelle de la mer a été organisé car :

- Les océans couvrent 71% de la surface de la Terre,

- Les populations se concentrent des autour des zones humides, côtières ou fluviales ; aujourd’hui, près de 50% de la population mondiale vit à moins de 60km des côtes, et ce taux pourrait atteindre 75% en 2020 (UNCED, 1992),
- Il devient nécessaire de définir une politique maritime française,
- Il existe une pression anthropique accrue sur le littoral et la mer,
- La question de la Mer n’a pas été réellement traitée lors du Grenelle de l’Environnement
- La France est très riche en termes d’espace maritime, puisqu’elle se place au 2^{ème} rang mondial avec une surface de onze millions de kilomètres carrés.
- La mer est le déversoir ultime de l’ensemble de nos effluents, la pollution arrivant à l’océan étant pour 75% d’origine continentale (FNH, 2006a) (*Figure 1-4*).

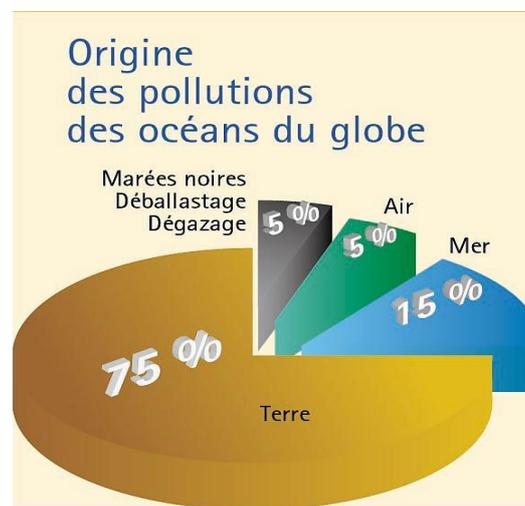


Figure 1-4. Origine de la pollution des océans : 75% proviennent des effluents industriels et urbains, et 15% directement des activités maritimes (pêche, navigation,...) (FNH, 2006a)

L’innovation par la recherche, la connaissance et l’observation ouvre de nouvelles perspectives de préservation de l’environnement, tout en créant de nouvelles opportunités de développement, tant économique que social. Ainsi, trois grands « moteurs » de la société sont mis en synergie : l’économie, le social et l’environnement. Même si le concept même de DD existe depuis plus de vingt ans, ce n’est qu’aujourd’hui qu’émerge réellement une prise de conscience environnementale globale.

1.5. Une réponse environnementale

Le monde de demain doit se bâtir sur un modèle durable qui ne prélève pas des ressources sans se soucier de leur devenir, mais qui doit prendre en compte l'ensemble des éléments nécessaires au développement des Hommes, de façon responsable. Consommer moins, mieux et de façon responsable, et émettre moins de substances ayant des effets néfastes sur l'environnement sont les deux grands axes orientant les réflexions pour tendre vers un mode de vie durable.

Une des solutions proposées est de prendre en compte la question environnementale en amont des prises d'action. L'idée est de stimuler l'économie en se basant sur le concept de cycle de vie et en utilisant des outils de gestion de cycle de vie adaptés (Figure 1-5) (CIRAIG, 2010).

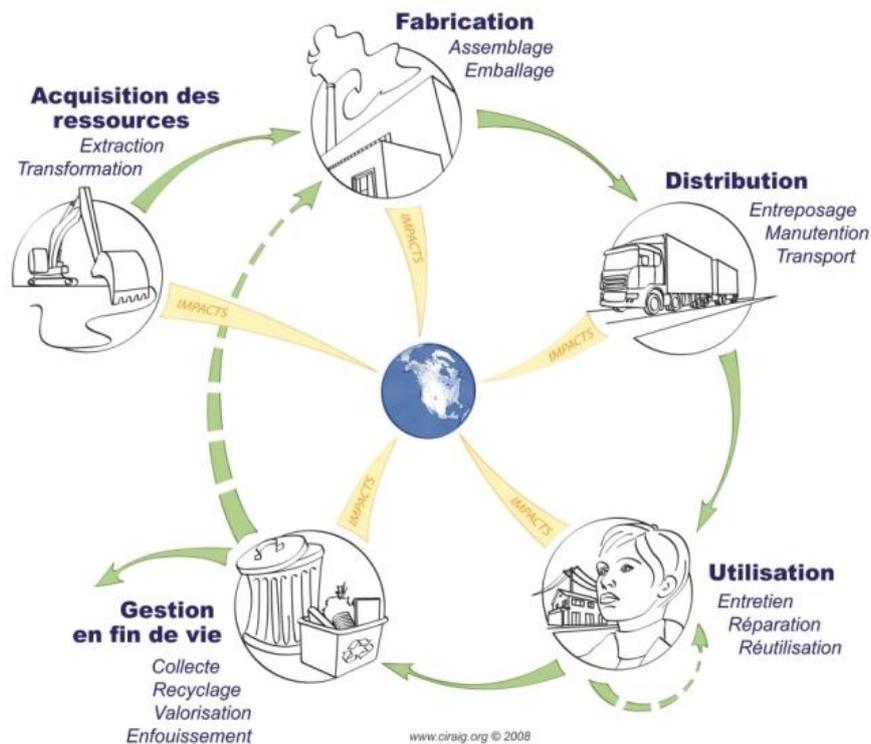


Figure 1-5. Schéma d'un cycle de vie classique (CIRAIG, 2010)

Un DD peut se construire sur le modèle d'un cycle de vie, ou selon une maxime de référence en chimie qui dit que « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme », attribuée à LAVOISIER, elle-même reformulation d'une phrase d'Anaxagore De CLAZOMENES : « Rien ne naît ni ne périt, mais des choses déjà existantes se combinent, puis se séparent de nouveau ». Comparable à des chaînes trophiques mettant en scène la terre et ses minéraux, puis différents consommateurs aux modes alimentaires bien différents, mais qui finissent tous par retourner à la terre, un cycle de vie devrait idéalement y ressembler. Mais il est certain qu'actuellement, ce mode de consommation est loin de ressembler à son modèle vivant. Le retour à la source est pratiquement impossible pour la majorité des produits que les Hommes utilisent. Le modèle le plus ressemblant serait celui qui se

termine par le compostage des déchets alimentaires, en supposant que ces déchets soient issus d'une agriculture biologique plutôt que d'origine conventionnelle. Cette analogie permet de prendre conscience qu'il faut penser le produit dès sa conception (éviter les engrais et pesticides), pour pouvoir envisager une fabrication, une utilisation et une fin de vie plus durable. C'est-à-dire que l'ensemble doit pouvoir former une boucle fermée, un cycle (à plus ou moins grande échelle), permettant de mieux gérer les ressources, les déchets, et ce, sur du long terme. Les déchets doivent devenir une nouvelle ressources, et non pas des objets destinés simplement à être éliminés.

C'est donc dès la conception des produits que l'environnement doit être intégré. Il faut que les concepteurs intègrent le paramètre environnemental au même titre que le coût ou la qualité dans le cahier des charges d'un produit. Par exemple, pour réduire les déchets, si le consommateur peut choisir de n'acheter que des produits non « sur-emballés », c'est aussi au producteur de proposer des produits dont les emballages seront moins présents. Et cela doit se penser dès la conception du produit : une réduction de taille, une diminution des volumes perdus (qui sont aussi motivants d'un point de vue économique car cela permet de diminuer les coûts de transport) sont des options souvent envisagées. On parle alors d'un produit « éco-conçu ».

2. LA MISE EN PLACE DE LEGISLATIONS ENVIRONNEMENTALES

Les questions environnementales, assez récemment prises en compte par les gouvernements font aujourd'hui plus souvent l'objet de préconisations que de réelles réglementations ou législations. En pratique, les textes législatifs sont longs à mettre en œuvre, car ils doivent obtenir un consensus général. Cela s'observe facilement au niveau national, sachant qu'une loi, pour être applicable doit passer par différentes étapes de lectures (élaboration du texte de loi, discussions, votes, motions, amendements, adoption, publication, décrets d'application) et différents lecteurs (Assemblée Nationale, Sénat). Au niveau international, c'est encore plus compliqué. Les textes proposés qui ne sont pas des lois mais des directives, résolutions ou circulaires, sont élaborés par des commissions. Ils sont ensuite soumis à discussions par les conseils (de l'Union Européenne, de l'ONU,...), doivent être entérinés, puis ratifiés par chacun des états s'étant engagé à mettre en œuvre le texte. Chacun de ces états doit ensuite établir des décrets ou des règlements pour que la directive s'applique dans le cadre national concerné. Il peut se passer une décennie entre la proposition et la ratification par un état.

2.1. Des législations « curatives » : vers une obligation de réparation des préjudices et dommages environnementaux

En cas de pollution, que cela soit pour les sols, les rivières, les côtes ou l'océan, il n'y a pas grand-chose à faire une fois la catastrophe produite. La zone devient contaminée, à plus ou moins long terme, de façon plus ou moins grave, en fonction des substances émises, et de leurs propriétés physico-chimiques qui leur permettent de réagir avec l'environnement. Lorsque cela est possible, des mesures de nettoyage sont entreprises par les pouvoirs publics, souvent accompagnés de bénévoles et d'associations. Ce phénomène s'observe lors des marées noires, mais aussi à l'occasion de manifestations comme celles organisées par la Surf Rider Foundation, qui sollicite les individus lors de journées spécialement dédiées au ramassage des déchets rapportés par la mer sur les plages. Si ces déchets ont fini par s'échouer, il n'en est pas de même pour ceux constituant la « soupe plastique ». C'est un agglomérat de microscopiques morceaux issus de bouteilles, sacs et autres résidus plastiques, résidus de tout ce que l'Homme peut jeter à la mer (directement ou non), en différents endroits. Ils suivent des courants les amenant dans des zones de gyre¹, et formant ainsi des amas flottants. Dans l'océan Pacifique, même s'ils sont peu visibles, ce ne sont pas moins de 3,4 millions de km² (soit l'équivalent d'un peu plus du tiers de la surface de l'Europe) qui s'accumulent ainsi (MAGDELAINE, 2010). Dans ce cas-là, pourtant très préoccupant du point de vue du devenir de ces matériaux non dégradables à court terme, peu d'actions de nettoyage sont entreprises à cause de la petitesse des particules plastiques.

Aujourd'hui, des législations se mettent en place, entre autres, pour venir en aide à ces associations qui participent aux nettoyages de zones polluées par d'autres, moins scrupuleux vis-à-vis des conséquences de leurs actes sur l'environnement. Lors du jugement rendu par la Cour d'Appel le 30 mars 2010 pour le procès Erika (le pétrolier qui s'était échoué sur les côtes bretonnes et avait occasionné une marée noire importante le 12 décembre 1999), Total a été jugé coupable mais non responsable civilement parlant. La responsabilité pénale de tous les acteurs de la chaîne du transport maritime à l'origine de la catastrophe de décembre 1999 a été mise en cause : la compagnie pétrolière Total (375.000 euros d'amende), la société de classification Rina (175.000 euros d'amende), l'armateur du navire Giuseppe Savarese et son gestionnaire Antonio Pollara (75.000 euros d'amende chacun). Des indemnités ont aussi été accordées aux parties civiles. Lors du procès, il a été reconnu, selon l'arrêt de la cour d'appel, qu'un « préjudice écologique » a été subi par des collectivités et associations environnementales (Robin des Bois, LPO). La nature de ce préjudice a été définie comme étant : « toute atteinte non négligeable à l'environnement naturel, à savoir, notamment, à l'air, l'atmosphère, l'eau, les sols, les terres, les paysages, les sites naturels, la biodiversité et l'interaction entre ces éléments, qui est sans répercussions sur un intérêt humain particulier mais affecte un intérêt collectif légitime ». Autre exemple plus récent, et certainement le plus marquant pour les Etats-Unis depuis le début des exploitations pétrolières, la plateforme de BP « Deepwater Horizon » ayant explosé le 20 avril 2010 à 80km des côtes de Louisiane. Au 1^{er} juin 2010, la fuite était toujours présente, avec un rythme d'écoulement de 795.000 litres par jour selon une estimation des autorités américaines reprise à son compte par British Petroleum. Cette entreprise aura très certainement à rendre des comptes, mais aussi à dédommager les dégâts occasionnés.

¹ Les gyres océaniques sont de grands tourbillons d'eau (à l'échelle d'un océan), formés grâce à de forts courants marins eux-mêmes dus à la force de Coriolis s'appliquant sur les masses d'eau.

La politique du « pollueur-payeur » est une notion assez récente, difficile à mettre en œuvre après coup. Lors des dégazages sauvages, encore trop fréquemment pratiqués, il est pratiquement impossible d'identifier le pollueur. Ce n'est finalement qu'en cas de pollution accidentelle qu'il est possible de les identifier.

En réaction à ces catastrophes plus ou moins importantes, des législations ont vu le jour. En 2010, l'ensemble de la flotte simple coque devra être démantelée (MIDN, 2006). Cette interdiction des simples coques doit permettre de limiter les dégâts lors d'accident qui amèneraient le navire à déverser son contenu dans l'océan. En compartimentant le navire, les quantités rejetées accidentellement devraient être inférieures.

2.2. Des législations préventives dédiées aux produits

En décembre 2009, l'idée française d'une taxe carbone a été abandonnée car elle ne satisfaisait pas l'ensemble des parties impliquées, n'étant pas jugée égalitaire, suite à l'exonération de l'électricité et des industries polluantes. Des engagements qui ont pu être mis en avant, en 2007, lors du Grenelle de l'environnement proposaient « des modifications importantes dans tous les secteurs participant à la dégradation de l'environnement ou au changement climatique. Deux secteurs majeurs seront particulièrement mis à contribution : d'une part, le bâtiment, marqué par l'objectif d'une réduction des consommations énergétiques de 38 % d'ici 2020, et d'autre part, les transports, secteur auquel est assigné un objectif de réduction de 20 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2020 » (ASSEMBLEE-NATIONALE, 2009b). Mais productivité et rentabilité économique ont, jusqu'à présent, eu raison de la mise en place d'une coopération durable, qu'elle soit nationale ou internationale.

Quelques secteurs industriels sont concernés par la mise en place d'un ensemble de législations, suite à des concertations ayant permis de proposer des préconisations puis des réglementations. Dans le secteur automobile, une directive européenne (COMMISSION-EUROPEENNE, 2010) régleme les émissions automobiles en CO₂. C'est une contrainte typiquement destinée aux constructeurs. D'autre part, la France a aussi instauré une contrainte visant les usagers : le principe du bonus / malus. Il a été mis en application pour favoriser le développement et l'achat de véhicules moins émetteurs de CO₂ (MEEDDM, 2010). La pression ainsi mise sur le secteur automobile pour réduire les émissions de CO₂ est visible depuis 2008, avec la diminution des émissions de CO₂ par km pour les voitures nouvellement immatriculées (*Figure 1-6*).

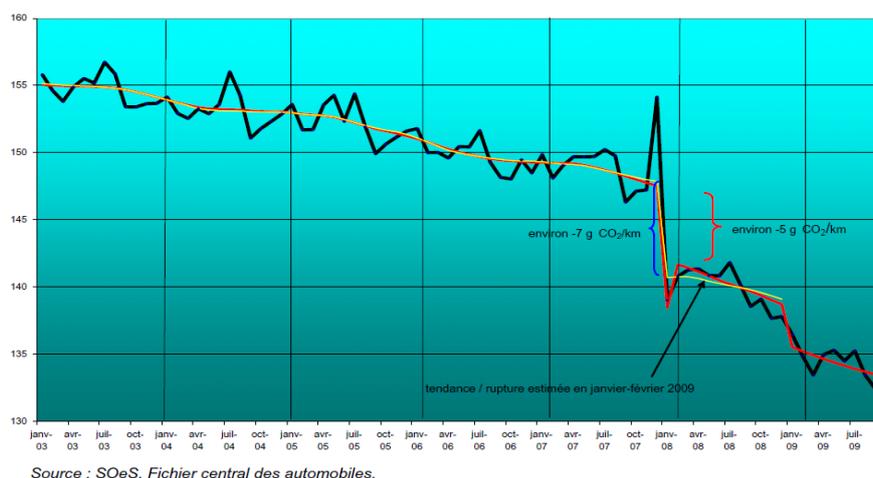


Figure 1-6. Emissions moyennes de CO₂ par km des voitures neuves immatriculées en France chaque mois, de janvier 2003 à juillet 2009 (PAPPALARDO, et al., 2010). Cette diminution peut être imputée au bonus/malus.

Dans le secteur de l'électroménager, un étiquetage environnemental a été défini depuis 1995, sous la pression européenne. Pour chaque appareil, une lettre allant de A à G (le « A » signifiant un produit plus économique en énergie que le « G ») permet de noter un produit selon sa performance énergétique (Figure 1-7).

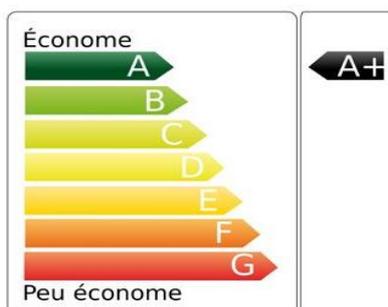


Figure 1-7. L'étiquette environnementale classique ; elle permet au consommateur de choisir l'équipement le plus énergétiquement performant.

Le Grenelle de l'Environnement a proposé d'inscrire dans la loi la tenue d'une conférence annuelle sur les Indicateurs de Développement Durable (IDD) (PAPPALARDO, et al., 2010). L'idée est de ne plus réfléchir uniquement avec l'unique indicateur économique qu'est le PIB, mais bien d'utiliser un panel d'indicateurs prenant aussi bien en compte l'environnement que les acteurs et l'économie. Ce sont des indicateurs de DD qui doivent permettre de faire l'état des évolutions sur le long terme. L'indicateur le plus connu est celui qui permet de quantifier les émissions de gaz à effet de serre : le kg équivalent de CO₂ (kg eq. CO₂). Cet indicateur permet de mesurer la quantité de CO₂ présente actuellement dans l'atmosphère, mais aussi de prévoir son évolution souhaitable pour les années à venir, si l'on veut diminuer leur quantité pour limiter le réchauffement climatique (Figure 1-8). Différents objectifs ont été fixés, à plus ou moins « long terme » (2020 : objectif de « -20% », 2050 : diviser par quatre les émissions de GES), dans l'idée d'installer des paliers de décroissance des émissions de GES, comme préconisé par le Protocole de Kyoto (UN-FCCC, 1998). Il a été convenu

qu'une diminution par un facteur quatre de ces émissions ne pourrait pas se faire du jour au lendemain, non seulement d'un point de vue humain, social et sociétal, mais aussi d'un point de vue technique. L'incitation du public à mettre en œuvre des actions permettant de diminuer leurs émissions passe par exemple par des primes et/ou des exonérations partielles, comme avec les travaux d'isolation des logements, très énergivores, et fortes source de GES.

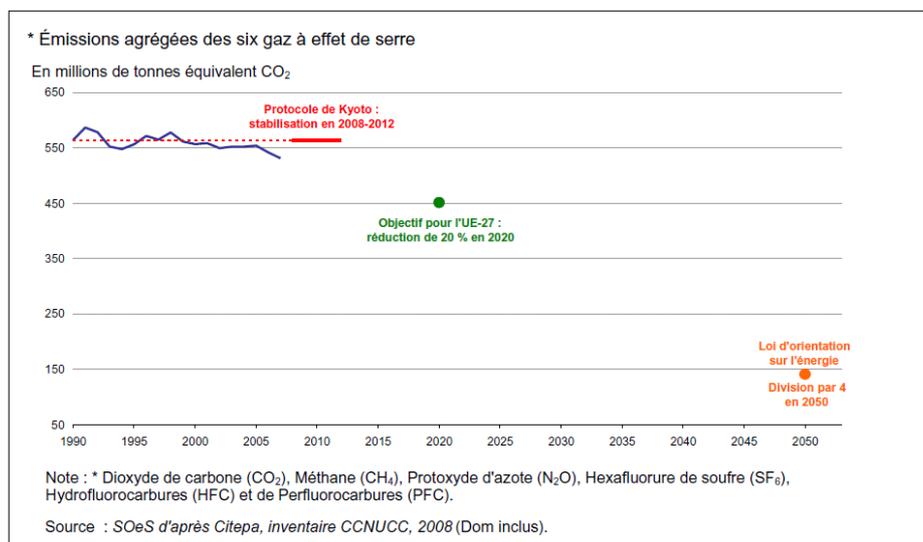


Figure 1-8. Evolution des émissions de gaz à effet de serre en France depuis 1990 et objectif à 2050 (PAPPALARDO, et al., 2010)

Au niveau international et européen, et toujours dans l'optique de diminuer les émissions de GES, le dioxyde de carbone est devenu l'objet d'un marché d'échange, avec la création de la bourse du carbone de Chicago. Le principe est d'obliger les principales installations industrielles à communiquer chaque année la quantité de GES émis, sous la forme de tonnes équivalent CO₂ (teqCO₂) (EUROCARBON, 2010). L'Etat (les états membres de l'UE) leur donne un quota de droit d'émission tous les ans, qui correspond à un permis d'émission. Ce dernier est négociable. Si elles ont moins émis que ce qui était autorisé, elles peuvent vendre la quantité restante à d'autres exploitants. Au contraire, si elles dépassent le seuil du quota, il faut qu'elles en rachètent à des exploitants ayant des quotas excédentaires ou qu'elles s'acquittent d'une amende forfaitaire de 40€/teqCO₂ la première année, et de 100€/teqCO₂ l'année suivante en cas de récidive. C'est une autre façon d'appliquer le principe de « pollueur-payeur ». Cette méthode doit permettre de diminuer les émissions globales. Mais c'est une méthode controversée car elle correspond aussi à une subvention publique au profit des industries polluantes.

2.3. Des législations préventives dédiées aux substances

2.3.1 La création d'une liste de substances dites prioritaires

Si dans certains cas, il faut mettre en place des législations pour « réparer » les dégâts occasionnés par des rejets industriels, il vaudrait mieux définir des règles pour que la pollution ne soit jamais à un niveau tel qu'il faille « nettoyer » après les usages faits. Mieux vaut prévenir que guérir. Ainsi, des législations sont mises en place pour préserver l'environnement d'éventuelles pollutions, mais aussi pour le réhabiliter et le restaurer. Par exemple, la directive Cadre sur l'eau (DCE), qui s'appuie sur une directive européenne (PARLEMENT-EUROPEEN, 2000a) permet « d'organiser la gestion des eaux intérieures² de surface³, souterraines⁴, de transition⁵ et côtières⁶ afin de prévenir et de réduire leur pollution, de promouvoir leur utilisation durable, de protéger leur environnement, d'améliorer l'état des écosystèmes aquatiques et d'atténuer les effets des inondations et des sécheresses ». L'Europe a, dans le même temps, défini une liste de substances prioritaires (33 substances ou groupes de substances, actuellement), pour lesquelles des normes de qualité et des mesures de réduction au niveau communautaire doivent être établies (PARLEMENT-EUROPEEN, 2001b) (*Tableau 1-2*).

On retrouve dans cette liste des métaux lourds (nickel, plomb,...) ayant prouvé leur haute toxicité et leur fort pouvoir de bioaccumulation. Sont aussi présents les composés organiques (tributylétain ou TBT, hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP,...) qui peuvent être délétères, carcinogènes, mutagènes ...

² Eaux intérieures : toutes les eaux stagnantes et les eaux courantes à la surface du sol et toutes les eaux souterraines en amont de la ligne de base servant pour la mesure de la largeur des eaux territoriales

³ Eaux de surface : les eaux intérieures, à l'exception des eaux souterraines, les eaux de transition et les eaux côtières, sauf en ce qui concerne leur état chimique, pour lequel les eaux territoriales sont également incluses.

⁴ Eaux souterraines : toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol.

⁵ Eaux de transition : des masses d'eaux de surface à proximité des embouchures de rivières, qui sont partiellement salines en raison de leur proximité d'eaux côtières, mais qui sont fondamentalement influencées par des courants d'eau douce.

⁶ Eaux côtières : les eaux de surface situées en-deçà d'une ligne dont tout point est situé à une distance d'un mille marin au-delà du point le plus proche de la ligne de base servant pour la mesure de la largeur des eaux territoriales et qui s'étendent, le cas échéant, jusqu'à la limite extérieure d'une eau de transition.

Tableau 1-2. Extrait de la liste des substances prioritaires dans le domaine de l'eau (PARLEMENT-EUROPEEN, 2001b).

Substance ou groupe de substances	Numéro CAS (1)	Numéro UE (2)	Nom de la substance prioritaire	Identifiée en tant que substance dangereuse prioritaire
1	15972-60-8	240-110-8	Alachlore	
2	120-12-7	204-371-1	Anthracène	(X) (***)
6	7440-43-9	231-152-8	Cadmium et ses composés	X
12	117-81-7	204-211-0	Di(2-éthylhexyl)phtalate (DEHP)	(X) (***)
13	330-54-1	206-354-4	Diuron	(X) (***)
16	118-74-1	204-273-9	Hexachlorobenzène	X
20	7439-92-1	231-100-4	Plomb et ses composés	(X) (***)
21	7439-97-6	231-106-7	Mercure et ses composés	X
22	91-20-3	202-049-5	Naphtalène	(X) (***)
23	7440-02-0	231-111-4	Nickel et ses composés	
28	sans objet	sans objet	Hydrocarbures aromatiques polycycliques	X
	50-32-8	200-028-5	(Benzo(a)pyrène),	
	205-99-2	205-911-9	(Benzo(b)fluoranthène),	
	191-24-2	205-883-8	(Benzo(g,h,i)perylène),	
	207-08-9	205-916-6	(Benzo(k)fluoranthène),	
	193-39-5	205-893-2	(Indeno(1,2,3-cd)pyrène)	
30	688-73-3	211-704-4	Composés du tributylétain	X
	36643-28-4	sans objet	(Tributylétin-cation)	
31	12002-48-1	234-413-4	Trichlorobenzène	(X) (***)
	120-82-1	204-428-0	(1,2,4-Trichlorobenzène)	
32	67-66-3	200-663-8	Trichlorométhane (Chloroforme)	

(*) Lorsqu'un groupe de substances est retenu, un représentant typique de ce groupe est mentionné à titre de paramètre indicatif (entre parenthèses et sans numéro). Les contrôles sont ciblés sur ces substances types, sans exclure la possibilité de rajouter d'autres représentants, si nécessaire.

(**) Ces groupes de substances englobent généralement un très grand nombre de composés. Pour le moment, il n'est pas possible de fournir des paramètres indicatifs appropriés.

(***) Cette substance prioritaire est soumise à révision pour sa possible identification comme "substance dangereuse prioritaire". La Commission adresse au Parlement européen et au Conseil une proposition en vue de la classification définitive de cette substance, au

(****) Uniquement pentabromodiphényléther (numéro CAS 32534-81-9).

(*****) Le fluoranthène figure dans la liste en tant qu'indicateur d'autres hydrocarbures aromatiques polycycliques plus dangereux.

(1) CAS: Chemical Abstract Services.

(2) Numéro UE: Inventaire européen des produits chimiques commercialisés (EINECS) ou Liste européenne des substances chimiques

2.3.2 Des substances anthropiques qui ont des conséquences sur l'environnement

L'exemple du cadmium est assez représentatif de ce que peut engendrer la présence d'une substance toxique dans le milieu aquatique. C'est un cas d'étude typique de pollution anthropique terrestre ayant entre autres des conséquences sur le milieu marin. Historiquement, le bassin de Decazeville, situé dans le centre de la France, était une zone d'extraction minière importante (bassin houiller). Au cours de son exploitation, elle a produit du cadmium (Cd), du plomb (Pb) et de l'arsenic (As). Situé à proximité du Riou-Mort, une petite rivière, la zone a subi les aléas du temps et l'érosion, drainant les vestiges de ces exploitations vers l'eau (BLANC, et al., 2006). Ainsi, ces métaux lourds se retrouvent dans la rivière, rivière qui vient alimenter le Lot, puis la Gironde, pour finir par se déverser dans l'océan Atlantique. Une fois dans l'eau, ces métaux peuvent soit se lier aux particules en suspension présentes (on parle de Cd particulaire) ou rester en suspension (Cd dissous). Chacune de ses formes a des comportements physico-chimiques différents, qui peuvent varier en fonction de la température, du pH ou de la salinité. Si la forme particulaire aura tendance à sédimenter, et donc à être plus ou moins fixée (sauf en cas de crue, où il y aura une remise en suspension), la forme

dissoute reste disponible. Le risque est alors que cette substance soit absorbée par les organismes vivant dans ce milieu. C'est le cas des Bivalves, et plus particulièrement des huîtres. Ces organismes filtreurs accumulent les substances qu'ils n'arrivent pas à dégrader. C'est ce qui se produit avec les métaux lourds, qui restent dans la chair des huîtres. Il s'agit d'un phénomène de bioaccumulation. Il a été ainsi prouvé que la pollution au Cd engendrée par le bassin de Decazeville se retrouve jusque dans les huîtres du bassin de Marennes-Oléron (BOUTIER, et al., 2000). Ce cas d'étude montre bien toute l'importance que peuvent prendre les mécanismes de transports de substances et de transferts de pollution. Une substance issue des terrils miniers a fini sa course à quelques centaines de km de là, dans l'océan Atlantique, soit dans les sédiments soit dans les organismes vivants.

2.3.3 *Un exemple de bioaccumulation et de ses conséquences*

Les substances telles que les métaux lourds sont hautement bio-accumulables, i.e. elles s'accumulent non seulement au sein d'un même organisme (le plus souvent dans les graisses), mais aussi le long de la chaîne trophique (*Figure 1-9*). Un des exemples le plus parlant est le Béluga. Mammifère vivant principalement en eaux froides, il est consommateur final, i.e. il n'a pas de prédateur. Il vit notamment dans la Baie d'Hudson au niveau de l'embouchure du fleuve Saint-Laurent, au Canada. Or cette région est très industrialisée et produit un grand nombre de substances aux effets divers et variés (résidus médicamenteux et hormonaux, métaux lourds, pesticides,...). Prises seules, elles n'ont pas d'impact mesurable à court terme sur les organismes. Pourtant, il a été mis en évidence que c'est le mélange de toutes ces substances qui, par le phénomène de bioaccumulation, provoque un taux anormalement élevé de cancers chez le Béluga (MARTINEAU, et al., 2002).

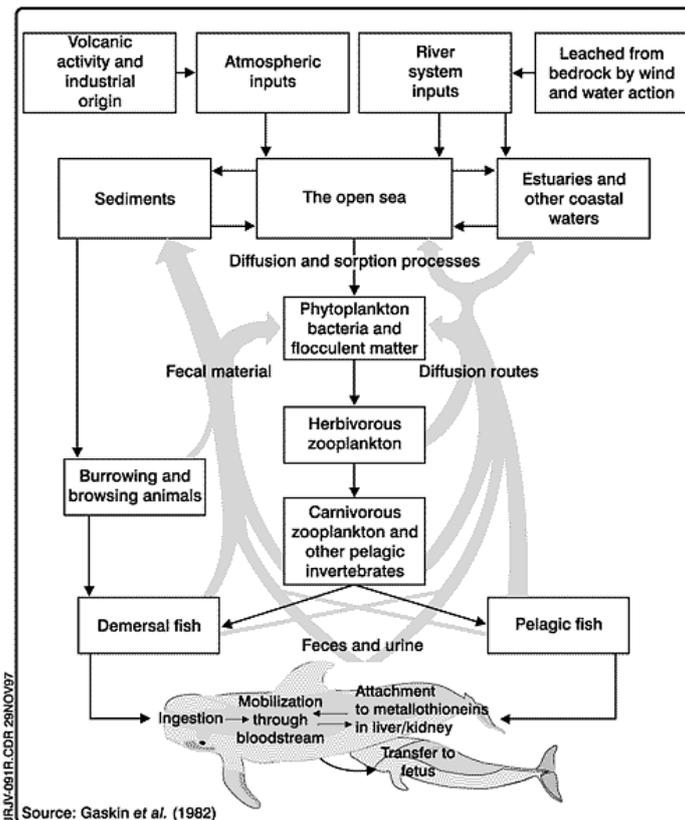


Figure 1-9. Le phénomène de bioaccumulation : plus le niveau de la chaîne trophique est important plus la concentration en substances est importante. Dans ce modèle trophique, c'est le Beluga qui est le réceptacle final.

2.4. L'eau : une ressource et un environnement particulièrement concernés par les mécanismes de pollutions anthropiques

2.4.1 L'eau, une ressource préservée par la mise en place de réglementations

La problématique de l'eau est l'une des plus étudiée et réglementée, car elle touche l'ensemble des secteurs : le privé aussi bien que le public, les collectivités locales ou encore les individus. L'eau douce, aussi appelée « or bleu » est une ressource fortement limitée. La DCE prévoit d'ici 2015, d'atteindre le « bon état des eaux pour les milieux moyennement ou fortement dégradés » et de préserver les milieux non dégradés. Ce « bon état » comprend l'état écologique et chimique d'une masse d'eau. Il est défini par des normes de qualité environnementale (NQE) (PARLEMENT-EUROPEEN, 2006c), plus connues sous le nom de REACH (règlement sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques), établies sur la base de critères écotoxicologiques, et décrites dans le guide technique et méthodologique européen (le TGD pour « Technical Guidance Document »). Le TGD fixe les procédures d'évaluation des substances chimiques. La prévention et le contrôle de la pollution sont ainsi fondés sur une approche combinée à la source par la fixation de valeurs limites d'émission et dans l'environnement

par le respect d'objectifs de qualité fixés par des normes de qualité environnementale (MARCHAND, et al., 2004b). Pour l'évaluation des risques dans l'environnement, le TGD repose en principe sur quatre étapes essentielles (MARCHAND, et al., 2005a) :

- L'identification des dangers et/ou propriétés et effets préoccupants, relatifs à une substance,
- L'évaluation des effets, consistant à déterminer, en termes qualitatifs et quantitatifs, la nature et la gravité des effets défavorables de la substance considérée. Ce qui se traduit par une relation dose / effet pour l'homme et concentration / effet pour l'environnement ; le but final étant d'estimer une PNEC (ou concentration prévisible sans effets), calculée à partir de données de toxicité aiguë et chronique et en appliquant des facteurs de sécurité en fonction de la nature des données disponibles,
- L'évaluation de l'exposition, consistant à estimer les concentrations auxquelles un compartiment environnemental peut être exposé, sur la base des quantités produites, de l'estimation des rejets dans le milieu et des propriétés de la substance rejetée. Le résultat escompté est la fixation d'une PEC (concentration environnementale prévisible) sur la base de données mesurées dans l'environnement ou calculées à l'aide de scénarii d'émissions appropriés,
- La caractérisation du risque, basée sur le rapport PEC/PNEC (concentration environnementale prévisible / concentration environnementale non prévisible), qui estime l'incidence et la sévérité des effets potentiels sur un environnement donné.

Ce guide est aujourd'hui un document de référence technique à l'échelle européenne pour évaluer les risques des substances chimiques dans le milieu marin.

Mais, avant que cette législation n'entre en vigueur par l'intermédiaire du TGD, la prévention de la pollution émise par les navires faisait déjà l'objet de la Convention MARPOL 73/78 (IMO, 1983c). Les substances liquides nocives, issues de la phase d'exploitation des navires, étaient alors classées en 4 catégories (A, B, C, D) selon leur dangerosité envers l'environnement marin et la santé humaine. La méthodologie et l'évaluation de ces profils de risque étaient réalisées par le GESAMP (Groupe d'experts des Nations Unies sur les aspects scientifiques de la pollution marine), et prenaient en compte différents aspects, notamment :

- Les dommages aux ressources vivantes (bioaccumulation, toxicité aquatique, modification des propriétés organoleptiques...)
- Les dangers pour la santé humaine (ingestion, inhalation, contacts cutanés et oculaires).

En 1993, le groupe de travail du GESAMP a défini une nouvelle procédure d'évaluation prenant en compte de nouveaux critères pour décrire les risques potentiels, et ce, principalement sur l'environnement marin : les notions de persistance et de toxicité à long terme de la substance, et les effets comportementaux des espèces liés à une contamination de leur biotope.

2.4.2 Les peintures antifouling : un exemple de législation visant à protéger le milieu aquatique

Un exemple très concret qui lie directement des problématiques de conception à des impacts sur l'environnement aquatique est celui des peintures antifouling. Ces peintures ont été développées dans le but d'empêcher (ou du moins de ralentir) la prolifération des microorganismes sur les coques de bateaux. En effet, la présence de salissures sur la coque augmente la corrosion, diminue les performances du navire, et augmente nettement la consommation en carburant. Le problème, c'est que les substances utilisées dans ces peintures étaient biocides. La peinture s'abîmant, et s'érodant, des morceaux se détachent et viennent polluer le milieu. Toute la chaîne alimentaire du milieu est concernée. Du tri-butyle-étain (TBT) a été retrouvé dans de nombreux organismes vivants, qui pourtant n'étaient pas des colonisateurs potentiels des coques. Plusieurs problèmes ont alors été identifiés : non seulement ce TBT se retrouvait en concentration non négligeable dans des poissons commercialisés, tels que le hareng ou le turbot, mais en plus, il a une persistance importante dans les sédiments. Le TBT ayant été identifié comme perturbateur du système endocrinien, son utilisation s'est vue interdite dès 1989, dans les pays de l'Union européenne pour les bateaux de moins de 25 mètres de longueur naviguant en mer, puis au niveau international par le biais de l'Organisation Maritime Internationale (OMI) en 2008 (IMO, 2008d).

A partir d'études environnementales récemment réalisées, des législations ont été mises en place pour interdire entre autres l'utilisation d'étain dans les peintures antifouling (AFS, 2001). Cela a nécessité de la part des concepteurs de trouver des alternatives pour la formulation chimique des peintures. Par exemple, de nouvelles peintures à base de silicone ont été développées.

2.5. La nécessité d'anticiper et d'être proactif

Il est bien plus facile d'éviter une pollution en évitant d'utiliser une substance connue pour sa toxicité plutôt qu'en essayant de la maîtriser. En effet, un risque n'étant jamais nul, il faut toujours considérer qu'une substance ainsi classée peut à tout moment être introduite dans l'environnement, provoquant des effets plus ou moins néfastes.

Les substances légiférées qui étaient utilisées classiquement pour la fabrication d'un produit doivent être remplacées. Pour les remplacer, il faut revenir à la conception du produit, faire des études comparatives et choisir celle qui serait la plus appropriée pour remplacer la substance réglementée. Cela nécessite de reconcevoir voire d'innover en conception.

Les entreprises ont ainsi tout à y gagner non seulement à court terme, pour leur image de marque, mais aussi à long terme pour privilégier un DD et augmenter leur compétitivité. L'investissement dans une démarche environnementale doit être considéré comme un investissement R&D à part entière.

3. LE CADRE DU PROJET CONVENAV

Cette thèse a vu le jour grâce au projet CONVENAV (CONception et Cycle de Vie Environnemental des NAVires). C'est en partant de la problématique soulevée par ce projet que l'ensemble de la démarche d'intégration de la question environnementale dans un processus de conception a pu être développé.

3.1. Les problématiques inhérentes à la Mer et aux Navires

3.1.1 *Le transport maritime*

Le transport maritime est actuellement considéré comme étant le moyen de transport le moins consommateur d'énergie pour une tonne transportée. Il est le moins polluant, avec cinq fois moins de CO₂ émis que pour le transport routier et treize fois moins que pour le transport aérien (ARMATEURS-de-FRANCE, 2010) (*Figure 1-10*). D'après la société Armateurs de France (ARMATEURS-de-FRANCE, 2010), « environ 7 milliards de tonnes de marchandises sont transportées chaque années par la mer. Près de 50 000 navires sillonnent les mers au quotidien et 99% de ces navires effectuent leur voyage sans encombre ».

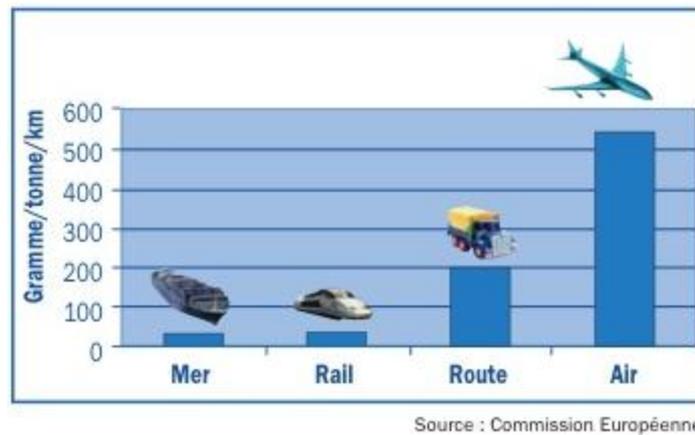


Figure 1-10. Comparaison des émissions de CO₂ entre différents modes de transport (ARMATEURS-de-FRANCE, 2010)

Mais ce n'est pas pour autant que ce mode de transport doit être considéré comme propre et non impactant pour l'environnement, et plus particulièrement pour le milieu aquatique. De fait, en sus de ces émissions génératrices de GES, ces transports émettent des substances telles que les nitrates, les sulfates et leurs dérivés (appelés respectivement et de façon générique les « NO_x » et « SO_x ») qui ont un fort pouvoir délétère sur l'environnement et particulièrement lorsqu'ils sont dissous dans l'eau. Les NO_x et les SO_x entraînent, entre autres, des phénomènes d'acidification des sols et à terme des eaux (qu'elles soient dans les nappes phréatiques ou océaniques) (*Figure 1-11*) (EYRING, et al., 2005).

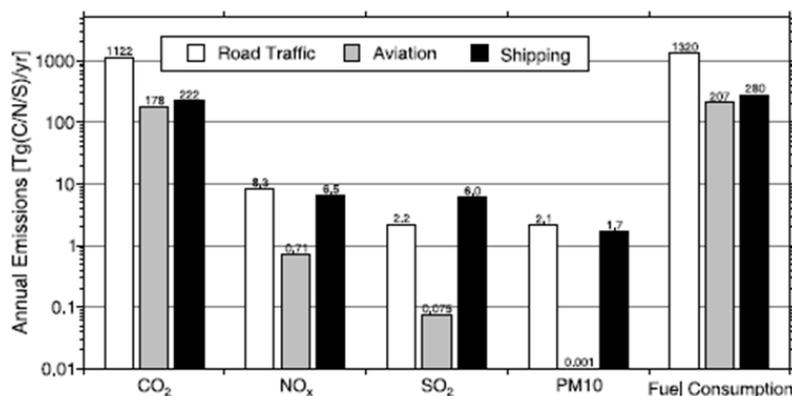


Figure 1-11. Emissions annuelles relatives au transport : émissions de CO₂ en Tg(C), de NO_x en Tg(N), de SO₂ en Tg(S), et en PM10⁷ en Tg(PM). Et consommations de fuel en MT estimées pour l'an 2000 (EYRING, et al., 2005).

En observant l'ensemble des émissions annuelles par moyen de transport, on peut constater que les navires ne sont pas si propres que ça, leurs faibles émissions par tonnes transportées étant compensées par une flotte mondiale très importante.

Les phénomènes d'acidification et d'eutrophisation s'observent directement en milieu naturel, en particulier dans les zones sensibles telles que les eaux côtières. Toute variation de pH du milieu entraînant un changement voire une perte de la biodiversité, cette question ne doit pas rester sans réponse. C'est une des raisons de la mise en place de législations spécifiques aux émissions de NO_x et de SO_x comme dans le port de Los Angeles, très peu permissif en ce qui concerne les émissions de substances nocives ou toxiques pour l'environnement. Au niveau mondial, ce phénomène d'acidification des océans (Figure 1-12) est aussi observable (ORR, et al., 2005). La dilution du CO₂ dans l'océan entraîne une acidification des eaux qui se répercute directement sur les organismes planctoniques, en dissolvant leur test⁸. Les conséquences inhérentes en sont une affection de l'ensemble de chaîne trophique, qui se voit sapée à sa source, au niveau des producteurs primaires, mais aussi une diminution du pouvoir photosynthétique et donc d'absorption du CO₂ par ces mêmes organismes. Ainsi, il est aisé de constater que la variation d'un seul paramètre environnemental (le pH de l'eau) peut avoir des conséquences multiples et interagissant les unes avec les autres de façon exponentielle.

⁷ PM10 = microparticules de 10micromètres de diamètre

⁸ Les tests sont les coquilles des microorganismes planctoniques. Ils sont pour certains composés d'aragonite, un minéral.

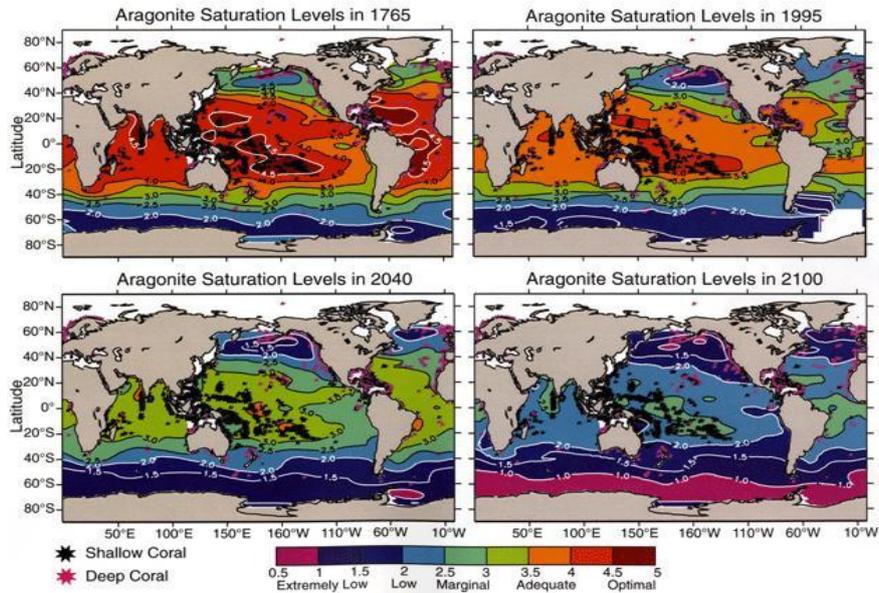


Figure 1-12. Observation et prévision du phénomène d'acidification des océans via le niveau de saturation en aragonite⁹ des organismes planctoniques de 1765 à 2100. Ce phénomène est dû principalement à l'augmentation du CO₂ (qui est transféré de l'atmosphère vers l'eau) mais aussi des émissions de NO_x. CO₂ et NO_x acidifient les eaux et ce faisant, dissolvent les tests du Plancton, appauvrissant l'océan en ressource primaire, et donc ayant potentiellement le pouvoir de toucher l'ensemble des chaînes trophiques liées à cette ressource (ORR, et al., 2005)

Les phénomènes d'eutrophisation, même s'ils se produisent naturellement, sont très courants depuis quelques années en Bretagne, et sont visibles lors des « marées vertes » qui envahissent les plages (Figure 1-13). En comparaison de l'acidification, ces phénomènes sont beaucoup plus locaux. Leur cause est connue et reconnue comme conséquence du rejet de lisiers (porcins principalement) et de l'infiltration dans le réseau aquatique breton de nitrates et autres substances stimulantes pour la croissance des plantes vertes. Ces produits se retrouvant rejetés à la mer plus ou moins directement, ils viennent servir de nourriture aux algues, qui prolifèrent alors de façon anarchique, rendant leur milieu de vie anoxique. C'est le phénomène d'eutrophisation.



Figure 1-13. Une plage bretonne lors d'un phénomène de marée verte. La plage est recouverte par un tapis d'algues.

⁹ L'aragonite est le polymorphe stable à haute température et haute pression du carbonate de calcium, de formule CaCO₃. Il est un constituant de la nacre et des perles d'huîtres, moules ou autres coquillages, et d'une partie du squelette de la plupart des coraux durs et les récifs coralliens.

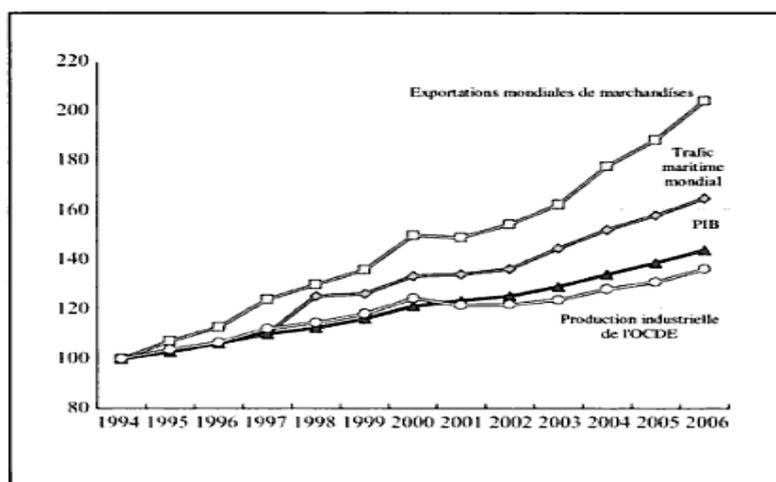
L'océan est un formidable réservoir de ressources tant en termes de biodiversité que de biotope ou de ressources abiotiques. Il est aussi le régulateur thermique de la planète. Mais c'est aussi le lieu de déversement ultime de nos déchets. Il nécessite donc une attention toute particulière, sachant que jusqu'à présent, il n'était pas vraiment au centre des préoccupations, qu'elles aient été politiques, industrielles ou individuelles. La problématique de la Mer, au sens large du terme, émerge depuis seulement une dizaine d'années.

3.1.2 L'évolution de la flotte mondiale

a. Quelques chiffres concernant le développement de la flotte mondiale

La flotte mondiale ne cesse de croître (*Figure 1-14*), non seulement parce que les échanges se globalisent, mais aussi parce que c'est le moyen de transport le plus « propre » (par tonne transportée) et le moins cher dès lors que le commerce se fait au niveau intercontinental. Ces navires ne sont pas éternels. Leur durée de vie est longue, et souvent, les bateaux sont exploités le plus longtemps possible, certains ne s'arrêtant que par la force des choses, lorsqu'ils menacent de couler (voire qu'ils finissent par sombrer). Il est ainsi très difficile d'évaluer le nombre de navires partant en démantèlement par an (*Figure 1-15*) (ISEMAR, 2010). Deux causes majeures forcent les armateurs puis les « cash buyers¹⁰ » à mener leurs navires à la démolition : lorsque les navires deviennent trop âgés, obsolètes ou vétustes, mais aussi lorsque le marché est en surcapacité. Ce dernier point est une spécificité des navires et de la flotte internationales. Mais il est certain que la question de l'impact environnemental des navires tout au long de leur vie, et donc même lors de leur fin de vie, doit être considéré comme un moyen non négligeable de réduire « l'ardoise environnementale » qu'a pu et que continue à contracter l'ensemble de la population mondiale.

¹⁰ Le *cash buyer* est un « intermédiaire qui achète le navire à son propriétaire, pour ensuite choisir l'avenir auquel il le destine, malgré la volonté première de l'armateur de le faire démolir. Professionnel spéculateur par excellence, le *cash buyer* va attendre le moment opportun pour revendre le navire à un chantier de démolition » (ISEMAR, 2010)



Sources: Secrétariat de la CNUCED à partir des *Principaux indicateurs économiques* de l'OCDE, avril 2006, de Globstat de la CNUCED, de la base de données sur le trafic de marchandises <http://uds.unctad.org/intrastat>; de l'*Étude sur les transports maritimes* de la CNUCED, de diverses publications et des *Statistiques du commerce international* de la CNUCED, 2006. Pour quelques tendances à long terme, voir le tableau II.1.

Figure 1-14. Indices de croissance économique mondiale (PIB), production industrielle de l'OCDE, exportations mondiales de marchandises (en volume) et trafic maritime (en volume), 1994-2006 (1994=100) (CNUCED, 2007).

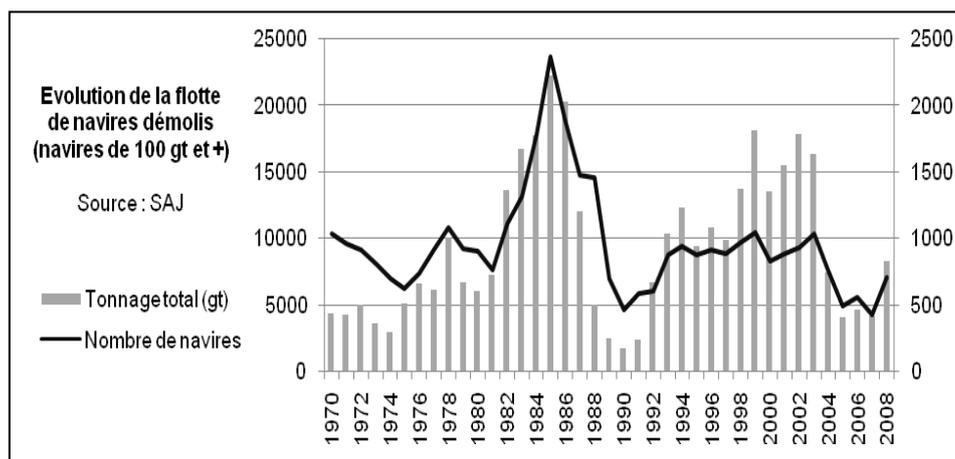


Figure 1-15. Evolution de la flotte mondiale de navires démolis (pour les navires de 100 Gt et plus) (ISEMAR, 2010). On constate que contrairement à ce qui pourrait être attendu, le nombre de navires démolis n'augmente pas avec le nombre de navires construits.

b. Le démantèlement des navires

Tous les navires construits finissent un jour ou l'autre par devenir obsolètes ou inutilisables. Ils doivent donc être mis hors d'usage. Plusieurs modes sont possibles : le navire a subi de telles avaries qu'il a fini par couler, le navire est coulé volontairement, le navire est laissé à l'abandon soit dans l'eau soit après échouage, le navire est démantelé. C'est cette dernière solution qui sera considérée dans le cadre de cette étude.

Trois types de chantiers sont classiquement définis pour caractériser le mode de démantèlement des navires (MIDN, 2006) :

- Les chantiers très mécanisés et à peu de main d'œuvre, avec un coût très élevé, uniquement présents sur les côtes occidentales (en Grande-Bretagne ou aux Pays Bas), avec capacités de l'ordre de 1000 t/homme/an
- Les chantiers non mécanisés, où la main d'œuvre est indispensable et de faible coût. Ce sont les chantiers du sous continent indien (Inde, Pakistan et Bangladesh, principalement), avec une productivité de quelques dizaines de t/homme/an
- Les chantiers intermédiaires, où la main d'œuvre effectue une bonne part du démantèlement malgré la présence de quelques équipements, qui restent à des coûts assez élevés. Ils sont situés surtout en Turquie, en Chine, ou dans certains chantiers du continent américain, avec une productivité de quelques centaines de t/homme/an.

Actuellement, plus de 90% des navires sont démantelés sur des chantiers non mécanisés, en Inde, au Pakistan et au Bangladesh (LLOYD's, 2000), dans des conditions très peu respectueuses non seulement de l'environnement, mais aussi des Hommes. Les bateaux sont échoués à marée haute, sur des plages de sable peu pentues, laissant peu de place à la maîtrise d'éventuelles fuites de carburant, ou d'autres substances nocives pour le milieu. Ils sont ensuite « cannibalisés ». Tout ce qui peut être récupéré et qui est récupérable est enlevé du navire ; parquet, meubles, ... Puis la découpe peut commencer. Elle se pratique au chalumeau, sans protections respiratoires ou vestimentaires. Ces conditions de démantèlement doivent changer car elles ne sont plus acceptables, ni acceptées par la communauté maritime, les organisations internationales, l'Union européenne, les États et les ONG. En effet, la croissance de la flotte est telle que dans les années à venir, le tonnage des navires à démanteler pourrait atteindre une vingtaine de millions de tonne par an (contre une moyenne de 40000t/an actuellement) (MIDN, 2006) (*Tableau 1-3*). Il est indispensable que le démantèlement des navires devienne plus propre et plus sûr, et ce, pour différentes raisons : la protection de la santé des travailleurs et de leur environnement de travail, i.e. les chantiers de démantèlement ; la protection de l'environnement marin, qui n'est pas une décharge où les navires peuvent être laissés à l'abandon ou sabordés ; la sécurité de la navigation et la sauvegarde des vies humaines, car plus un bateau est vétuste et délabré, plus il existe de risques d'avaries graves ; la participation au DD avec une priorité donnée au recyclage des métaux, non seulement pour en préserver leur ressource, mais aussi pour économiser les énergies nécessaires à l'extraction et à la mise en forme des matières premières.

Tableau 1-3. Estimation des volumes (en millions de tonne – lège) de démolition futurs des navires civils (MIDN, 2006). Le pic de 2010 correspond à l’année butoir pour le retrait définitif des pétroliers à simple coque

ESTIMATIONS DES VOLUMES DE DEMOLITION FUTURS

(en millions de tonnes - lège)

Année de retrait progressif	Vraquiers	Porte-conteneurs	Gaziers	Navires rouliers à passagers	Autres navires de charge	Navires non cargos	Pétroliers	Autres tankers	Total
2006	3,0	0,9	0,3	0,9	1,6	0,1	0,2	0,2	7,2
2007	2,9	0,9	0,3	0,8	1,4	0,1	0,3	0,2	6,9
2008	2,8	0,9	0,3	0,7	1,3	0,1	1,3	0,2	7,6
2009	2,7	0,9	0,3	0,7	1,1	0,1	1,1	0,2	7,1
2010	2,6	1,0	0,3	0,6	1,0	0,1	11,0	0,3	16,9
2011	2,4	1,0	0,3	0,5	0,9	0,1	0,4	0,3	5,9
2012	2,3	1,0	0,2	0,4	0,8	0,1	0,3	0,4	5,5
2013	2,2	1,1	0,2	0,4	0,8	0,1	0,4	0,5	5,7
2014	2,1	1,2	0,2	0,4	0,7	0,0	0,4	0,6	5,6
2015	2,1	1,3	0,2	0,4	0,7	0,0	1,2	0,7	6,6

Source : Commission européenne.

Il est important de considérer les navires et leur fin de vie. En gérant au mieux le stock, il est possible de remettre à disposition une grande quantité de métaux, matières recyclables par excellence. Et pour cela, il faut prendre en compte ces questions de recyclabilité dès la conception de ces navires, pour faciliter le démantèlement final.

3.2. Les réflexions soulevées par ces constats

3.2.1 La nécessité de concevoir différemment

Le constat d’une problématique environnementale peu prise en compte, et ce de façon générale, a été établi. Un intérêt particulier est porté à l’océan qui, jusque-là, n’avait été que peu considéré, si ce n’est comme étant un réservoir illimité de ressources biotiques et abiotiques, capable d’assimiler tous les déchets, toutes les substances qu’il pouvait recevoir. Force est de constater qu’il n’en est rien, bien au contraire. S’il se comporte comme une éponge, en absorbant tout et n’importe quoi, il commence à en subir les conséquences.

Il faut donc se demander quoi faire pour remédier à ce flux de substances toxiques et nocives dirigé vers l’océan. Les réglementations sont là en parties pour répondre à cette problématique. Mais comme il a été décrit plus haut, elles sont assez compliquées à mettre en place, et ne sont pas toujours en phase avec les réels besoins. D’un point de vue réactivité, la législation ne peut pas suivre le rythme soutenu imposé par les innovations constantes et les découvertes conséquentes (ou cosécantes). Il est donc nécessaire d’anticiper les réglementations. D’abord pour ne pas se laisser dépasser lorsqu’une nouvelle législation est mise en place, rendant le produit obsolète. Mais aussi

parce que la tendance actuelle va vers un durcissement concernant les autorisations d'utilisation des substances.

En allant à la source du problème, les solutions sont théoriquement plus faciles à trouver. Pour prendre en compte l'environnement, il faut l'intégrer dès que l'on entreprend une action, que cela soit créer un produit ou développer un service. Ce commencement c'est la conception, la conceptualisation de ce produit ou de ce service. Dans le monde industriel, la conception désigne la création, la fabrication et la distribution d'un produit ou d'un service nouveau (COLIN, 2008). Peuvent ainsi être conçus non seulement des objets ou des équipements, mais aussi des techniques, voire des systèmes sociaux. Historiquement, la formalisation de la conception est une conséquence directe de la révolution industrielle pour répondre aux besoins nouveaux des entreprises et à la production industrielle de série (QUARANTE, et al., 1996). Et si l'environnement doit être pris en compte lors de la conception du produit, il est nécessaire qu'il le soit sur l'ensemble de son cycle de vie (*Figure 1-5*). Il faut que les éventuels problèmes environnementaux soient anticipés en amont. Et il faut que différents critères environnementaux soient intégrés. Les impacts sur l'environnement, mais aussi sur la santé de l'Homme doivent être pris en compte. Et pour cela, il faut pouvoir analyser tout changement lié à la composition, la fabrication, l'utilisation et la fin de vie des produits.

3.2.2 *La problématique générale de cette thèse*

En partant de l'exemple des navires, produits très particuliers faisant intervenir l'ensemble de la « supply chain » et les clients, en mettant en avant le besoin de connaissance de l'environnement marin et en prenant en compte la nécessité de réorganiser non seulement le mode de pensée mais aussi les échanges entre les parties prenantes, la problématique générale suivante peut être posée :

Un outil d'aide à la décision environnementale adapté et utilisable dès la phase d'avant-projet, peut-il permettre de faire à la fois une évaluation environnementale viable d'un navire et en faciliter l'amélioration de la conception ?

Si oui, comment l'intégrer dans une démarche de conception ancrée à un tel niveau qu'elle en devient structurelle au sein d'une entreprise de grande envergure qui compte un grand nombre de spécialistes ? Ou ce savoir-faire coexiste-t-il avec une conception très organisationnelle ?

3.3. Un consortium pour répondre à des besoins spécifiques

3.3.1 *Le contexte du consortium*

Cette thèse s'appuie sur un projet de recherche financé par l'ANR (l'Agence Nationale de la Recherche), par l'intermédiaire des projets de recherche et développement PRECODD (PRogramme de Recherche sur les Ecotechnologies et le Développement Durable). Les projets PRECODD ont tous pour but de « favoriser l'émergence de nouveaux moyens techniques, méthodologiques et conceptuels, permettant de réduire les impacts des activités industrielles et urbaines sur l'environnement. Il contribue à dynamiser et à structurer la communauté française dans le domaine des écotechnologies, en favorisant le développement de partenariats de recherche public-privé. Le programme PRECODD est inscrit dans la feuille de route française du plan d'action européen ETAP et constitue le principal instrument de R&D de la contribution française » (PRECODD, 2010).

3.3.2 *Des besoins et des exigences spécifiques : intégrer l'approche environnementale lors de la conception des navires*

Le projet CONVENAV a vu le jour pour répondre à un besoin des constructeurs de navires et des futurs armateurs. CONVENAV est un acronyme pour CONception et Cycle de Vie Environnemental des NAVires. En effet, dans le contexte actuel de remise en question de chacun de nos actes et de leurs conséquences sur l'environnement, et pour répondre à une réelle demande de ses clients, DCNS, constructeur naval militaire, souhaite améliorer les performances environnementales de ses navires. Or pour évaluer et améliorer leurs navires, et ce dès la phase de conception, il est nécessaire de développer un outil capable non seulement d'évaluer les impacts environnementaux des navires, mais aussi qui permette d'améliorer les performances environnementales de ces navires. Ce projet répond donc à une logique besoin / développement de produit (*Figure 1-16*). Une analyse des besoins se fait en fonction de 4 paramètres qui vont permettre de décrire le contexte : les producteurs, les demandeurs, les marchés et les besoins. A partir de ces paramètres, les possibilités et les limites d'actions sont définies. Les exigences spécifiques peuvent alors être établies pour commencer le projet (WIGUM, 2004).

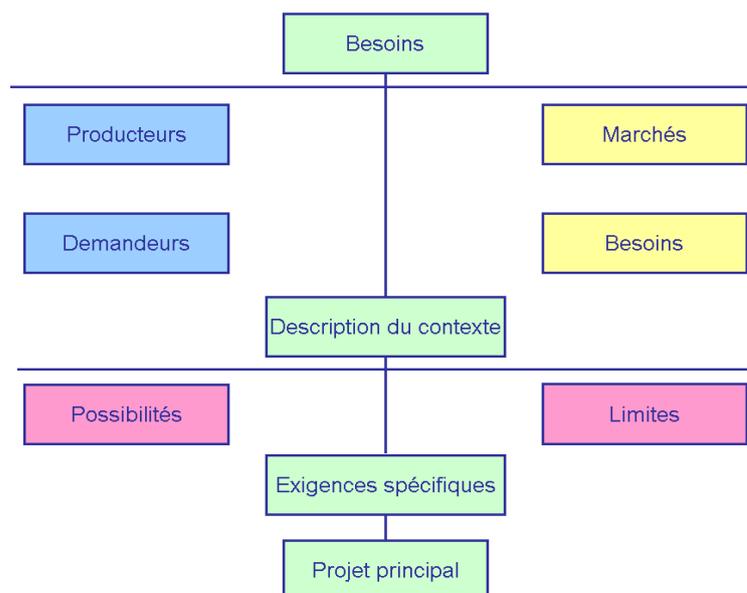


Figure 1-16. Représentation schématisée d'une analyse des besoins (WIGUM, 2004)

De nouvelles exigences viennent se greffer sur un processus de conception « classique » : il faut prendre en compte l'environnement, et pouvoir afficher l'amélioration de ces performances.

Le but du projet CONVENAV est ainsi de développer des outils d'éco-conception et de suivi des impacts sur l'environnement pour le secteur naval militaire en premier lieu, puis civil à terme. Le navire doit pouvoir être étudié dès sa phase précoce de conception, mais sa fin de vie (FdV) doit aussi être considérée. En bref, tout le cycle de vie des navires doit pouvoir être évalué d'un point de vue impacts environnementaux, et chaque phase doit pouvoir être améliorée. Il est aussi indispensable que ces outils soient utilisables par les équipes de conception, qui ne seront pas des spécialistes de l'environnement, même s'ils seront sensibilisés à ces questions. L'idée est que, à partir de ce qui existe déjà en termes de cahier des charges, un nouveau paramètre entre en jeu : la prise en compte de l'environnement via l'évaluation des impacts du produit sur ce dernier.

3.3.3 *Le projet CONVENAV : un projet ambitieux, à double objectif*

Aujourd'hui, prévoir les impacts environnementaux d'un produit dès sa phase de conception est une vraie valeur ajoutée. Quand en plus il s'agit d'un produit aussi complexe qu'un navire, c'est non seulement un vrai challenge, mais aussi une démarche volontariste car il n'existe pas (encore) de réelles obligations de préservation environnementale pour les navires militaires, et assez peu pour les navires civils (IMO, 1983c).

L'outil d'évaluation quantitative des impacts environnementaux le plus complet actuellement disponible est l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) (cf. chapitre 2, 1.3.4). L'ACV est une méthode classique,

très généraliste et difficilement applicable à un niveau de précision correct pour des produits aussi complexes que des navires. Elle est aussi très difficile à appréhender, et elle demande des compétences spécifiques, avec une connaissance particulière non seulement pour modéliser les produits mais aussi pour analyser les résultats. Il n'existe pas non plus de bases de données globales adaptées aux spécificités du milieu marin, ce qui conduit à faire des approximations préjudiciables à la qualité des résultats.

La problématique du projet CONVENAV consiste donc à créer à la fois une méthodologie d'évaluation des impacts des navires sur l'environnement, avec un focus sur le milieu aquatique, puisque c'est le lieu de prédilection des navires, mais aussi un OEC permettant d'améliorer les performances environnementales de ces navires. L'évaluation et le retour en conception doivent pouvoir se faire grâce au même outil d'éco-conception : l'OCEAN ou « Outil de Conception, Evaluation et Amélioration des Navires ». Il doit être utilisable par l'ensemble de l'équipe projet, à tout moment de la conception, le plus tôt possible, et ce de façon la plus intuitive possible.

Les limites fixées pour le cadre de cette thèse vis-à-vis du projet sont les suivantes :

- Même si les objectifs du projet sont de développer un OEC et un outil de suivi, l'intérêt ne sera porté que sur l'OEC
- Le livrable du projet concernant l'OEC est un démonstrateur, mais la théorie sera appliquée sur le principe d'un outil dont le développement serait achevé.

3.3.4 *Un consortium multi-compétent*

Ce projet fait l'objet d'un consortium réunissant toutes les compétences nécessaires et indispensables.

a. DCNS : le principal demandeur



Le groupe DCNS est issu du regroupement, en 2007, de la DCN (Direction des Constructions Navales) et de la filiale navale de Thalès. Entreprise française, aujourd'hui, acteur européen, et de renommée internationale, DCNS dispose d'une expérience de plus de 350 ans dans la construction navale qui lui permet de se positionner sur le marché mondial des systèmes navals de défense. « Pour maîtriser la complexité des navires armés, DCNS fait jouer son expertise de l'architecture navale, de l'ingénierie des principaux systèmes du navire armé, de la conduite des chantiers d'assemblage et d'intégration, de la réalisation d'équipements spécifiques et du soutien au service opérationnel » (DCNS, 2010).

DCNS est le demandeur principal au sein de ce consortium. Même si ses navires, à destination de la Marine nationale ou des marines d'autres pays, sont exclus du champ d'application des législations en vigueur s'appliquant à l'ensemble de la flotte (IMO, 1983c), il existe une volonté entrepreneuriale et étatique de produire des navires militaires plus respectueux de l'environnement.

Pour fabriquer des bateaux plus performants, il faut d'abord connaître leurs impacts sur le milieu, donc pouvoir en faire une évaluation environnementale. Mais DCNS ne dispose pas d'un outil capable d'évaluer et d'améliorer ces performances, qui soit aussi et surtout utilisable par l'ensemble de l'équipe de conception, à un stade précoce du processus de conception.

DCNS est le premier expérimentateur de l'outil développé, avec une participation et une intégration dès la définition du cahier des charges de l'outil, mais aussi lors du développement informatique de ce dernier. A terme, cet outil sera utilisable par l'ensemble des équipes de conception, après une première phase d'intégration consistant à la sensibilisation du personnel aux problématiques environnementales, dans le cadre d'une démarche de certification environnementale, non seulement des sites de production, mais aussi du processus de conception (cf. chapitre 2, 3).

Dans le cadre du projet, DCNS est le modèle de référence pour l'étude du processus de conception des navires et pour l'intégration de l'OEC au sein d'une entreprise. L'outil développé (au format prototype/démonstrateur, selon les termes définis par l'accord de consortium) sera aussi testé à DCNS, à la fois lors de son développement mais aussi lorsque la version livrable sera disponible.

b. Ifremer : le spécialiste du monde marin, et un demandeur

 L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER a été créé par le décret du 5 juin 1984. Il a différents objectifs : « connaître, évaluer et mettre en valeur les ressources des océans et permettre leur exploitation durable, améliorer les méthodes de surveillance, de prévision d'évolution, de protection et de mise en valeur du milieu marin et côtier, et favoriser le développement économique du monde maritime » (IFREMER, 2010). Il est armateur de quelques navires océanographiques via la société Genavir. Ainsi, Ifremer a un double objectif avec ce projet : participer à la mise en place d'une méthodologie permettant de mieux appréhender l'océan, mais aussi, pouvoir utiliser les outils d'éco-conception et de suivi qui seront développés.

Dans le cadre du projet, Ifremer a été mis à contribution pour la création d'un indicateur marin spécifique, mais aussi pour le test de la version livrable de l'OEC.

c. Sita France : le spécialiste des problématiques de « fin de vie », et une première expérimentation de démantèlement de navire



Sita France est une filiale du groupe Suez Environnement, spécialiste de la gestion globale des déchets depuis 90 ans. Sita dessert 51 millions d'habitants dans 20 pays (SITA, 2010). L'entreprise gère à la fois les citoyens, les entreprises et les industriels, ainsi que les professionnels de santé.

La gestion des déchets est un axe majeur de réflexion dès qu'il s'agit d'environnement, et encore plus lorsqu'il est question de DD. En effet, comme il a été vu plus en amont lors de la

présentation du contexte, il est nécessaire de prendre en compte la fin de vie des produits si l'on veut mettre en place des pratiques durables. Il était donc indispensable qu'un acteur de la fin de vie fasse partie de ce consortium.

Dans le cadre de ce projet, Sita a participé à la collecte de données de terrain, puisqu'à cette occasion, ils ont pu avoir leur 1^{ère} expérience de démantèlement de navire grâce au Lucifer. Ce navire britannique, datant de la Seconde Guerre Mondiale, après avoir servi, a été utilisé comme lieu d'exercices à incendies, entre autres. Sita a participé aussi à la modélisation de la fin vie, qui est une question encore assez peu traitée aujourd'hui, car très difficile à modéliser.

d. Le Bureau Veritas :



**BUREAU
VERITAS**

Bureau Veritas a été créé en 1828 « pour rechercher la vérité et le dire sans crainte ou partialité ». BV estime être le deuxième groupe mondial (en chiffre d'affaires et en nombre de salariés en 2006) de services d'évaluation de conformité et de certification appliqués aux domaines de la qualité, de la sécurité, de la santé, de l'environnement et de la responsabilité sociale (QHSE), et le leader mondial des services QHSE hors inspection de matières premières (BV, 2010).

Dans le cadre du projet, le BV est hors consortium. Il a un rôle d'appuis en ce qui concerne les problèmes et questions législatives et réglementaires. A terme, il pourra faciliter la certification des outils développés car il en aura suivi la construction.

e. Arts et Métiers ParisTech



L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers est une « grande école d'ingénieur », fondée en 1780. Etablissement Public à Caractère Scientifique, Culturel et Professionnel (EPCSCP) placé sous la tutelle du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, elle a pour vocations principales l'enseignement et la recherche (ENSAM, 2010). Le laboratoire concerné par l'éco-conception à Arts et Métiers est le laboratoire MAPIE (Modélisation, Analyse et Prévention des Impacts Environnementaux), récemment rattaché au LCPI (Laboratoire Conception de Produits et Innovation). C'est là qu'est menée la recherche de fond du projet, avec la création des outils, tant du point de vue théorique que pratique. C'est dans ce laboratoire que se déroule la thèse.

Dans le cadre du projet, l'ENSAM a développé les méthodologies pour les outils de conception et de suivi, mais aussi une méthode pour l'intégration de l'éco-conception dans des entreprises de type DCNS (cf. chapitre 3).

CHAPITRE 2) L'ECO-CONCEPTION EN ENTREPRISE – PLACE DU PARAMETRE ENVIRONNEMENTAL DANS LES DIFFERENTES APPROCHES

1. L'ECO-CONCEPTION ET SON INTEGRATION CLASSIQUE EN ENTREPRISE

1.1. Le processus de conception : bref rappel

La conception d'un produit, quel qu'il soit, est bâtie sur un schéma classique comportant des jalons étapes. Dans un premier temps, il y a une phase d'avant-projet, pendant laquelle la conception du produit se définit. Vient ensuite la phase de conception détaillée, puis le prototypage et les tests associés, l'industrialisation, et enfin, la revue du produit avec une possibilité de retour en conception à ce moment-là (*Figure 2-1*).



Figure 2-1. Schéma des étapes d'un processus de conception et de développement classique d'un produit (ISO-14062, 2003)

Il faut cependant noter que chaque entreprise a son propre processus de conception, issu de ce processus générique. Ce dernier peut dépendre non seulement des produits fabriqués, mais aussi

des acteurs de la conception, de leur nombre, de leur expertise et savoir-faire, de l'entreprise et de son histoire...

Dans une *supply chain* classique, les principaux acteurs sont : le client, l'équipe de conception (composée de décisionnaires, concepteurs, ingénieurs et techniciens), et les fournisseurs. Chacun a ses propres contraintes à respecter. Elles peuvent être économiques, stratégiques, temporelles, qualitatives, techniques, ... (Figure 2-2).

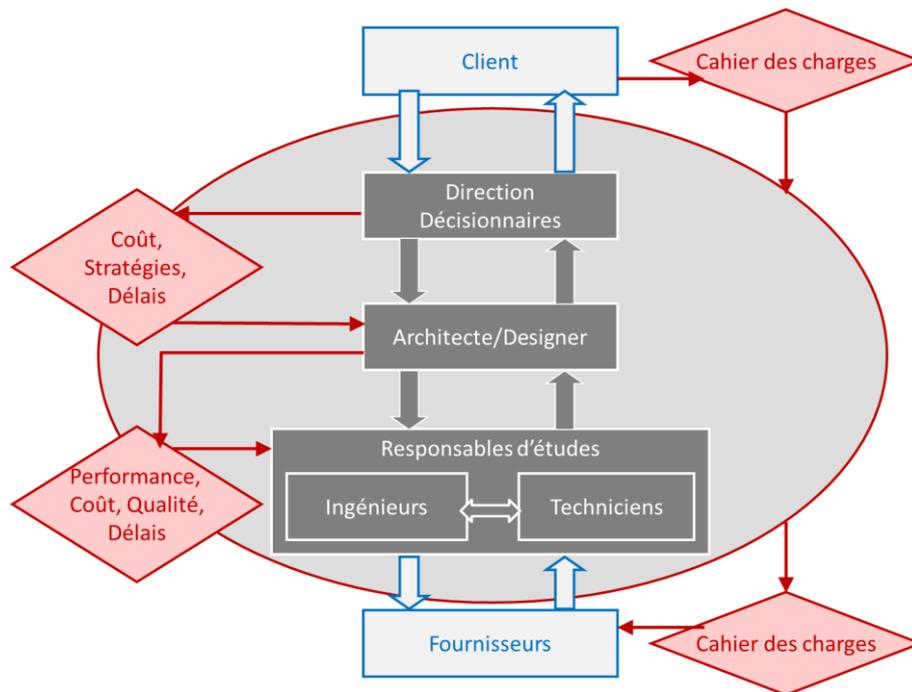


Figure 2-2. Schéma d'une *supply chain* classique, associée aux contraintes liées les plus fréquents

Chacun de ces protagonistes doit pouvoir répondre à l'ensemble des exigences posées qui peuvent être assez nombreuses et contraignantes. Jusqu'à présent, le paramètre environnemental ne fait pas partie de ces contraintes.

1.2. Les processus de reconception et d'innovation

Plus un projet avance, moins les libertés d'actions et de décisions sont importantes, car si des changements sont décidés tardivement, ils entraînent entre autres, de forts coûts supplémentaires. Dans l'idéal, il est donc préférable de fixer les choix techniques et d'innovation lors des phases initiales du processus de conception (ISO-14062, 2003). Plus une décision est prise précocement, moins il est difficile de l'appliquer à l'ensemble du processus de conception (Figure 2-3).

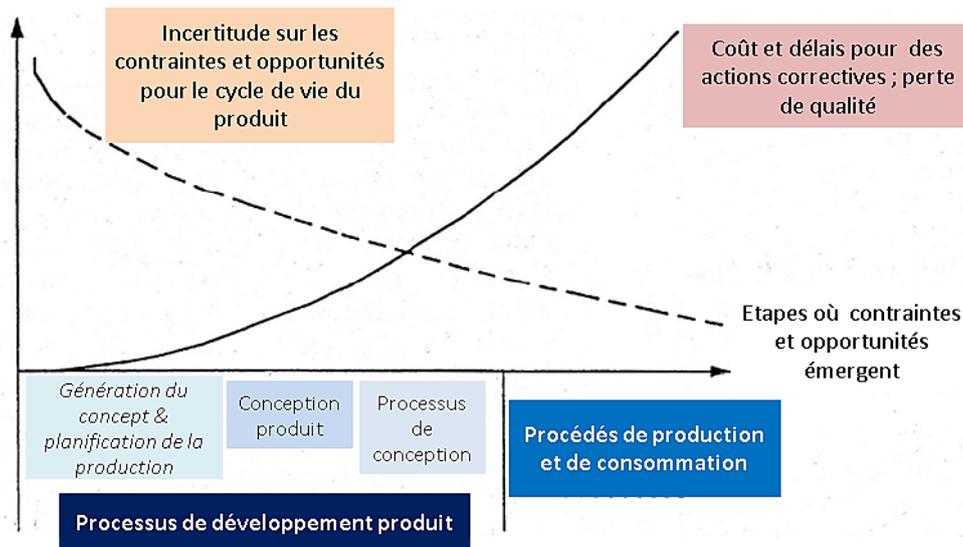


Figure 2-3. Evolution en fonction des phases de conception de l'incertitude sur les contraintes et les opportunités lors du cycle de vie d'un produit, en parallèle des coûts et du délai qu'engendrent une action corrective. Traduit de (WIGUM, 2004)

Quatre grands types de reconception/innovation peuvent être définis (Figure 2-4) :

- Les produits améliorés
- Les produits « ré-affinés », faisant appel à un nouveau design
- Les produits reconçus, avec une innovation en rupture
- Les produits entièrement repensés, entraînant un changement de système industriel

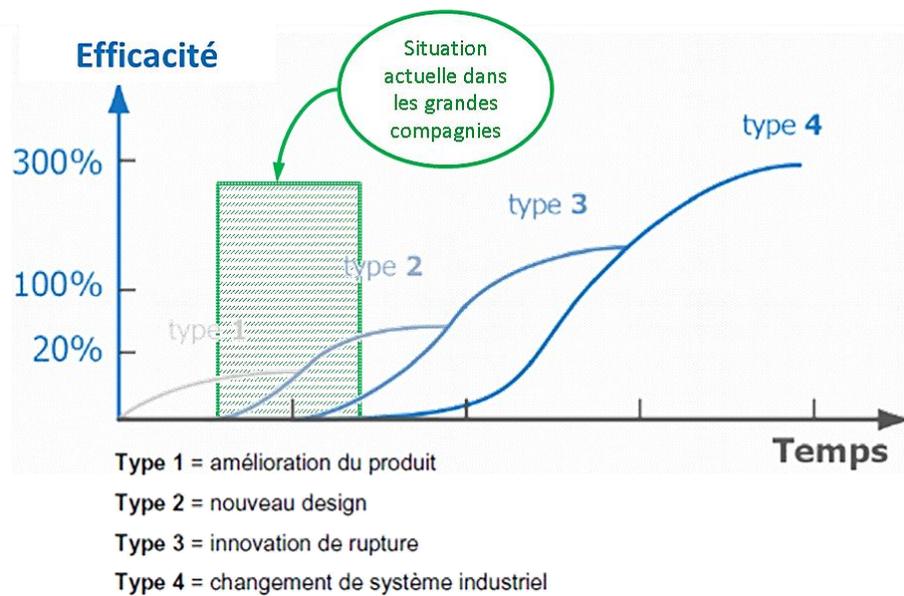


Figure 2-4. Les 4 grands niveaux de reconception/innovation avec le temps nécessaire à leur mise en place et leur efficacité. Modifié d'après (TEULON, 2008) et (LAGERSTEDT, 2003).

Plus le processus de conception est mis en cause plus cela demande de temps pour mettre en application les changements.

Pour la majorité des produits industrialisés, ce processus de conception est assez court, de l'ordre de quelques mois. Il est ainsi assez difficile de faire de la reconception ou de l'innovation à toutes les étapes de conception du produit. Le plus souvent, pour répondre à des contraintes de délais et de coût, les industriels se limitent à l'amélioration de leurs produits. C'est en Recherche et Développement (R&D) que reconception et innovation prennent réellement leur place. Trois grands moments de recherche se définissent (WIGUM, 2004) : la recherche pour la conception au niveau de l'avant-projet, la recherche dans la conception lors du projet en lui-même et la recherche à travers la conception en post-projet (*Figure 2-5*).

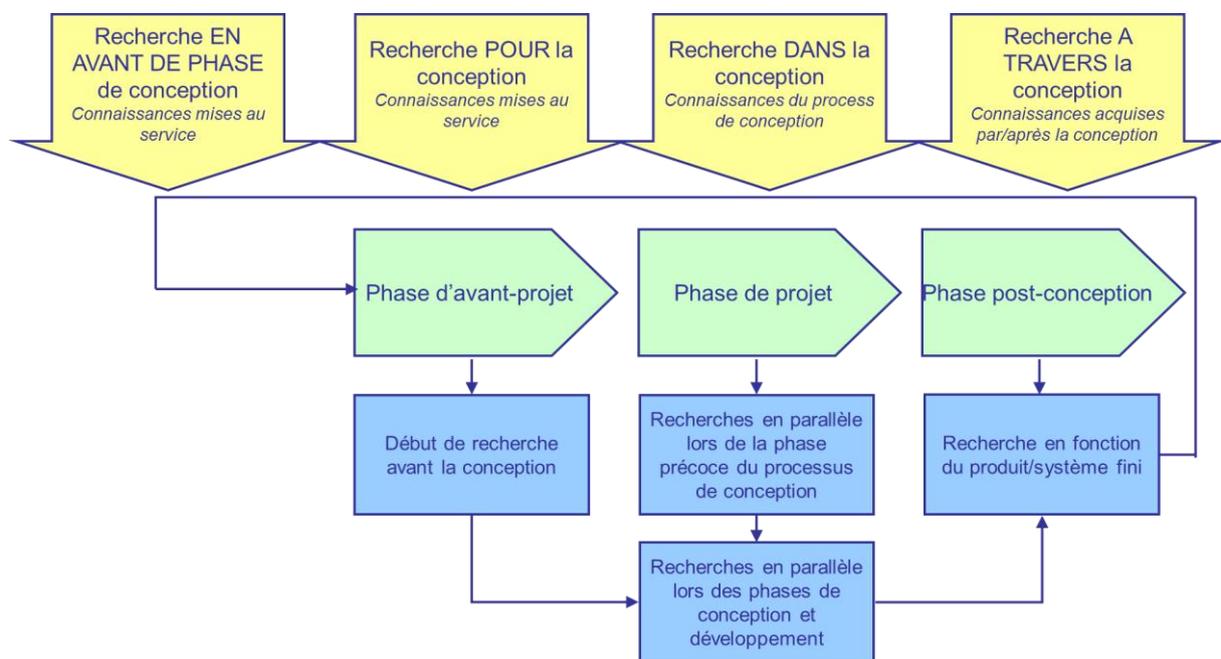


Figure 2-5. La recherche en conception et ses relations avec les phases d'un projet, traduit et modifié d'après (WIGUM, 2004).

Mais, à ces trois grandes étapes de recherche, il faut aussi ajouter la recherche en avant de phase de conception. C'est le cas lorsque les entreprises font de la R&D : la direction générale décide qu'il faut que l'entreprise travaille sur certains sujets car ils pourraient éventuellement déboucher sur de nouvelles opportunités. C'est justement dans ce cadre là qu'il est intéressant d'entreprendre des démarches d'anticipation. Cette approche est volontariste, et ne répond pas ni à des pressions réglementaires existantes ou à venir, ni à des pressions économiques. Plus les nouvelles technologies, les nouvelles idées sont intégrées en amont de la conception plus il est aisé de les mettre en application tout au long de la conception.

Pour créer une méthodologie systémique, applicable à toutes les étapes d'un processus de conception, il faut intégrer les trois modes de recherche (« en avant », « pour », « dans » et « à travers » la conception), et réussir à les coupler pour obtenir un outil systémique. Cela peut

s'envisager d'autant plus facilement que le processus de conception d'un produit est long. Et effectivement, comme cela sera détaillé par la suite (cf. chapitre 2, 2. et 3.), nous allons nous intéresser tout particulièrement à ce type de produit, correspondant à ceux de l'entreprise pour laquelle le consortium a été monté, DCNS. Un temps de conception assez long, avec un grand nombre d'acteurs mis en jeu au sein de l'entreprise, et un produit à longue durée de commercialisation doivent permettre une plus grande latitude d'action lors du processus de conception, et donc une meilleure intégration d'éventuelles évolutions visant à améliorer le produit.

D'après (WIGUM, 2004), en pratique, il y a trois contributions majeures de la recherche en conception :

- La création d'un support de connaissance pour le processus de conception, comme des *guidelines*, ou des critères. Ils permettent de créer une méthodologie de conception
- La possibilité de viser certains types de produits
- La création de méthodes d'évaluation pour tester les résultats des méthodologies expérimentées

Dans cette thèse, ces trois types de contributions seront considérés pour développer un outil d'éco-conception.

1.3. L'éco-conception

1.3.1 Approche d'un aspect du développement durable par la conception

Comme cela a été présenté dans le chapitre 1 (cf. chap.1, 1.3.), sur le long terme, il n'y aura pas de développement possible s'il n'est pas économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement tolérable (MELQUIOT, 2003).

Comme pour toutes les contraintes de conception, il est plus efficace de prendre en compte l'environnement en amont des décisions (CIRAIG, 2010). Jusqu'à présent, de nombreux paramètres entraînent en jeu lors de la prise de décision, mais l'environnement n'en faisait pas partie. Mais pour assurer un DD, il est nécessaire de prendre en compte ce nouveau paramètre, au même titre que les contraintes techniques, économiques, ou tout autre paramètre pris considéré lors de la conception d'un produit (*Figure 2-6*).

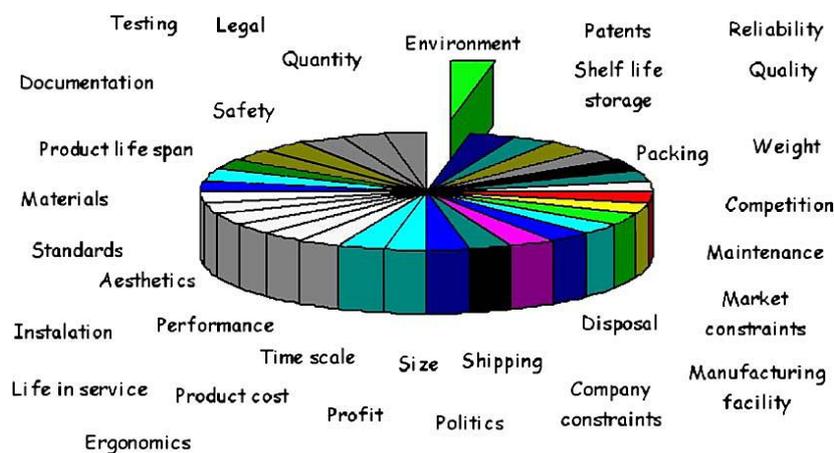


Figure 2-6. Les contraintes à prendre en compte lors de la conception d'un produit. L'environnement est la petite dernière de la liste, mais compte autant que les autres. Si l'une d'elles n'est pas respectée, toute la conception peut être remise en cause (LUTTROP, et al., 2006).

Ainsi, le paramètre environnement vient se placer au milieu d'une trentaine d'autres paramètres pouvant être pris en compte lors de la conception d'un produit (LUTTROP, et al., 2006), et entrant en jeu lors de la prise de décision.

Mettre l'environnement au même niveau que le coût, la satisfaction client, la qualité, les problèmes de pénibilités au travail lors de l'industrialisation,... permettrait d'être réellement durable sur le long terme.

Mais, si les autres contraintes sont bien maîtrisées lors d'un processus de conception classique, il n'en est pas de même de l'environnement, qui fait figure de « petit nouveau » non seulement dans un processus de conception très structuré et n'autorisant pas une grande latitude d'action, mais aussi au sein des équipes de conception, qui sont le plus souvent novices vis-à-vis de cette problématique, quand elles ne sont pas récalcitrantes. Il est donc assez délicat d'introduire, d'intégrer ce paramètre dans le processus de conception. De plus, il ne peut pas être intégré dans ce processus à chaque étape de la même manière (Figure 2-7).

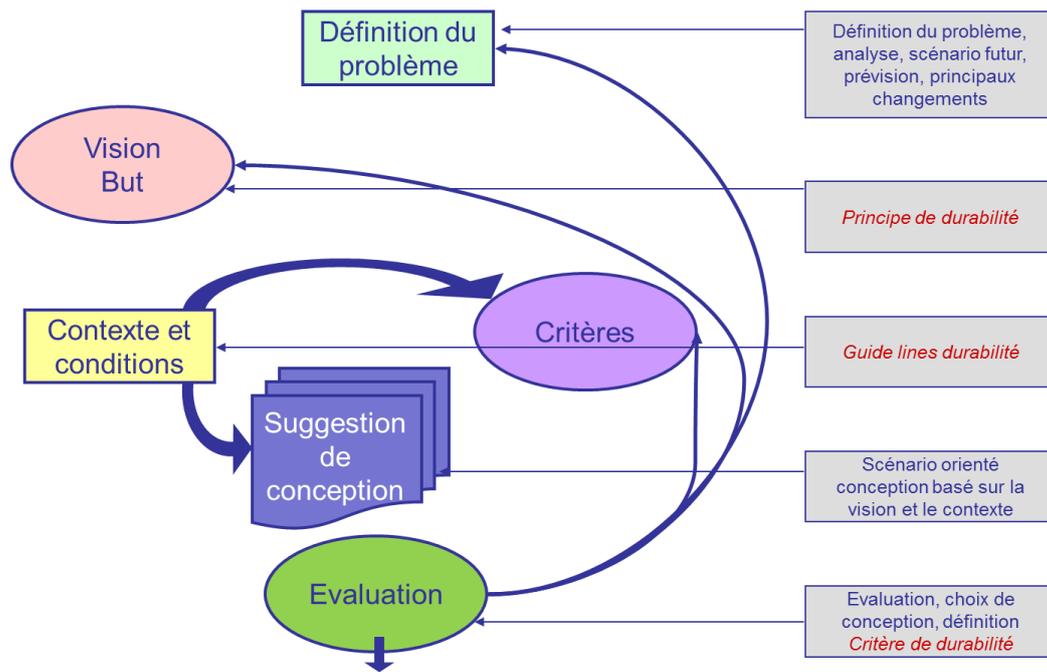


Figure 2-7. Applications possibles pour prendre en compte la notion de durabilité (et donc de l'éco-conception) durant un processus de conception (WIGUM, 2004).

Pour viser un produit durable, ou éco-conçu, les deux grands axes de travail sont les guidelines ou les critères de durabilité (évaluation, choix de conception, ...). Mais ces deux aspects sont, jusqu'à présent, presque incompatibles lors d'un processus de conception. Le fait d'intégrer le paramètre environnemental permettrait de le considérer tout au long du processus de conception.

Une analogie d'intégration d'un nouveau paramètre dans un processus de conception peut être faite avec le paramètre qualité. En effet, dans les années 90, les normes QHSE ont été créées. Elles font appel aux groupes de normes ISO 9000 (qualité), 14000 (environnement) et 18000 (hygiène et sécurité). Le but était de prendre en compte le paramètre qualité en premier lieu, lors de la production. Dans un second temps, ce paramètre a pu être pris en compte aussi lors de la conception. Il n'existait aucun outil permettant d'intégrer ce paramètre. Pourtant, au fur-et-à-mesure, la qualité a pris sa place dans les paramètres de prise de décision en conception, grâce entre autres au développement d'outils permettant d'intégrer ce paramètre. Des systèmes de managements, de procédures, d'instructions ont été établis. Le personnel a été formé. Les équipementiers ont été amenés à participer à cette démarche en créant des fiches de non-conformité de leurs produits par exemple.

Il n'est donc pas impossible d'intégrer de nouveaux paramètres à la conception.

Une des approches proposée pour prendre en compte l'environnement est de se baser sur le concept de cycle de vie. En effet, le cycle de vie d'un produit permet de décomposer celui-ci en étapes de vie, de la production (extraction et récolte des matières premières) jusqu'à l'évacuation finale (élimination ou valorisation), en passant par la fabrication, l'emballage, le transport, la consommation par les ménages et les industries et le recyclage ou élimination (MELQUIOT, 2003)

(Figure 2-8). Les deux grands axes de réflexion orientés développement durable et basés sur le principe de cycle de vie sont, d'une part la gestion raisonnée des ressources non renouvelables, et d'autre part, une meilleure prise en charge des produits arrivés en FdV (Fin de Vie). Ces derniers peuvent représenter une source importante de nouvelle ressource. L'exemple le plus marquant est le cas japonais. Sur-consommateurs de produits de haute technologie, ils sont en train de constituer un vrai réservoir de métaux précieux dans leurs décharges, à tel point que pour l'or, l'argent, le platine ou encore le palladium ils rivaliseraient avec les « vraies » mines australiennes ou brésiliennes.

Relier la fin de vie des produits en les valorisant, soit en tant que matière soit en tant que source énergétique potentielle permet de boucler le cycle de vie de ces produits, et donc d'établir des relations durables vis-à-vis des ressources naturelles non renouvelables et de la gestion des déchets.

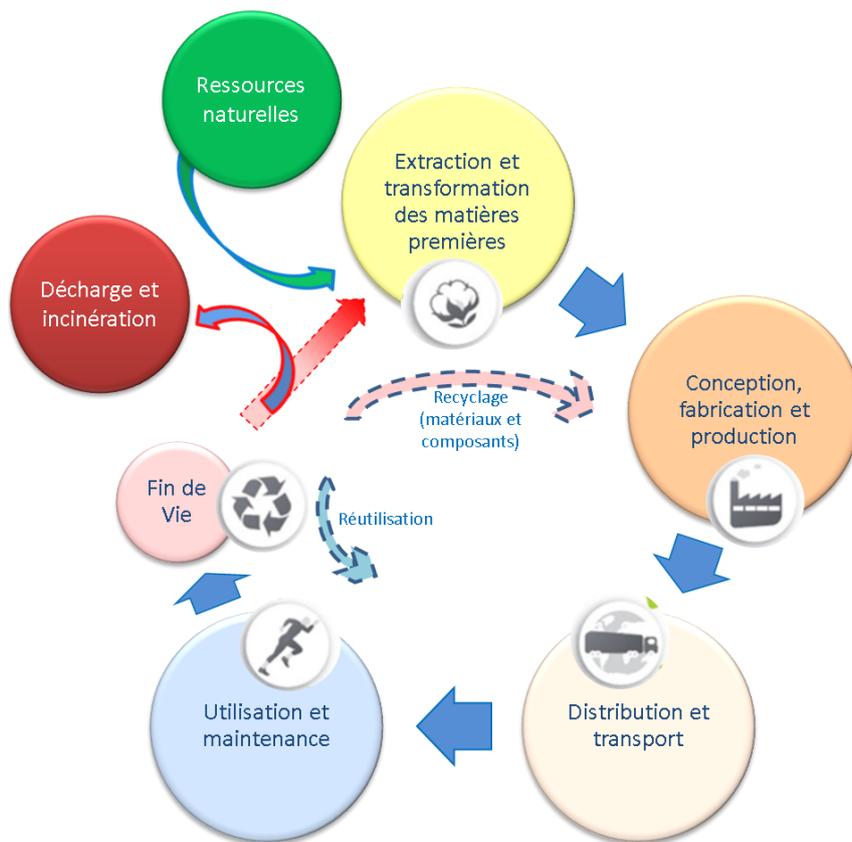


Figure 2-8. Schéma du cycle de vie d'un produit : la fin de vie est peu considérée, sinon du point de vue mise en décharge ou incinération. Le lien entre la FdV d'un produit et la possibilité de créer une nouvelle source de matériaux est assez peu exploité. La gestion des ressources naturelles et de la FdV sont les axes de réflexion majeure à développer pour réellement mettre en place un cycle de vie fonctionnant en boucle fermée.

Et pour prendre en compte l'ensemble des données caractérisant un produit sur son cycle de vie, il est nécessaire d'y avoir accès, donc de pouvoir établir un dialogue entre les décideurs (les concepteurs) et les fournisseurs.

1.3.2 Le processus d'éco-conception

Le rapport de l'ONU du Sommet Mondial pour le DD (SMDD) (UN, 2002) souligne que « la conception des produits, tant dans leur fabrication que dans leur mode de consommation, doit être un des axes prioritaires pour la protection de l'environnement ». Et TISCHNER de dire que « La réflexion sur le cycle de vie du produit dans le processus de conception est une partie importante de la méthodologie pour établir un processus d'éco-conception » (traduit de TISCHNER, 2001).

L'éco-conception est une démarche qui permet à la fois de réduire voire de résoudre des problèmes environnementaux existants et connus, mais aussi d'apporter des solutions innovantes. Si, à court terme, le gain économique n'est pas toujours évident, il l'est souvent dès que l'on s'intéresse à la vie complète des produits.

D'après la norme internationale ISO 14062, l'éco-conception se définit comme étant « l'intégration des contraintes environnementales dans la conception et le développement de produits » (ISO-14062, 2003). Cette norme précise que le terme « produit » désigne aussi bien des produits que des services.

Le but de l'éco-conception est de diminuer sur l'ensemble du cycle de vie du produit l'impact environnemental global. Elle repose sur deux principes fondamentaux :

- l'approche globale, ou approche cycle de vie : elle consiste à étudier un produit « du berceau à la tombe », avec une prise en compte des toutes les étapes de vie du produit (phases de fabrication, d'utilisation et de fin de vie)
- l'approche multicritères : elle considère pour tout le cycle de vie d'un produit, l'ensemble des catégories d'impacts environnementaux pertinents pour le produit étudié.

Pour l'approche cycle de vie, il est donc indispensable de disposer d'un inventaire le plus complet possible, dans lequel on retrouve tous les éléments ayant contribué à la fabrication du produit (*Figure 2-9*) :

- les entrants : les énergies et matières premières
- les sortants : les émissions dans l'air, dans l'eau, et les autres déchets.

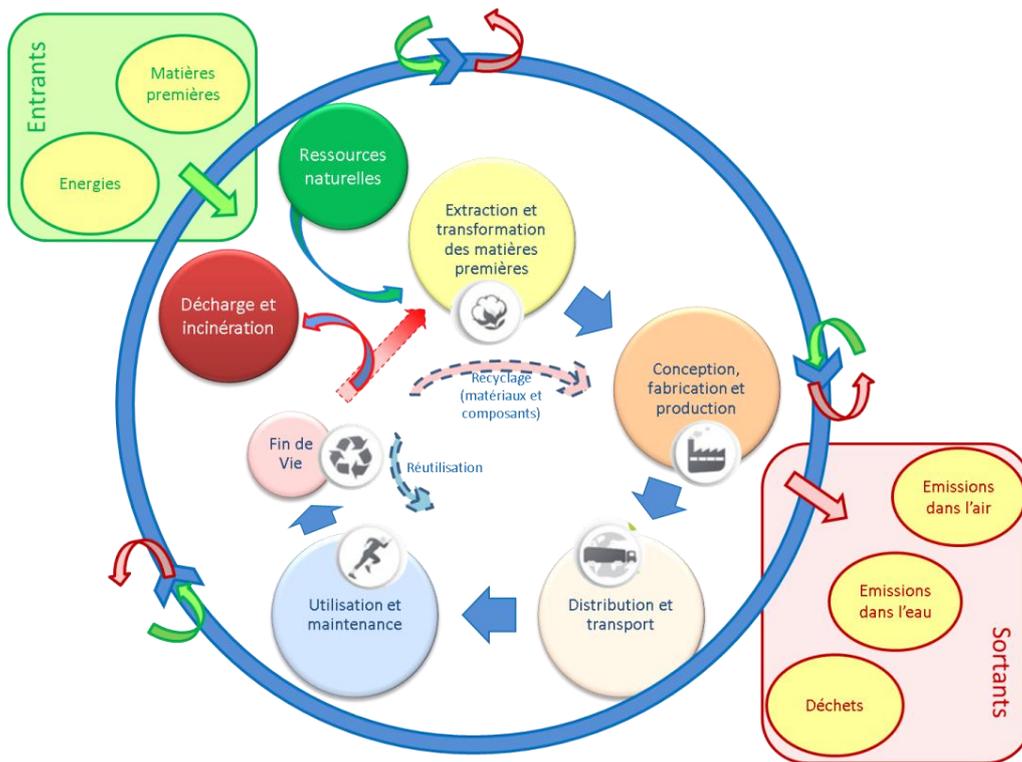


Figure 2-9. Le schéma du cycle de vie avec ses entrants et ses sortants. Quelle que soit l'étape de ce cycle de vie, il peut exister : des consommations de matières premières et d'énergies, ainsi que des rejets dans l'air, dans l'eau ou encore sous forme de déchets.

L'approche multicritères doit permettre de quantifier certaines données telles que les consommations énergétiques, de matières premières, ou encore les rejets et autres émissions produites.

La norme ISO 14062 préconise aussi :

- une intervention la plus amont possible au processus de conception
- de repenser les fonctionnalités du produit
- de prendre en compte les éléments managériaux
- et d'appliquer les grandes lignes de l'éco-conception.

L'éco-conception se place dans le processus de conception à un niveau comparable à celui de la reconception voire de l'innovation. Plus le degré d'éco-conception est élevé, plus son intégration est importante au sein d'une entreprise (Figure 2-10).

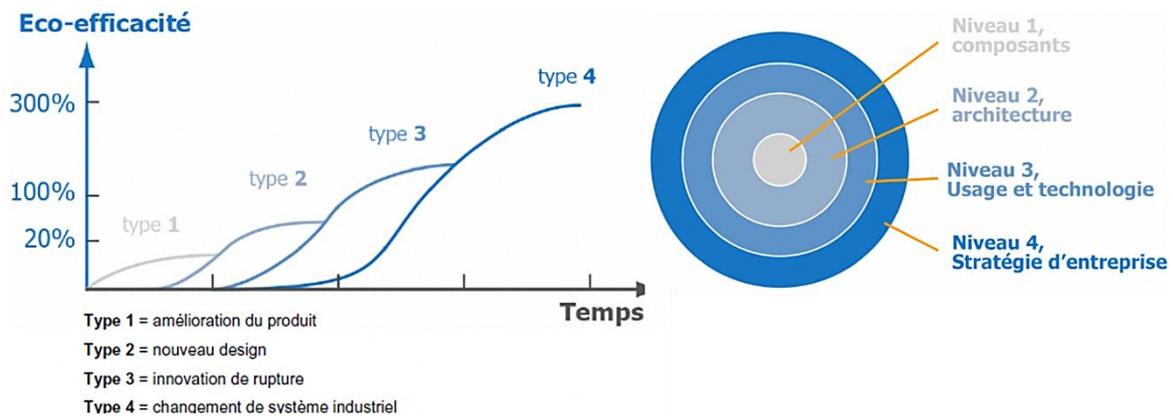


Figure 2-10. Les 4 grands niveaux d'éco-conception en fonction du temps nécessaire à leur mise en place et leur efficacité. En parallèle, la correspondance de ces niveaux d'éco-conception et des systèmes étudiés. Modifié d'après (TEULON, 2008), image Ginkgo21.

Au meilleur degré d'intégration de l'éco-conception, celle-ci peut servir de moteur à l'innovation. Cela permet d'accroître la valeur. Réciproquement, tant qu'à innover, autant développer des produits éco-conçus, ce qui permet de réduire les risques et les impacts environnementaux (Figure 2-11).



Figure 2-11. Innovation et éco-conception. Un juste équilibre et une dynamique à trouver (TEULON, 2008) (image Ginkgo 21)

Et établir une telle dynamique n'est pas obligatoirement plus cher, en particulier si l'échelle considère le moyen ou le long terme.

1.3.3 Les outils d'éco-conception

a. Les outils en fonction des étapes du processus de conception

L'éco-conception peut se définir classiquement comme « la prise en considération des aspects environnementaux sur toutes les phases du processus de développement du produit, permettant d'engendrer le minimum d'impact durant tout le cycle de vie du produit » (DAOUD, 2008). L'intérêt va se porter principalement sur les outils utilisables en fonction des étapes du processus d'éco-conception, qui ont par ailleurs été très largement décrites dans de nombreuses publications telles que (DAOUD, 2008) ou (LE POCHAT, et al., 2007b). Un processus d'éco-conception est similaire à un processus de conception intégrant reconception et innovation. Il faut que le produit soit évalué (le plus tôt possible) en termes de performances (environnementales pour l'éco-conception) pour faire un retour en conception en vue d'une amélioration de ces performances.

Le problème majeur qui se pose actuellement est le manque d'outils permettant de réaliser une évaluation précoce ou inversement une amélioration plus tardive lors du processus de conception.

Dans le schéma classique d'éco-conception, l'intégration des aspects environnementaux ne peut être réalisée qu'au niveau du lancement sur le marché et de la revue (*Figure 2-12*) (ISO-14062, 2003). En effet, dans ce schéma, il s'agit le plus souvent de PME (MILLET, et al., 2005), avec des produits ayant un court temps de conception, et souvent pour de grandes séries. Tous ces éléments ne permettent pas de réaliser une évaluation environnementale satisfaisante lors de la conception de produits dans ces conditions. Lorsque des évaluations environnementales sont faites pendant la conception d'un produit, elles ne peuvent être que trop simplifiées. Elles fournissent alors des informations qui sont à prendre avec précaution, car l'incertitude des données est très importante du fait du manque de précision des données entrées. Au final, et pour la majorité des cas, l'intégration des contraintes environnementales dans la conception est peu réalisable. Ce n'est souvent que lors du développement de produits que l'intégration des contraintes environnementales est faisable. Or, comme cela a été vu plus haut (*Figure 2-3*), plus un paramètre est intégré en amont lors de la conception, plus il est facilement pris en compte.

De nombreux outils d'éco-conception ont été développés, chacun ayant des actions possibles différentes, en fonction de leur intégration des aspects environnementaux lors du processus de conception (*Figure 2-12*).

Étapes typiques du processus de conception et de développement de produit

Actions possibles relatives à l'intégration des aspects environnementaux

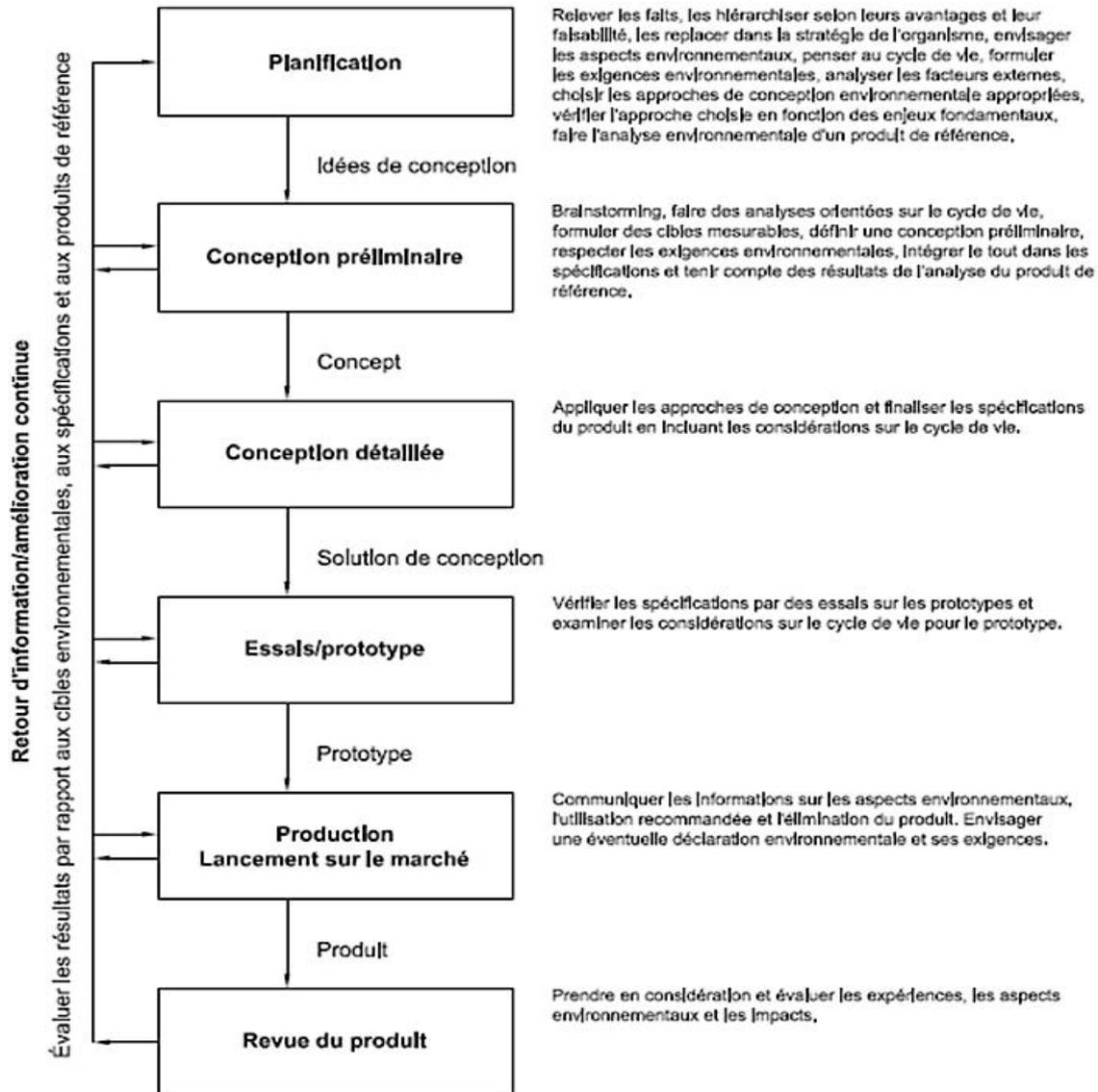


Figure 2-12. Exemple de modèle générique de prise en compte des aspects environnementaux dans le processus de conception et de développement de produit, d'après la norme (ISO-14062, 2003).

Dans ce modèle classique décrivant les possibilités de prise en compte des aspects environnementaux dans un processus de conception, les outils utilisables sont entre autres:

- Des guidelines ; typiquement, elles vont permettre à un concepteur de l'aider à choisir entre deux types de matériaux en lui disant quel est celui qui a le plus d'impact à quantité égale. Elles sont surtout utiles en avant-projet. Elles ne permettent pas de faire une évaluation environnementale du produit.
- Des listes de substances ; elles vont, par exemple, servir à lister l'ensemble des substances à ne pas utiliser lors de la fabrication du produit. Elles non plus ne permettent pas

de faire une évaluation environnementale du produit. Elles peuvent permettre une amélioration dans le sens où certaines substances peuvent ainsi être bannies.

– Des analyses de cycle de vie ; elles ne sont réalisables qu'en fin de processus, lors de la production et de la revue de produit. Elles viennent donc trop tardivement pour le développement même du produit.

Ainsi, on constate qu'il n'existe pas d'outil unique, qui serait utilisable à chaque étape de ce processus, et qui permettrait de faire réellement de l'éco-conception, à savoir évaluer les performances environnementales de façon assez précise pour identifier les sources d'impacts, et pouvoir les améliorer en aidant les concepteurs et ce, dès l'avant-projet, voire même en amont de la conception. Car, sur ce modèle, la phase amont n'existe pas. C'est pourtant bien en amont de la conception qu'il est plus facile d'intégrer des contraintes. Cette étape-là et la phase d'avant-projet sont stratégiques car elles qui offrent le plus de latitude à la conception. L'idée est donc de proposer un outil unique et utilisable dès l'amont des projets.

b. Des outils d'évaluation face à des outils d'amélioration environnementales

Les outils peuvent être classables en fonction de leurs performances (*Figure 2-13*) :

– d'évaluation environnementale : elle désigne « la mise en œuvre des méthodes et des procédures permettant d'estimer les conséquences sur l'environnement d'une politique, d'un programme ou d'un plan, d'un projet ou d'une réalisation ; par extension, le rapport qui en rend compte » (MELQUIOT, 2003). Cette évaluation permet de connaître l'impact d'un produit sur l'environnement et donc de savoir quel élément est le plus impactant pour ce même produit (transport, matières premières, ...)

– d'amélioration environnementale : elle permet de faire « progresser » un produit vers une meilleure prise en compte de l'environnement. Mais pour permettre cette amélioration, il faut connaître à minima les éléments les plus impactants, pour permettre aux concepteurs de travailler dessus lors de la conception du produit. Cet aspect doit permettre une aide à la décision lors de la conception.

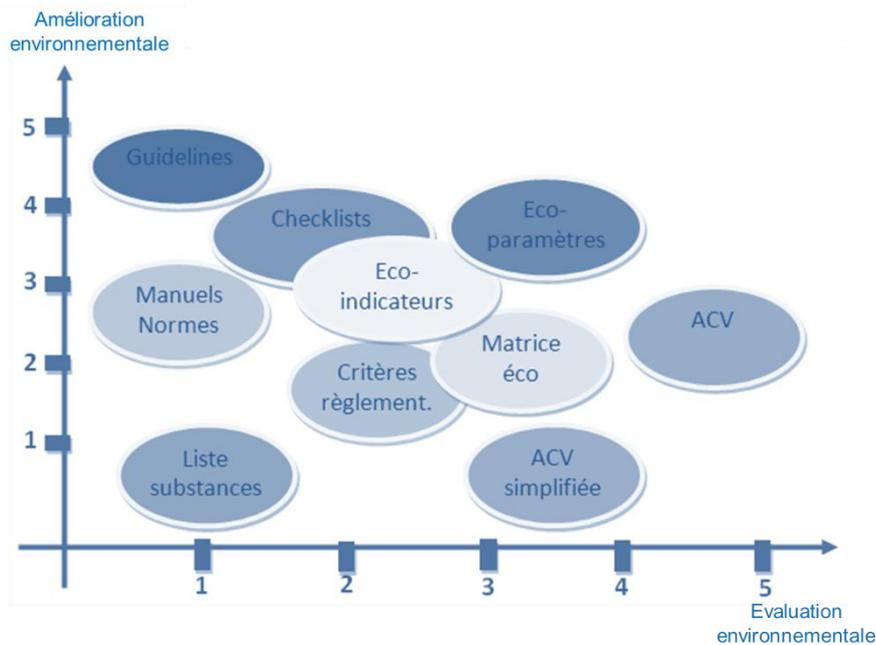


Figure 2-13. Classement des outils d'éco-conception en fonction de leurs performances d'évaluation et d'amélioration environnementales. D'après (LE POCHAT, 2005a)

En termes d'amélioration environnementale, ce sont les *guidelines* qui sont les plus performants. Le problème inhérent à cet outil est que ce sont très souvent des idées directrices très générales et génériques. Par exemple, il vaut mieux privilégier l'utilisation d'un matériau renouvelable que celle d'un matériau non renouvelable. De plus, si un guide est mal construit, inadapté ou mal utilisé, alors il devient impossible de vérifier et de valider l'éventuel progrès.

Les outils les plus performants du point de vue évaluation environnementale sont les outils d'Analyse de Cycle de Vie (ACV). L'ACV fait un séquençage du produit selon les étapes de son cycle de vie, et permet d'attribuer des valeurs d'impacts environnementaux (cf. chapitre 2, 1.3.4.).

L'idéal est de combiner au mieux évaluation et amélioration environnementale. Mais comme il a été démontré par le classement des différents OEC (Outils d'Eco-Conception), il n'existe pas d'outil qui soit pleinement performant et opérationnel sur l'évaluation et l'amélioration environnementale (Figure 2-14).

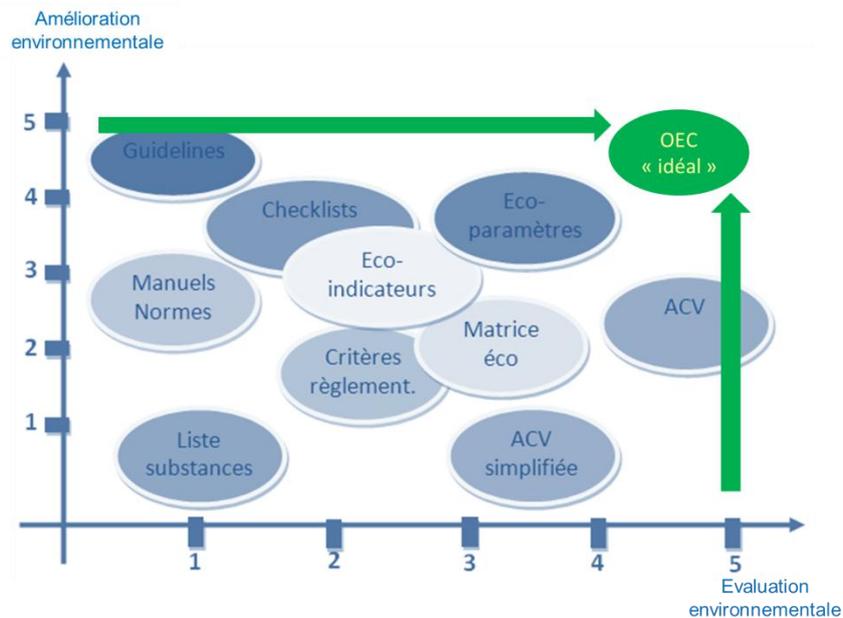


Figure 2-14. Place d'un OEC (Outil d'Eco-Conception) idéal par rapport aux outils existants. Modifié d'après (LE POCHAT, 2005a)

Idéalement, un outil d'éco-conception (OEC) devrait pouvoir évaluer l'ensemble des impacts d'un produit sur l'environnement, tel que le fait l'ACV, mais aussi pouvoir aider le concepteur à améliorer son produit, et ce presque simultanément à l'évaluation.

c. Des outils dédiés

A ce problème d'incomplétude des OEC existants, il faut aussi prendre en compte le paramètre « utilisateur ». En effet, il faut non seulement considérer les compétences individuelles mais aussi la capacité d'intégration de l'entreprise considérée.

Des études ont été menées en ce sens (LE POCHAT, et al., 2007b). Savoir si des outils développés nécessitent un niveau d'expertise pour leur utilisation, si des PME peuvent s'en servir de façon autonome, et si l'outil considéré permet une aide à la décision sont trois critères ayant été définis comme caractérisant « l'utilisabilité » de l'OEC (*Tableau 2-1*), i.e. son efficacité, son efficience et la satisfaction qu'il apporte.

Tableau 2-1. Différents outil d'éco-conception avec les fonctions et leurs caractéristiques (LE POCHAT, et al., 2007b)

Types of ecodesign tools with their functions and characteristics				
Types of ecodesign tools	Function: assessment and/or improvement	Estimated level of required expertise for use	Possible autonomous use by SMEs (after first project)	Aid-decision tool for strategy
LCA	Assessment	+++	No	No
Simplified LCA	Assessment	++	No	No
Eco-matrix	Assessment	++	No	No
Checklist	Assessment Improvement	+	Yes	No
Eco-parametric tool	Assessment	+	Yes	No
Guidelines	Improvement	+	Yes	No
Manual	Improvement	++	No	No

Malgré le développement de nombreux outils et méthodes permettant théoriquement aux entreprises de leur faciliter une appropriation de l'éco-conception, il s'avère que ces outils et méthodes ne sont utilisés que par des experts, et qu'ils ne servent pas à intégrer de nouveaux principes au sein de l'entreprise concernée (LE POCHAT, et al., 2007b) (*Tableau 2-1*). Pour appliquer la notion de durabilité à un processus de conception, il y a donc des limites. Si des critères d'amélioration peuvent être définis, c'est seulement après une évaluation. D'après (WIGUM, 2004), et en l'état actuel de l'approche de l'éco-conception, seuls des *guidelines* ou des principes comme la notion de durabilité peuvent être utilisés en phase d'avant-projet lors de la conception pour l'amélioration d'un produit.

L'objectif est ainsi de partir d'un outil performant sur l'évaluation environnementale, donc sur un outil d'ACV, et de voir ensuite comment intégrer l'aspect amélioration environnementale par le biais de retour en conception et d'aide à la décision. Cet objectif se base sur l'idée d'un outil d'éco-conception unique, utilisable pour l'ensemble des phases de conception, de la phase amont à la revue du produit.

1.3.4 L'ACV, un outil d'éco-conception ?

a. Un outil normalisé

« L'ACV est une méthode d'évaluation environnementale qui permet de quantifier les impacts d'un produit (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service voire d'un procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation. Outil normalisé et reconnu, l'ACV est la

méthode la plus aboutie en termes d'évaluation globale et multicritère. Elle résulte de l'interprétation du bilan quantifié des flux de matières et énergies liés à chaque étape du cycle de vie des produits, exprimée en impacts potentiels sur l'environnement » (ADEME, 2010).

Selon la norme ISO 10040 (ISO-14040, 2006), l'ACV est la « compilation et évaluation des consommations d'énergie, des utilisations de matières premières, et des rejets dans l'environnement, ainsi que de l'évaluation de l'impact potentiel sur l'environnement associé à un produit, ou un procédé, ou un service, sur la totalité de son cycle de vie ».

L'ACV est normalisée par la série des ISO 10040 :

- La norme ISO 14040 (ISO-14040, 2006): elle pose les principes et les cadres pour effectuer une ACV.
- La norme ISO 14044 : elle spécifie les exigences et les lignes directrices pour mener à bien une ACV

Cette méthode d'éco-conception repose sur une démarche découpée en 4 phases :

- en premier lieu, la définition des objectifs et du champ de l'étude. Cette étape est très importante, car elle permet de justifier le cadre de l'étude
- puis l'analyse de l'inventaire. La phase d'inventaire est l'étape la plus longue, et est très chronophage, car les données sont très souvent non disponibles, ou très incertaines.
- ensuite, l'évaluation de l'impact. Elle se fait selon une méthode d'évaluation d'impact, choisie par l'utilisateur, en fonction des objectifs initiaux
- et enfin, l'interprétation des résultats obtenus en fonction des objectifs initiaux. C'est une étape délicate, car toutes les incertitudes accumulées doivent être prises en compte dans l'analyse des résultats finaux. Par exemple, l'absence d'une donnée ne signifie pas que cette dernière n'a pas de poids vis-à-vis de l'environnement.

La démarche d'inventaire permet de prendre en compte la notion substances, qu'elles soient utilisées lors de la fabrication, émises lors de l'utilisation ou même rejetées en FdV. Effectivement, grâce aux BDD (Bases de Données), la fabrication d'un kilo d'acier est référencée de telle façon que « 1kg acier = un ensemble de substances utilisées pour la fabrication + un ensemble de substances utilisées pour l'utilisation + un ensemble de substances utilisées pour la FdV ». De plus, comme nous l'avons vu dans le premier chapitre (chapitre 1, 2.3.), les substances sont un moteur à l'innovation ou tout du moins, à la reconception. Il est nécessaire de pouvoir quantifier et « localiser » dans le système, des substances soumises à des législations (ou qui vont y être soumises).

L'ACV permet, entre autres :

- d'évaluer des produits au cours d'une démarche d'éco-conception
- de gérer des flux de matières et d'énergie
- d'évaluer des filières
- d'approfondir les connaissances sur les rejets et les impacts environnementaux
- de faire de la communication environnementale
- d'établir un dialogue client/fournisseurs
- de répondre à une pression européenne croissante
- de se démarquer par rapport à la concurrence

– ...

L'ACV ne couvre pas l'ensemble des problématiques environnementales. Il est, par exemple, assez difficile de modéliser des nuisances sonores ou olfactives. Ces nuisances ne sont pas réellement quantifiables et sommables. Il faut donc aborder ces problématiques via des approches indirectes, avec le nombre de personnes dérangées au-delà d'un certain seuil s'il on considère les nuisances sonores. La toxicité (aussi bien sur l'Homme que sur le biotope) entre aussi dans la catégorie des indicateurs d'impacts pris en compte de façon indirecte. Dans ce cas là, la solution consiste à créer de nouveaux indicateurs spécifiques. Mais cela nécessite des modélisations complexes et précises, qui peuvent être discutables.

b. Présentation et comparaison de quelques outils d'ACV

De nombreux outils d'ACV ont été développés au cours des vingt dernières années. Et ils ont déjà été comparés lors de plusieurs études (ALTING, et al., 1995) (PONS, 2008) (BELAUSTEGUIGOITIA, et al., 2009) (cd2e, 2010) (EC-JRC, 2010).

Il existe des logiciels permettant de réaliser des ACV complètes, des ACV simplifiées ou même des ACV spécialisées (pour le monde du bâtiment en particulier). Seules les AVC complètes seront considérées dans cette étude. En effet, l'idée de pouvoir faire une évaluation le plus tôt possible lors de la phase de conception implique que les ACV simplifiées ne sont pas les outils adéquats. Quant aux ACV spécialisées, il n'existe aucun outil d'ACV dédié aux navires, notre produit de référence. Il n'existe d'ailleurs aucune ACV complète de navire qui ait été publiée.

La PNUE (PNUE, 2009b) a émis les lignes directrices à suivre pour faire une ACV des produits. Les points clés à suivre sont les suivants :

- 1) réunir une équipe pour avoir des avis différents pour les critères de sélections,
- 2) définir les besoins,
- 3) définir les ressources qu'elles soient budgétaires ou humaines,
- 4) repérer les logiciels qui semblent répondre au mieux aux besoins.

C'est cette méthodologie qui a été suivie.

Il a ainsi été déterminé en accord avec le consortium, une liste de quelques critères indispensables auxquels doit pouvoir répondre le logiciel d'ACV choisi :

- Il doit permettre une très bonne modélisation du système, celui-ci pouvant, en phase de conception avancée, comporté plus de 60 000 lignes
- Il doit prendre en compte les substances
- Il doit faire une bonne analyse d'impact
- Les résultats doivent être présentés de sorte que les utilisateurs les comprennent rapidement
- Il doit avoir une très bonne base de données (BDD), et celle-ci doit pouvoir être enrichie aisément
- Il doit aider lors de la prise de décision en conception
- Il doit aider à l'amélioration des produits

– Il doit aussi être accessible à tous les niveaux d'utilisateurs (concepteurs, architectes, fournisseurs et clients, chacun ayant un accès différent), et ne pas être dédié à un expert / analyste environnemental.

Pour l'identification des logiciels d'ACV, PONS a décrit un « canevas de démarche pour choisir un logiciel d'ACV » (PONS, 2008). Elle a aussi fait la synthèse des qualités relatives de quelques logiciels d'ACV complète qui sont les plus utilisés actuellement (*Tableau 2-2*) : Umberto, TEAM, SimaPro, KLC Eco, GaBi.

Tableau 2-2. Quelques exemples de logiciels d'ACV complète (PONS, 2008). Les comparaisons entre logiciels ont été réalisées entre : Umberto VS TEAM, SimaPro VS Gabi et KCL Eco VS EcoLab VS GEMIS (ces deux derniers n'ayant pas été repris lors de la synthèse).

	Modélisation du système	Calculs et analyses		Présentation graphique		Bases de données	Prix
		Analyse d'impact	Analyse de sensibilité	Résultats	Présentation		
Umberto 5.1	*****	**	*	***	*****	**	€€€€€
TEAM 4.0	***	*****	*****	***	*****	*****	€€€
SimaPro 7	**	***	***	***	**	*****	€€€
KCL Eco	****	**	**	***	***	*	€€€
GaBi 4	*****	***	*****	*****	***	**	€€€€

Le choix des critères d'évaluation ne s'étant porté que sur l'évaluation environnementale, deux autres logiciels couramment utilisés et répondant au critère d'ACV complète mais plus orientés aide à la conception ont été ajoutés :

– EcoDesign Pilot (ECODESIGN-PILOT, 2010) : il est très orienté aide à la conception. Il ne permet pas de faire une évaluation complète, i.e. les résultats sont donnés globalement, par phase de vie. Ce logiciel ne possède pas de BDD initiale, mais il a l'avantage de donner des pistes de réflexion à l'utilisateur pour améliorer son produit. Ce logiciel est en accès libre sur internet.

– EIME (CODDE, 2010) : outil d'ACV complet, il peut être utilisé par différents types d'utilisateurs (designer, analyste). Il permet de faire une évaluation environnementale à toutes les phases de conception, de modéliser le système mais pas à un haut degré de précision, et de comparer différentes options de conception en vue d'une amélioration. Il utilise le principe d'un signalement par des « to do » et des « warning ». Les « to do » signalent les actions qu'il serait judicieux de mener pour améliorer le produit. Par exemple, si un produit contient plus de 50% de matériaux composites (donc peu recyclable par rapport à un matériau tel l'aluminium), l'outil le signalera et lui proposera de chercher un matériau alternatif moins impactant. C'est un outil qui peut être utilisé pour faire de la communication en interne (contribution active au Système de Management Environnemental), comme en externe (pour

les clients et les actionnaires). Ce logiciel est réellement très performant en ce qui concerne l'aide à la conception, mais il est assez cher.

En reprenant la cotation effectuée par PONS, en l'adaptant en valeurs numériques correspondantes, et en ne sélectionnant que les paramètres ayant retenu l'attention du consortium, on peut donc reclasser les logiciels étudiés. Les critères supplémentaires retenus sont : « modélisation du système », « analyse d'impact », « résultats », « aide à la décision », « accessibilité pour les concepteurs » et « base de données ».

Il en ressort qu'aucun de ces logiciels d'ACV étudiés ci-dessus n'arrive à coupler tous les paramètres souhaités. Aucun ne peut à la fois conjuguer une modélisation du système complète et fine, une aide à la conception et à l'amélioration environnementale et une approche assez intuitive qui le rende aussi bien utilisable par un expert que par un novice en problématiques environnementales. Dans le lot, ce sont les logiciels TEAM et SimaPro qui satisfont le plus de critères. Sachant que ces deux logiciels sont équivalents dans leurs fonctionnalités, et que Arts et Métiers disposait déjà d'une licence SimaPro, il a été décidé de se baser sur SimaPro (GOEDKOOP, 2008) (GOEDKOOP, 2007) pour démarrer une modélisation de navires et approcher le problème de développement d'un OEC qui répondrait aux besoins spécifiés.

1.4. Les limites de l'ACV telle qu'elle est utilisée aujourd'hui

Si les ACV permettent (ECOBILAN, 2010) :

- d'intégrer l'ensemble des flux à l'interface entre un site et son environnement (entrées et sorties)
- d'évaluer les différents choix environnementaux (paramétrage des données)
- de modéliser les évolutions à long terme
- de se comparer à des références,

il n'en reste pas moins que la partie « amélioration environnementale » censée faire partie d'un OEC n'est que très limitée. Et si elle est mise en avant, alors l'aspect modélisation du système et évaluation environnementale est mineur.

Aujourd'hui, et même si l'ACV est un outil très appréciable, aucun outil dit « d'éco-conception » ne permet de faire réellement et simultanément évaluation et amélioration environnementales.

Les deux principales limites identifiées sont :

- BDD du point de vue purement logiciel avec une méconnaissance des BDD disponibles et de leur signification pour une personne non experte en ACV voire non initiée. Un logiciel d'ACV est inaccessible à une personne non formée à son utilisation.
- les BDD du point de vue accès aux données du composant, informations détenues par les fournisseurs, voire des fournisseurs de rang supérieur. Plus il y a d'intervenants, plus il est difficile d'acquérir des informations sur le composant final.

Ainsi, plus un produit est constitué par un grand nombre de composants, plus il est difficile à modéliser, et plus cette modélisation est chronophage, en particulier lorsqu'elle n'est réalisée que par une seule et même personne, l'analyste environnemental.

L'ACV nécessitant un accès le plus complet à l'inventaire de cycle de vie, elle n'est généralement réalisable qu'en fin de projet, après la production (*Figure 2-12*). De plus, c'est un outil très peu accessible qui nécessite un expert. Comme l'a dit Millet (MILLET, et al., 2005), « l'ACV n'est pas un outil destiné aux concepteurs car son utilité lors du processus de conception est limitée à l'analyse de produits existants ou bien définis, et cela, seulement à un niveau avancé de conception ». MILLET dit aussi que « l'ACV ne peut être utilisée pour créer une dynamique d'apprentissage dans l'entreprise car elle n'améliore pas la légitimité ou la crédibilité des considérations environnementales » (MILLET, et al., 2005). L'ACV n'est pas un outil d'éco-conception adéquat pour une utilisation en conception. Elle demande trop de temps et d'efforts pour la collecte des informations.

Il faut donc se demander si la méthode d'approche actuelle de l'éco-conception est satisfaisante, et s'il n'y aurait pas autre un moyen de mieux coupler évaluation et amélioration environnementale pour créer un « vrai » outil d'éco-conception.

1.5. Quelles sont les causes de cette inadaptation de l'ACV en conception ?

L'axe de travail classique basé sur l'utilisation de l'ACV se définit par les grandes étapes suivantes, effectuées par un analyste environnemental (*Figure 2-15*) :

- Le produit existant est modélisé du mieux possible. Il faut que l'analyste fasse la démarche intellectuelle de découper le produit en sous-ensembles pour les lier avec les BDD fournies, et leur associer différents procédés, consommations, rejets, et ceci pour chaque phase de vie. C'est une étape fastidieuse à réaliser pour une seule et même personne.
- Le produit est analysé d'un point de vue impacts environnementaux. C'est une étape d'autant plus délicate lorsque la modélisation du système est très incertaine.
- Les éléments nécessitant une amélioration sont ciblés. Généralement, le client demandeur de l'étude et les concepteurs connaissent les éléments sur lesquels ils peuvent agir, donc seuls ceux-là font l'objet d'études comparatives.
- Des pistes générales peuvent être écrites pour l'ensemble du système, et elles pourront servir pour l'ensemble des concepteurs.

Ce schéma classique de l'approche d'un produit via l'ACV est limité et limitant. L'ACV n'est pas l'outil qui doit être appliqué pour un produit complexe au processus de conception long, tout du

moins tant qu'il ne met pas à disposition les moyens permettant d'améliorer les produits lors de leur conception.

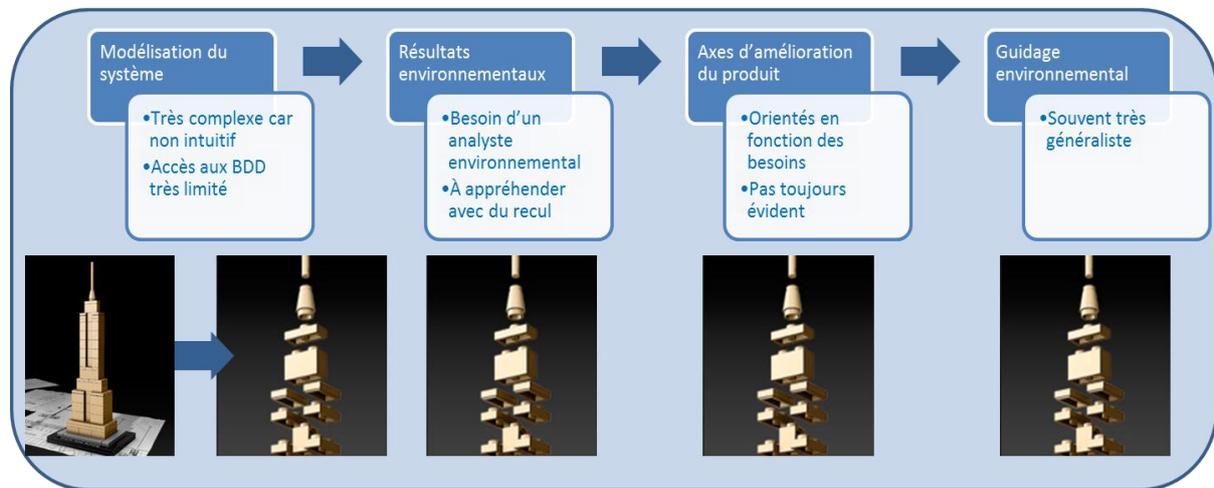


Figure 2-15. La démarche classique d'utilisation de l'ACV : un produit existant est virtuellement découpé en sous-ensembles, puis analysé selon une méthode de calcul d'impact. A partir de ces résultats, certains composants sont « repensés » en vue d'améliorer leurs impacts (images LEGO ®).

En effet, tel pour un assemblage de Lego ®, il est très difficile de démonter virtuellement un produit puis d'attribuer des valeurs d'impacts à chaque brique, et ensuite, d'essayer de trouver des alternatives technologiques aux briques les plus impactantes (Figure 2-15). La non-maitrise et la non-expertise des briques et des solutions techniques et / ou technologiques auxquelles elles répondent font qu'un analyste environnemental n'est pas le mieux placé pour répondre aux besoins du produit. Il est nécessaire que le concepteur, celui qui détient la connaissance des briques, puisse intervenir dans ce choix. Un analyste ne peut que donner des axes, des pistes à suivre pour améliorer le produit.

De plus, lors de la réalisation d'une ACV, il est très tard pour remettre en cause la brique considérée dans le processus de conception.

Pourtant, des études ont montré qu'il est possible d'utiliser l'ACV, au moins de façon simplifiée, ou dans certaines conditions, lors de la conception des produits.

En particulier, il est possible de trouver quelques rapports faisant le bilan environnemental des navires (JOHNSEN, et al., 2005) (MAGERHOLM-FET, 2002). Ces deux études se basent sur l'analyse de cycle de vie partielle des navires. JOHNSEN étudie des navires de types Ro-Ro (des navires rouliers, dédiés aux transports d'engins roulant ou tractables). Pour l'ACV, il utilise des données macro, à l'échelle des sous-systèmes. Cela se justifie car ce type de navire est assez simple dans sa constitution, et très peu dense. Ce genre de navire peut se « résumer » à un moteur, un système propulsif et une coque. Les données à récupérer sont donc bien moins nombreuses que pour un navire armé. Grâce à ces évaluations, ils ciblent les sources d'impact et essaient de les améliorer.

Et effectivement, si ces études sont basées sur le principe de l'ACV, elles ne l'appliquent que de façon simplifiée. C'est la solution actuelle qui a été trouvée pour pallier au manque de données du produit. Ce dernier est ainsi restreint à quelques lignes qui sont censées le représenter. Quant aux indicateurs environnementaux utilisés, ils sont eux aussi simplifiés et ciblés sur quelques grandes catégories aujourd'hui assez parlantes et classées comme étant « prioritaires » à améliorer. Le réchauffement climatique, l'acidification, l'eutrophisation des eaux, et la déplétion abiotique (qui représente l'épuisement des ressources non vivantes) sont de ces catégories jugées préoccupantes, et relativement représentatives des divers impacts de l'Homme sur le milieu.

Cette solution peu satisfaisante est la conséquence directe du fossé existant entre les données composant détenues par les fournisseurs et les personnes amenées à modéliser le produit. Ce gap est dû au fait que les fournisseurs directs (de rang 1) sont souvent les clients de fournisseurs de rang supérieurs. Ils utilisent des briques technologiques qui rassemblent l'ensemble des contraintes et des paramètres utiles. Une "brique technologique" désigne un élément ou un sous-ensemble voire même une solution technologique nécessaire à la réalisation d'un système. Une brique technologique peut donc être composée d'un composant, d'un équipement ou d'un sous ensemble. Il est nécessaire d'étendre la notion de brique au-delà de l'objet technologique élémentaire en intégrant les aspects liés à l'assemblage des briques (QUENARD, 2007).

Le fait de faire intervenir un grand nombre de fournisseurs de rang N avant le fournisseur de rang 1¹ limite l'accès du producteur aux informations qui concernent les composants servant à fabriquer le produit. Cela implique non seulement un manque d'accessibilité aux données, mais aussi que les produits ainsi conçus sont figés. Le fabricant n'a aucun pouvoir, aucun contrôle sur le produit qu'il fabrique à partir des composants obtenus via le fournisseur de rang 1 (*Figure 2-16*).

¹ Nous définissons le « fournisseur de rang1 » comme étant celui qui crée la brique technologique. Il peut donc s'agir du fabricant qui crée lui-même certains de ces composants.

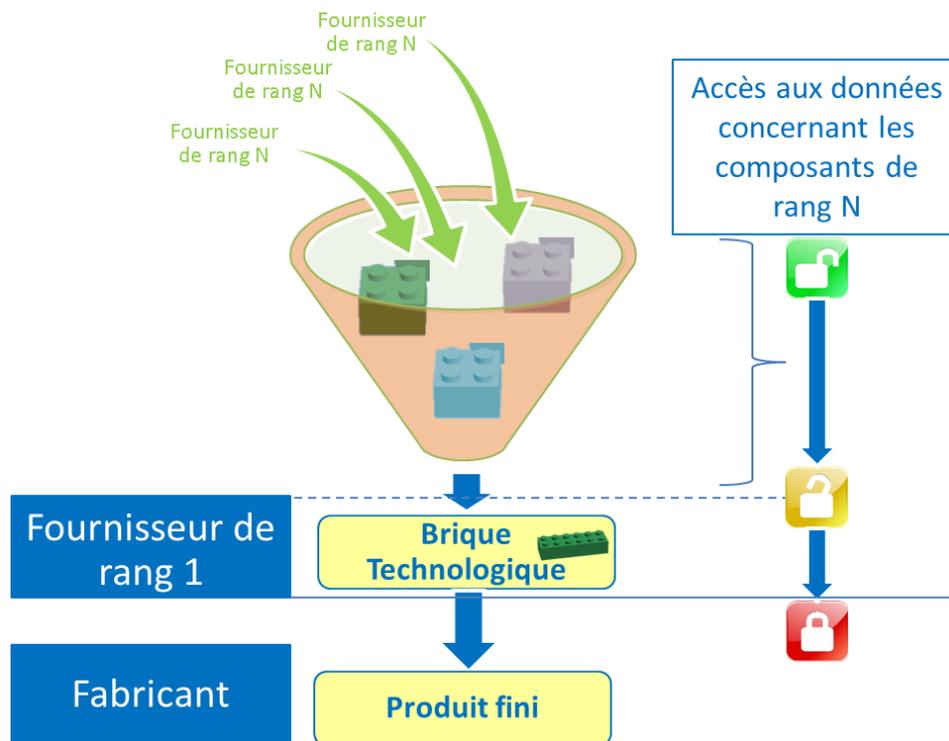


Figure 2-16. La constitution d'une brique technologique : un accès limité aux informations concernant les composants de rang N.

Plus un produit se compose d'un grand nombre d'ensembles et de sous-ensembles, plus la réalisation d'une ACV devient compliquée. En effet, plus les composants sont multiples, plus il est difficile de leur attribuer des données relatives à leur fabrication, à leur utilisation ou encore à leur fin de vie. Cela implique directement une difficulté pour la modélisation des produits en vue d'une ACV. L'accès aux données étant limité, l'analyste est souvent amené à faire des approximations non seulement sur la composition des composants, mais aussi sur toutes les données relatives à la fabrication, à l'utilisation et à la FdV. Les résultats de l'ACV en découlant sont donc logiquement « approximatifs », d'autant plus que le produit se décompose en un grand nombre de composants. Et surtout, ils ne permettent pas de réellement améliorer ces composants (*Figure 2-17*).

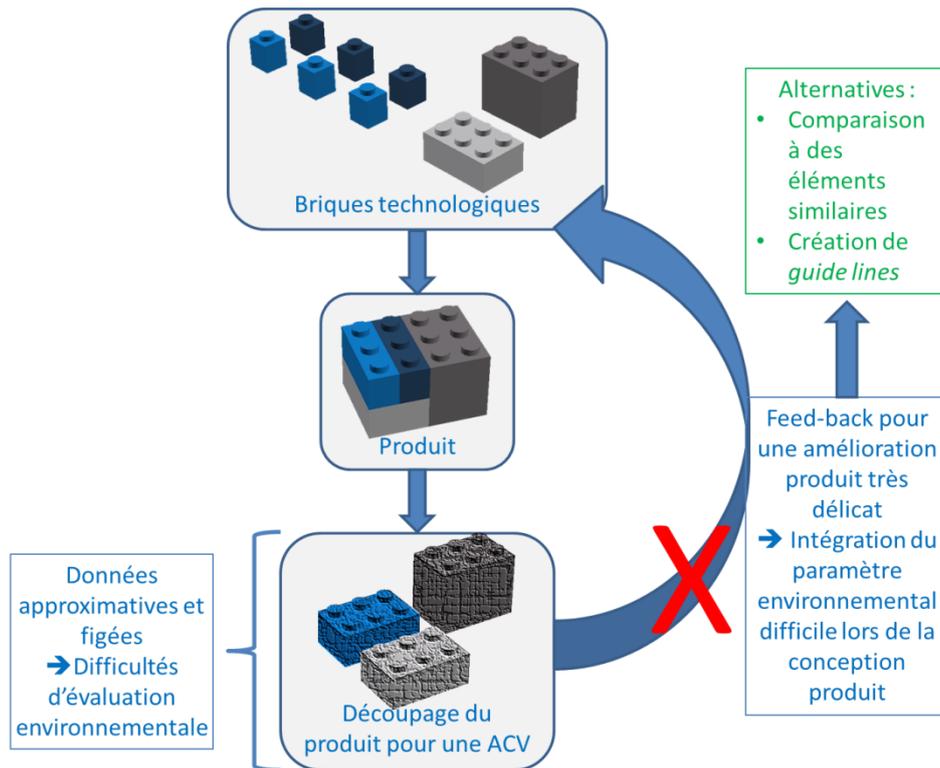


Figure 2-17. La difficulté à prendre en compte le paramètre environnemental lorsqu'il n'est pas intégré à la conception

Lorsque l'on veut réaliser une ACV, il faut justement utiliser les données de fabrication des composants. De même, si on veut améliorer un produit en améliorant certains de ses composants, les briques technologiques étant « figées », il est difficile de travailler sur ces composants. La solution actuelle consiste à tester d'autres technologies alternatives et de les comparer entre elles. Elle contourne le problème, sans réellement le régler.

Les limites clairement identifiées comme étant responsables de l'inadéquation de l'utilisation de l'ACV lors de la conception d'un produit sont donc :

-Le manque d'accès aux BDD servant à décrire le produit, et donc le manque de communication, d'interaction avec les fournisseurs

-Le manque de connaissances de l'analyste vis-à-vis du produit qu'il traite. Pour un produit tel qu'un navire, personne ne possède l'ensemble des connaissances relatives à l'ensemble des composants mis en jeu pendant la conception. Il faut donc que les concepteurs puissent apporter directement leur connaissance métier, et donc qu'ils soient directement impliqués. Il faut créer une interactivité avec les concepteurs.

1.6. L'approche proposée pour pouvoir utiliser l'ACV lors de la conception d'un produit

Dans cette thèse, nous voulons essayer de démontrer que l'ACV peut servir de principe de base pour le développement d'un OEC. En partant des lacunes actuelles d'une ACV (données peu accessibles, figées,...), le problème peut être posé dans le « sens inverse ». Cela devrait permettre aux concepteurs d'utiliser cet outil d'éco-conception, basé sur l'ACV, et cela dès la première étape de conception du produit.

La méthode développée se propose de montrer qu'il est possible de partir « à l'envers » du schéma classique d'évaluation environnementale (*Figure 2-15*) pour construire un nouveau modèle d'éco-conception basée sur l'ACV qui intègre le paramètre environnemental dans un processus de conception long. Plutôt que de partir d'un produit complet et seulement modélisable en fin de conception, l'idée est de pouvoir intégrer le paramètre « environnement » dans les briques technologiques, au même titre que le coût, ou les contraintes techniques.

Cette intégration doit permettre de mieux prendre en compte les impacts d'un produit sur le milieu en facilitant non seulement l'ACV mais aussi le retour en conception et l'amélioration de ce produit. En intégrant les données nécessaires à la réalisation d'une ACV avec celles concernant les données se rapportant plus directement au produit lui-même (les données indispensables pour répondre au cahier des charges), et en facilitant le suivi des composants utilisés pour la fabrication d'un produit, il doit être possible d'utiliser un outil d'éco-conception basé sur l'ACV.

Les trois objectifs indispensables sont donc :

- La création d'une forte interaction amenant les fournisseurs à échanger avec les concepteurs.*
- Le fait que la démarche doit être applicable à toutes les étapes de conception, phase amont comprise. Ceci nécessite la création d'un outil unique.*
- La capacité de cet outil unique à pouvoir non seulement évaluer les performances environnementales d'un produit, mais aussi de pouvoir en améliorer la conception en conséquence.*

Toute la démarche développée jusque-là permet de poser les étapes ayant mené à la problématique de la thèse. Le processus de la thèse peut ainsi et enfin être décrit selon les étapes suivantes (*Figure 2-18*).

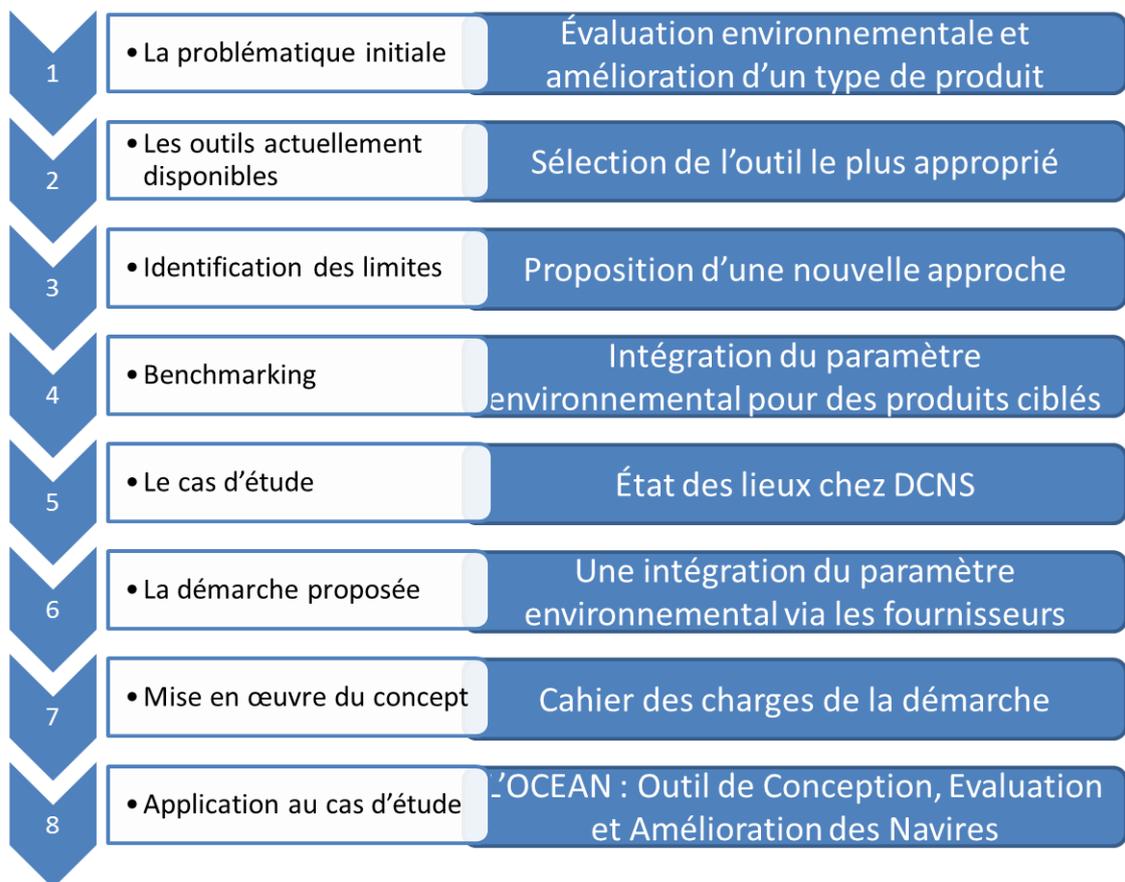


Figure 2-18. Le processus de la thèse.

Après avoir posé la problématique initiale, qui est celle de l'évaluation des impacts d'un navire sur son milieu, avec la possibilité d'en améliorer la conception, les outils existants ont été passés au crible. Il s'est avéré que l'ACV est l'outil d'éco-conception permettant d'évaluer au mieux les impacts d'un produit, même si son aspect amélioration environnementale est perfectible. En identifiant clairement les limites de l'ACV et ses conditions d'utilisation nécessaires, il est possible de trouver les conditions supplémentaires à mettre en œuvre pour créer un nouvel outil d'éco-conception basé sur l'ACV, qui intègre au mieux le paramètre environnemental. Cela permet de poser la problématique réelle soulevée par cette thèse :

LA PROBLEMATIQUE DE LA THESE :

Comment intégrer le paramètre « environnement » dans le processus de conception pour faciliter l'évaluation environnementale et l'amélioration du produit lors de sa conception, en se basant sur l'outil d'Analyse de Cycle de Vie ?

Pour répondre à cette question, un *benchmark* de l'intégration de l'éco-conception et/ou de la notion d'environnement dans des entreprises fonctionnant sur le même modèle, sur le même type de processus de conception que DCNS a été réalisé. Il a fallu d'abord cibler les entreprises pouvant potentiellement assumer le même type de démarche. Après avoir étudié quelques grandes entreprises cibles, un questionnaire (cf. annexes, pour la version complète) a été envoyé au responsable environnement de ces entreprises. Le but était de :

- tout d'abord, de valider les hypothèses déduites des informations recueillies sur le net
- puis de confirmer la similitude entre ces entreprises, du point de vue processus de conception
- et enfin, d'obtenir des réponses sur des informations un peu plus précises mais non disponibles sur leurs sites internet.

Dans un premier temps, et pour valider la cohérence des hypothèses par rapport aux entreprises ciblées, une brève liste de caractéristiques du processus de conception a été donnée (Figure 2-19). Les questions ont été posées à sa suite.

Les caractéristiques globales du processus de conception :

- Une **longue durée de conception** pour des produits **de longue durée de vie**
- Des produits **multi-matériaux** et multi-pièces
- Des **contraintes techniques / physiques / mécaniques** très importantes qui nécessitent la définition d'un **bilan de masse** très tôt lors de la conception (en avant-projet)
- Un découpage du produit selon une **arborescence produit** : découpage en sous-ensembles selon les fonctionnalités ou les spécialités mises en jeu (métiers) → directement lié au bilan de masse
- De **nombreux acteurs de la conception** travaillant à des niveaux différents, et avec des approches différentes suivant les phases de conception

Figure 2-19. Les caractéristiques du processus de conception « type »

Les réponses ainsi collectées ont confirmé les hypothèses. Le processus de conception de ces entreprises dure 3 à 5 ans, voire plus. Un bilan de masse est défini dès la phase d'avant-projet, car la masse est un critère capital dans leurs secteurs d'activité. Et effectivement, toutes les caractéristiques énoncées pour définir le processus correspondent totalement à leurs produits. L'innovation est présente à la fois en R&D et lors de la conception d'un nouveau produit. Dans ce cas-là, « chacun est invité à innover et à proposer des solutions innovantes en termes de conception. Chez Eurocopter, il existe un processus spécifique visant à favoriser la prise en compte des meilleures idées ». L'entreprise possède les licences pour l'utilisation des principaux logiciels d'éco-conception et d'ACV plus particulièrement, disponibles sur le marché. De plus, l'ensemble du personnel est concerné par la démarche environnementale.

Comme cela sera constaté dans les paragraphes suivants, cet ensemble de critères va permettre de poser les paramètres favorisant l'intégration du paramètre environnemental via un OEC réalisant de l'évaluation et de l'amélioration environnementale.

2. EMERGENCE D'UN ENSEMBLE DE PRODUITS SUPPORTANT L'INTEGRATION DU PARAMETRE ENVIRONNEMENTAL VIA LA MISE EN PLACE D'UN OUTIL D'ECO-CONCEPTION BASE SUR L'ACV

2.1. Une démarche systémique d'intégration dans un processus de conception préexistant

L'éco-conception, lorsqu'elle existe dans une entreprise, nécessite un investissement des moyens aussi bien économiques, qu'humains ou même temporels. En effet, cette démarche ne se met pas en place du jour au lendemain. C'est une méthode non générique et donc non applicable directement. Elle nécessite une sensibilisation des futurs acteurs non seulement sur les problématiques environnementales globales, mais aussi sur la politique de leur entreprise vis-à-vis de la démarche. Lorsqu'un OEC doit être intégré, les personnes susceptibles de l'utiliser doivent être formées à l'outil lui-même. Il y a ainsi tout un protocole à suivre pour qu'un outil soit bien intégré et puisse être réellement utilisé dans le processus de conception. Par le biais de la sensibilisation plus ou moins poussée suivant le futur degré d'implication des utilisateurs, et d'une intégration systémique, il est possible de changer la vision actuelle qui destine un OEC à un expert.

Un canevas pour adopter et appliquer les techniques d'éco-conception a été décrit par KNIGHT (KNIGHT, et al., 2009) :

- L'identification des choix et des intérêts de l'entreprise,
- L'identification des outils et méthodologies appropriées,
- L'identification du processus de conception et des zones d'ajustement possible pour l'adoption de l'outil,
- L'identification des détails et de l'application de l'OEC pour les usages .décrits

Un OEC ne doit pas être seulement adapté aux perspectives environnementales. Il doit aussi être appropriable par les futurs utilisateurs. Il faut donc prendre en compte le potentiel d'application de l'outil, et passer d'outil d'éco-conception à une procédure d'éco-conception.

Pour pouvoir intégrer l'éco-conception dans une entreprise, il faut donc établir un lien, une interactivité entre la *supply-chain* et les fournisseurs (qui seront la clé de la gestion des BDD). Il est possible de se baser sur la démarche appliquée pour l'intégration de l'innovation en conception de

systemes complexes. En effet, comme il a été démontré dans ce chapitre (cf. chapitre 2, 1.3.2), le processus d'éco-conception peut être apparenté à celui de l'innovation en conception. Dans cette démarche, l'approche redonne sa vraie place à l'acteur, ce que nous cherchons à faire. C'est une méthode centrée sur l'interaction entre les différents protagonistes, l'objet et le projet. Un modélisateur est placé comme superviseur. Sept étapes sont nécessaires (GRES, 2002) :

- 1) La perception et l'observation : l'idée est de proposer la mise en relation des personnes sur la base d'une problématique ou d'un thème
- 2) L'identification et le positionnement : le but est de décrire le système par l'identification, le rassemblement de l'ensemble des partenaires du projet selon leurs motivations respectives, en faisant émerger les gains espérés et les prises de risque envisagées par rapport à la finalité du système à concevoir
- 3) La co-construction du référentiel par une description stabilisée du système
- 4) L'appropriation du langage et la socialisation : c'est un accompagnement à la formation de la relation entre les membres du projet et à l'éthique fondant l'appartenance au groupe
- 5) La configuration et la reconfiguration : le but est la construction d'un lien entre la vision locale et globale
- 6) L'organisation et l'intégration des contraintes de l'environnement pour passer du conceptuel au matériel. L'enjeu est l'identification des axes de réalisation du projet
- 7) L'action et la sécurisation avec l'élaboration des préconisations et opérations à mener en conséquence.

Il est donc important de noter que c'est bien la décision collective qui permet de définir les objectifs à atteindre et les actions à entreprendre pour y parvenir. La démarche décrite ci-dessus permet de poser les bases favorables à l'émergence de l'innovation, et donc, de l'éco-conception. Elle permet aussi de garantir une qualité de la communication interpersonnelle et d'entretenir sa dynamique dans la durée. Et le fait d'impliquer tous les protagonistes dans la démarche permet non seulement de les faire entrer plus facilement dans l'action (en diminuant les réticences), mais aussi de développer une méthode adhérent le plus possible à leurs besoins.

La démarche environnementale est initiée dans ces entreprises selon deux grandes catégories du marché de l'environnement (BSR, 2007) (*Figure 2-20*) :

- Une action basée sur la politique ou les réglementations
- Une action basée sur une démarche volontaire b2b (business to business), ou sur des transactions privées.

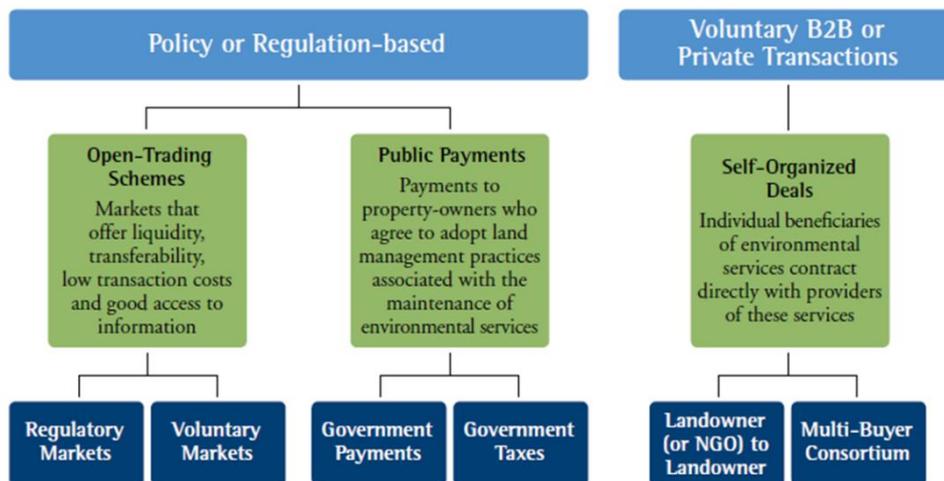


Figure 2-20. Les différentes catégories de marchés de l'Environnement (BSR, 2007)

Ces marchés se placent sur trois créneaux principaux, assez porteurs surtout du point de vue communication :

- Les émissions aériennes (SO₂, NO_x, GES,...) qui répondent aux critères du protocole de Kyoto (UN-FCCC, 1998),
- La qualité des eaux (nutriments, métaux et métaux lourds, ...) qui peut être cotée par le coût des services engendrés,
- La biodiversité (conservation, gestion des zones humides, ...) (UNESCO, 1994)

La mise en place d'une telle démarche peut répondre à un ensemble de questions qui se posent :

- Des questions de stratégies avec la tendance, les opportunités, ou l'importance que cela peut générer
- Des questions plus opérationnelles, avec entre autres, la fiabilité, la confiance dans l'entreprise, son statut actuel, mais aussi et les coûts et les risques engendrés, la réduction potentielle des coûts, la valorisation de la réputation, la réduction des risques (environnementaux),...

Les ressources sont aussi des points à prendre en compte. Il faut considérer les ressources matérielles qui comprennent tous les outils de mesure, d'évaluation, d'identification et d'innovation nécessaire à la bonne intégration de la démarche. Mais il faut aussi considérer les ressources humaines, par le biais de partenariat. Ce partenariat doit cibler les marchés porteurs, les niches où un développement est possible, mais aussi avoir recours à des organismes spécialistes du marché de l'environnement (telles que les organismes de certification environnementale, qui auront un œil plus objectif sur le travail accompli).

Ce sont toutes ces clés de décision qui permettent à une entreprise de diriger et d'orienter sa démarche environnementale, le but étant de transformer des facteurs préexistants limitant en conditions de succès (Figure 2-21).

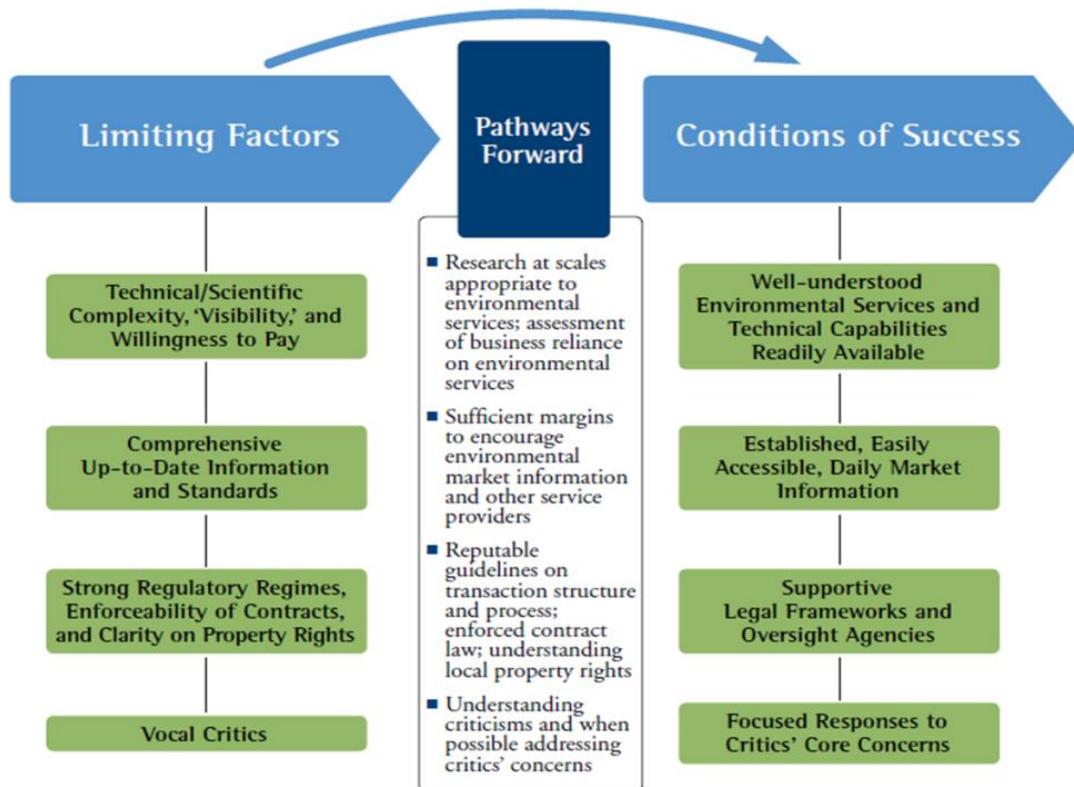


Figure 2-21. La transformation de facteurs limitant en conditions de succès (BSR, 2007).

2.2. Quelques exemples d'intégration de l'éco-conception dans des processus de conception longs

Chaque entreprise voulant intégrer l'éco-conception peut donc le faire à différents degrés d'implication. Voici trois cas d'étude assez typiques d'intégration d'éco-conception dans de grandes entreprises : Volvo, Eurocopter et Renault Trucks. Elles ont toutes comme point communs avec DCNS :

- Un processus de conception très établi, bien défini par des étapes-clé servant de point de validation pour l'avancement du projet
- Un processus de conception longue durée, d'au minimum 2 à 3 ans
- Des produits à longue durée de vie
- Des produits multi-matériaux, devant répondre à un nombre certain de contraintes techniques / mécaniques / physiques / chimiques / réglementaires
- De nombreux acteurs de la conception

– Une importante partie de la conception et de la fabrication réalisée chez des fournisseurs.

Les informations qui vont suivre ont été recueillies sur les sites internet respectifs des constructeurs (CADENAS, 2010), (RENAULT, 2010a), (VOLVO, 2010a)

2.2.1 *L'intégration du paramètre environnemental chez VOLVO : l'implication des fournisseurs*

Le groupe Volvo a mis en place une politique environnementale qui s'appuie sur la démarche ISO 14001 d'amélioration continue (ISO-14001, 2009). La question environnementale est une de leurs valeurs d'entreprise.

Leur approche environnementale se veut holistique, i.e. tous les aspects des impacts environnementaux (aussi bien locaux que globaux) sont étudiés (VOLVO, 2010b). L'ensemble du cycle de vie est considéré pour améliorer les impacts de leurs produits sur le milieu.

Comme ils le disent, « les fournisseurs jouent un rôle primordial dans le développement et la production des produits Volvo. Tous les liens existant dans la *supply chain* sont également, équitablement responsables devant les meilleurs choix environnementaux ». C'est donc l'aspect « interaction avec les fournisseurs » qui est mis en avant dans cette démarche d'éco-conception. Pour cela, un questionnaire à leur intention a été établi, et mis en ligne (VOLVO, 2010c). Il permet à tout nouveau fournisseur potentiel de répondre à un ensemble de questions. C'est une auto-évaluation listant les prérequis à remplir pour devenir fournisseur Volvo.

Après avoir complété les renseignements sur son entreprise, le fournisseur doit répondre à deux grands types de questions :

– Des questions sur la politique environnementale de son entreprise : suit-elle une démarche d'amélioration continue avec une certification effectuée par un tiers ? y a-t-il des plans ou des activités visant à améliorer les produits ou les procédés vis-à-vis des impacts environnementaux (et prenant en compte tout le cycle de vie) ?

– Des questions sur les substances dangereuses : est-ce que les produits livrés sont exempts de substances « black listées » telles que celles référencées dans REACH (PARLEMENT-EUROPEEN, 2006c) ? est-ce que les procédés utilisés lors de la fabrication font appel à ce genre de substances ?

De plus, si le fournisseur dispose de rapports environnementaux ou d'ACV disponibles, il peut les joindre à son dossier.

Toute cette démarche permet à Volvo de récupérer des données qui lui sont utiles pour faire des évaluations environnementales de ses produits, et donc, d'en améliorer la conception. Cette façon de procéder permet une meilleure maîtrise des informations concernant la fabrication des produits servant à l'assemblage en produit final (ici, des camions, des bus, ...). Cela permet aussi de constituer un « stock » de données, une base de données constituée par les « briques de données », ces éléments qui peuvent être assemblés par les concepteurs pour créer un produit (*Figure 2-22*).

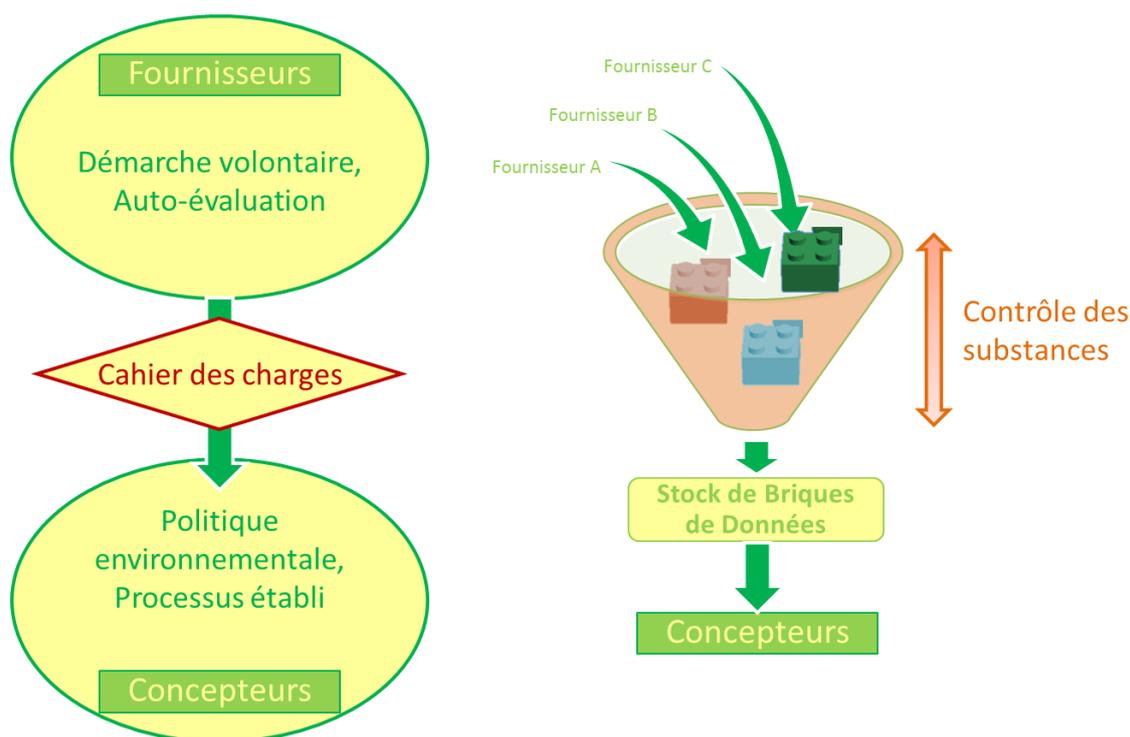


Figure 2-22. La constitution du stock de briques de données par récupération des données fournisseurs, avec le contrôle des substances, et les actions nécessaires pour y parvenir.

Le catalogage des substances référencées, qu'elles soient utilisées lors de la fabrication des éléments, qu'elles en fassent partie ou encore qu'elles soient utilisées lors de l'assemblage des éléments, permet à Volvo de connaître exactement leur « localisation » dans le produit mais aussi leur quantité. Ces paramètres sont très importants car, d'une part, ils permettent de tracer ces substances tout au long de la vie du produit, ainsi qu'à son terme. Cela facilite leur extraction lors du démantèlement final. D'autre part, ce sont des données directement intégrables dans lors d'une ACV. Et ce sont aussi des points de contrôle vis-à-vis de l'évolution des réglementations.

Ainsi, grâce une démarche d'intégration des fournisseurs, Volvo démontre non seulement qu'il est possible d'inclure les fournisseurs dans le processus de conception, mais aussi que c'est le meilleur moyen de contrôler les composants acheter chez les fournisseurs, ainsi que les substances potentiellement dangereuses pour l'environnement.

2.2.2 L'intégration du paramètre environnemental chez RENAULT : vers un affichage de l'amélioration des produits

Si le groupe Volvo communique assez peu sur sa démarche environnementale et n'en fait pas un argument de vente majeur, il n'en est pas de même pour le groupe Renault. Depuis 2007, Renault a lancé sa gamme eco², censée concilier écologie et économie (RENAULT, 2010a). Pour cela, le groupe s'est appuyé sur les trois phases de vie du produit

- Pour la fabrication : il a fait certifier ses usines en ISO 14001 (ISO-14001, 2009)
- Pour l'utilisation : les voitures conçues ont des taux d'émission de CO₂ inférieurs à 140g/km (en moyenne sur la gamme)
- Pour la FdV : les véhicules sont recyclables à 85%. A noter que cette valeur est théorique, et rarement atteinte en condition réelle de démantèlement.

Concernant leurs objectifs environnementaux, une charte de collaboration pour les fournisseurs, du type guideline (une « Corporate Social Responsibility ») définit six points assez classiques (RENAULT, 2010b) :

- Le management environnemental implémenté
- La réduction des émissions de GES
- La prévention des pollutions atmosphériques, aquatiques et des sols
- La sauvegarde des ressources et la réduction des déchets
- La gestion des substances chimiques
- La Conservation des écosystèmes

Renault incite et encourage ses fournisseurs à respecter quelques démarches. Ils n'y sont pas tenus comme pour chez Volvo. Pour chacun de ces points, il faut principalement respecter les législations, voire prendre un temps d'avance par rapport à eux, mais aussi de diminuer les consommations en eaux et en ressources non renouvelables, et la production de déchets.

C'est avec le client que Renault « dialogue » le plus. C'est assez logique, dans le sens où, les produits vendus le sont à des particuliers, consommateurs, qui n'ont pas le même mode de pensée qu'une entreprise ou des fournisseurs. Ils sont les acheteurs finaux, qui ne seront pas tous sensibilisés à l'environnement et aux questions de DD de la même façon. C'est donc sur l'aspect valorisation du produit qu'a travaillé Renault. Leur site internet en est le parfait reflet : la question de l'environnement est bien présente et bien décrite. Tous les points importants sont abordés très pédagogiquement.

Pour valoriser leur démarche, il a fallu mettre en place des outils d'évaluation environnementale dont les résultats seraient communicables. Le plus typique est le cas du challenge pour le CO₂, qui en sus, va dans le sens des clients. Quatre axes sont pris en compte pour la question des émissions de CO₂ (Figure 2-23) :

- le prix du pétrole, argument incontournable au vu de la flambée des prix
- le contexte de réchauffement climatique dû à une très forte augmentation de la concentration en CO₂ (et autres GES anthropiques) dans l'atmosphère, notable depuis le début de l'ère industrielle (dès les années 1850)

- la consommation de gasoil, qui est directement liée au pétrole, donc à des questions financières, mais aussi à une notion jusque-là inconnue du consommateur : l'épuisement de cette ressource fossile
- le label CO2 (cf. chapitre 1, 2.1.) et la politique fiscale mise en place, avec encore une fois la question financière mise en jeu.

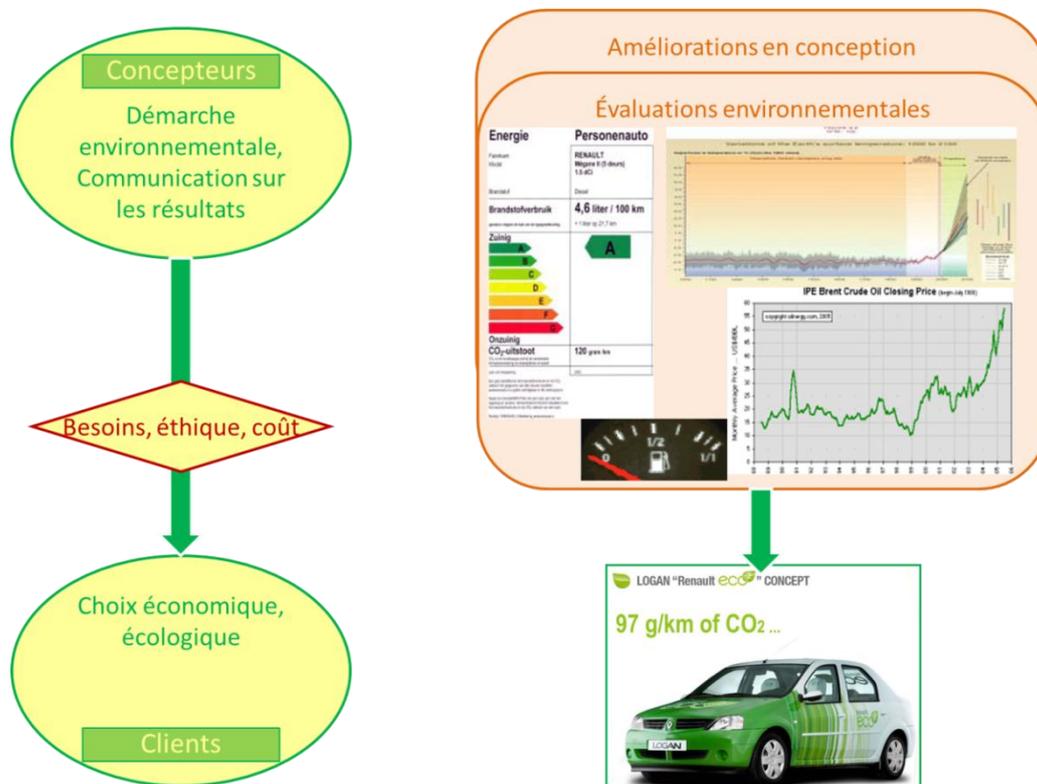


Figure 2-23. La valorisation des efforts en éco-conception pour interagir avec le client. Dans la fenêtre « évaluations environnementales », le schéma en haut à gauche est la cotation du label CO2, le graphique en haut à droite représente l'augmentation du taux de CO2 atmosphérique, le dessin en bas à gauche est une jauge à essence et le graphique en bas à droite représente le prix du baril de pétrole.

A chaque fois, le client est gagnant économiquement parlant, s'il choisit un véhicule plus propre d'un point de vue émissions de CO2. Ou comment rendre un consommateur « consommateurs », à ses dépens. L'argent est, dans ces cas-là, un très bon moteur. Et cela prouve bien encore une fois que la notion de DD est indissociable du contexte social (ou sociétal) et économique.

Ainsi, Renault a mis en avant l'importance de l'interaction avec le client. Il faut pouvoir lui montrer des résultats compréhensibles en termes d'indicateurs environnementaux, mais aussi les améliorations qui auront été faites grâce à l'intégration de la démarche environnementale dans le processus de conception.

2.2.3 L'intégration du paramètre environnemental chez EUROCOPTER : une vision aide à la conception

C'est certainement le groupe qui correspond le plus à DCNS, tant du point de vue de la conception et de ses étapes, que du fonctionnement entre les équipes de conception. De plus, en construisant des hélicoptères et autres aéronefs, ils sont soumis à de très fortes contraintes techniques et technologiques : ici, il faut s'affranchir de la pesanteur terrestre et avoir une certaine aérodynamique, alors que sur l'eau, il faut éviter de couler et être hydrodynamique. Mais dans tous les cas, le sol n'est pas là comme support aux mouvements.

De même que chez Volvo, Eurocopter ne met pas en exergue son implication dans la démarche environnementale (EUROCOPTER, 2010). Les sites de production en France, Allemagne et Espagne ont été certifiés ISO 14001. Le groupe a travaillé plus particulièrement sur la réduction des bruits et sur la diminution des émissions gazeuses (CO₂ et NO_x). Leur stratégie environnementale est basée sur une double action :

- Un accent mis sur l'innovation
- Une approche en conception et pour les procédés de fabrication plus respectueuse de l'environnement.

Eurocopter est un membre fondateur de l'initiative européenne « Clean Sky » qui vise à développer un mode de déplacement aérien durable (CLEANSKY, 2010). Dans ce projet, comme pour le Projet CONVENAV, l'ensemble du cycle de vie est étudié, évalué, dans le but d'être amélioré (Figure 2-24).

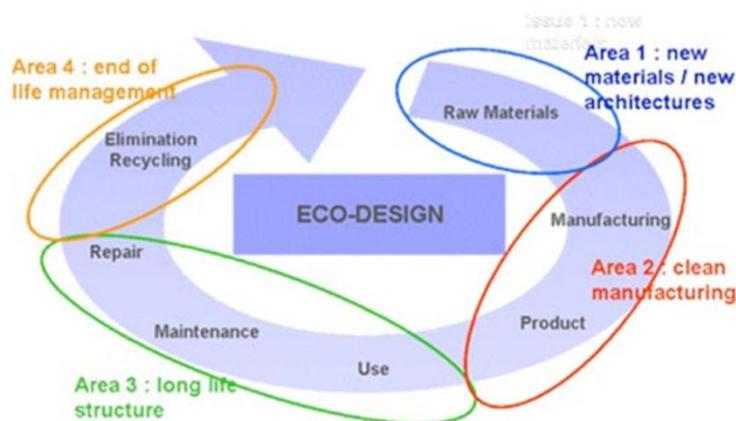


Figure 2-24. Les phases de vie des aéronefs, objets d'études spécifiques dans le projet Clean Sky (CLEANSKY, 2010).

Au cours de ce projet, un évaluateur de technologies doit être développé (Figure 2-25).

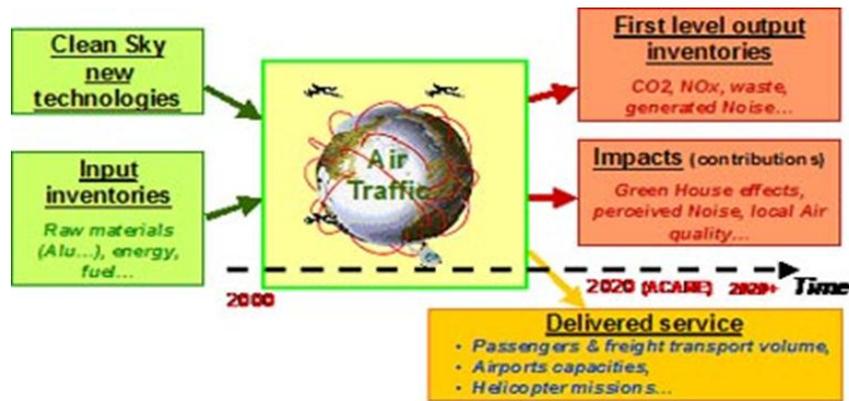


Figure 2-25. L'évaluateur de technologies en développement dans le projet Clean Sky (CLEANSKY, 2010)

Effectivement, lors du projet Clean Sky, une large gamme de technologies innovantes doit être développée et testée. C'est l'évaluateur de technologies qui doit évaluer les impacts environnementaux de ces technologies.

En parallèle de cette démarche externalisée, un logiciel de gestion des composants a été mis en place depuis 2008. Le logiciel CADENAS permet de répondre à trois besoins existants depuis plusieurs années au sein des équipes de conception (CADENAS, 2010) :

- Au niveau du bureau d'études, regrouper en un même système les composants créés en interne par Eurocopter et les pièces du commerce
- Connecter les catalogues de pièces aux systèmes CAO, PDM et ERP de l'entreprise
- Réduire durablement les coûts liés à la gestion des pièces standards.

Ce logiciel, couplé aux autres logiciels de conception, permet de regrouper les composants fabriqués, standards internes et normes de l'aéronautique. Cela permet de répondre à un des axes de la démarche d'intégration de l'éco-conception, à savoir, la création d'un stock de briques de données. Grâce à cela, une vraie interactivité s'est développée entre les équipes de concepteurs d'Eurocopter et leurs fournisseurs. Mais il faut bien noter qu'aucune démarche environnementale n'est liée à cet outil.

Eurocopter met en avant le besoin d'un OEC spécifique à leurs produits, abordable par des concepteurs, non experts en environnement, qui soit intuitif, et qui permette d'évaluer et d'améliorer les produits dès leur conception (Figure 2-26).

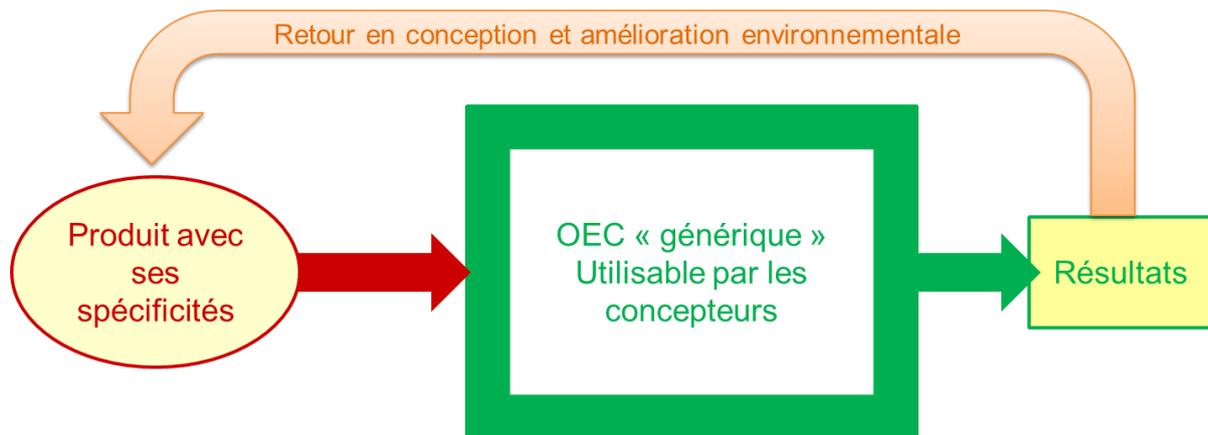


Figure 2-26. Les fonctionnalités d'un OEC mises en avant chez Eurocopter

Ainsi, Eurocopter démontre l'importance de l'implication des concepteurs et de la capitalisation de leurs connaissances métier au sein d'un même outil. Cet outil dédié à leurs produits doit permettre de faire de l'éco-conception. De plus, ils souhaitent établir de vraies plateformes collaboratives et participatives entre leurs concepteurs et leurs fournisseurs.

2.3. Une démarche commune pour répondre à des besoins similaires

Chez Eurocopter, tout comme chez DCNS, les concepteurs sont à la recherche d'un outil dédié à leur filière, comprenant donc des données spécifiques à leurs produits, qui soit simple d'utilisation, qui permette d'évaluer les impacts environnementaux et d'améliorer la conception de leurs produits. Ils ont ainsi lancé en janvier 2010, un projet similaire au projet CONVENAV : le projet CORINE (CORINE, 2010). L'objectif du projet CORINE est « d'améliorer la performance environnementale des matériaux et procédés dès la conception et la fabrication des hélicoptères ». Cet outil se veut collaboratif, d'éco-conception et dédié aux PME et à la filière hélicoptère. Basé sur une dynamique filière, « CORINE a pour objectif de fournir aux PME un outil d'éco-conception collaboratif entre donneurs d'ordre et fournisseurs. Il permettra d'identifier et d'intégrer de nouveaux matériaux et procédés tout au long du cycle de vie de l'hélicoptère ». A la différence près que ce projet a été centré dès le départ sur la relation fournisseurs / équipe de conception, et que donc il cible principalement les questions de matériaux et de procédés, on peut considérer que le projet CORINE est l'analogue du projet CONVENAV pour le monde aérien.

On constate que les besoins sont les mêmes que ceux posés chez DCNS :

- Faire face à une pression réglementaire croissante pour améliorer les performances environnementales

- Des réglementations européennes qui imposent, ou vont imposer d’ici peu, l’utilisation de matériaux et procédés alternatifs
- La prise de conscience environnementale et la volonté de moins impacter sur l’environnement

Tout cela suppose une meilleure prise en compte des démarches d’éco-conception.

Ces besoins énoncés pour des PME par Eurocopter, sont les mêmes que ceux d’un grand groupe tel que DCNS. La taille de l’entreprise et le nombre d’acteurs au sein de cette entreprise n’est donc pas un facteur déterminant pour l’intégration d’un outil d’éco-conception. Tout ce qui compte, c’est qu’il y ait les interactions entre client(s), équipe de concepteurs et fournisseurs (*Figure 2-27*).

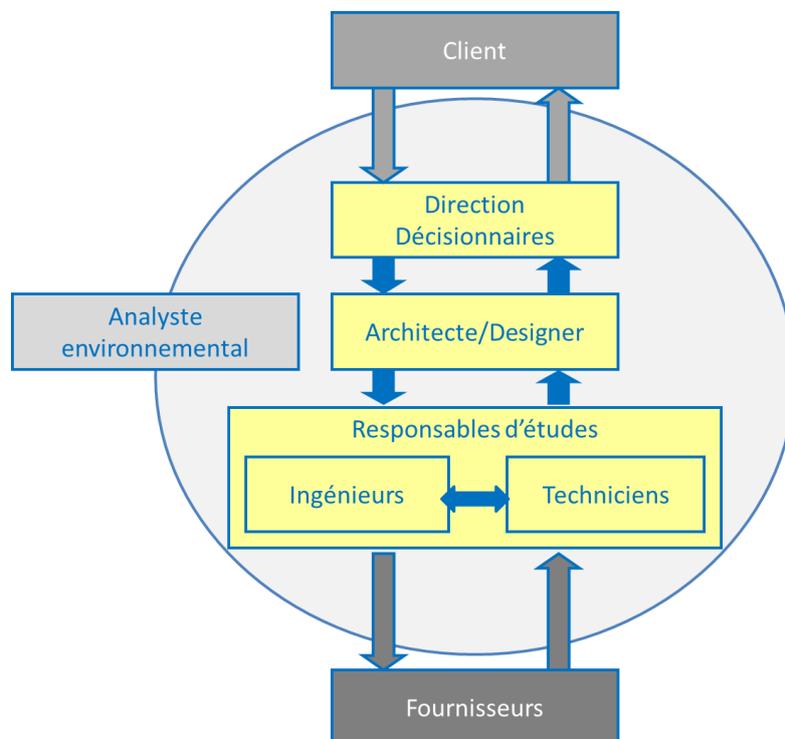


Figure 2-27. Les protagonistes nécessaires à l’intégration de l’OEC dans une entreprise, qu’elle soit une PME ou une grande entreprise. L’analyste environnemental est soit intégré dans l’équipe de conception (quand l’entreprise en a les moyens), soit externe (à titre de consultant). Il est l’élément indispensable au démarrage de l’intégration de l’éco-conception au sein d’une entreprise.

Par une distribution des tâches mettant en pratique le principe de gouvernance, le but est d’augmenter la performance de la contribution de chacun des protagonistes, et donc la performance globale. C’est une action volontariste et totalement proactive vis-à-vis des réglementations.

Le concept même de plateforme collaborative est ici clairement énoncé.

3. L'INTEGRATION DE L'ECO-CONCEPTION CHEZ DCNS

La construction d'un navire, et en particulier d'un navire militaire armé, ne s'accomplit pas sans un minimum de réflexion. Elle passe nécessairement par des étapes bien définies, qui sont suivies pendant la phase de conception. Le fait d'étudier la conception de ces bateaux militaires présente des avantages. Ce sont les types de navires les plus « denses », les plus complexes qui existent parmi la classification des types de navires admise (DG-ENV, 2007). Savoir aborder un navire militaire en termes de conception et d'évaluation environnementale donnera toute l'expérience pour appliquer l'OEC² à des navires moins complexes tels que les tankers et autres bateaux cargos qui représentent la majorité de la flotte internationale.

3.1. Les processus de conception, de reconception et d'innovation chez DCNS

3.1.1 Quelques notions sur la construction et la structuration d'un navire conçu par DCNS

DCNS conçoit ses navires sur la base d'une arborescence produit du navire répartie en plusieurs systèmes tels que : flotteur, mobilité, vie à bord, auxiliaires et servitudes, conduite et réseaux, sécurité, traitement et exploitation de l'information, combat (Figure 2-28). Dans l'objectif d'un outil applicable à tout type de navires, le système combat étant spécifique aux bateaux armés, il sera modélisé comme étant le système spécifique à l'activité du navire. Par exemple, pour un navire océanographique de l'Ifremer, ce système correspondra à l'équipement scientifique existant à bord.



Figure 2-28. Quelques systèmes d'un navire armé DCNS

² L'outil dédié aux navires de surface a été nommé OCEAN, acronyme pour « Outil de Conception, d'Evaluation et d'Analyse des Navires ».

Ces systèmes sont le résultat de l'assemblage de sous-systèmes (pour le système mobilité, on a la manœuvrabilité, la propulsion, la sauvegarde de propulsion, ...). Ces sous-systèmes sont eux-mêmes composés de familles d'éléments (éléments de liaison, carlingages, ... pour la manœuvrabilité), elles-mêmes étant la somme de rubriques (attaches et matériels de fixation, traversées de ponts et cloisons pour les éléments de liaison). Cet ensemble allant des systèmes aux rubriques est appelé Arborescence Produit (AP) (*Tableau 2-3*). Dans cette AP, le navire armé se trouve au premier niveau, alors qu'au dernier niveau, il y a des matériels ou ensemble de matériels (soit achetés chez les fournisseurs, soit fournis par les équipementiers de DCNS). Pour chacun de ces éléments est alloué un devis de masse. C'est sur la base de ce devis de masse que la modélisation d'un navire peut être réalisée, en particulier pour la modélisation d'un cycle de vie en vue de réaliser une ACV d'un de ces bateaux.

Tableau 2-3. Extrait de l'Arborescence Produit d'un NA de DCNS : la frégate FREMM

Arborescence produit				
Systèmes	Sous-systèmes	Famille d'éléments	Rubriques	
Flotteur				
Vie à bord				
Mobilité	Propulsion			
	Sauvegarde de propulsion			
	Manœuvrabilité	Carlingages		
		Éléments de liaison		Attaches et matériels de fixation
			...	

Pour la conception d'un navire, une des principales contraintes reste la flottabilité de l'ensemble. C'est ainsi à un travail de gestion des grands équilibres que sont confrontés les architectes.

Si on considère une approche « terrain » du navire, on constate que les systèmes peuvent être regroupés dans différentes zones du navire. Le plus souvent, les éléments constitutifs d'un même système sont répartis sur l'ensemble du bâtiment. Ce qui n'est pas pour faciliter la conception, ni même la reconception, voire l'éco-conception des navires, car cela nécessite l'établissement d'un vrai dialogue entre tous les intervenants, à chaque étape du processus de conception. Il est souvent nécessaire de bien gérer les interfaces entre les différents systèmes. C'est aussi le rôle de l'architecte de vérifier que toutes ces interfaces sont prises en compte correctement. L'exemple le plus symbolique de cette répartition hétérogène est celle du système flotteur qui est constitué par la coque et les éléments structuraux du bateau. On retrouve donc ce système sur tout le produit, de la proue à la poupe, et de tribord à bâbord.

Il faut aussi savoir que les (grands) navires, excepté ceux en bois, sont assemblés en anneaux, ou tranches. Ces anneaux possèdent plusieurs étages, appelés ponts, qui sont cloisonnés (*Figure 2-29*). L'ensemble des systèmes est réparti à travers ces anneaux.

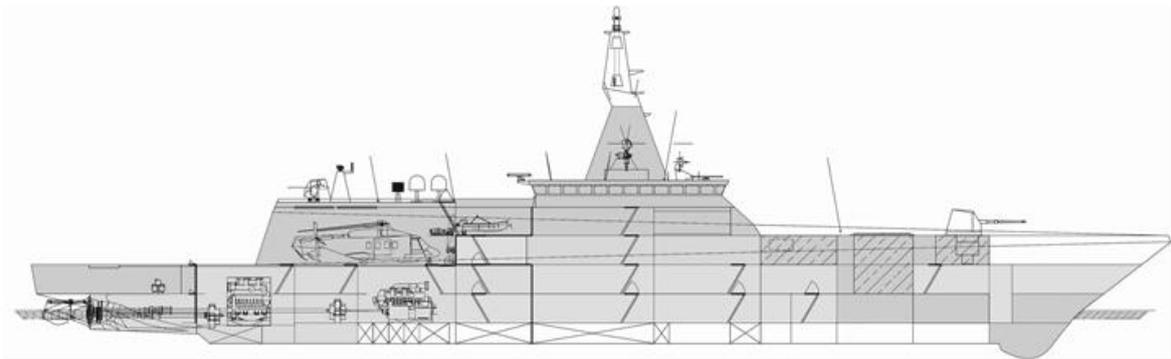


Figure 2-29. Schéma de la structure générale d'une frégate avec son découpage transversal (en anneaux) et longitudinal (en ponts) (image DCNS)

3.1.2 Les acteurs de la conception chez DCNS

Comme présenté précédemment (Figure 2-27), il y a des acteurs internes à l'entreprise qui sont en relation avec des acteurs externes : un client et des fournisseurs. Ce schéma est valide chez DCNS, avec la présence d'un acteur interne supplémentaire : l'analyste environnemental. Il est présent au sein de l'équipe des concepteurs de DCNS (Figure 2-30).

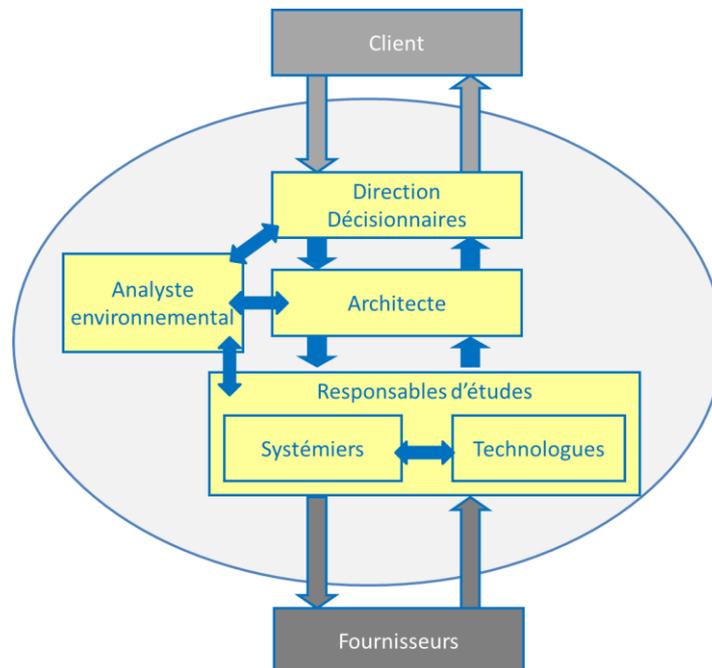


Figure 2-30. Les protagonistes du processus de conception chez DCNS.

a. L'équipe de conception DCNS

Trois grands types de fonctions sont définis chez DCNS :

– L'architecte qui possède une vision globale du produit final. Il définit les orientations des projets et alloue les exigences à chacun des autres intervenants. Il donne, entre autres, la répartition massique pour chaque système du bateau, sachant que la principale contrainte est la flottabilité du produit final. Il coordonne une équipe de spécialistes, responsables d'études :

– Les systémiers qui sont en fait des concepteurs. Ils ont chacun en charge un système du navire. Ils choisissent l'ensemble des produits nécessaires au bon fonctionnement de leur système, de façon globale. C'est-à-dire qu'ils décident de quels matériels ils ont besoin, et les positionnent dans le navire.

– Les technologues dont la fonction est dédiée à la mise en place des technologies non spécifiques à bord du navire. Ils choisissent le matériel standard dans des catalogues de référence (tuyauterie, câbles, instrumentation,...) et privilégient les technologies qui ont déjà fait leur preuve dans un même contexte.

A noter tout de même qu'un systémier peut travailler aussi bien sur un système bien défini, que pour une fonction transverse, typiquement, pour la gestion de la sécurité ou pour l'emménagement à bord du navire.

Pour encadrer ces équipes, il y a les décisionnaires, qui vont surtout dialoguer avec le client à chaque étape de validation de la conception.

A ces acteurs-là, vient s'ajouter l'analyste environnemental. Récemment inclus dans les équipes de conception, il a un rôle ponctuel dans les projets et dans le processus de conception lui-même. Il participe surtout aux projets dédiés et axés sur les améliorations environnementales. Son rôle sera plus amplement décrit dans les paragraphes suivants.

b. Les clients de DCNS

« Le groupe DCNS est un acteur européen de tout premier plan sur le marché mondial des systèmes navals de défense. Pour répondre à une demande de plus en plus globale et intégrée, DCNS assure la maîtrise d'œuvre des navires armés et leur soutien, en s'appuyant sur ses moyens propres de développement, de commercialisation et de réalisation, et sur des partenaires sélectionnés. Pour maîtriser la complexité des navires armés, DCNS fait jouer son expertise de l'architecture navale, de l'ingénierie des principaux systèmes du navire armé, de la conduite des chantiers d'assemblage et d'intégration, de la réalisation d'équipements spécifiques et du soutien au service opérationnel. » (DCNS, 2010a).

Les clients de DCNS sont principalement la Marine française, mais aussi les Marines de Singapour, du Brésil ou de la Malaisie.

Les clients peuvent impulser leurs volontés grâce au cahier des charges qu'ils rédigent. Sans leur agrément, aucun effort d'amélioration environnemental ne peut être mis en place.

c. Les fournisseurs de DCNS

L'ensemble des produits ne sont pas sous-traités par des fournisseurs. En relation principalement avec les technologues, mais aussi avec les systémiers, les fournisseurs sont de rang international. La politique entrepreneuriale DCNS est de réduire le montant des achats et promouvoir une productivité renforcée (DCNS, 2010a). Acheter mieux et moins sont des clés pour la gestion des dépenses. Acheter utile est aussi une devise : « travailler avec fournisseurs génère une réelle valeur grâce à des solutions innovantes, des spécifications améliorées et la réduction des non-qualités ». DCNS homologue ses fournisseurs sur des segments d'achats stratégiques.

3.1.3 Les processus de conception, reconception et innovation de DCNS

a. La nécessité d'adhérer à la démarche existante

Les processus de conception, reconception et innovation sont très codifiés, très structurés. Cela implique que si de nouveaux paramètres (environnementaux) doivent être intégrés dans ce processus, ce sont ces nouvelles préoccupations qui doivent venir adhérer, s'intégrer à la démarche, et pas l'inverse. Les concepteurs ne feront pas d'effort particulier pour intégrer l'environnement à leur démarche habituelle. Cela explique l'intérêt tout particulier qui a été porté :

- Au processus de conception lui-même (ainsi que les processus de reconception et d'innovation)
- A la procédure, à la façon dont travaillent les équipes de conception (quels supports sont utilisés) et aux interactions entre elles (qui, quand, comment)
- Aux besoins des futurs utilisateurs (ce qui s'est principalement résumé à ce qu'ils ne veulent pas).

b. Le processus de conception

Le processus de conception « Navire Armé » (NA) est construit comme un processus d'ingénierie système. Les normes du secteur (IEEE, CEI, EIA, RG AERO) sont prises en compte dans ce processus. Conception et développement sont structurés itérativement et par arborescence (*Figure 2-31*).

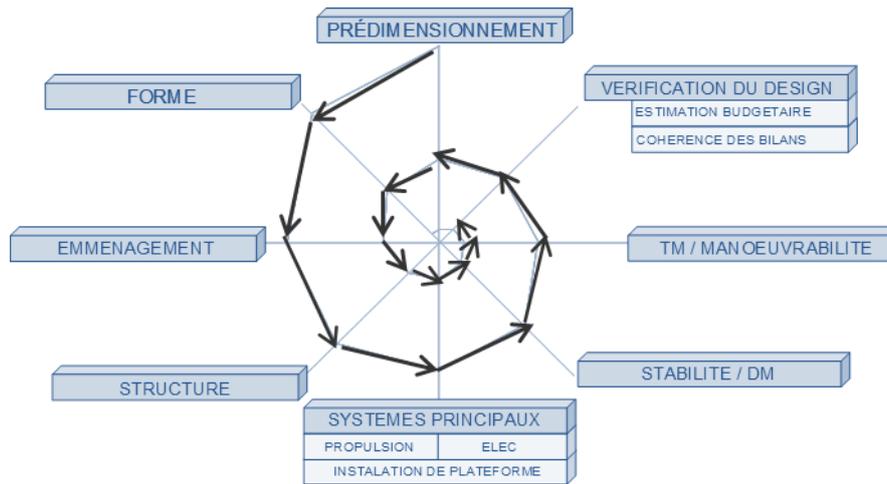


Figure 2-31. . La boucle de conception itérative appliquée à un navire. Chacune de ces étapes est répétée jusqu'à l'obtention d'un niveau de précision suffisant et acceptable. La conception ne peut avancer tant qu'une étape n'est pas satisfaite et satisfaisante.

Chacune étape de cette boucle itérative est répétée jusqu'à l'obtention d'un niveau de précision suffisant et acceptable. La conception ne peut avancer tant qu'une étape n'est pas satisfaite et satisfaisante.

Trois types d'architecture sont définis successivement lors de la conception préliminaire, en fonction du besoin client, pour pouvoir produire un NA (*Figure 2-32*) :

- L'architecture fonctionnelle du système : c'est la liste des fonctions techniques pertinentes avec leurs interfaces
- L'architecture logique du système : c'est la décomposition en sous-systèmes ou en composants décrivant l'exploitation des systèmes (fonctions logicielles et IHM³) et identifiant les interfaces entre les sous-systèmes ou entre les composants
- L'architecture physique du système : c'est la décomposition en sous-systèmes ou en composants décrivant la partie opérative des systèmes (fonctions hardware et actionneurs) et identifiant les interfaces entre les sous-systèmes ou entre les composants.

³ IHM : Interface Homme Machine

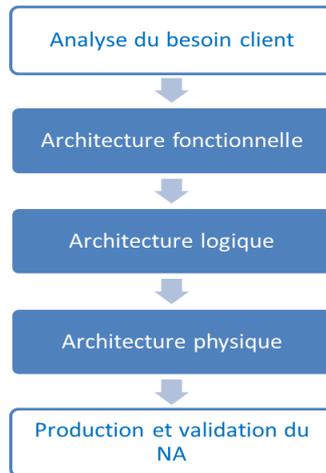


Figure 2-32. Les différentes architectures nécessaires pour concevoir un NA

Conformément à la norme ISO 9001 (ISO-9001, 2009), les exigences prises en compte, définies et validées par le concepteur sont :

- Les exigences spécifiées par le client
- Les exigences implicites non formulées par le client (nécessaires pour l’usage spécifié ou, lorsqu’il est connu, pour l’usage prévu)
- Les exigences réglementaires et légales relatives au produit
- Et toutes les exigences complémentaires (référentiel DCNS, directives industrielles, commerciales,...)

A DCNS, le processus de conception, acté par le référentiel ISO 9001 (ISO-9001, 2009), définit une succession de phases de conception (*Tableau 2-4*). Il peut durer jusqu’à sept ans. C’est un processus long, pour un produit qui est plus proche d’un prototype que d’un produit réellement industrialisé.

Lors du processus de conception, se succèdent (DCNS, 2007b) :

- L’avant-projet, comprenant les phases A et B, lors desquelles les premiers choix technologiques sont faits. Les grands ensembles de l’AP sont définis, avec un bilan de masse correspondant, et sans descendre au niveau le plus fin de l’AP. La fin de la phase A est conclue par une estimation budgétaire, alors que la phase B permet l’engagement avec le client (par contrat) avec une configuration de référence fonctionnelle.
- Le développement, avec les phases C0, C1 et C2. Ce sont les étapes qui permettent respectivement de fiabiliser le développement, de figer les structures et de spécifier les essais du NA. La construction du navire peut commencer dès la phase C1. La fin de la phase C0 est notifiée par la configuration de référence de développement, C1 par la configuration de référence pour l’emménagement et C2 par la configuration de référence de production.
- L’industrialisation, avec la phase D. C’est la réalisation et les essais du NA, avec vérification de la conception et de la conformité du produit final.

Tableau 2-4. Les étapes du processus de conception de DCNS (UE : Unités Emménagement, RFP : Request For Proposal, RFI : Request For Information, RFQ : Request For Quotation) (image floutée pour raison de confidentialité)

	UE	RFP	RFI	RFQ	UE	RFP	RFI	RFQ	UE	RFP	RFI	RFQ
1	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
2	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
3	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
4	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
5	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
6	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
7	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
8	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
9	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
10	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
11	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
12	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
13	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
14	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
15	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
16	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
17	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
18	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
19	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
20	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
21	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
22	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
23	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
24	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
25	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
26	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
27	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
28	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
29	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
30	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
31	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
32	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
33	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
34	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
35	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
36	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
37	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
38	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
39	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
40	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
41	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
42	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
43	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
44	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
45	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
46	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
47	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
48	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
49	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE
50	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE	UE

Le processus NA est classique ; c'est un cycle en « V » (*Figure 2-33*). Il y a un échange constant entre les différents niveaux d'AP, du navire aux composants en passant par les systèmes.

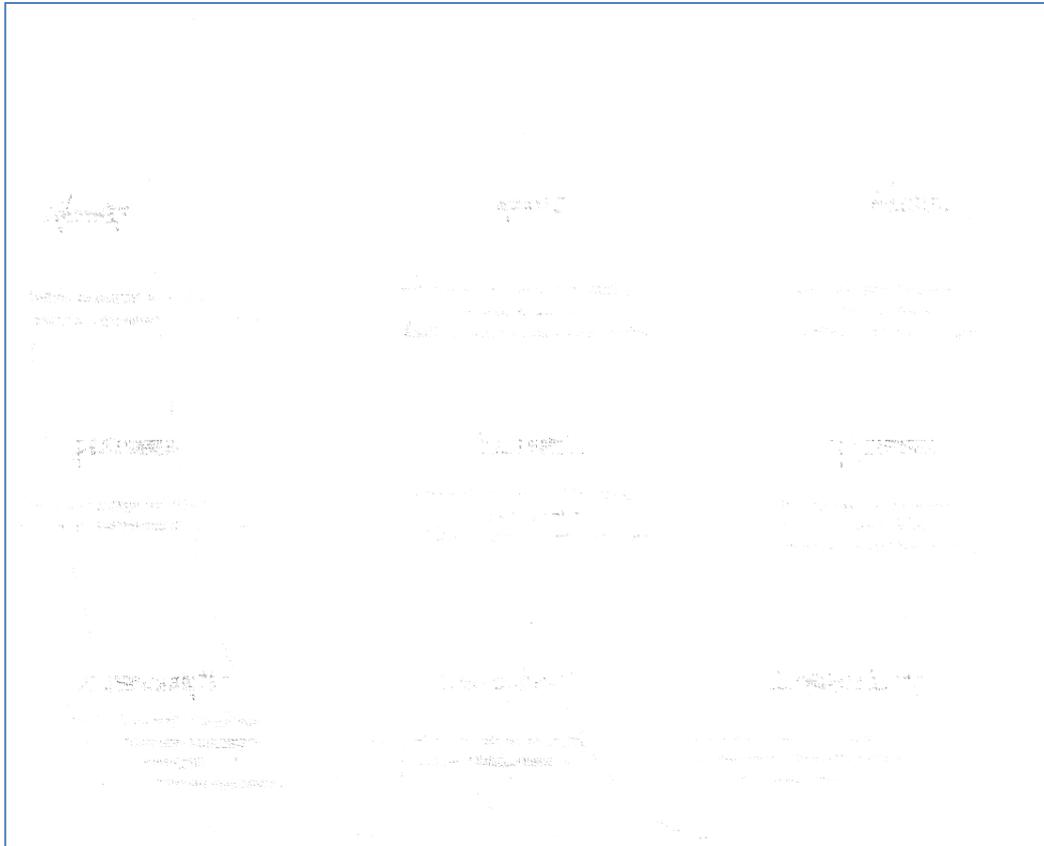


Figure 2-33. Cycle en V du processus NA (DCNS, 2007b) (image dégradée pour raison de confidentialité)

La définition et la validation des exigences ainsi que la conception préliminaire du NA et de ses systèmes se font dans une logique « top-down », du NA vers les composants. La conception détaillée, l'intégration fonctionnelle des systèmes complexes et la vérification et la validation du produit final se font dans une logique « bottom-up », des composants vers le NA (DCNS, 2007b).

Pour chacune des phases de conception, les concepteurs et l'architecte ont des objectifs bien définis en termes de précision et de « densité » de données (*Tableau 2-4, Tableau 2-5*). Plus le projet avance, plus les données sont précises et nombreuses. Avec l'avancement d'un projet, la qualité et la quantité de la description des sous-ensembles se précise, permettant de définir les grands ensembles en phases A et B, et les composants en phase (B et) C.

Tableau 2-5. Les étapes du processus de conception et les acteurs concernés par chacune d'entre elles.

AVANTPROJET	Analyse du Besoin	Analyse fonctionnelle et référence aux catalogues	Architecte (ARE)
	Phase A	premiers choix : dim ensionnement, propulsion enménagements	Architectes et systèmeiers
		premiers choix technologiques : plans de technologies	Architectes et systèmeiers(+techno logues)
		Bilan / devis	
	Phase B	choix technologiques plus fins propection / achats	Systèmeiers
			Responsable d'installation et technologies
	Bilan/ devis	Architectes et systèmeiers	
DEVELOPPEMENT	Phase C	choix technologiques propection / achats	Architectes et systèmeiers
		Bilan / devis	Architectes
INDUSTRIALISATION	Phase D	abrication	Etablissement de production
		Devis bilan	EP et architectes

Par exemple, les architectes et chefs de projets dirigent la planification et le pilotage des activités d'ingénierie pour maîtriser :

- Les coûts et les délais,
- Les performances,
- L'avancement technique,
- La configuration des données techniques,
- Et les risques associés.

Quant aux concepteurs, ils assurent les tâches suivantes :

- La spécification technique du besoin,
- Le suivi technique de la prestation, la vérification de la bonne prise en compte des exigences,
- L'acceptation sur le plan technique des fournitures

Les dernières générations de navires armés comme les frégates FREMM, sont conçus sur un modèle d'architecture ouverte, permettant d'accueillir des plateformes aux fonctions différentes, en suivant la demande client. Il y a donc une grande modularité d'assemblage possible autour d'une même base.

On voit ainsi se profiler l'intérêt que pourrait représenter des briques toutes prêtes, réutilisables, assemblables et disponibles pour les différents niveaux d'AP.

c. Les processus de reconception et d'innovation

Dans le monde industriel dans lequel évolue DCNS, l'innovation est un maître mot. Elle représente un atout face à la concurrence, et une réponse aux nouvelles technologies développées « menaçantes ». Les navires militaires se doivent d'être le fer de lance de la technologie. Vitesse, discrétion acoustique, flexibilité, fiabilité et efficacité sont quelques-uns des critères indispensables pour un navire armé.

Il y a donc une forte compétence en reconception mais surtout en innovation dans les équipes de conception DCNS. Le matériel choisi est de deux sortes : standard ou spécifique. Si le matériel standard peut être considéré comme du matériel « sur étagère », il n'en est pas de même pour le matériel spécifique. A noter que la standardisation peut s'appliquer à un système, à un sous-système ou à tout autre niveau de l'AP du navire.

Ainsi, dans le cas d'un NA très innovant, la séparation des architectures permet d'optimiser les périmètres des systèmes (et leurs coûts respectifs), et limite la réutilisation de solutions standards en se cantonnant donc aux systèmes non innovants. Dans le cas d'un NA peu innovant, la conception sera optimisée par la réutilisation de solutions standards, avec une veille importante concernant la cohérence des interfaces (DCNS, 2007b). Ce deuxième cas correspond plus à de la reconception.

Les innovations sont essentiellement faites lors de projets de R&D, donc en continu, en amont et en parallèle des projets en cours. La démarche conceptuelle proactive de DCNS permet le plus souvent de proposer des options développées aux clients. Et finalement, le client choisit dans un « catalogue » pour construire un navire « à la carte ».

Là encore, l'utilisation de modules de référence tout prêts (les briques de données) permettrait aux concepteurs de comparer assez vite les avantages ou les inconvénients de la nouvelle technologie, d'un point de vue environnemental.

3.2. La démarche environnementale chez DCNS

3.2.1 Ce qui existe déjà

a. Une démarche globale : de la certification ISO 14001 à la R&D

« Quatre axes structurent la politique environnementale de DCNS : protéger la mer et les milieux naturels, se conformer aux exigences réglementaires, concevoir des navires éco-efficents et inscrire l'ensemble de sa démarche dans une logique de prévention et d'amélioration continue » (DCNS, 2010a).

DCNS a mis en place une démarche de groupe pour une certification ISO 14001. Tous les sites français sont certifiés ISO 14001. L'ingénierie est elle aussi certifiée. L'éco-conception et le management environnemental y sont favorisés.

C'est dans ce contexte que le projet CONVENAV a pu voir le jour. De même que pour le projet SSD (Sustainable Ship Design), le travail est orienté sur la notion de cycle de vie. En effet, comme cela a été décrit précédemment, le processus de conception chez DCNS est tel que l'arborescence produit est définie dès la phase d'avant-projet. Cette AP est construite jusqu'au niveau AP3 (voire AP4), donc à un niveau assez macro. Mais des masses sont quand même associées pour chacun de ces niveaux. La connaissance des bilans de masse (bilan massique de tous les composants d'un produit), et donc aussi des entrants et des sortants, permet de réaliser des ACV plus ou moins « précises » pour les différentes phases de conception. Ces modélisations, non seulement du fait de la durée du processus de conception mais aussi de la présence dès l'avant-projet d'un bilan de masse, sont théoriquement réalisables même pendant la conception du produit.

b. Une première expérience d'ACV de navire

Aujourd'hui, dans la littérature, il existe assez peu de références concernant les ACV de bateaux. Les évaluations environnementales des navires sont soit partielles (MAGERHOLM-FET, 2002), soit simplifiées avec non pas des évaluations de type ACV mais des bilans environnementaux (WINNES, et al., 2006).

Dans un premier temps, DCNS, en collaboration avec Arts et Métiers, a essayé de réaliser l'ACV d'un navire existant, une frégate La Fayette. Ce navire déjà en service devait permettre de pouvoir récupérer un maximum d'informations concernant la conception. Le logiciel d'ACV utilisé est SimaPro (GOEDKOOOP, 2007c) (GOEDKOOOP, 2008a). Les modélisateurs (le spécialiste éco-conception DCNS et des étudiants Arts et Métiers) se sont heurtés à trois principales difficultés :

- Un navire armé en fin de conception se décrit grâce à son bilan de masse sur pas moins de 25000 lignes (et peut atteindre quelques 60000 lignes). Cela représente un travail de modélisation extrêmement long et laborieux quand il est effectué par une seule et même personne, même experte en ACV.
- Pour bon nombre de ces lignes, elles sont « incompréhensibles » pour un analyste environnemental qui ne connaît pas le produit ; i.e. elles emploient des termes très spécifiques, codifiés voire codés.

– La majorité de ces composants ne sont pas des modules existants dans les BDD telles qu'EcolInvent. Il s'est avéré très difficile de trouver des données permettant de créer des modules correspondants. Même si les données concernant un produit sont théoriquement accessibles et/ou connues du concepteur ou du fournisseur, il a été impossible de les récupérer, en particulier lorsqu'elles n'étaient détenues que par les fournisseurs. A titre d'exemple, pour modéliser un moteur diesel, il a fallu plus d'un an pour avoir un retour du fournisseur qui a fini par « céder » la composition approximative de son moteur.

Malgré ces inconvénients, des résultats ont pu être obtenus. Ils ont permis de mettre en évidence que sur l'ensemble du cycle de vie du navire, c'est la phase d'utilisation qui est largement la plus impactante et cela, quelle que soit la méthode de calcul d'impact utilisée (Figure 2-34) (GOEDKOOP, et al., 2001) (BRANDES, et al., 1996). Il ne sera présenté que les résultats obtenus selon la méthode de calcul d'impact CML 2001 (cf. chapitre 3, 2.1.).

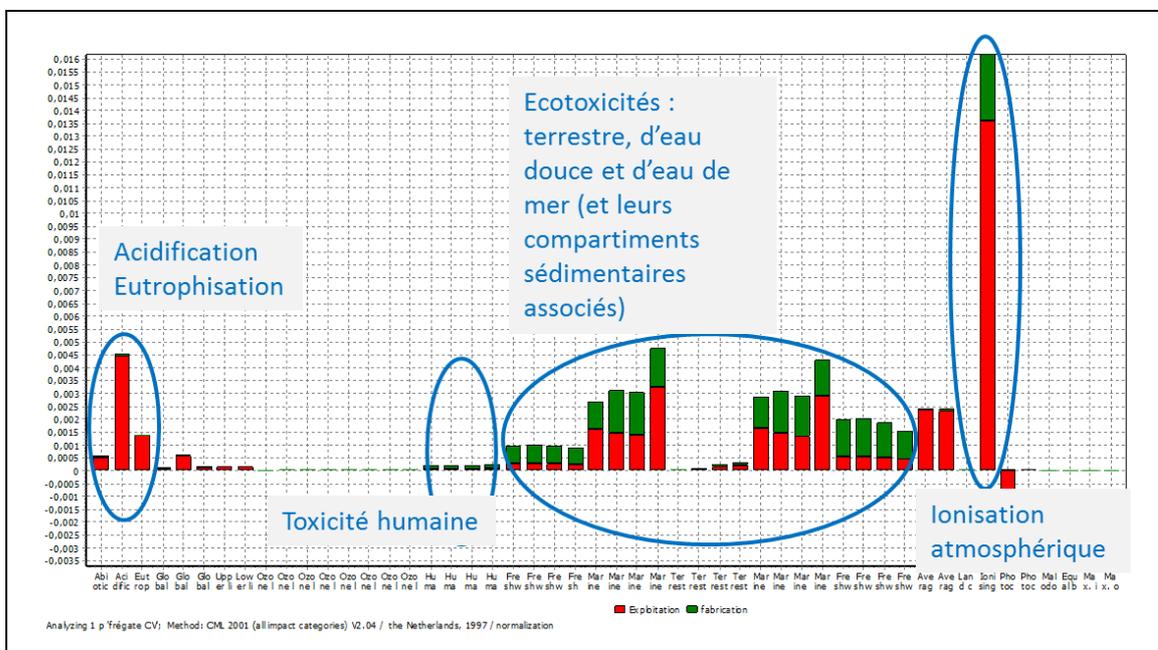


Figure 2-34. Les premiers résultats de la modélisation ACV de la frégate La Fayette, selon la méthode de calcul d'impact CML 2001. La fabrication (en vert) est moins impactante que l'utilisation (en rouge).

Les impacts, selon la méthode de calcul d'impact CML 2001, sont surtout portés sur :

- l'acidification et l'eutrophisation du milieu
- les écotoxicités : terrestre, marine aquatique, marine sédimentaire, d'eau douce et sédimentaire d'eau douce.

Les valeurs d'impacts sont données en valeurs normalisées (adimensionnelle) par rapport aux émissions moyennes d'un européen pour chacune des catégories d'impact.

Ces deux grandes catégories sont fortement liées à la problématique des émissions dans l'eau et dans l'atmosphère.

Le pic observable pour l'ionisation atmosphérique s'explique simplement par le fait que le navire modélisé utilise de l'énergie française, non seulement lors de la fabrication, mais aussi quand le navire est à quai (en phase d'utilisation). Cette énergie est un mix qui se compose à 80% d'énergie nucléaire. Or le nucléaire produit des déchets radioactifs qui ont un fort pouvoir d'ionisation de l'atmosphère, ce qui explique donc ce pic observé. Une modélisation ACV prenant en compte une énergie allemande n'aurait pas un pic aussi marqué ; mais il aurait par contre un impact sur les ressources fossiles (« abiotic depletion ») plus important.

Lors de la phase de fabrication, les systèmes les plus impactants sont ceux concernant les fonctions de propulsion et de manœuvrabilité (la coque) (Figure 2-35). A noter cependant que ce navire n'était pas découpé en systèmes, mais en fonctions. En effet, historiquement, lors de la conception de la frégate La Fayette, l'AP en systèmes n'était pas intégrée dans le processus de conception. Aujourd'hui, tous les navires DCNS sont définis selon une AP de référence, permettant de garder les mêmes nomenclatures d'un projet à l'autre.

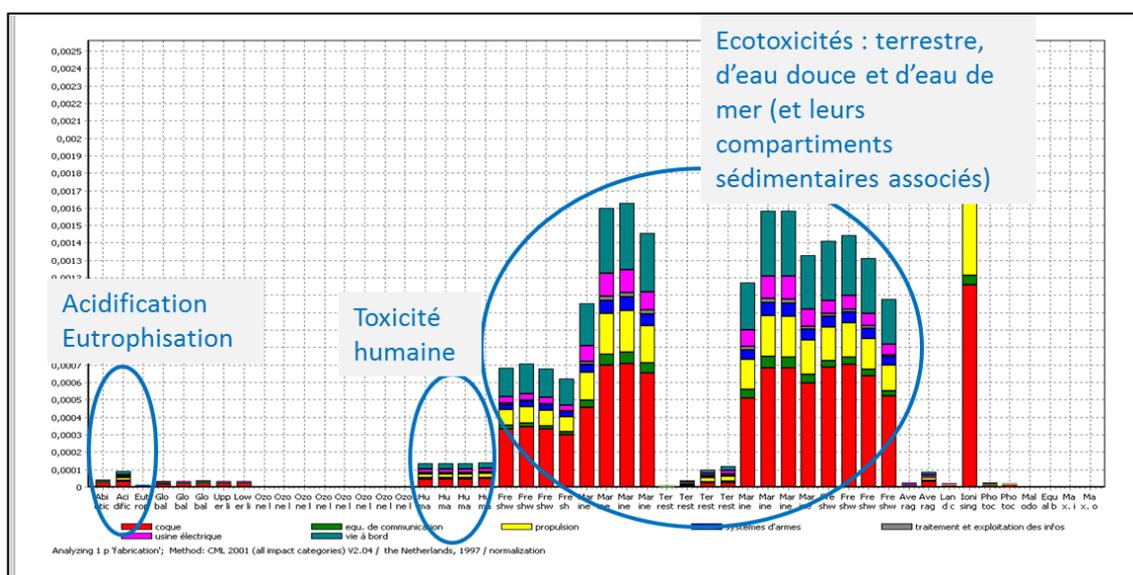


Figure 2-35. Les résultats de l'ACV de la frégate La Fayette pour la phase de fabrication, selon la méthode de calcul d'impact CML 2001. La coque (en rouge), la vie à bord (en vert d'eau) et la propulsion (en jaune) sont les éléments les plus impactants.

En ce qui concerne la phase d'utilisation, comme cela a été dit précédemment, ce sont les systèmes de propulsion et de production électrique qui sont la source des impacts environnementaux (Figure 2-36).

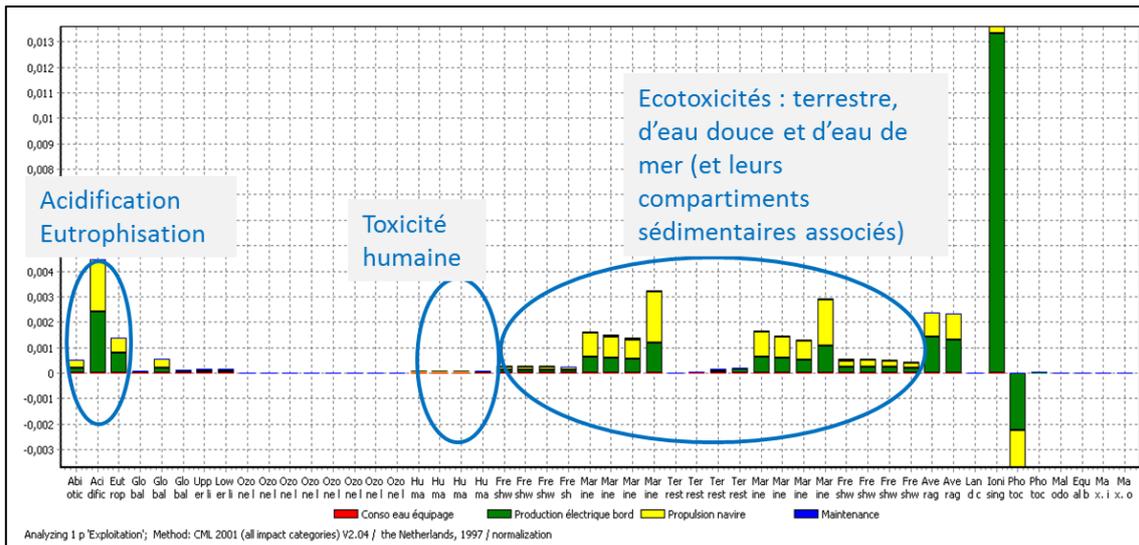


Figure 2-36. Les résultats de l'ACV de la frégate La Fayette pour la phase d'utilisation, selon la méthode de calcul d'impact CML 2001. La production électrique de bord (en vert) et la propulsion (en jaune) sont les éléments les plus impactants.

Cette expérience a démontré que si l'ACV est réalisable, l'outil utilisé n'est pas le plus adéquat. Il est inadapté à la situation qui nécessite :

- une interactivité avec les concepteurs, qui eux, connaissent les composants utilisés,*
- une réactivité plus importante permettant d'obtenir rapidement des résultats exploitables,*
- une approche plus orientée aide à la conception et à l'amélioration des produits. Comme WINNES l'a dit, l'ACV est inadaptée à la prise de décision lors du processus de conception (WINNES, et al., 2006).*

De plus, le découpage en arborescence produit du navire rend le système complexe (GRES, 2002). En effet, même si les ensembles sont définis par grandes fonctionnalités, celles-ci ne sont pas toujours indépendantes les unes des autres (ce n'est que très rarement le cas). Un changement de technologie au sein d'un sous-ensemble peut avoir des répercussions sur d'autres éléments n'appartenant pas à ce même sous-ensemble. De cette façon, une amélioration de chacun des constituants ne garantit donc pas une amélioration globale du produit. Il faut donc que l'outil puisse aussi garantir un optimum environnemental sur l'ensemble du produit.

c. Une intégration au niveau projet

En 2008, le groupe a souhaité éco-concevoir un navire. Ce projet, nommé Ecoship, s'est limité à une étude de niveau phase d'avant-projet, donc à un concept (Figure 2-37). Le projet a été

présenté lors des journées Euronaval (exposition internationale des professionnels du secteur naval et maritime) avec l’affichage des résultats obtenus ainsi qu’une maquette projet. Ecoship est un outil de communication très important pour l’entreprise (TI, 2009).

L’objectif principal de l’équipe ayant travaillé sur ce projet était de réduire de moitié l’impact environnemental global d’un navire militaire de référence, un Bâtiment d’Intervention et de Souveraineté (BIS), mais aussi d’en amortir les surcoûts générés sur une période de cinq ans. L’idée est de rendre les navires éco-conçus plus économiques sur le long terme, malgré un surcout d’achat.



Figure 2-37. ECOSHIP : un projet de navire éco-conçu : une coque en aluminium, une voile type kite surf, des panneaux solaires,... (Image mer et marine)

Dans un premier temps, le navire de référence (BIS) a donc été modélisé sous SimaPro. Le but était de faire une première évaluation du produit, dans son ensemble, pour connaître le rapport entre les phases de vie, mais aussi entre les différents systèmes. La méthode de calcul d’impact utilisée est EI 99. Sachant que ce type de navire a une durée de vie de 30 ans et qu’il consomme du gazoil (en grande quantité) pour ses fonctions électriques et propulsives, les résultats obtenus n’ont pas été réellement surprenants : c’est la phase d’utilisation qui est largement plus impactante pour l’environnement (Figure 2-38).

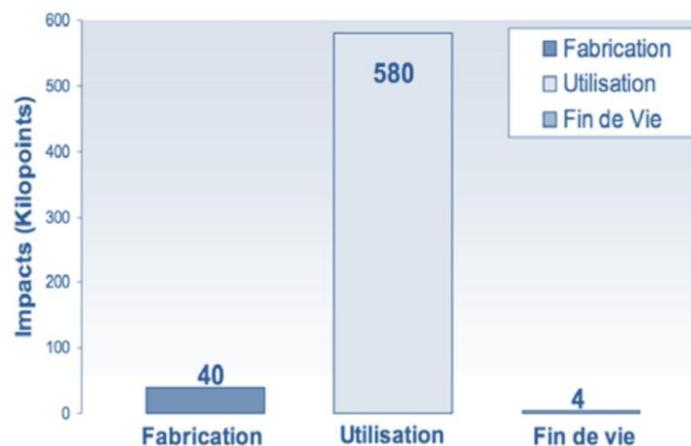


Figure 2-38. Résultats en éco-points de l’ACV du navire BIS, par la méthode de calcul d’impact EI 99 (H).

Ainsi, la préoccupation de recherche principale pour imaginer un navire éco-conçu a été de diminuer cet impact en améliorant l'hydrodynamique et le mode de propulsion du navire. Quatre axes de recherche ont été particulièrement étudiés :

- L'optimisation du flotteur : forme de la carène et matériau structurel
- L'optimisation hydro et aérodynamique
- L'utilisation d'énergies propres
- L'optimisation énergétique

Par exemple, la coque ayant été évaluée comme étant une forte source d'impact, elle a fait l'objet de réflexions. Ainsi, l'acier a été remplacé par de l'aluminium. Même si l'extraction et la mise en forme de l'aluminium a un impact plus important que pour l'acier (notamment parce que l'aluminium est une ressource plus rare que le fer), le fait d'utiliser ce matériau permet d'en réduire la quantité initiale nécessaire. Cela permet aussi d'améliorer l'impact de la FdV car l'aluminium est hautement recyclable.

Autre exemple permettant de réduire la consommation en carburant : l'amélioration de l'hydrodynamisme et du système propulsif avec le développement d'un ensemble intégré hélice/safran, appelé « *pod* » (Figure 2-39).

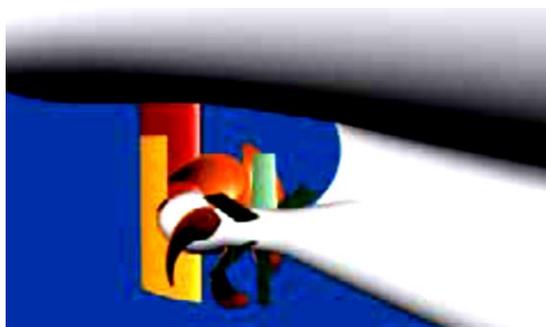


Figure 2-39. L'optimisation du système de propulsion : un ensemble intégré hélice/safran ou « *pod* »

A chaque fois, les solutions proposées étaient des solutions technologiques existantes, disponibles, même si elles ne sont pas utilisées dans ce milieu industriel. Ce sont les briques technologiques, telles que décrites précédemment (cf. chapitre 1, 1.5). Le cas des panneaux solaires en est le parfait exemple : les navires militaires se doivent d'être le plus discret possible dans la majorité des projets. Cette technologie n'est donc pas adaptée à cette contrainte. Mais pour un navire de type Ecoship, qui peut être un peu moins « invisible » que les autres, et qui a surtout servi de démonstrateur, les concepteurs ont pu intégrer une technologie assez inhabituelle pour eux. De même, une voile de type kite surf a été ajoutée sur le navire (Figure 2-37). Greffée à l'avant, elle serait déployée pour gagner en propulsion, lors par exemple de trajets non « urgents » et permettrait d'économiser du carburant.

Le projet Ecoship a permis de démontrer non seulement que pour faire de l'amélioration, il n'est pas toujours nécessaire d'innover (pour l'ensemble du produit), mais aussi que ces solutions sont directement applicables pour les projets à venir. Ainsi, l'optimisation de la consommation et du rendement, le respect des normes en matière de rejets et de déchets et la traçabilité des matériaux entre autres sont des points qui sont actuellement mis en application lors des projets plus « courants ».

d. Vers une intégration totale de l'éco-conception

L'intégration de l'éco-conception chez DCNS se fait en deux étapes :

- Dans un premier temps, DCNS n'a appliqué cette démarche qu'à l'échelle de projets bien spécifiques (pour des avant-projets de démonstration tel Ecoship).
- Dans un second temps, le groupe a entrepris d'impliquer l'ensemble du personnel des équipes de conception dans la démarche.

Le groupe DCNS s'est lancé dans une intégration « complète » de la question environnementale dans le processus de conception. Cette démarche fait suite à trois principales forces motrices :

- La pression réglementaire qui devient de plus en plus exigeante
- La demande des clients de plus en plus fréquente d'un produit plus respectueux, qui se situe à l'avant-garde des réglementations à venir, qui intègre le principe de précaution, et qui donne finalement par la même occasion, une meilleure image non seulement du client et de ses choix responsables, mais aussi du constructeur.
- Une volonté entrepreneuriale d'une démarche plus active vis-à-vis des préoccupations environnementales.

Cette intégration dans le processus de conception se fait donc selon trois grandes étapes (*Figure 2-40*) :

- Un affichage des besoins dans le cahier des charges. Ils peuvent par exemple s'exprimer par : « un navire moins polluant en termes d'émissions gazeuses dues à la propulsion »
- Une évaluation des besoins par rapport à la législation : la demande est-elle en respect des normes en vigueur ? des normes à venir ? proactive ?
- Une intégration de l'éco-conception en conséquence de ce rapport demande / législation



Figure 2-40. Les 3 étapes permettant de déterminer le niveau d'implication de la conception du produit par rapport à l'éco-conception.

En fonction de ces étapes, l'intégration de l'éco-conception au sein des équipes sera déterminée. Cette détermination ne sera fixée que dans le cadre d'un même projet, en fonction donc des spécifications et exigences notifiées par le client dans le cahier des charges.

Dans ce cahier des charges (*Figure 2-41*), on retrouve ainsi les « habituelles » spécifications techniques telles que : la vitesse maximum à pouvoir atteindre, ou bien encore le fait que le navire ait besoin d'un système d'air conditionné efficace car il sera destiné à croiser en zone tropicale. Ce sont des données classiques auxquelles peuvent venir s'ajouter des contraintes réglementaires comme par exemple, respecter la législation en termes d'émissions atmosphériques d'un pays ou d'un autre. En effet, un navire qui sera amené à voyager le long d'un littoral bangladais n'aura pas les mêmes restrictions qu'un autre voulant mouiller au port de Los Angeles (très regardant sur les émissions de NOx et de SOx, sur la gestion des eaux de ballast ainsi que des grises et des noires). Mais le client peut vouloir un navire encore plus propre que ce qui est demandé par les législations en vigueur. Dans ce cas-là, lorsqu'il sort du cadre des législations, il peut soit faire une démarche d'anticipation soit être réellement proactif. L'anticipation réglementaire se définit quand il existe des textes de lois ou des préconisations qui sont en discussion (par des groupes de spécialistes, scientifiques, politiciens, comme ce fût le cas début 2010 pour la problématique des eaux de ballast). Le client fait une demande proactive lorsque sa demande dépasse largement les législations en termes de prévention. Par exemple, des objectifs tels que « zéro émissions » sont loin d'être mis en discussion pour d'éventuelles réglementations. Mais un client peut vouloir un bateau entièrement propre du point de vue rejets atmosphériques. Il est certain que cela demanderait un réel effort d'amélioration du produit.

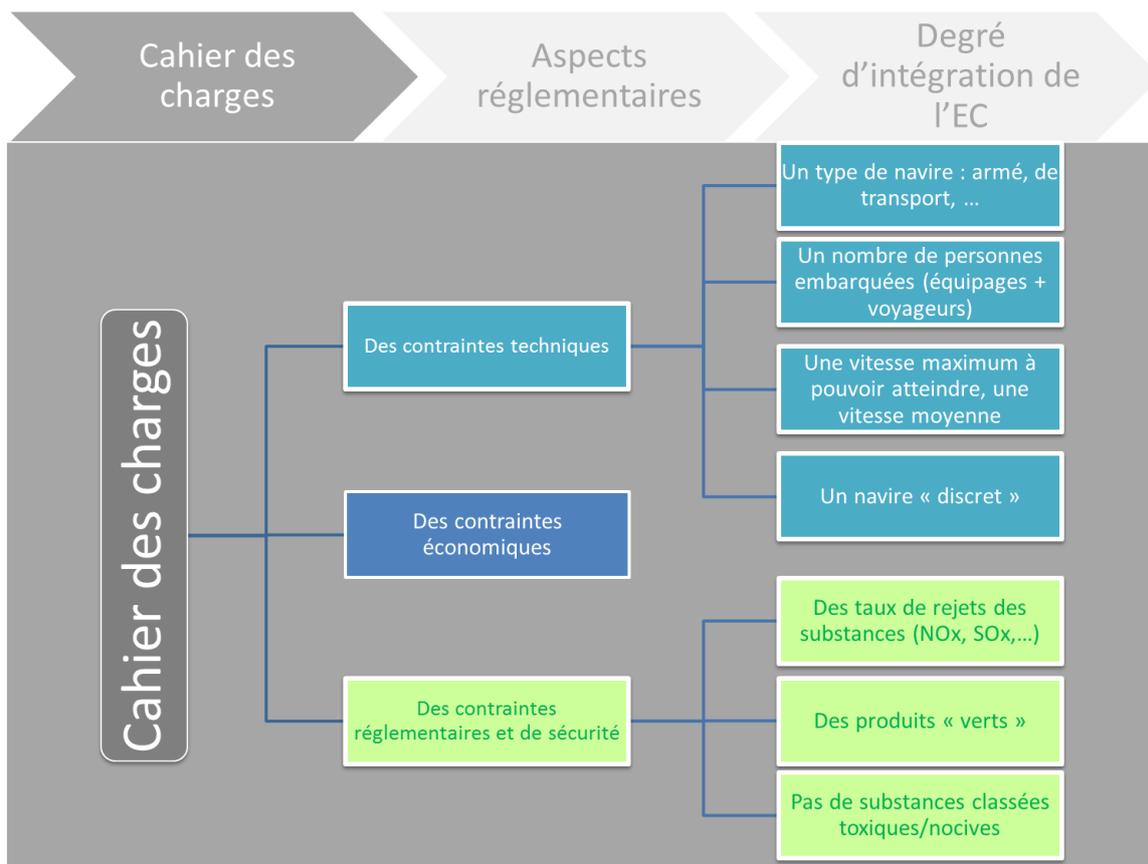


Figure 2-41. Un exemple de spécifications observables dans un cahier des charges DCNS

Les trois catégories d'aspects réglementaires sont les suivantes (Figure 2-42) :

- Le respect des législations en vigueur, avec entre autres, MARPOL 2006, REACH et la législation sur les peintures antifouling
- L'anticipation des législations à venir, telles que celles concernant l'interdiction totale de rejets en mer des eaux noires et grises
- Une démarche proactive face à la législation comme par exemple un navire « zéro émissions » dans l'eau, ou dans l'air.

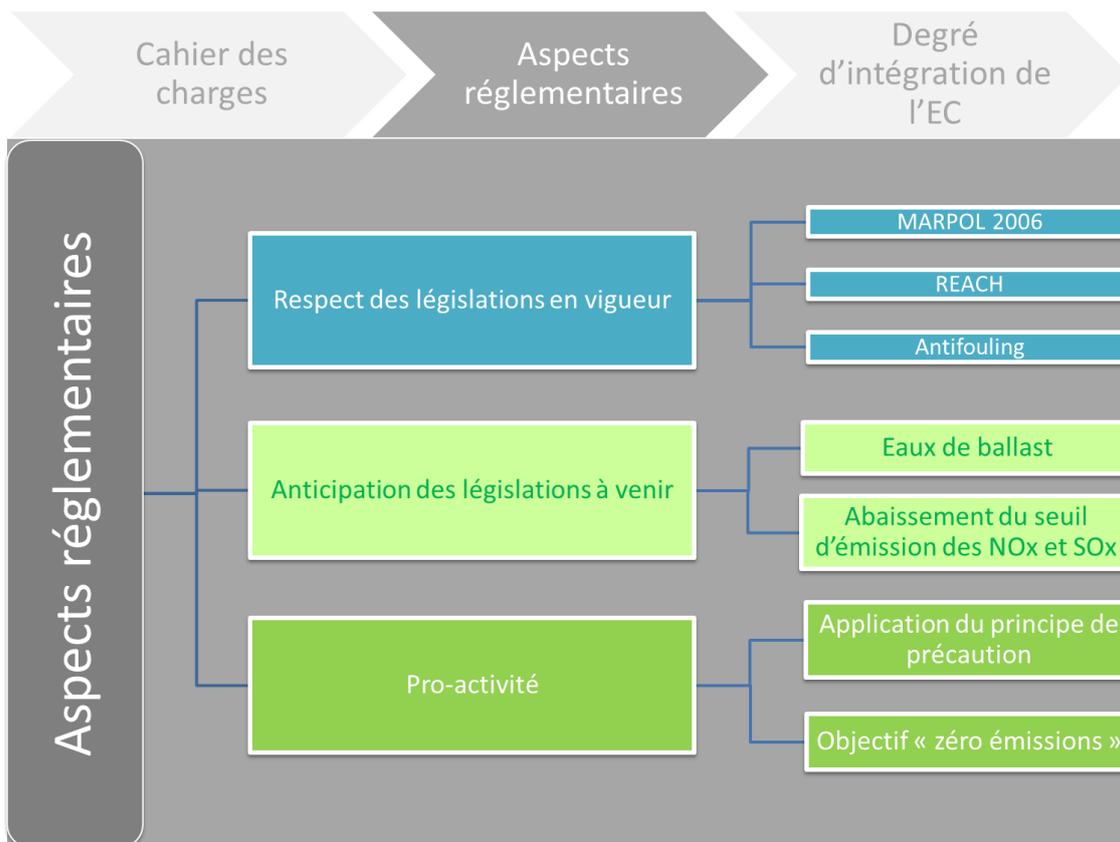


Figure 2-42. La classification des aspects réglementaires : respect des législations en vigueur, anticipation des législations à venir et démarche proactive.

Ainsi, c'est à la fois basé sur le cahier des charges et sur les aspects législatifs (Figure 2-43) qu'est décidée la démarche d'éco-conception à suivre. De même que les aspects législatifs sont classés en trois groupes, la démarche d'intégration de l'éco-conception qui en découle est classée en trois catégories d'approche :

- L'approche standard : le client ne souhaite pas faire d'efforts particuliers vis-à-vis de l'environnement, mais respecte les législations en vigueur.
- L'approche volontariste : le client veut anticiper les législations à venir.
- L'approche éco-conçue : le client souhaite un navire qui impacte moins sur l'environnement, et ce de façon plus globale.

Ces trois approches sont directement liées à la vision législative du produit, i.e. à l'adéquation de celui-ci avec les réglementations existantes ou à venir.

Il est important de noter toutefois, qu'aujourd'hui, les navires militaires ne sont nullement tenus de respecter les législations en vigueur. Pourtant, en France, la Marine Française essaye de faire le choix du respect de ces lois. Et c'est en partie grâce à cette démarche que le groupe DCNS s'est lancé dans le défi de l'éco-conception.

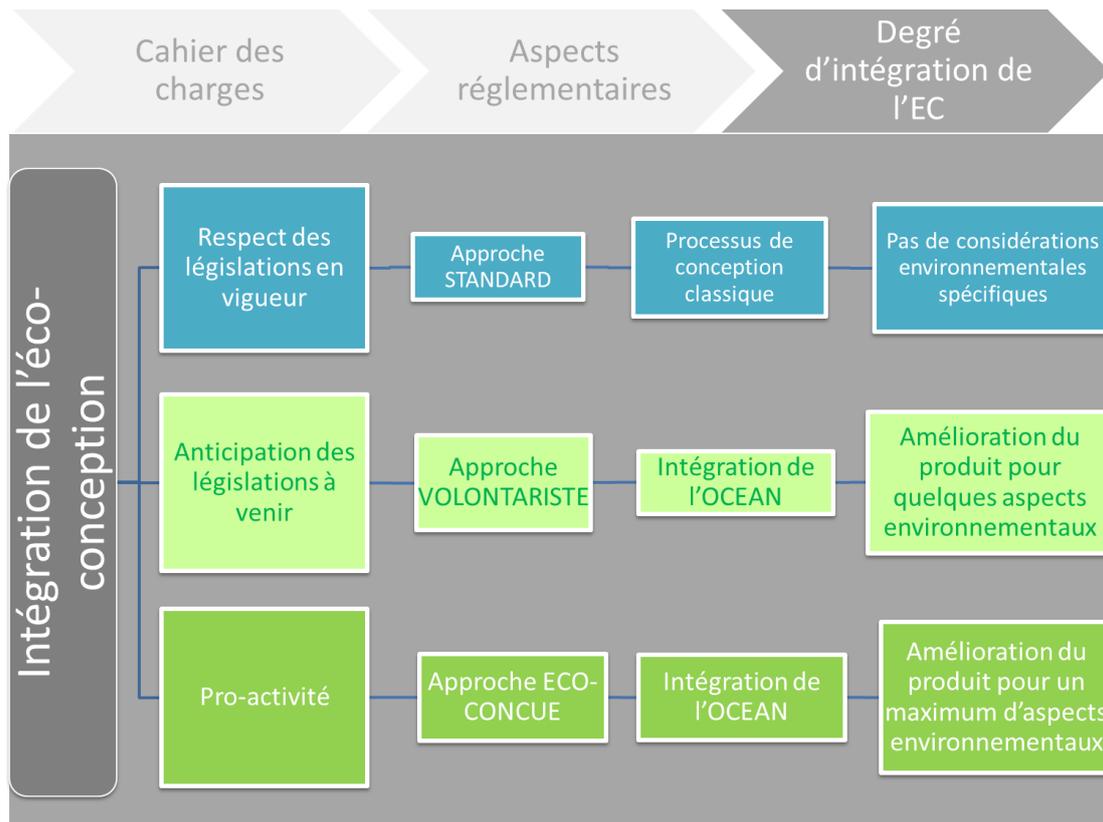


Figure 2-43. Les 3 grands niveaux d'intégration de l'éco-conception, basés sur le cahier des charges et l'état des législations : l'approche standard, l'approche volontariste et l'approche éco-conçue.

Chacune de ces approches confèrera ou non au futur produit des atouts face à l'avancée des législations. En effet, celles-ci ne sont pas fixes, mais réellement évolutives, souvent dans le sens restrictif : certaines substances jusque-là tolérées ne le seront dorénavant que jusqu'à un certain seuil, d'autres ne seront plus utilisables car référencées comme étant hautement toxiques et/ou nocives pour l'Homme et/ou le biotope.

Ainsi, un client ayant une approche standard de son produit se conforme à la réglementation, mais il est certain que dans les dix années à venir, son produit ne sera plus conforme. La plupart du temps, c'est une question de coût qui bloque une démarche plus volontariste. Cela peut aussi être dû à une lacune de connaissance technologique de la part du client : ses équipes sont habituées à travailler avec certains matériaux et composants, et cela demanderait trop d'efforts (financiers et temporels) pour remettre à niveau le personnel.

Un client ayant une approche volontariste essaye d'anticiper au mieux les futures législations, sans impliquer un surcoût trop important, à la fois dans l'immédiat (pour la construction de son produit), mais aussi dans les années à venir. Cette anticipation permet souvent d'avoir une vision plus large du produit, et ainsi d'envisager des solutions technologiques et techniques différentes, pour finalement obtenir indirectement une diminution des impacts environnementaux visés. Par exemple, sur la frégate FREMM, en gardant une motorisation diesel classique, les concepteurs se sont aperçus que le nombre de moteurs nécessaires pour atteindre des vitesses hautes en changeant une motorisation diesel simple par un système de double motorisation complémentaire

(diesel pour les petites vitesses, avec un relais sur turbines à gaz pour les grandes vitesses), les émissions dues à la combustion (de CO₂, NO_x et SO_x) ont pu être diminuées.

Enfin, un client ayant une approche éco-conçue voit plus loin que la législation. Il essaye d'améliorer son produit, sans attendre qu'on lui dise ce qu'il doit améliorer. C'est l'ensemble de son produit qui l'intéresse. L'idée est de trouver toutes les astuces permettant de diminuer les impacts du produit, que ces technologies soient déjà disponibles ou qu'il faille les développer.

Chronologiquement, pour une intégration de l'éco-conception cohérente, l'entreprise passe par ces trois stades évolutifs : l'approche standard, puis volontariste et enfin proactive (éco-conçue). Il faut que cette évolution soit progressive pour ne pas être trop intrusive dans le processus établi et dans les habitudes de travail des équipes de conception. L'éco-conception ne doit pas être une nouvelle charge de travail, mais elle doit devenir naturellement un paramètre d'aide à la décision, au même titre que le coût par exemple.

De plus, comme cela a été montré, le paramètre qualité est passé par toutes ces entraves-là, et il s'en est sorti : aujourd'hui, il est totalement intégré. Il n'y a donc aucune raison pour que le paramètre environnemental ne soit pas intégré dans les processus de conception.

3.2.2 *Ce qu'attendent les équipes de conception DCNS de l'OCEAN*

Les responsables du groupe DCNS ayant décidé d'intégrer l'éco-conception, plusieurs démarches ont été entreprises avec les équipes de conception pour aller dans ce sens : lors du projet CONVENAV, des concepteurs qui avaient pour certains déjà travaillé sur EcoShip, ont été mis à contribution. Des sessions de brainstorming ont ainsi été organisées. Elles réunissaient : des systémiers, des informaticiens, les interlocuteurs privilégiés (responsables de la démarche éco-conception et management environnementale). Ces fréquentes réunions ont permis de clairement définir les besoins et les attentes de chacun des futurs protagonistes, en fonction de leur niveau d'implication dans le processus de conception. Ainsi, quelques grandes caractéristiques ont été mises en avant ; l'outil doit être utilisable :

- Pour toutes les phases de conception, et en particulier surtout en avant-projet et en développement
- Pour une phase de vie (fabrication, utilisation, fin de vie), ou sur toute la durée du cycle de vie du navire, et ceci, pour chaque phase de conception
- Pour l'ensemble du navire, ou seulement un système, un sous-système ou tout autre élément constitutif du navire

- En fonction et en rapport avec une représentation 3D du navire (ou au moins un plan permettant une localisation des éléments par local) (cf. chapitre 5, 1)
- Par différents utilisateurs :
 - L'analyste environnemental : il doit avoir les « pleins » pouvoirs sur l'outil. C'est le garant du bon fonctionnement de l'outil et du bilan environnemental. Il doit avoir accès à tous les éléments de l'outil, que ce soit les bases de données, des modules utilisés ou créés, ou encore l'AP d'un système ou d'une partie de l'AP.
 - L'architecte : il peut aider et travailler en parallèle de l'analyste grâce à sa vision globale du produit et de chacun de ses constituants. Il doit avoir accès à l'ensemble de l'AP associée aux données d'entrée.
 - Les systémiers : ils n'ont accès qu'au système qu'ils ont en charge
 - Les technologues : ils ont accès à une partie du système pour lequel ils travaillent. Cet accès est défini par le référent (système, architecte, analyste)
 - Les fournisseurs : ils n'ont accès qu'à un fichier type qu'ils devront remplir via une connexion internet par exemple.
 - Les clients : ils n'ont qu'un accès de consultation (niveau de regard différent) ; par l'intermédiaire d'un accès à des rapports spécifiques

Chacun des futurs protagonistes, excepté les fournisseurs, ont été questionnés sur leurs attentes. Celles des clients sont déjà mentionnées dans le cahier des charges qu'ils proposent à DCNS. Un tableau récapitulatif a pu être dressé à partir de la collecte des données acquises lors de ces nombreuses rencontres ([Tableau 2-6](#)).

Pour chaque futur protagoniste, les différents critères permettant une bonne intégration de l'OCEAN dans le processus de conception ont été éclaircis. Ces critères sont :

- Leurs objectifs habituels
- Les contraintes liées à ces objectifs
- Les résultats attendus, i.e. principalement le format de ceux-ci
- Les gains attendus, i.e. ce qui pourra servir concrètement dans leur travail
- Et les actions, les apports à mettre en œuvre pour une bonne intégration

Qui que soit l'utilisateur potentiel, il a toujours demandé à ce qu'un outil tel qu'on lui propose soit facile d'accès non seulement en terme visuel, mais aussi et surtout en termes technique et de compétences nécessaires. Il faut que l'outil permette une utilisation non experte en ce qui concerne les questions relatives à la prise en compte de l'environnement.

Tableau 2-6. Les acteurs de la conception chez DCNS, et leurs liens avec l'intégration de l'OEC ; leurs objectifs, leurs contraintes, le résultat et les gains attendus, et leur apport nécessaire pour une bonne intégration de l'OEC.

Protagonistes	Objectifs	Contraintes	Résultat attendu	Gains attendus	Apports/actions à réaliser
Clients	marketing, coût, stratégie, performance, délais, qualité	coûts, législation, rentabilité	un bilan, une certification avec mise en avant des améliorations environnementales	un produit plus "vert", une possibilité de communication pour améliorer son image, une démarche pro-active par rapport à la législation, des économies: par rapport à une taxe de pollution, de gazole ou autre pendant la phase d'exploitation, une augmentation des performances du navire (autonomie...)	cahier des charges, retour d'expérience de l'utilisation
Architecte	évaluation des impacts, action sur leur(s) origine(s), présentation de l'intégrité du navire (vision globale de la problématique)	stratégies entrepreneuriales, coût, délais, technologie, cahier des charges	un bilan environnemental navire clair, utilisable, intégrable à leur démarche habituelle, archivable	visualisation et connaissance des impacts, possibilité de retour en conception	management des ressources, allocation des impacts par systèmes (en coopération avec l'analyste), cohérence entre les systèmes, Choix des axes techniques d'amélioration (en coopération avec l'analyste)
Systémier	évaluation des impacts du système, action sur leur(s) origine(s)	coût, délais, technologie, vision système, cahier des charges	un bilan environnemental système clair, utilisable, intégrable, archivable	visualisation et connaissance des impacts, possibilité de retour en conception et d'aide à l'amélioration, comparaison de plusieurs solutions techniques	management du système, choix technologiques spécifiques
Technologue	évaluation des impacts d'un produit et de ses solutions technologiques, action sur leur(s) origine(s)	coût, délais, technologie, vision produit, cahier des charges	un bilan environnemental produit clair, utilisable, intégrable, archivable, modulable	visualisation des impacts, possibilité de retour en conception et d'aide à l'amélioration	choix technologiques spécifiques
Analyste	évaluer et améliorer les impacts d'un navire et de ses systèmes	stratégies entrepreneuriales, coût, délais	un bilan le plus complet possible, permettant de prendre en compte un maximum d'éléments du CV du navire, une modélisation simple à réaliser	une synergie entre les protagonistes facilitant les échanges de données, et donc une meilleure évaluation du produit, pour une meilleure prise en compte de l'environnement lors de la conception	management environnemental, des ressources et du personnel utilisant l'OECAN
Fournisseur	valorisation des produits via des certifications/labels, stratégie, qualité, performance	coût, délais, concurrence, stratégie, technologie	une certification environnementale du produit claire, utilisable, valorisable	visualisation des impacts du produit, avec la possibilité de proposer différentes options	un fichier type BDD

CHAPITRE 3) METHODOLOGIE POUR L'INTEGRATION DU PARAMETRE ENVIRONNEMENTAL DANS UN PROCESSUS DE CONCEPTION – CAHIER DES CHARGES DE L'OEC

Grâce au *benchmark* réalisé précédemment, et en ayant posé le cadre des actions à réaliser pour intégrer le paramètre environnemental dans un processus de conception (cf. chapitre 2), il devient possible de définir un cahier des charges pour la mise en place de l'éco-conception dans ce processus, en se basant sur un outil d'ACV.

1. QUELLES SONT LES CARACTERISTIQUES PERMETTANT A UN PRODUIT COMPLEXE DE SOUTENIR UNE ECO-CONCEPTION BASEE SUR L'ACV DES LA PHASE D'AVANT-PROJET ?

1.1. Un produit complexe impliquant une conception structurée

Dans les quatre cas d'étude du *benchmark*, les produits fabriqués font appel à de nombreuses technologies pour répondre à des contraintes techniques, technologiques, ou bien réglementaires. Ces technologies définissent des fonctions propres au produit. Par exemple, la motorisation d'une voiture est dimensionnée en fonction de la vitesse maximum, la puissance d'accélération, la masse à déplacer, la zone de circulation privilégiée (urbaine ou routière) ou encore d'une consommation en carburant économique. La motorisation est donc liée entre autres à la taille du véhicule, mais aussi à sa masse. En allégeant la masse du véhicule, de la puissance est « libérée ». Généralement, on peut considérer que les produits devant se mouvoir par leurs propres moyens sont des produits complexes. Automobiles, camions, trains, bateaux, avions, navettes spatiales sont quelques exemples de produits hautement complexes. Ils doivent remplir plusieurs (sous-) fonctions pour permettre la réalisation de la fonction principale. Chacune de ces (sous-) fonctions est dépendante des autres.

Les produits du benchmark sont classés comme produits dits complexes. Dans le cadre de cette thèse, et d'après la définition de GRES (GRES, 2002), un produit (ou système) complexe se définit de la sorte : « un produit est dit complexe lorsque la fonction du produit complet n'est pas identique à la somme des fonctions de ses sous-ensembles » (*Figure 3-1*). Typiquement, cela s'illustre lorsque le changement d'un élément au sein d'un sous-ensemble entraîne des modifications dans un autre ensemble ; il y a donc des interrelations et interactions entre les sous-ensembles censés être identifiés comme ayant des fonctions « homogènes » et indépendantes.

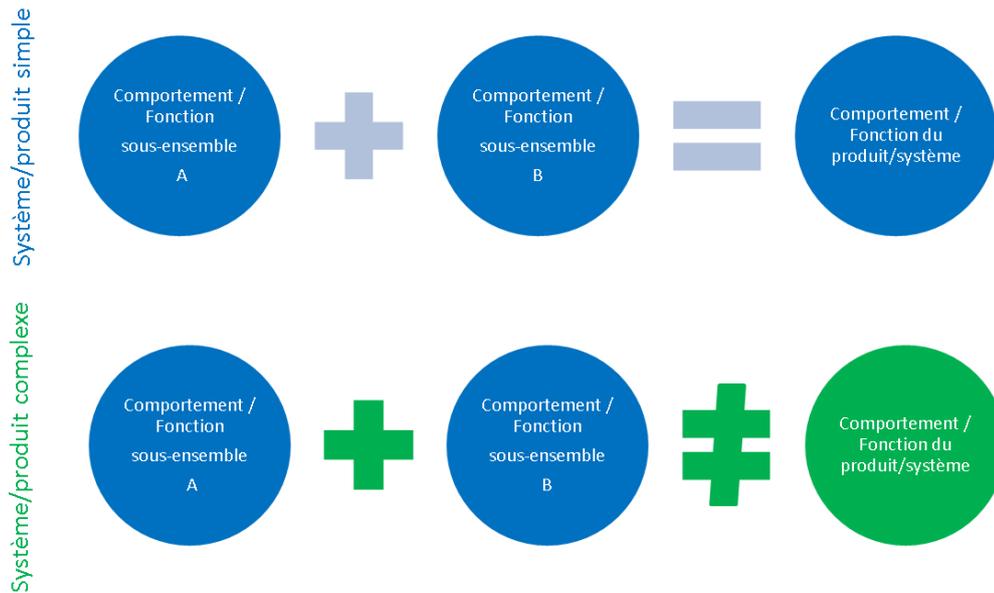


Figure 3-1. Définition d'un système ou produit complexe.

Toute la difficulté entraînée par cette complexité réside dans le périmètre d'étude de la (des) fonction(s). En effet, l'observation de changements de conception à une échelle micro (les sous-fonctions) ne garantit pas les mêmes résultats à une échelle plus macro (la fonction principale). De même, si la définition des sous-fonctions ne pose que peu de problèmes à première vue, il n'en est rien car chacune d'entre elle est dépendante des autres. La fonction principale est elle aussi assez difficile à poser. Pour le cas d'un avion, des sous-fonctions peuvent être : le « système propulsif » sert à mouvoir l'avion, les « installations de bord dédiées à la sustentation des passagers et du personnel » servent à assurer la fonction d'alimentation des personnes à bord lors d'un vol. Le périmètre de ces sous-fonctions semble simple à poser. Pourtant, le nombre de passager va jouer sur la capacité de propulsion de l'avion, et inversement Il en est de même pour la fonction principale. Cela pourrait juste être « faire voler un avion de X tonnes », ou bien « transporter X passagers pour des vols longs courriers »... mais ces définitions ne reflètent pas la réalité. La conception d'un avion répond à un ensemble de contraintes et de besoins, chacun d'entre eux étant descriptible par une fonction. Pour définir la fonction principale d'un produit complexe, il faut que son périmètre d'étude soit posé de façon la plus exhaustive possible, i.e. en prenant en compte tous les paramètres pouvant faire varier la fonction principale. Dans le cas de l'avion, cela pourrait être « assurer le transport de X passagers et les sustenter X' fois (en fonction des horaires et de la durée du vol), sur une distance de Y kilomètres, avec un mode de propulsion Z ».

Ainsi un produit complexe peut se définir par l'ensemble des fonctions nécessaires associées entre elles par des interactions et des interdépendances et qui n'autorisent pas l'étude d'une fonction seule sans considération de l'intégralité du produit.

La complexité inhérente à ce type de produits nécessite un processus de conception très établi, défini par une succession d'étapes de conception sanctionnées par des revues de fin de phases. Cette complexité rend indispensable la création d'une AP associée à un bilan de masse et ce,

en amont de la conception du produit, i.e. dès la fin de l'avant-projet. Ce processus de conception très établi permet de maintenir une cohésion entre les différentes fonctions du produit.

La complexité d'un produit implique une complexité du processus de conception, des procédés et de la gestion de projet.

1.2. Les conditions d'application de la méthode

Les quatre cas d'études cités précédemment (Volvo, Eurocopter, Renault et DCNS) aident à la création d'une synthèse des caractéristiques permettant à un produit complexe et à son processus de conception de soutenir une démarche d'éco-conception basée sur l'ACV, et ce, dès la phase d'avant-projet (*Figure 3-2*). Ressortent ainsi les éléments caractéristiques suivants :

- Un produit complexe, impliquant :
 - Un processus de conception suffisamment long, qui autorise une évaluation environnementale poussée (type ACV) aux moments clé de ce processus, i.e. en fin des phases de conception sanctionnées par des revues de phase, et qui permet de prendre du recul quant aux résultats et aux améliorations envisageables
 - Et principalement, la création et la définition d'une arborescence produit associée à un bilan de masse dès la phase d'avant-projet, notifiant un produit très complexe soumis à de nombreuses contraintes techniques/technologiques
- L'implication de l'ensemble des protagonistes de la conception avec :
 - Au sein de l'équipe de conception, un grand nombre de collaborateurs ayant des fonctions bien précises et codifiées non seulement par des connaissances métiers, mais aussi par le processus de conception lui-même
 - La possibilité de dialoguer avec les fournisseurs, d'instaurer des échanges de données, et de créer un stock de briques de données
 - La présence d'un analyste environnemental, garant de la bonne intégration, de la bonne implication de la démarche environnementale dans le processus de conception.

A noter que la présence de l'analyste est aussi une conséquence de la mise en place d'une telle démarche. Sans volonté d'intégration du paramètre environnemental, l'équipe de conception n'a nullement besoin de faire appel à un analyste environnemental, qu'il soit en interne ou en externe à l'entreprise.

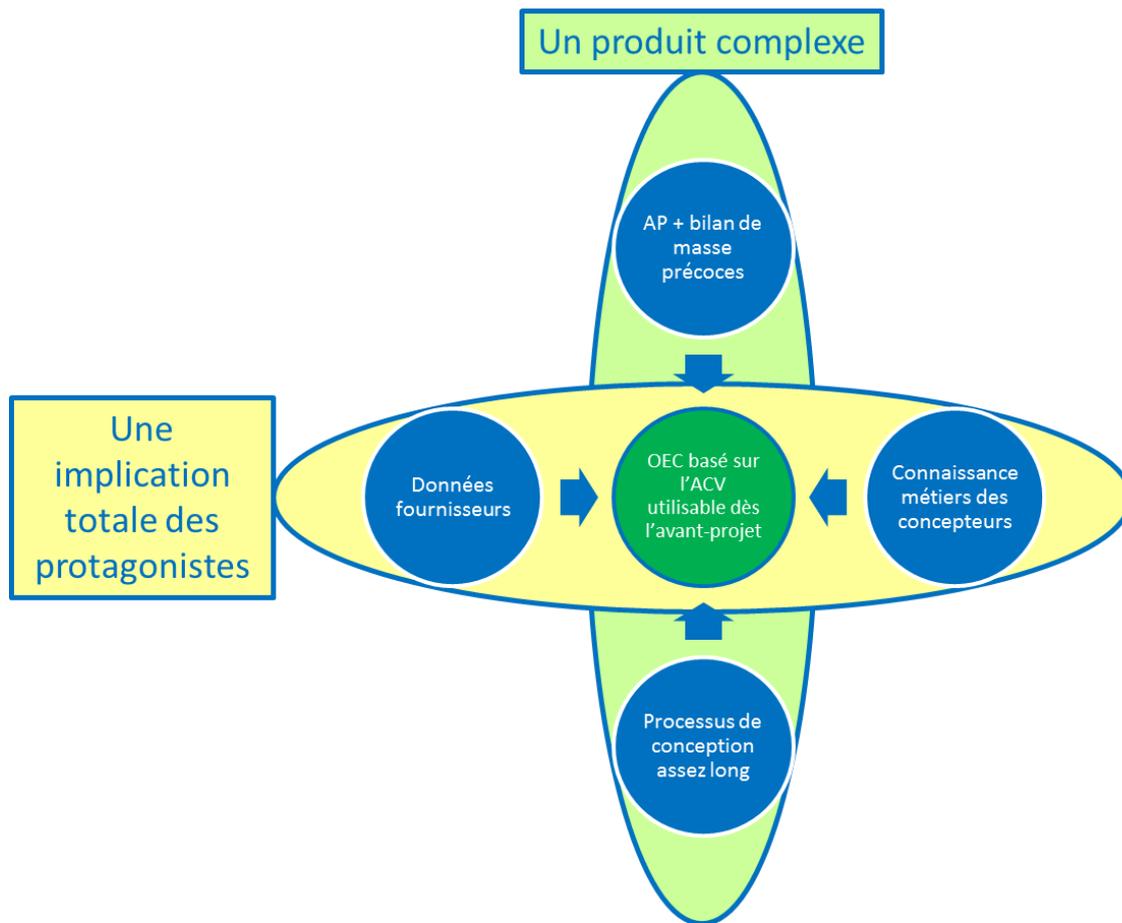


Figure 3-2. Les 4 grandes conditions rendant possible l'utilisation d'un OEC basé sur l'ACV dès l'avant-projet.

Ces quatre grandes conditions seront, dans un premier temps tout du moins, les conditions *sine qua non* de la mise en place d'une démarche éco-conception basée sur l'utilisation d'un outil de type ACV.

1.3. Une démarche collaborative et participative grâce à la création de briques de données

L'OEC basé sur l'ACV doit parvenir à combler les deux grandes lacunes des outils d'ACV classiques, à savoir, l'adaptabilité à un processus de conception très établi ainsi que les problèmes de qualité (concernant plus spécifiquement les BDD). Il faut réussir à répondre aux limites décrites (cf. chapitre 2, 1.5) en intégrant :

- D'une part, les fournisseurs en vue de récupérer les informations concernant les composants afin de créer un stock de données,
- D'autre part, les concepteurs pour créer une synergie collaborative et mettre en pratique les connaissances métiers propres à chacun.

Cela doit permettre de ne plus considérer l'analyste environnemental comme seul apte à se servir d'un OEC, mais bien de mettre en place une démarche collaborative et participative.

Puisque la démarche d'ACV et d'amélioration environnementale d'un produit n'est pas directement applicable pour un processus de conception, le problème a été pris selon un nouvel angle de vue. Comme proposé précédemment et pour répondre à la problématique de la thèse (cf. chapitre 2,1.5 et 1.6), la méthode a été construite à l'envers du schéma classique. Plutôt que de partir d'un produit fini pour définir la contribution de chacun de ses composants aux impacts sur l'environnement, le postulat avancé est le suivant :

Il faut réussir à intégrer le paramètre environnemental au même niveau que des paramètres dits « conventionnels » (le coût, la durée de vie, ...) dans les briques technologiques.

Grâce à cette approche, le produit final contient déjà les données qui seront utilisées dans le cadre d'une ACV (Figure 3-3). Ces briques qui incluent les données technologiques classiques et les données environnementales (nécessaires à la réalisation d'une ACV) sont appelées « briques de données ».

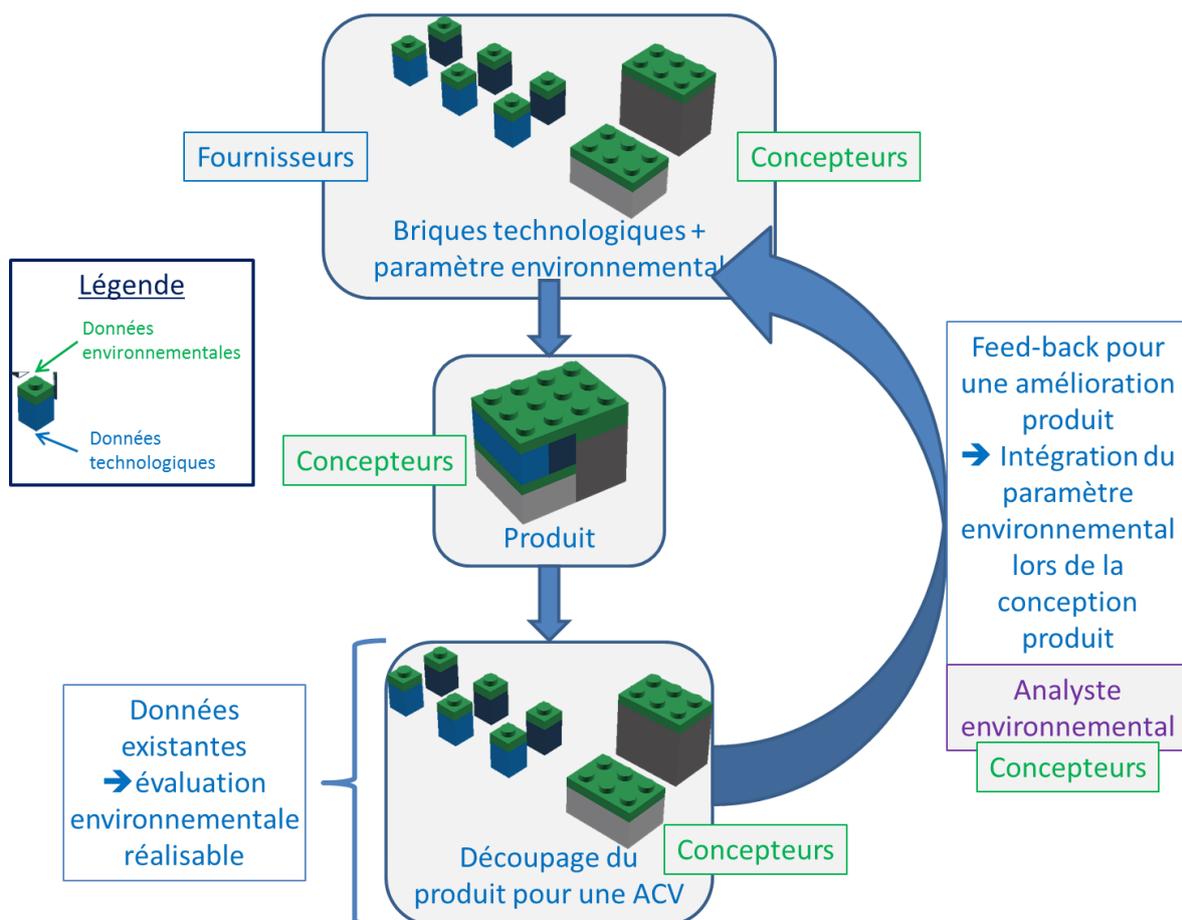


Figure 3-3. Une démarche participative et collaborative pour intégrer le paramètre environnemental au processus de conception.

Faisons une analogie avec le Lego®. Avec la méthode classique, faire l'ACV d'une maison construite en Lego®, revient à dire à quelqu'un n'ayant pas participé à sa construction (l'analyste environnemental) et ne pouvant pas la démonter réellement, de justement modéliser toutes les pièces ayant servi à construire ladite maison (*Figure 3-4*).

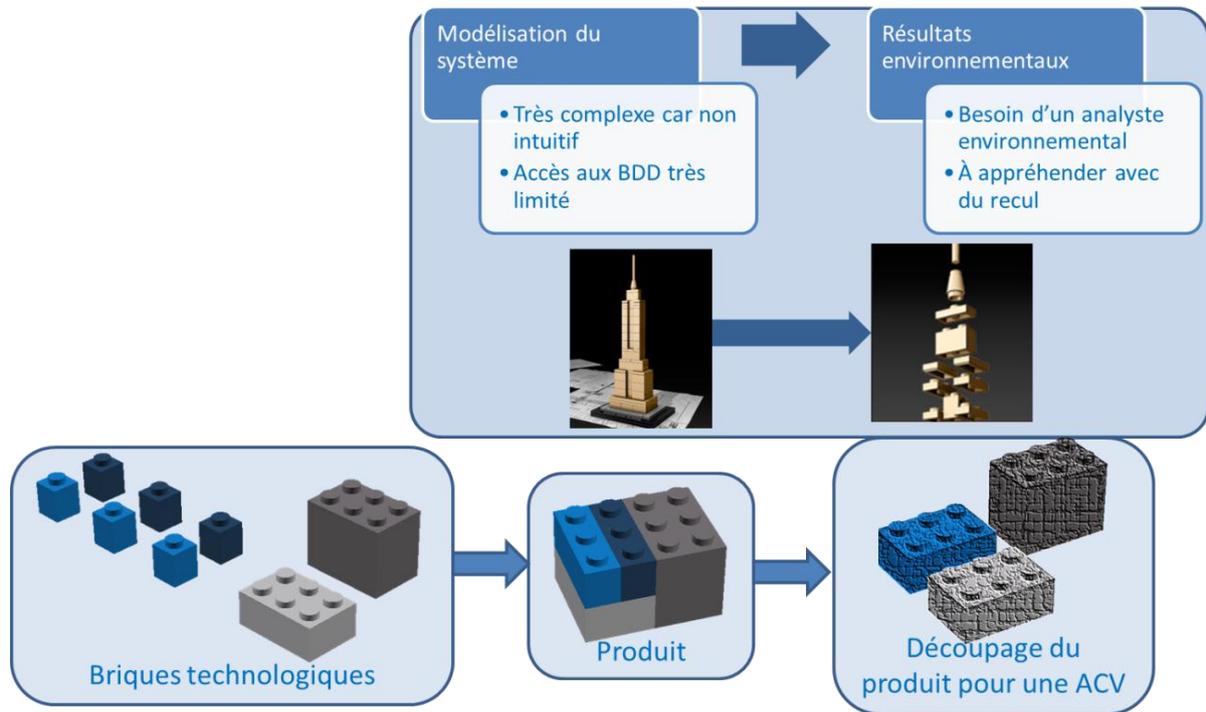


Figure 3-4. L'approche ACV classique : la difficulté de mettre en place une évaluation environnementale pour un produit fini composé de briques technologiques (images LEGO®). Le découpage réalisé pour effectuer une ACV est de faible qualité.

Il est quasiment impossible de réaliser une ACV complète et précise selon cette approche, sauf si toutes les personnes ayant participé à la fabrication de la maison mettent en commun les informations. Puisque la démarche n'est pas opérationnelle dans ce sens-là, l'idée est donc de mettre à contribution les personnes ayant fabriqué les pièces (les fournisseurs) en amont de la démarche, ainsi que les personnes participant à la construction du produit (les concepteurs) (*Figure 3-5*). Cette collaboration participative doit permettre d'initier la création des « *briques de données* ».

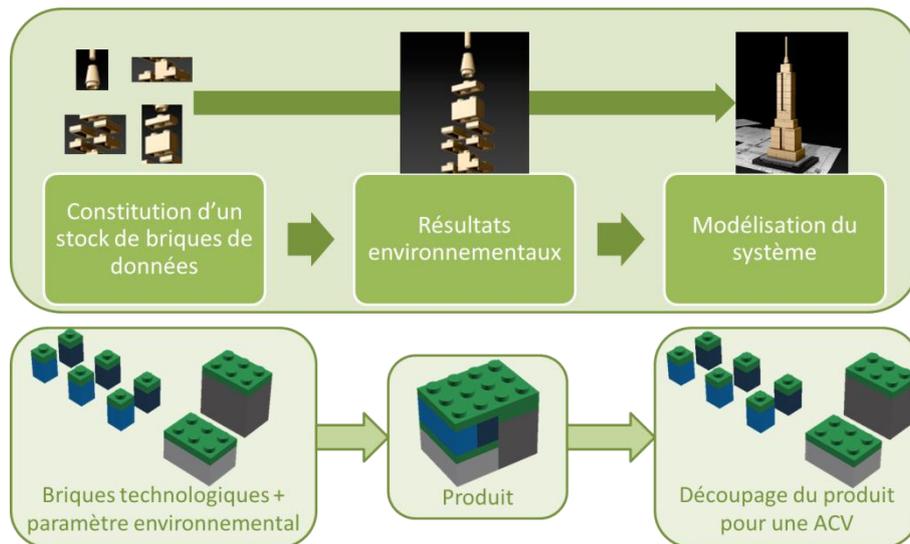


Figure 3-5. La proposition de la méthodologie de travail : le produit n'est assemblé qu'après avoir réuni l'ensemble des composants, des briques nécessaires (images LEGO®).

Ces briques contiennent le même genre d'informations que celles disponibles dans des briques technologiques, auxquelles sont ajoutées des données nécessaires à la réalisation d'ACV.

En instaurant une telle démarche, il est possible de constituer un stock de briques de données. Certaines de ces briques auront une même fonction mais pas forcément une même composition. Par exemple, pour faire un ensemble de trois briques, il pourrait y avoir trois briques simples, ou deux briques simples et une double ... Ces différentes options correspondent à des choix technologiques différents (Figure 3-6). Chacune de ces briques ayant des couleurs, des formes ou des textures différentes, peut correspondre à une cotation environnementale, à un prix, à une technologie alternative

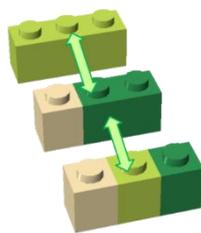


Figure 3-6. Pour une même brique de données, la possibilité de moduler différents composants qui auront la même fonction.

Chacune des options technologiques possibles pour remplir une même fonction correspond à la définition de l'UF de ces briques. Cette UF est variable et paramétrable selon le périmètre de l'étude (cf. chapitre 3, 1.1). Elle est implicitement connue par le bureau d'étude qui choisit les options technologiques envisageables pour répondre à des besoins spécifiques.

Les concepteurs, chacun à leur niveau de spécialité et à l'échelle à laquelle ils travaillent lors de la conception du produit (au niveau « élément » avec « les poutres » ; au niveau « famille d'éléments » avec « la structure associée aux poutres » ; au niveau « sous-système » avec « la coque » ; au niveau système avec « la flottabilité ») viennent consulter les données environnementales sur les briques ou ensemble de briques dont ils ont besoin. Le produit final n'est recomposé qu'à la fin, lorsque l'architecte ou le chef de projet veut avoir une vision globale de son produit (Figure 3-7). Mais l'ensemble reste très modulable, abordable par tous, et utilisable dès les phases de conception précoces (amont et avant-projet).

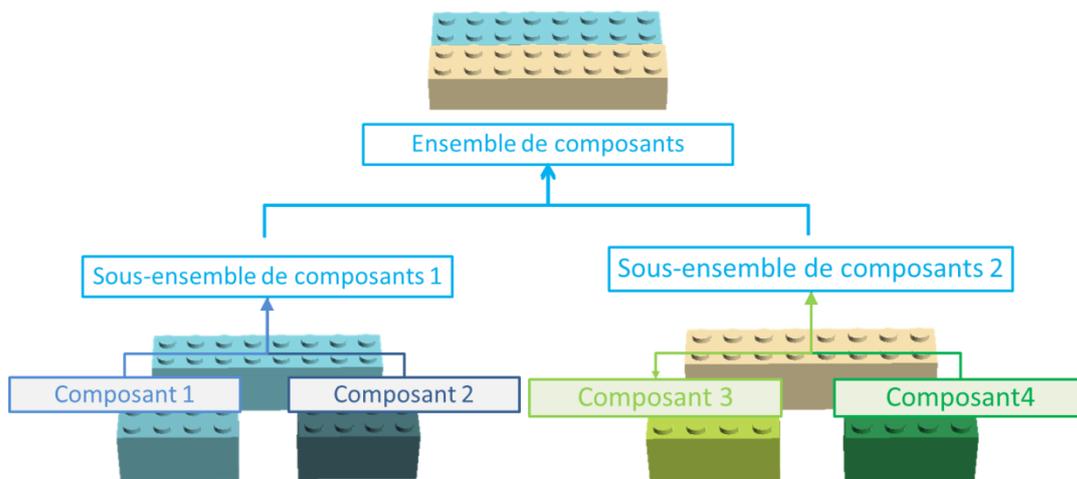


Figure 3-7. L'assemblage de différents composants en un ensemble peut constituer une nouvelle brique de données.

Pour développer une telle démarche collaborative, les deux points clés essentiels à traiter et à prendre en compte sont la gestion des BDD et la création inhérente de briques de données, ainsi que les protagonistes et leur degré d'implication dans l'outil. Ces utilisateurs potentiels ne sont plus nécessairement des experts en environnement, mais bien des concepteurs travaillant en totale collaboration avec les fournisseurs. C'est via ces deux axes-là qu'un OEC basé sur l'ACV et permettant vraiment une aide à la conception peut être développé.

Une idée clé de cette approche est donc d'impliquer les fournisseurs dans la démarche d'ACV. En effet, jusqu'à présent, le dialogue concepteurs / fournisseurs était très limité, comme l'a démontré l'expérience réalisée lors de l'ACV du navire DCNS. Obtenir des informations autres que des données purement techniques ou économiques est très complexe. Et même si les fournisseurs jouent un rôle primordial dans le développement et la production des produits, leur savoir-faire n'est pas suffisamment mis à profit lors de la mise en place d'une démarche d'éco-conception.

Une telle démarche a entre autres été mise en place par le groupe VOLVO (cf. chapitre 2, 2.2.1), qui démontre non seulement qu'il est possible d'inclure les fournisseurs dans le processus de conception, mais aussi que c'est le meilleur moyen de contrôler les composants achetés chez les fournisseurs, ainsi que les substances potentiellement dangereuses pour l'environnement.

Il est assez évident que les fournisseurs risquent d'être réticents à s'engager dans la démarche, sachant qu'ils devront fournir une partie des informations pouvant être considérées comme confidentielles. C'est à ce moment-là que le fabricant devra justifier à un tiers toute la pertinence de la démarche dans laquelle il se sera engagé¹. Démontrer que cette démarche est non seulement bénéfique d'un point de vue de l'environnement, mais aussi, plus pratiquement, d'un point de vue économique. Proposer sur le marché un produit ayant subi une évaluation et une amélioration environnementale est une forte valeur ajoutée face à la concurrence, aussi bien au niveau du produit fini qu'au niveau de ses composants.

Créer des briques de données permet ainsi d'établir le lien durable et stable entre les fournisseurs et les concepteurs. Ces briques en sont l'outil, le support de communication. L'intégration de données environnementales dans ces briques autorise une évaluation environnementale, et ce, dès que ces briques sont créées, i.e. finalement dès que, les briques technologiques sont conçues, soit dès l'amont des projets. Le fait de pouvoir réaliser des évaluations d'impacts et d'en remonter la source favorise grandement les possibilités d'amélioration des produits. Les trois objectifs décrits précédemment (cf. chapitre 2, 1.6) peuvent alors être atteints via l'instauration d'une telle démarche :

- Les échanges entre fournisseurs et concepteurs sont rendus possibles grâce à l'utilisation des briques de données.

- La démarche est applicable à toutes les étapes du processus de conception

- La démarche permet d'évaluer et d'améliorer les impacts environnementaux.

La démarche à instaurer entre tous les protagonistes doit être totalement participative et collaborative (Figure 3-3). Les fournisseurs devront rendre accessibles certaines de leurs données de fabrication. Mais en retour, ils pourront recevoir les résultats environnementaux concernant leur produit. La démarche se veut vertueuse et synergique. Elle doit motiver chaque partie à donner le meilleur possible. Si l'un des acteurs ne s'implique pas, c'est toute la démarche qui peut être remise en question.

¹ Eventuellement, il pourrait être envisageable que le fournisseur, s'il dispose des outils d'évaluation adéquats, ne donne que le profil environnemental de ses composants, sans décrire précisément les matériaux ou procédés utilisés.

2. LA CREATION DE L'OUTIL D'ECO-CONCEPTION BASE SUR L'ACV

Pour développer un outil d'éco-conception basé sur l'ACV qui permette à la fois d'évaluer les impacts d'un produit sur l'environnement mais aussi d'en améliorer la conception, il faut travailler sur les aspects décrits comme étant indispensables pour intégrer le paramètre environnemental dans un processus de conception. Il faut donc développer :

- Un modèle de brique de données qui soit utilisable d'une part par les fournisseurs dans une version « épurée » (ils ne doivent pas avoir accès à l'ensemble de données, pour des questions de confidentialités qui seraient alors rédhibitoires), et d'autre part par les concepteurs dans une version complète.
- Un outil qui permette de réutiliser des produits (ou des composants) déjà modélisés. Les connaissances créées ne doivent pas se perdre. L'outil doit centraliser et capitaliser les données. Cette démarche est particulièrement importante dans le cadre d'une évaluation environnementale de produits sur le long terme.
- Une méthode permettant de guider le concepteur à la fois pour l'aide à la conception mais aussi pour l'amélioration de son produit,
- Un outil qui se base sur l'ACV mais qui soit plus ergonomique, plus interactif et plus intuitif.

2.1. Les informations qui doivent être contenues dans une brique de données

2.1.1 *Le type de données*

De même que dans l'étude de GEHIN (GEHIN, et al., 2009b), les phases de vie classiques du produit ont été redéfinies. Chaque grande phase de vie a été dissociée en sous-phases de vie :

- La phase de fabrication est composée par : la fabrication du composant, l'assemblage de ces composants sur le produit final, et le transport qui relie ces deux étapes.
- La phase d'utilisation se découpe en : phase de maintenance et phase de vie du produit (intégrant les consommations et les rejets directement associés).
- La phase de fin de vie est découpée de façon symétrique à la phase de fabrication avec : la phase de démantèlement, la phase de traitements spécifiques (en filières) et le transport reliant ces deux étapes.

GEHIN (GEHIN, et al., 2009b) propose une méthode basée sur le concept de briques de cycle de vie car la problématique de son produit est très axée fin de vie (GEHIN, et al., 2008a). Son but est d'aider les concepteurs à construire rapidement des scénarii de cycle de vie du produit qui peuvent être évalués du point de vue environnement. Dans cette thèse, les briques intègrent la notion de cycle de vie, via un découpage des données par phases (et sous-phases) de vie, mais ce n'est pas leur fonction principale. En effet, les problématiques des concepteurs sont l'évaluation environnementale de leurs produits et l'aide à la conception et à l'amélioration des produits, justement en fonction des résultats environnementaux.

Dans cette thèse, la démarche proposée se base sur la notion de *brique de données*. Une brique de données contient différentes informations qui doivent servir lors de l'ACV (*Figure 3-8*). Ces informations sont virtuellement découpées, organisées et stockées selon les 3 grandes phases de vie d'un produit, à savoir, les phases de fabrication, utilisation et FdV.

Pour la phase de fabrication, les informations à collecter seront :

- les matériaux constitutifs
- les procédés mis en œuvre pour fabriquer les composants du produit, et pour les assembler
- les consommations nécessaires à cette fabrication : en énergie (électrique, fossile, ou même éolienne ou solaire), en fluides (eau, huiles, ...) et en gaz
- les rejets associés à ces consommations : en énergie, en fluides et en gaz
- le transport associé à cette fabrication, avec typiquement le transport entre fournisseurs et fabricant.

Pour la phase d'utilisation, ces informations seront :

- si un composant est renouvelé au cours de la vie du produit, il est possible de remplir des procédés de maintenance associés (enlèvement de pièces par exemple)
- les consommations en énergie, en fluides et en gaz
- les rejets en énergie, en fluides et en gaz

Pour la phase de FdV, les informations à recueillir ont une structure symétrique à celle de la phase de fabrication :

- les procédés de démantèlement du produit, avec les consommations et rejets associés
- les procédés de traitement spécifiques, avec les consommations et rejets associés. Ces procédés sont essentiellement ceux liés aux filières dites de fin de vie, qui sont spécifiques aux produits entrants dans ces filières (ex. : filières VHU pour les « Véhicules Hors d'Usage »). Ces procédés peuvent être associés à des données du type taux de valorisation matière par le recyclage.
- le transport nécessaire entre le lieu de démantèlement et de traitement.

A ces 3 grands groupes de données viennent se greffer des données générales sur le produit. Ce dernier groupe permet de visualiser le nom du produit, sa masse, savoir s'il subit une maintenance, un renouvellement lors de son utilisation, ou encore sa durée de vie. Il permet aussi de renseigner la localisation de l'élément au sein du produit final par un code type coordonnées (x, y, z) par exemple. Une représentation 3D des résultats permet de visualiser très clairement et très rapidement les informations associées à cet espace. Un espace est aussi réservé pour que le concepteur, lorsqu'il voudra faire une comparaison, puisse renseigner l'unité fonctionnelle (UF). Pour chaque brique de données, le concepteur, grâce à sa connaissance métier (acquise, ou répertoriée dans des guides métiers), peut renseigner l'UF de sa brique comme sa durée de vie ou sa puissance, i.e., toutes les caractéristiques qui permettent au concepteur de choisir cette pièce plutôt qu'une autre. De plus, à chaque fois qu'une brique sera comparée à une autre, le résultat de la comparaison environnementale sera affiché (en une aide à la conception).

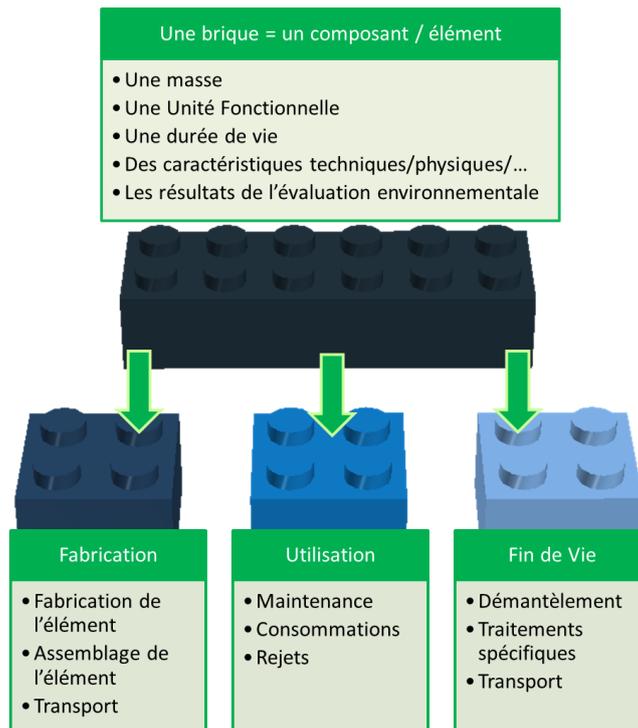


Figure 3-8. Les informations contenues par une brique de données : chaque phase de vie d'un produit se redécoupe en sous-phases, plus adaptées à la représentation « réelle ». Les informations contenues seront utilisables pour réaliser une analyse de cycle de vie soit de ce composant, soit du produit final dans lequel il s'insèrera.

Toutes les informations recueillies correspondent aux données habituellement collectées lors d'un inventaire de cycle de vie, en vue d'une analyse de ce cycle de vie. Cette ACV pourra être réalisée pour un composant, aussi bien que pour le produit fini.

2.1.2 Des informations saisies différentes en fonction des protagonistes

Comme cela a été brièvement abordé précédemment, ce n'est pas une seule et même personne qui est en charge de saisir les données. La récolte des données et leur saisie doit être participative. Chaque protagoniste a une série d'informations spécifiques à entrer dans l'OEC (Tableau 3-1).

Les informations ne concernant que la fabrication d'un composant sont typiquement renseignées par le fournisseur. A ces informations, viennent s'ajouter celles concernant l'assemblage de ce composant par les responsables d'études. Pour les données concernant la fin de vie, elles sont plutôt définies au niveau macro, pour l'ensemble du produit, donc par l'architecte et / ou l'analyste environnemental. Seuls l'analyste est habilité à intervenir à tous les niveaux.

Tableau 3-1. L'origine des renseignements entrés dans l'OEC. Exemple d'application pour les navires.

Protagonistes		Clients	Architecte	Reponsables d'études (systémiers et technologues)	Fournisseur	Analyste
Echelle d'action		Ensemble du navires		Systèmes/sous-systèmes/éléments	Eléments	Tous les niveaux
Phase de fabrication	Fabrication de l'élément				X	X
	Assemblage de l'élément			X		X
	Transport fournisseurs/chantier de fabrication		X		X	X
Phase d'utilisation	Maintenance		X	X		X
	Consommations			X		X
	Rejets			X		X
Phase de fin de vie	Démantèlement	X	X			X
	Traitement spécifique		X	X		X
	Transport chantier de démantèlement/sites de retraitement		X	X		X

Grâce à la participation de chacun des acteurs de la conception, l'ensemble des données pourra être collecté. C'est une des conditions *sine qua none* de la bonne intégration du paramètre environnemental dans le processus de conception et ainsi, du bon fonctionnement de l'outil. Cette intégration doit permettre la mise en place d'une synergie collaborative entre les protagonistes.

Le fait de déléguer, de répartir les tâches implique chaque participant dans la démarche, et de ce fait, sensibilise les personnes à la question de la prise en compte de l'environnement, et ce, quelles que soient les échelles de prises de décision. De plus, cette répartition sera un vrai gain de temps en termes de récolte des données. En effet, classiquement, l'inventaire de cycle de vie est une phase très chronophage. Ici, par cette approche collaborative et participative, cette phase ne sera plus aussi contraignante, grâce à la mise en commun du savoir de chacun.

2.2. La création et l'intégration du paramètre environnemental dans la démarche de conception : deux étapes nécessaires

Le paramètre environnemental doit être intégré en deux étapes. En effet, sachant qu'il n'est actuellement pas intégré dans le processus de conception ni dans la prise de décision, il faut mettre en place une démarche qui permette tout d'abord d'intégrer ce paramètre aux données existantes, puis de le rendre utilisable lors de la conception et de l'amélioration des produits. L'entreprise de

cette démarche est totalement innovante. Il n'existe de pas de méthode permettant l'intégration de ce nouveau paramètre dans les outils d'aide à la décision. Il a donc fallu créer une méthode adaptée pour dans un premier temps créer ce paramètre environnemental, puis trouver le moyen de l'intégrer en conception et enfin de le rendre opérationnel.

2.2.1 La création du paramètre environnemental

La première étape d'intégration du paramètre environnemental consiste en la création de la brique de données qui doit contenir à la fois les données technologiques ainsi que les données nécessaires à la réalisation d'une ACV. Il faut que cette brique modélisée soit testée et évaluée via l'OEC basé sur l'ACV pour être complètement intégrée dans un stock de briques de données. Les résultats environnementaux n'étant « pertinents » que d'un point de vue relatif, pour les afficher, il faut que cette brique ait été comparée au moins à une autre brique.

La démarche d'intégration du paramètre environnemental dans les données concepteurs se déroule selon trois étapes clés (Figure 3-9) :

- La définition d'une UF pour un ensemble de briques de données à comparer
- Une cotation environnementale pour et entre chacune de ces briques
- L'intégration des différentes briques dans le stock de briques de données en vue d'une intégration dans l'AP.

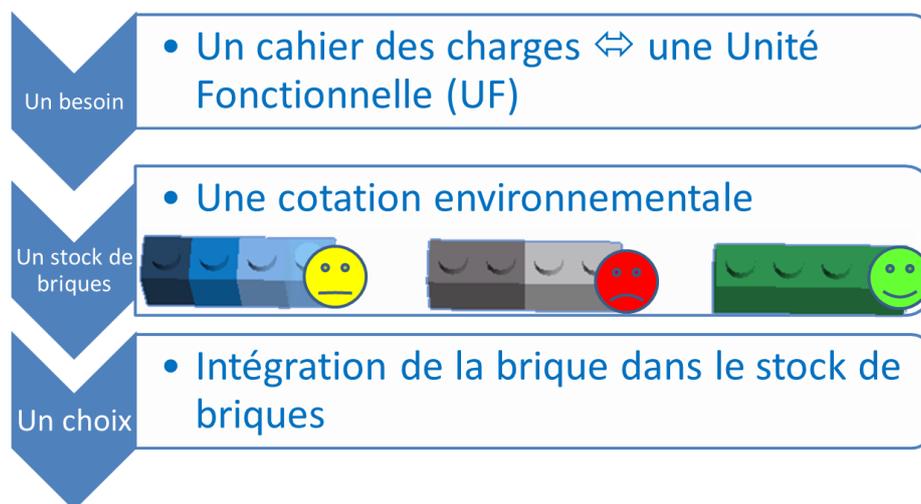


Figure 3-9. Les étapes suivies par un concepteur pour intégrer le paramètre environnemental dans sa démarche de conception.

La notion et la définition de l'UF est particulièrement importante. Une UF est une unité permettant de quantifier une fonction remplie par un produit, un bien, un service. L'exemple souvent utilisé pour illustrer cette définition pour de la peinture est : « la quantité de peinture nécessaire

pour couvrir un mètre carré de mur avec un degré d'opacité défini et pour une durée de 10 ans ». Mais c'est finalement assez peu fréquent de pouvoir définir une UF aussi facilement et aussi clairement. La notion d'échelle de l'étude est capitale pour définir une UF. A une échelle micro, un composant peut « facilement » être décrit par une UF ; il va rendre un service pendant X temps. Mais dès qu'il s'agit de composer des ensembles d'éléments, l'UF devient vite un vrai problème. Au niveau macro, l'UF est souvent délicate à mettre en place. Par exemple, pour un avion, plusieurs options sont possibles :

- Définir l'UF en fonction du nombre « utile » de personnes à bord pour le bon fonctionnement de l'avion, sachant qu'une personne a des besoins spécifiques (vivres, espace,...) et qu'une personne peut être remplacée par un « équivalent » électronique (des automates, des ordinateurs,...).
- Définir l'UF en fonction de la zone de vol privilégiée : un avion long-courrier ou un moyen-courrier ne seront pas dimensionnés de la même façon, car n'ayant pas les mêmes besoins en autonomie d'énergie par exemple
- Définir l'UF en fonction du temps passé par modes opérationnels : temps passé sur le tarmac, en décollage, en vol, ou en atterrissage
- ...

Toutes ces définitions sont autant de choix pour autant d'UF possibles permettant de comparer deux avions entre eux. Cette décision appartient à l'utilisateur en fonction de ce qu'il veut étudier. Une UF est d'autant plus difficile à poser que le produit est complexe (cf. [chapitre 3, 1.1](#)).

Il faut cependant noter que la notion d'UF est souvent connue de façon implicite par le concepteur. Quand il souhaite comparer deux technologies, il sait qu'il peut les comparer parce que, par exemple, elles vont fournir une même puissance électrique. L'UF est aujourd'hui une vraie connaissance métier, mais elle n'est que très rarement référencée en tant que telle. Le fait d'intégrer les concepteurs dans la démarche doit justement faciliter ce travail de synthèse des connaissances, pour créer un stock de briques de données dans lequel les éléments seront virtuellement regroupés entre eux, grâce une définition d'UF donnée par le concepteur.

A chaque comparaison de produits, il faudra que l'utilisateur renseigne l'UF utilisée. Ceci servira de référence lors de la réutilisation de l'un ou de l'autre des deux produits (en affichant le résultat environnemental de la comparaison).

Le problème majeur est le passage de l'UF d'une brique (elle rend un service précis) à celui de l'UF d'un ensemble de briques (chaque brique rendant un service). La solution proposée pour aider l'utilisateur est de pouvoir renseigner l'UF textuellement. Cela doit permettre de garder une « trace » justifiant la comparaison entre deux options technologiques, mais aussi d'impliquer les concepteurs dans la démarche. Les paramètres servant à la définition d'un UF sont les suivants :

- La durée de vie de l'élément et sa durée d'utilisation (ex : une pompe qui fonctionne 12h/24, 7j/7 pendant 20 ans)
- Le nombre d'éléments nécessaires pour remplir une fonction souhaitée (ex : deux pompes nécessaires pour fournir un débit Q)
- La fonctionnalité principale de l'élément, son service rendu (ex : fournir un débit Q, une pression P)

- La consommation énergétique de l'élément (ex : 50kW/h). Cette donnée est une fonction contrainte par la fonction principale. Elle n'est donc pas une variable de l'UF.

Tous ces paramètres sont susceptibles d'être choisis comme variable(s) pour comparer deux options technologiques. La sélection même de ces options technologiques ne dépend que de la connaissance métier de l'utilisateur. L'outil n'est pas destiné à faire de l'optimisation mais bien de la comparaison de technologies. L'utilisateur peut donc choisir de comparer :

- Des briques élémentaires : deux pompes A et B devant fournir un débit Q pendant 20 ans. Pour se faire, la pompe A ayant une durée de vie de 10 ans, il en faudra 2 pour remplir la fonction, alors qu'une pompe B durant 20 ans sera suffisante.
- Des ensembles de briques : un système hydraulique et un système électrique devant fournir une pression P pendant 20 ans. Le système hydraulique fournira la pression P, pour 5 ans de vie et le système électrique pour une durée de vie de 10 ans, fournira une pression P/3.

Pour mettre les éléments à la même UF, il faut donc attribuer des coefficients à la durée de vie et/ou au nombre d'éléments nécessaires à chaque élément.

Ainsi, pour créer le paramètre environnemental, il faut qu'un dialogue s'établisse entre fournisseurs et concepteurs. Le support de ce dialogue est la brique de donnée. Les informations renseignées en collaboration permettent d'évaluer ces briques d'un point de vue impact environnemental, et donc de créer une donnée « paramètre environnemental ».

2.2.2 La cotation du paramètre environnemental

Pour justement afficher ce résultat environnemental issu de la comparaison de produit, il faut pouvoir classer ces briques en fonction de leurs impacts sur l'environnement.

Une méthode a été développée pour répondre au besoin de cette cotation. Sachant que l'outil doit pouvoir se coupler à un indicateur spécifique au produit (dans notre cas d'étude, un indicateur spécifique à l'environnement marin (PRINCAUD, et al., 2010)) (cf. chapitre 4), il a été décidé que les impacts calculés par l'outil ne seraient pas normalisés, mais seulement caractérisés. Chaque catégorie d'impact ayant sa propre unité (par exemple, le kg eq. CO2 pour le changement climatique², le kg eq. NO2 pour l'acidification), les valeurs d'impact seront toutes affichées à 100% (Figure 3-10). Pour obtenir des résultats normalisés, il est toutefois possible d'exporter les résultats via un fichier Excel, et d'appliquer les coefficients de normalisation des impacts sur chaque catégorie correspondante, selon la même méthode de calcul d'impact que celle utilisée dans l'OEC (par exemple, EI 99, CML 2001, ou encore Impact 2002+).

² Ou GWP (= Global Warming Potentiel)

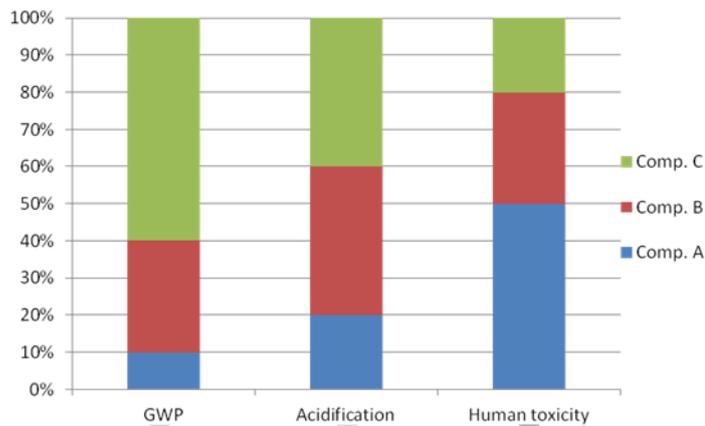


Figure 3-10. Un affichage des impacts à 100% : tous les impacts sont caractérisés, et non normalisés. (« Comp. A » = « composant A »)

Un affichage à 100% pour chaque catégorie d'impact implique que ces catégories ne sont pas comparables. A partir de ces résultats, l'utilisateur doit quand même être guidé, par exemple, vers l'élément contributif le plus impactant. Ce guidage s'effectue selon la méthode décrite dans le schéma suivant (Figure 3-11).

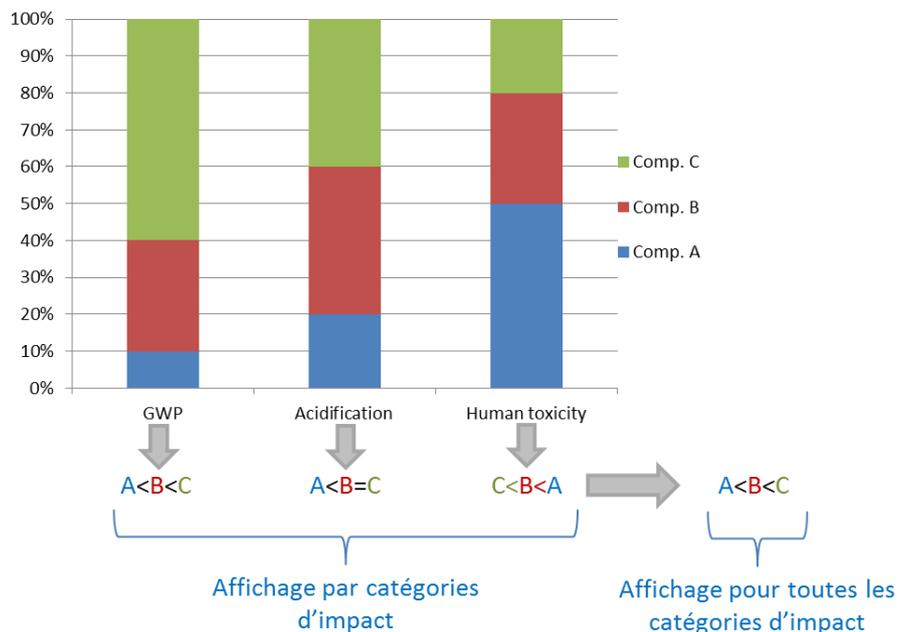


Figure 3-11. La méthodologie permettant de guider l'utilisateur vers les éléments à améliorer du point de vue impact environnemental. Il peut choisir de ne travailler que sur une catégorie d'impact, ou sur l'ensemble de catégories d'impacts. La classification des impacts ne tient pas compte de la valeur « réelle » de l'impact. Cela permet de hiérarchiser les impacts qualitativement (et non pas quantitativement, ce qui n'est possible que lorsque les catégories d'impact sont normalisées).

Cette classification des éléments contributifs aux impacts fonctionne en deux étapes :

- Dans un premier temps, les éléments contributifs sont classés par ordre croissant de contribution pour une catégorie d'impact. Ce travail est réalisé pour chacune des catégories d'impact, et il est possible de n'étudier qu'une seule de ces catégories.
- Dans un second temps, le classement s'effectue sur l'ensemble des catégories d'impact, selon la logique suivante :
 - Soit trois éléments A, B et C qui contribuent à l'ensemble des catégories d'impact : pour le GWP : $A < B < C$, pour l'acidification $A < B = C$ et pour la toxicité humaine : $C < B < A$
 - Soit 1 le rang définissant l'élément le moins contributeur, et 3 le plus contributeur
 - Au rang 1, les éléments apparaissent avec une fréquence de 2/3 pour A, 1/3 pour C. C'est donc l'élément A qui est le moins contributeur (de rang 1)
 - Au rang 2, les éléments apparaissent avec une fréquence de 3/3 pour B et 1/3 pour C. C'est donc l'élément B qui est le contributeur de rang 2
 - Au rang 3, les éléments apparaissent avec une fréquence de 2/3 pour C et 1/3 pour A. C'est donc l'élément C qui est le plus contributeur (de rang 3)

Les contributeurs sont ainsi classés selon un ordre croissant de contribution globale aux impacts ($A < B < C$ pour l'exemple donné).

Cette méthode permet d'afficher un classement non quantitatif (en terme de valeur d'impact) mais qualitatif des éléments contribuant soit à une catégorie d'impact, soit à l'ensemble des catégories d'impacts. Cela permet de mettre en évidence les éléments qui doivent être étudiés de façon « prioritaire », et auxquels des alternatives technologiques doivent être proposées et testées. Cette technique est applicable à toutes les échelles d'études, que cela soit pour mettre en évidence les phases (ou sous-phases) de vie les plus impactantes, ou que cela soit pour identifier un composant, ou tout autre élément de l'AP, quel que soit le niveau observé. De même, cette technique peut s'appliquer pour faire des comparaisons (entre différentes options technologiques par exemple).

L'utilisateur peut alors comparer deux technologies pouvant répondre à ses besoins ; il les traduit ainsi en caractéristiques techniques, mécaniques, ... définissant ainsi l'unité fonctionnelle correspondante. Il peut ensuite faire un test entre les technologies possibles. Les résultats sont finalement archivés selon le modèle de brique de données.

2.2.3 *L'intégration du paramètre environnemental : initiation de la boucle synergique et collaborative*

Le rôle des fournisseurs et des concepteurs ainsi que la méthode pour créer des briques de données contenant le paramètre environnemental ayant été décrits, il est maintenant possible de s'intéresser à l'initiation de la démarche d'intégration du paramètre environnemental.

Il faut donc dans un premier temps, initier la démarche, et pour cela, constituer le stock de briques de données qui sera nécessaire pour réellement éco-concevoir un produit, i.e. l'évaluer et l'améliorer du point de vue environnement.

Les étapes d'initiation de la démarche sont les suivantes (*Figure 3-12*) :

- Lors de l'avant-projet, en parallèle de la définition du cahier des charges du produit entre le client et le producteur, un échange de données se met en place entre le producteur et les fournisseurs. Le producteur incite ses fournisseurs à entrer dans la démarche, et ainsi à créer les premières bases des briques de données « élémentaires », i.e. qui correspondent à des composants que le constructeur devra utiliser pour fabriquer son produit (composé des briques assemblées).
- Lors de la phase de développement, cette interaction fournisseurs / producteur continue. Lorsque les concepteurs reçoivent les « ébauches » de briques de données récupérées des fournisseurs, ils peuvent en compléter les données pour finaliser la brique de données. Plus le projet avance, plus les données sont précises.
- Enfin, lors de la phase d'industrialisation, lorsque les briques sont entièrement complétées, elles sont évaluables par l'OEC basé sur l'ACV. D'une part, ces résultats peuvent être retournés aux fournisseurs pour établir un vrai lien à double sens entre les fournisseurs et le producteur. D'autre part, et principalement, ces résultats seront étudiés pour mettre en évidence les éléments devant subir une amélioration. Ces éléments peuvent être une des phases de vie du produit (typiquement, la phase d'utilisation lorsque le produit a une très longue durée de vie), ou encore un système complet (par exemple, le système propulsif), ou un composant de produit (le moteur, pour suivre l'exemple).
- Lorsque les contributeurs aux impacts sont ciblés pour une amélioration, ils peuvent être comparés à des éléments étant des options technologiques de même UF. Les résultats obtenus permettent de mettre en avant lequel des éléments comparé est le « moins impactant », et éventuellement, de le marquer comme tel s'il est accepté comme solution technologique de remplacement. C'est à ce moment-là que la connaissance métier des concepteurs est très importante. En procédant de la sorte, le stock de briques de données s'enrichit de solutions technologiques « testées et approuvées ».
- Lors de la phase amont de l'étude, ce sont surtout d'éventuelles technologies et leur concept qui sont développés, toujours dans une optique d'amélioration des performances, qui peuvent aussi bien être techniques qu'environnementales. Cette démarche d'amélioration continue en parallèle de l'avancement des projets, dans les équipes de R&D. Cela crée un axe constant et durable qui permet de faire des retours en conceptions quel que soit l'avancement du projet.

De ce fait, tout élément modélisé et évalué est enregistré dans une BDD. Si cet élément est comparé à des solutions possibles, chacune de ces solutions étant modélisées, l'ensemble de ces solutions est stocké dans la BDD. Ces solutions comparées sont aussi référencées les unes par rapport aux autres du point de vue impact environnemental.

Ces étapes sont nécessaires à la création du stock de briques de données. Ce n'est qu'en effectuant toutes les étapes de cette démarche que l'OEC sera viable et utilisable à bon escient. Sans elles, il n'y a pas de stock de briques de données, et donc, pas de possibilités d'utiliser réellement l'OEC dès l'avant-projet ainsi qu'en R&D.

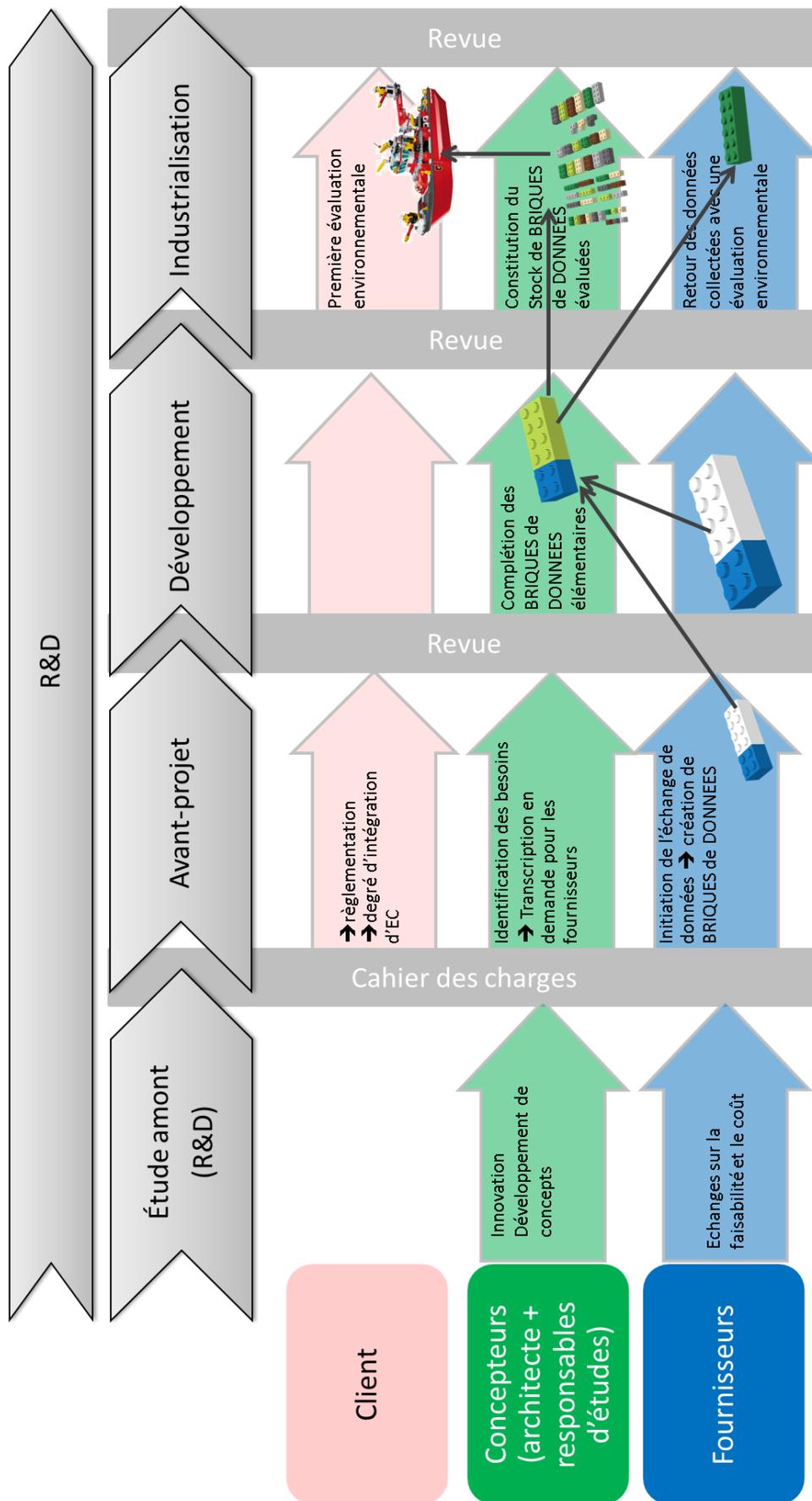


Figure 3-12. Initiation de la démarche d'intégration du paramètre environnemental.

2.2.4 Utilisation du paramètre environnemental dans le processus de conception : Fonctionnement de la boucle synergique établie

Une fois que les étapes précédemment décrites ont été mises en place, l'OEC est réellement utilisable, et ce, à toutes les phases de conception du produit. En effet, grâce à la collecte des briques de données et au fait qu'elles aient été testées, il est enfin possible de les utiliser pour améliorer le produit. Effectivement, toutes les briques modélisées, testées et éventuellement comparées sont stockées dans une BBD. Dès que le concepteur veut choisir un de ces éléments-là, un double affichage (*Figure 3-13*) lui permet :

- d'une part de gagner du temps, si l'élément qu'il veut compléter existe déjà, il a juste à le copier et l'insérer dans son produit
- d'autre part, de visualiser les cotations environnementales des briques comparées entre elles.

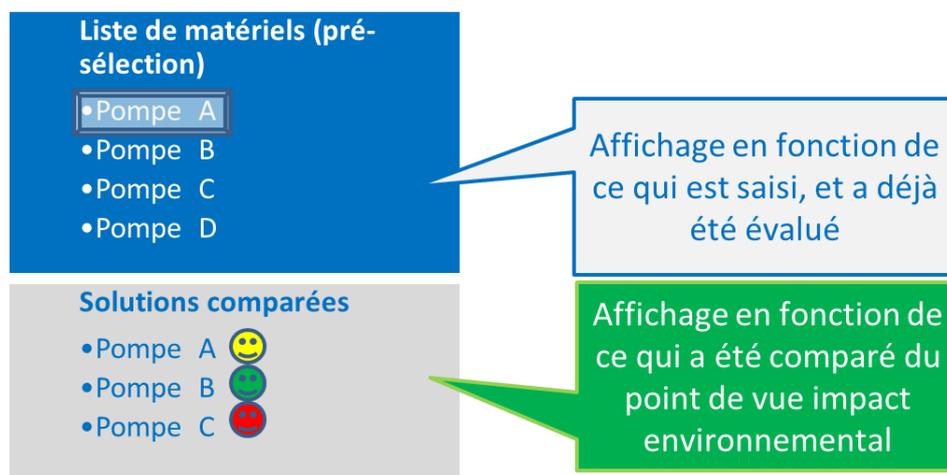


Figure 3-13. Un double affichage pour aider le concepteur dans le choix de ses matériaux/éléments : une liste d'éléments déjà modélisés, et une liste d'éléments déjà comparés

Lors de la phase d'avant-projet, il devient possible au concepteur de récupérer des ensembles de briques de données (*Figure 3-14*). Ces ensembles de briques correspondent à des sous-ensembles (voire à des ensembles dans leur totalité) de modules déjà évalués lors de projets précédents. Ils peuvent avoir été évalués, voire même améliorés. C'est là que se situe un des avantages majeurs de cet outil : il permet de capitaliser les projets précédents pour pouvoir sélectionner et réutiliser des modules déjà évalués, et ce, dès la phase d'avant-projet. Il devient alors possible de réaliser des ACV complètes à toutes les phases de conception d'un produit. En effet, le fait de mettre à disposition des briques de données, déjà constituées via l'interface de l'outil, permet aux concepteurs de les sélectionner lors de l'avant-projet, phase pendant laquelle ces concepteurs récupèrent traditionnellement des briques technologiques connues et appréciées pour répondre à un ensemble de critères définis par un cahier des charges classique.

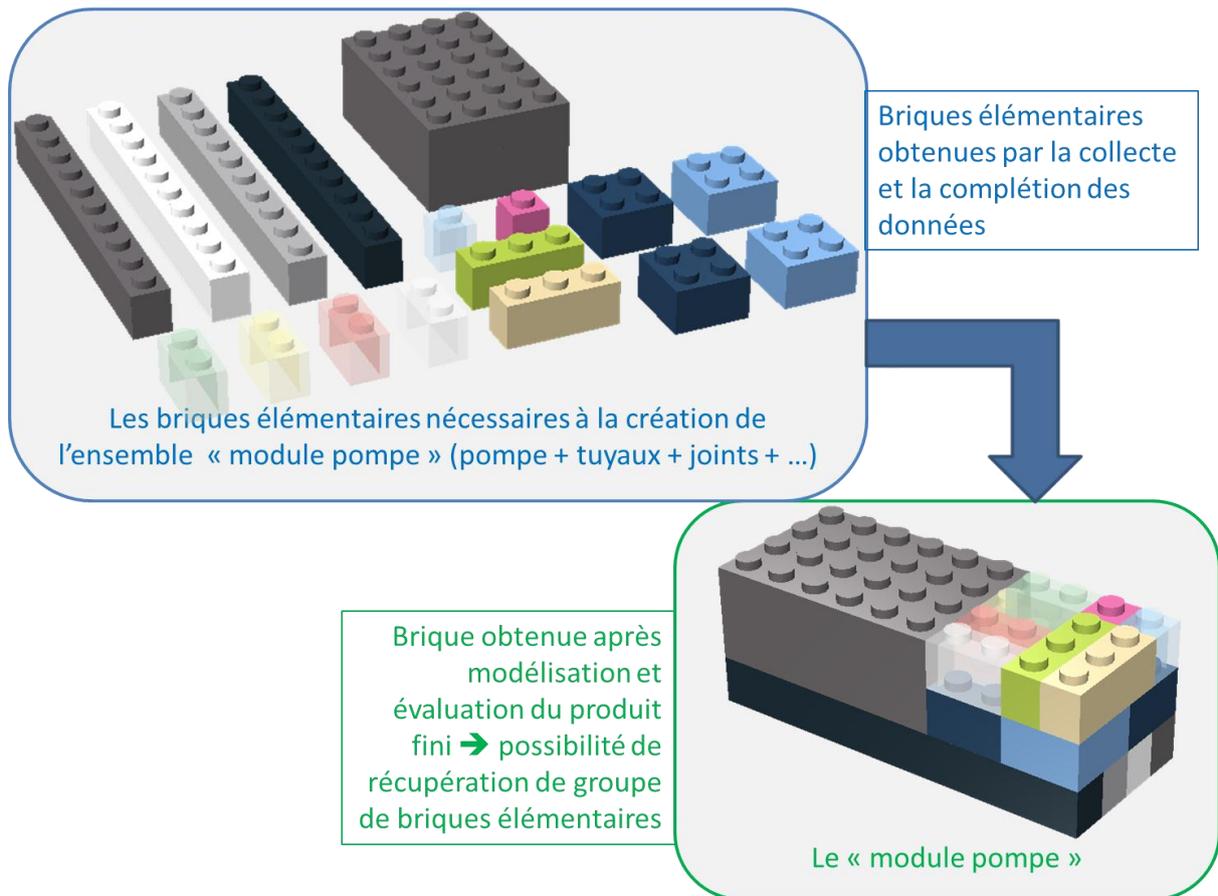


Figure 3-14. Des ensembles de briques de données. Constitués de briques élémentaires, ils symbolisent des groupes d'éléments comme par exemple, une pompe et tout son système de tuyauterie.

Quand le paramètre environnemental est intégré au processus de conception, la complétion des données fournisseurs se poursuit grâce à l'implication des concepteurs. Cela enrichit le stock des briques de données, et permet d'établir et de maintenir une « boucle vertueuse » par une démarche collaborative et participative entre tous les protagonistes et à toutes les étapes du processus de conception du produit (Figure 3-15).

Tout au long du processus de conception, un échange peut et doit s'instaurer entre les fournisseurs et les concepteurs. Cette interaction dont le support est la brique de données, doit permettre l'amélioration continue et constante des technologies créées (en phase amont), industrialisées (par les fournisseurs) et choisies (par les concepteurs). Le dialogue n'est pas compartimenté entre chacune des phases de conception. Il doit s'établir entre concepteurs et fournisseurs en inter- aussi bien qu'en intra-phases.

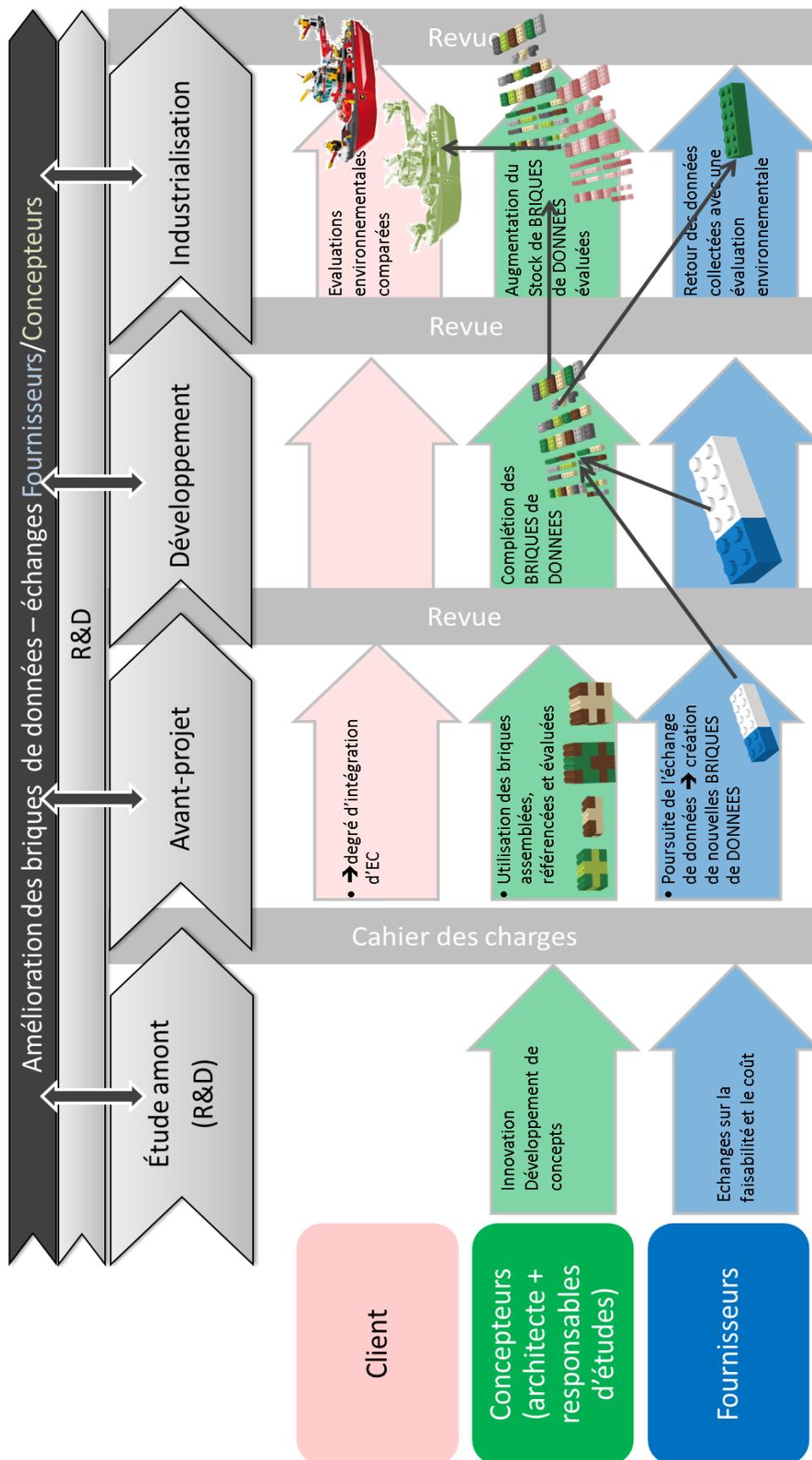


Figure 3-15. L'utilisation du paramètre environnemental dans le processus de conception : une aide à la conception et à l'amélioration du produit.

3. STRUCTURATION GENERALE DE L'OUTIL D'ECO-CONCEPTION BASE SUR L'ACV – UNE VISION DEVELOPPEMENT INFORMATIQUE DE L'OUTIL

A partir des informations présentées jusque-là, il est possible de définir la structure même de cet OEC basé sur l'ACV, ainsi que la logique de son fonctionnement.

3.1. La logique de fonctionnement de l'outil

Les fournisseurs impliqués dans la démarche renseignent les informations relatives à leurs composants, et ce faisant, donnent la possibilité de suivre la présence potentielle de substances dangereuses. La récupération et la complétion des briques de données par les concepteurs permettent de constituer un stock de briques. Pour créer la donnée environnementale, ces briques doivent être évaluées et éventuellement comparées, lors d'un test entre deux options technologiques possibles (ou plus) pour permettre un archivage de ces informations. Une fois que les briques ont été testées, l'utilisateur est guidé pour améliorer son produit du mieux possible. En ce qui concerne l'aide à la conception, les informations permettant une aide à la prise de décision sont donc affichées pendant la conception même du produit, que le projet soit en phase précoce ou avancée.

Sur un schéma général, la logique de la démarche peut se résumer comme il suit (Figure 3-16).

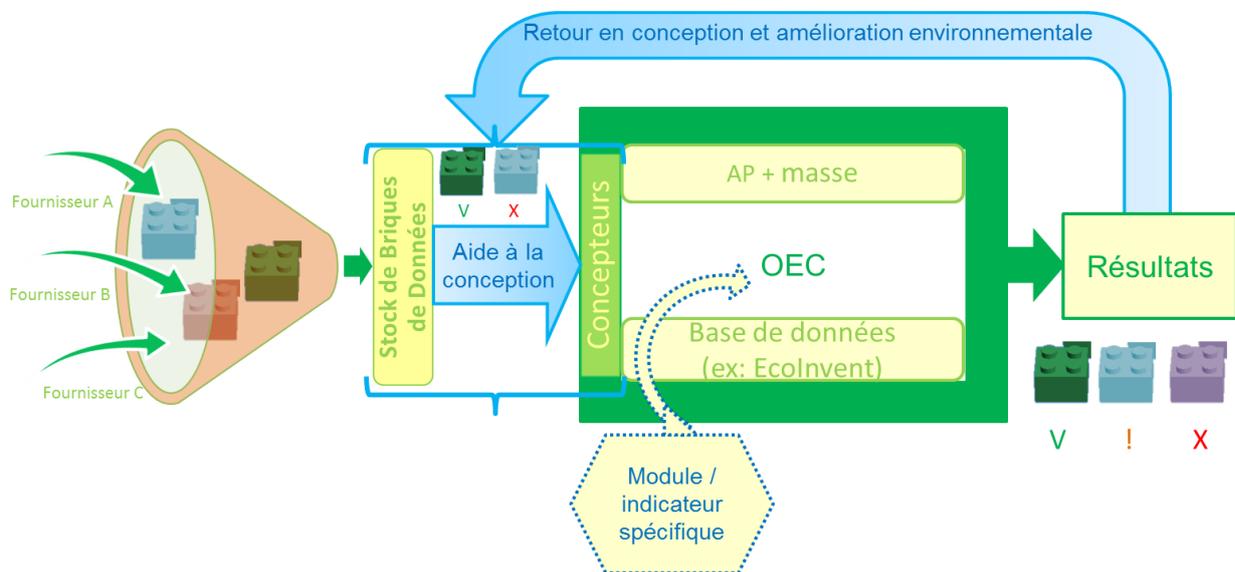


Figure 3-16. Le schéma global de la méthodologie : une synergie « vertueuse ».

Une fois les briques créées et mises à disposition pour les concepteurs, ceux-ci peuvent s'en servir pour modéliser leurs produits. L'ensemble des informations (AP + données associées) passent par le calculateur de l'OEC (une méthode de calcul d'impact + une BDD) qui peut être couplé ou non à un indicateur spécifique au produit. Par exemple, dans le cas des navires, un éco-indicateur marin a

été spécialement développé (PRINCAUD, et al., 2010) (cf. chapitre 4). Les résultats environnementaux sont hiérarchisés pour guider l'utilisateur (pour améliorer la technologie). L'ensemble des comparaisons des alternatives technologiques sont archivées et capitalisées pour être mises à disposition lors d'une future modélisation.

La bonne intégration des fournisseurs dans la démarche favorise une bonne évaluation environnementale du produit fini et de ses composants.

La bonne intégration des concepteurs dans la démarche favorise l'amélioration des performances environnementale du produit fini et de ses composants.

3.2. L'outil d'un point de vue informatique – cahier des charges global

A partir de toutes les spécifications présentées dans les paragraphes précédents, des critères / caractéristiques informatiques idéales pour l'OEC peuvent être définies (*Figure 3-17*):

- L'outil étant basé sur l'ACV mais n'utilisant pas un logiciel existant, doit pouvoir recalculer des impacts de la même façon que le ferait un logiciel d'ACV complète (type SimaPro).
- Les logiciels d'ACV étant peu conviviaux et peu accessibles autant par le mode de navigation (l'ergonomie de l'outil) que par le contenu, l'OEC doit pallier ces deux faits.
- L'outil doit permettre de charger automatiquement une Arborescence Produit, car comme cela a été présenté, pour un produit complexe tels que ceux visés par cette étude, cette AP peut compter des dizaines de milliers de lignes.
- L'outil doit pouvoir arborer différentes « interfaces » en fonction de l'utilisateur : le fournisseur n'aura accès qu'à un fichier type limité à son produit, alors qu'un concepteur pourra naviguer dans une partie de l'AP, ou que l'architecte aura accès à l'ensemble de cette AP.
- L'OEC doit permettre de calculer des impacts sur des produits modélisés et d'en capitaliser les résultats, d'une part pour faciliter l'aide à la conception, d'autre part pour en améliorer la conception.

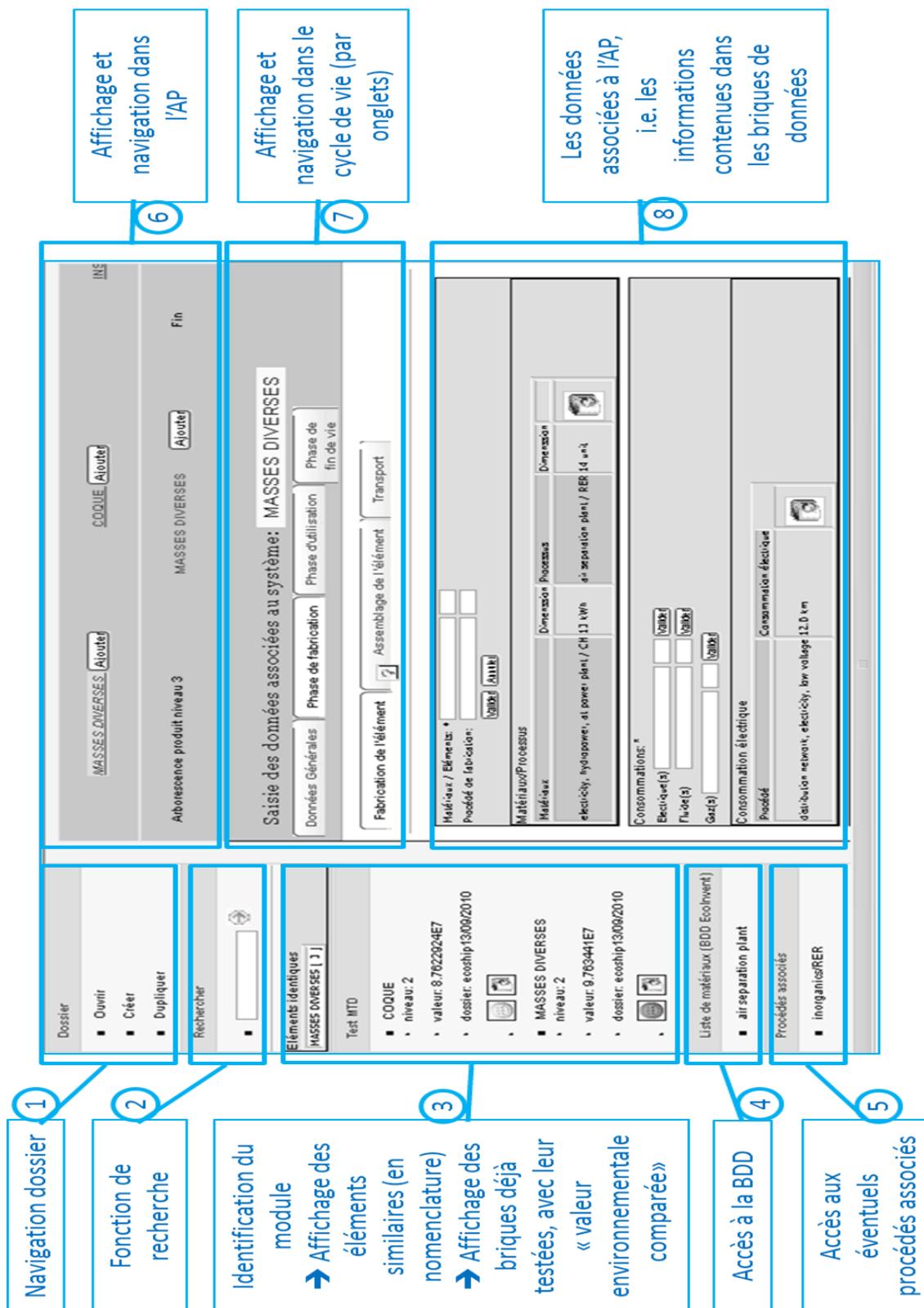


Figure 3-17. Extrait de l'interface du prototype de l'OEC développé : présentation de quelques-unes des fonctionnalités informatiques d'un OEC basé sur l'ACV.

Ainsi, l'outil en lui-même peut être compartimenté en plusieurs boîtes représentant chacune des fonctions, des interfaces, ou des BDD à constituer (*Figure 3-18*).

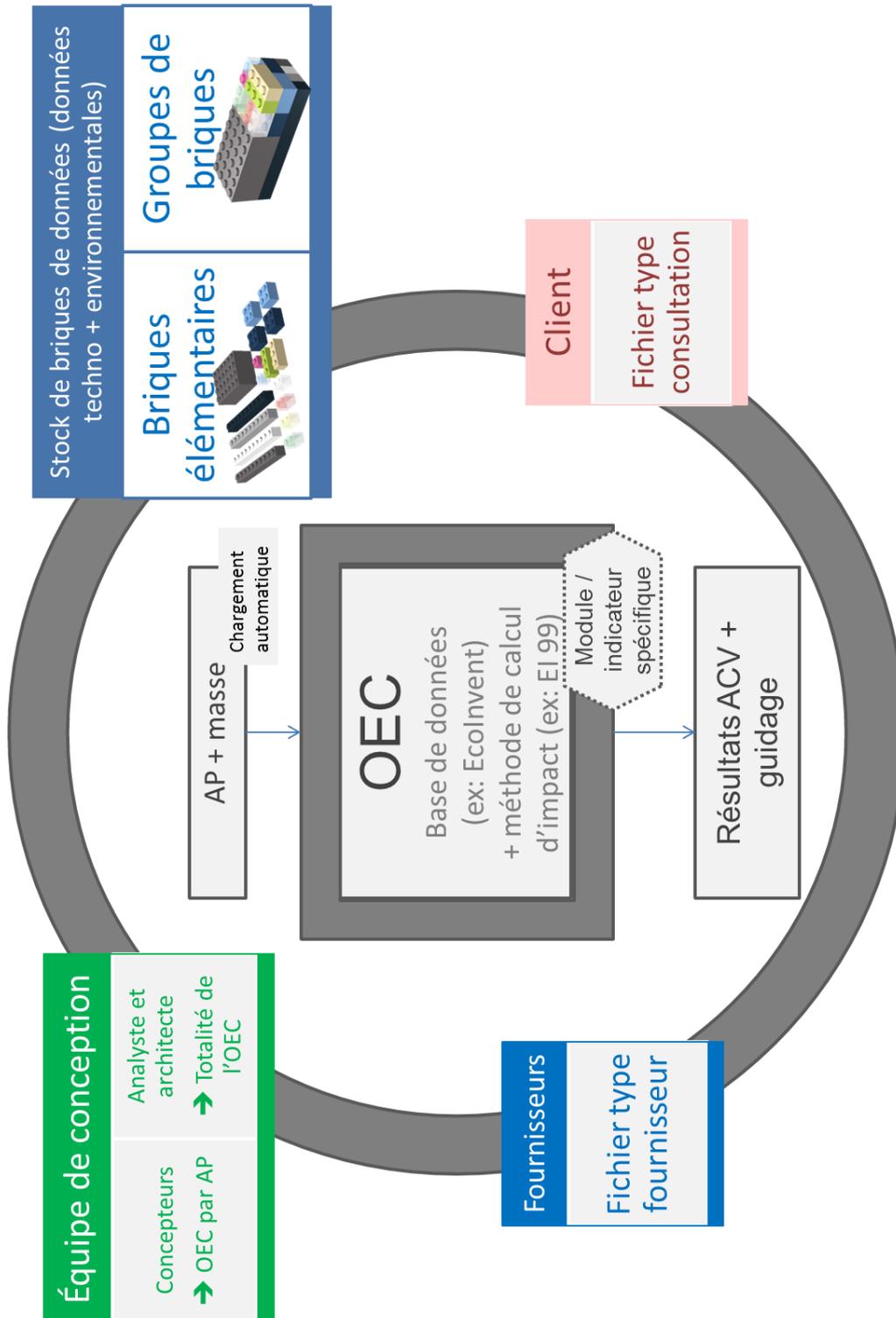


Figure 3-18. Les modules permettant l'articulation de l'OEC.

Chacune de ces boites / interfaces est un point d'interaction et de dialogue avec l'OEC.

La boite « stock de briques de données » constitue la représentation « physique » du lieu de sauvegarde et d'archivage des briques et ensembles de briques modélisées et testées.

La boite « fournisseurs » est matérialisée par un fichier type dans lequel les fournisseurs pourront saisir les données concernant leurs produits. Ce fichier sera au format d'un fichier d'« extraction » de l'OEC. Il sera aussi réintégré à l'outil une fois complété.

La boite « client » se matérialise par un accès de type consultation vis-à-vis de l'OEC.

Enfin, la boite « équipe de conception » correspond à l'interface la plus complète de l'outil, avec par exemple, la possibilité de charger des fichiers Excel contenant l'AP associée à un bilan de masse. C'est par cet accès que la majorité des données seront saisies, et que l'aide à la conception et à l'amélioration des produits peut se faire.

Du point de vue purement informatique, il faut que le développeur informatique mette en forme ces différents aspects pour les accorder entre eux, et permette une totale interaction entre toutes ces interfaces.

C'est en partie ce travail qui a été réalisé pour le développement de l'OCEAN, et qui va être présenté dans le chapitre suivant, en tant qu'application directe de la méthodologie proposée pour d'une part, intégrer le paramètre environnemental chez DCNS et, d'autre part, évaluer et améliorer la conception des navires d'un point de vue impacts sur l'environnement.

CHAPITRE 4) APPLICATION DE LA DEMARCHE - CREATION D'UN OUTIL D'ECO-CONCEPTION DEDIE AUX NAVIRES : L'OCEAN

Ce chapitre correspond à la mise en application de la démarche proposée dans les paragraphes précédents. Dans le cadre du projet CONVENAV, un outil d'éco-conception dédié aux navires a été développé : l'OCEAN, acronyme pour Outil de Conception, Evaluation et Amélioration des Navires. Cet outil doit répondre à deux problématiques :

- Pouvoir évaluer les impacts d'un navire sur l'environnement
- Pouvoir améliorer la conception des navires pour qu'ils impactent le moins possible sur l'ensemble de leur cycle de vie.

L'OCEAN a été développé en fonction de besoins précis, décidés par l'ensemble des partenaires du consortium, ainsi que par de futurs utilisateurs. La construction de l'outil s'est établie en fonction d'un cahier des charges qui décrit l'expression de besoins de l'outil. De plus, un indicateur spécifique aux navires a été développé. Il s'agit de l'EIM (Eco-Indicateur Marin).

Dans ce chapitre, seront présentés :

- L'identification des besoins spécifiques à l'OCEAN
- La construction de l'outil pour la partie évaluation environnementale, avec un intérêt tout particulier prêté à l'EIM
- La construction de l'outil pour la partie amélioration environnementale
- Les limites de l'OCEAN et de cette démarche.

1. IDENTIFICATIONS DES BESOINS SPECIFIQUES A L'OCEAN

Dans un premier temps, un rapport sur l'expression des besoins (EB) et des fonctionnalités de l'OCEAN a été rédigé (cf. [Annexes](#)). Ce document a permis de transcrire l'ensemble des besoins mis en avant pour construire un outil capable d'évaluer des impacts selon une méthode basée sur l'ACV, mais aussi capable de guider l'utilisateur pour l'aider lors de la conception des produits, et d'en améliorer les impacts sur l'environnement. L'EB décrit entre autres les besoins de l'outil (de la même façon que pour un cahier des charges), les modules constituant ce futur OCEAN et les exigences nécessaires à respecter pour le bon développement d'un tel outil.

L'outil doit pouvoir être utilisable :

- Pour toutes les phases de conception (surtout en avant-projet et en développement)

- Pour une phase de vie (fabrication, utilisation, fin de vie), ou sur toute la durée du cycle de vie du navire, et ceci, pour chaque phase de conception
- Pour l'ensemble du navire, ou seulement un système, un sous-système ou tout autre élément constitutif du navire
- En fonction et en rapport avec une représentation 3D du navire (ou au moins un plan permettant une localisation des éléments par local)
- Par différents utilisateurs (analyste, architecte, systémier, technologue, client et fournisseur).

Les fonctions les plus importantes sont entre autres¹ :

- Pouvoir charger/saisir l'AP du navire, et un bilan de masse associé
- Pouvoir évaluer les impacts d'un navire de la même façon que SimaPro, i.e. en affichant des valeurs d'impact par catégories (définies par la méthode de calcul d'impact CML 2001)
- Pouvoir évaluer plus spécifiquement les impacts du navire dans le milieu marin et prendre en compte le fait que le navire est un produit mobile
- Etre capable de remonter aux contributeurs d'impact (par phase de vie ou par élément d'AP)
- Pouvoir améliorer les produits, donc avoir à disposition une aide à la décision et une interface guidant l'utilisateur dans ce sens-là.
- La possibilité de choisir le périmètre de l'étude d'impact (les phases de vie et les niveaux d'AP)
- Pouvoir saisir un code local par élément (dans l'optique d'une interface avec une modélisation 2D ou 3D du navire)

Après validation et étude de chacun des points, un cahier des charges de l'OEC dans sa version prototype a été défini : pour chaque fonctionnalité, une priorité et un degré de fonctionnalité ont été établis quant à sa modélisation dans l'OCEAN ([Tableau 4-1](#)).

¹ L'ensemble des fonctionnalités sont décrites dans un tableau Excel, disponible en [annexes](#)

Tableau 4-1. Extrait du cahier des charges définissant les fonctionnalités à créer dans l'OCEAN, d'un part dans la version démonstrateur, mais aussi qui devront être présentes dans une version définitive de l'outil (version commercialisable).

	Fonctionnalités			Priorité		Remarques	faisabilité technique
	Pour le prototype	A terme	Indispensable	Secondaire			
Mode d'emploi / guide d'utilisateur	un guidage par des signaux insérés dans l'IHM		x			signaux = "?" ou "!" dans des bulles. En passant la souris dessus : pop-up avec le message correspondant	
Glossaire	accès à un glossaire des termes "environnementaux" et spécifiques à l'outil						
Un tutoriel	une fonction de tutorat utilisable à chaque étape de l'IHM		x				
Gestion de l'accès	1 seul mode, accès libre à tous les niveaux, sans restriction	différents niveaux d'utilisateurs, restrictions d'accès	x				
Création de dossiers	pas besoin de toutes les informations ; sont indispensables : la masse, la durée de vie, les profils d'utilisation (il faut au moins 2 types de masses d'eau par grandes catégories) et opérationnel (les 4 modes opérationnels de base seulement, pas nécessairement le 5ème paramétrable), le profil de vitesse (au moins une vitesse moyenne), les données constructeur sur la motorisation (émissions gazeuses par taux de charge), le temps passé en cale sèche	remplissage de toutes les informations : s'ajoutent donc le type de navire + profil de vitesse complet (de zéro à vitesse max) + dimensions du navire	x			remplissage en fonction des données fournies	sont en théorie automatiquement chargeables : l'AP, le code AP, la masse, la localisation, le bila électrique, et peut-être un code fournisseur
Les données génériques à un navire	sont à renseigner 1 seule fois (par l'analyste) : 1) les facteurs de pondération des catégories d'impact, 2) le scénario global de FdV avec les éléments qui subiront un scénario spécifique, 3) les substances de l'IST qui seront dépolluées et/ou stituées.					à part pour les facteurs de pondération, si l'utilisateur connaît la donnée, il pourra l'entrer (elle sera alors prioritaire sur la donnée	

Ce document² reprend l'ensemble des fonctionnalités qui devront être présentes lors du développement de l'outil sous sa forme « commercialisable ». Ainsi, même si la totalité des fonctions n'ont pas pu être développées dans le cadre du projet CONVENAV, il faut garder à l'esprit que l'outil dans sa version prototype est un démonstrateur. Il doit prouver que la démarche proposée est réalisable, applicable et intégrable à un processus de conception très établi. La version développée doit permettre de réaliser une évaluation environnementale, comme le ferait un logiciel d'ACV type SimaPro, ce qui n'est pas une innovation en soi mais qui était indispensable. Mais cette version de l'OCEAN doit aussi et surtout, être assez dynamique pour supporter toute la partie concernant l'aide à la décision et à l'amélioration du produit.

L'EB de l'OCEAN peut se résumer comme il suit :

« L'outil d'éco-conception et d'évaluation environnementale doit permettre de prendre en compte les impacts sur l'environnement, et plus particulièrement sur le milieu marin, lors de la conception des bateaux. Il doit fournir un outil d'aide à la décision des utilisateurs, pour une optimisation des performances environnementales des navires. Il doit permettre à tous les acteurs de la conception (analyste environnemental, architecte, systémiers, technologues et fournisseurs) de participer à la récupération des données et/ou à l'utilisation de l'outil. Cet outil doit être utilisable pour l'ensemble des phases de conception.

Les attentes spécifiques de DCNS face à cet outil ont été décrites précédemment (cf. chapitre 2, 3.2.2). Il a clairement été énoncé par les futurs utilisateurs que l'outil se devra d'avoir une Interface Homme Machine (IHM) conviviale, assez intuitive, ne créant pas de nouvelles contraintes trop lourdes à intégrer dans le processus de conception classique. De plus, il devra permettre une aide à la décision, qu'elle soit à prendre en avant-projet ou en phase d'industrialisation. L'utilisateur pourra choisir le périmètre de son étude (niveau d'utilisateur, phase de conception, phase de vie, typologie du navire, arborescence produit et données associées) puis lancer les calculs d'impacts, et être guidé pour l'interprétation des résultats.

² L'ensemble des fonctionnalités sont décrites dans un tableau Excel, disponible en [annexes](#)

2. DU CHOIX D'UNE METHODE DE CALCUL D'IMPACT VERS LA NECESSITE D'UN INDICATEUR MARIN SPECIFIQUE : L'ECO-INDICATEUR MER

Comme cela a été présenté, l'outil doit se baser sur l'ACV. Il faut donc choisir une méthode de calcul d'impact adaptée au produit étudié, et éventuellement, envisager la création d'un nouvel indicateur plus adapté à l'évaluation des impacts d'un navire sur l'environnement, et en particulier, sur l'environnement marin.

2.1. Les éco-indicateurs et les méthodes d'évaluation d'impacts existants

2.1.1 *Identification des critères à évaluer pour réaliser l'ACV d'un navire*

Pour évaluer les impacts d'un navire sur l'environnement, il faut prendre en compte ses caractéristiques intrinsèques pour choisir la meilleure méthode de calcul d'impact possible :

- Le navire est un produit très complexe : tout changement de conception évalué à une échelle idoine doit être perceptible. La méthode doit être suffisamment sensible pour représenter cette complexité.
- Un navire est à proximité ou dans l'eau tout au long de ses phases de vie, de l'assemblage, au démantèlement. La méthode doit donc prendre en compte le milieu aquatique de façon assez précise pour différencier à *minima* l'eau douce de l'eau de mer, voire les sous-compartiments aquatiques (eaux côtières, portuaires,...)
- Un navire impacte sur le milieu majoritairement lors de sa phase d'utilisation, à cause de sa consommation en carburant. Il faut donc que la méthode permette de visualiser les impacts liés à cette combustion, i.e. les émissions de GES (tels le CO₂), mais aussi les émissions de sulfates ou de phosphates, qui vont augmenter l'acidification et l'eutrophisation du milieu.
- Une exhaustivité maximum pour les substances modélisées et prises en compte par la méthode, car par ce biais, l'utilisateur pourra contrôler l'existence des substances référencées comme étant toxiques ou nocives, et donc réglementées.

A partir de ces quelques critères, il va être possible de sélectionner la méthode la plus adaptée, qui utilisera les éco-indicateurs les plus pertinents.

2.1.2 *Les éco-indicateurs : définition*

Selon l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economique), un Eco-Indicateur (EI) est « un paramètre ou une valeur calculée à partir de paramètres donnant des indications sur l'état d'un phénomène, de l'environnement ou d'une zone géographique, et d'une portée supérieure aux informations directement liées à la valeur du paramètre ». Le but d'un EI est de (MELQUIOT, 2003):

- comparer l'incomparable : des produits différents, dans le temps, l'espace...
- mettre en évidence les tendances (prospection)
- aider à la décision en créant des modèles capables de donner des réponses, axes de réflexion
 - permettre une planification pour la coordination et la mise en place d'actions proposées
 - mesurer le niveau de performance des réponses

Ce sont ces EI qui permettent notamment de quantifier les impacts d'un produit en fonction de différentes catégories d'impact. Ils servent à réaliser « une analyse préliminaire, globale et critique des problèmes, effets et résultats, tant positifs que négatifs, en matière d'environnement des activités d'un établissement, d'un projet ou d'une politique. Différentes méthodologies existent en France et dans les autres pays. Elles sont généralement très liées à la politique générale du pays et à sa réglementation. » (MELQUIOT, 2003). Par exemple, pour évaluer les impacts des émissions de CO₂ dus à la combustion de carburant utilisé par un navire, un EI possible est celui renseignant le changement climatique.

Un EI permet de mesurer :

- les impacts d'un produit, d'une activité, d'un développement
- l'amélioration/la dégradation par rapport à des valeurs de références (dans le temps ou l'espace)
- les pressions exercées par l'ensemble ou une partie de la société sur l'environnement ou sur des groupes socio-économiques particuliers
 - l'impact et la détermination de la responsabilité effective de groupes socio-économiques dans les divers phénomènes étudiés

Pour effectuer une bonne évaluation environnementale, plusieurs conditions sont nécessaires :

- Savoir ce que l'on souhaite évaluer
- Connaître le produit que l'on souhaite évaluer
- Choisir l'EI adéquat et la meilleure méthode de calcul d'impact
- Connaître les limites et avantages de l'EI choisi ainsi que de la méthode de calcul d'impact

Selon les caractéristiques décrites dans la partie précédente, les EI les plus pertinents pour l'évaluation environnementale des navires seraient donc, entre autres :

- un indicateur pour le changement climatique,
- un indicateur pour l'acidification des eaux,
- un indicateur pour l'eutrophisation des eaux,
- un indicateur pour la toxicité humaine,
- un indicateur pour les écotoxicités aquatiques (différenciant si possible les eaux douces des eaux salées),
- un indicateur pour la déplétion abiotique (la diminution des ressources non vivantes).

Ce sont donc ces EI qui vont être les guides pour choisir une méthode de calcul d'impact la plus appropriée possible aux navires.

2.1.3 Le choix d'une méthode de calcul d'impact

Il existe de nombreuses méthodes de calcul d'impacts. Certaines ne prennent en compte qu'un seul EI, telle la méthode décrite par l'IPCC, développée par le Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC ou IPPC), qui ne considère qu'une seule catégorie d'impact : le potentiel de réchauffement climatique des émissions aériennes. D'autres sont beaucoup plus complexes, et peuvent prendre en compte une vingtaine de catégories d'impact (telle EDIP 2003, ou CLM 2001).

Quelle que soit la méthode utilisée, le calcul d'impact réalisé à partir de l'inventaire des substances intervenant dans le cycle de vie d'un produit peut se résumer par le schéma suivant (Figure 4-1) :

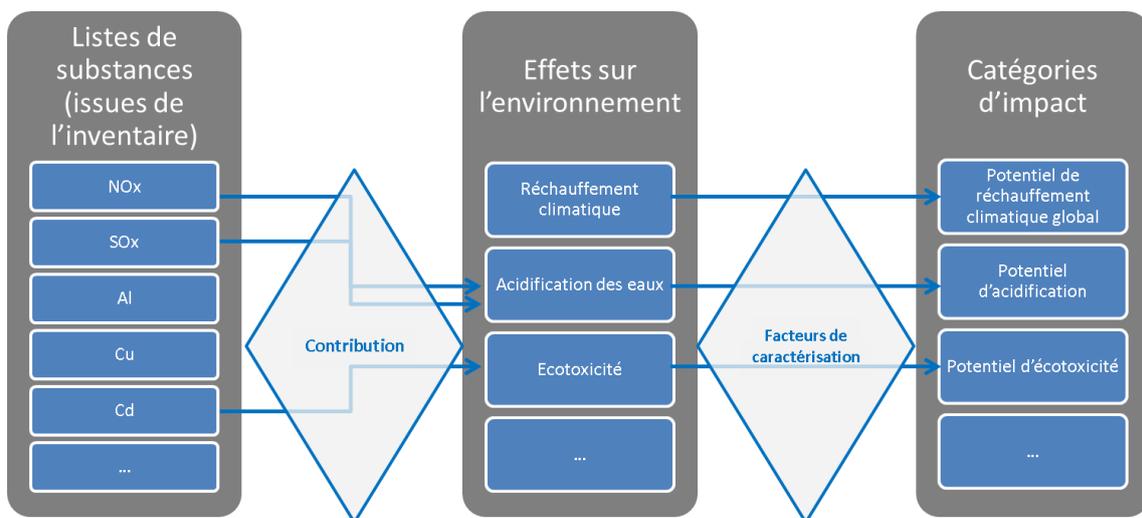


Figure 4-1. Des substances contributives à un (ou des) effets sur l'environnement vers la caractérisation des impacts.

Chaque méthode de calcul d'impact attribue des facteurs de contribution à certaines substances pour différentes catégories d'impact. Entre chacune de ces méthodes, les substances, leur contribution et le facteur correspondant peuvent être différents. Ainsi, pour un même inventaire de substances, deux méthodes de calcul d'impact pourront donner des résultats différents.

Pour sélectionner la meilleure méthode de calcul d'impact, s'il en est une, une recherche bibliographique approfondie sur le sujet a été nécessaire. Dans un premier temps, sur l'exemple de la

première modélisation ACV de la frégate La Fayette, différentes méthodes de calculs ont été testées (DREYER, et al., 2003), sachant que les résultats concernant les écotoxicités, l'acidification, l'eutrophisation des eaux étaient sujet à un intérêt tout particulier au vu des spécificités du produit. Plusieurs méthodes ont été retenues : EDIP 2003, CML 2001 et EI 99 (PANT, et al., 2004), (GOEDKOOOP, et al., 2001b), (LARSEN, et al., 2007), (POTTING, et al., 2006). La méthode de calcul d'impact EDIP 2003 a rapidement été mise de côté, car elle est beaucoup moins utilisée que les deux autres, en faisant une méthode moins utilisable en cas de référencement. Les deux méthodes restantes ont été comparées et évaluées, pour savoir si l'une d'elle pouvait satisfaire aux besoins décrits pour l'évaluation environnementale d'un navire.

La méthode EI 99 a une vision assez anthropocentriste, alors que CML 2001 étudie plus les effets sur l'environnement. La première est *end-point*, i.e. elle a une approche dommage, qui regroupe des catégories d'impact pour simplifier l'affichage final : elle va un pas plus loin dans l'analyse, mais de ce fait, elle ajoute une incertitude de plus aux résultats. La seconde méthode a une approche *mid-point*, i.e. elle s'arrête aux catégories d'impacts : l'analyse des résultats est plus compliquée, mais moins biaisée.

La méthode CML 2001 prend aussi en compte beaucoup plus de substances lors du calcul d'impact. Les deux méthodes ne prennent pas en compte la notion de fréquence d'émission des substances. L'échelle temporelle d'EI 99 est basée sur des perspectives culturelles, alors qu'avec CML 2001, c'est le temps d'exposition qui sert de référence temporelle. En ce qui concerne les échelles spatiales, EI 99 travaille au niveau local et régional, avec comme postulat que le système est fermé, sans circulation d'air ni d'eau avec les zones hors limites. La méthode CML 2001, elle, prend en compte des notions de zones d'émissions, avec une échelle continentale, voire globale pour certains indicateurs (*Figure 4-2*). Elle prend aussi en compte les notions de transferts de substances entre les compartiments.

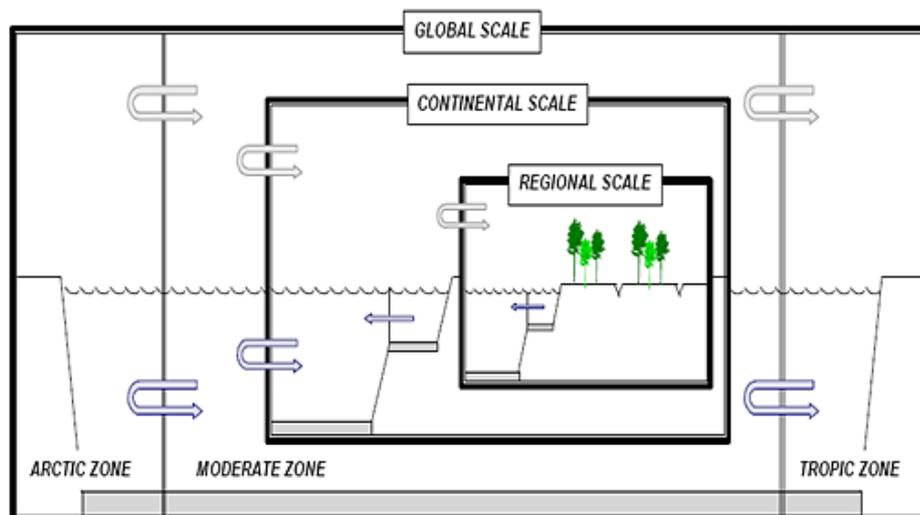


Figure 4-2. Représentation schématique de la modélisation selon Simple Box (BRANDES, et al., 1996) : plusieurs niveaux d'échelles spatiales sont pris en compte. Une substance peut interagir dans chacun des compartiments représentés.

Une telle modélisation des compartiments est un réel avantage. En ce qui concerne la connaissance de l'environnement marin et de sa représentation en termes de modèles, Simple Box (ROSEMBAUM, et al., 2008) permet de modéliser le transfert des substances à travers différents compartiments de façon très détaillée, comparée à EI 99 par exemple. Ces modélisations sont prises en compte dans les méthodes de calcul d'impact lorsqu'on effectue une ACV.

Pour connaître les impacts environnementaux d'un produit, il est nécessaire et indispensable de revenir à la base du calcul : la chimie (les substances mises en jeu) et les réactions chimiques (leurs interactions avec le milieu et entre elles). En effet, pour calculer l'impact d'un produit sur l'environnement, il faut non seulement en connaître les substances (constitutives, contributives et émises), mais aussi savoir où elles sont émises et quelles sont leurs réactivités vis-à-vis de l'environnement et des autres substances. Le schéma d'un calcul d'impact se construit de la sorte :

- Une connaissance du milieu approfondie : dans l'idéal, pour chaque substance, les caractéristiques physico-chimiques doivent être définies. Plusieurs laboratoires travaillent sur cette thématique dans l'optique de l'élargissement de ces connaissances.
- Une connaissance des compartiments impliqués
- Une connaissance des dynamiques d'échanges des substances entre les compartiments
- Une connaissance des éco-indicateurs
- Une connaissance des méthodes de calcul d'impact

En terme de catégories d'impacts, les méthodes n'affichent pas toutes les mêmes, bien qu'elles soient comparables par regroupement. En fonction des besoins, une méthode de calcul d'impact sera ainsi préférée à une autre. En général, EI 99 avec entre autres, l'approche *end-point*,

est très utilisée dans le milieu industriel, alors que CML 2001, plus exhaustive, est préférée dans la recherche.

Toutes ces caractéristiques mises en relation avec les besoins énoncés font que le choix de la méthode de calcul d'impact s'est porté sur CML 2001. Cette méthode est celle qui prend le mieux en compte l'environnement aquatique, qui s'appuie sur une modélisation poussée des transferts de substances entre les compartiments, et qui prend en compte un bon nombre de substances.

2.2. Les limites de la méthode CML 2001 pour l'évaluation environnementale des navires

La méthode de calcul d'impact CML 2001 a ses limites. L'intérêt s'étant plus particulièrement porté sur le milieu aquatique, et sur les catégories d'impact permettant de mettre en valeur les effets des navires sur cet environnement spécifique, un focus a été réalisé sur la modélisation des impacts pour les écotoxicités marines, l'acidification ou encore l'eutrophisation. En ce qui concerne ces catégories d'impacts, une limite importante de la méthode de calcul CML 2001 est la notion de spatialisation. Bien que ce modèle soit l'un des plus performants actuellement, il n'est cependant pas suffisant pour les besoins précédemment décrits, qui sont de représenter au mieux les impacts sur l'environnement marin. En effet, si l'on considère les catégories d'impact qui concernent le compartiment aquatique (les écotoxicités, l'acidification, l'eutrophisation), on s'aperçoit assez rapidement que seules les eaux douces et salées sont modélisées. Hors, comme cela a déjà été décrit auparavant, un navire passe sa vie entière à proximité ou dans l'eau, que cela soit lors de sa construction, pendant son utilisation, ou lors du démantèlement. Il est donc très important de bien modéliser l'environnement de vie des navires pour mieux évaluer leurs impacts sur le milieu aquatique.

Le but étant de modéliser au mieux les impacts d'un navire sur l'environnement et sur son milieu de prédilection, la nécessité de créer de nouveaux compartiments aquatiques marins est apparue.

Il faut aussi simplifier la lecture des résultats, et leur analyse. En effet, en utilisant CML 2001, il est possible de visualiser pas moins de 49 catégories d'impact différentes. Il faut donc envisager de faire un tri entre toutes ces catégories, sachant que certaines ne sont que des fonctions temporelles pour un même indicateur qui correspondent à une implémentation des impacts à plus ou moins long terme. Cette complexité d'analyse des impacts doit aussi être résolue dans l'OCEAN, pour faciliter la prise de décision des concepteurs qui utiliseront cet outil basé sur l'ACV et sur CML 2001.

Il a ainsi été décidé de créer un nouvel indicateur spécifique aux navires, qui prenne en compte le milieu marin de façon plus détaillée.

2.3. Un nouvel éco-indicateur : l'EIM

2.3.1 La logique de l'EIM

Le milieu marin est tout aussi complexe que le milieu terrestre. Jusqu'à présent, il n'a été modélisé que par une seule et unique masse d'eau ayant un comportement homogène. Pourtant, il n'en est rien. Il n'existe pas un seul type d'eau salée, mais des multitudes (Figure 4-3). Les eaux estuariennes, lagunaires, de haute mer en sont quelques exemples non exhaustifs.

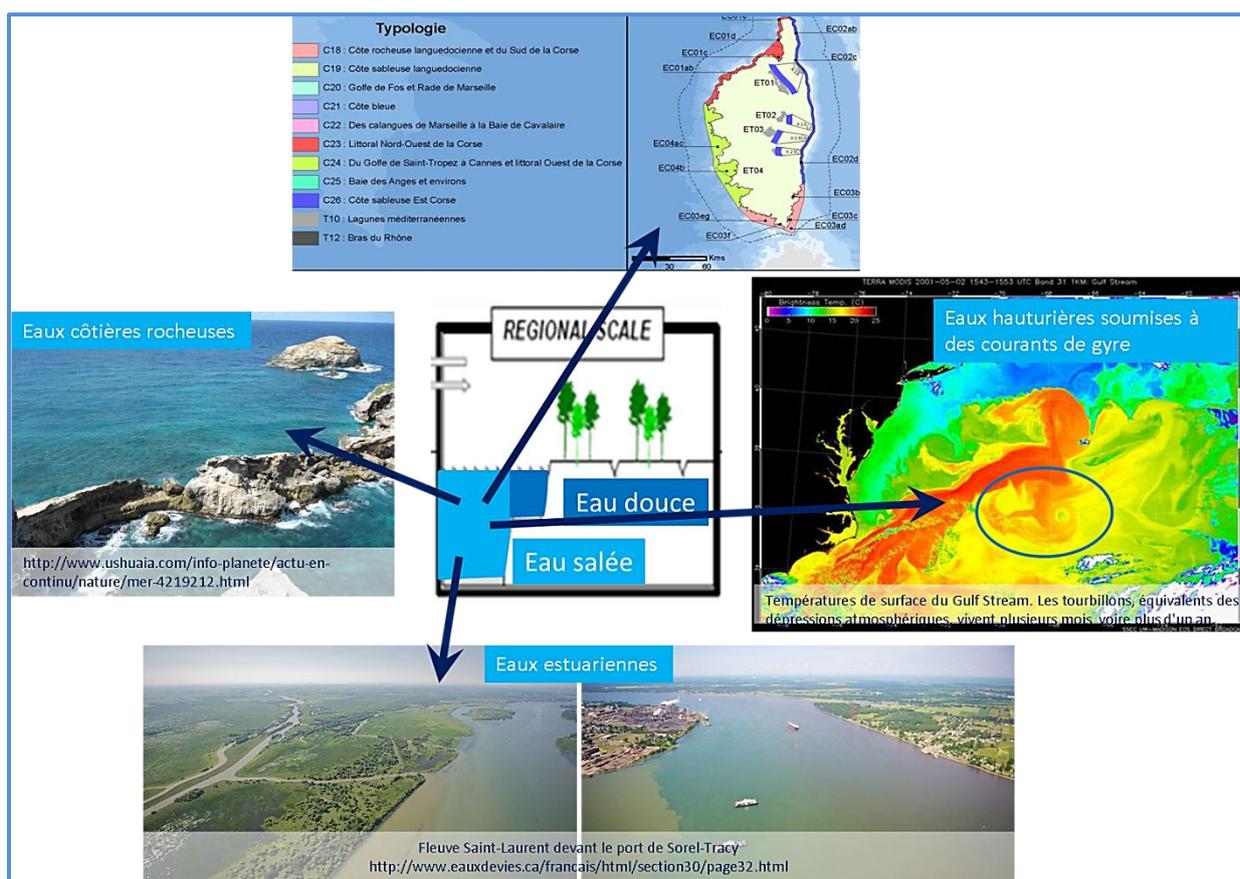


Figure 4-3. Le compartiment aquatique d'eau salée, tel que modélisé et pris en compte par la méthode de calcul d'impact CML 2001 VS la réalité du milieu : un panel très vaste de compartiments marins.

Il existe de nombreux types de masses d'eau, chacune ayant des caractéristiques physico-chimiques et un comportement spécifiques. La température, la salinité, la turbidité ou encore le pH sont quelques-uns de ces critères. Une substance telle que le mercure ne réagira pas de la même façon si elle est émise dans une eau très turbide, riche en micro-organismes, ou dans une eau plus claire et moins riche en êtres vivants. L'idée était donc de créer de nouveaux compartiments aquatiques, qui seraient assez fins dans leur caractérisation pour apporter de nouveaux résultats et permettant de mieux évaluer les impacts d'un navire sur l'eau.

Les calculs effectués par catégorie d'impact sont basés sur des données provenant de différents modèles. Ainsi, par exemple, les écotoxicités et le changement climatique ne sont pas modélisés selon les mêmes schémas de transferts de substances : l'écotoxicité est modélisée au niveau régional, alors que le changement climatique a une portée globale. Mais dans tous les cas, lorsque l'on souhaite entrer dans ces modèles (Simple Box, USES-LCA) (ROSEMBAUM, et al., 2008), (PANT, et al., 2004) pour ajouter de nouvelles données, cela s'avère très complexe. C'est un travail de laboratoire de chimie et d'écotoxicologie, et non le propos du projet. Il a donc été décidé que pour cette étude, avec les moyens et le temps impartis, il ne serait pas possible de « rentrer » dans les modules de base, mais qu'une étape de calcul supplémentaire serait ajoutée pour modéliser les nouveaux compartiments marins (Figure 4-4).

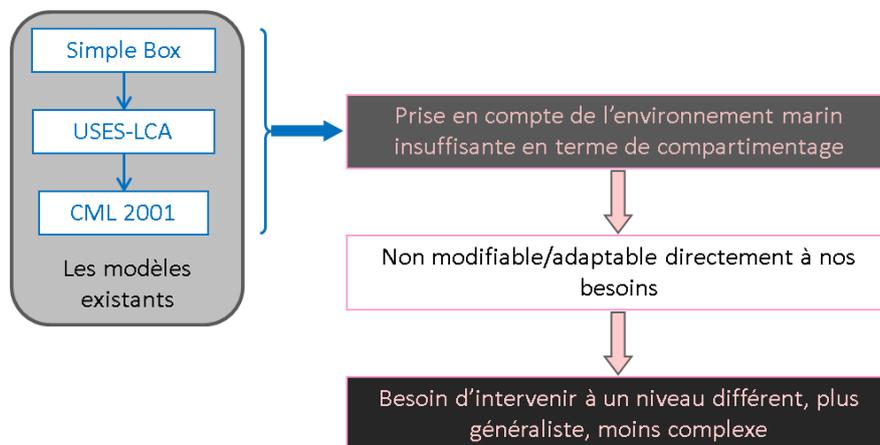


Figure 4-4. L'impossibilité d'insérer des nouveaux compartiments marins dans les modèles existants.

L'intervention est réalisée en aval du calcul d'impact effectué par CML 2001. Le nouvel modèle est l'Eco-Indicateur Marin (EIM), développé en partenariat avec l'Ifremer. Son but est de « sous-compartimenter » le milieu aquatique marin. Ce compartimentage s'appuie donc sur les catégories d'impact « écotoxicité marine aquatique » et « écotoxicité sédimentaire marine » décrites par la méthode de calcul d'impact CML 2001 (Figure 4-5).

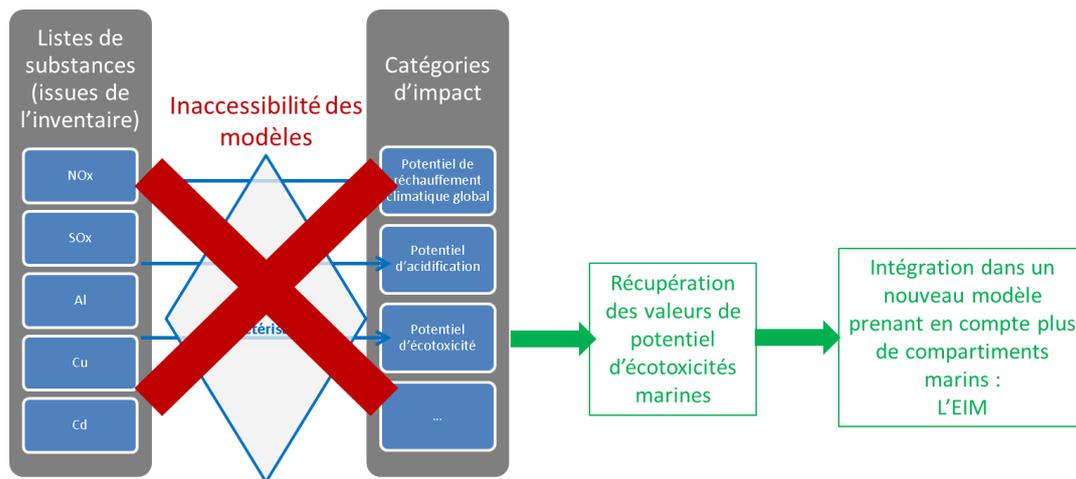


Figure 4-5. Une nouvelle modélisation, basée sur les valeurs d'écotoxicités marines calculées d'après CML 2001.

Les valeurs calculées selon CLM 2001 pour les catégories « écotoxicité marine aquatique » et « écotoxicité sédimentaire marine » sont récupérées pour servir de référence pour le compartiment marin global. La pondération des impacts en fonction des nouveaux sous-compartiments se base sur ces valeurs.

2.3.2 Les modules utilisés dans l'EIM

Au vu de la complexité des modèles environnementaux existants, il a donc été décidé créer de nouveaux sous-compartiments marins hors des modèles existants. Pour cela, 3 aspects ont été considérés (ABADANE, et al., 2009)³ :

- Les substances émises et leur potentiel de toxicité
- Les compartiments aquatiques et leur indice de vulnérabilité
- Le profil d'utilisation des navires par zones aquatiques et leur indice de sensibilité

a. Une liste de substances pertinentes pour l'environnement marin

Chaque substance prise en compte a été caractérisée selon un potentiel de toxicité, défini entre autres grâce à :

- Ses propriétés physico-chimiques telles que : sa masse molaire, son coefficient de partage air/eau, son potentiel de volatilisation, sa solubilité, son point de fusion, son coefficient de partage MES⁴ (sédiments)/eau, ...

³ L'ensemble du rapport est disponible en [annexes](#). Il présente entre autres, la méthodologie utilisée, ainsi que les étapes successives pour la détermination des facteurs de toxicité des substances et de vulnérabilité du milieu.

⁴ MES = Matières En Suspension

– Son comportement dans le milieu, son interactivité avec d'autres substances mais aussi avec les organismes vivants : son facteur de bioconcentration, son potentiel de bioaccumulation, sa persistance, sa biodégradabilité, son temps de demi-vie, ...

Cette caractérisation a permis de coter le potentiel de toxicité des substances jugées pertinentes pour cet environnement (*Tableau 4-2*) (ABADANE, et al., 2009). Elle a été réalisée pour les substances impactantes dans le compartiment marin et dans le compartiment sédimentaire associé, car il est le lieu d'échange privilégié.

Tableau 4-2. Extrait de la liste des substances caractérisées pour l'EIM. La caractérisation des substances est en « potentiel de toxicité ».

TOXICITY POTENTIAL	SEAWATER	MARIN SEDIMENTS
4	Benzo(a)pyrene Arsenic/Arsenic ion Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin Hydrogen sulfide PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons (carcinogenic) Chromium VI Lead Mercury Benzene, hexachloro-Tributyltin compounds	Arsenic Benzo(a)pyrene Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin Lead Mercury PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons (carcinogenic) Zinc Benzene, hexachloro-Benzene, pentachloro-
3	Acrolein Ammonia Chromium/Chromium ion Sulfur dioxide Vanadium/Vanadium ion Sodium dichromate Selenium Nickel/Nickel ion Methane, bromo-, Halon 1001 Cadmium/Cadmium ion Benzene, pentachloro-m-Xylene / 1,3-Diméthylbenzène Copper/Copper ion	Cadmium Nickel Chromium Copper

La notion de potentiel de toxicité, cotée de 0 à 4 (0 étant sans incidence et 4 fortement toxique et/ou nocive), permet de s'affranchir de la substance de référence utilisée par CML 2001, le 1,4-dichlorobenzène (1,4DB). Tous les impacts évalués pour les écotoxicités le sont en quantité de substance équivalente de 1,4DB. Or, utiliser une unité basée sur cette substance n'est pas très compréhensible pour un non expert en chimie ou en biochimie. Passer par l'unité « potentiel de toxicité » permet ainsi de mieux s'approprier les résultats, et de mieux comprendre la notion d'impact des substances sur l'environnement.

b. *Un indice de vulnérabilité pour les sous-compartiments marins pris en compte dans l'EIM*

Pour prendre en compte de nouveaux compartiments marins, il faut les caractériser de façon à les rendre intégrable dans la méthode de calcul. Cette caractérisation s'est basée sur la vulnérabilité pour chaque zone définie à l'introduction de substances polluantes.

Cette étude, réalisée par l'Ifremer, a permis de créer douze compartiments marins, classés selon trois grands groupes :

- Les eaux hauturières (de haute mer) avec :
 - Les zones comportant des courants marins en direction des côtes
 - Les zones sièges de gires
- Les eaux portuaires avec :
 - Les ports en eau profonde
 - Les ports estuariens
 - Les ports fluviaux
- Les eaux côtières avec :
 - Les zones humides littorales (lagunes, baies semi-fermées, étangs)
 - Les zones de schorres et marais médiolittoraux alimentés en eau marine
 - Les zones vaseuses abritées
 - Les estuaires et les deltas
 - Les plages sableuses ou à graviers, galets, cailloux abritées
 - Les côtes rocheuses abritées
 - Les côtes rocheuses, plages sableuses ou à graviers exposées

Pour chacun de ces compartiments marins, un indice de vulnérabilité a été attribué ([Tableau 4-3](#)) (ABADANE, et al., 2009). Cet indice est coté de 1 à 10, les valeurs les plus importantes signifiant une forte vulnérabilité à toute introduction de substances dans le milieu.

Tableau 4-3. Les compartiments aquatiques définis et leur indice de vulnérabilité. Cet indice est pondéré par le profil d'usage du navire (donné en pourcentage du temps passé dans chaque zone) (ABADANE, et al., 2009).

Indice de vulnérabilité	Type de zone	Description et caractéristiques
10	Zones humides littorales (lagunes, baies semi-fermées, étangs)	Très productives aux plans halieutique et aquacole Milieux confinés et fragilisés : faible profondeur, superficie réduite, hydrodynamisme faible Accumulation définitive de polluants, sauf en cas de tempêtes ou de marées de vives eaux Facteurs limitant : salinité, température, oxygénation, courants, sels nutritifs
9	Schorres / Marais médiolittoraux alimentés en eau marine	Encroûtement en surface Hydrodynamisme restreint Pollution en profondeur du substrat Système enclavé, alimenté uniquement au cours de marées de vives-eaux
9	Zones vaseuses ABRITEES	Percolation en profondeur due aux organismes fouisseurs et aux mouvements d'eaux interstitielles
8	Estuaires/Deltas	Secteur-clé pour le trafic fluvial, l'économie et le recrutement de plusieurs poissons Ecosystème fragile souvent associé à des nurseries/frayères de poissons Milieu propice à l'accumulation et au stockage des contaminants Haute productivité en terme de biomasse et d'éléments nutritifs pour la vie marine
8	Ports en estuaire	Sites abrités (eaux stagnantes et accumulation de polluants) Sensibilité accentuée par les multiples sources de pollution localisées dans les ports (relargage métaux après dragage, peintures anti-salissures, etc) Proximité des estuaires, secteurs-clés très sensibles
7	Ports sur un fleuve	Sites abrités (eaux stagnantes et accumulation de polluants) Sensibilité accentuée par les multiples sources de pollution localisées dans les ports (relargage métaux après dragage, peintures anti-salissures, etc.)
6	Plages sableuses ou à graviers, galets, cailloux ABRITEES	Percolation rapide Faible courantologie Formation en surface d'une couche durcie voire d'une croûte
5	Côtes rocheuses ABRITEES	Dépôts de pellicules fines dans les cuvettes/fractures/fissures car faible courantologie Accumulation dans les anfractuosités
4	Ports en eau profonde	Exposition relative de la zone Zone plus exposée du fait des activités maritimes
3	Côtes rocheuses, plages sableuses ou à graviers EXPOSEES	Temps de récupération rapide Courantologie, Marées Dépôts en surface de la plage, polluants décollables et transportables ailleurs (autoépuration)
2	Zones comportant des courants marins en direction des côtes	Grande dilution et éloignement des côtes MAIS Présence de courants superficiels ramenant des polluants parfois très loin de leur lieu d'émission, s'ils sont persistants toutefois
1	Zones sièges de gires	Pas/peu de courants Grande dilution (masse d'eau "infinie") Grande profondeur (sédiment, colonne d'eau)

Haute mer
Zone côtière
Zone portuaire

2.3.3 Le calcul des impacts sur les nouveaux compartiments

A partir des modules précédents, le calcul peut être effectué. Il prend en compte :

- Les substances impactantes et leur potentiel de toxicité
- Les nouveaux compartiments marins et sédimentaires associés en fonction de leur indice de vulnérabilité
- Le profil de navigation des navires dans ces mêmes compartiments.

La méthodologie pour coupler ces 3 types de données est la suivante (Tableau 4-4) :

1) Par un premier calcul d'ACV selon la méthode de calcul d'impact CML 2001, on obtient une liste de substances impactantes et leur quantité associée pour les catégories d'impact « écotoxicité marine aquatique » et « écotoxicité sédimentaire marine »⁵.

2) Les substances extraites de l'ACV sont mises en parallèle de celles définies par l'Ifremer et caractérisées par un potentiel de toxicité. Ce dernier sert de valeur unité. En additionnant toutes ces masses de substances impactantes, on obtient l'impact total du navire en termes de toxicité (Tableau 4-4).

Tableau 4-4. La caractérisation des substances par un potentiel de toxicité, en fonction des quantités émises selon le calcul d'impact réalisé par CML 2001

Substances	Détermination pour le compartiment aquatique			Détermination pour le compartiment sédimentaire associé	
	Quantité (masse) A	Potentiel de toxicité B	Masse de substances impactante C = A*B	Potentiel de toxicité B'	Masse de substances impactante C' = A'*B'
Ammoniac	2,36E-3	3	7,08E-3	0	0
Cadmium	5,67E-2	3	1,70E-1	3	1,70E-1
Arsenic	8,29E-6	4	3,32E-5	4	3,32E-5
TOTAL			D = Σ (C)		D' = Σ (C')

Valeurs Ifremer

Valeurs issues de l'ACV

3) En parallèle, le profil de navigation du navire est entré pour chacune des zones définies.

4) En multipliant les valeurs du profil de navigation, et de vulnérabilité des zones par l'impact de l'ensemble des substances émises par le navire, on obtient une valeur d'impact du navire pour chaque nouvelle zone marine définie (Tableau 4-5). La prise en compte du profil de navigation permet de prendre en compte le caractère mobile des navires. Un bateau navigant la majorité de son temps en haute mer aura moins d'impact sur le compartiment associé que s'il reste en zone côtière (beaucoup plus sensible à la pollution).

⁵ Les deux catégories ont été choisies pour une échelle de temps à 500ans (ABADANE, et al., 2009).

Tableau 4-5. Les étapes de calcul permettant de quantifier les impacts d'un navire sur l'eau et sur les sédiments associés, en fonction des compartiments marins, de leur vulnérabilité, du temps de navigation passé dans chacun, des substances en jeu et de leur toxicité. La valeur de l'impact peut être lue selon l'unité « potentiel de toxicité ».

Zone géographique	Sous-zone géographique	Vulnérabilité du milieu (E)	Profil de navigation (%) (F)	Valeur de l'impact des substances par catégories d'impacts		Valeur de l'impact du navire sur l'eau (G = D*E*F)	Valeur de l'impact du navire sur les sédiments (G' = D'*E'*F')
				Ecotox marine aquatique D	Ecotox marine sédimentaire D'	Pour l'eau G	Pour les sédiments G'
Haute mer	Zones siège de gires	1	5	1,77E-1	1,70E-1	8,85E-01	8,500E-01
	Zones comportant des courants marins en direction des côtes	2	5	1,77E-1	1,70E-1	1,77E+00	1,70E+00
Eaux portuaires	Port en eau profonde	4	0	1,77E-1	1,70E-1	0,00E+00	0,00E+00
	Port en estuaire	8	30	1,77E-1	1,70E-1	2,83E+01	2,72E+01
	Port sur un fleuve	7	5	1,77E-1	1,70E-1	6,20E+00	5,95E+00
Eaux côtières	Estuaires/Deltas	8	15	1,77E-1	1,70E-1	2,12E+01	2,04E+01
	Lagunes et baies semi-fermées	10	10	1,77E-1	1,70E-1	1,77E+01	1,70E+01
	Côtes rocheuses	5	10	1,77E-1	1,70E-1	8,85E+00	8,50E+00
	Côtes sableuses	6	10	1,77E-1	1,70E-1	1,06E+01	1,02E+01
	Côtes vaseuses	9	10	1,77E-1	1,70E-1	1,59E+01	1,53E+01

Les résultats obtenus donnent les valeurs des impacts du navire sur l'eau et sur les sédiments associés, en fonction des compartiments marins, de leur vulnérabilité, du temps de navigation passé dans chacun, des substances en jeu et de leur toxicité. Ces résultats peuvent se lire selon une unité de « potentiel de toxicité ».

A partir des résultats obtenus, il est possible de les afficher sous forme de graphiques (en histogrammes), de la même façon que le fait un outil d'ACV classique (Figure 4-6).

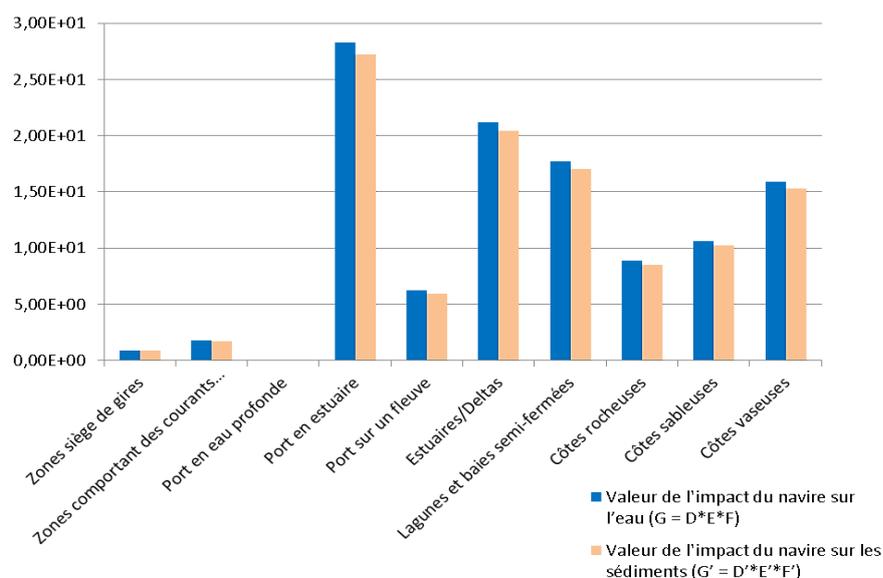


Figure 4-6. Graphique illustrant les impacts d'un navire (en fonction d'un profil de navigation) en potentiel de toxicité sur quelques-unes des nouvelles zones définies.

Les résultats obtenus sont donnés en « potentiel de toxicité » (ce même facteur servant à normaliser les quantités de substances émises dans le milieu). Ce potentiel de toxicité peut être considéré comme étant une nouvelle unité définissant les valeurs d'impacts pour chacune des vingt-quatre catégories d'impact créées (douze pour les compartiments aquatiques et douze autres pour les compartiments sédimentaires associés). La construction de ces nouvelles catégories d'impact les rend compatibles avec la méthode utilisée par CML 2001. En effet, d'une part, les quantités de substances sont normalisées entre elles par le potentiel de toxicité (par le 2,4-DicchloroBenzène pour les écotoxicités prises en compte par CML 2001). D'autre part, chacune des nouvelles catégories d'impacts définies est caractérisée par un facteur de pondération spécifique (l'indice de vulnérabilité couplé au profil de navigation). C'est donc bien un nouvel éco-indicateur, composé de vingt-quatre indicateurs, qui a été développé.

Cette méthodologie proposée constitue le nouvel éco-indicateur marin. Il permet de prendre en compte l'impact de certaines substances hautement toxiques et / ou nocives pour le milieu marin, en discriminant cet impact en fonction de différents sous-compartiments marins. Chaque compartiment caractérisé correspond ainsi à une nouvelle catégorie d'impact (ex : écotoxicité marine en eaux portuaires estuariennes).

Grâce à cet EIM, il devient possible de retracer l'impact de certaines substances (celles prises en compte) dans les différents compartiments marins, et donc d'en identifier la source. Le suivi des réglementations légiférant les émissions de substances dans l'eau devient alors plus simple.

Il faut noter que cette étude ne prend pas en compte, par exemple, des eaux du type côtier récifal, ou côtier à palétuvier. En effet, sachant que CML 2001 considère le compartiment continental européen comme zone-source d'émission de substances, l'étude s'est limitée à caractériser des compartiments marins présents en Europe. Ainsi, toutes les eaux « exotiques » ne sont pas caractérisées. Pour rendre l'EIM plus complet, il serait judicieux de poursuivre cette étude pour répertorier et caractériser l'ensemble des compartiments aquatiques existants.

3. LA CONSTRUCTION DE L'OUTIL DE CONCEPTION, EVALUATION ET AMELIORATION DES NAVIRES : L'OCEAN

Après avoir spécifié les besoins pour le développement de l'OCEAN et créé un nouvel indicateur marin spécifique au produit, nous pouvons nous intéresser à la construction de l'outil et à la façon dont il va traiter les deux points capitaux pour mettre en place l'éco-conception chez DCNS : l'évaluation environnementale basée sur l'ACV et additionnée de l'EIM, et l'amélioration des performances environnementales par l'intégration d'un outil permettant l'aide à la décision environnementale.

3.1. Les modules de l'OCEAN

L'OCEAN est un outil qui doit évaluer et améliorer les performances environnementales des navires.

L'outil peut être schématisé sur le même modèle que la version présentée précédemment (cf. chapitre 3, 3.2, figure 18), avec les modules idoines à l'OCEAN, à la place des modules génériques (Figure 4-7).

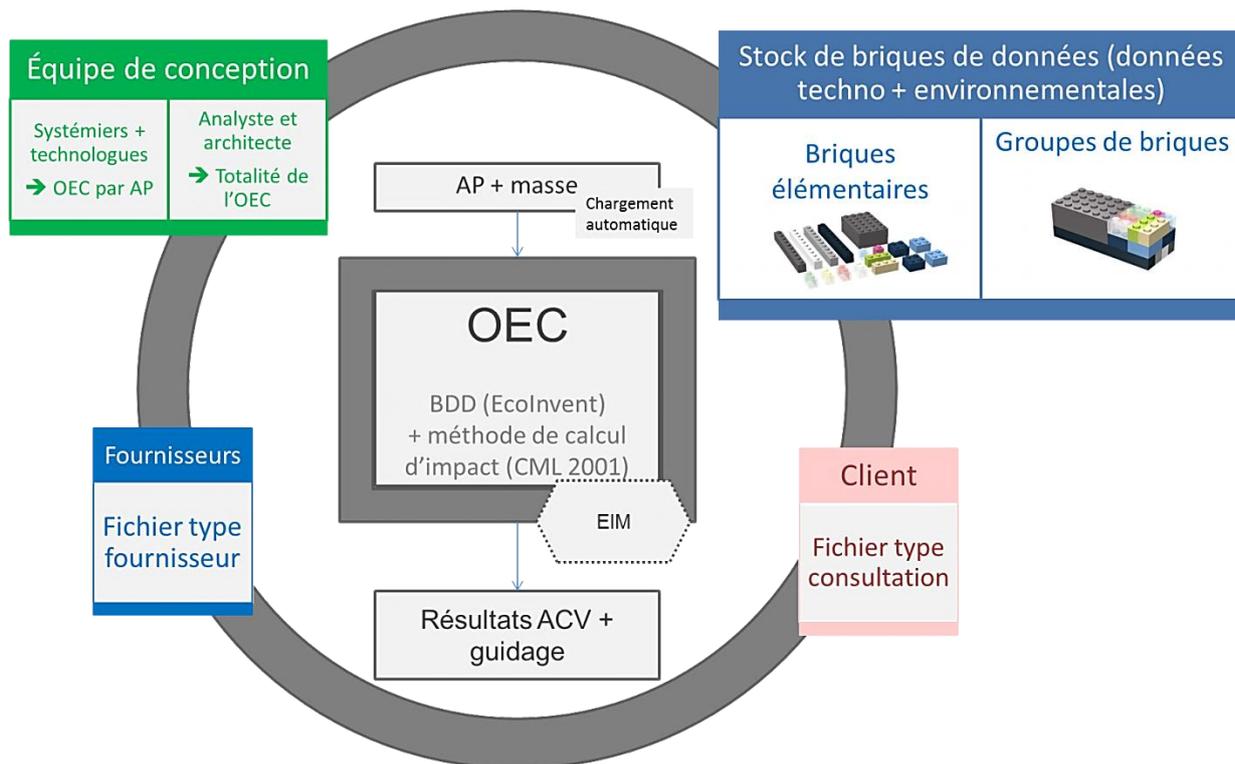


Figure 4-7. Les modules permettant le bon fonctionnement de l'OCEAN. Les utilisateurs sont bien identifiés pour ce produit, les BDD et méthodes de calcul d'impacts définies, et le module spécifique au produit est pris en compte (l'EIM).

L'outil met en interaction :

- Des protagonistes ayant chacun une IHM privilégiée avec :
 - Le client qui accède à une version « épurée » l'OCEAN pour une simple consultation de l'évaluation environnementale, et des améliorations réalisées.
 - Les fournisseurs qui ont accès à l'outil par des fichiers types à remplir. C'est par cet intermédiaire qu'ils remplissent les données concernant leurs produits.
 - L'équipe de conception avec l'architecte, les systémiers, les technologues et l'analyste environnemental. Ils ont un accès plus complet à l'outil qui leur permet de saisir des informations, évaluer et améliorer leurs produits.
- Des BDD dans lesquelles sont stockées les informations concernant les briques élémentaires de données aussi bien que les ensembles de briques.
- Le « cœur » de l'outil permettant :
 - D'évaluer les produits selon la méthode de calcul d'impacts CML 2001, basée sur la BDD Eco Invent, à partir d'une structure en arborescence produit (associée à un bilan de masse). Cette évaluation réalisée selon CML 2001 est perfectionnée pour les écotoxicités marines grâce à l'EIM.
 - D'améliorer les produits grâce à la mise en place d'un échange via les briques de données entre les fournisseurs et les concepteurs.

Tous ces points correspondent à chacun des « modules » de l'outil qui permettent son bon fonctionnement d'un point de vue informatique aussi bien que logisitque.

3.2. L'OCEAN du point de vue développement informatique – quelques informations pratiques.

L'OCEAN est une application client/serveur. L'utilisateur (le client) communique grâce à un navigateur avec un serveur (ou machine distante). Cette communication se sert du protocole HTTP et s'effectue par la saisie d'une URL (Uniform Resource Locator).

L'application a été développée en particulier grâce au langage Java(POO). Elle s'appuie plus précisément sur la plate-forme JEE5 (Java Enterprise Edition 5 – développée sur l'IDE Eclipse).

Cette application utilise une architecture trois tiers, qui permet de séparer l'interface graphique utilisateur (IHM ou Interface Homme/Machine), la logique de traitement de l'application et le serveur hébergeant les données.

L'interface graphique fonctionne sur le poste client qui utilise un navigateur type tels que : Internet Explorer (IE), Mozilla (Fire Fox), Google chrome, ou encore Opera (*Figure 4-8*). L'interface graphique utilise les langages HTML/CSS pour l'aspect statique et JavaScript pour l'aspect dynamique. Le tracé des graphiques (histogrammes) se fait à partir d'une API écrite en java.

La logique de traitement est réalisée par un serveur d'application type Apache/Tomcat qui nécessite une machine virtuelle pour fonctionner (JRE / JDK).

Enfin, l'accès aux ressources (persistance des données) utilise un Système de Gestion des Bases de Données (SGBD) de type MySql (5.1).

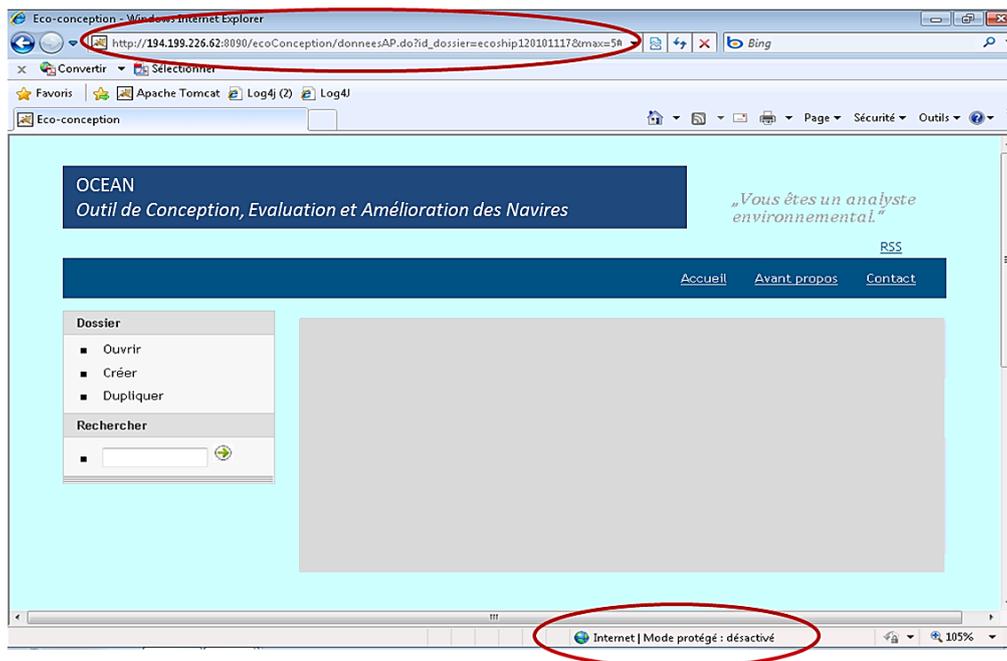


Figure 4-8. L'IHM de l'OCEAN : un outil fonctionnant sur un navigateur.

3.3. L'évaluation environnementale

3.3.1 Un calcul d'impact similaire à celui réalisé par un logiciel d'ACV

Pour réaliser l'évaluation environnementale, l'outil se base sur l'ACV en utilisant la méthode de calcul d'impact CML 2001 et la base de données Eco Invent⁶. Le calcul d'impact réalisé est le même que celui qui serait réalisé avec tout autre logiciel d'ACV complète. Il se résume simplement en des additions et des multiplications de facteurs. Les substances contribuent à des modules (par exemple, le fer qui contribue à la fabrication d'1kg d'acier), qui eux-mêmes contribuent aux différentes catégories d'impacts (la fabrication de ce kilo d'acier qui contribue à la déplétion abiotique).

La fiabilité des résultats évalués a été testée en comparant les résultats obtenus pour un même « produit test » modélisé dans l'OCEAN et dans SimaPro. Ce produit se compose de :

- 11kg de "Sheep for slaughtering, live weight, at farm/US S"
- 12kWh de "Electricity mix/AT S"
- 11MJ de "Cooling energy, natural gas, at cogen unit with absorption chiller 100 kW/CH S"

Les saisies des données se présentent des façons suivantes (Figure 4-9) :

⁶ Le choix de la BDD s'est porté sur Eco Invent (version 2.2, en 2010) car c'est la BDD la plus complète.

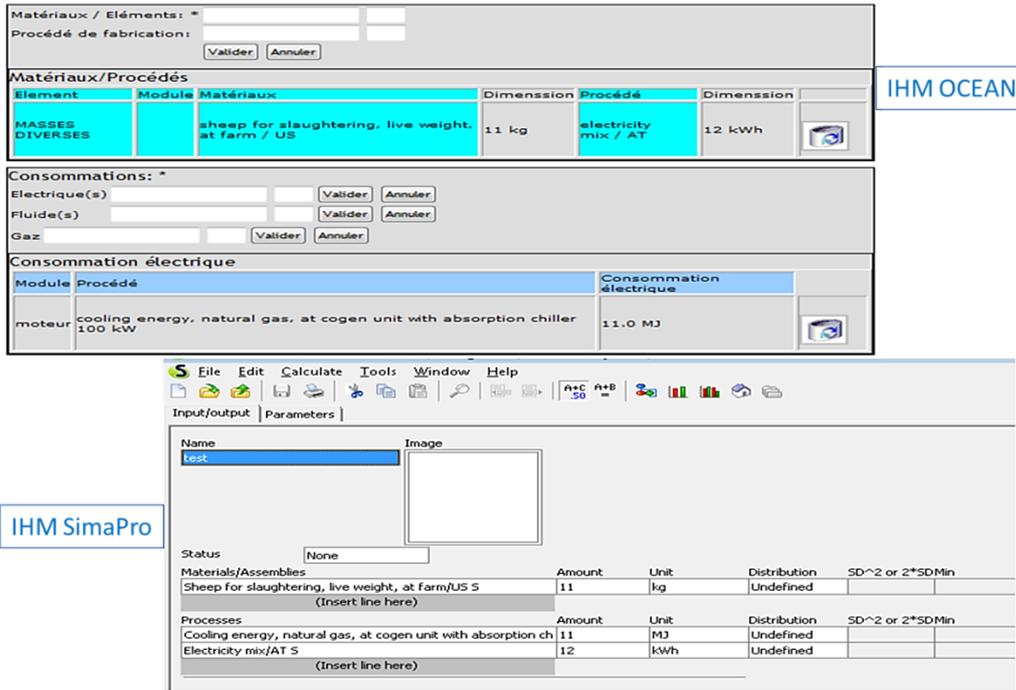


Figure 4-9. Les interfaces de saisie les données dans l'OCEAN et dans SimaPro.

En modélisant ce produit sous SimaPro, les résultats obtenus sont les suivants (Figure 4-10):

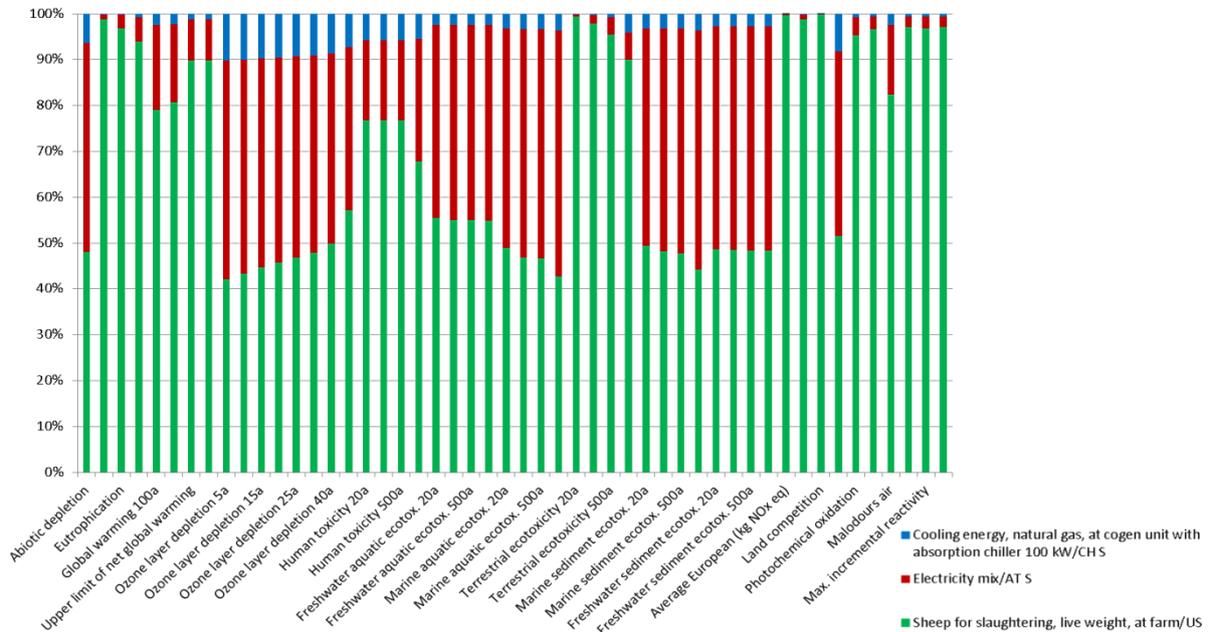


Figure 4-10. Résultats de l'ACV du produit test sous SimaPro, par la méthode de calcul d'impact CML 2001

L'exhaustivité des catégories d'impact prises en compte par la méthode CML 2001 rend le graphique difficilement lisible, et donc les résultats peu interprétables. L'affichage de ces catégories d'impact a été réduit dans l'OCEAN à 13 catégories d'impacts qui sont :

- La déplétion abiotique
 - L'acidification
 - L'eutrophisation
 - Le potentiel réchauffement climatique à 500 ans
 - La déplétion de la couche d'ozone à 500 ans
 - La toxicité humaine à 500 ans
 - Les radiations ionisantes
 - L'oxydation photochimique
 - L'écotoxicité terrestre à 500 ans
 - L'écotoxicité aquatique d'eau douce à 500 ans
 - L'écotoxicité aquatique d'eau marine à 500 ans
 - L'écotoxicité sédimentaire d'eau marine à 500 ans
 - L'écotoxicité sédimentaire d'eau douce à 500 ans
- } Indicateurs classiques
- } Indicateurs privilégiés pour le milieu aquatique

Le choix s'est porté sur des indicateurs classiquement retrouvés dans les études ACV, associés à ceux qui décrivent mieux les impacts sur le milieu aquatique. Ce sont ces catégories-là qui sont affichés dans l'OCEAN. A ces catégories choisies sont additionnées les nouvelles définies par l'EIM.

Les résultats obtenus avec SimaPro « filtrés » suivant les mêmes catégories d'impact que celles sélectionnées pour l'OCEAN, peuvent alors être comparés avec les résultats obtenus avec l'OCEAN (*Figure 4-11*) :

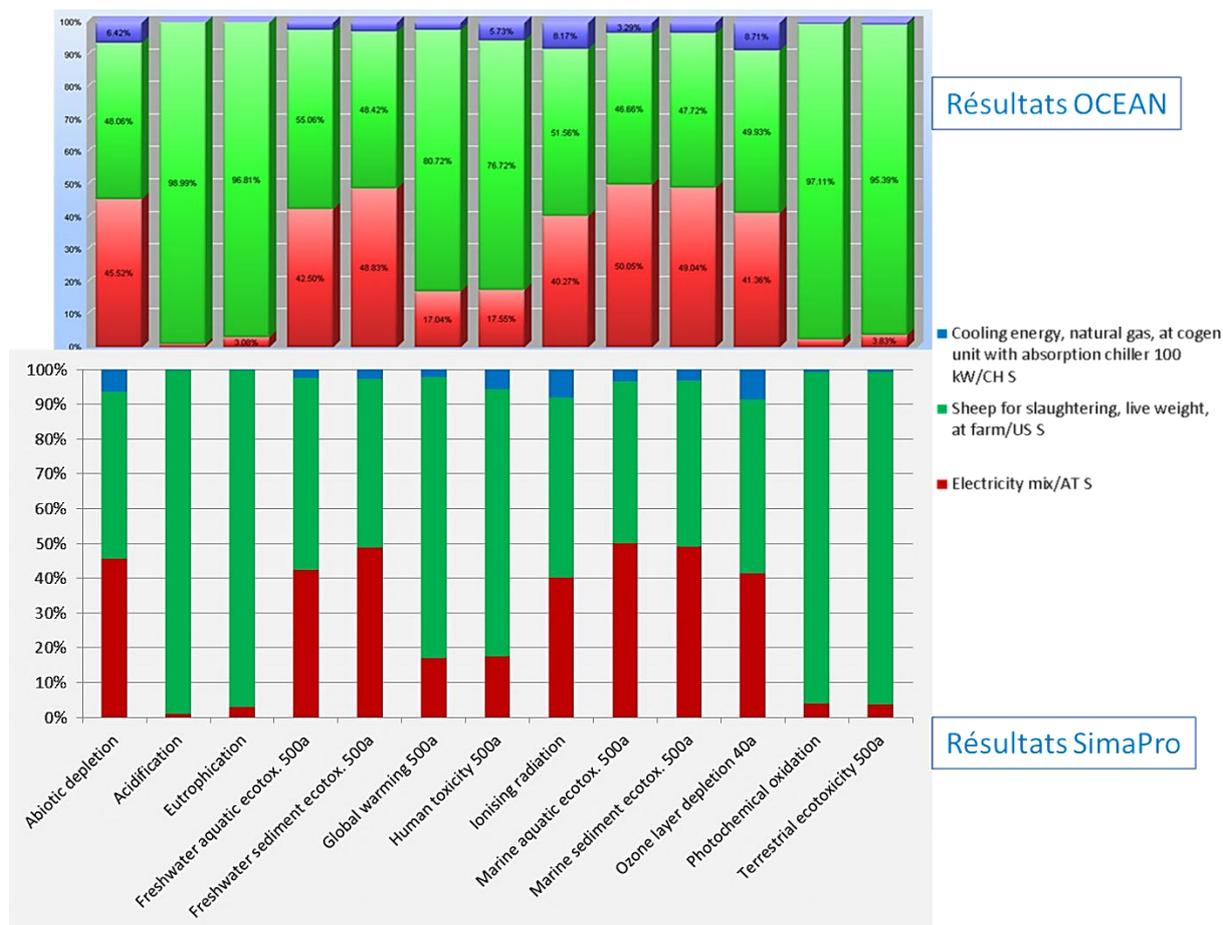


Figure 4-11. Comparaison des résultats obtenus selon SimaPro et l’OCEAN pour un même produit modélisé : les calculs donnent les mêmes valeurs d’impact. Pour une meilleure lisibilité, les résultats obtenus avec SimaPro ont été triés en fonction des catégories d’impact utilisées dans l’OCEAN.

On constate que les résultats sont identiques, autant en répartition des contributions aux impacts qu’en quantité de contribution.

Il faut cependant noter que le résultat de ces calculs n’est pas rigoureusement identique lorsqu’on observe les valeurs d’impacts. En effet, l’OCEAN n’effectue aucun arrondissement des valeurs, contrairement à SimaPro, d’où une très légère différence des résultats, lorsque les résultats sont étudiés jusqu’à quatre chiffres significatifs après la virgule (Figure 4-12).

Catégorie d'impact	Unité	Total
Abiotic depletion	kg antimony-Eq	3.5557e-02
Acidification	kg SO2-Eq	8.6425e-03
Eutrophication	kg PO4-Eq	1.0428e-02

Résultats OCEAN

Impact category	Unit	Electricity mix/AT S
Abiotic depletion	kg Sb eq	0,03555651
Acidification	kg SO2 eq	0,008528312
Eutrophication	kg PO4-- eq	0,010432592

Résultats SimaPro

Figure 4-12. Les valeurs d’impact comparées entre SimaPro et OCEAN, pour le module « electricity mix/AT S »

3.3.2 Une simplification de la saisie des données

a. La possibilité de charger l'arborescence produit et le bilan de masse associé

Comme cela a précédemment mentionné (cf. chapitre 2, 3.2.1.a), saisir une arborescence pouvant faire quelques soixante mille lignes s'avère être une étape particulièrement peu attrayante, sachant que de tels documents sont déjà disponibles. Une des fonctionnalités de l'OCEAN est donc de pouvoir charger de façon semi-automatique l'AP et éventuellement, le bilan de masse associé.

Pour ce faire, il suffit de disposer d'un fichier Excel dans lequel sont présentes l'AP et les masses associées (Figure 4-13). Cette AP n'a besoin d'être chargée qu'une seule fois, lors de la création d'un nouveau projet par exemple. Cette action sera typiquement réalisée par l'analyste environnementale ou par l'architecte.

	A	B	C
	Niveau d'AP	Nomenclature	Masse (t)
1	1	NAVIRE	1625
2	2	SYSTEME A	940
3	3	Sous-système A1	425
4	3	Sous-système A2	455
5	4	Famille d'éléments A2a	50
6	4	Famille d'éléments A2b	250
7	4	Famille d'éléments A2c	155
8	5	Eléments A1c1	100
9	5	Eléments A1c2	25
10	5	Eléments A1c3	30
11	4	Famille d'éléments A2d	35
12	3	Sous-système A3	60
13	2	SYSTEME B	685
14	3	Sous-système B1	590
15	4	Famille d'éléments A2a	145
16	4	Famille d'éléments A2B	445
17	5	Eléments A2B1	95
18	5	Eléments A2B2	350
19	3	Sous-système B2	95
20	4	Famille d'éléments B2a	25
21	4	Famille d'éléments B2B	70
22			

Figure 4-13. Exemple d'un fichier type pouvant être directement téléchargé dans l'OCEAN. L'utilisateur n'a qu'à renseigner les cellules correspondant aux premières lignes : du niveau d'AP, de la nomenclature et de la masse.

Pour le chargement de l'AP, il suffit de renseigner les cellules correspondant aux premières lignes du niveau d'AP, de la nomenclature et de la masse.

Une fois que cette AP est chargée, les utilisateurs peuvent naviguer à travers les différents niveaux, et les différents éléments (Figure 4-14).

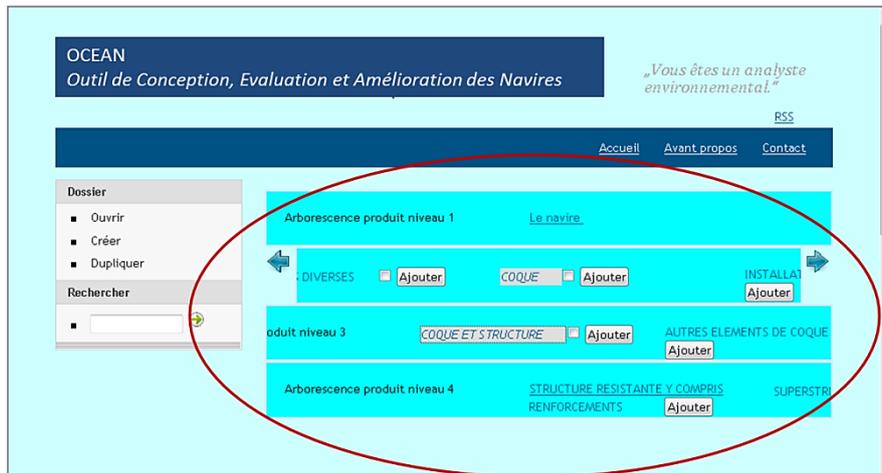


Figure 4-14. Accès à l'AP du navire dans l'IHM.

b. Une Navigation facilité et plus intuitive

Lors du développement de cet outil, un des points clé le plus important a été de rendre l'IHM plus conviviale qu'un outil d'ACV type SimaPro, autant dans son interface que dans son utilisation. L'utilisateur doit être amené naturellement à saisir les données appropriées. Pour cela, les informations ont été compartimentées :

- Selon les phases de vie : chaque phase de vie est elle-même redécoupée en sous-phases de vie, avec un affichage en onglet (Figure 4-15). Ce redécoupage permet de cibler des informations qui sont à remplir par les différents protagonistes.

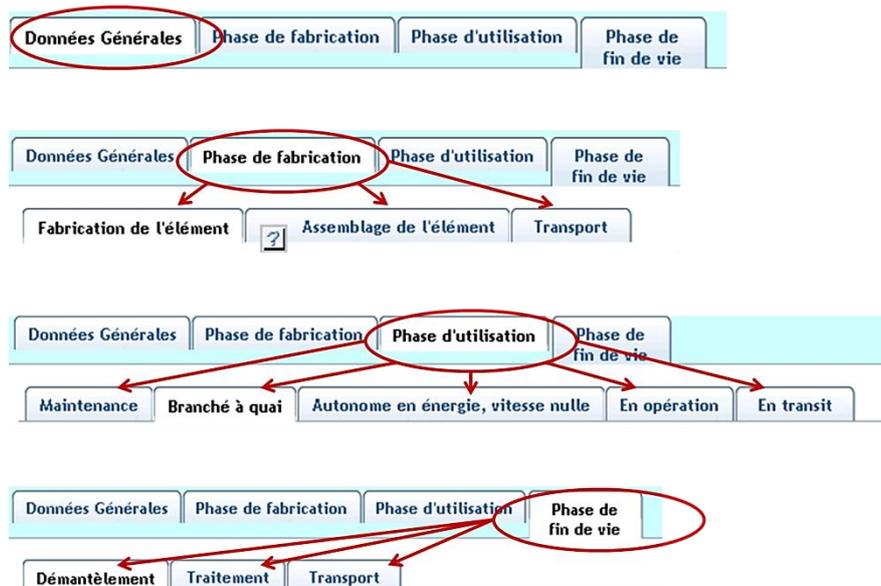


Figure 4-15. Des onglets pour chaque phase et sous-phase de vie : une IHM plus intuitive

– Selon le type de données à saisir. En effet, chaque onglet comporte différents espaces de saisie, en fonction du type de donner. Masses, matériaux, procédés utilisés, consommations (en énergies, en fluides, ou bien en gaz), et rejets associés sont bien différenciés (Figure 4-16).

The image shows a software interface with a multi-tabbed structure. At the top, there are four main tabs: 'Données Générales', 'Phase de fabrication', 'Phase d'utilisation', and 'Phase de fin de vie'. Below these, under the 'Phase de fabrication' tab, there are three sub-tabs: 'Fabrication de l'élément', 'Assemblage de l'élément', and 'Transport'. The 'Fabrication de l'élément' sub-tab is currently selected and active. It contains several sections for data entry:

- Créer un nouveau module:** A checkbox labeled 'Nouveau Module'.
- Matériaux / Eléments: *** Two input fields for materials and elements, with 'Valider' and 'Annuler' buttons below.
- Procédé de fabrication:** One input field for the manufacturing process, with 'Valider' and 'Annuler' buttons below.
- Consommations: *** Three rows for consumption: 'Electrique(s)', 'Fluide(s)', and 'Gaz'. Each row has two input fields and 'Valider' and 'Annuler' buttons.
- Rejets associés: *** Two rows for associated emissions: 'Fluide(s)' and 'Gaz'. Each row has two input fields and 'Valider' and 'Annuler' buttons.

Figure 4-16. Les informations à renseigner dans chacun des onglets. Ce format est le même pour l'ensemble des onglets, sauf pour les onglets concernant les modes opérationnels, qui ne comportent que les consommations et rejets associés.

Ce compartimentage multiple a quelques avantages :

– Il facilite la lecture et donc la compréhension de ce qui doit être saisi par l'utilisateur. Ce découpage, toujours réalisé lors d'une ACV, n'est pas présent concrètement dans les outils d'ACV. Toutes les informations sont regroupées (mis à part les matériaux) (Figure 4-9), ce qui ne facilite ni l'interprétation, ni l'amélioration du produit lorsque l'utilisateur est novice en matière d'ACV.

– Il permet de créer des fichiers types à destination des fournisseurs. Ces derniers rempliront l'équivalent de l'onglet « fabrication de l'élément » de la phase de fabrication.

– Il permet d'établir des règles d'allocation d'impacts. Typiquement, pour le transport des éléments, les données ne sont pas (encore) connues. Dans ces conditions, l'architecte, ou l'analyste, pour l'ensemble du navire, va pouvoir poser des hypothèses en supposant que pour les composants venant de fournisseurs, 20% arrivent en avion, 50% en camion et 30% en train. Cette règle définie pour le niveau AP1 pourra s'appliquer aux niveaux inférieurs grâce à une

allocation par la masse de l'élément considéré. Cette logique fonctionne pour le transport lors de la fabrication et de la FdV, pour les procédés d'assemblage sur le chantier, et pour le démantèlement et le traitement spécifique des éléments en FdV. Cette fonction permet de pallier à un manque de connaissance de la donnée, en la rendant homogène à l'ensemble du navire. A terme, l'idéal sera de renseigner ces données précisément, en particulier si l'amélioration veut être portée sur ces thématiques.

Toutes les informations contenues dans ces onglets, pour un même élément, correspondent aux données devant constituer une brique de données.

Un accès à la BDD Eco Invent est disponible pour saisie des informations. Effectivement, pour constituer les briques de données, il faut renseigner les informations qu'elles contiennent qui correspondent à des modules Eco Invent (*Figure 4-17*).

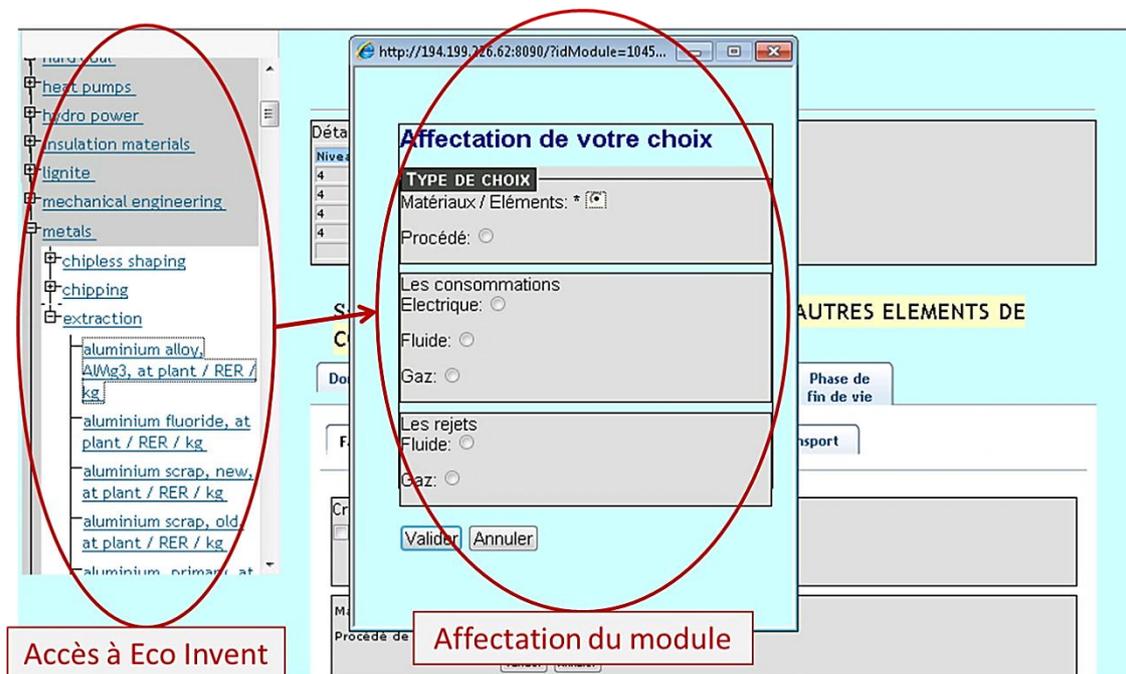


Figure 4-17. L'accès à la BDD Eco Invent, et l'affectation du module sélectionné.

Dans un premier temps, créer les briques est une étape indispensable. *In fine*, une fois que les briques « courantes » auront été créées, l'utilisateur aura moins besoin d'aller chercher dans les BDD (*Figure 4-18*). Il fera appel aux briques de données la majorité du temps, et ne viendra chercher des informations dans la BDD que s'il lui faut créer de nouveaux modules.

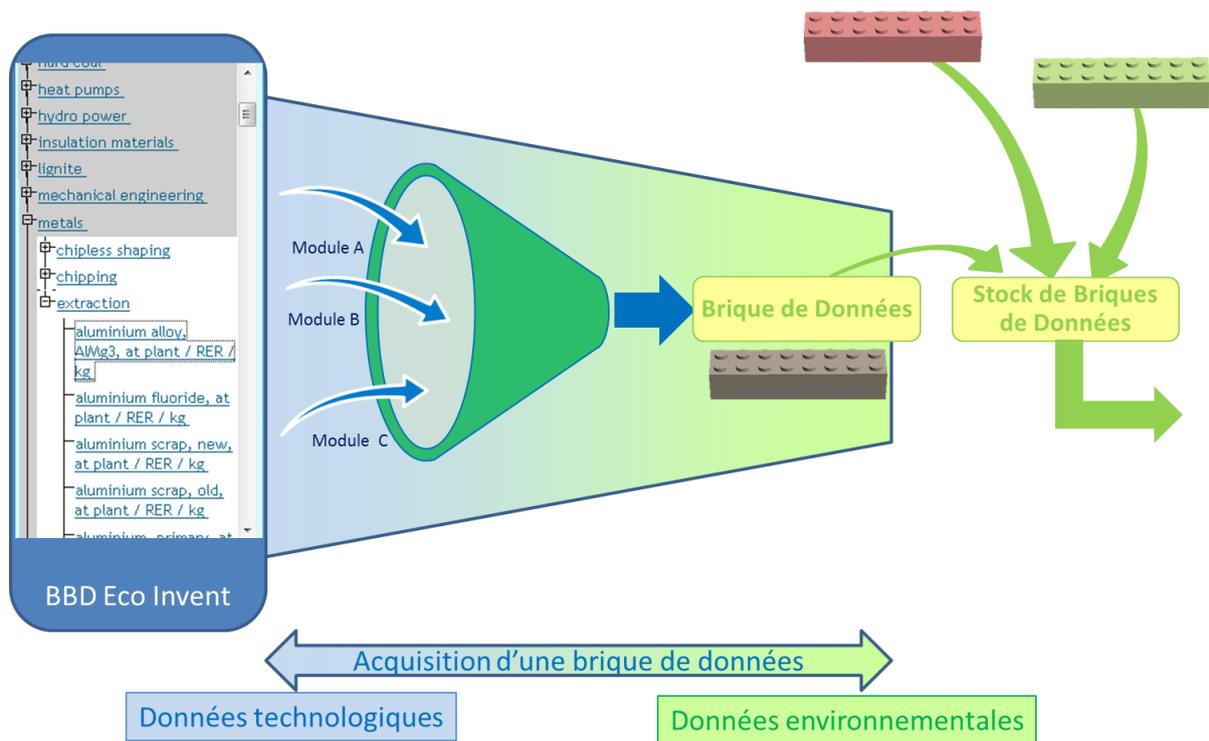


Figure 4-18. Des BDD Eco Invent aux Briques de Données : une « transformation des données technologiques en données environnementales ».

Aujourd'hui, la BDD Eco Invent est intégrée telle quelle dans l'outil, mais pour faciliter sa lecture et son utilisation, cette BDD devrait être réorganisée sur le même schéma que les types d'informations à saisir. Actuellement, la BDD sépare les matériaux du reste des données, mais l'idéal pour l'outil dans sa version commercialisable sera de les reclasser en : Matériaux, procédés, consommables, ... Cela permettra par exemple, de ne pas saisir une consommation d'énergie en lieu et place d'un matériau, et *vice-versa*.

3.3.3 Des résultats du type ACV

Une fois l'ensemble des données saisies dans le respect des normes ISO relatives à l'ACV, le calcul d'impact peut être réalisé. Les résultats peuvent être affichés selon deux modes au choix de l'utilisateur (Figure 4-19) :

- En fonction des phases de vie
- En fonction de l'AP

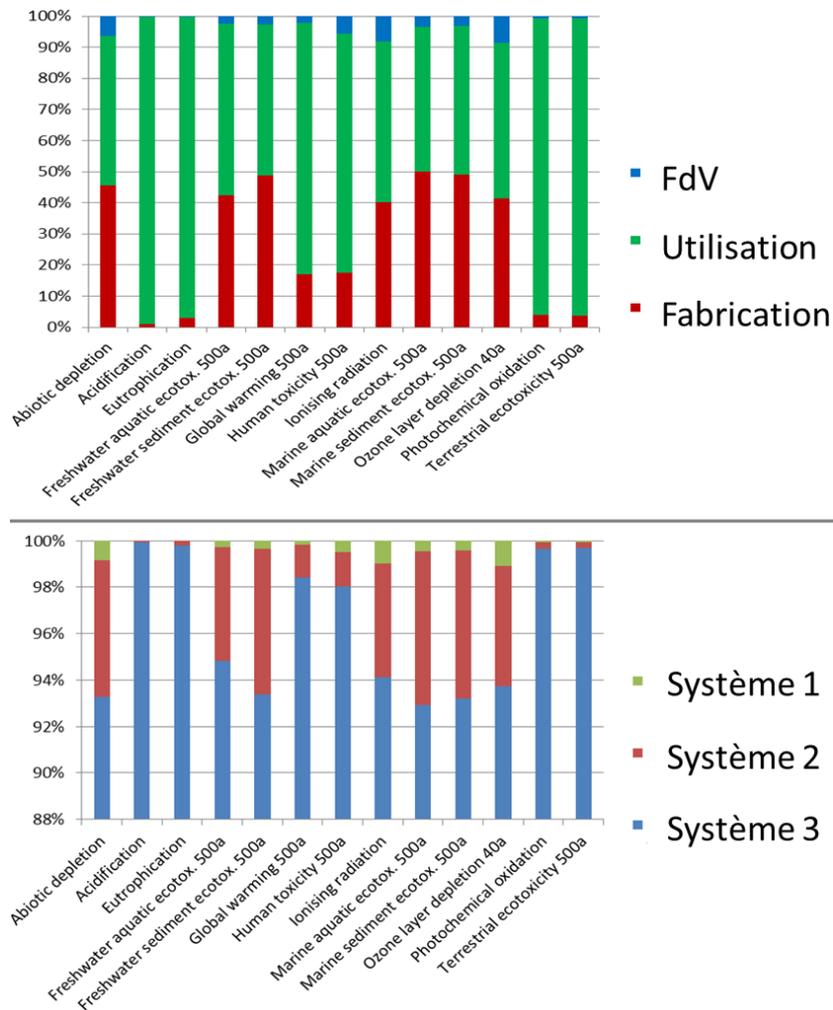


Figure 4-19. La possibilité d'afficher les résultats soit par phases de vie, soit par AP.

Ce double mode permet de focaliser sur un élément de l'AP source d'impact (une pompe par exemple) ou une sur une phase de vie impactante (en mode opérationnel lors de l'utilisation par exemple).

L'ensemble des résultats s'affiche sous forme d'histogrammes. Il est aussi possible de les visualiser sous forme de tableaux de données, avec pour chaque contributeur, les valeurs d'impact par catégories d'impact.

A chaque calcul d'impact, deux graphiques sont affichés :

- Un graphique donnant les impacts évalués selon la méthode de calcul d'impact CML 2001, affichés en valeurs caractérisées, i.e. à 100% (Figure 4-20).

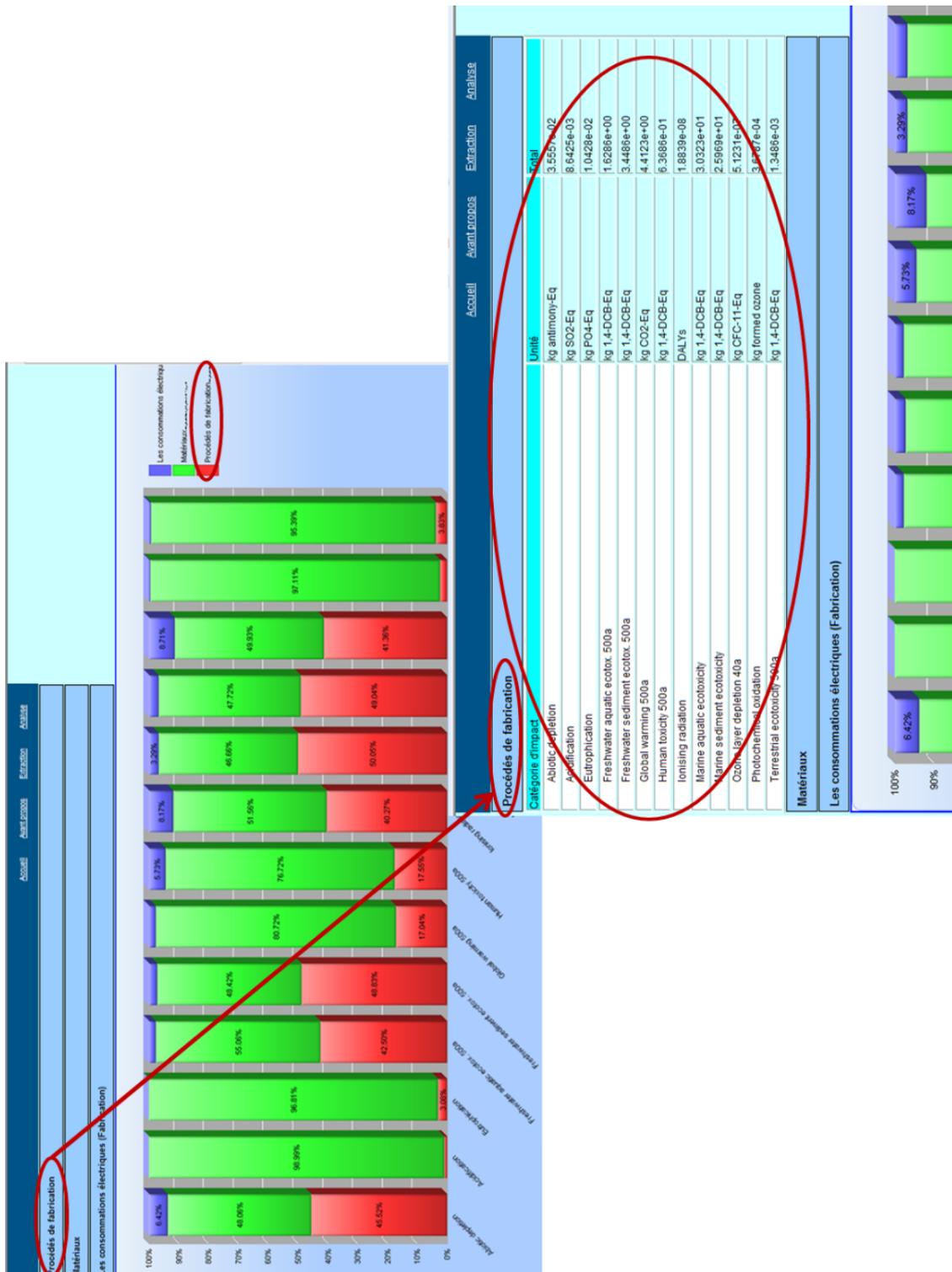


Figure 4-20. La possibilité de visualiser les résultats sous forme d'histogrammes et de tableaux de valeurs.

– Un graphique donnant les impacts évalués selon l'EIM. Les valeurs d'impact étant toutes calculées par rapport à un potentiel de toxicité, elles n'ont pas besoin d'être affichées en pourcentage (Figure 4-21). Ces résultats sont eux aussi disponibles sous tableau associé.

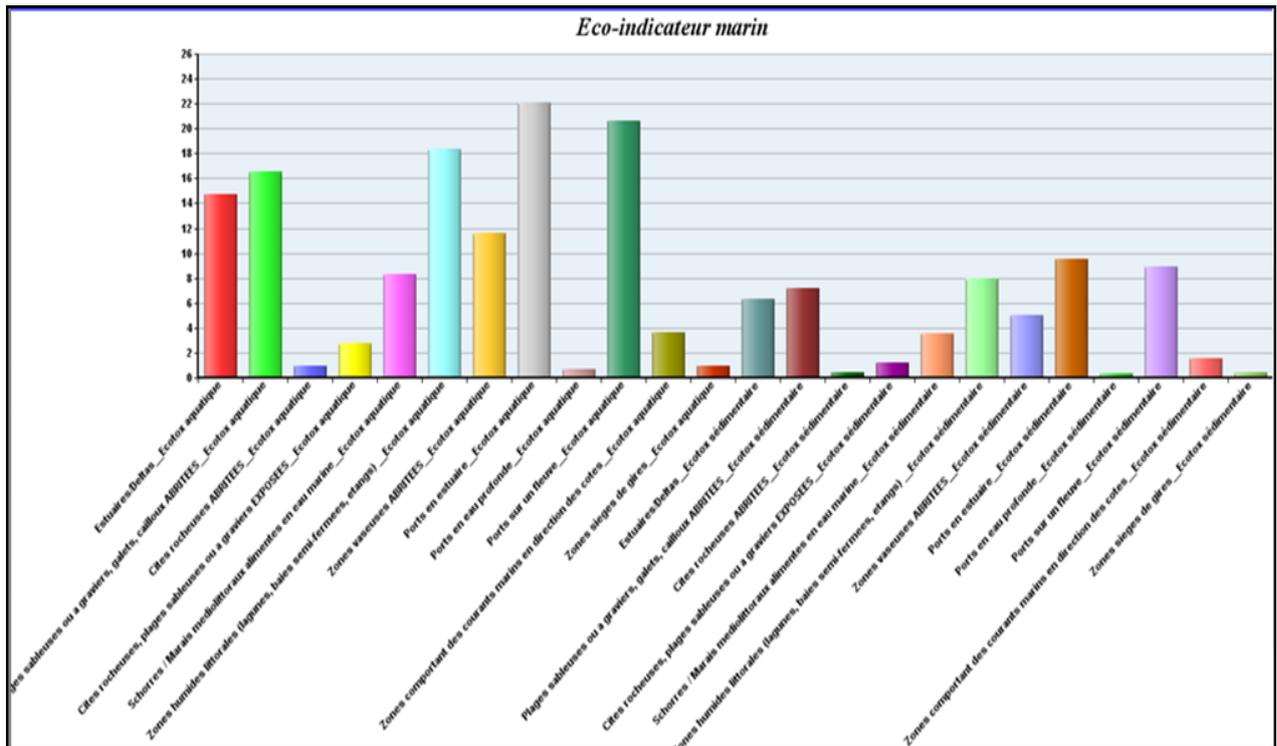


Figure 4-21. Le résultat graphique de l'évaluation par l'EIM associé à l'évaluation des impacts par CML 2001

Il est aussi possible de tracer les impacts pour en trouver leur source, qu'elle soit une phase (ou sous-phase) de vie, ou un élément de l'AP (Figure 4-22).

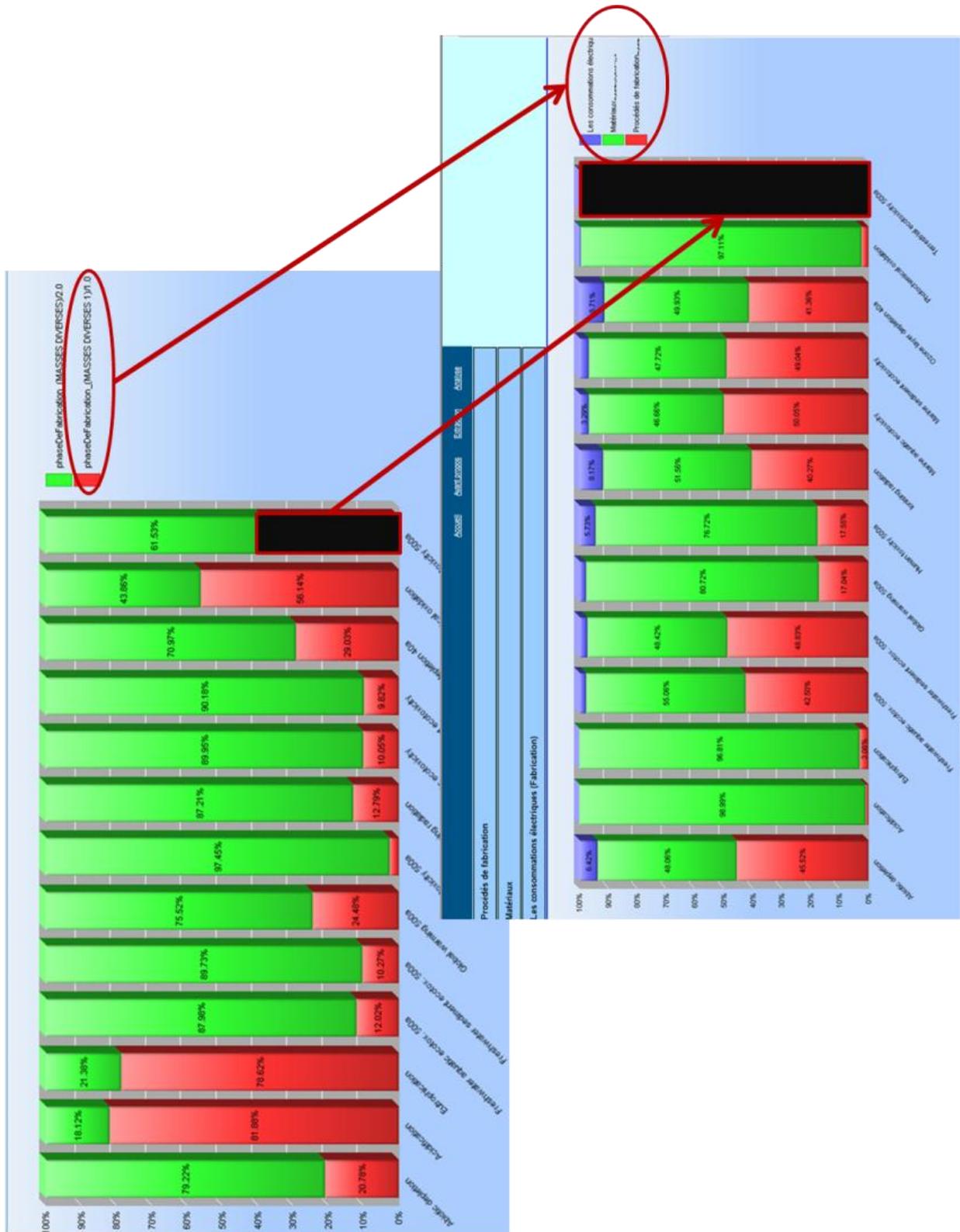


Figure 4-22. La possibilité de tracer les impacts : en cliquant sur un contributeur (la phase de fabrication ici, avec le rectangle noir du haut), l’outil affiche un nouveau graphique montrant l’ensemble des contributeurs inférieurs (les matériaux + les procédés + les consommations ici, avec le rectangle noir du bas).

En cliquant sur un des impacts, l'utilisateur peut en décortiquer les contributeurs et remonter à la source de cet impact. Dans cette démarche, et pour visualiser les contributeurs les plus importants, l'utilisateur est guidé. La méthode permettant de classer les contributeurs est celle présentée précédemment (cf. chapitre 3, 2.2 figure 11). A chaque visualisation des impacts, cette aide à l'analyse est disponible (Figure 4-23).



Figure 4-23. Le guidage de l'utilisateur vers les contributeurs les plus impactants.

Dans l'optique d'une éventuelle mise en forme particulière (graphiques camembert, en radar,...), l'ensemble des résultats sont exportables vers des fichiers Excel.

Grâce à l'OCEAN, il est possible d'évaluer les impacts d'un navire selon la méthode de calcul d'impact CML 2001 associée à l'EIM qui étudie plus spécifiquement les impacts sur les compartiments marins. Ces résultats et leur affichage sont très modulables. L'utilisateur peut les visualiser par phases de vie ou par éléments d'AP contributifs. A chaque fois, un guide lui indique la hiérarchisation de ces contributeurs.

3.4. Les moyens d'amélioration de la en conception et d'aide à l'éco-conception

Dans la démarche proposée, il est possible d'améliorer le produit à chaque étape de la conception. Mais cette approche doit se faire en deux moments (cf. chapitre 3, 2.2.3) :

- Dans un premier temps, les produits existants doivent être évalués, pour servir de références, mais aussi et surtout, pour commencer à constituer le stock de briques de données. Une fois que ces briques sont disponibles, il est envisageable de leur en trouver des solutions alternatives et de les comparer aux références. Il peut alors y avoir des améliorations des produits. Tous les tests effectués sont archivés dans des BBD qui constituent des stocks de briques de données.
- Ce n'est que lorsque ces briques ont été créées, testées et éventuellement comparées, qu'elles peuvent être utilisées lors de la saisie des données, en tant qu'outil d'aide à la décision.

3.4.1 *La nécessité d'une bonne définition de l'UF*

Dans l'amélioration autant que dans l'aide à la conception, le principe de base sur lequel s'appuie l'utilisateur, c'est la comparaison. Cette comparaison peut s'effectuer entre des phases de vie ou des éléments de l'AP, à titre « informatif », i.e. pour hiérarchiser les contributeurs.

Mais cette comparaison est surtout intéressante pour évaluer deux (ou plus) options technologiques l'une par rapport à l'autre. Et pour cela, il est indispensable qu'elles aient la même UF. Comme cela a été démontré précédemment (cf. chapitre 3, 2.2), la connaissance métier intervient particulièrement dans la définition d'une UF. Elle est variable en fonction du niveau de l'AP observé, et ne peut donc pas se caractériser par un mode de définition unique. L'approche dans l'OCEAN pour définir une UF en vue d'une comparaison s'effectue selon les étapes suivantes (Figure 4-24) :

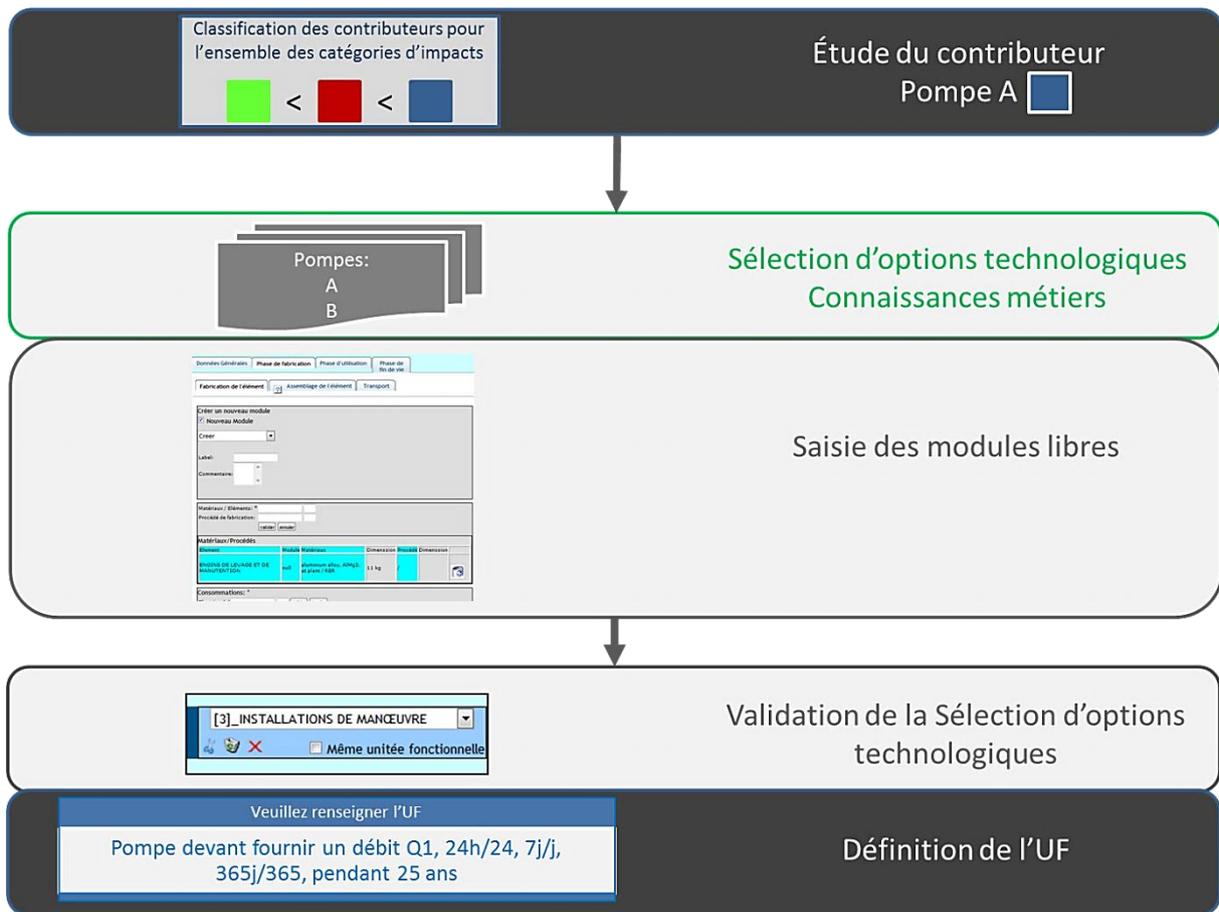


Figure 4-24. Les étapes permettant la définition d'une UF.

Pour que l'utilisateur puisse renseigner une UF, il faut qu'il sache quelles options il veut modéliser (options technologiques, modes d'utilisation différents). La sélection de ces options est le résultat de la connaissance métier que possède l'utilisateur. Si une de ces options n'est pas déjà modélisée dans l'outil, il doit la saisir, en créant un nouveau module, qui sera un module dit libre car non inclus dans l'AP. C'est lorsqu'il sélectionne les options à comparer que l'outil demande de valider que l'UF est la même. Si c'est le cas, il peut alors renseigner cette UF textuellement.

C'est donc en obligeant d'une certaine façon l'utilisateur à renseigner son choix, que l'UF peut être saisie.

3.4.2 L'aide à l'amélioration du produit

Lorsque l'utilisateur a calculé les impacts de son produit, la hiérarchisation des contributeurs (par phase de vie ou éléments de l'AP) lui permet de cibler les plus impactants, pour essayer d'en améliorer la conception. Il est ainsi amené à saisir de nouvelles technologies dans l'OCEAN, en modules « libres », non rattachés à l'AP. Ces modules libres sont créés de la même manière que les éléments de l'AP, et contiennent les mêmes informations (matériaux, procédés,...). Après la saisie de

l'UF, une comparaison détermine quelle est la meilleure option technologique d'un point de vue environnemental. L'utilisateur a alors la possibilité de la choisir pour l'insérer dans l'AP du navire (Figure 4-25).

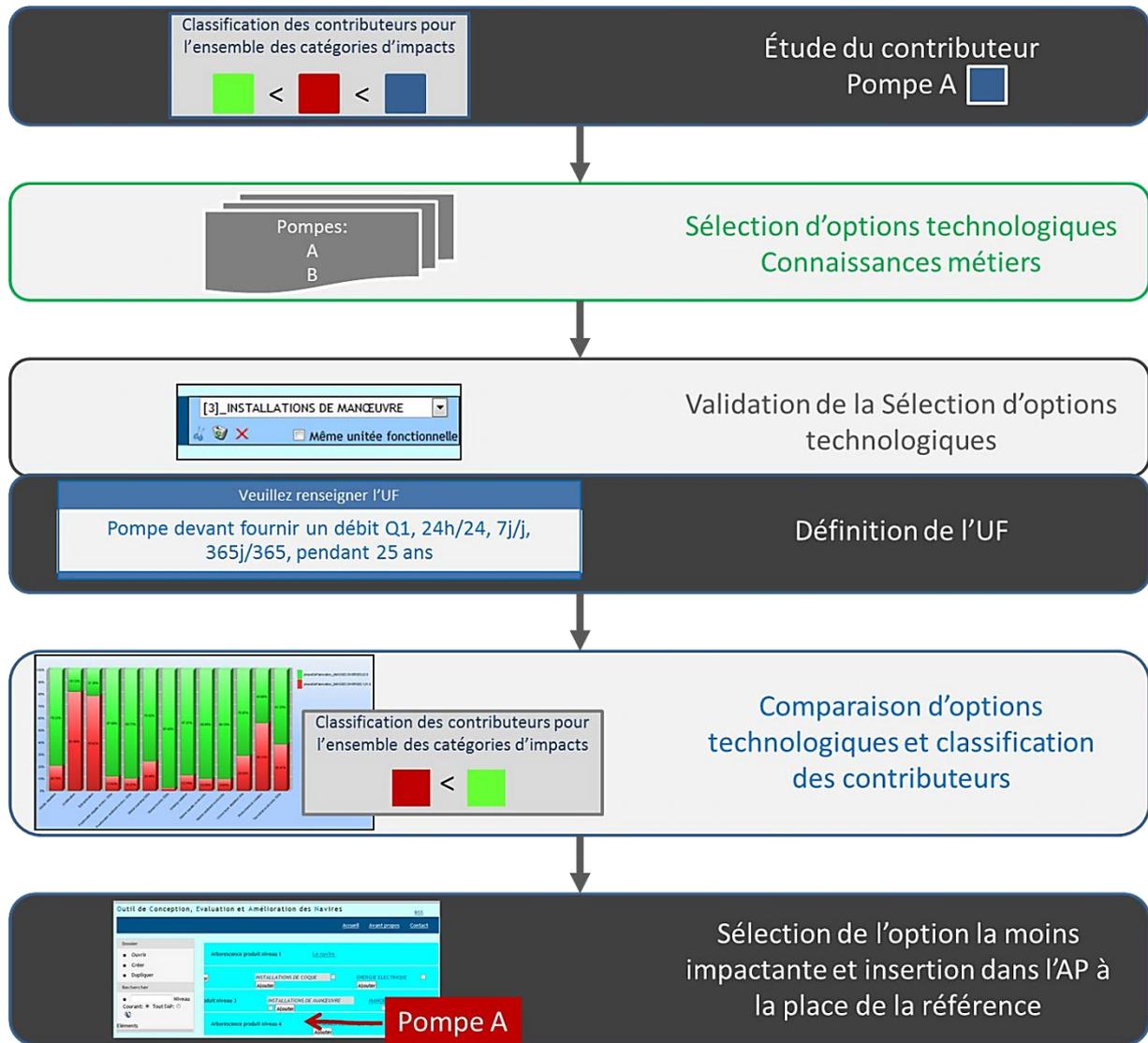


Figure 4-25. Les étapes permettant l'amélioration d'un élément.

Les évaluations simples et les comparaisons permettent d'accroître le stock de briques de données. A chaque évaluation, les modules testés sont archivés en vue d'une capitalisation des informations.

3.4.3 L'aide à l'éco-conception du produit

L'aide à la conception ne peut exister que si des éléments ont déjà été testés. En effet, pour que l'utilisateur puisse accéder au stock de briques de données, il faut que ce dernier ait été constitué, au moins en partie. Dans le cas contraire, il n'existe pas d'accès disponible dans l'espace dédié dans l'IHM. La création de ce stock se fait selon les étapes suivantes (Figure 4-26).

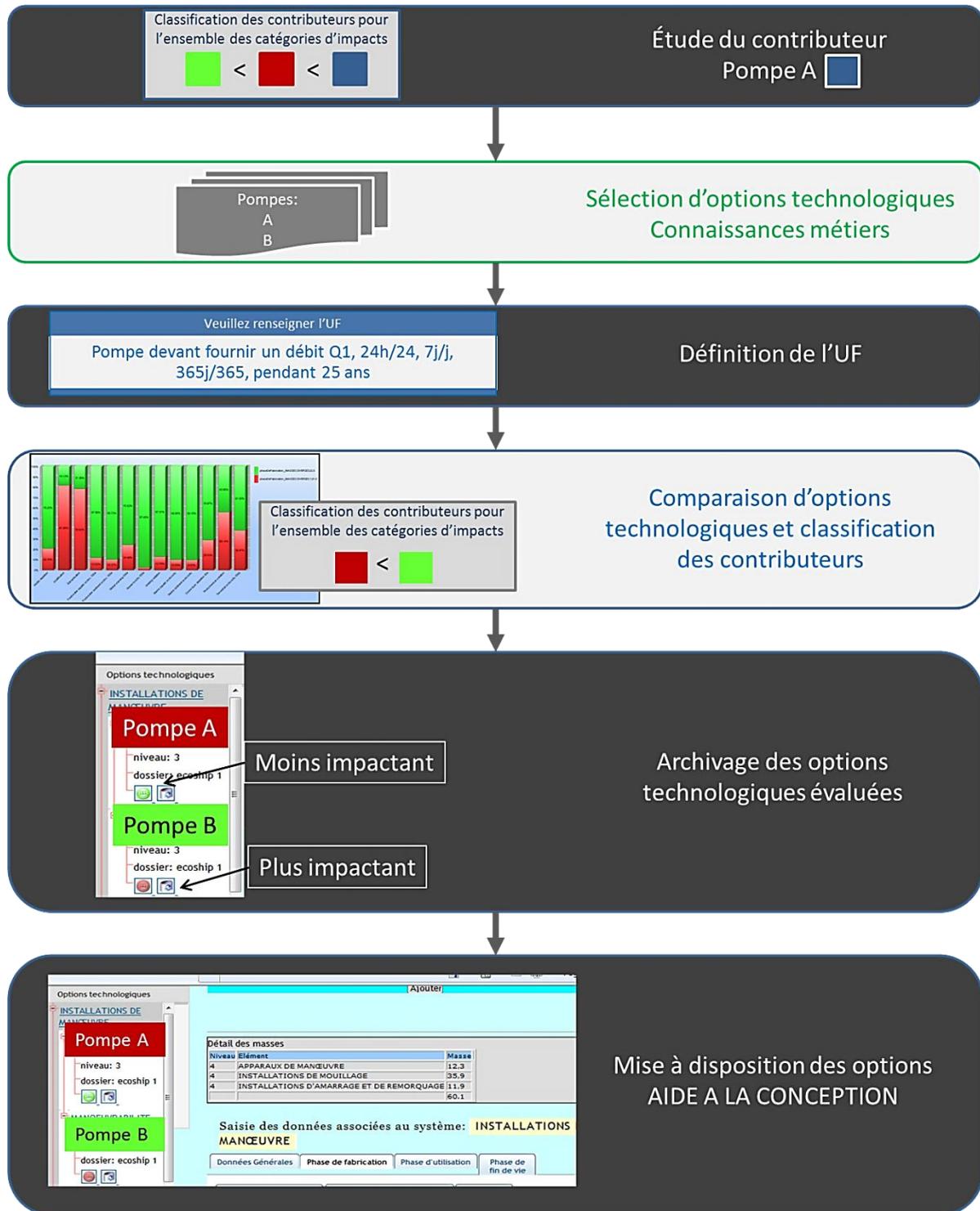


Figure 4-26. Les étapes permettant de mettre à disposition d'aide à la conception.

Une fois que ce stock de briques de données est disponible, l'utilisateur peut être aidé lors de la conception de son produit. Cette aide se présente comme sur les figures suivantes (*Figure 4-27*, *Figure 4-28*, *Figure 4-29*) :

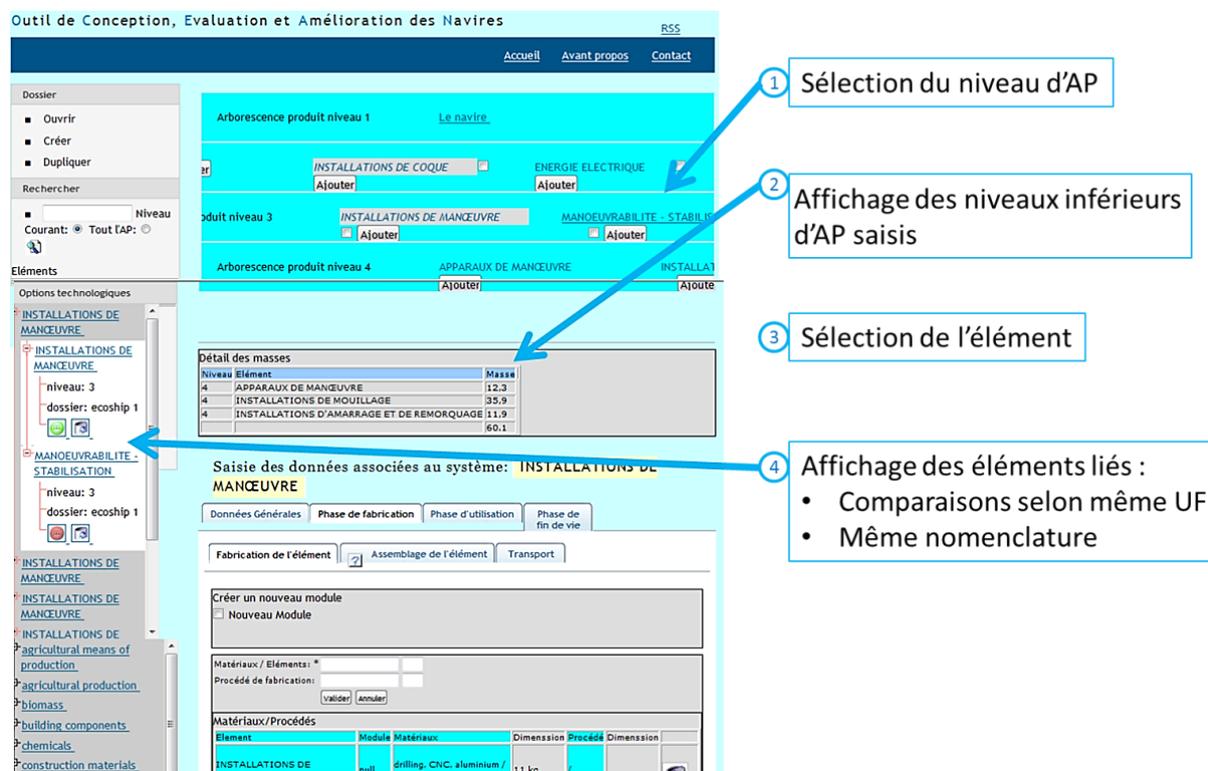


Figure 4-27. Les étapes 1 à 4 permettant l'aide à la conception.

Les premières étapes (1 à 4) (*Figure 4-27*) permettent à l'utilisateur de visualiser s'il existe ou non des options technologiques disponibles pour son composant. Il visualise ainsi l'ensemble des briques archivées (classement par nomenclature et par ordre alphabétique) qui auront toutes au moins été évaluées. Les briques qui auront aussi été comparées seront alors disponibles d'accès, i.e. qu'il est possible d'accéder à leur fiche contenant les informations précédemment saisies.

Ensuite, deux cas peuvent se présenter :

- Soit le concepteur va chercher directement une technologie qui correspond à son besoin dans le stock de briques, sans passer par l'étape de modélisation. Dans ce cas-là, il lui suffit de copier-coller le module correspondant, toujours en ayant pris soin de vérifier les concordances d'UF.
- Soit, si le concepteur souhaite comparer un composant de son AP déjà modélisé avec une des briques testée précédemment et archivée, il lui faut vérifier et valider l'UF commune.

Dans ces deux cas-là, les cases « dimensions » et « taux de maintenance » lui permettent d'attribuer des coefficients aux modules pour définir l'UF (*Figure 4-28*).

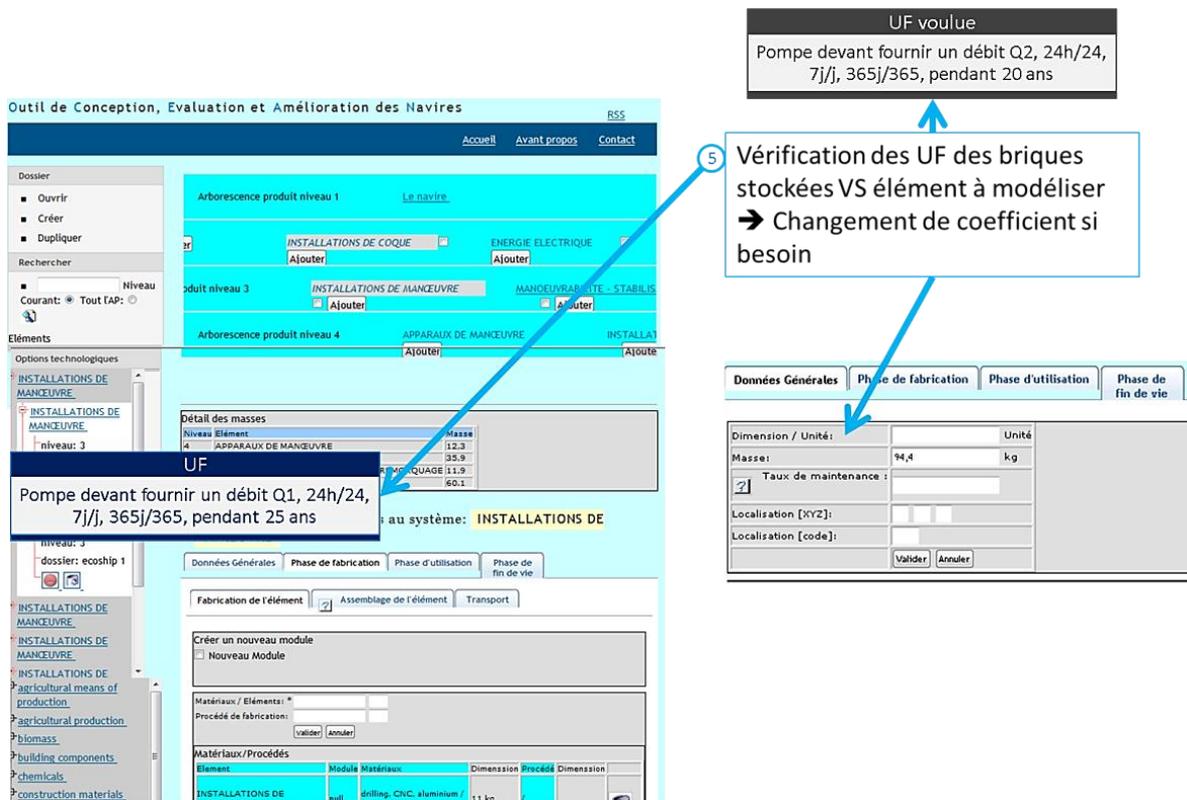


Figure 4-28. L'étape 5 permettant l'aide à la conception.

Après mise à niveau des UF, les impacts des différentes options technologiques sont calculés. Le concepteur peut alors décider d'une part, d'archiver cette comparaison, pour enrichir le stock de briques de données, et d'autre part, de sélectionner (ou non) l'élément le moins impactant sur l'ensemble des catégories d'impacts (Figure 4-29).

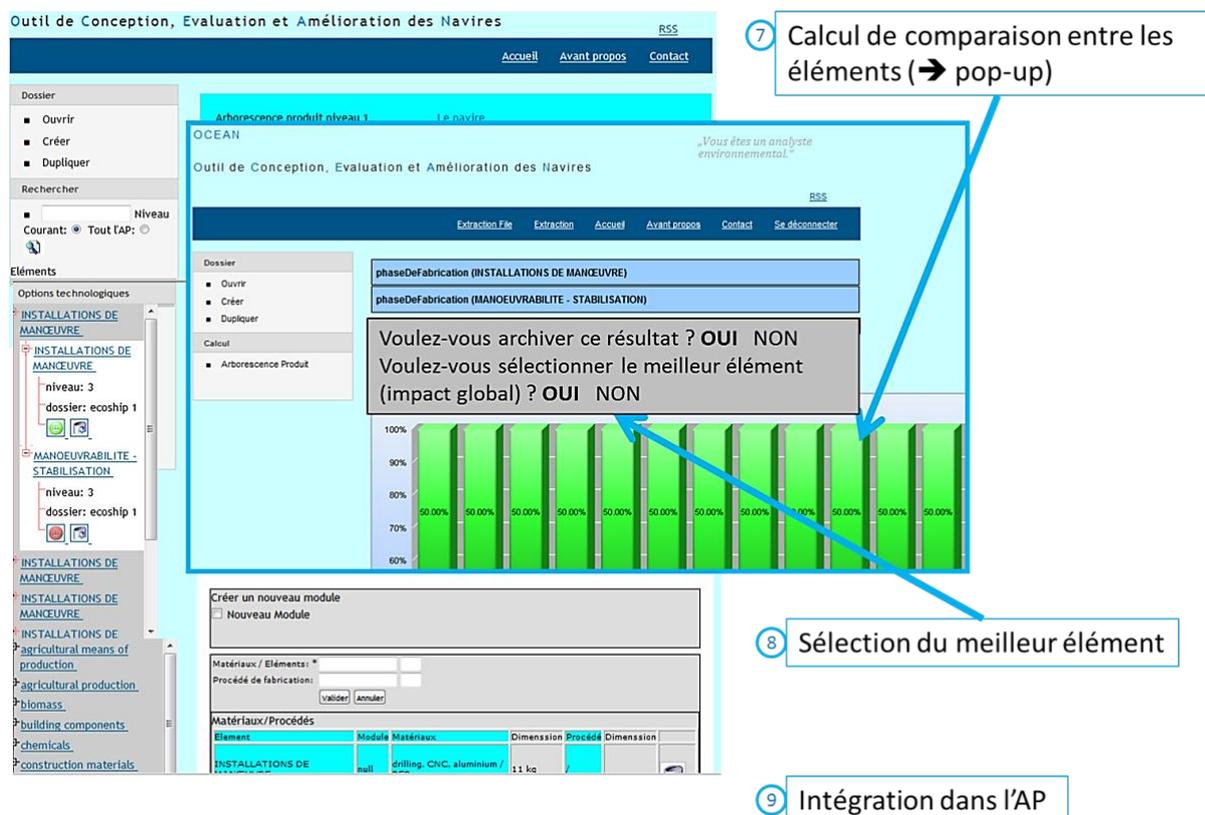


Figure 4-29. Les étapes 7 à 9 permettant l'aide à la conception.

Grâce à cette méthode d'aide à la conception, il est ainsi possible de récupérer non seulement des briques élémentaires, mais aussi des ensembles de briques. Tout l'intérêt de cette manipulation réside dans le fait que cela rend l'OCEAN totalement intégrable, et ce, dès la phase d'avant-projet. Jusqu'à présent, il était totalement impossible de réaliser des ACV complètes en avant-projet. Avec cet outil, sachant que dans la majorité des cas, pour démarrer les projets, les concepteurs récupèrent des technologies connues, il est possible d'adhérer à cette démarche et de récupérer des ensembles ou sous-ensemble du produit final, et donc d'en évaluer les performances environnementales et de les améliorer dès l'avant-projet.

L'OCEAN doit permettre la mise place d'une dynamique, d'une synergie d'enrichissement des données favorisant l'intégration d'une vraie démarche d'éco-conception prenant à partie tous les protagonistes.

Dès l'avant-projet (voire la phase amont) le dialogue peut s'établir entre concepteurs et fournisseurs pour commencer à créer les briques de données, le support de communication proposé. Après une première étape de création de briques de données qui doivent passer par l'évaluation environnementale, les références technologiques testées enrichissent le stock. Dès cet instant-là, les comparaisons d'options technologiques sont faisables grâce à l'implication des concepteurs et de

leurs connaissances. Et par la capitalisation de ces évaluations et de ces comparaisons, le concepteur peut être aidé sur le paramètre environnemental lors de sa prise de décision.

4. LES LIMITES DE L'OCEAN

Actuellement, la partie évaluation environnementale de l'outil est entièrement modélisée. Mais la partie aide et amélioration de la conception est toujours en fin de développement informatique. Il n'a donc pas pu être testé en retour d'expérience en condition réelle d'usage. Cependant, il a été présenté lors de journées de sensibilisation aux normes ISO et à la démarche d'éco-conception chez DCNS. Il semble que, de l'avis général recueilli à ces occasions-là, les concepteurs sont fortement intéressés par un outil tel que l'OCEAN, qui permettrait non seulement de faire de l'évaluation environnementale plus aisément qu'avec SimaPro, mais aussi d'aider à améliorer les performances de leurs produits. Même s'ils ont avoué ne pas bien percevoir le côté aide à la conception, car ils sont complètement novices dans cette démarche, ils sont par contre très demandeurs concernant l'ACV. Il va donc falloir leur démontrer tous les avantages de l'OCEAN, et leur montrer que faire de l'évaluation environnementale, c'est bien, mais que savoir quoi en faire, c'est mieux.

Pour intégrer totalement l'entreprise dans cette démarche et l'outil dans le processus de conception (*Figure 4-30*), trois notions seront à éclaircir très précisément avec l'ensemble des protagonistes :

- La nécessité de l'implication des concepteurs dans la démarche ; sans eux, la démarche est vouée à l'échec.
- La nécessité de l'implication des fournisseurs ; ils sont la clé des bases de données, de leur gestion et de leur accès pour créer les briques de données. Il faut que DCNS intègre ses fournisseurs dans son action, sans quoi, encore une fois, la démarche est vouée à l'échec.
- La notion de temps ; cette démarche va demander un certain temps et un temps certain avant de se mettre en place et d'être autosuffisante. L'acquisition des briques de données sera la phase la plus longue, mais une fois que cette étape aura été franchie pour la majorité des produits, la démarche sera beaucoup plus simple, fluide et naturelle.

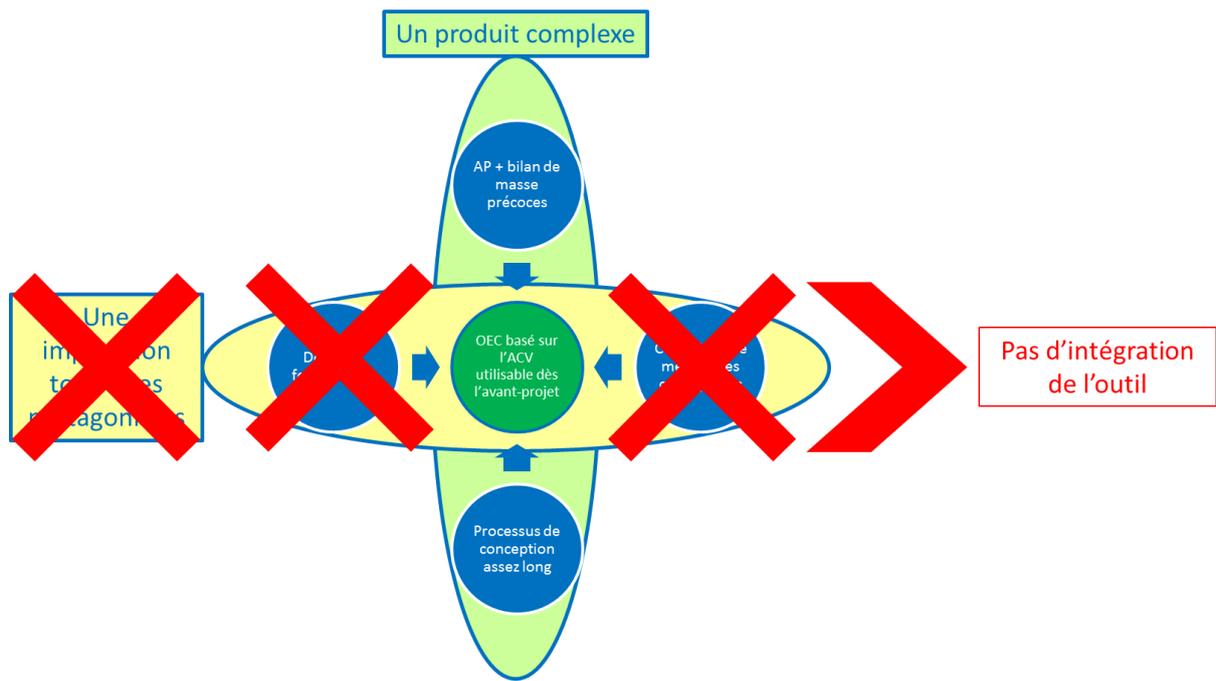


Figure 4-30. La non implication de l'un des protagonistes impliquera nécessairement un échec de la démarche d'intégration de l'outil d'éco-conception dans le processus de conception.

1. LES PERSPECTIVES DE L'ECO-INDICATEUR MARIN

Pour palier à l'absence d'indicateurs spécifiques au milieu marin, nous avons développé une méthode permettant de mieux prendre en compte les impacts d'un navire sur son milieu de prédilection : l'eau de mer. D'après les premiers tests effectués, cet éco-indicateur semble suffisamment sensible pour évaluer d'une part l'impact des substances en fonction de leur quantité émise, et d'autre part la sensibilité des zones modélisées ainsi que le temps que les navires passent dans ces mêmes zones.

Cette approche est basée sur une évaluation type ACV couplée à une prise en compte plus réaliste de la vie et de la conception des navires. Il faudrait tester plus largement cette approche pour en mesurer sa sensibilité vis-à-vis de navires ayant des modes de navigation et des conceptions totalement différentes. Une vraie étude de sensibilité (une étude statistique) permettrait de pouvoir conclure réellement quant au cadre d'étude de cet EIM, en prenant en compte non seulement les substances émises, mais aussi différents types de navires ainsi que plusieurs profils de navigation.

D'un point de vue méthodologique, il pourrait être intéressant d'appliquer la démarche sur d'autres produits ayant eux aussi des caractéristiques suffisamment typiques pour ne pas être couverts par les indicateurs existants. Le fait de proposer un indicateur spécifique à un produit permet aussi de répondre aux attentes des futurs utilisateurs en leur simplifiant l'analyse des résultats. Le fait de cibler un panel d'indicateurs caractéristiques et appropriés à un produit permet de ne pas « parasiter » les résultats avec des indicateurs inopportuns voire inadaptés et rend la lecture des impacts plus aisée.

D'un point de vue recherche scientifique, il serait judicieux et opportun d'approfondir cet éco-indicateur marin. Deux axes pourraient être améliorés :

- Les substances prises en comptes. Elles sont limitées à une soixantaine de substances, ce qui est loin de représenter l'ensemble des substances potentiellement émises vers le milieu aquatique. Dans l'idéal, il faudrait que cette liste puisse s'enrichir au fur-et-à-mesure de l'avancement des connaissances et de la caractérisation de ces substances par les laboratoires.

- Les compartiments aquatiques modélisés. Même si le panel choisi est assez représentatif des eaux européennes, il n'est pas pour autant suffisamment exhaustif pour couvrir l'ensemble de la réalité. Ceci est vrai en particulier pour les eaux exotiques, telles les eaux à récifs coralliens ou à palétuviers, ou encore pour les eaux polaires arctiques ou antarctiques. Pour étendre le champ d'application de l'OCEAN à la flotte mondiale, il faudrait que l'ensemble des types d'eaux caractérisables soit représenté.

En améliorant ainsi ces deux points, il serait possible de rendre l'EIM plus exhaustif et plus représentatif de la réalité.

2. LES PERSPECTIVES DE L'OCEAN

2.1. Un outil utilisable dès la fin de son développement

Même si l'outil développé aujourd'hui est dans sa version prototype, il a été pensé dans l'ensemble de ses fonctionnalités. C'est un démonstrateur assez évolué, qui permet de :

- Réaliser une évaluation des impacts d'un navire sur l'environnement, sur l'ensemble de son cycle de vie, et à toutes les étapes de conception.
- Réaliser une amélioration des performances environnementales d'un navire.
- Mettre à disposition une aide à la conception pour intégrer le paramètre environnemental lors de la prise de décision.

L'OCEAN prouve qu'il est possible de faire de l'éco-conception en s'appuyant sur une démarche d'ACV.

Une fois le développement informatique achevé, l'outil sera utilisable tel quel, par l'ensemble des futurs protagonistes. Les interfaces ont été pensées pour être ergonomiques et intuitives. De plus, l'utilisateur aura à sa disposition un guide d'utilisation ainsi que l'accès à des petites aides en ligne (comme un éclaircissement sur certaines fonctions, une définition...) directement via l'IHM.

Pour permettre à l'outil d'être le plus rapidement opérationnel, deux actions sont menées :

- La première, la sensibilisation du personnel à l'éco-conception, est déjà lancée. Cette démarche y est présentée comme étant la continuité et l'application de la démarche d'amélioration continue initiée avec la certification ISO 14001.
- La seconde, l'implication des fournisseurs, est déjà plus ou moins amorcée. En effet, le projet ISD (Inventaire des Substances Dangereuses ex « passeport vert ») vise à répertorier l'ensemble des substances toxiques et/ou nocives légiférées, référencées dans les directives telles que REACH (PARLEMENT-EUROPEEN, 2006c) ou RoHS (PARLEMENT-EUROPEEN, 2003d) qui sont utilisées pendant la construction des composants, présents dans ces composants, ou susceptibles d'être émis lors du démantèlement. Le but de cette collecte de données et de pouvoir lister et quantifier l'ensemble de ces substances dès la conception du navire. Un document, une sorte de « passeport vert » inventorie ces informations, et permet de les suivre tout au long de la vie du navire, en l'accompagnant jusqu'à son terme, lors du démantèlement. Dans le cadre de cette démarche, des relations ont donc été établies avec certains des fournisseurs.

2.2. La possibilité de localiser les impacts sur un modèle 3D

Une option a été placée dans l'outil pour saisir un code de localisation des éléments. Ce code, au même titre que la masse, est téléchargeable avec l'AP (Figure 5-1).

Saisie des données associées au système: **Le navire**

Données Générales Phase de fabrication Phase d'utilisation Phase de fin de vie

Créer un nouveau module

Nouveau Module

Dimension / Unité: Unité

Masse: 0 kg

Taux de maintenance: ?

Localisation [XYZ]:

Localisation [code]:

Valider Annuler

Figure 5-1. La possibilité de saisir un code permettant la localisation des éléments.

L'avantage en est qu'il devient alors possible de relier les résultats de l'ACV avec ces codes de localisation. Ces codes peuvent être de deux formats :

- En coordonnées spatiales (x, y, z). Elles permettent de placer les éléments sur un repère orthonormé, sans forcément avoir de « schéma » de trame du navire.
- En codes locaux, utilisés lors de la conception des navires. Chaque local est référencé grâce à sa position par rapport à la découpe en ponts et anneaux, et par rapport à la distribution bâbord / tribord. Pour placer un élément, la structure du navire doit être disponible via un logiciel de gestion 3D.

En utilisant ces codes, il devient alors possible de les coupler avec les résultats d'impact, et ainsi de visualiser leur source sur une modélisation du navire. De la même manière que le fait le logiciel SolidWorks Sustainability (SOLIDWORKS, 2010), les éléments seraient colorés en fonction de la valeur de leur impact (Figure 5-2). En rouge, il y aurait les éléments les plus impactants et en vert les plus performants. Cette visualisation pourrait se faire pour une catégorie d'impact ou pour l'ensemble des catégories d'impact, avec une cotation similaire à celle qui est utilisée pour hiérarchiser les contributeurs aux impacts environnementaux.

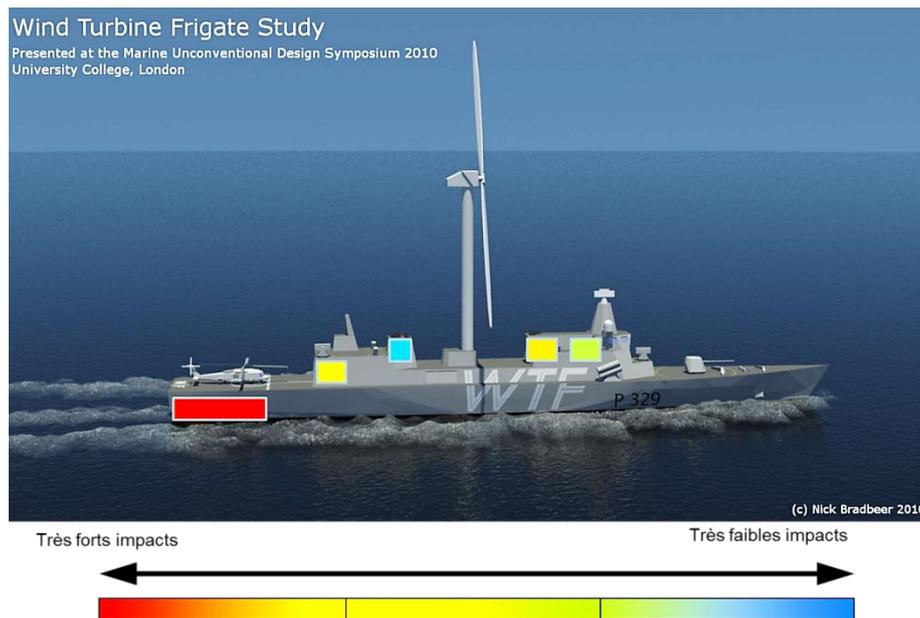


Figure 5-2. La possibilité de localiser les impacts à bord du navire grâce à l'intégration du paramètre de localisation des éléments (image : N. BRADBEER, 2010, "Wind Turbine Assisted Frigate", Marine Unconventional Design Symposium 2010, London, University College London).

Chaque zone codée serait interactive : en cliquant, l'utilisateur pourrait accéder à l'ensemble des informations liées à cette zone, telles que les données de fabrication, d'utilisation ou de FdV.

Une interface d'application ayant la forme du produit fini serait particulièrement attractive et ergonomique pour les utilisateurs.

2.3. La possibilité d'accompagner le navire jusqu'à son démantèlement

Un autre avantage d'une interface avec une modélisation du navire, c'est qu'il est alors possible de s'occuper plus précisément de la FdV, et d'accompagner le produit jusqu'à son démantèlement. Deux aspects sont visualisables :

- Les substances dangereuses (*Figure 5-3*) et leur répartition à travers le navire. Si cette information suit le navire tout au long de sa vie, cela permet de favoriser leur extraction en vue du démantèlement. En effet, le démantèlement ne doit se faire seulement que quand l'ensemble de ces substances ont été extraites du navire. Sans quoi, les personnes pratiquant la déconstruction s'exposent à leur nocivité (par exemple parce qu'elles sont volatilisables sous l'effet de la chaleur).

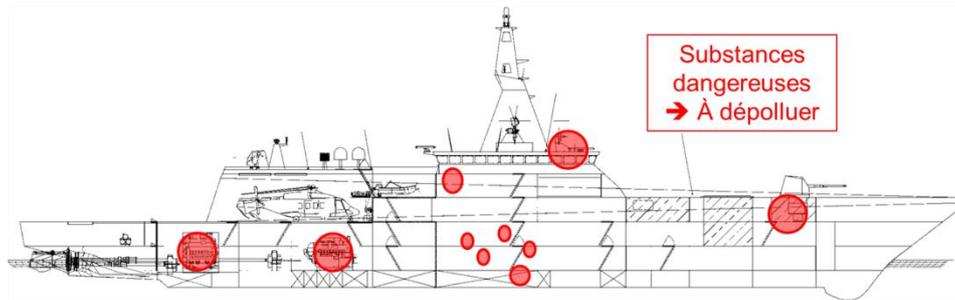


Figure 5-3. La possibilité de localiser les substances dangereuses, toxiques et / ou nocives.

– Le plan de démantèlement avec les zones préférentielles pour effectuer les découpes, les éléments à enlever en vue d’une réutilisation ou d’un recyclage en filière spécifique (Figure 5-4). En effet, chaque élément du navire ayant son propre scénario de FdV définissable, il est envisageable de coupler des données quantifiables (telles que celles concernant la FdV), avec la notion d’accessibilité, qui est une connaissance métier, pouvant être retranscrite en partie grâce à une visualisation des éléments sur un modèle virtuel.

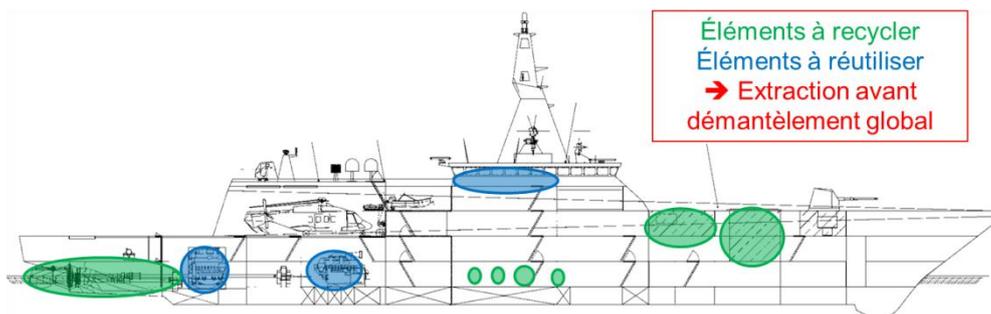


Figure 5-4. La possibilité de localiser les éléments pouvant / devant être extraits en amont du démantèlement global, en vue d’une FdV spécifique (réutilisation ou recyclage en filière spécifique).

Ainsi, si les données de fabrication peuvent suivre le navire lors de son utilisation et jusqu’à sa FdV, il est possible de largement favoriser le travail de démantèlement du navire, et en particulier, d’aider les déconstructeurs à repérer les zones potentiellement dangereuses pour eux lors de la dépollution (qui est une étape obligatoire aujourd’hui), mais aussi à sélectionner les éléments à extraire pour un éventuel recyclage ou pour une réutilisation.

Cette démarche va dans le sens de celle initiée par le « passeport vert » (tracer les substances dangereuses mises en jeu) mais elle permet d’élargir le champ d’étude sur l’ensemble des scénarii de FdV en prenant en compte la dépollution, la réutilisation et le recyclage. Et mieux prendre en compte le recyclage et les paramètres jouant en sa faveur, c’est avoir un levier de plus pour diminuer les impacts du navire sur son cycle de vie.

3. LES PERSPECTIVES D'APPLICATION D'UN OUTIL COMME L'OCEAN A DES PRODUITS DIFFERENTS

3.1. Une démarche applicable à l'ensemble des produits complexes

Comme cela a été présenté (cf. chapitre 3), la démarche d'intégration du paramètre environnemental doit pouvoir s'appliquer à des produits aussi complexes que les navires, tels que les voitures, les trains ou encore les avions. Cela est réalisable à partir du moment où ils remplissent les conditions décrites comme étant nécessaires à l'intégration de ce paramètre. Ces conditions sont :

- L'implication des concepteurs (entre autres pour leurs connaissances métiers) et des fournisseurs (pour l'apport des briques de données)
- La disponibilité d'une arborescence produit et d'un bilan de masse associé dès l'avant-projet.

La démarche à appliquer serait exactement la même que celle qui a été utilisée avec DCNS. La différence notable porterait, de même que pour les briques technologiques, sur le fait que les briques de données contenant l'ensemble des informations nécessaires seraient spécifiques à chaque type de produit (*Figure 5-5*).



Figure 5-5. Des briques de données spécifiques à chaque type de produit, mais une démarche identique pour les mettre en place.

Chaque type de produit complexe pourrait ainsi se constituer son propre stock de briques de données spécifiques.

3.2. Vers la création de stock de briques de données au format unique

En observant d'un peu plus près les briques, et sachant comment elles sont constituées, il est possible d'aller plus loin dans le raisonnement.

La création de briques de données, comme pour les fichiers de CAO, met les fournisseurs au centre de la démarche. En effet, ils détiennent les informations qui permettent de créer les briques

et de renseigner les informations concernant la phase de fabrication des éléments (*Figure 5-6*). Et cela, quelle que soit la destinée de la brique. C'est le point commun de la démarche, pour l'ensemble des produits.

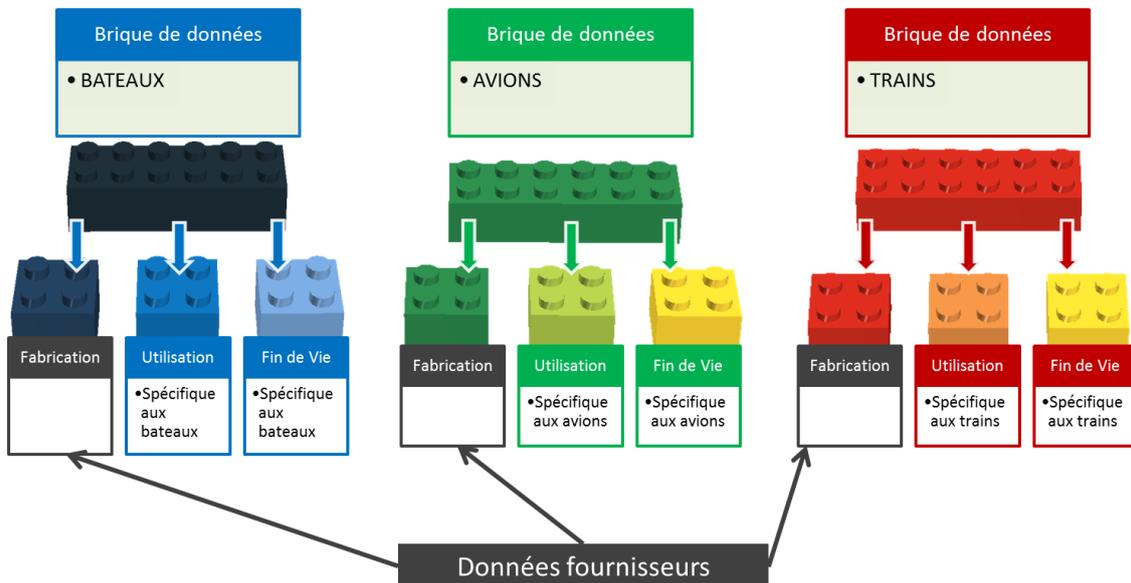


Figure 5-6. Les données concernant la phase de fabrication : des données renseignées par les fournisseurs, quelle que soit la destination de la brique.

L'unité commune pour créer des briques de données peut ainsi être simplifiée aux données concernant la fabrication de l'élément. Ceci place les fournisseurs au cœur de la démarche d'intégration du paramètre environnemental, en particulier si elle devait être intégrée plus largement, dans un plus vaste panel d'entreprises. Une même brique peut être utilisée pour et par différents produits spécifiques (*Figure 5-7*). Les données concernant la phase de fabrication de l'élément (donc l'étape se déroulant chez le fournisseur uniquement) restent les mêmes quelle qu'en soit l'utilisation ou la fin de vie du futur produit, qui elles, sont les étapes spécifiques au produit.

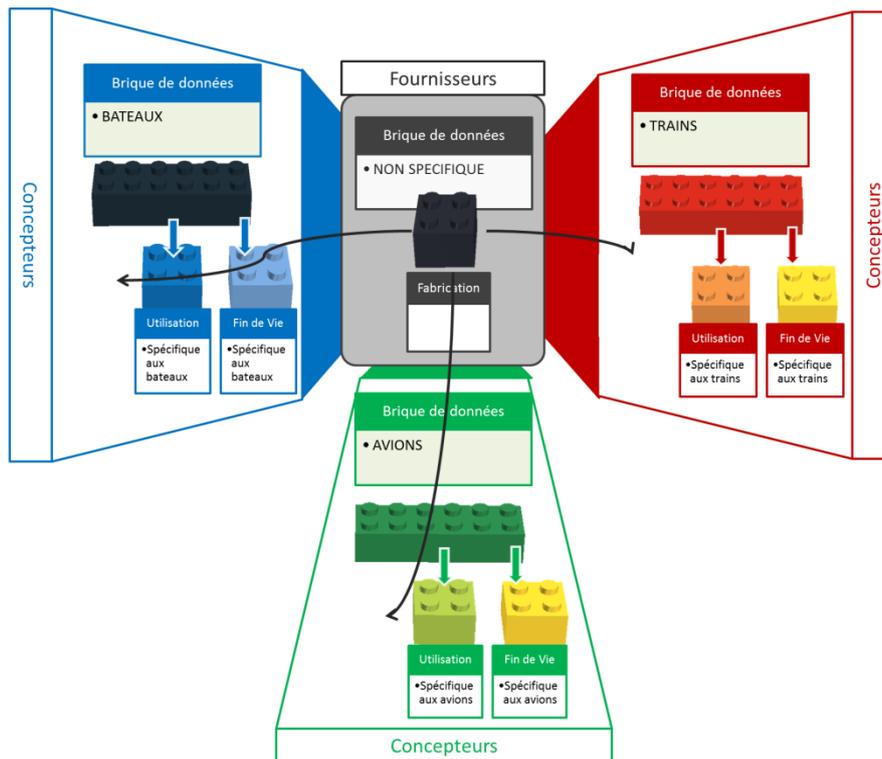


Figure 5-7. Les fournisseurs au centre de la démarche pour la création des briques de données

La démarche initiée avec les fournisseurs doit permettre de créer un stock de briques de données. Et ce stock pourrait être utilisé par l'ensemble des entreprises utilisant ces équipements. Ils détiendraient les bases permettant de construire les briques de données, et les mettraient à disposition des concepteurs (Figure 5-8).

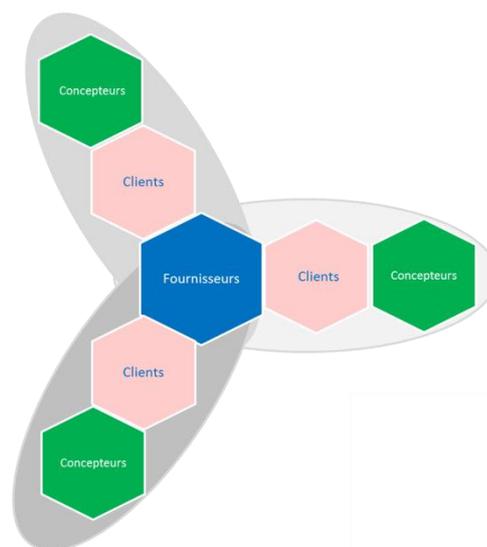


Figure 5-8. Les fournisseurs au cœur de la démarche d'intégration du paramètre environnemental dans le processus de conception.

A terme, il serait ainsi possible de créer des fichiers, tels les fichiers CAO, utilisables par toutes les équipes de conception voulant prendre en compte le paramètre environnemental lors de la conception de leurs produits, et utilisant un OEC tel que celui développé dans le cadre du projet CONVENAV. De plus, ces fichiers sont utilisables dès la phase amont, et tout au long du processus de conception.

4. LES PERSPECTIVES D'APPLICATION DE CETTE DEMARCHE D'INTEGRATION DU PARAMETRE ENVIRONNEMENTAL DANS UN PROCESSUS DE CONCEPTION DE PRODUITS DIFFERENTS

4.1. Une démarche permettant la mise en place d'un outil d'éco-conception complet

Les fournisseurs et les concepteurs, chacun apportant un élément à la démarche, sont les pivots de l'intégration d'un OEC « complet », qui fasse aussi bien de l'évaluation environnementale que de l'amélioration du produit. Les fournisseurs en donnant l'accès aux bases de données permettent de réaliser une évaluation environnementale précise et complète. Les concepteurs, quant à eux, apportent leurs connaissances métiers, grâce auxquelles il devient alors possible d'améliorer les produits. C'est bien la synergie entre ces deux acteurs qui devient le moteur de la démarche s'appuyant sur l'outil de communication que sont les briques de données (*Figure 5-9*).

Ce sont ces deux types de protagonistes, concepteurs et fournisseurs, qui sont les seuls aptes à pousser un outil d'éco-conception vers l'outil idéal, permettant autant l'évaluation que l'amélioration environnementale des produits.

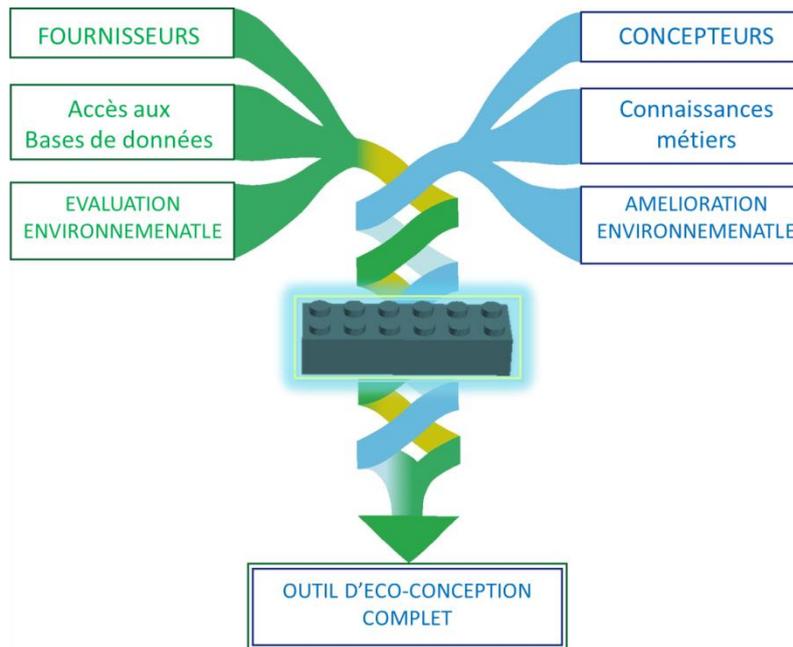


Figure 5-9. Les fournisseurs et les concepteurs, et leur apport spécifiques, pour permettre la bonne intégration et le bon fonctionnement d'un outil d'éco-conception complet.

En reprenant la figure qui caractérisait les outils d'éco-conception en fonction de leurs capacités à évaluer et à améliorer les produits, cette figure peut être précisée en y ajoutant les éléments favorisant, d'une part l'évaluation, d'autre part l'amélioration environnementale (Figure 5-10).

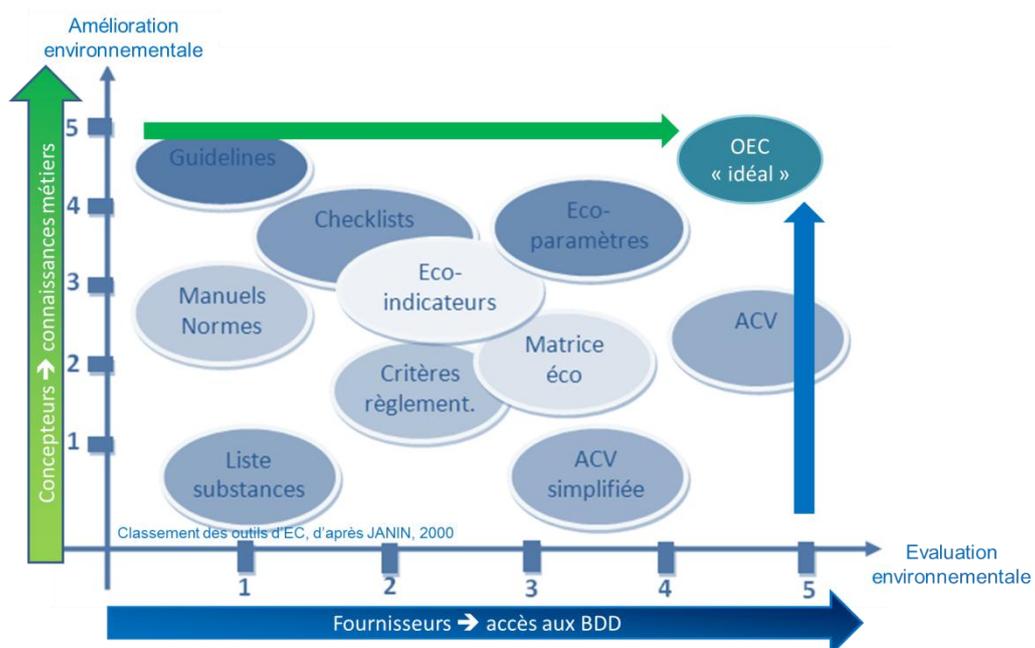


Figure 5-10. L'ensemble des paramètres permettant d'accroître les performances d'un OEC pour ses capacités à évaluer et à améliorer les produits. Modifié d'après (JANIN, 2000).

4.2. Des critères transposables à d'autres produits

Les conditions d'application de la méthodologie qui avaient été définis (cf. chapitre 3, 1.2) étaient :

- Un processus de conception assez long qui permet de prendre le temps de réaliser une évaluation environnementale basée sur l'ACV
- La disponibilité d'une arborescence produit associée à un bilan de masse dès l'avant-projet
- L'implication des concepteurs et de leurs connaissances métiers
- L'implication des fournisseurs mettant à disposition leurs données.

Jusqu'à présent nous avons proposé la démarche dans le cadre de produits à conception longue, pour une longue durée de commercialisation, avec un haut degré de complexité pour le produit final qui nécessite un processus de conception très structuré. En effet, le fait que le processus de conception soit assez permet de contrebalancer le temps nécessaire à la création de l'ensemble des briques de données.

Mais, à contrario, pour un produit moins complexe et à conception assez courte (de l'ordre de quelques mois), telle pour une machine à laver le linge, il y a finalement beaucoup moins de briques à prendre en compte.

Les avantages de produits ayant une durée de conception plus courte sont :

- Si le produit est moins complexe, la présence d'une AP dès l'avant-projet serait facilement envisageable et réalisable pour s'en servir dans l'outil.
- Même pour des produits moins complexes, il existe toujours de la R&D en amont et parallèle du développement.
- Les industriels fonctionnent tous en utilisant des briques technologiques, même s'ils n'utilisent pas ce terme-là. Ils ont tous aussi des contraintes à respecter en fonction d'un cahier des charges

Ainsi, on peut assez facilement imaginer que même si la durée de conception est plus courte, le concept développé pour intégrer le paramètre environnemental dans le processus de conception pourrait quand même être appliqué finalement à l'ensemble des produits. Cette méthodologie et sa bonne intégration ne dépend que de la collaboration et de la participation des fournisseurs et des concepteurs dans la démarche.

CONCLUSION GENERALE

Dans cette thèse, nous avons répondu à la problématique générale ainsi qu'à la problématique inhérente :

- Nous avons réussi à développer un outil d'aide à la décision environnementale adapté et utilisable dès la phase d'avant-projet, qui permet de faire à la fois une évaluation environnementale viable (basé sur l'outil d'Analyse de Cycle de Vie) d'un navire et en faciliter l'amélioration de la conception
- Nous avons intégré le paramètre environnement dans le processus de conception

Dans le premier chapitre, nous avons mis en avant la prise de conscience générale de la nécessité de mieux considérer l'environnement dans nos actions. Nous avons démontré le caractère indispensable de l'intégration de la contrainte environnementale lors de la conception des produits. Cette contrainte doit être prise en compte au même titre que le coût ou la qualité lors des prises de décisions. Et pour ce faire, il ne faut pas attendre la mise en application des législations, mais bien être proactif. D'une part cela permet prendre de l'avance en termes d'innovations technologiques, et d'autre part, cette démarche n'est pas incompatible avec des bénéfices économiques à plus ou moins long terme. Nous avons mis en évidence la nécessité d'évaluer les impacts de nos actions, et plus particulièrement via une étude du cycle de vie des produits pour mieux en améliorer les performances.

Dans le deuxième chapitre, l'état des lieux constaté pour l'ensemble des outils d'éco-conception existants, a mis en exergue qu'aucun d'entre eux ne satisfait simultanément et pleinement aux deux critères définissant l'éco-conception. Aucun outil ne permet de réaliser aussi bien l'amélioration que l'évaluation environnementale. De plus, il n'existe aucun outil unique, utilisable sur l'ensemble du cycle de vie. Nous avons montré l'importance de la phase amont de la conception : c'est elle qui offre le plus de latitude d'actions, et pourtant, elle n'est pas considérée comme une étape pendant laquelle il est possible de faire de l'éco-conception. Or, c'est précisément à cette étape là que sont faites une grande partie des innovations, et que les briques technologiques sont développées.

Malgré ses faiblesses pour l'amélioration des performances environnementales des produits, c'est l'outil d'ACV qui a été choisi comme base de travail car il est très performant en ce qui concerne l'évaluation des impacts environnementaux. Sachant que les deux limites principales à l'ACV sont l'accès aux bases de données et le manque d'implication des concepteurs qui possèdent pourtant les connaissances métiers, il a fallu trouver le moyen de remédier à ces obstacles. La méthode s'est proposée d'inclure le paramètre environnemental le plus tôt possible dans le processus de conception, c'est-à-dire de l'inclure dans les briques technologiques, pour créer des briques de données. Cette approche devait permettre de :

- Créer une forte interaction amenant les fournisseurs à échanger avec les concepteurs.
- Rendre la démarche applicable à toutes les étapes de conception, phase amont comprise.
- Donner la capacité à un outil unique de pouvoir non seulement évaluer les performances environnementales d'un produit, mais aussi de pouvoir en améliorer la conception en conséquence.

Un benchmark des entreprises pratiquant des démarches environnementales a permis de confirmer qu'il est possible d'impliquer les fournisseurs et les concepteurs dans la démarche.

Dans le troisième chapitre, l'identification des critères permettant à un produit complexe de soutenir une éco-conception basée sur l'ACV dès la phase d'avant-projet a permis de trouver le moyen d'intégrer ce paramètre environnemental. En impliquant les fournisseurs, la première limite identifiée comme étant responsable de l'inadéquation de l'utilisation de l'ACV lors de la conception d'un produit, l'accès aux bases de données, est supprimée. Ils donnent l'accès aux données de fabrication de l'élément, données qui sont généralement non disponibles si elles ne sont pas fournies initialement. La bonne intégration des fournisseurs dans la démarche favorise une bonne évaluation environnementale du produit fini. En impliquant les concepteurs, c'est la deuxième limite, le manque de connaissance des produits par l'analyste, qui est à son tour éliminée. Les concepteurs détiennent les connaissances indispensables pour effectuer les choix entre différentes options technologiques. . La bonne intégration des concepteurs dans la démarche favorise l'amélioration des performances environnementale du produit fini. Grâce d'une part à l'implication des concepteurs et de leur savoir-faire, et d'autre part à l'incorporation des fournisseurs, cette démarche d'intégration du paramètre environnemental est réalisable.

Le support d'échange clé entre l'ensemble des protagonistes est le concept de briques de données. Il s'appuie sur la logique des briques technologiques aux quelles sont ajoutées les données nécessaires à la réalisation d'une Analyse de Cycle de Vie. En intégrant ces informations, il devient alors possible d'évaluer les impacts environnementaux des produits, et d'en améliorer les performances environnementales dès leur conception.

L'ensemble de la démarche ne requiert que trois conditions :

- L'implication des concepteurs
- L'implication des fournisseurs
- Et la mise à disposition d'une arborescence produit associée à un bilan de masse en amont de la conception, i.e. dès l'avant-projet.

Si ces trois critères sont réalisés, il est alors possible d'utiliser un outil d'éco-conception complet, qui permet de faire à la fois de l'évaluation et de l'amélioration environnementale. Cette démarche est hautement collaborative et participative. Elle doit permettre la mise en place d'une synergie entre l'ensemble des protagonistes.

Dans une quatrième partie, nous avons prouvé qu'il est possible de développer un outil d'éco-conception satisfaisant à la démarche proposée. L'OCEAN, répond aux problématiques énoncées dans les chapitres 1 et 2. Il démontre que la démarche est réalisable et qu'elle peut se mettre en pratique dans une entreprise telle que DCNS, qui a un processus de conception ultra structuré. L'OCEAN est un outil d'aide à la décision environnementale adapté et utilisable dès la phase d'avant-projet, qui permet de réaliser à la fois une évaluation environnementale viable d'un navire, basée sur l'ACV, et d'en faciliter l'amélioration lors de la conception.

In fine, il n'est pas impensable de proposer l'hypothèse selon laquelle, s'il est possible de constituer un stock de briques de données dans le contexte de produits dits complexes, la démarche devrait pouvoir s'appliquer à l'ensemble des produits, qu'ils soient de conception longue ou courte, complexes ou plus simples. Chaque fabricant mettant à disposition les données environnementales telles les fichiers de CAO, il serait alors possible d'intégrer le paramètre environnemental dans chaque cycle de conception pour en faire un outil d'aide à la décision, au même titre que les paramètres de coût ou de qualité.

Ainsi, en intégrant le paramètre environnemental comme critère d'aide à la décision lors de la conception, les industriels pourraient réellement faire du Développement Durable et proposer des solutions plus respectueuses de l'environnement, et garantes d'une meilleure gestion des ressources.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABADANE M., MASSON D., & LEFORT D. (2009). Mise en place d'une méthodologie d'évaluation de l'impact des navires tout au long de leur cycle de vie en fonction du niveau d'impact des polluants émis et de la masse d'eau impactée. *Rapport Ifremer, Livrable du projet CONVENAV, 65p.*
- ABADANE, M., MASSON, D., & LEFORT, D. (2009). Mise en place d'une méthodologie d'évaluation de l'impact des navires tout au long de leur cycle de vie en fonction du niveau d'impact des polluants émis et de la masse d'eau impactée. Rapport Ifremer, Livrable du projet CONVENAV, 65p.
- ADEME. (2010). <http://www2.ademe.fr/>. Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, Site internet consulté en août 2010.
- AFS. (2001). Acte final de la conférence internationale de 2001 sur le contrôle des systèmes antisalissures nuisibles pour le navire. AFS/CONF/25, 8 octobre 2001.
- AGARDY, T. (2006). Dropping pH in the Oceans Causing a Rising Tide of Alarm. World Ocean Observatory, 4p.
- ALEXANDER, B., BARTON, G., PETRIE, J., & ROMAGNOLI, J. (2000). Process synthesis and optimisation tools for environmental design: methodology and structure. *Computers and Chemical Engineering* 24 (2000) 1195-1200.
- ALTING, L., & LEGARTH, J. B. (1995). Life Cycle Engineering and Design. *Annals of the CIRP* Vol. 44/2/1995.
- ARMATEURS-de-FRANCE. (2010). http://www.armateursdefrance.org/02_transport/01_chiffres.php. site consulté le 24 mai 2010.
- ARZEL, J., CORNIER, A., NICOLAS, L., & HOULOT, M. (2006). Eco-conception d'un navire type frégate : impacts environnementaux et analyse du cycle de vie. rapport de stage, ENSAM.
- ASSEMBLEE-NATIONALE. (2008a). Convention internationale pour le contrôle et la gestion des eaux de ballast et sédiments des navires. CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958, TREIZIÈME LÉGISLATURE Enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale le 8 avril 2008, JO n 119 du 23 mai 2008, 60p.
- ASSEMBLEE-NATIONALE. (2009b). Loi de programmation relative à la mise en oeuvre du Grenelle de l'environnement. Dossier législatif, Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 parue au JO n° 179 du 5 août 2009, NOR: DEVX0811607L.
- AZAPAGIC, A., & CLIFT, R. (1999). The application of life cycle assessment to process optimisation. *Computers and Chemical Engineering* 23 (1999) 1509–1526.
- AZAPAGIC, A., & PERDAN, S. (2000). Indicators of Sustainable Development for Industry: A General Framework”,. *Process Safety and Environmental Protection* Volume 78, Issue 4 Pages 243-261 Sustainable Development, July 2000.

- AZAPAGIC, A., MILLINGTON, A., & COLLETT, A. (2006a). Methodology for integrating sustainability considerations into process design. Institution of Chemical Engineers, Trans IChemE, Part A, June 2006, Chemical Engineering Research and Design, 84(A6): 439–452.
- BAHLOUL EL, I. (s.d.). Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) Bilan de fonctionnement. Techniques de l'Ingénieur, G 4 102, 12p.
- BELAUSTEGUIGOITIA, G. M., & SCHISCHKE, K. (2009). 2009 Update of Ecodesign Tools and Methodologies. FRAUNHOFER IZM, 3p., April 16, 2009.
- BLANC, G., SCHÄFER, J., AUDRY, S., BOSSY, C., LAVAUX, G., & LISSALDE, J.-P. (2006). Le cadmium dans le Lot et la Garonne : sources et transport. Hydroécol. Appl. (2006) Tome 15, pp. 19–41 © EDP Sciences, DOI: 10.1051/hydro:2006005.
- BOEGLIN, & VEUILLET. (2005). Introduction à l'analyse de cycle de vie (ACV). département éco-conception & consommation durable/direction clients ; note de synthèse externe, 14p, nb & dv / DECCD / DC : mai 2005.
- BOUTIER, B., CHIFFOLEAU, J.-F., GONZALEZ, J.-L., LAZURE, P., AUGER, D., & TRUQUET, I. (2000). Influence of the Gironde estuary outputs on cadmium concentrations in the coastal waters: consequences on the Marennes-Oléron bay (France). OCEANOLOGICA ACTA, Vol. 23 - N°7, Ifremer/CNRS/IRD/Editions scientifiques et médicales, ELSEVIER SAS, PII : S0399-1784(00)01119-1:FLA, 13p.
- BRANDES, L., Den HOLLANDER, H., & Van De MEENT, D. (1996). SimpleBox 2.0: a nested multimedia fate model for evaluating the environmental fate of chemicals. National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, the Netherlands, RIVM report n° 719101029, 155p., December 1996.
- BRAUER, A. (. (2001). Strategic Environmental Planning. Renault DD-SRI, VP Environmental Strategy Plan Conférence de Paris du 21 Janvier 2001, 27p.
- BRUTLAND COMMISSION. (1987). Our Common Future, the report of the World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, Oxford.
- BSR. (2007). The New Markets for Environmental Services: A Corporate Manager's Guide to Trading in Air, Climate, Water and Biodiversity Assets. Business for Social Responsibility, 62p, december 2007.
- BV. (2010). http://www.bureauveritas.fr/wps/wcm/connect/bv_fr/Local/Footer/Home/. Bureau Veritas, site internet consulté en juin 2010.
- BWM. (2004). ADOPTION DE L'ACTE FINAL DE LA CONFÉRENCE ET DES INSTRUMENTS, RECOMMANDATIONS ET RÉOLUTIONS RÉSULTANT DES TRAVAUX DE LA CONFÉRENCE CONVENTION INTERNATIONALE DE 2004 POUR LE CONTRÔLE ET LA GESTION DES EAUX DE BALLAST ET SÉDIMENTS DES NAVIRES. BWM/CONF/36, 16 février 2004.
- CADENAS. (2010). http://www.cadenas.fr/success_stories/amelioration-de-la-gestion-des-composants-standards-chez-Eurocopter.html. CADENAS France SARL, Site internet consulté en juillet 2010.
- CCE(a). (2007). COMMUNICATION DE LA COMMISSION AU PARLEMENT EUROPÉEN, AU CONSEIL, AU COMITÉ ÉCONOMIQUE ET SOCIAL EUROPÉEN ET AU COMITÉ DES RÉGIONS - Une politique maritime intégrée pour l'Union européenne. communiqué, COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, Bruxelles.

- CCE(b). (2007). Livre Vert sur les instruments fondés sur le marché en faveur de l'environnement et des objectifs politiques connexes. Bruxelles: 140p, le 28.3.2007 COM(2007).
- cd2e. (2010). http://www.cd2e.com/sections/fr/plate-forme_acv/outils_pour_l_acv/outils_-_logiciels_d9219/. site internet consulté en août 2010.
- CIRAIG. (2010). <http://www.ciraig.org/fr/>. Centre Interuniversitaire de Recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services , site internet consulté en juin 2010.
- CLEANSKY. (2010). <http://www.cleansky.eu/> . Site internet consulté en août 2010.
- CNUCED. (2007). Etude sur les transports maritimes 2007. Conférences des Nations Unies sur le Commerce Et le Développement, UNCETAD/RMT/2007, Publication des Nations Unies, n° de vente : F.07.II.D.14, ISB 978-92-1-212344-8, ISSN 0252-5429.
- CODDE. (2010). <http://www.codde.fr/>. Bureau Veritas CODDE, pôle d'expertise en Ecoconception et Développement Durable, site internet consulté en août 2010.
- COLIN, C. (2008). Design. inspectrice I.C.E.A.A.C. (inspecteurs et conseillers de la création, des enseignements artistiques et de l'action culturelle), délégation aux arts plastiques, ministère de la Culture, © 2008 Encyclopædia Universalis s.a.
- COMMISSION-EUROPÉENNE. (2010). Règlement (UE) N° 1014/2010 concernant la surveillance et la communication des données relatives à l'immatriculation des voitures particulières neuves en application du règlement (CE) n° 443/2009 du Parlement européen et du Conseil. Commission du 10 novembre 2010, Journal officiel de l'UE, L 293, 6p. 11-11-2010.
- CONVENTION-DE-BALE. (1989). Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et de leur élimination. Adoptée par la conférence de plénipotentiaires, RS 0.814.05.
- CORINE. (2010). <http://www.corinecodesign.eu/fr/index.htm>. Conception Optimisée pour la Réduction de l'Impact des Nuisances Environnementales, Site internet consulté en août 2010.
- CORNIER, HOULOT, JALMAIN, FOLL, L., AUTRET, & CONAN. (2007). Elaboration d'un passeport vert pour une frégate de type FREMM, phase 2 du programme : rédaction du guide utilisateur du Passeport Vert. Rapport version interne (provisoire), ENSAM, 06/06/07.
- COSTANZA, & al. (2007). The value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. Nature 387, 253-260.
- DAOUD, W. (2008). Développement d'un système de management intégré de l'éco-conception des appareillages électriques de moyenne tension. Thèse de doctorat, ENSAM, 225p.
- DCNS. (2007b). Processus général de conception. Instruction n° RDE-000108700 – D, Ingénierie n° 1302, Domaine DCNS : 13 – Technique, 31p.
- DCNS. (2010a). <http://www.dcnsgroup.com/cms/dcms-la-defense-navale-toujours-a-la-pointe.html>. site internet consulté en juin 2010.
- DG-ENV, (. (2007). Ship Dismantling and Pre-cleaning of Ships. European Commission Directorate General Environment, Report no. 64622-02-1, June 2007.
- DREYER, L., NIEMANN, A., & HAUSCHILD, M. (2003). Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99: Does it matter which one you choose? Technical University of Denmark, Department of Manufacturing Engineering and Management, The International Journal of LCA, Vol.8 No.4, p.191-200.

- DUFLOU, DEWULF, & SAS. (2003). Pro-active Life Cycle Engineering Support Tools. Dept. of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, CIRP Annals - Manufacturing Technology 52 (1), pp. 29-32.
- EC-JRC. (2010). <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/toolList.vm#>. European Commission, Joint Research Center, Site internet consulté en août 2010.
- ECOBILAN. (2010). <https://www.ecobilan.com/>. Site internet consulté en août 2010.
- ECODESIGN-PILOT. (2010). <http://www.ecodesign.at/pilot/ONLINE/FRANCAIS/INDEX.HTM>. EcoDesign Pilot, Vienna TU, Institute for Engineering Design - éco-conception, site internet consulté en août 2010.
- ENSAM. (2010). <http://www.ensam.fr/fr>. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, site internet consulté en juin 2010.
- EPA, & SAIC. (2001). Introduction to LCA. LCAccess - LCA 101, U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, SCIENCE APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION.
- EUROCARBON. (2010). <http://www.bourseducarbone.com/start.htm>. site internet consulté en juillet 2010.
- EUROCOPTER. (2010). <http://www.eurocopter.com/site/en/ref/home.html>. Site internet consulté en août 2010.
- EYRING, V., KOHLER, H. W., VAN AARDENNE, J., & LAUER, A. (2005). Emissions from international shipping: 1. The last 50 years. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 110, D17305, doi:10.1029/2004JD005619, 15 sept. 2005.
- FAY, F., & al. (2008). Peintures marines antifouling de nouvelle génération. Techniques de l'Ingénieur, RE106, Décembre 2008.
- FNH. (2006a). Livret Mer Vivante. Fondation Nicolas Hulot, livret découverte, 20p.
- FNH. (2008b). Quels poissons consommer ? Fondation Nicolas Hulot, 5p.
- GAILL, F., & al. (2010). Comité opérationnel Recherche et Innovation. Groupe VIII, Le Grenelle de la Mer, Rapport final au 6 mars 2010, 36p.
- GEHIN, A., ZWOLINSKI, P., & BRISSAUD, D. (2008a). A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. Journal of Cleaner Production, Volume 16, Issue 5, March 2008, Pages 566-576.
- GEHIN, A., ZWOLINSKI, P., & BRISSAUD, D. (2009b). Integrated design of product lifecycles-The fridge case study. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Volume 1, Issue 4, 2009, Pages 214-220.
- GOEDKOOOP, & SPRIENSMA. (2001b). The Eco-indicator 99 – A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment – Methodology annex. Pré consultants, 22 june 2001, 3rd edition, 144p.
- GOEDKOOOP, (. (2007). SimaPro 7 – tutorial. v.3.2, june 2007.
- GOEDKOOOP, (. (2008). SimaPro 7 – introduction into LCA. v.4.2, Pré consultants, 144p. feb. 2008.
- GOODPLANET. (2010). [http://www.goodplanet.info/Zones/Etat-du-monde/Indicateur/Biocapacite/\(theme\)/](http://www.goodplanet.info/Zones/Etat-du-monde/Indicateur/Biocapacite/(theme)/). Site internet consulté en septembre 2010.
- GRES, S. (2002). Approche pour la conception de systèmes complexes. Techniques de l'Ingénieur, AG 1 560 (1-10).

- GUERIN, A. (2006a). Eco-conception d'un navire type frégate. Rapport de thèse professionnelle, ENSAM, 65p.
- GUERIN, A., CORNIER, A., HOULOT, M., & AUTRET, G. (2006b). Eco-conception d'un navire de type frégate, Approche Fin de Vie – Démantèlement. Rapport intermédiaire n°2, ENSAM, Version du 29/09/2006.
- GUESNERIE, R., BOURG, D., RAMANANTSOA, B., & al. (2008). Promouvoir des modes de développement écologiques. Groupe VI, Grenelle Environnement, rapport de synthèse, 43p.
- HAILS, C., & al. (2008). Living Planet Report 2008. WWF INTERNATIONAL, INSTITUTE OF ZOOLOGY, GLOBAL FOOTPRINT NETWORK and TWENTE WATER CENTRE, 48p.
- HARSCOET, E., & FROELICH, D. (2007). Use of LCA to evaluate the environmental benefits of substituting chromic acid anodizing (CAA). *Journal of Cleaner Production* 16 (2008) 1294-1305.
- HAUSCHILD, & WENZEL. (1998). *Environmental Assessment of Products*, vol. 2 : Scientific background.
- HEPBURN, C., & STERN, N. (2008). A new global deal on climate change. *Oxford Review of Economic Policy* 24(2):259-27.
- HERMANN, B., KROEZE, C., & JAWJIT, W. (2007). Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performances indicators. *Cleaner Prod.* 15 (18), pp. 1787-1796.
- HUIJBREGS, M. (1999). Priority assessment of toxic substances in the frame of LCA. Development and application of the multimedia fate, exposure and effect model USES-LCA. *Milieukunde*, University of Amsterdam, 46p, May 1999.
- HUNKELER, D. (2006). Societal LCA Methodology and Case Study. *Int J LCA* 11 (6) 371 – 382.
- HUNKELER, D., & VANAKARI, E. (2000). EcoDesign and LCA Survey of Current Uses of Environmental Attributes in Product and Process Development. *Int. J. LCA* 5 (3) 145 - 151.
- IFREMER. (2010). <http://www.ifremer.fr/francais/index.php>. site internet consulté en juin 2010.
- IMO. (1983c). International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships, 1973 as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (MARPOL 73/78) . International Maritime Organization, 2 October 1983.
- IMO. (1997a). Directives relatives au contrôle et à la gestion des eaux de ballast des navires en vue de réduire au minimum le transfert d'organismes aquatiques nuisibles et d'agents pathogènes. ORGANISATION MARITIME INTERNATIONALE, A 20/Res.868, 1er décembre 1997.
- IMO. (2004b). Guidelines for the development of the ship recycling plan. INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, MEPC/Circ.419.
- IMO. (2008d). International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships. International Maritime Organisation, AFS/CONF/26 18, Adoption: 5 October 2001 Entry into force: 17 September 2008.
- INERIS. (1996). Directive n° 96/61/CE du 24/09/96 relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution . JOCE n° L 257 du 10 octobre 1996.

- ISEMAR. (2010). La démolition navale : un outil polémique de régulation des flottes. Institut Supérieur d'Economie MARitime, Nantes Saint-Nazaire, Note de synthèse n°124, ISSN : 1282-3910 , 4p., avril 2010.
- ISO-14001. (2009). ISO 14001 : 2004/COR 1 : 2009, Systèmes de management environnemental -- Exigences et lignes directrices pour son utilisation. Edition: 1 | Stade: 60.60 | TC 207/SC 1 ICS: 13.020.10 Document disponible depuis le: 2009-07-17.
- ISO-14040. (2006). ISO 14040: 2006 Environmental management -- Life cycle assessment - Principles and framework. AFNOR, NF EN ISO 14040 (2006-10-01), X30-300, 33p.
- ISO-14044. (2006). ISO 14044: 2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines. AFNOR, NF EN ISO 14044 (2006-10-01), X30-304, 59p.
- ISO-14062. (2003). Environmental management - Integrating environmental aspects into product design and development. AFNOR, 36p.
- ISO-9001. (2009). ISO 9001 : 2008/Cor 1:2009, Systèmes de management de la qualité – Exigences. Edition: 1 | Stade: 60.60 | TC 176/SC 2, ICS: 03.120.10, Document disponible depuis le: 2009-07-17.
- JANIN, M. (2000). Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu: construire la cohérence entre outils et processus. PhD thesis, ENSAM, Chambéry, FRANCE.
- JAOUEN, B. (2010). Les Bateaux du Futur - L'écotechnologie en marche ! Compte rendu 1ère Journée Thématique 2010 ECONAV, Auditorium de la MACIF, Paris XVème, 63p., Vendredi 5 mars 2010.
- JOHNSEN, T., ENDRESEN, Ø., & SØRGÅRD, E. (2005). Assessing environmental performance by ship inventories. Det Norske Veritas, rapport 12p.
- KNIGHT, P., & JENKINS, J. O. (2009). Adopting and Applying Eco-Design Techniques: A Practitioners Perspective. Journal of Cleaner Production 17 (2009) 549-558.
- LAGERSTEDT, J. (2003). Functional and environmental factors in early phases of product development - Eco functional matrix. PhD thesis, Trita-MMK, ISSN 1400-1179; 156p., 2003:1.
- LARSEN, H. F., & HAUSCHILD, M. (2007). Evaluation of Ecotoxicity Effect Indicators for Use in LCIA. Int J LCA 12 (1) 24 – 33.
- LE COZ, E. (2001). Méthodes et outils de la qualité - Outils classiques. Techniques de l'Ingénieur, AG 1 770 (1-16).
- LE POCHAT, S. (2005a). Intégration de l'éco-conception dans les PME : proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits. Thèse de doctorat, ENSAM, 279p.
- LE POCHAT, S., BERTOLUCI, G., & FROELICH, D. (2007b). Integrating ecodesign by conducting changes in SMEs. Journal of Cleaner Production 15 (2007) 671e680.
- LLOYD's. (2000). New openings quantifying opportunities in Asia. 37p.
- LUTTROP, C., & LAGERSTEDT, J. (2006). Ecodesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. Journal of Cleaner Production 14 (15-16), pp. 1396-1408.
- MAGDELAINE, C. (2010). http://www.notre-planete.info/actualites/actu_1471_continent_dechets_pacifique_nord.php. Notre-Planète.info, page internet consultée en juillet 2010.

- MAGERHOLM-FET, A. (2002). Life Cycle Assessment of transportation . Norwegian University of Science and Technology Presented at the WEGEMT workshop, Southampton, 10p., Sept. 2002.
- MARCHAND, M., & TISSIER, C. (2005a). Analyse du risque chimique en milieu marin : l'approche méthodologique européenne. Collection Comportement des polluants - IFREMER : 124 pp.
- MARCHAND, M., TISSIER, C., TIXIER, C., & TRONCZYNSKI, J. (2004b). Les contaminants chimiques dans la Directive Cadre sur l'Eau. Document de synthèse IFREMER, 31 pp.
- MARTINEAU, D., LEMBERGER, K., DALLAIRE, A., LABELLE, P., LIPSCOMB, T. P., MICHEL, P., et al. (2002). Cancer in Wildlife, a Case Study: Beluga from the St. Lawrence Estuary, Québec, Canada. Environmental Health Perspectives Volume 110, N° 3, p285-292, March 2002.
- MCALOONE, T., & BEY, N. (2009). Environmental improvement through product development - a guide. Danish Environmental Protection Agency, 48p, ISBN 978-87-7052-950-1.
- MEEDDM. (2010). Décret instituant une aide à l'acquisition des véhicules propres. Décret no 2010-447 du 3 mai 2010 modifiant le décret no 2007-1873 du 26 décembre 2007 instituant une aide à l'acquisition des véhicules propres, NOR : DEVE1000293D, 2p.
- MELQUIOT, P. (2003). 1001 mots et abréviations de l'environnement et du développement durable . RECYCONSULT, 192P, JUILLET 2003.
- MICHEL, J., & HAYES, M. (2005). Sensitivity of coastal environments and wildlife to spilled oil: Hudson River BIRDS (Bird Polygons). Office of Response and Restoration, NOAA's National Ocean Service, 85p.
- MIDN. (2006). Rapport intermédiaire des travaux de la Mission interministérielle sur le démantèlement des navires civils et militaires en fin de vie. Lettre du Premier ministre du 6 mars 2006, 35p., Paris, le 25 octobre 2006.
- MILLET, D., BISTAGNINO, L., LANZAVECCHIA, C., CAMOUS, R., & POLDMA, T. (2005). Does the potential of the use of LCA match the design team needs? Journal of Cleaner Production 15 (4) 335-346.
- MORTGAT, B. (2004). L'éco-conception, un Graal de plus en plus accessible aux PME / PMI. Environnement & Technique, ISSN 0986-2943 ,n°240, pp.32-36 octobre 2004.
- OECD. (1998). Towards sustainable development: environmental indicators. OECD, Paris, 156p.
- OLLIVIER-DEHAYE, C. (1999). Analyse du Cycle de Vie – Comment choisir un logiciel. Techniques de l'Ingénieur, vol. G3, noG6350, pp. G6350.1-G6350.1, 16p.
- ORR, J., & al. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature 437, 681-686 (29 September 2005) | doi:10.1038/nature04095; Received 15 June 2005; Accepted 29 July 2005.
- PANT, R., & al. (2004). OMNIITOX: LCA Case Studies Comparison between Three Different LCIA Methods for Aquatic Ecotoxicity and a Product Environmental Risk Assessment Insights from a Detergent Case Study within OMNIITOX. Int J LCA 9 (5) 295 - 306.
- PAPPALARDO, M., & al. (2010). Les indicateurs de développement durable. Collection « La Revue » du Service de l'observation et des statistiques (SOeS) du Commissariat général au développement durable (CGDD), 102p., 20 janvier 2010.

- PARLEMENT-EUROPEEN. (2000a). Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. JO L 327 du 22.12.2000, SYN 97/0067, extension à l'EEE par 22007D0125, p. 1–73.
- PARLEMENT-EUROPEEN. (2001b). Décision n° 2455/2001/CE du Parlement européen et du Conseil du 20 novembre 2001 établissant la liste des substances prioritaires dans le domaine de l'eau et modifiant la directive 2000/60/CE. 32001D2455 , JO L 331 du 15.12.2001, p. 1-5.
- PARLEMENT-EUROPEEN. (2003d). Directive 2002/95/EC on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS). Directive of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003, , Official Journal of the European Union, L 37, 5p, 13 February 2003.
- PARLEMENT-EUROPEEN. (2006c). Directive 2006/121/CE du Parlement européen et du Conseil. modifiant la directive 67/548/CEE du Conseil, OJ L 396, 30.12.2006, COD 2003/0257, p. 850–856, 18 décembre 2006. rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives relatives à la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses afin de l'adapter au règlement (CE) no 1907/2006: concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), et instituant une agence européenne des produits chimiques.
- PERROT, J.-Y., & POITEVIN, F. (2010). Etudes d'impact, évaluation. Groupe VII, Le Grenelle de la Mer, 56p. Rapport final au 15 mars 2010.
- PIGUET, BLANC, CORBIERE-NICOLLIER, & ERKMAN. (2007). L'empreinte écologique : un indicateur ambigu. Futuribles, n° 334, pp.5-24. ISSN 0337 307 X, octobre 2007, DOI : 10.1.51/futur :20073345.
- PNUE. (2002a). Directives techniques pour la gestion écologiquement rationnelle du démantèlement intégral ou partiel des navires. Conférence des parties à la convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination, Sixième réunion 9-13 décembre 2002. Genève: Programme des Nations Unies pour l'Environnement.
- PNUE. (2009b). Lignes directrices pour l'analyse sociale du cycle de vie des produits. ISBN: 978-92-807-3051-7, DTI/1211/PA, 104p.
- PONS, M.-N. (2008). Analyse du Cycle de Vie – Comment choisir un logiciel. Techniques de l'Ingénieur G 6 350v2, 15p.
- POTAGE, J. (2010). Des achats à la " gestion des ressources fournisseurs ". Séminaire Ressources Technologiques et Innovation, L'Association des Amis de l'École de Paris, Séance du 17 mars 2010 Compte rendu rédigé par Élisabeth Bourguinat, 11p.
- POTTING, J., & HAUSCHILD, M. Z. (2006). Spatial Differentiation in Life Cycle Impact Assessment A decade of method development to increase the environmental realism of LCIA. Int J LCA 11, Special Issue 1 (2006), 11 – 13.
- PRECODD. (2010). <http://www.precodd.fr>. site internet du PProgramme de Recherche sur les Ecotechnologies et le Développement Durable, consulté en juin 2010.
- PRINCAUD, M., CORNIER, A., & FROELICH, D. (2010). Developing a tool for environmental impact assessment and eco-design for ships. J. Engineering for the Maritime Environment, 2010, 224 (M3), 207-224. DOI 10.1243/14750902JEME185.
- QUARANTE, D., & MAGNON, L. (1996). Design industriel. Référence T70, 24p., 10 mai 1996.

- QUENARD, D. (2007). Comparaison internationale bâtiment énergie, C – composants et équipements innovants. PREBAT - Décembre 2007 / ADEME-PUCA-CSTB.
- REAP, J., ROMAN, F., DUNCAN, S., & BRAS, B. (2008). A survey of unresolved problems in life cycle assessment Part 1: goal and scope and inventory analysis. *Int J Life Cycle Assess* (2008) 13:290–300 DOI 10.1007/s11367-008-0008-x.
- RENAULT. (2010a). <http://www.renault.com/fr/Groupe/developpement-durable/environnement/Pages/Cycle-de-vie.aspx>. Site internet consulté en juillet 2010.
- RENAULT. (2010b). Renault-Nissan CSR Guidelines for Suppliers. Renault S.A.S. Nissan Motor Co., Ltd, 20p., May 2010.
- ROSEMBAUM, R. K., & al. (2008). USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *Int J Life Cycle Assess* DOI 10.1007/s11367-008-0038-4.
- SCHINDLER, J.-M., & al. (2010). Groupe de travail Pollutions marines. Groupe XIII, Le Grenelle de la Mer, Rapport final au 11 mars 2010, 40p.
- SCIENCES&VIE. (2008). Construire un monde durable, . hors série n°243, 162p., Excelsior Publications SAS, juin 2008.
- SINGH, R., MURTY, H., GUPTA, S., & DIKSHIT, A. (2009). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicator*, Volume 9, Issue 2, Pages 189-21, March 2009.
- SITA. (2010). <http://www.sita.fr/>. site internet consulté en juin 2010.
- SMEETS, E., & WETERINGS, R. (1999). Environmental indicators typology and overview. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 19p.
- SOES. (2009). Recueil des fiches indicateurs de l'Observatoire National des Zones Humides. Service de l'Observation et des Statistiques et Observatoire National des Zones Humides, Commissariat Général au Développement Durable, Octobre 2009.
- STERN, & TAYLOR. (2007). Climate change: Risk, ethics, and the stern review. *Science* 13 July 2007:Vol. 317. no. 5835, pp. 203 - 204, DOI: 10.1126/science.1142920, 203-204.
- TERRE-SACREE. (2008). Le terrible échancier. Association Terre Sacrée, 8p.
- TEULON, H. (2008). L'éco-conception par l'innovation. présentation Gingko 21.
- TI. (2009). Ecoship, le fleuron écologique de la marine française. article consulté en ligne en septembre 2010, sur :http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/materiaux-thematique_6342/ecoship-le-fleuron-ecologique-de-la-marine-francaise-article_6179/, 21 juil. 2009.
- UN. (2002). Report of the World Summit of Sustainable Development. New-York, 173p.
- UNCED. (1992). Agenda 21. United Conference on environment and Development, Rio de Janeiro, June 1992.
- UNESCO. (1994). Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau. Ramsar, Iran, 2.2.1971 telle qu'amendée par le protocole du 3.12.1982 et les amendements de Regina du 28.5.1987, Paris, le 13. juillet 1994.
- UN-FCCC. (1998). Protocole de Kyoto ; À la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Nations Unies 1998, FCCC/INFORMAL/83 GE.05-61647 (F) 070605 090605, 24p.

- VAN BERKEL, R., & LAFLEUR, M. (1997). Application of an industrial ecology toolbox for the introduction of industrial ecology in enterprises-II. *J. Cleaner Prod.* Vol. 5, No. 1-2, pp. 21-31.
- VAN BERKEL, R., WILLEMS, E., & LAFLEUR, M. (1997). Development of an industrial ecology tool box for the introduction of industrial ecology in enterprises-I. *J. Cleaner Prod.* Vol. 5, No. 1-2, pp. 11-25.
- VOLVO. (2010a). <http://www.volvogroup.com/suppliers/global/en-gb/supplierselection/environment/Pages/environment.aspx>. Site internet consulté en juillet 2010.
- VOLVO. (2010b). Key Elements Procedure 5 Environmental Requirements. WORD.KEP.DOC/ISSUE 4 – April 30, 2010, Doc. reg. 960-09-043, 5p.
- VOLVO. (2010c). Supplier Self-assessment Environmental requirements for Volvo Group Suppliers. WORD.KEP.DOC/ISSUE 4 – April 30, 2010, Doc. reg. 960-09-043, 3p.
- WENZEL, HAUSCHILD, & ALTING. (1997). *Environmental Assessment of Products*, vol. 1 : Methodology, tools and case studies in product development.
- WIGUM, K. S. (2004). Human and ecological problem solving through radical design thinking. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology Department of Product Design Engineering Trondheim.
- WINNES, H., & ULFVARSON, A. (2006). Environmental improvements in ship design by the use of scoring functions. *Proc. IMechE Vol. 220 Part M: J. Engineering for the Maritime Environment* 220 (1), pp. 29-39.

ANNEXES

1. QUESTIONNAIRE ENVOYE AUX ENTREPRISES	I
2. EXPRESSION DE BESOINS POUR L'OUTIL D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE ET D'ECO-CONCEPTION	III
2.1. GENERALITES	III
2.2. CONTEXTE	III
2.3. LA STRUCTURE GLOBALE DE L'OUTIL : DEFINITION DES BESOINS ET DES ATTENTES EN TERMES DE RESULTATS	V
2.4. L'INTERFACE HOMME/MACHINE	VII
2.5. LES BASES DE DONNEES	XVIII
2.6. LA METHODE DE CALCUL BASEE SUR CML 2001	XXVIII
2.7. LA FIN DE VIE (FDV)	XXX
3. FONCTIONNALITES DE L'OCEAN	XXXIII
4. MISE EN PLACE D'UNE METHODOLOGIE D'EVALUATION DE L'IMPACT DES NAVIRES TOUT AU LONG DE LEUR CYCLE DE VIE EN FONCTION DU NIVEAU D'IMPACT DES POLLUANTS EMIS ET DE LA MASSE D'EAU IMPACTEE (RAPPORT IFREMER)	XXXVI

1. QUESTIONNAIRE ENVOYE AUX ENTREPRISES

(...)Je cherche des informations sur l'intégration de l'éco-conception au sein du processus de conception dans des entreprises fabriquant des produits assez complexes. En effet, je travaille sur l'éco-conception de navires, et je souhaite faire le parallèle avec des produits similaires, en termes de processus de conception. Ces produits seraient définis par :

- Une **longue durée de conception** pour des produits de **longue durée de vie** (et de petites séries)
 - des produits **multi-matériaux** et multi-pièces
 - des **contraintes techniques / physiques / mécaniques** très importantes qui nécessitent la définition d'un **bilan de masse** très tôt lors de la conception (en avant-projet)
 - un découpage du produit selon une **arborescence produit** : découpage en sous-ensembles selon les fonctionnalités ou les spécialités mises en jeu (métiers) → découpage directement lié au bilan de masse
 - de **nombreux acteurs de la conception** travaillant à des niveaux différents, et avec des approches différentes suivant les phases de conception
-

J'ai quelques questions d'ordre général à vous poser, à la fois sur le processus de conception, et sur l'intégration de l'éco-conception :

1) Combien de temps, en moyenne, dure votre processus de conception ?

....

2) Y a-t-il un bilan de masse défini pour vos produits ? si oui, à partir de quelle étape de la conception ? si non, pourquoi ?

....

3) Pourriez-vous m'indiquer si vos produits entreraient dans la définition énoncée ci-dessus ? si oui, y a-t-il des critères supplémentaires que vous ajouteriez ? et si non, en quoi diffèrent-ils ?

....

4) L'innovation a-t-elle une place particulière (en R&D, donc en continu) ou est-elle mise en place lors de la conception de chaque nouveau produit ? (à titre de comparaison, pour les navires militaires, il est très fréquent de réutiliser des ensembles technologiques dont les fonctionnalités sont très bien connues)

....

5) A quelle échelle votre entreprise a-t-elle choisi d'intégrer les questions sur l'environnement ?

a. est-ce dès la conception des produits ? si oui, de quel(s) outil(s) disposez-vous ?

....

b. Qui est concerné par cette démarche ? des spécialistes ou l'équipe de conception dans son ensemble (peut-être après une sensibilisation ?) ?

....

6) Si on vous disait que vous pourriez utiliser un outil d'éco-conception (permettant à la fois une évaluation des impacts environnementaux mais aussi une amélioration des produits grâce à une aide à la conception), à la condition que votre produit dispose d'un bilan de masse dès la phase d'avant-projet, seriez-vous intéressé ?

....

2. EXPRESSION DE BESOINS POUR L'OUTIL D'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE ET D'ÉCO-CONCEPTION

2.1. Généralités

Objectifs du document

Ce document est destiné à décrire :

- Les besoins de l'outil (cahiers des charges)
- Les modules constituant le futur outil
- Les exigences nécessaires pour la construction de l'outil
- Les critères d'acceptation concernant ces exigences
- Les futurs « points d'attache » qui relieront cet outil à l'outil de suivi

Domaine d'application

Ce document s'applique dans le cadre du projet CONVENAV. Dans un premier temps, l'outil sera un « prototype » construit sur les bases de données des navires de DCNS. L'outil, en vue de sa validation, devra être testé avec les données disponibles pour un navire océanographique. Enfin, il se destine à être commercialisable et applicable à tout type de bateaux.

DCNS sert de support pour le développement et l'expérimentation de l'outil, qui sera par la suite utilisable par tous les concepteurs de navires.

Documents de références

- Cahier des charges de l'outil d'éco-conception – V.1.0 – 16.01.2009
- Réunions des 25 et 26 juin 2009

2.2. Contexte

Objet

L'outil d'éco-conception et d'évaluation environnementale doit permettre de prendre en compte les impacts sur l'environnement, et plus particulièrement sur le milieu marin, lors de la conception des bateaux. Il doit fournir un outil d'aide à la décision des utilisateurs, pour une optimisation des performances environnementales des navires. Il doit permettre à tous les acteurs de la conception (analyste environnemental, architecte, systémiers, technologues et fournisseurs) de participer à la récupération des données et/ou à l'utilisation de l'outil.

Périmètre

L'outil doit pouvoir être utilisable :

- Pour toutes les phases de conception (surtout en avant-projet et en développement)
- Pour une phase de vie (fabrication, utilisation, fin de vie), ou sur toute la durée du cycle de vie du navire, et ceci, pour chaque phase de conception
- Pour l'ensemble du navire, ou seulement un système, un sous-système ou tout autre élément constitutif du navire
- En fonction et en rapport avec une représentation 3D du navire (ou au moins un plan permettant une localisation des éléments par local)

Par différents utilisateurs :

- **L'analyste environnemental** : il doit avoir les « pleins » pouvoirs sur l'outil. C'est le garant de l'outil (fonctionnement, intégrité, ...) et du bilan environnemental. Il doit avoir accès à tous les éléments de l'outil, que ce soit des bases de données, des modules utilisés ou créés, ou encore l'AP d'un système ou d'une partie de l'AP.
- **L'architecte** : il doit aider l'analyste grâce à sa vision globale du produit et de chacun de ses constituants. Il doit donc avoir accès à l'ensemble de l'AP associée aux données d'entrée.
- **Les systémiers** : ils n'ont accès qu'au système qu'ils ont en charge
- **Les technologues** : ils ont accès à une partie du système pour lequel ils travaillent. Cet accès est défini par le référent (système, architecte, analyste)
- **Les fournisseurs** : ils n'ont accès qu'à un fichier type qu'ils devront remplir via une connexion internet par exemple.
- **Les clients** : ils n'ont qu'un accès de consultation (niveau de regard différent) ; par l'intermédiaire d'un accès à des rapports spécifiques

Dans le cadre du projet CONVENAV

Dans le cadre du projet CONVENAV, l'outil doit se « limiter » à un démonstrateur. Toutes les fonctionnalités ne seront pas forcément mises en place. Par exemple, toutes les catégories d'impact présélectionnées ne seront pas développées. Les fonctionnalités variables entre les utilisateurs potentiels ne seront pas construites, même si elles seront établies et prédéfinies en vue du futur développement de l'outil pour une éventuelle commercialisation.

L'outil doit quand même pouvoir fonctionner de façon complète, c'est-à-dire que l'on doit avoir un bon aperçu des possibilités de l'interface, avec ses entrants (données constructeurs, et données de « base »), et ses sortants (graphiques, et autres résultats). Il doit nous permettre de

tester sa faisabilité, ses limites avec pour objectif, d'identifier les éléments à perfectionner, et perfectibles pour un développement plus industriel de l'outil.

2.3. La structure globale de l'outil : définition des besoins et des attentes en termes de résultats

Description du besoin

L'utilisateur choisit le périmètre de son étude (niveau d'utilisateur, phase de conception, phase de vie, typologie du navire, arborescence produit et données associées) puis il lance les calculs (impacts, et autres).

Structure générale de l'outil

L'outil présente une interface « Homme-machine » intégrant les données qui devront entrer pour le calcul d'impacts et les autres calculs (relatifs à la fin de vie entre autres) et où les résultats s'afficheront.

Toutes les bases de données seront en anglais. Seule l'Interface Homme/Machine (IHM) sera présentée en français.

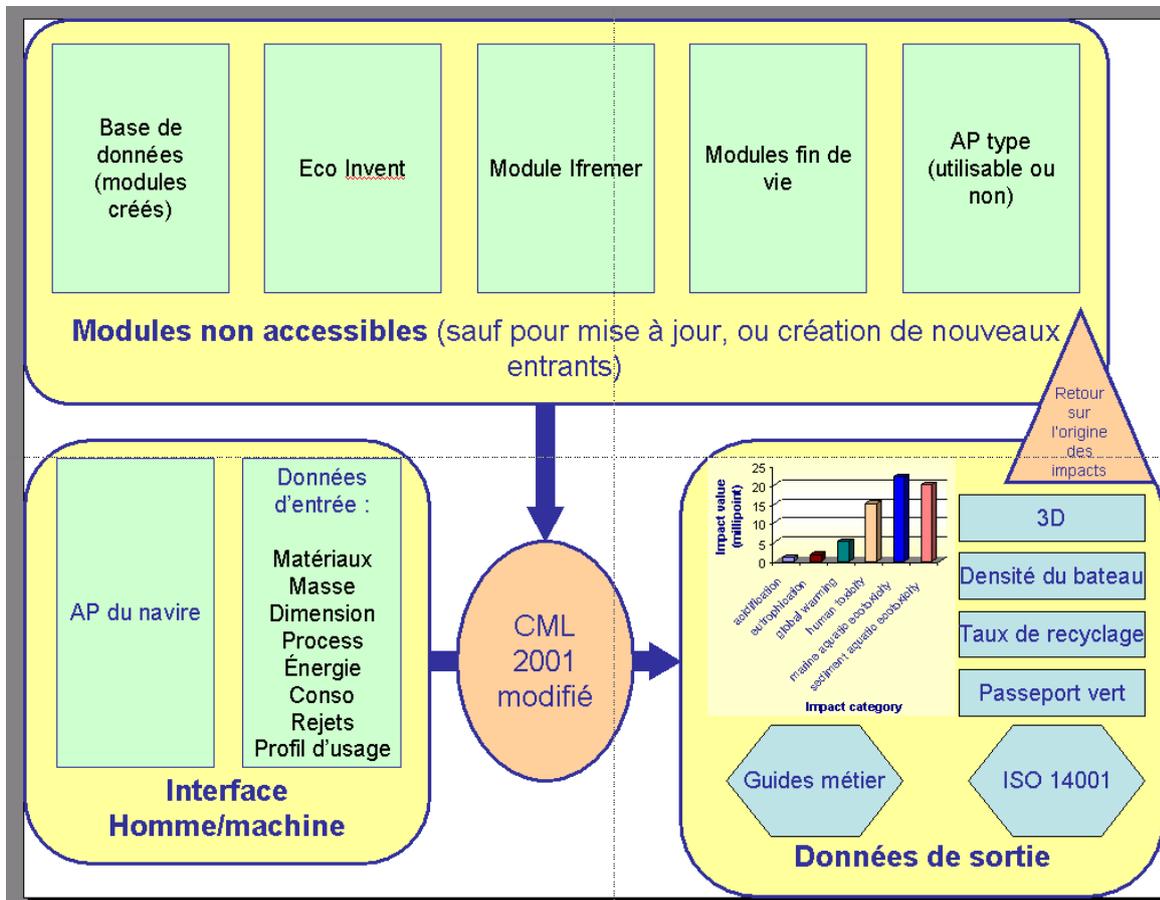
On peut séparer l'outil en 6 grandes parties :

- l'ensemble des bases de données, qu'elles soient existantes (Ecolvent), créées (modules créés lors de la modélisation des frégates La Fayette et FREMM, ou modules qui vont être créés), ou récupérées (possibilités d'insérer des bdd existantes et apportées par exemple par les fournisseurs)
- l'ensemble de données constructeur : l'arborescence produit (plus ou moins) associée aux données telles que les bilans de masse, de consommation, ...
- la méthode de calcul, basée sur la méthode CML 2001, et modifiée en ce qui concerne le calcul d'impact sur le milieu marin (ajout de nouvelles catégories d'impact, liées à la spatialisation du milieu marin)
- une matrice de calcul pour les autres résultats (surtout liés à la fin de vie)
- les résultats types ACV sortant du calcul utilisant CML 2001 modifié avec la possibilité d'identifier les sources contribuant aux impacts (tous les types de flux)
- les résultats des calculs « hors ACV » qui donnent des valeurs et informations aidant à l'aide à la décision

L'outil (en version industrialisable) regroupe donc :

- des bases de données sous format Excel, Ecolvent ou autre
- un plan du navire
- une méthode de calcul

- des documents divers
- des fiches de données de sécurité ?



Les fonctions indispensables à l'outil

- page d'accueil
- accès à un portail fournisseurs : pour le remplissage de fichiers types
- création de compte (log in, mot de passe, références, fonction)
- log in et mot de passe
- droit : administrateur (analyste), utilisateur (architecte, systémiers, technologues, et très spécifiquement fournisseur), consultation (client, BV, autres)
- interface : multifenêtres, menus déroulants, pop-up
- **capacité du logiciel à traiter nombre d'informations à la seconde**
- capacité de fonction de tri / requête / affichage par type de flux ou multicritères
- outil ouvert, interfaçable, adaptable, configurable par les non initiés
- possibilité d'entrée et de sortie de fichiers (format défini, mais adaptable)
- mise à jour aisée (accès, suivi, signalement)

- définition de champs utiles (constructeurs, clients, BV)
- liens hypertextes vers les documents associés
- possibilité de sauvegarde, archivage et historique
- possibilité de sauvegarder les données d'entrées (AP et bases de données) séparément des données de sorties (résultats), pour refaire tourner le calculateur sans tout reprendre si il y a eu des mises à jour entre temps
- possibilité de créer des versions
- possibilité d'affichage du suivi d'un élément (« drapeau »)
- définir l'évolution des données : écraser, ajouter, modifier, supprimer, ...
- des fonctions d'import et export de données
- des fichiers types pour les échanges et la collecte des données
- une fonction de stockage des données et informations (liens hypertextes ?)
- une fonction de tri permettant d'identifier une cause commune (ex : matériau, élément, ...)
- accès à un didacticiel
- accès à « guide des bonnes pratiques » (= guide métier éco-conception = *ecodesign pilot*)
- accès à un glossaire

Les limites d'utilisation

Les calculs d'impacts et pour les autres résultats nécessitent un minimum d'interventions manuelles.

Il devra être notifié, dans le cas d'une comparaison de produits, qu'une éventuelle mise à jour aura pu être effectuée et que, en conséquence, les résultats obtenus sur un précédent projet auront pu être modifiés.

Enregistrement

L'enregistrement se fera sur demande de l'utilisateur, avec une demande automatisée à la fin de chaque session d'utilisation (pop up). Cet enregistrement ne sera possible que si l'utilisateur n'est pas un consultant.

2.4. L'interface Homme/machine

Par définition, l'interface doit être accessible à tous les utilisateurs. Cette interface doit être intuitive dans son utilisation et dans son mode de navigation. Il y a des étapes à suivre, qui ne seront accessibles qu'après validation de chacune des étapes dans l'ordre défini.

Le lien entre les bases de données et le projet ne se feront que si et seulement s'il y a un lancement de calcul. Cela permet d'intégrer d'éventuelles mises à jour.

Le « taux de remplissage » des informations

Certaines informations étant indispensables pour obtenir un résultat, si elles ne sont pas remplies, l'outil devra refuser d'aller plus loin. Elles peuvent être marquées d'astérisques par exemple. Ces données sont les informations spécifiques à l'utilisateur (AP, bilan de masse et matériaux) et ne peuvent être apportées que par lui.

D'autres informations qui seront aussi indispensables pourront être laissées vides, souvent par ignorance de ces informations (process, rejets, ...). Mais contrairement aux données précédentes, celles-ci sont estimables, ou tout du moins, elles peuvent être moyennées. Il se fera alors un remplissage automatique au niveau des données manquantes. L'utilisateur devra quand même valider ses actions en autorisant un remplissage automatique qui fera appel aux bases de données existantes et prédéterminées. Ces cases seront « pré-référencées » de telle sorte que si après une première validation des données elles sont vides, l'outil les remplisse en allant chercher la bonne information.

Pour les informations utiles mais laissées vides, il n'y a aucune automatisation du remplissage, car ces données ne peuvent pas être « inventées ».

En fonction du taux de remplissage, l'outil pourra donner un indice de fiabilité. Plus les données fournies seront nombreuses, plus cet indice sera important.

Les étapes

Ouverture du logiciel

A l'ouverture, l'utilisateur commence par s'identifier :

- soit il a déjà un compte auquel cas, il lui suffit de rentrer son identifiant (log in) et son mot de passe.
- soit c'est sa première utilisation auquel cas, il lui faut fournir ses références : nom, prénom, mot de passe (à confirmer), adresse mail, ses coordonnées professionnelles, son « degré » d'utilisateur (analyste, architecte, systémier, technologue, client ou fournisseur). L'identifiant peut être créé d'office : la première lettre du prénom, suivie du nom, le tout en minuscules.

Si l'utilisateur est le client, il n'aura qu'un droit de consultation.

Si c'est un fournisseur, il n'aura qu'un accès « utilisateur » pour remplir la fiche correspondant à ce qu'il fournit (défini certainement par le systémier ou le technologue avec qui est habituellement en relation). Pour le reste de l'outil, il n'aura qu'un droit de consultation.

Si l'utilisateur est un technologue, il aura un accès de type utilisateur, restreint à sa zone de compétence.

Pour les systémiers, l'accès est toujours utilisateur, avec une restriction par système définie par l'architecte.

L'architecte a lui aussi un accès utilisateur, mais illimité.

Seul l'analyste environnemental a des droits administrateur.

Ouverture du fichier de travail

Pour ouvrir un fichier, il y a plusieurs options :

- soit il ouvre un dossier déjà créé et présent dans la base de données de l'outil (aller directement à l'étape 4)
- soit il crée un nouveau dossier

Création d'un nouveau dossier

C'est là que l'utilisateur rentre des informations générales :

- le type de bateau (selon la classification COWI 2007) : oil tanker ou other tanker ou bulk vessel ou container vessel ou gaz vessel ou passenger/ro-ro/vehicule ou other cargo vessel ou non-cargo vessel ou fishing vessel ou warship
- les dimensions du navire : longueur, largeur, hauteur, masse, densité, forme de la coque, plan. Le plan doit pouvoir être un fichier de référence externe, utilisé grâce à des codes de localisation qui seront entrés dans l'outil et qui iront faire la localisation dans le plan
- le profil opérationnel global du navire qui détermine les temps (en %) : à quai, en mouillage forain, en transit et en opération. Il doit cependant être possible de rajouter d'autres profils, si l'utilisateur en a besoin. Ces données sont théoriquement fournies par le client.

Le profil d'utilisation qui détermine le temps (en %) que doit théoriquement passer le bateau dans chaque type d'eau :

- Haute mer :
- En zone de siège de gyre
- En zone à courants marins orientés vers les côtes
- Eaux côtières
- Côtes rocheuses, plages sableuses ou à graviers, exposées
- Côtes rocheuses abritées
- Plages sableuses ou à graviers, galets, cailloux, abritées
- Estuaires et delta
- Zone vaseuse abritée
- Schorres et marais médiolittoraux alimentés en eau marine
- Zone humide littorale (lagunes, baies semi-fermées, étangs)

- Eaux portuaires :
- Ports en eaux profondes
- Ports en estuaire
- Ports fluviaux

NB : on peut supposer que toutes ces zones de navigation ne seront pas connues. Donc il doit être possible de seulement poser un ratio du temps par grand type d'eau (portuaire, côtière et hauturière).

Le profil de vitesse du navire. Il est défini au minimum par une vitesse maximum et une vitesse moyenne. Si l'utilisateur (entre autre, le systémier propulsion) possède un profil plus complet, il doit avoir la possibilité d'ajouter des lignes à ce profil.

Ces trois profils (opérationnel, d'utilisation et de vitesse) sont les composantes du profil d'exploitation. En théorie, le profil d'exploitation est donné par le client avec le cahier des charges.

Ces informations générales sont fournies par l'utilisateur pour l'ensemble d'un projet. On peut supposer qu'elles seront entrées par l'analyste, l'architecte voire quelques systémiers concernés. Ainsi, toutes ces informations ne seront pas entrées à chaque fois. Si elles n'ont pas été encore renseignées, l'outil doit proposer de le faire. Sinon, il passe à l'étape suivante, tout en sachant que ces données doivent être accessibles et modifiables.

Identification des limites de l'étude

L'utilisateur place le contexte de son étude par :

la phase de conception sur laquelle il va travailler (à renseigner manuellement, car cela reste une information indicative

la phase de vie du navire qu'il veut étudier (fabrication et/ou utilisation et/ou fin de vie)

L'arborescence produit

Au sein de l'outil, il y a une matrice de référence qui place chacun des niveaux de l'AP les uns par rapport aux autres. Il doit être possible de décrire l'AP au niveau, ou à un ensemble de niveaux que l'utilisateur souhaite. Cette matrice peut se présenter sous différents formats :

- si l'utilisateur souhaite travailler directement par le biais de l'interface outil, il entre progressivement son AP. Cela implique de pouvoir créer des lignes et des sous-lignes. On doit avoir une fonction qui permet de masquer des lignes (confort visuel) avec un développement/regroupement des sous-ensembles possible comme dans l'affiche des dossiers par un exploreur.
- si l'utilisateur souhaite travailler hors outil (notamment si il possède déjà un fichier AP), il doit pouvoir extraire de l'outil un fichier type vierge qu'il n'aura plus qu'à remplir et réintégrer dans l'outil.

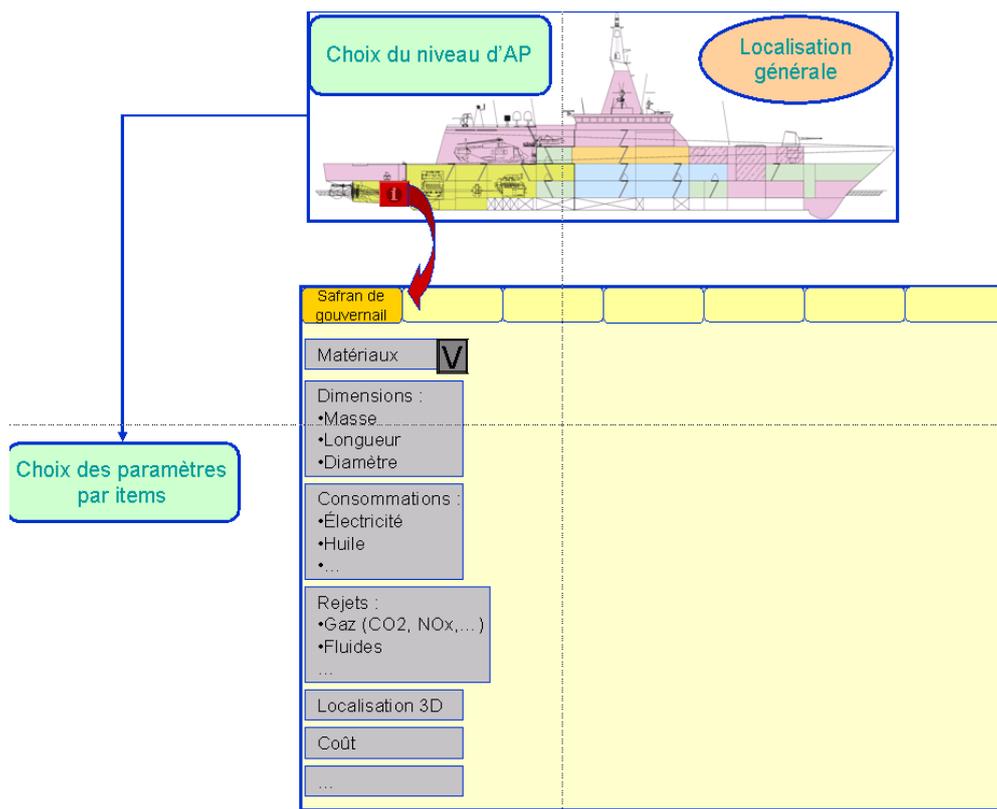
A noter que l'utilisateur peut choisir de n'entrer qu'un sous-ensemble d'un système, mais il devra quand même situer sa « racine » par rapport à l'ensemble de l'AP.

Les données associées à l'arborescence produit

L'utilisateur doit entrer des données associées à l'AP, telles que le matériau, sa masse, sa localisation, ... pour cela, il peut procéder selon les 2 mêmes options que pour l'AP : par l'interface (utilisation de menus déroulants pour les choix, possibilité d'ajout de lignes) ou hors outil. Dans ce dernier cas, il fait encore appel à un fichier type vierge.

A chaque qu'il possède la donnée et qu'il en connaît la provenance, il doit la notifier (dans une zone de commentaires).

Quatre modes opérationnels principaux sont définis de base (à quai, en mouillage forain, en transit et en opération). Mais il doit être possible d'ajouter d'autres modes quand ils sont nécessaires.



Dans tous les cas, l'utilisateur doit pouvoir renseigner :

pour la phase de fabrication et pour chacun des matériaux (ou éléments) :

- sa quantité et l'unité de cette quantité (pièce, masse, longueur, densité, ...)

- ses process de fabrication : remplissage automatique en fonction du matériau ou de l'élément entré, ou par l'utilisateur si celui-ci le connaît
- ses process d'assemblage : à remplir par l'utilisateur (affichage d'une présélection en fonction de l'entrant, et choix), ou si inconnu, automatique
- sa localisation dans le navire (code de localisation relié à un plan en externe de l'outil)

	matériaux	dimensions		process		localisation (3D, ou code)
		quantité	unité	fabrication	assemblage	
			p, masse, longueur, densité, ...	automatique, ou à remplir seulement si connu	à remplir (sinon automatique)	
phase A	acier coque					
phase C	acier nomenclaturé					

pour la phase d'utilisation et pour chacun des matériaux (ou éléments) :

- sa quantité et l'unité de cette quantité (pièce, masse, longueur, densité, ...)
- ses process de fabrication : remplissage automatique en fonction du matériau ou de l'élément entré, ou par l'utilisateur si celui-ci le connaît
- ses process d'assemblage : à remplir par l'utilisateur (affichage d'une présélection en fonction de l'entrant, et choix), ou si inconnu, automatique (en fonction de l'élément)
- ses process de démantèlement : à remplir par l'utilisateur (affichage d'une présélection en fonction de l'entrant, et choix), ou si inconnu, automatique (en fonction de l'élément)
- sa localisation dans le navire (code de localisation relié à un plan en externe de l'outil)
- son taux de renouvellement pour la maintenance : un élément qui doit être changé 1 fois au cours de la vie du navire a un taux de maintenance de 200% (il faut créer 2 fois cet élément, avec prise en compte des process associés, et le démanteler une fois). Il correspond à un facteur de multiplication de l'élément.

Ses consommations (avec quantité et unité à chaque fois) :

- En électricité : à quai, en mouillage forain, en transit et en opérationnel.
- En gasoil : à quai, en mouillage forain, en transit et en opérationnel
- En huile : à quai, en mouillage forain, en transit et en opérationnel
- En eau potable : à quai, en mouillage forain, en transit et en opérationnel
- En eau de mer : à quai, en mouillage forain, en transit et en opérationnel
- En gaz (à définir) : à quai, en mouillage forain, en transit et en opérationnel

- En fluides autres (à définir) : à quai, en mouillage forain, en transit et en opérationnel
- Autres : création de ligne
- Ses rejets (avec quantité et unité à chaque fois) :
- En gaz : à choisir
- En fluides : à choisir (eau, huiles, ...)

	matériaux	dimensions		process			localisation (3D, ou code)
		quantité	unité	fabrication	assemblage	démantèlement	
			p, masse, longueur, densité, ...	automatique, ou à remplir seulement si connu	à remplir (sinon automatique)	à remplir (sinon : la valeur de l'assemblage)	
phase A	acier coque						
phase C	acier nomenclaturé						

consommations													tx de maintenance			
électricité				gasoil				huile				eau				
à quai	mouillage forain	transit	opération	à quai	mouillage forain	transit	opération	à quai	mouillage forain	transit	opération	à quai	mouillage forain	transit	opération	

rejets					
gaz				fluides	...
CO2	NOx	SOx	...		

pour la phase de fin de vie et pour chacun des matériaux (ou éléments) :

- sa quantité et l'unité de cette quantité (pièce, masse, longueur, densité, ...)
- le scénario de fin de vie envisagé : il peut être automatisé au niveau du matériau, ainsi qu'au niveau de l'élément constitué de différents matériaux. Nous pouvons déterminer un scénario « idéal », dès qu'un matériau est présent à une certaine hauteur (quantité ou pourcentage).
- ses process de démantèlement : à remplir par l'utilisateur (affichage d'une présélection en fonction de l'entrant, et choix), ou si inconnu, automatique (en fonction de l'élément), ils sont présélectionnés en fonction du scénario de fin de vie choisi

- sa localisation dans le navire (code de localisation relié à un plan en externe de l'outil)

	matériaux	dimensions		process	localisation (3D, ou code)
		quantité	unité	démantelement à remplir (sinon : la valeur de l'assemblage)	
phase A	acier coque				
phase C	acier nomenclaturé				

A noter que, pour le choix des process, l'utilisateur a différentes options :

- si il connaît le process de fabrication (celui utilisé par le fournisseur pour fabriquer l'élément par exemple), d'assemblage (celui utilisé sur le chantier de construction pour mettre cet élément dans le navire) et / ou de démantèlement (ceux utilisés pour la maintenance et pour le démantèlement final du navire), il doit pouvoir rentrer ces informations. Pour cela, ayant entré un matériau (ou élément), l'outil va chercher automatiquement les process correspondant possibles et les propose sous forme de menu déroulant à l'utilisateur. Il choisit celui qui lui convient, et lui donne une quantité (associée à une unité). L'utilisateur doit pouvoir créer son module, s'il ne trouve rien dans les bases de données qui corresponde à son besoin. Ce module créé doit contenir le même type d'informations qu'un module classique défini dans la base EcoInvent.
- si l'utilisateur ne connaît pas les process utilisés, il choisit de ne pas remplir la case appropriée. Celle-ci est alors automatiquement remplie par une donnée moyenne et supposée (donnée définie après recherche biblio, ou données de « terrain » obtenue par le fournisseur et entrée dans la base de données créée), pondérée par la quantité de matériau entrée.

Si l'utilisateur rentre une valeur, celle-ci est prioritaire pour le calcul final, et est considérée comme « fiable ».

Le calcul des résultats

Une fois que l'utilisateur a entré toutes les données qu'il souhaitait (ou pouvait), il clique sur un bouton « calculer ». L'outil lui propose alors de valider ses choix : accepter que les cases vides indispensables pour le calcul soient remplies automatiquement, ce qui lui donnera une valeur d'incertitude plus importante (affichée, en fonction du taux de remplissage des cases).

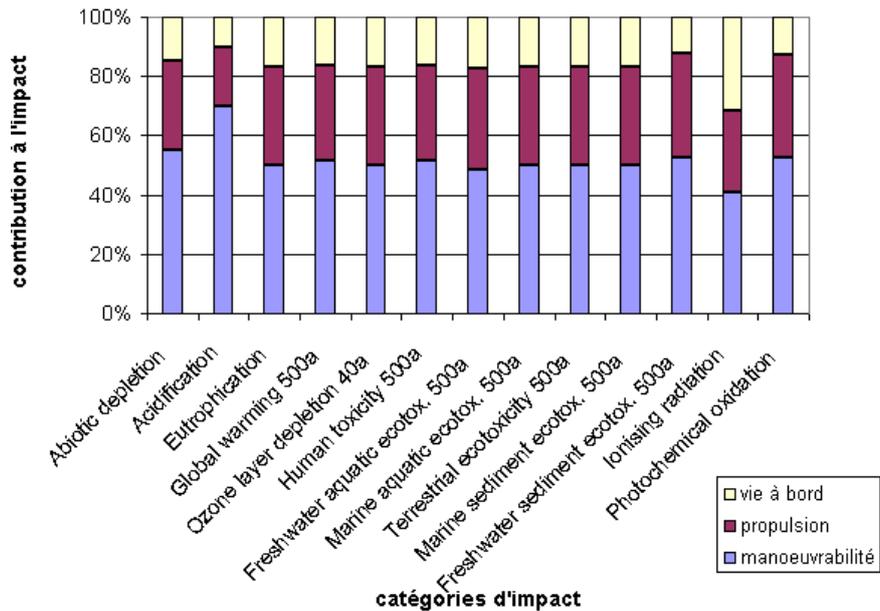
Deux types de calculs sont alors faits : un calcul type ACV et des résultats supplémentaires, hors calcul d'impact

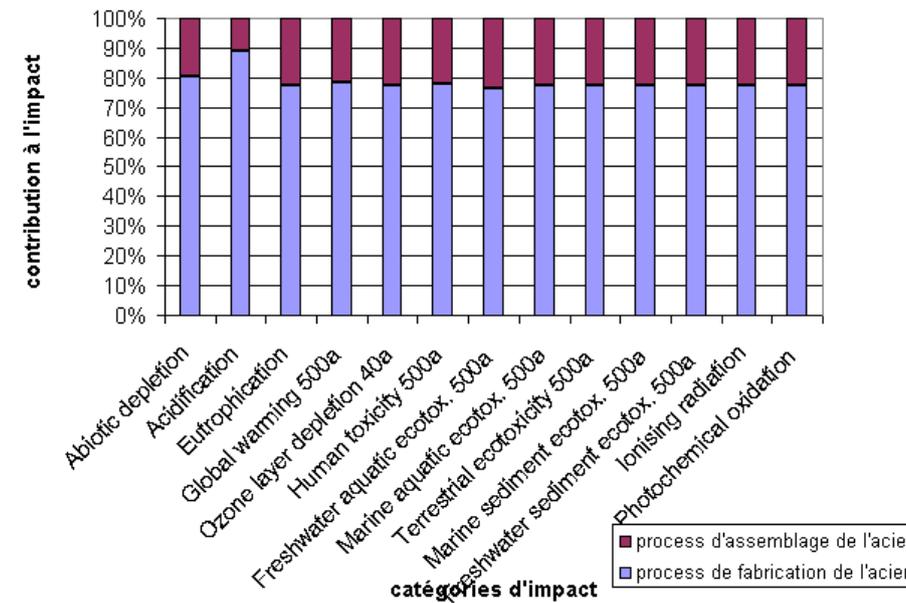
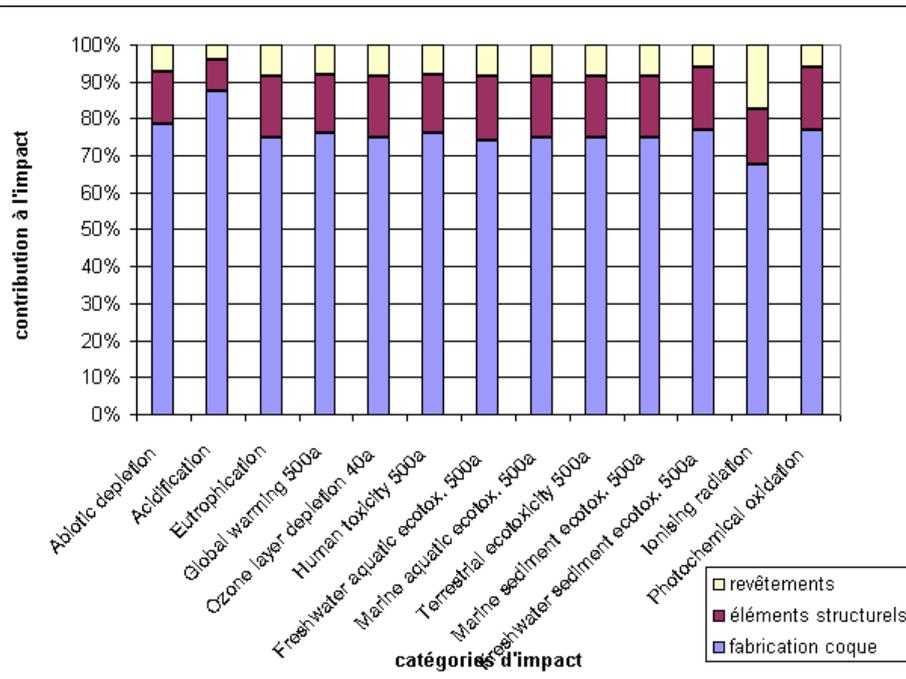
NB : si l'utilisateur charge son fichier type dans l'outil, il doit pouvoir naviguer grâce à l'AP du navire, à travers l'ensemble des données. Le fichier type doit donc pouvoir s'afficher dans l'interface (après une « conversion » du format des données).

a) un calcul d'impact type ACV.

Pour chaque catégorie d'impact affiche une valeur de l'impact (affichage par graph et tableaux). La contribution de chaque élément de l'AP (au niveau à étudier souhaité), de chaque process, substance, phase de vie doit être identifiable. Et il doit être possible de « remonter » sur toute la longueur du flux choisit.

Par ex : pour la phase de fabrication du navire, on obtient les impacts par systèmes. On identifie le système coque comme étant le plus impactant. On veut alors savoir qui contribue le plus à cet impact dans le sous-système. Il s'agit de la fabrication même de la coque et de ses structures. Dans le sous-ensemble coque, on peut continuer à remonter le flux, et voir que c'est le process de fabrication de l'acier qui est le plus contributif.





L'utilisateur doit pouvoir remonter n'importe quel flux contributif. Il peut le faire en cliquant sur la partie de l'histogramme qui l'intéresse, faire un clic droit, et choisir une spécification du flux qu'il souhaite visionner.

Parallèlement à un affichage graphique, il doit être possible de faire un affichage sous forme de tableaux.

Les deux formats doivent être extractibles de l'interface outil (format Excel entre autres), si l'utilisateur souhaite peaufiner l'ergonomie de ses résultats (qui restera assez simple par l'interface).

Une option possible : pouvoir remonter directement (sans faire le cheminement manuel) à la source d'impact voulue. L'utilisateur doit pouvoir afficher la source principale pour une catégorie d'impact (au niveau d'AP souhaité, par substance, process, ...). On peut aussi lui proposer d'afficher les éléments source d'impact qui sont contributeurs à un certain pourcentage de la catégorie d'impact étudiée.

En plus de ces résultats, et au moment où ils s'affichent, l'utilisateur peut choisir de normaliser (pondérer) les catégories d'impact pour pouvoir les comparer. Cela peut se présenter sous la forme d'une case « normaliser » qui permet d'ouvrir une fenêtre où toutes les catégories d'impact s'afficheront. Pour chaque catégorie, on peut attribuer un facteur qui détermine l'importance que l'utilisateur leur accorde. Cette normalisation doit être laissée à la seule appréciation de l'entreprise et de ses choix environnementaux (ou de communication ou tout autre critère). C'est une étape très subjective, qui ne peut pas être généralisée pour toutes les futures entreprises susceptibles d'utiliser l'outil. Il peut y avoir une normalisation de référence, préremplie par les responsables. Une fois ces facteurs entrés, les résultats sont recalculés et affichés. Les possibilités de remonter aux sources de polluant restent identiques.

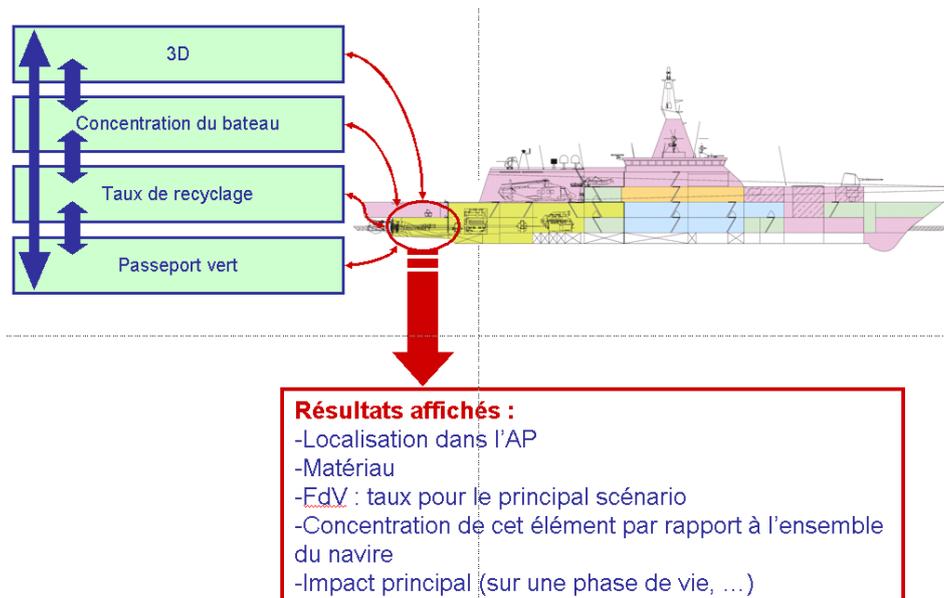
b) des résultats hors calcul d'impact

Plusieurs résultats doivent être calculables ou donnés :

- une localisation de l'origine d'un impact sur le plan du navire. L'outil doit être capable d'associer le résultat à sa localisation.
- Un calcul de la répartition de la concentration d'éléments ayant la même fin de vie, ce qui doit permettre la mise en évidence de zones de découpe potentielle pour le démantèlement.
- Associé à ce calcul et à la localisation, des calculs pour les taux de fin de vie
- Si une substance toxique référencée dans le passeport vert est localisée, l'utilisateur peut accéder à la fiche correspondant au suivi de cette substance

Pour ces résultats, l'outil doit rassembler des données concernant à la fois la localisation dans le navire, l'AP et ses matériaux associés, leur masse et concentration à travers le navire, ainsi que leur scénario de fin de vie.

- Les scénarii de fin de vie sont :
- la dépollution
- le recyclage, la réutilisation
- la valorisation
- la mise en centre de stockage de déchets ultimes



En cliquant sur une partie du navire, l'outil doit pouvoir afficher :

- l'appartenance de cet élément par rapport à l'AP
- son principal matériau constitutif
- les taux pour la fin de vie
- la concentration de cet élément par rapport à l'ensemble du navire (peut-être la possibilité de localiser les éléments similaires en plus)
- l'impact principal de cet élément par rapport à l'impact global du navire (un pourcentage, en fonction du flux source)

2.5. Les bases de données

L'outil fait appel à plusieurs bases de données, certaines très formalisées, d'autres créées pour notre étude. Dans tous les cas, l'outil doit permettre un interfaçage entre ces bases et la méthode de calcul basée sur CML 2001 (pour ce qui est du calcul d'impact).

A noter que si nous avons choisi Ecolnvent, c'est parce qu'aujourd'hui, c'est l'une des plus complète. Mais il peut être « sage » d'envisager un interfaçage avec d'autres bases de données utilisées dans les logiciels d'ACV, sachant qu'elles sont toutes construites de façon similaire.

Dans tous les cas, l'accès à ces données doit être restreint à l'analyste environnemental.

La base de données Ecolnvent

C'est une base utilisée par les logiciels d'ACV. Elle répertorie les substances, leurs facteurs de caractérisation, les modules où elles interviennent, et les facteurs de pondération par catégories d'impact. La base est sous format Excel et fonctionne par fichiers et onglets. Il y a 9 fichiers répertoriant les substances en fonction des modules, et un fichier supplémentaire qui récupère les en-têtes des 9 autres fichiers (les noms des modules) et donne le facteur de caractérisation de

chaque module pour chaque catégorie d'impact. Dans ce fichier, seul le 1^{er} onglet nous intéresse car il concerne la méthode de calcul d'impact CML2001.

Cette base de données étant régulièrement enrichie et mise à jour, l'utilisateur (l'analyste environnemental) doit pouvoir effectuer aisément ces mises à jour. Il faut prévoir d'afficher les changements majeurs occasionnés par cette mise à jour : un apport de nouvelles données, et surtout un changement dans celles existantes (visionnées par un surlignage avec un code couleur)

Les « formats » selon EcolInvent

Il existe deux types de formats pour le calcul :

- le format « system » : pour un élément X existant dans la base de données et qui n'est pas un élément « premier » pour la constitution de cet élément X, il est possible d'afficher tous les éléments premiers utilisés pour modéliser l'élément X. Ce sont ces données qui sont utilisées pour le calcul d'impact. Elles sont appelées « flux élémentaire ». Le problème pour notre outil, c'est que si on lui fait faire ce « saut » entre l'élément X existant dans la base de données et les constituants premiers, l'utilisateur ne peut pas remonter le flux à la source d'impact (ou seulement dans une certaine limite).

Known outputs to technosphere. Products and co-products							
Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Waste type	Category	Comment
Cast iron, at plant/RER S	1	kg	Mass	100 %	Ferro metals	Metals/Ferro	Europe

Known outputs to technosphere. Avoided products						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SD/Min	Max	Comment
Inputs						

Known inputs from nature (resources)							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SD/Min	Max	Comment
Aluminium, 24% in bauxite, 11% in crude ore, in ground	in ground	0,00026859	kg	Undefined			
Anhydrite, in ground	in ground	7,1523E-9	kg	Undefined			
Barite, 15% in crude ore, in ground	in ground	0,00030181	kg	Undefined			
Basalt, in ground	in ground	0,00011083	kg	Undefined			
Borax, in ground	in ground	2,0202E-9	kg	Undefined			
Cadmium, 0.30% in sulfide, Cd 0.18%, Pb, Zn, Ag, In, in ground	in ground	8,1592E-8	kg	Undefined			
Calcite, in ground	in ground	0,29222	kg	Undefined			
Carbon dioxide, in air	in air	0,017626	kg	Undefined			
Carbon, in organic matter, in soil	in ground	1,6774E-7	kg	Undefined			
Cerium, 24% in bastnaesite, 2.4% in crude ore, in ground	in ground	-8,0547E-19	kg	Undefined			
Chromium, 25.5% in chromite, 11.6% in crude ore, in ground	in ground	0,00055249	kg	Undefined			
Chrysolite, in ground	in ground	4,2157E-8	kg	Undefined			
Cinnabar, in ground	in ground	3,8934E-9	kg	Undefined			
Clay, bentonite, in ground	in ground	0,011636	kg	Undefined			
Clay, unspecified, in ground	in ground	0,0081804	kg	Undefined			
Coal, brown, in ground	in ground	0,12089	kg	Undefined			
Coal, hard, unspecified, in ground	in ground	0,77837	kg	Undefined			
Cobalt, in ground	in ground	4,122E-10	kg	Undefined			

- le format « unit » : pour un élément X dans la base de données, l'outil affiche la contribution de chacun des constituants. Il peut ainsi afficher le flux réel des contributeurs, mais au niveau temps de calcul, c'est plus long.

Known outputs to technosphere. Products and co-products							
Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Waste type	Category	Comment
Cast iron, at plant/RER U	1	kg	1000	100 %	Ferro metals	Metals/Ferro	Europe

Known outputs to technosphere. Avoided products						
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
Inputs						

Known inputs from nature (resources)							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
Inputs							

Known inputs from technosphere (materials/fuels)							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
Anode, aluminium electrolysis/RER U	0,003	kg	Lognormal	1,2335		(2,3,2,3,3,3,4)	
Electric arc furnace converter/RER/I U	4,0E-11	p	Lognormal	3,2254		(5,nA,nA,nA,nA,nA,9)	
Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE U	0,42361	kWh	Lognormal	1,2335		(2,3,2,3,3,3,2)	
Hard coal mix, at regional storage/UCTE U	0,014	kg	Lognormal	1,2335		(2,3,2,3,3,3,11)	
Iron scrap, at plant/RER U	0,38675	kg	Lognormal	1,2335		(2,3,2,3,3,3,3)	
Natural gas, high pressure, at consumer/RER U	0,975	MJ	Lognormal	1,2335		(2,3,2,3,3,3,11)	
Oxygen, liquid, at plant/RER U	0,05073	kg	Lognormal	1,2335		(2,3,2,3,3,3,4)	
Pig iron, at plant/GLO U	0,71825	kg	Lognormal	1,2335		(2,3,2,3,3,3,3)	
Quicklime, in pieces, loose, at plant/CH U	0,055	kg	Lognormal	1,2335		(2,3,2,3,3,3,4)	
Refractory, basic, packed, at plant/DE U	0,0195	kg	Lognormal	1,2335		(2,3,2,3,3,3,4)	
Transport, freight, rail/RER U	0,12055	tkm	Lognormal	2,095		(4,5,nA,nA,nA,nA,5)	
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	0,11905	tkm	Lognormal	2,095		(4,5,nA,nA,nA,nA,5)	

Known inputs from technosphere (electricity/heat)							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
Outputs							
Use SD^2 for lognormal and 2*SD for normal distribution							

Emissions to air							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
Benzene, hexachloro-		2,0E-8	kg	Lognormal	2,0597		(2,3,2,3,3,3,23)

Sachant que l'utilisateur voudra identifier la source de pollution en termes d'AP, de process, d'énergie consommée, nous devons utiliser les 2 formats de données. Le format « unit » sera utilisé jusqu'au niveau d'AP « donnée d'entrée - 1 », ce qui permettra l'identification des process et autres entrants pour l'élément considéré. Ensuite, les calculs « piocheront » dans le format « system » car il est inutile de remonter le flux plus en amont.

Les données fournies par Ecolnvent sont les suivantes (dans l'idéal, quand toutes les données existent et sont remplies) :

- le produit (élément ou matériau)
- les ressources utilisées : matériaux et fuels, électricité et chaleur
- les émissions dans l'air
- les émissions dans de l'eau
- les émissions dans le sol
- le flux de déchets finaux
- les émissions non matérielles
- les problèmes sociaux
- les problèmes économiques
- le traitement des déchets

Ces données ne sont pas toujours toutes renseignées, mais dans l'idéal, pour un calcul d'impact, outre le matériau (ou élément) et sa quantité associée à son unité, il faut surtout avoir les ressources qui sont nécessaires à sa fabrication.

Products					
Electricity, medium voltage, production AT, at grid/AT U	1	kWh	100	not defined	Electricity AUSTRIA
Avoided products					
Resources					
Materials/fuels					
Electricity, high voltage, production AT, at grid/AT U	1,0093	kWh	Lognormal	1,2355	(€
Sulphur hexafluoride, liquid, at plant/RER U	7,825E-08	kg	Lognormal	1,078	(1
Transmission network, electricity, medium voltage/CH/I U	3,24E-08	km	Lognormal	3,1614	(€
Electricity/heat					
Emissions to air					
Heat, waste		0,018457	MJ	Lognormal	1,3221
Sulfur hexafluoride		7,83E-08	kg	Lognormal	1,506
Emissions to water					
Emissions to soil					
Heat, waste		0,015101	MJ	Lognormal	1,3221
Final waste flows					
Non material emissions					
Social issues					
Economic issues					
Waste to treatment					
Input parameters					

Avec l'outil, si l'utilisateur renseigne un matériau (ou élément) qui existe dans la base de données, il y a une fonction d'automatisme qui permet de récupérer les données associées et indispensables pour le calcul d'impact. Cela implique que l'utilisateur ne puisse renseigner que des matériaux existant dans la base de données (Ecolvent, ou créée). Sinon, il doit pouvoir créer son propre module, si et seulement si il possède les informations nécessaires requises.

Pour l'extraction de la base, nous pouvons choisir de ne pas garder les catégories d'impact qui ne seront pas utilisées, et de seulement travailler avec les catégories suivantes :

- abiotic depletion
- acidification
- eutrophication
- global warming 500a
- ozone layer depletion 40a
- human toxicity 500a
- freshwater aquatic ecotoxicity 500a
- marine aquatic ecotoxicity 500a (qui va être modifié)
- terrestrial ecotoxicity 500a
- freshwater sediment ecotoxicity 500a
- marine sediment ecotoxicity 500a (qui va être modifié)
- ionising radiation
- photochemical oxidation

Le calcul d'impact

L'ensemble de données (matériau, process, ...) forme un module. Ce module est la somme de flux élémentaires, chacun de ces flux ayant sa propre part de contribution (listée et répertoriée dans la base de données Ecolvent). La contribution d'une substance est définie pour chaque module, en fonction des compartiments (air, eau, sol, ...) appelés « Ecocat » et en fonction de paramètres existants pour ces « Ecocat », les « Ecosubcat ». Par exemple, pour le compartiment aérien, ces

paramètres peuvent être high population density, low population density, ... en combinant le module, les « ecocat » et « Ecosubcat », on obtient la liste des substances contributives (les flux élémentaires) et la quantité qui leur correspond.

				Modules		
				vinyl chloride, at plant	bitumen adhesive compound, cold, at plant	bitumen adhesive compound, hot, at plant
				RER	RER	RER
				kg	kg	kg
				plastics monomers	plastics others	plastics others
substances	Unit	Ecocat	Ecosubcat	MeanValue	MeanValue	MeanValue
1,4-Butanediol	kg	air	high population density	2,1018E-15	2,1928E-12	1,3937E-12
2-Methyl pentane	kg	air	high population density			
2-Methyl-1-propanol	kg	air	high population density			
2-Methyl-2-butene	kg	air	high population density			
2-Propanol	kg	air	high population density	3,8926E-11	4,094E-08	2,599E-08
3-Methyl-1-butanol	kg	air	high population density			
4-Methyl-2-pentanone	kg	air	high population density			
Acenaphthene	kg	air	high population density	5,1456E-16	2,5184E-13	2,2175E-13
Acenaphthene	kg	air	low population density	4,4197E-17	6,8206E-15	5,9016E-15
				les 2 grands axes de recherches		
				paramètres de "conditions" pour le choix des lignes		

L'addition de ces flux élémentaires permet d'obtenir, la contribution du module à l'impact.

Dans notre exemple, on sélectionne les substances contribuant aux 3 modules (vinyl, et les 2 bitumes), avec comme paramètres pour le compartiment aérien, une haute densité de population. On somme ensuite les valeurs attribuées à chaque substance pour chaque module. Cela donne le flux impactant par module.

				vinyl chloride, at plant	bitumen adhesive compound, cold, at plant	bitumen adhesive compound, hot, at plant
				RER	RER	RER
				kg	kg	kg
				plastics monomers	plastics others	plastics others
substances	Unit	Ecocat	Ecosubcat	MeanValue	MeanValue	MeanValue
1,4-Butanediol	kg	air	high population density	2,1018E-15	2,1928E-12	1,3937E-12
2-Propanol	kg	air	high population density	3,8926E-11	4,094E-08	2,599E-08
Acenaphthene	kg	air	high population density	5,1456E-16	2,5184E-13	2,2175E-13
				3,8926E-11	4,09424E-08	2,59916E-08

Ces modules contribuent chacun à l'impact d'une catégorie définie selon la méthode de calcul CML 2001.

				Name	average European	GWP 100a	
				Location	RER	GLO	
				Unit	kg SO2-Eq	kg CO2-Eq	
				Ecocat	CML 2001	CML 2001	
				Ecosubcat	acidification potential	climate change	
j) Name	Location	Unit	Infrastructureprocess	Ecocat	Ecosubcat	MeanValue	MeanValue
1 vinyl chloride, at plant	RER	kg	0	plastics monomers		0,0042354	1,5877
8 bitumen adhesive compound, cold, at plant	RER	kg	0	plastics others		0,0029409	0,39521
8 bitumen adhesive compound, hot, at plant	RER	kg	0	plastics others		0,0056517	0,56783

Pour chaque module, il faut multiplier la contribution de leur flux par le coefficient de caractérisation propre à chaque catégorie d'impact. Cela donne la contribution de chaque module pour chaque catégorie d'impact.

							Name	average European	contribution du module à l'acidification	GWP 100a	contribution du module à l'acidification
							Location	RER		GLO	
							Unit	kg SO2-Eq		kg CO2-Eq	
							Ecocat	CML 2001		CML 2001	
							Ecosubcat	acidification potential		climate change	
contribution du module (kg)	Name	Location	Unit	Infrastruct	Ecocat	Ecosubcat	MeanValue	MeanValue	MeanValue		
3,89286E-11	vinyl chloride, at plant	RER	kg	0 plastics	monomers	0,0042354	0,0042354	1,64878E-13	1,5877	6,1807E-11	
4,09424E-08	bitumen adhesive compound, cold, at plant	RER	kg	0 plastics	others	0,0029409	0,0029409	1,20408E-10	0,39521	1,61809E-08	
2,59916E-08	bitumen adhesive compound, hot, at plant	RER	kg	0 plastics	others	0,0056517	0,0056517	1,46897E-10	0,56783	1,47588E-08	

En sommant les contributions pour chaque catégorie d'impact, on obtient la caractérisation de l'impact pour ces catégories.

							Name	average European	contribution du module à l'acidification	GWP 100a	contribution du module à l'acidification
							Location	RER		GLO	
							Unit	kg SO2-Eq		kg CO2-Eq	
							Ecocat	CML 2001		CML 2001	
							Ecosubcat	acidification potential		climate change	
contribution du module (kg)	Name	Location	Unit	Infrastruct	Ecocat	Ecosubcat	MeanValue	MeanValue	MeanValue		
3,89286E-11	vinyl chloride, at plant	RER	kg	0 plastics	monomers	0,0042354	0,0042354	1,64878E-13	1,5877	6,1807E-11	
4,09424E-08	bitumen adhesive compound, cold, at plant	RER	kg	0 plastics	others	0,0029409	0,0029409	1,20408E-10	0,39521	1,61809E-08	
2,59916E-08	bitumen adhesive compound, hot, at plant	RER	kg	0 plastics	others	0,0056517	0,0056517	1,46897E-10	0,56783	1,47588E-08	
								2,67469E-10		3,10015E-08	

Ces valeurs sont celles à sortir sous forme de graphiques avec en abscisses, les catégories d'impact que nous avons sélectionné, et en ordonnées, la valeur de l'impact

NB : les substances seront cherchées par leur « cas number » et pas par leur nom ce qui nécessite de coder chaque substance par ce numéro.

La base de données créée (sur le modèle d'EcoInvent)

Lors de la modélisation des frégates La Fayette et FREMM, nous avons créé nos propres modules lorsque les modules disponibles étaient inadéquats, ou que ceux que nous voulions étaient inexistants. Ces modules ont été créés exactement sur le même modèle que ceux d'une base de données classique. Les champs à renseigner ont été remplis, lorsque les données ont été trouvées.

Name	Image						Comment
fabrication coque							
Status							
Materials/Assemblies	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
Steel, converter, low-alloyed, at plant/RER U	1269,62	ton	Triangle	1142,66	1396,6	1250t + 1,57% de chutes	
Pig iron, at plant/GLO U	4,5	ton	Triangle	4,05	4,95	grenillage	
Water, decarbonised, at plant/RER U	330	ton	Triangle	297	363		
azote	28,14	kg	Triangle	25,326	30,954		
CVR superstructure	94,18	ton	Undefined			Correspond à la somme des Blocs 40, 41, 42 et de la plage avant.	
CVR mature	5	ton	Undefined			Correspond à la somme des masses de la mature avant et se la mature arrière.	
Pig iron, at plant/GLO U	250	ton	Triangle	225	275	sablage	
azote gaz	22,5	m3	Undefined				
(Insert line here)							
Processes	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
Welding, arc, steel/RER U	583022	m	Triangle	524719,8	641324,2		
Electricity, production mix FR/FR U	6590266	kWh	Triangle	5931239,4	7249292,6		
(Insert line here)							

Actuellement, ce sont de simples modules créés, et rangés dans SimaPro, mais ils sont extractibles, et donc « formatables » à nos besoins.

Cette base de données doit être construite sur le même modèle que la base Ecolvent, ce qui finalement permettra de juste créer un nouveau fichier et ses références, portant à 10 le nombre de fichiers de base de données (plus celui des coefficients pour les catégories d'impact).

Ce fichier doit pouvoir être enrichi par les utilisateurs quand ils ne trouvent pas les bases de données adéquates.

L'accès à cette base de données doit être restreint à l'analyste. Lui seul peut y intervenir. Si un autre utilisateur souhaite créer des modules qui lui semblent plus adaptés, il devra d'abord passer par l'analyste (au moins le temps que les utilisateurs s'approprient l'outil et son fonctionnement).

Il doit y avoir une possibilité de sauvegarde des nouveaux modules, dans des fichiers qui seront partagés entre chacun des utilisateurs. Ces modules seront rangés dans une « bibliothèque » virtuelle. Ils doivent être sauvegardés dans leur totalité pour pouvoir être réutilisés entièrement, sans avoir à les remodeliser (par une fonction d'importation)

La base de données « Ifremer »

Disponible sous format Excel, les données répertoriées dans cette base sont de différents ordres :

L'indice de vulnérabilité des types d'eaux (et sous-types d'eaux) avec :

- Haute mer :
 - o En zone de siège de gyre
 - o En zone à courants marins orientés vers les côtes
- Eaux côtières
 - o Côtes rocheuses, plages sableuses ou à graviers, exposées
 - o Côtes rocheuses abritées

- Plages sableuses ou à graviers, galets, cailloux, abritées
 - Estuaires et delta
 - Zone vaseuse abritée
 - Schorres et marais médiolittoraux alimentés en eau marine
 - Zone humide littorale (lagunes, baies semi-fermées, étangs)
- Eaux portuaires :
- Ports en eaux profondes
 - Ports en estuaire
 - Ports fluviaux

Grands types d'eaux	Indice de vulnérabilité	Sous-types d'eaux	Indice de vulnérabilité	profil d'usage
				%
Haute mer	1,5	Zones comportant des courants marins en direction des côtes	2	
		Zones sièges de gires	1	
Eaux côtières	7	Zones humides littorales (lagunes, baies semi-fermées, étangs)	10	
		Schorres / Marais médiolittoraux alimentés en eau marine	9	
		Zones vaseuses ABRITEES	8	
		Estuaires/Deltas	8	
		Plages sableuses ou à graviers, galets, cailloux ABRITEES	6	
		Côtes rocheuses ABRITEES	5	
Eaux portuaires	6,333333333	Côtes rocheuses, plages sableuses ou à graviers EXPOSEES	3	
		Ports en estuaire	8	
		Ports sur un fleuve	7	
		Ports en eau profonde	4	

Les substances et leur indice de toxicité en fonction de chaque compartiment (l'eau et les sédiments).

A noter que dans cette liste, les formes chimiques ionique et non ionique sont considérées comme ayant le même potentiel de toxicité. Mais, chacune de ces formes n'étant pas émise en même quantité, il faut que l'outil additionne et pondère chaque forme de la même substance, et ne les agrège pas en considérant une seule version. A noter que les substances ne seront pas « cherchées » grâce à leur nom, mais grâce à leur « cas number »

TOXICITY POTENTIAL	SEAWATER	MARIN SEDIMENTS
4	Benzo(a)pyrene	Arsenic
	Arsenic/Arsenic ion	Benzo(a)pyrene
	Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin
	Hydrogen sulfide	Lead
	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons (carcinogenic)	Mercury
	Chromium VI	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons (carcinogenic)
	Lead	Zinc
	Mercury	Benzene, hexachloro-
	Benzene, hexachloro-	Benzene, pentachloro-
	Tributyltin compounds	
3	Acrolein	Cadmium
	Ammonia	Nickel
	Chromium/Chromium ion	Chromium
	Sulfur dioxide	Copper
	Vanadium/Vanadium ion	
	Sodium dichromate	
	Selenium	
	Nickel/Nickel ion	
	Methane, bromo-, Halon 1001	
	Cadmium/Cadmium ion	
	Benzene, pentachloro-	
	m-Xylene / 1,3-Diméthylbenzène	
	Copper/Copper ion	
2	Acenaphthene	Vanadium
	Zinc/ion	Thallium
	Methane, dichloro-, HCC-30	Selenium
	Formaldehyde	Tin
	Ethene, tetrachloro-	
	Ethene, chloro-	
	Cobalt	
	Benzene	
	Benzene, 1,2-dichloro-	
	Benzene, chloro-	
	Benzene, ethyl-	
	Antimony	
	Toluene / Méthylbenzène	
	Styrene	
	Phenol	
	Phenol, pentachloro-	
	o-Xylene / 1,2-Diméthylbenzène	
	Chloroform	
	Methane, tetrachloro-, CFC-10	
Hydrogen chloride	Acenaphthene	

	mercurie, tétrachlorure, CFC-10	
1	Hydrogen chloride	Acenaphthene
	Hydrogen fluoride	Acrolein
	Nitrogen oxides	Ammonia
	Ethylene oxide	Benzene
	Ethane, 1,2-dichloro-	Benzene, 1,2-dichloro-
	Ethene	Benzene, chloro-
	Butadiene	Benzene, ethyl-
	Propylene oxide	Butadiene
		Chloroform
		Ethane, 1,2-dichloro-
		Ethene
		Ethene, chloro-
		Ethene, tetrachloro-
		Ethylene oxide
		Formaldehyde
		Hydrogen chloride
		Hydrogen fluoride
	Hydrogen sulfide	
	Methane, bromo-, Halon 1001	
	Methane, dichloro-, HCC-30	
	Methane, tetrachloro-, CFC-10	
	m-Xylene / 1,3-Diméthylbenzène	
	Nitrogen oxides	
	o-Xylene / 1,2-Diméthylbenzène	
	Phenol	
	Phenol, pentachloro-	
	Propylene oxide	
	Sodium dichromate	
	Styrene	
	Sulfur dioxide	
	Toluene / Méthylbenzène	
0	Acenaphthylene	Acenaphthylene
	Barite	Antimony
	Barium	Barite
	Beryllium	Barium
	Molybdenum	Beryllium
	Thallium	Chromium VI/Chromium ion
	Tin/Tin ion	Cobalt
		Molybdenum
	Tributyltin compounds	

La méthode de calcul pour coupler l'impact des substances avec les différents types d'eaux et leur indice de sensibilité.

Cette méthode doit être appliquée pour les catégories d'impact « aquatic marine ecotoxicity 500a » et « aquatic sediment ecotoxicity 500a »

1	Modélisation du cycle de vie	Résultats de l'ACV
	navire modélisé en fonction de son AP fichier type associé	méthode : CML 2001 identification des catégories d'impacts listes des subst les + impactantes récupération des quantités pour les subst répertoriées dans la liste ifremer

2	Substances	Quantité A (masse)	Potentiel de toxicité B	Masse de subst impactante C = A*B
	barite			
	éthène			
	mercure			
	...			
	impact total du navire D = ΣC			

Le fonctionnement de CML 2001

La méthode de calcul CML 2001 fournit des facteurs de pondérations pour les substances pour chaque catégorie d'impact. On trouve aussi ces facteurs par modules. La méthode se présente donc comme une simple base de données.

Nous allons utiliser préférentiellement le lien module/facteur, plutôt que le lien substance/facteur, car le 1^{er} est directement disponible dans la base de données Ecolvent (dossier EI_DATA_LCIA.xls).

Cela signifie que pour créer de nouveaux modules, il faudra faire appel à l'analyste environnemental. Il devra aller chercher les facteurs de caractérisation de ces modules dans la base de données, que ce soit Ecolvent, si le module fait appel à des sous-modules disponibles dans Ecolvent, ou que ce soit CML 2001, si l'analyste doit recréer entièrement le module (et donc aller chercher les facteurs de caractérisation par substances). Il faudra donc intégrer à l'outil les 2 bases de données (Ecolvent et CML 2001), et établir des liens qui permettent d'aller chercher les informations recherchées, d'extraire des données, ou de créer de nouvelles lignes.

La méthode de calcul d'impact CML 2001 définit plusieurs catégories d'impact. Nous avons choisi d'afficher les catégories d'impact suivantes :

- - abiotic depletion
- - acidification
- - eutrophication
- - global warming 500a
- - ozone layer depletion 40a
- - human toxicity 500a
- - freshwater aquatic ecotoxicity 500a
- - terrestrial ecotoxicity 500a
- - freshwater sediment ecotoxicity 500a
- - ionising radiation
- - photochemical oxidation
- - l'écotoxicité marine en eaux profondes (calculée à partir de marine aquatic ecotoxicity 500)
- - l'écotoxicité marine en eaux côtières (calculée à partir de marine aquatic ecotoxicity 500)
- - l'écotoxicité marine en eaux portuaires (calculée à partir de marine aquatic ecotoxicity 500)
- - l'écotoxicité sédimentaire en eaux profondes (calculée à partir de marine sediment ecotoxicity 500)
- l'écotoxicité sédimentaire en eaux côtières (calculée à partir de marine sediment ecotoxicity 500)
- l'écotoxicité sédimentaire en eaux portuaires (calculée à partir de marine sediment ecotoxicity 500)

La méthode de calcul

Cf § « la base de données EcolInvent »

2.7. La fin de vie (FdV)

La fin de vie ne peut pas être considérée au même niveau que les phases de fabrication et d'utilisation. Elle est « à part » du simple fait que pour réellement l'intégrer dans un cycle de vie, il faudrait prendre ses impacts réellement, et pas seulement en termes d'ajout ou d'évitement d'impacts sur le résultat final. Il est important de l'étudier, surtout en vue du démantèlement du navire. L'outil doit permettre de montrer des préconisations soit pour le démantèlement, soit pour un retour en conception, en vue d'une amélioration visant à faciliter le démantèlement.

Nous avons donc choisi de séparer la phase de fin de vie en termes de construction dans l'outil, mais aussi pour les résultats. A noter que l'utilisateur peut quand même choisir d'afficher les impacts de toutes les phases de vie en même temps (fabrication + utilisation + fin de vie), avec toujours la possibilité de remonter aux sources d'impacts par le flux voulu.

Pour la fin de vie, l'outil doit montrer 2 formats de résultats : des résultats de types ACV, et des résultats hors ACV, sachant que ce dernier format nécessite les résultats obtenus par l'ACV (notamment pour l'identification des impacts).

La base de données Fin de Vie

La base de données fin de vie est construite par association d'un matériau avec son scénario de FdV idéal (et les taux associés). Par exemple, pour de l'acier, le meilleur scénario de FdV est le recyclage (une fois qu'il est entré dans la filière spécifique, il peut être recyclé à plus de 90%). Par élément, il existe des modules qui donnent un scénario idéal avec toujours le taux associé, mais qui sont définis par des conditions. Par exemple, si un élément contient au moins 10% d'acier, il ira vers une filière de recyclage. Mais si ce même élément contient une substance répertoriée par le PV, alors, il devra d'abord passer par une dépollution, puis pourra aller en filière de recyclage.

C'est donc les matériaux entrés qui sont les liens entre l'outil et la base de données fin de vie.

Les résultats types ACV

Ces résultats dépendent des données entrées dans le fichier type défini pour la FdV (cf § « 6) données associées à l'arborescence produit »). En fonction du matériau, l'utilisateur choisit un

scénario de FdV (dans un menu déroulant), qui permet ensuite de remplir un champ pour les process (qui sont fonction du scénario choisi, faisant appel à la base de données FdV, affichés en menu déroulant), pour lesquels l'utilisateur alloue une valeur (quantité, temps,...)

Le calcul se fait ensuite, de la même façon que pour les autres phases de vie (Cf. § « la base de données EcoInvent »).

Les résultats se présentent aussi comme pour l'ensemble des phases du cycle de vie du navire, par des graphs et tableaux associés, pour lesquels l'utilisateur peut identifier la source des impacts selon le flux sélectionné.

Les résultats hors ACV

Les résultats obtenus par graphiques doivent être extractibles pour être associés à la localisation dans le navire. Une source d'impact identifiée (principalement en termes de flux type AP) et quantifiée peut être reliée à son code de localisation à bord du navire.

Une fois qu'un scénario est attribué à un élément (ou à un ensemble d'élément), l'outil peut calculer le taux de fin de vie, et définir si l'élément a une contribution positive ou négative en termes d'impacts, et par rapport à un bateau de référence.

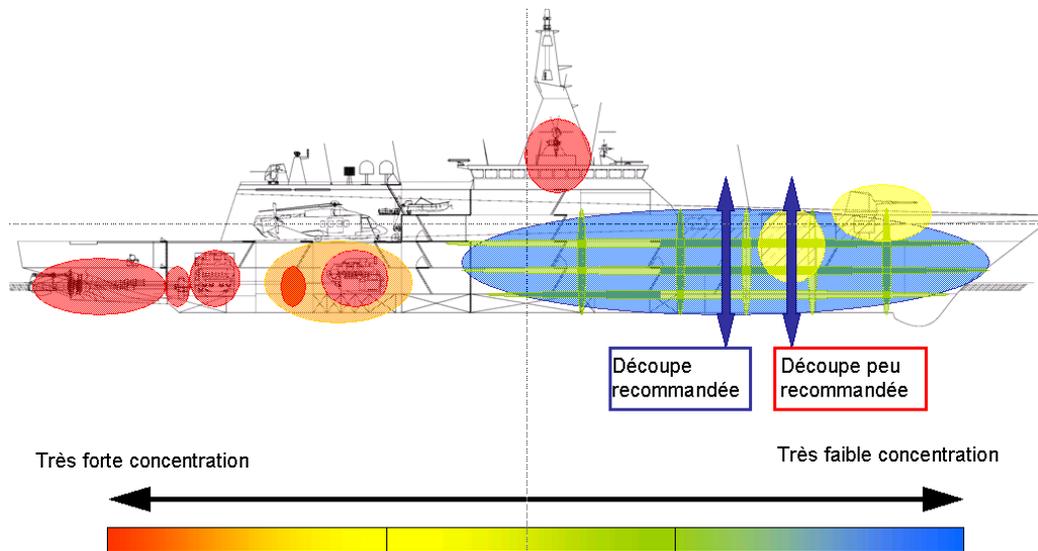
En fait, le travail effectué pour le PV va être élargi à l'ensemble des constituants du navire ; c'est-à-dire que tous les éléments de l'AP étant localisés, et connaissant leurs impacts, on peut établir un lien entre l'impact et sa localisation (Cf. « b) des résultats hors calculs d'impact »).

Une donnée de plus est cependant à calculer : la concentration massique de l'élément étudié, ou concentration élémentaire. Pour cela, il faut d'abord définir la référence du bateau, dont la concentration est de 1 (ou 100%). Cette concentration est calculée de la sorte : masse totale du navire / volume total du navire (défini par ses dimensions de longueur, largeur et hauteur). Pour l'élément étudié, il faut que l'outil calcule sa concentration (masse/volume) et la compare à celle du navire. Si la concentration élémentaire est supérieure à celle du navire, il faut la signaler à l'utilisateur (code de couleur allant du rouge au bleu pour le plus concentré vers le moins concentré). On peut imaginer une répartition des données de concentration sur l'ensemble du navire (qui doit correspondre aux données de moment cinétique utilisées pendant la conception du navire), en zones colorées en fonction de cette concentration par rapport à celle du navire.

	Masse (kg)	Volume (m ³)	Concentration (kg/m ³)	Concentration relative	Cotation (par tranches)
re Navi	200000	3*10 ⁵	0,66	1 (ou 100%)	----- -----
pe Pom	10	0,05	20	30,3 (ou 3030%)	Rouge
au Tuy	0,5	1	0,5	0,75 (ou 75%)	Bleu

La notion de concentration de référence n'est pas obligatoire.

Avec le code couleur, on obtiendrait un schéma comme suivant :



Grâce à cette mise en évidence des zones les plus denses, on met en évidence les zones où il ne sera pas conseillé de découper le navire lors de son démantèlement. On définit ainsi les zones de découpe idéales (en 3D). Ce schéma doit être construit selon 3 axes (x, y et z). Chaque local défini dans la base de données et relié à l'AP a ses propres coordonnées dans ce repère orthonormé. Quand l'utilisateur fait apparaître le schéma du navire, il doit pouvoir choisir un axe selon lequel il souhaite faire une découpe (virtuelle). L'outil doit calculer la masse totale (densité) qu'il faudrait traverser selon cet axe. Plus cette valeur est importante, moins cela sera conseillé. Les zones de faible concentration massique sont les zones préconisées pour le démantèlement. Pour optimiser le démantèlement, il faut avoir un total des concentrations massiques le plus faible possible.

En plus de cette cotation de la concentration massique, on doit pouvoir corréliser de la même façon une répartition des impacts des éléments à travers tous le navire, à la phase de conception voulue. L'utilisateur doit pouvoir choisir son référentiel en termes d'impacts (un système, un sous-système, une phase de vie, ...). Le référentiel est noté 1 (ou 100%). Ensuite l'élément étudié est comparé à cette référence (même calcul que pour la concentration massique).

3. FONCTIONNALITES DE L'OCEAN

	Fonctionnalités		Priorité		Remarques	faisabilité technique
	Pour le prototype	A terme	Indispensable	Secondaire		
Mode d'emploi / guide d'utilisateur	un guidage par des signaux insérés dans l'IHM		x		signaux = "?" ou "!" dans des bulles. En passant la souris dessus : pop-up avec le message correspondant	
Glossaire	accès à un glossaire des termes "environnementaux" et spécifiques à l'outil					
Un tutoriel	une fonction de tutorat utilisable à chaque étape de l'IHM		x			
Gestion de l'accès	1 seul mode, accès libre à tous les niveaux, sans restriction	différents niveaux d'utilisateurs, restrictions d'accès	x			
Création de dossiers	pas besoin de toutes les informations : sont indispensables : la masse, la durée de vie, les profils d'utilisation (il faut au moins 2 types de masses d'eau par grandes catégories) et opérationnel (les 4 modes nécessaires de base seulement, pas paramétrable), le profil de vitesse (au moins une vitesse moyenne), les données constructeur sur la motorisation (émissions gazeuses par taux de charge), le temps passé en cale sèche	remplissage de toutes les informations : s'ajoutent donc le type de navire + profil de vitesse complet (de zéro à vitesse max) + dimensions du navire	x		remplissage en fonction des données fournies	sont en théorie automatiquement chargeables : l'AP, le code AP, la masse, la localisation, le billa électrique, et peut-être un code fournisseur
Les données génériques à un projet	sont à renseigner 1 seule fois (par l'analyste) : 1) les facteurs de pondération des catégories d'impact, 2) le scénario global de FdV avec les éléments qui subiront un scénario spécifique, 3) les substances de l'IST qui seront dépolluées et/ou suivies spécifiquement pendant la phase d'utilisation et de FdV, 4) une allocation globale des transports entre fournisseurs et chantier		x		à part pour les facteurs de pondération, si l'utilisateur connaît la donnée, il pourra l'entrer (elle sera alors prioritaire sur la donnée générique)	

<p>Sauvegarde, archivage</p>	<p>Sauvegarde de l'AP et des données associées 1) automatiquement après la saisie de l'AP et des données associées 2) sur demande de l'utilisateur 3) proposée automatiquement à la fin de chaque session d'utilisation</p>	<p>Archivage sur demande de l'ensemble du calcul : AP et données associées + bases de données généralistes (Ecoinvent, etc.) + méthode de calcul complète (Module Ifremer, FoV, etc.)</p>	<p>x</p>		<p>possibilité de créer un lien vers une validation des informations (qui seront alors "figées")</p>	
<p>Mise à jour</p>	<p>possibilité de mettre à jour des dossiers (au niveau AP, bilans de masse ou électrique, localisation) par ajout/suppression de lignes</p>	<p>possibilité de mise à jour automatique par "mapping" entre le dossier de référence et celui mis à jour</p>	<p>x</p>	<p>x</p>		<p>à voir, selon évolution du développement informatique</p>
<p>Copier/coller</p>	<p>possibilité de récupérer tout ou partie d'un projet existant pour l'intégrer dans un nouveau dossier => par simple copier/coller</p>	<p>possibilité d'enregistrer des parties de l'AP sous un format type BDD chargeable à l'envie une fois qu'elles sont créées et enregistrées</p>	<p>x</p>			
<p>Périmètre de l'étude</p>	<p>le prototype doit au moins demander la ou les phase(s) de vie à étudier : fabrication et/ou exploitation et/ou fin de vie</p>	<p>+ phase de conception où l'on se trouve (avant-projet, projet ...)</p>	<p>x</p>		<p>il existe une colonne "remarque/commentaire" où la provenance de l'information pourra être notée</p>	
<p>Arborescence Produit (AP)</p>	<p>entrée directement par l'intermédiaire de l'IHM + selon contraintes associées : possibilité d'échange avec un fichier externe "préformaté" selon un modèle donné (= fichier type) démonstration de la définition des niveaux avec "compréhension" de la part du système quant aux échanges entre les niveaux (du petit au grand et inversement) -> plus simplement : "décomposition de l'AP en une arborescence d'au moins quatre niveaux" ? possibilité d'ajouter des éléments quels que soient leurs niveaux</p>	<p>possibilité d'échange avec un fichier externe "préformaté" selon un modèle donné (=fichier type) arborescence à sept niveaux sachant que l'outil peut en théorie générer autant de niveaux que nécessaire</p>	<p>x</p>		<p>pour les échanges par fichier externe : en fonction de l'avancement du développement informatique</p>	<p>entrée du fichier contenant l'AP et données associées => en fichier temporaire puis sauvegarde en BDD</p>
			<p>x</p>		<p>l'ensemble de l'AP n'est pas "utile" pour la démo; il faut juste prouver que l'échange d'informations fonctionne entre les niveaux.</p>	

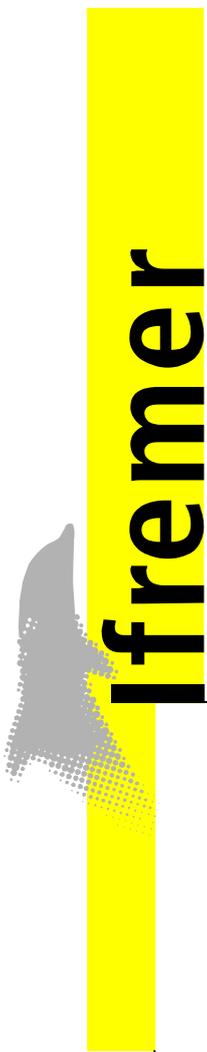
4. MISE EN PLACE D'UNE METHODOLOGIE D'EVALUATION DE L'IMPACT DES NAVIRES TOUT AU LONG DE LEUR CYCLE DE VIE EN FONCTION DU NIVEAU D'IMPACT DES POLLUANTS EMIS ET DE LA MASSE D'EAU IMPACTEE (RAPPORT IFREMER)

Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
Brest

Mehdi ABADANE

Superviseurs : Daniel MASSON (Ifremer La Tremblade)
Olivier LEFORT (Ifremer Brest)

Novembre 2008 à Mars 2009



Ifremer

PROJET CONVENAV

Mise en place d'une méthodologie d'évaluation de l'impact
des navires tout au long de leur cycle de vie en fonction du
niveau d'impact des polluants émis et de la masse d'eau
impactée

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Olivier Lefort (IFREMER Brest) et Daniel Masson (IFREMER La Tremblade) pour leur disponibilité, leur soutien, et pour toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant cette étude.

Je remercie également Stéphane Le Floch, Corinne Caroff, François-Xavier Merlin (CEDRE), Roger Kantin (IFREMER Toulon), Marie-Jo Thebaud (IFREMER Nantes), Alice James (Cellule ARC), Matthieu Lassus (INERIS), ainsi que Marion Prinçaud et Alain Cornier de l'ENSAM Chambéry, pour tous les conseils et les informations qu'ils ont pu m'apporter au cours de ce projet.

Je remercie enfin l'ensemble du personnel que j'ai côtoyé au Centre IFREMER de Brest, et notamment Carole Despinoy, Olivier Quedec, Jean-Xavier Castrec, Françoise Quiniou, Romain Davy, Xavier Lurton et Nadine Rossignol pour leurs services et leur accueil chaleureux.

Sommaire

Sommaire	2
Liste des listes	4
Glossaire.....	6
Résumé.....	7
Abstract	7
Avant-propos.....	8
I. Introduction.....	8
II. Contexte réglementaire.....	8
III. Objectif de l'étude.....	9
IV. Cadre de l'étude	10
1 ^{ère} PARTIE : Substances toxiques, bioaccumulables et/ou persistantes pour le milieu marin et cycle de vie d'un navire	11
I. Méthodologie de l'évaluation de l'impact	11
I.1. L'analyse du cycle de vie.....	11
I.2. L'évaluation de l'impact.....	12
I.3. La méthode d'évaluation d'impact choisie : CML2001	14
II. Caractérisation des substances pertinentes pour le milieu marin	15
II.1. Documents sources	15
II.2. Méthode de travail	17
II.3. Limites de l'étude	18
II.4. Conclusion	19
2 ^{ème} PARTIE : Comportement et impact des polluants en milieu marin	21
I. Introduction à l'écotoxicologie	21
I.1. Toxicologie et écotoxicologie.....	21
I.2. Comportement des produits dans l'environnement	21
II. Méthodologie de classement	23
II.1. Les différentes méthodes de classement.....	23
II.2. Choix de la méthode de classement.....	25
II.3. Choix des critères de classement.....	26
II.4. Cotation des critères	31
III. Conclusion.....	33
3 ^{ème} PARTIE : Eco-indicateurs et hiérarchisation des substances pertinentes pour l'environnement marin	34
I. Hiérarchisation des données	34
I.1. Données relatives aux substances pertinentes.....	34
I.2. Choix des normes de classement	37
I.3. Tableau final	40
II. Conclusion.....	42
4 ^{ème} PARTIE : Masses d'eau et impact d'un navire sur le milieu marin	43
I. Sensibilité des zones maritimes vis-à-vis une pollution	43
I.1. Zones à considérer	43

I.2. Indexation de ces zones en fonction de leur caractéristiques géomorphologiques....	44
II. Indicateur de l'impact d'un navire selon la masse d'eau impactée	47
III. Conclusion.....	49
Conclusion générale	50
Références bibliographiques	51
Annexes	53

Liste des listes

Liste des tableaux

Tableau 1 : Substances les plus impactantes (selon CML2001)	16
Tableau 2 : Données d'entrée choisies pour l'évaluation d'impact d'un navire (projet CONVENAV)	17
Tableau 3 : Liste des substances les plus pertinentes pour le milieu marin, voire pour la santé humaine	20
Tableau 4 : Système de classification européen du comportement à court terme des substances déversées accidentellement en mer	23
Tableau 5 : Classement des dangers d'un produit pour le milieu marin, d'après MARPOL 73/78	23
Tableau 6 : Caractérisation des substances PBT et vPvB	24
Tableau 7 : Caractérisation du risque à partir du rapport PEC/PNEC	26
Tableau 8 : Comportement de la substance dans le milieu marin en fonction des valeurs du KOC	29
Tableau 9 : Tableau des cotations des critères de classement retenus (de 0 à 4)	32
Tableau 10 : Cotation des différents critères retenus en fonction de la substance étudiée	36
Tableau 11 : Classement par catégorie d'impact d'une substance pertinente pour le milieu marin (+++ : très fort impact, ++ : fort impact, + : impact moyen, NO : impact faible voire négligeable)	38
Tableau 12 : Classement par valeur d'impact d'une substance pertinente pour le milieu aquatique (légende identique)	39
Tableau 13 : Tableau de hiérarchisation des substances émises par l'activité des navires et pertinentes pour le milieu marin	41
Tableau 14 : Cotation du potentiel de toxicité d'une substance (attribuées à partir des données du Tableau 13)	42
Tableau 15 : Indice de vulnérabilité théorique des zones marines	45
Tableau 16 : Classement des quatre milieux spécifiques (A > B > C > D en terme de vulnérabilité du milieu)	46
Tableau 17 : Polluants mis en jeu lors de la protection des navires	54
Tableau 18 : Polluants concernés par types d'activité	55
Tableau 19 : Différents types de polluants mis en jeu en fonction des principales sources de pollution	55
Tableau 20 : Critères GESAMP adoptés vis-à-vis de la bioaccumulation	57
Tableau 21 : Critères GESAMP adoptés vis-à-vis de la toxicité aquatique	57
Tableau 22 : Critères GESAMP adoptés vis-à-vis de la toxicité envers les mammifères	58
Tableau 23 : Critères GESAMP adoptés vis-à-vis des effets physiques et à long terme sur la santé humaine	58
Tableau 24 : Critères GESAMP adoptés vis-à-vis de l'altération des produits de la mer ("tainting"), de l'environnement et des agréments côtiers	58
Tableau 25 : Liste des phrases de risque utilisées comme données dans le tableau de cotation des critères de classement	60

Liste des figures

Figure 1 : Cadre normatif de l'ACV	11
Figure 2 : Forme simplifiée de l'inventaire	12
Figure 3 : Forme généralisée de classification	13
Figure 4 : Deux approches des méthodes d'évaluation différentes	14
Figure 5 : Méthodologie du tri des substances pertinentes pour le milieu marin (OUT = à ne pas prendre en compte)	18
Figure 6 : Méthodologie effectuée pour la hiérarchisation des substances pertinentes pour le milieu marin	40
Figure 7 : Outil d'évaluation théorique de l'impact d'un navire selon la masse d'eau considérée	48
Figure 8 : Classement tiré de l'annexe II du MARPOL 73/78 des substances selon GESAMP	59
Figure 9 : Index de vulnérabilité appliqué à la côte nord de la Bretagne (d'après d'Ozouville et al.).....	64

Glossaire

ACV : Analyse du Cycle de Vie.

Anti-fouling : Se dit d'une peinture qui empêche les organismes marins de se fixer sur la coque. Syn. Anti-salissures.

Ballast : compartiment d'un navire, généralement placé sur les flancs, que l'on remplit plus ou moins d'eau de mer, afin de l'équilibrer.

BCF : **Bioconcentration Factor**. En français, FBC ou Facteur de Bioconcentration.

Biote : Ensemble d'organismes d'un écosystème donné ou d'une période de temps donnée.

Cedre : Centre de documentation, de recherche et d'expérimentation sur les pollutions accidentelles des eaux.

CLARA II : **Calcul Liés Aux Rejets Aquatiques en mer**. Projet de prévision et d'aide au diagnostic dans un contexte de pollution accidentelle en milieu marin, grâce à la création d'un outil de simulation de la localisation d'un contaminant et de l'évolution de sa concentration dans la mer et dans l'atmosphère lors d'un déversement massif de polluant en Méditerranée.

CML2001 : Méthode d'évaluation d'impact.

CMR : Substances cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction ; en application de la directive 67/548/CEE.

DCE : Directive Cadre sur l'Eau.

DCNS : Direction des Constructions Navales.

EC₅₀ : Concentration effective pour 50% des cas (observation d'effets toxiques).

ENSAM : Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers (Chambéry).

GESAMP : Groupe d'experts des Nations Unies sur les aspects scientifiques de la pollution marine.

HASREP : **REsPonse to HArmful Substances spilled at sea**. Projet d'étude des flux de produits chimiques transportés en vrac au niveau maritime européen, et de leurs risques.

HAP : **Hydrocarbures polyaromatiques**. En anglais, PAH.

IC₅₀ : Concentration inhibitoire pour 50% des cas (observation d'effets d'inhibition).

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer.

Kow / P : Unité de mesure du coefficient de partage n-octanol/eau.

LC₅₀ : Concentration létale pour 50% des cas.

LD₅₀ : Dose létale pour 50% des cas (toxicité à court terme).

Lipophilie : Affinité d'une substance pour une phase organique par rapport à une phase aqueuse. Syn. Hydrophobie.

MARPOL : **MARine POLLution**. Convention internationale élaborée dans le cadre de l'OMI.

NOEC : Concentration sans effet observé (évaluation de la toxicité chronique).

NQE : **Norme de qualité environnementale**. Concentration d'un (groupe de) polluant(s) dans l'eau, les sédiments ou le biote à ne pas dépasser, afin de protéger la santé humaine et l'environnement.

OMI : **Organisation Maritime Internationale**. En anglais, IMO.

PBT : Substances persistantes, bioaccumulatives et toxiques ; définies dans le TGD

PEC : Concentration environnementale prévisible (évaluation de l'exposition).

PNEC : Concentration prévisible sans effets (évaluation des effets).

Pvap : Acronyme de *Pression de vapeur*. Détermine la volatilité d'une substance.

Tainting : Se dit d'un produit qui, lorsqu'il entre en contact avec un organisme, va altérer les qualités organoleptiques (goût/couleur/odeur) des aliments marins consommés par l'homme.

TBT : Tributylétain. Puissant biocide utilisé comme matière active des peintures antifouling.

TGD : **Technical Guidance Document** ou Guide technique méthodologique européen.

vPvB : Substances très (very) persistantes et très (very) bioaccumulatives ; définies dans le TGD.

Résumé

Dans le cadre du développement de guides d'évaluation des risques des substances chimiques envers l'environnement marin, le projet CONVENAV a été mené, en collaboration avec l'ENSAM de Chambéry, afin d'établir une nouvelle méthode d'évaluation de l'impact d'un navire et de la mettre en relation avec les pollutions spécifiques aux activités de celui-ci, au cours de son cycle de vie ; c'est-à-dire au cours sa construction, sa mise en service et son démantèlement.

La mise en place de cet outil d'évaluation a consisté dans un premier temps à établir des éco-indicateurs du milieu marin, qui sont des critères destinés à la détermination du niveau d'écotoxicité de toute substance contaminant sur un milieu donné (eau de mer, sédiments marins et santé humaine). La seconde phase a été de proposer un classement des zones géographiques marines (ou masses d'eau) touchées en fonction de leur sensibilité vis-à-vis d'une pollution anthropique quelconque.

A partir de la combinaison de ces deux ensembles de données (le niveau d'écotoxicité de la substance émise par le navire d'une part, et la vulnérabilité d'une masse de la masse d'eau atteinte par la pollution générée par l'activité de ce navire, d'autre part) avec l'outil de conception fourni par DCNS, l'ENSAM a la possibilité de définir les impacts d'un navire (préalablement modélisé) en fonction de la masse d'eau potentiellement exposée à cette pollution marine, mais également de comparer les différentes typologies de navire modélisées en fonction de leurs contributions (en terme d'impact) respectives sur une zone géographique donnée.

Cela permettra de connaître davantage les sources de pollution et leurs impacts respectifs, pour *in fine* concourir à réduire à la source la pollution anthropique générée par les navires.

Abstract

Within the framework of the development of technical guidance documents on marine risk assessment, the CONVENAV project was led, in collaboration with Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM) in Chambéry, in order to establish a new ship impact assessment method, and to link it with the specific pollutions that occur during the ships' cycle of life, i.e. the shipbuilding, its commissioning and its demolition.

This assessment tool's setting up consisted firstly in establishing marine environment "eco-indicators", such criteria being used for determination of the ecotoxicity level of any pollutant contaminating a given medium (seawater middle, marine sediments and human health). Then, a filing of the sensitivity of marine geographic zones (or masses of water) being touched by any type of anthropogenic pollution, was proposed.

From combination of these two factors (previously quoted) with the DCNS' conception tool, ENSAM will be able to define the ship's impacts connected with "potentially-polluted" mass of water, and also to compare different models of vessels according to their respective impact contributions on a given geographic zone. Finally, it will enhance the knowledge on ship's pollution sources and their respective impacts on marine environment, as to reduce *in fine* this anthropogenic marine pollution.

Avant-propos

I. Introduction

Les eaux portuaires, estuariennes, littorales et du large ont longtemps été considérées comme un exutoire idéal des activités humaines, et principalement des activités des navires. En effet, de par l'effet des marées, des courants et du vent, ces activités entraînent et dispersent indubitablement des rejets contaminants tant pour l'homme que pour l'environnement marin et les sédiments associés.

C'est notamment les conséquences de ces rejets qui ont motivé la mise en place de réglementations en vue de l'évaluation des risques écotoxicologiques vis-à-vis du milieu marin, notamment par la Communauté Européenne et l'Organisation Maritime Internationale.

Cette pollution concerne principalement les contaminants chimiques, qui ont pour origine des rejets ponctuels, diffus et/ou accidentels, et dont les principales sources d'émission étudiées concernent les trois phases du cycle de vie d'un bateau, soit son exploitation, sa production et son démantèlement final.

II. Contexte réglementaire

La législation européenne impose de procéder à l'évaluation des risques pour certaines substances (jugées prioritaires) afin d'assurer la protection de l'environnement et de l'homme (travailleurs et consommateurs en relation avec l'écosystème).

En ce sens, la Directive Cadre sur l'Eau (ou DCE (2000-60-CE)) du 23 octobre 2000 constitue le cadre réglementaire de la politique de l'eau au niveau communautaire et concerne tous les milieux aquatiques (eaux côtières et de transition incluses). Elle impose de préserver les milieux aquatiques non dégradés et d'atteindre d'ici 2015 un bon état des eaux pour les milieux moyennement ou fortement dégradés.

Ce "bon état" comprend l'état écologique et chimique d'une masse d'eau, et est défini par des normes de qualité environnementale (NQE). Ces dernières sont établies sur la base de critères écotoxicologiques et décrites dans un guide technique méthodologique européen (le TGD ou Technical Guidance Document) qui fixe les procédures d'évaluation des risques des substances chimiques. La prévention et le contrôle de la pollution est ainsi fondée sur une approche combinée à la source par la fixation de valeurs limites d'émission et dans l'environnement par le respect d'objectifs de qualité fixés par des normes de qualité environnementale (1).

Pour l'évaluation des risques dans l'environnement, le TGD repose théoriquement sur quatre étapes essentielles (2):

- L'identification des dangers et/ou propriétés et effets préoccupants, relatifs à une substance.
- L'évaluation des effets, consistant à déterminer, en termes qualitatifs et quantitatifs, la nature et la gravité des effets défavorables de la substance considérée. Ce qui se traduit par une relation dose/effet pour l'homme et concentration/effet pour l'environnement ; le but final étant d'estimer une PNEC (ou concentration prévisible

sans effets), calculée à partir de données de toxicité aiguë et chronique et en appliquant des facteurs de sécurité en fonction de la nature des données disponibles.

- L'évaluation de l'exposition, consistant à estimer les concentrations auxquelles un compartiment environnemental peut être exposé, sur la base des quantités produites, de l'estimation des rejets dans le milieu et des propriétés de la substance rejetée. Le résultat escompté est la fixation d'une PEC (concentration environnementale prévisible) sur la base de données mesurées dans l'environnement ou calculées à l'aide de scénarii d'émission appropriés.
- La caractérisation du risque, basée sur le rapport PEC/PNEC, qui estime l'incidence et la sévérité des effets potentiels sur un environnement donné.

Ce guide est aujourd'hui un document de référence technique à l'échelle européenne pour évaluer les risques des substances chimiques dans le milieu marin.

Mais, bien avant cette législation n'entre en vigueur par l'intermédiaire du TGD, la prévention de la pollution par les navires avait fait l'objet de la Convention MARPOL 73/78. Les substances liquides nocives, issues de la phase d'exploitation des navires, étaient alors classées en 4 catégories (A, B, C, D) selon leur dangerosité envers l'environnement marin et la santé humaine.

La méthodologie et l'évaluation de ces profils de risque étaient réalisées par le GESAMP (Groupe d'experts des Nations Unies sur les aspects scientifiques de la pollution marine), et prenaient en compte différents aspects, notamment :

- Les dommages aux ressources vivantes (bioaccumulation, toxicité aquatique, modification des propriétés organoleptiques...)
- Les dangers pour la santé humaine (ingestion, inhalation, contacts cutanés et oculaires)

En 1993, le groupe de travail du GESAMP a ensuite défini une nouvelle procédure d'évaluation qui prend en compte de nouveaux critères pour décrire les risques potentiels, et ce, principalement sur l'environnement marin: les notions de persistance et de toxicité à long terme de la substance, et les effets comportementaux des espèces liés à une contamination de leur biotope.

Ces différentes méthodes d'évaluation de l'impact des substances sur le milieu marin (DCE/TGD, MARPOL/GESAMP, etc.) seront discutées par la suite dans ce rapport.

III. Objectif de l'étude

L'objectif de la présente étude consiste dans un premier temps à identifier et lister les substances polluantes, toxiques persistantes et bioaccumulables vis-à-vis du milieu aquatique, principalement marin, en gardant toutefois le critère de santé humaine (travailleurs et marins susceptibles d'être en contact avec les navires, et qui sont liés au cycle de vie des navires). Dans un deuxième temps, une hiérarchisation de ces substances retenues sera effectuée en fonction de leur impact négatif sur la vie marine et la santé des utilisateurs. Au sein de cette évaluation, seront listées le plus pertinemment possible les substances toxiques, bioaccumulables et persistantes vis-à-vis de l'environnement marin (et de la santé humaine, par extension), qui sont mises en jeu lors des phases de construction, d'exploitation et de démantèlement du navire.

La perspective finale est de désigner au sein de ce classement les substances les plus impactantes pour chaque catégorie d'impact concernée, qui seront prises en compte *in fine* dans les modèles.

Dans un dernier temps, un nouveau critère sera ajouté à ce classement pour caractériser la plus ou moins grande incidence de cette pollution selon les zones géographiques d'impact concernées ; les eaux littorales et estuariennes d'une part, et les eaux du large d'autre part. Cela permettra à l'ENSAM d'évaluer *in fine* l'impact global d'un navire précis en fonction de la masse d'eau (ou zone géographique) sur laquelle il séjourne, afin de réduire les risques de pollution à la source...

IV. Cadre de l'étude

L'**IFREMER** (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) est un Etablissement public à Caractère Industriel et Commercial (EPIC) créé en 1984 et placé sous la tutelle conjointe des ministères de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et de l'Agriculture et de la Pêche.

Cet organisme de recherche finalisé dédié spécifiquement au milieu maritime est présent dans 26 implantations réparties sur tout le littoral métropolitain et dans les DOM-TOM. Il est constitué d'un siège social situé à Issy-les-Moulineaux, de cinq grands centres (Brest, Boulogne-sur-Mer, Nantes, Papeete et Toulon) ainsi que de 78 laboratoires ou services répartis entre toutes ces implantations, soit près de 1800 ingénieurs, chercheurs, techniciens et administratifs.

Plus précisément, l'Ifremer contribue, par ses travaux et expertises à la connaissance des océans et de leurs ressources, à la surveillance du milieu marin et littoral et au développement durable des activités maritimes. À ces fins, il conçoit et met en œuvre des outils d'observation, d'expérimentation et de surveillance, et gère la flotte océanographique française pour l'ensemble de la communauté scientifique.

1^{ère} PARTIE : Substances toxiques, bioaccumulables et/ou persistantes pour le milieu marin et cycle de vie d'un navire

A ce jour, le trafic maritime représente en volume près de 70% des échanges mondiaux. Les risques environnementaux associés à cette activité humaine sont donc importants et une des solutions pour les réduire à terme serait d'optimiser les impacts sur tout le cycle de vie des navires impliqués par cette pollution ; à savoir lors de leur fabrication, exploitation et déconstruction.

Ce projet, appelé CONVENAV, est mené conjointement entre l'Ecole des Arts et Métiers de Chambéry (ENSAM), la DCNS (Direction des Constructions Navales) et Ifremer. Et dans cette réflexion, l'Ifremer est chargé de définir des éco-indicateurs pour mesurer les impacts d'un navire au cours de son cycle de vie, indépendamment de la typologie de celui-ci.

Aussi, pour bien comprendre au sein de quoi s'implante la mission de l'Ifremer relative à ce projet, il est tout d'abord nécessaire de bien visualiser le travail réalisé en amont par l'ENSAM sur les méthodes d'évaluation d'impact et l'analyse du cycle de vie d'un navire. (3)

I. Méthodologie de l'évaluation de l'impact

I.1. L'analyse du cycle de vie

Une analyse de cycle de vie (ou ACV) permet de diagnostiquer l'impact environnemental résultant de l'ensemble des activités liées à un service ou à un produit ; cette méthode étant normalisée par la norme ISO 14040.

Cette norme illustre les différentes phases d'une analyse du cycle de vie par le schéma suivant :

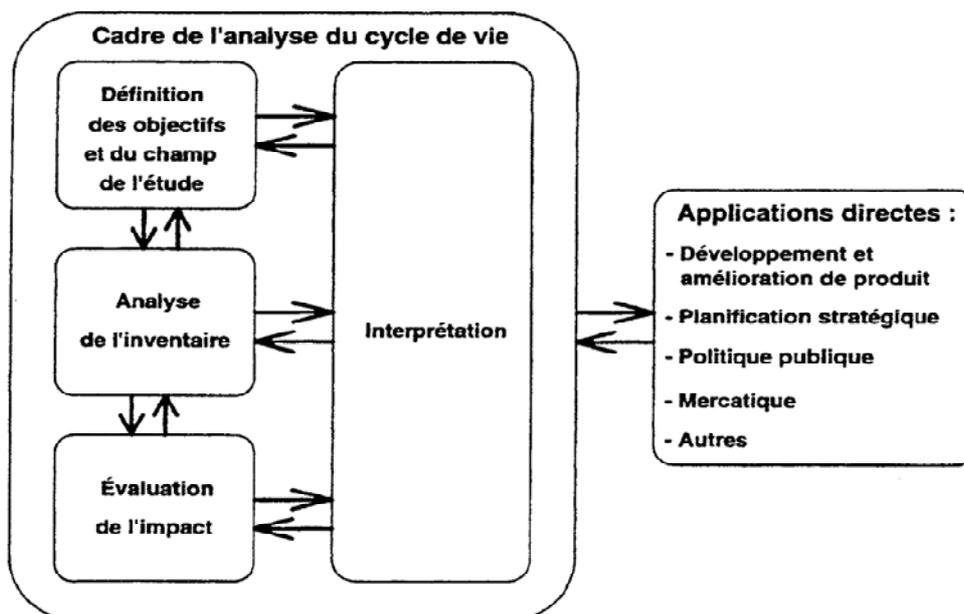


Figure 1 : Cadre normatif de l'ACV

C'est donc une méthode en quatre étapes :

- Définition des objectifs et du champ de l'étude (durée de vie du produit, type d'utilisation...), qui va permettre d'établir des limites au système (ici, un navire)
- Compilation d'un inventaire des entrants et sortants d'un produit sur son cycle de vie, illustrée ci-dessous :

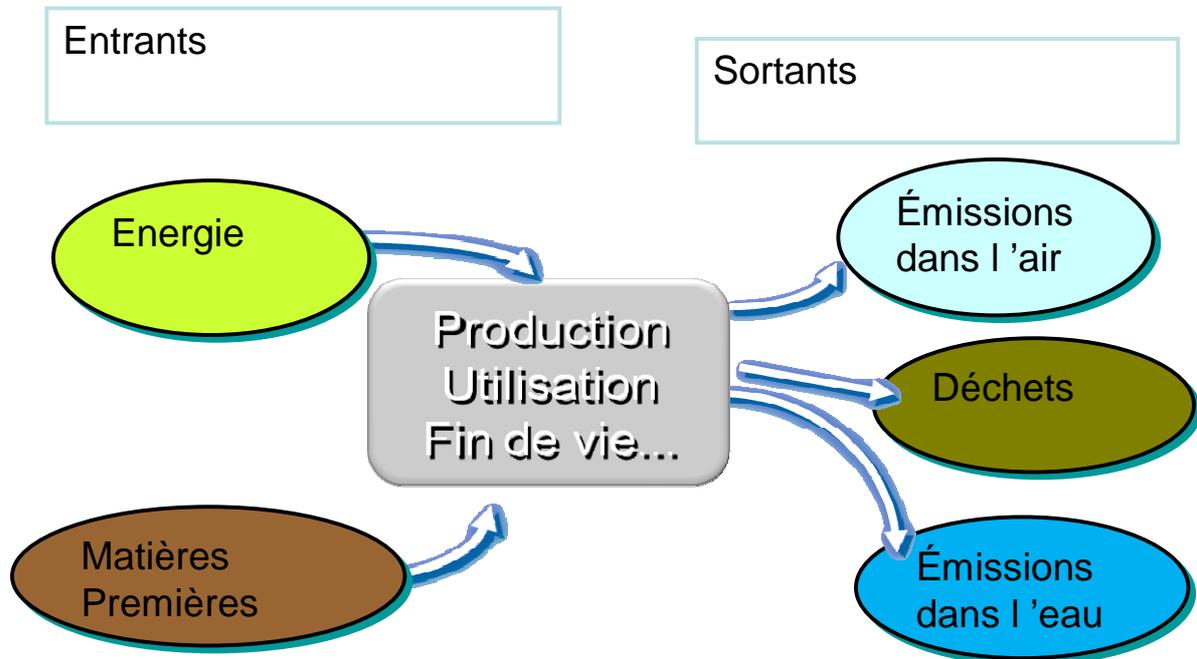


Figure 2 : Forme simplifiée de l'inventaire

- Evaluation des impacts environnementaux potentiels associés à cet inventaire (étape développée dans le paragraphe suivant)
- Interprétation des résultats par-rapport aux objectifs de l'étude

I.2. L'évaluation de l'impact

L'étape d'évaluation d'impact préfigure comme le moteur de l'ACV. Il existe ainsi différentes méthodes d'évaluation de l'impact, qui varient en fonction de la liste des impacts pris en compte mais aussi de la façon de les caractériser.

Mais globalement, l'évaluation de l'impact s'effectue en 4 phases :

- Classification

Cela revient, à partir d'un inventaire exhaustif, à faire correspondre des produits aux impacts auxquels ils contribuent.

Ainsi, pour ce qui de l'évaluation de l'impact du cycle de vie d'un produit (ex. le navire), est schématisé ci-contre le principe de classification employé :

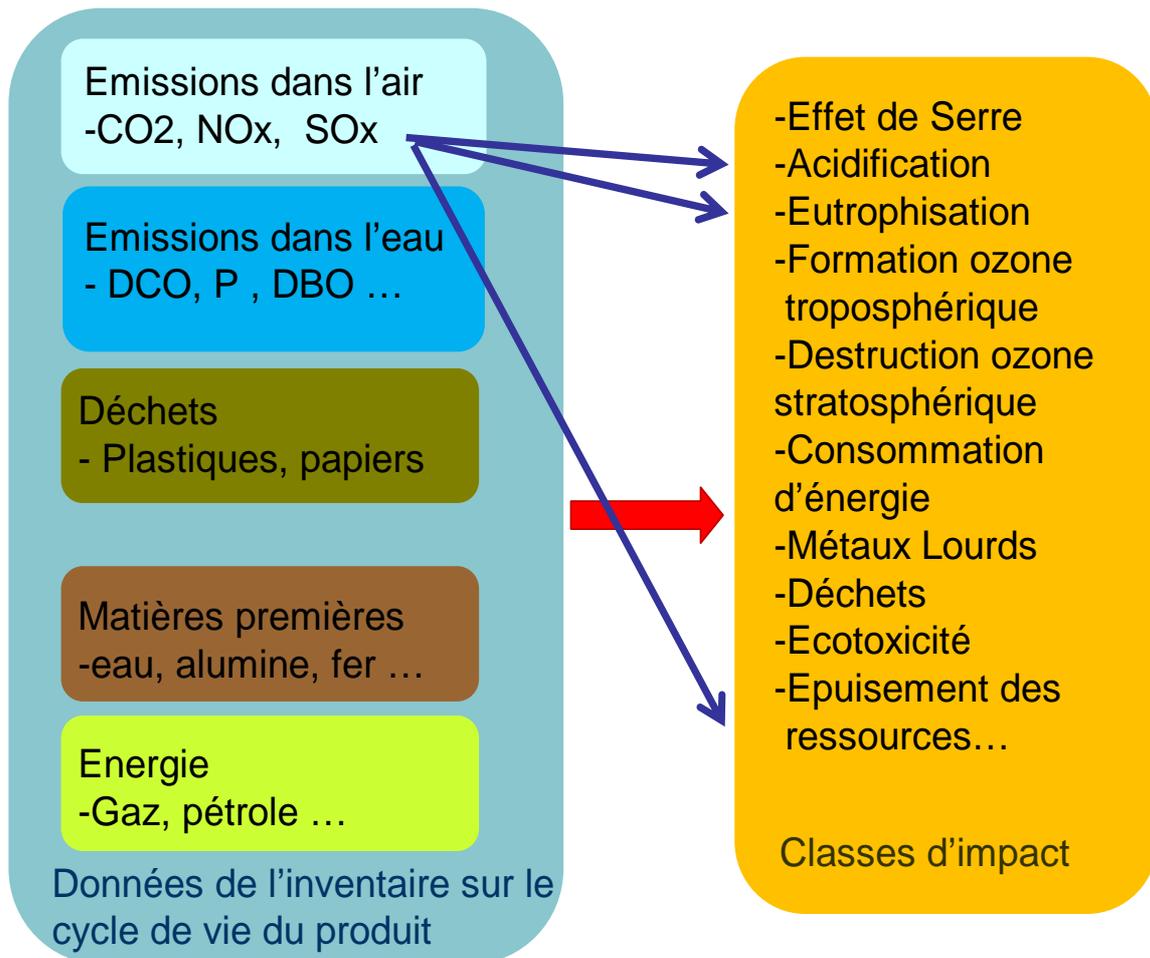


Figure 3 : Forme généralisée de classification

- Caractérisation

Il s'agit dans notre cas de figure, de quantifier les contributions des diverses substances émises d'un navire aux différentes classes d'impact listées ci-dessus.

- Normalisation (comparaison des résultats de la caractérisation avec une valeur de référence)
- Pondération des différents impacts les uns par-rapport aux autres

Ainsi, parmi les nombreuses méthodes proposées, l'ENSAM a pu établir sous SimaPro (logiciel d'ACV) la méthode d'évaluation d'impact la plus à même de caractériser les impacts d'une substance sur le monde marin et par défaut sur la santé humaine, liés à l'activité d'un navire : **CML2001**.

Il est donc judicieux de s'attarder un peu sur cette méthode, dans la mesure où les résultats donnés par celle-ci serviront de base de données pour le travail alloué à l'Ifremer ; à savoir la hiérarchisation des substances émises au cours du cycle de vie des navires, en fonction des masses d'eau et des catégories d'impact.

I.3. La méthode d'évaluation d'impact choisie : CML2001

a. Introduction

Cette méthode présente une approche diversifiée sur différents écosystèmes, contrairement aux autres méthodes d'évaluation de l'impact. Elle est de plus très adéquate pour caractériser les impacts liés au milieu marin (milieu concerné par le projet CONVENAV, ndlr).

C'est aussi une des méthodes qui prend en compte le plus grand nombre de substances possible, la majorité des écosystèmes (la terre, les eaux douces et de mer ainsi que les sédiments associés, et les activités de l'Homme) ; la rendant à la fois précise et exhaustive.

L'objectif du projet CONVENAV étant de créer une méthode de calcul d'impact pour un navire, il a été décidé de travailler avec CML2001 pour pouvoir utiliser des indicateurs spécifiques tels que les écotoxicités en milieu marin notamment.

Aussi, de part l'approche orientée «impact envers l'environnement marin et la santé humaine» qu'elle propose, cette **méthode sera adoptée par l'Ifremer pour la suite du projet CONVENAV.**

b. Inconvénients de CML2001

Il est toutefois à notifier certaines limites à cette méthode d'évaluation des risques :

- D'une part, c'est une méthode d'approche orientée impacts (ou *mid-end approach*) qu'on oppose à une méthode orientée dommages (ou *end-point approach*, comme la méthode EI99), du fait qu'elle va à un degré d'analyse moins poussé ; ce qui va d'un côté diminuer les incertitudes de calcul, mais également donner une vision moins globale de l'impact...comme résumé ci-dessous :

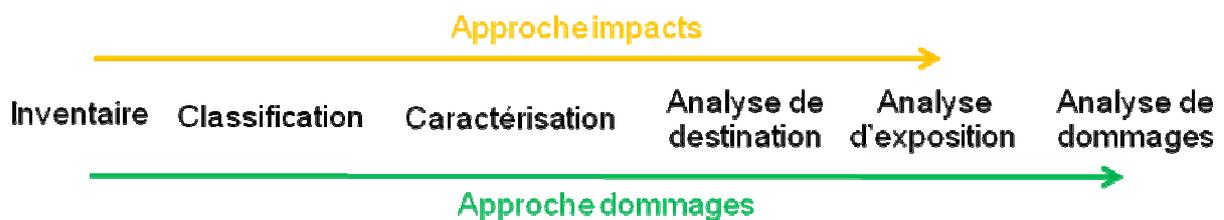


Figure 4 : Deux approches des méthodes d'évaluation différentes

- D'autre part, la notion de lieu d'émission des substances n'est pas prise en compte dans CML2001 ; ce qui ajoute une incertitude supplémentaire quant à la zone géographique prétendument impactée.

c. Catégories d'impact prises en compte

Dans le cas qui nous intéresse, les catégories choisies par l'ENSAM pour l'exploitation de CML2001, qui sont le plus impactées par le cycle de vie des navires sont **l'eau de mer et les sédiments marins.**

Toutefois, il paraît irréaliste de négliger l'impact sur la **santé humaine** (marins, consommateurs de produits de la mer et autres travailleurs en relation avec le monde marin, qui sont plus ou moins directement touchés par l'activité des navires). Ce critère sera donc pris en compte dans la présente étude.

Par ailleurs, il est estimé que durant son cycle de vie, un navire passe très peu de temps en eau douce (rivières, lacs...) ; aussi l'eau douce et ces sédiments ne seront pas des catégories prises en compte, car trop peu représentatives.

Pour tous ces critères, la perspective de temps retenue sera de **500 ans**, qui est une échelle de temps réaliste au vu de la persistance de la majorité des substances inventoriées et du temps d'exposition de l'environnement marin à ces pollutions.

Indicateurs CML2001 relatifs à ces critères : HTP (Human Toxicity Potential)
MAETP (Marine Aquatic Ecotoxicity Potential)
MSETP (Marine Sediment ETP)

Après avoir entrevu l'aspect théorique de l'évaluation de l'impact, l'étude se penche sur le travail de recherche et de classement des substances toxiques, bioaccumulables et persistantes, auquel l'environnement marin est confronté lors du cycle de vie d'un navire.

II. Caractérisation des substances pertinentes pour le milieu marin

II.1. Documents sources

Les sources d'information exploitées sont les fichiers fournis par l'ENSAM et intitulés :

- « Inventaire production.xls », « Inventaire exploitation.xls » et « Comparaison navires-substances les plus impactantes.xls » (1)

Les deux premiers documents-source sont des inventaires de substances émises durant les phases de production (construction du navire) et d'exploitation (mise en service), indépendamment de la typologie du navire.

Ces deux fichiers-source, une fois comparés avec le troisième (plus récemment émis), permettent d'identifier des différences dans les substances inventoriées : l'échelle de temps, au départ infinie, a été réduite à une perspective de temps de 500 ans (pour les raisons mentionnées dans le paragraphe précédent).

Le troisième fichier-source, résultat de l'exploitation de CML2001 pour les phases de production et d'exploitation, présente :

- l'inventaire des substances émises dans ces deux phases, associé au compartiment d'émission correspondant, définis par les termes SOIL, WATER, WASTE, RAW et AIR. [onglet inventaire]
- les diverses contributions des substances aux process mis en jeu lors de ces phases
- et les classements des 20 substances les plus impactantes pour les indicateurs HTP, MAETP et MSETP, et selon la typologie du navire (tanker/navire-citerne, frégate et

autres navires militaires, ou navire de marchandises) ; classements résumés ci-dessous :

Tableau 1 : Substances les plus impactantes (selon CML2001)

Temps: 500 ans	Santé humaine (HTP)	Eau de mer (MAETP) et Sédiments marins (MSETP)
Substances les plus impactantes	HAP, hydrocarbures aromatiques polycycliques	Nickel, ion / Nickel
	Chrome VI	Vanadium, ion / Vanadium
	Oxydes d'azote	Barite / Barium
	Arsenic	Zinc, ion / Zinc
	Nickel / Nickel, ion	Cuivre / Cuivre, ion
	Benzene / Benzene, hexachloro-	Cobalt
	Cadmium	Composés du tributylétain
	Cuivre	Beryllium
	Dioxines	Mercurure
	Vanadium / Vanadium, ion	HAP, hydrocarbures aromatiques polycycliques
	Cobalt	Cadmium
	Dichromate de sodium	Chrome VI
	Particules en suspension (< 2.5 µm, > 2.5 µm et < 10µm)	Molybdène
	Barium / Barite	Selenium
	Fluorure d'hydrogène HF	Arsenic, ion / Arsenic
	Dioxyde de soufre	Thallium
	Oxyde de propène	

(1) En bref, ces fichiers donnent un inventaire exhaustif des substances à considérer dans l'étude, dénombrées à près de 700 unités, réparties entre les compartiments AIR, SOIL, WATER et RAW ; et ce pour une perspective de temps de 500 ans.

➤ « Substances CML2001.xls » et « Substances Impact CML2001.xls » (2)

Ces derniers documents-source utilisés sont des documents présentant :

- d'une part, les facteurs de normalisation à considérer pour les indicateurs d'écotoxicité/toxicité (HTP, MAETP et MSETP).
- d'autre part, une liste de substances auxquelles on associe leurs contributions aux diverses classes d'impact, à partir de facteurs de caractérisation calculés par CML2001.

Ces substances décrites sont en outre définies par leur compartiment d'émission, leur numéro CAS et le groupe fonctionnel auxquelles elles appartiennent.

Pour rappel :

- ✓ *Le numéro CAS est un numéro unique, propre à une seule substance chimique et reconnu au niveau international pour identifier une substance chimique décrite par sa formule moléculaire, son nom générique et/ou commercial (4).*
- ✓ *Les différents groupes fonctionnels évoqués ci-dessus sont : les pesticides, les métaux, les composés inorganiques, non-aromatiques (halogénés ou non), aromatiques (polycycliques ou non, halogénés ou non) et les nouveaux composés.*

(2) En bref, ces fichiers donnent des substances qui contribuent plus ou moins aux classes d'impact qui nous intéressent ; à savoir la toxicité humaine et les écotoxicités marines. Cela donne donc un ordre d'idée des substances pertinentes pour le milieu marin (voire pour la santé humaine).

II.2. Méthode de travail

L'évaluation d'impact de l'ACV décidée par l'ENSAM peut être résumée ainsi :

Tableau 2 : Données d'entrée choisies pour l'évaluation d'impact d'un navire (projet CONVENAV)

Critères de base	Données d'entrée
Méthode d'évaluation d'impact	CML2001
Classe d'impacts	Ecotoxicité/Toxicité
Catégories d'impacts	Ecotoxicité aquatique marine Ecotoxicité sédimentaire marine Toxicité humaine
Echelle temporelle	500 ans
Compartiments non pris en compte	Sol continental Eau douce Sédiments d'eau douce Energie-Matières premières Déchets

A partir de ces données de base, il est donc nécessaire de trier les données fournies par les fichiers (2) :

- en supprimant d'abord les substances ne figurant pas dans l'inventaire de référence (1), qui dénombre près de 700 substances mises en jeu dans l'étude,
- en classant ensuite les substances communes aux deux inventaires, en fonction de leur compartiment d'émission initial ; à savoir SOIL (issues du sol continental), WATER (eau douce, eau de mer...), AIR (particules et substances (semi-)volatiles), WASTE (déchets agricoles et industriels) et RAW (énergie et matières premières),
- et en ne gardant que les substances dont la source d'émission est l'eau ou l'air ; considérant que les catégories d'impact sont l'eau de mer, les sédiments marins et éventuellement la santé humaine.

La liste composée des substances ainsi retenues correspond dès lors aux substances référencées qui sont impactantes sur la vie marine, et dont les compartiments d'émission (majoritaires en ce qui concerne l'activité des navires) sont les domaines aérien et marin.

Toutes les étapes de tri énumérées précédemment sont résumées ci-contre au niveau d'un organigramme :

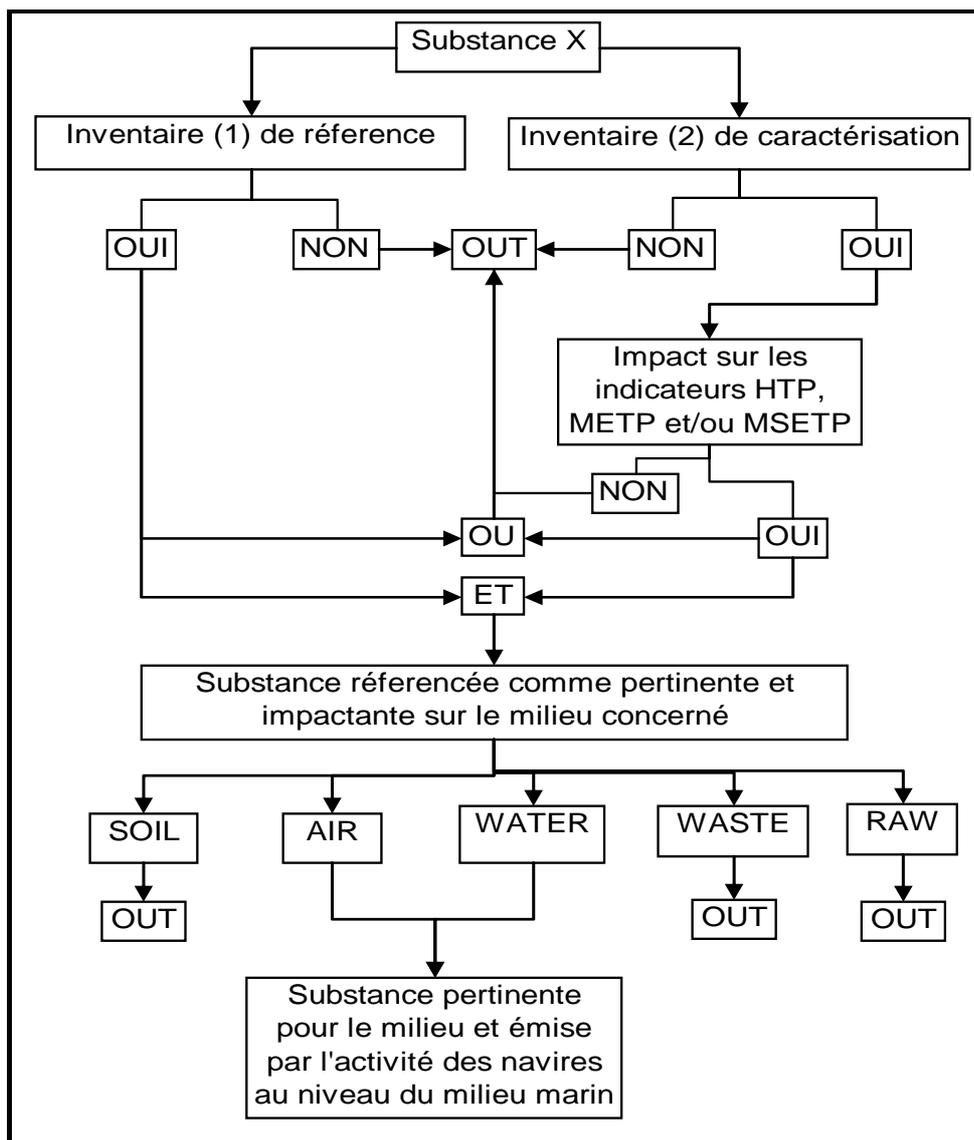


Figure 5 : Méthodologie du tri des substances pertinentes pour le milieu marin (OUT = à ne pas prendre en compte)

II.3. Limites de l'étude

Dans ce paragraphe, sont évoquées les limites fixées à cette étude, et les raisons qui ont poussé à les établir en vue d'une classification la plus judicieuse possible :

a. Pollution accidentelle

La notion de pollution accidentelle, qu'elle se traduise par des rejets involontaires ou par le chavirage d'un navire, n'est pas un critère qui sera choisi pour caractériser l'impact d'une substance émise par un navire sur un milieu marin quelconque.

En effet, ces épisodes de pollution ne sont que très rarement constatés, voire souvent implicites et indépendant de la bonne marche d'un navire ; ce qui les rend difficilement appréciables et quantifiables à terme.

Des listes de substances transportées par les navires sont disponibles, et ne seront donc point prises en compte, car leur transport est à usage principalement commercial, et les seuls

impacts envisageables sur l'écosystème qu'elles pourraient avoir se produiraient en cas d'accident ou d'incident survenu durant l'activité des navires.

Ainsi, les données fournies par les projets HASREP (Response to Harmful Substances spilled at sea) et CLARA II (Calcul Liés Aux Rejets Aquatiques en mer), qui concernent respectivement des données sur les substances transportées en vrac les plus dangereuses et la modélisation des rejets maritimes accidentels, ne peuvent pas être considérés...malgré l'importance des classements que ces projets mettent en valeur.

b. Démantèlement des bateaux et pollution

Il est à remarquer que l'inventaire effectué pour la phase de démantèlement n'a pas été réalisé pour l'instant, car la phase d'évaluation des impacts dûs aux process mis en jeu dans cette dernière phase n'a pas été finalisée.

La fin de vie d'un navire, de par les émissions de polluants (les métaux lourds, principalement) de très haute toxicité au niveau des chantiers navals et autres lieux de déconstruction, n'est pourtant théoriquement pas négligeable. Aussi, l'incertitude quant à la globalité des données fournies est de mise ; toutefois, il peut être envisagé en théorie que les substances mises en jeu en production et exploitation du navire, se retrouveront dans le démantèlement de ce dernier.

Il sera de plus estimé par l'ENSAM que c'est la phase d'exploitation, de par l'utilisation de pétrole, qui est la plus impactante des phases.

c. Sources d'émission des polluants non considérées

Pour des raisons d'exploitabilité de ce travail sur une période courte, les substances toxiques, bioaccumulables et persistantes pour l'environnement marin, dont l'émission a pour origines le sol continental (SOIL), l'exploitation des ressources et matières premières (RAW), ainsi que le traitement des déchets (WASTE), ne seront pas non plus prises en compte.

Outre cet aspect, ces substances ne concernent pas la majorité (en terme quantitatif) des substances émises lors du cycle de vie des navires. De plus, pour la plupart d'entre elles, ces substances sont difficilement quantifiables du point de vue écotoxicologique, et très peu de données concernant leurs propriétés intrinsèques sont disponibles...les rendant difficilement hiérarchisables en terme d'impact sur l'écosystème marin.

II.4. Conclusion

A l'issue de la première étape de cette étude, l'émission d'une liste de substances les plus pertinentes pour le milieu marin et la santé humaine (plus ou moins directement associée), a été menée à terme et est schématisée au Tableau 3 ci-contre. Elle tient compte de toutes les émissions mises en jeu, pour une échelle de temps/exposition de 500 ans, au cours des deux premières phases du cycle de vie d'un navire ; sa construction et sa mise en service. Les sources d'émission finalement retenues sont l'eau et l'air, correspondants respectivement à des impacts directs sur l'environnement aquatique et l'homme.

Tableau 3 : Liste des substances les plus pertinentes pour le milieu marin, voire pour la santé humaine

SUBSTANCE NAME	CAS NUMBER	TYPE
Acenaphthene	83-32-9	New
Acenaphthylene	208-96-8	New
Acrolein	107-02-8	Non aromatic
Ammonia	7664-41-7	Inorganic
Antimony	7440-36-0	Metal
Arsenic / Arsenic, ion	7440-38-2	Metal, ion
Barite	13462-86-7	New
Barium	7440-39-3	Metal
Benzene	71-43-2	Aromatic
Benzene, 1,2-dichloro-	95-50-1	Halogenated aromatic
Benzene, chloro-	108-90-7	Halogenated aromatic
Benzene, ethyl-	100-41-4	Aromatic
Benzene, hexachloro-	118-74-1	Halogenated aromatic
Benzene, pentachloro-	608-93-5	Halogenated aromatic
Benzo(a)pyrene	50-32-8	Polycyclic aromatic
Beryllium	7440-41-7	Metal
Butadiene	106-99-0	Non aromatic
Cadmium / Cadmium, ion	7440-43-9	Metal, ion
Chloroform	67-66-3	Halogenated non-aromatic
Chromium	7440-47-3	Metal
Chromium VI	/	Ion
Chromium, ion	/	Ion
Cobalt	7440-48-4	Metal
Copper / Copper, ion	7440-50-8	Metal, ion
Dioxins	/	New
Ethane, 1,2-dichloro-	107-06-2	New
Ethene	74-85-1	New
Ethene, chloro-	75-01-4	New
Ethene, tetrachloro-	127-18-4	New
Ethylene oxide	75-21-8	New/Non aromatic
Formaldehyde	50-00-0	Pesticide
Hydrogen chloride	7647-01-0	Inorganic
Hydrogen fluoride	7664-39-3	New
Hydrogen sulfide	7783-06-4	New
Lead	7439-92-1	Metal
Mercury	7439-97-6	Metal
Methane, bromo-, Halon 1001	74-83-9	New
Methane, dichloro-, HCC-30	75-09-2	Halogenated non-aromatic
Methane, tetrachloro-, CFC-10	56-23-5	Halogenated non-aromatic
Molybdenum	7439-98-7	Metal
m-Xylene / 1,3-Diméthylbenzène	108-38-3	Aromatic
Nickel / Nickel, ion	7440-02-0	Metal, ion
Nitrogen oxides	11104-93-1	New
o-Xylene / 1,2-Diméthylbenzène	95-47-6	Aromatic
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons (carcinogenic)	/	Polycyclic aromatic
Particulates, < 2.5 um	/	New
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	/	New
Phenol	108-95-2	Aromatic
Phenol, pentachloro-	87-86-5	Halogenated aromatic
Propylene oxide	75-56-9	Non aromatic
Selenium	7782-49-2	Metal
Sodium dichromate	10588-01-9	New
Styrene	100-42-5	Aromatic
Sulfur dioxide	7446-09-5	Inorganic
Thallium	7440-28-0	Metal
Tin / Tin, ion	7440-31-5	Metal, ion
Toluene / Méthylbenzène	108-88-3	Aromatic
Tributyltin compounds	/	New
Vanadium / Vanadium, ion	7440-62-2	Metal, ion
Zinc / Zinc, ion	7440-66-6	Metal, ion

2^{ème} PARTIE : Comportement et impact des polluants en milieu marin

L'environnement marin comprend de très nombreux biotopes selon les zones géographiques étudiées, et pour cette raison, est d'autant plus vulnérable à la seule pollution anthropique associée à ce milieu : celle liée à l'activité des bateaux.

La définition d'éco-indicateurs, critères permettant d'identifier et de qualifier les valeurs d'impact des substances sur l'eau de mer, les sédiments marins et indirectement sur l'homme, est donc tout à fait appropriée.

Mais avant de s'intéresser à ces critères de classement et d'évaluation des impacts d'une substance, et pour améliorer leur compréhension, il est indispensable de connaître par quels moyens et dans quelles mesures de tels produits, de part leurs propriétés intrinsèques, peuvent devenir une menace pour l'environnement marin.

I. Introduction à l'écotoxicologie

I.1. Toxicologie et écotoxicologie

La toxicologie, anciennement appelée *étude des poisons*, étudie les désordres induits dans la physiologie des êtres vivants par l'exposition à des concentrations excessives de composés minéraux ou organiques.

On distingue classiquement la toxicologie de l'écotoxicologie : la première étudie les effets sur la santé de l'individu humain et animal, la deuxième les effets des agents polluants sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes. En effet, l'écotoxicologie étudie la contamination de l'environnement, le comportement et les effets des polluants ainsi que les conséquences écologiques qui en découlent à des échelles spatiales et temporelles bien plus importantes (5).

I.2. Comportement des produits dans l'environnement

Dans l'eau, le devenir des produits chimiques dépend des processus de dispersion, dégradation ou autres transformations physiques, chimiques ou biologiques. Suivant la rémanence du produit, ces processus s'étaleront sur des durées allant de quelques jours à plusieurs années (devenir à court terme et à long terme du produit chimique).

Du point de vue comportemental, tous ces phénomènes vont contribuer à la disparition du produit, ou à son accumulation dans l'écosystème aquatique (6).

a. Dispersion et circulation

Les polluants ont la capacité de passer d'un compartiment à l'autre. Ainsi, tout composé, minéral ou organique, peut en théorie passer dans l'atmosphère. C'est bien entendu le cas des gaz, mais pour les liquides et les solides, ce passage s'effectue respectivement par évaporation ou sous forme d'aérosols (fines particules et gouttelettes en suspension), et sous forme de poussières pouvant être piégées dans les aérosols.

Mais suivant leur nature et les conditions du milieu, les polluants se retrouvent dans l'eau à l'état dissous et/ou particulaire (précipités, adsorbés sur des matières en suspension,...) ; la fraction particulaire sédimente alors plus ou moins rapidement en aval des fleuves ou au fond des mers, d'où elle peut être remobilisée à nouveau par des processus physico-chimiques, biologiques voire géologiques (érosion, désorption, relargage, etc.) (7).

N.B : Cette étude ne tiendra pas en compte des pollutions d'origine anthropique autre que l'activité des navires. Il est en effet logique de constater le transfert direct ou indirect (précipitations, vent) d'effluents de toutes origines (domestique, industrielle, agricole), susceptibles d'apporter des polluants toxiques aux cours d'eau. Pourtant, la répartition de ces derniers entre les différents compartiments du milieu (colonne d'eau, sédiment, atmosphère), ajoutée à leur persistance et leur biodisponibilité, déterminent le niveau d'exposition aux toxiques que subiront les écosystèmes et les organismes qui y vivent.

b. Biodégradation et persistance

La plupart des polluants dispersés dans l'environnement sont instables. Ils seront *dégradés* si des processus abiotiques interviennent pour conduire à leur destruction et/ou à leur transformation en dérivée peu ou pas toxiques ou au contraire plus toxiques que la substance d'origine. Ces dégradations peuvent avoir lieu soit par photodégradation (rayons UV), photolyse, hydrolyse, oxydation ou réactions acido-basiques.

Le processus envisagé pour le projet CONVENAV est majoritairement la **biodégradation**, qui est réalisée par les êtres vivants (bactéries, champignons, organes digestifs des organismes supérieurs...). Cette dégradation tendra plus ou moins rapidement à la minéralisation des composés organiques (sous forme de CO₂, d'eau et de sels minéraux) et sera plus longue encore pour les composés minéraux comme les métaux lourds.

Est associée à la biodégradation d'un produit sa **persistance**, c'est-à-dire sa capacité à rester dans un milieu sans être physiquement dégradée ni biodégradée ; elle est quantifiable par sa demi-vie, notion à ne pas confondre avec la **rémanence**, qui est le temps pendant lequel il garde un ou plusieurs effets visibles (7).

c. Conclusion

Les produits déversés dans l'eau ont donc un comportement spécifique qui, à plus ou moins long terme, donnera lieu à la contamination d'un compartiment donné. D'où la nécessité de fractionner le milieu marin en compartiments d'émission (eau de mer, sédiments marins et santé humaine) et zones géographiques d'émission (estuaires et ports, eaux côtières et eaux du large) afin de préciser l'impact d'une substance donnée.

A ce propos, l'Annexe A définit les sources d'émission associées à l'activité des navires, selon les zones géographiques marines pouvant être impactées.

II. Méthodologie de classement

L'idée est d'établir une méthode de classement propre au projet, faisant intervenir les éco-indicateurs les plus judicieux pour décrire les impacts d'une substance sur le milieu marin, ainsi que les contributions selon les compartiments d'impact (eau de mer, sédiments et santé humaine).

II.1. Les différentes méthodes de classement

a. Classification MARPOL 73/78

Afin de répertorier les produits chimiques, une classification basée sur leurs propriétés physico-chimiques a été élaborée sous l'égide de l'UE dans le cadre du système européen de classification établi par l'accord de Bonn (Bonn Agreement, 1994). Cette classification a permis de prévoir le comportement à court terme des produits en les différenciant en quatre grands types de catégories de produits : ceux qui s'évaporent (E), ceux qui flottent (F), ceux qui se dissolvent (D) et ceux qui coulent (S).

Tableau 4 : Système de classification européen du comportement à court terme des substances déversées accidentellement en mer

Description	Symbole	Caractéristiques de la substance		
		Densité	Pression de vapeur	Solubilité
Flotte	F	<1.03	<0.3kPa	<0.1% (liq) ou <5% (sol)
Coule	C	>1.03		<0.1% (liq) ou <5% (sol)
Se dissout	D			>5% (liq) ou >100% (sol)
S'évapore	E		>3kPa	

Mais dans la réalité, la situation est plus complexe, les produits pouvant appartenir à plus d'une catégorie évoquée.

Cela a conduit l'OMI (Organisation Maritime Internationale), par l'intermédiaire du GESAMP, à répertorier l'ensemble des substances chimiques selon la classification MARPOL 73/78 (IMO, 1997), basée sur les propriétés physico-chimiques et les niveaux de toxicité des produits.

Cette convention pour la prévention de la pollution par les navires couvre l'ensemble des pollutions susceptibles d'être engendrées depuis les navires et leur cargaison

L'annexe II de cette convention présente notamment une classification des substances liquides transportées en vrac en fonction du type de pollution qu'elle peut engendrer. Et au total, quatre catégories de pollution sont identifiées en fonction des dangers décroissants qu'un produit présente pour le milieu marin :

Tableau 5 : Classement des dangers d'un produit pour le milieu marin, d'après MARPOL 73/78

Catégorie A	Risques graves pour les ressources marines, la santé humaine et/ou les autres utilisations de la mer
Catégorie B	Risques moyens
Catégorie C	Risques faibles
Catégorie D	Risques discernables

En guise d'illustration d'une méthode de classement, les tableaux associés à cette classification sont reportés à l'Annexe B.

Plus simplement, le système de classement MARPOL est basé sur la caractérisation des profils de dangers de substances chimiques vis-à-vis de l'homme et de l'environnement marin.

L'établissement d'un profil de danger d'une substance chimique sert à divers aspects réglementaires (construction des navires) et opérationnels (rejets opérationnels, déversements accidentels) ; cette classification est donc adéquate pour évaluer les contaminations lors de la construction et de l'exploitation des navires. Mais la seule évaluation du profil de danger d'une substance (qui représente ses seules propriétés intrinsèques) est insuffisante pour évaluer son impact probable en cas d'exposition et contamination de l'environnement (8).

N.B : C'est là toute la différence entre le danger et le risque ; ce dernier étant la conséquence d'une exposition. Aussi, il est à noter que dans l'approche proposée, le GESAMP n'a pas souhaité s'engager dans une démarche d'analyse du risque des substances chimiques, car trop longue, trop complexe et n'apportant au final qu'un bénéfice supplémentaire (8).

b. TGD (Technical Guidance Document)

Pour rappel, ce document constitue actuellement la référence européenne pour l'évaluation du risque chimique pour la protection de l'homme et de l'environnement. Pour rappel, il consistait à évaluer le rapport PEC/PNEC pour identifier le comportement et devenir d'une substance associée à un biote plus ou moins sensible.

Il a fait récemment l'objet d'une adaptation spécifique pour l'environnement marin, tout en conservant le même concept méthodologique (cf. paragraphe *Concept réglementaire de l'Avant-propos*). Il est en effet admis que le milieu marin est le réservoir de la plupart des contaminants chimiques, or les effets d'une telle accumulation sont difficiles à estimer à long terme, notamment pour les substances PBT (potentiellement persistantes, bioaccumulables et toxiques) et vPvB (très persistantes et toxiques).

La stratégie PBT est donc apparue dans le nouveau TGD pour identifier entre elles les substances les plus préoccupantes, grâce à l'évaluation de leurs propriétés intrinsèques. Le tableau ci-dessous résume ainsi les critères pris en compte pour caractériser les substances PBT et vPvB dans la nouvelle version du TGD (2) :

Tableau 6 : Caractérisation des substances PBT et vPvB

	Substances PBT	Substances vPvB
Persistance	Demi-vie > 60 jours dans l'eau de mer ou > 180 jours dans le sédiment marin	
Bioaccumulation	BCF > 2000 ou log Kow > 4.5	BCF > 5000
Toxicité	NOEC < 0.01 mg/L Substance CMR (cancérogène, mutagène ou reprotoxique) ou perturbateur endocrinien	

Deux stratégies sont donc proposées au sein du TGD pour illustrer l'évaluation des risques et impacts sur l'environnement marin ; d'une part l'évaluation du risque (rapport PEC/PNEC) et

d'autre part, l'évaluation de l'impact des substances les plus dangereuses en vue de leur réduction ou élimination à la source (stratégie PBT).

II.2. Choix de la méthode de classement

La méthode de classement et d'évaluation des impacts la plus judicieuse doit obligatoirement souscrire à quatre grands critères :

- **Exhaustivité** : Les indicateurs choisis dans la méthode doivent aborder tous les aspects qualitatifs et quantitatifs de l'impact environnemental considéré. En d'autres termes, chaque indicateur doit dépendre de tous les paramètres influant sur le phénomène étudié. De plus, il est important de préciser si les paramètres disponibles sont définis arbitrairement ou s'ils correspondent à des normes.
- **Faisabilité** : L'indicateur doit pouvoir être calculé/évalué rapidement.
- **Transparence** : Nécessaire pour rendre l'évaluation vérifiable et compréhensible par un non-spécialiste.
- **Exploitabilité** : Plus le nombre d'indicateurs sera réduit, meilleure sera l'exploitabilité de la méthode.

Pour toutes ces raisons, j'ai adopté un classement similaire au classement MARPOL (Marine Pollutants) dans sa typologie, en y associant des paramètres de classement plus exploitables issus du TGD (persistance, bioaccumulation).

Cela va permettre de fournir un **classement des produits en catégories de pollution** selon le compartiment d'émission (sédiments marins, santé humaine ou eau de mer) ; ce classement **se fonde sur une évaluation de leurs propriétés et se traduit par un profil de risques pour l'environnement marin**.

Remarque :

Ne figure pas dans la liste de critères (détaillée ci-dessous) retenus pour le projet CONVENAV le rapport PEC/PNEC, qui est l'indicateur de risque environnemental employé dans le TGD (document de référence européen pour l'analyse du risque chimique, ndlr). Les raisons de ce choix sont les suivantes :

- pour mémoire, la méthodologie de définition des normes ou seuils de qualité repose sur les méthodologies d'évaluation des risques utilisées dans le cadre de la réglementation des substances chimiques (ou TGD).

Ce qui a permis d'établir d'une part, les normes de qualité environnementale pour les substances prioritaires de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau) et d'autre part, le rapport PEC/PNEC (défini dans l'Avant-propos de cette étude).

Le choix des NQE (Normes de qualité environnementale certifiant du bon état chimique d'une masse d'eau, ndlr) est dès lors inapproprié pour notre étude : ces normes ne concernant qu'une minorité de substances (les 33 catégories de substances prioritaires de la DCE). Quant au choix du rapport PEC/PNEC, il est également peu judicieux car dans certaines situations, il n'est pas possible de caractériser quantitativement le risque chimique* ; c'est notamment le cas pour les environnements marins océaniques éloignés ou peu explorés, ainsi que pour les substances pour lesquelles les valeurs PEC et PNEC ne peuvent être correctement estimées (2).

* C'est d'ailleurs le cas pour cette étude, qui se fondera sur une approche majoritairement qualitative de l'impact d'une substance sur un milieu précis, dans la mesure où les quantités de polluants mis en jeu n'est pas une donnée connue.

- D'autre part, le rapport PEC/PNEC peut être jugé trop simpliste, car la gradation de la caractérisation du risque se trouve dans l'expression quantitative de ce rapport, comme en témoigne le tableau suivant (2) :

Tableau 7 : Caractérisation du risque à partir du rapport PEC/PNEC

	Echelle locale	Echelle régionale	Description
Valeur du rapport PEC/PNEC	< 1	< 1	Absence de risques
	> 1	< 1	Impact local
	> 1	> 1	Impact environnemental important

- En outre, le critère PNEC (Predictive No Effect Concentration) est déterminé à partir de tests écotoxicologiques auxquels sont associés un facteur d'incertitude supplémentaire (de 10 à 1000), évalué en fonction de l'information utilisée : ce facteur est ainsi plus élevé si l'information vient seulement de tests de toxicité aigue et si la variété d'espèces testées est faible (7).

Cela rend le travail de caractérisation du risque par cette méthodologie trop compliqué et laborieux, dans la mesure où cette concentration est spécifique à un lieu donné (l'air, le sol, l'eau ou le sédiment), et donc à des tests effectués sur une zone précise. Aussi faut-il avoir des données concernant ces tests, qui n'ont pas été effectués pour toutes les substances pertinentes pour notre étude.

II.3. Choix des critères de classement

J'ai choisi de dissocier ce profil de risques en cinq catégories principales :

- Bioaccumulation
- Biodégradation
- Mobilité (comportement dans l'écosystème)
- Toxicité aquatique
- Comportement et effets sur l'homme

Le choix des critères de classement associés à ces catégories est explicité ci-dessous :

a. Bioaccumulation

Bioaccumulation / Log P :

On désigne par **bioaccumulation** le processus d'absorption par lequel les êtres vivants peuvent accumuler dans leur organisme des nutriments, tout autre substance présente naturellement dans son environnement ou encore un polluant organique de synthèse, quelle que soit la voie de pénétration dans l'organisme considéré (5).

Ce critère est évalué par le **coefficient de partage n-octanol/eau**, noté **log Kow** ou **log P**, dont la valeur caractérise la lipophilie de la substance.

Il indique donc la tendance qu'a une substance à s'accumuler dans les membranes physiologiques puis dans les cellules, c'est-à-dire dans les organismes vivants. Il représente

également l'aptitude qu'a une substance de se fixer sur les sédiments, qu'ils soient en suspension ou bien déposés sur le fond (9).

N.B. : Il est admis que les substances ayant un $\log Kow \geq 3$ sont bioaccumulées dans les organismes aquatiques. Toutefois, les substances extrêmement hydrophobes ($\log Kow > 7$ ou dont le poids moléculaire est supérieur à 700g) ne sont pas bioaccumulables

Bioconcentration / FBC :

La **bioconcentration** est le processus par lequel une substance prélevée dans un biotope par un être vivant va se rencontrer dans l'organisme de ce dernier à des concentrations supérieures à celles auxquelles il se trouve, selon les cas, dans les eaux, l'air et/ou les sols et sédiments.

Ce critère est évalué par le **facteur de bioconcentration**, noté **FBC**, qui est la valeur par laquelle la concentration d'un polluant dans un organisme excède celle dans le biotope.

Il n'existe pas de différence fondamentale entre les processus de bioaccumulation et de bioconcentration, ce dernier n'étant juste qu'un cas particulier du précédent : le cas où existe un accroissement de concentration quand le polluant passe du biotope dans la biomasse d'un être vivant, quel que soit le niveau trophique de l'organisme concerné (5).

C'est donc pour cette raison que les deux coefficients $\log P$ et FBC sont réunis dans une seule et même colonne.

N.B. : En réalité, tous les êtres vivants présentent, à divers degrés, cette propriété de stockage dans leur organisme de toute substance peu ou pas biodégradable. Il apparaîtra ainsi des phénomènes d'**amplification biologique** des polluants dans l'écosystème contaminé : en effet, un organisme qui aura concentré une substance toxique, va servir de nourriture à une autre espèce animale qui l'accumulera à son tour dans son organisme ; ce qui va, de proche en proche, conduire à une contamination de la chaîne trophique.

On évalue ce phénomène par le facteur de bioamplification, basés en principe sur des valeurs mesurées, mais estimés sur la base du FBC et/ou du coefficient de partage Kow (si disponibles) de la substance [Fisk *et al.*, 1998].

Pour mieux appréhender les résultats des valeurs de ces deux coefficients sur les phénomènes de bioaccumulation, bioconcentration et bioamplification, il est donc judicieux de conserver les valeurs du tableau de classement établi par le GESAMP des Nations Unies (cf. Annexe B), tout en réduisant l'échelle de notation croissante à cinq valeurs (de 0 à 4).

b. Biodégradation

La connaissance de la cinétique de dégradation d'une substance chimique dans l'environnement aquatique est primordiale pour appréhender les effets à long terme de celle-ci. En général, la biodégradation est la voie la plus significative de dégradation dans l'environnement.

Mis à part les pesticides agricoles (non pris en compte dans cette étude, car d'origine d'émission continentale), il existe peu d'espèces toxiques, bioaccumulables et persistantes, qui ont à ce jour des données sur leurs cinétiques de dégradation dans l'environnement, et les données concernant l'environnement marin sont encore plus rares.

Un système simplifié est alors proposé pour caractériser les substances qui se dégradent facilement et présentent le moins de danger pour le milieu considéré :

R : Biodégradation rapide	NR : Absence de biodégradation rapide	(2)
----------------------------------	--	------------

Il est donc souhaitable d'associer à ce système binaire (défini dans le classement MARPOL) des données plus pertinentes, comme celle liée à la dégradation physique d'une substance (ici, l'hydrolyse).

Cette dégradation ne représente qu'une voie de dégradation partielle d'une substance, mais témoigne de la persistance d'un produit dans un biotope car l'effet de l'hydrolyse peut réduire la concentration de la substance dans l'eau et diminuer la capacité de bioconcentration.

On l'illustrera par la détermination du **temps de demi-vie** du produit considéré, qui représente le temps mis par une substance pour perdre la moitié de son activité physiologique (ici, sa concentration). Ce paramètre, commun à toute substance concernée par cette étude, permettra de mettre en lumière aussi bien la persistance dans les milieux aqueux et sédimentaire.

On se basera sur les données caractérisant les substances PBT en terme de persistance (cf. Tableau 6) ; à savoir :

$\tau_{1/2} > 60$ j (eau de mer) et $\tau_{1/2} > 180$ j (sédiments marins)
--

N.B : Il est admis que, pour une demi-vie inférieure à 12 heures, le processus d'hydrolyse est plus important que celui de l'accumulation dans les organismes aquatiques.

c. Mobilité (comportement dans l'écosystème)

Biodisponibilité / KOC :

En réalité, la valeur de la concentration « inerte » d'un polluant dans un biotope ne présente pas une grande signification (en écologie et *a fortiori* en écotoxicologie) sur le fait qu'elle pourra être absorbée par tel ou tel organisme constituant la biocénose et quelle proportion de cette dernière sera disponible pour les êtres vivants.

C'est dans cette mesure que la **biodisponibilité** d'une substance en général et d'un polluant en particulier est prise en compte pour qualifier la fraction de la quantité totale de ce dernier qui est absorbable par des producteurs (végétaux), consommateurs (animaux) et/ou décomposeurs (champignons, bactéries). Cela caractérise donc la quantité qui peut être transférée, stockée et métabolisée par une substance **(5)**.

Il est donc nécessaire de se baser sur le **coefficient de partage carbone organique – eau (ou KOC)**, qui détermine la capacité qu'a un produit à se fixer sur les particules organiques d'un sol ou sédiment, ou au contraire à être relargué dans l'environnement.

Il est d'usage de prendre les ordres de grandeur suivants **(9)** :

Tableau 8 : Comportement de la substance dans le milieu marin en fonction des valeurs du KOC

Valeur du KOC	Description
< 1000 (ou log KOC<3)	Produit se retrouvant facilement dans l'eau (si KOC=1, menace pour l'écosystème aquatique)
> 1000	Bonne capacité de fixation sur le sédiment (si KOC=0, produit non inquiétant sur ce critère)

Hydrosolubilité (S) :

C'est un indicateur de la tendance d'un produit à être entraîné sous forme soluble par les eaux. Les ordres de grandeur suivants peuvent être considérés pour témoigner du comportement de la substance dans le milieu marin (9) :

<p>S < 10 mg/L : Substance peu soluble 10 < S < 200 mg/L : Substance moyennement soluble S > 200 mg/L : Substance soluble</p>

N.B. : C'est aussi un paramètre intéressant dans la mesure où il sera associé par la suite à d'autres catégories (comme la biodégradation, la bioaccumulation ou encore la toxicité aquatique), pour caractériser un impact plus ou moins important sur un compartiment bien précis : les sédiments marins ou l'eau de mer... selon les valeurs obtenues

d. Toxicité aquatique

C'est un des critères majoritaires définissant la nocivité d'une substance sur l'environnement marin.

Il existe 2 types de toxicité :

- une **toxicité aigüe** (effet direct et immédiat sur la chaîne alimentaire),
- et une **toxicité chronique** (effet à long terme, qui concernent plus spécialement les substances bioaccumulables et/ou persistantes, donc de faible biodégradabilité).

Pour quantifier leur impact, il est admis de se baser respectivement sur les données en :

- effets létaux LC₅₀, effets toxiques EC₅₀ ou en effets d'inhibition IC₅₀
- concentrations sans effet observé (ou NOEC), par rapport à des effets liés à la survie, la reproduction ou la croissance des espèces considérées (9).

<p>Ces données sont fournies par le classement du GESAMP et illustrées à l'Annexe B ; les toxicités aquatiques aigüe et chronique étant respectivement évaluées par les mesures de la LC₅₀ (96h) et de la NOEC. Elles feront l'objet d'une cotation différente pour rendre la nouvelle classification la plus exploitable possible</p>

e. Comportement et effets sur l'homme

L'impact sur la santé humaine est une catégorie d'impact à ne pas négliger si l'on souhaite évaluer l'impact d'une pollution quelconque sur le milieu marin, surtout pour une perspective de temps assez grande (ndlr, 500 ans).

Les effets, certes majoritairement indirects d'une telle consommation sont variés car ils peuvent aussi bien toucher les travailleurs en contact direct avec le navire (manutentionnaires portuaires, dockers, marins, personnel navigant) que les consommateurs de poissons et produits de la mer qui sont exposés à cause de la bioaccumulation le long de la chaîne trophique.

Voici donc les critères à prendre en considération si l'on souhaite évaluer une pollution sur cette catégorie d'impact :

Volatilité :

Tout comme le critère d'hydrosolubilité, la volatilité est un indicateur de la répartition d'une substance dans un biote, l'air. C'est donc un des critères de base pour évaluer la diffusion dans l'atmosphère d'un produit plus ou moins dangereux. Elle est déterminée par la pression de vapeur (notée P_{vap}) à 20°C, dont les ordres de grandeur sont les suivants **(10)** :

$P_{vap} < 5 \text{ Pa}$: Substance très peu volatile
$5 < P_{vap} < 1000 \text{ mg/L}$: Substance modérément volatile
$1000 < P_{vap} < 5000 \text{ Pa}$: Substance volatile
$P_{vap} > 5000 \text{ Pa}$: Substance très volatile

Effets insidieux :

Certains produits peuvent avoir des effets insidieux : cancérigènes, tératogènes (malformations du fœtus), mutagènes ou autres...dûs à leur toxicologie propre. Ils peuvent tout aussi bien être des perturbateurs endocriniens, et provoquer des modifications hormonales chez l'homme et l'animal. Il est donc important de prendre en compte ce critère qui témoigne du risque potentiel d'une substance pour l'homme.

Toxicité (mammifères) :

Tout comme le critère de toxicité aquatique, on peut évaluer le niveau de toxicité d'un produit sur les mammifères, pour des contaminations par voie orale, cutanée et inhalatoire. La voie orale de contamination, trop rarement constatée, sera négligée au profit des deux autres voies, pour lesquelles on utilisera les données de LD50 (Lethal Dose) et de LC50 (Lethal Concentration), qui se réfèrent respectivement à des mesures d'empoisonnement à court terme et à des concentrations aériennes tuant 50% de la population d'une espèce.

Ces données sont indiquées dans le classement MARPOL et référencées à l'Annexe B ; elles feront l'objet d'une révision, comme pour tous les autres critères, dans le paragraphe suivant.

N.B : De la même façon, le critère « Irritation et corrosion de la peau et de l'œil » est à considérer s'il manque des données concernant la toxicité ou les effets insidieux. Ils sont en effet à juste titre évoqués comme critères adoptés par le GESAMP pour la définition du profil de danger d'une substance.

II.4. Cotation des critères

Pour information, nous présenterons les principaux éléments de cette classification touchant aux effets potentiels sur l'environnement marin, selon une échelle de cotation croissante, allant de 0 à 4, pour éviter une hiérarchisation ultérieure trop fournie et donc inexploitable.

Il faut également noter une certaine ressemblance dans la typologie de ce tableau de cotation avec la Figure 8 de l'Annexe B, illustrant la classification MARPOL ; ressemblance voulue afin que ce tableau reste exploitable et compréhensible de tous.

De plus, certains éco-indicateurs sont associés à des phrases de risque si les données correspondantes manquent pour une substance quelconque (comme indiquées dans la légende) ; ces phrases de risque définissant les effets dudit produit (produit chimique uniquement) sur les milieux environnants.

Ces phrases de risque, figurant sur l'emballage des produits dangereux, sont répertoriées à l'Annexe C.

Voici donc le tableau de cotation des éco-indicateurs proposé, qui intègre les valeurs de seuil proposées par les instances européennes :

Tableau 9 : Tableau des cotations des critères de classement retenus (de 0 à 4)

Compartiment	ENVIRONNEMENT MARIN							SANTÉ HUMAINE					
Colonne	A-BIOACCUMULATION		B-BIODEGRADATION		C-MOBILITE		D-TOXICITE AQUATIQUE		E-COMPORTEMENT et EFFETS SUR L'HOMME			F-TOXICITE (mammifères)	
Côte	A1-log P	A2-FBC	B1-R/NR	B2-Temps de demi-vie	C1-KOC	C2-Hydrosolubilité (mg/L)	D1-Aigue EC/LC/IC ₅₀ (mg/L)	D2-Chronique NOEC (mg/L)	E1-Pression de vapeur à 20°C (Pa)	E2-Irritation/corrosion de la peau/œil	E3-Effets insidieux	F1-Voie cutanée LD50 (mg/kg)	F2-Inhalation LC50 (mg/L)
0	<3	Non mesurable ou <100	R: Biodégradation rapide	< 60j (eau de mer) ou < 180j (sed)	> 1000 (fixation sédiment)	< 10 (peu soluble)	> 1000	> 1	<5	Non irritant	aucuns	> 2000	> 20 (négligeable)
1	3 à < 4	100 à < 500	NR: Absence de biodégradation rapide	> 60j (eau de mer) ou > 180j (sed)	< 1000 (menace écosystème aquatique)	10-200	100-1000	0,1-1	5-1000 (moyen)	Légèrement irritant	possibles	1000-2000	10-20 (légère)
2	4 à < 5	500 à < 4000		> 60j (eau de mer) et > 180j (sed)		> 200	1-100	0,01-0,1	1000-5000	Irritant (c)	CMTRNIOPA*	200-1000 (e)	2-10 (moyenne) (f)
3	>5	> 4000					0,1-1 (a)	0,001-0,01	>5000 (très)	Fortement irritant (d)		50-200	0,5-2 (assez toxique) (g)
4							<0,1 (b)	<0,001				< 50	< 0,5 (toxique) (h)

Légende :

(a) Colonne D1 – En cas de manque de données concernant cette côte, les phrases de risque R51, R52, R53 ou R58 peuvent remplacer la valeur de toxicité fournie.

(b) Colonne D1 – En cas de manque de données concernant cette côte, la phrase de risque R50 peut remplacer la valeur de toxicité fournie.

(c) Colonne E2 – En cas de manque de données concernant cette côte, les phrases de risque R21, R24, R34, R36 ou R38 peuvent remplacer la description de l'irritabilité/corrosion de l'œil ou de la peau associée.

(d) Colonne E3 – En cas de manque de données concernant cette côte, les phrases de risque R27, R35, R41 ou R66 peuvent remplacer la valeur de toxicité cutanée fournie.

(e) Colonne F1 – En cas de manque de données concernant cette côte, la phrase de risque R43 peut remplacer la valeur de toxicité par inhalation fournie.

(f) Colonne F2 – En cas de manque de données concernant cette côte, les phrases de risque R42 ou R37 peuvent remplacer la valeur de toxicité par inhalation fournie.

(g) Colonne F2 – En cas de manque de données concernant cette côte, les phrases de risque R20, R23, R29, R31 ou R67 peuvent remplacer la valeur de toxicité par inhalation fournie.

(h) Colonne F2 – En cas de manque de données concernant cette côte, les phrases de risque R26 ou R49 peuvent remplacer la valeur de toxicité par inhalation fournie.

(*) Colonne E3 – Cette côte concerne tous les produits avérés cancérigènes (C), mutagènes (M), tératogènes (T), reprotoxiques (R), neurotoxiques (N), immunotoxiques (I), œstro-mimétiques (O), provoquant des atteintes pulmonaires (P) ou d'autres symptômes (A). Cette description concerne également les désorganiseurs endocriniens avérés.

En cas de manque de données concernant cette côte, les phrases de risque R40, R45, R46, R48 ou R49 peuvent remplacer la description d'effets insidieux associée.

III. Conclusion

Les critères retenus (ou éco-indicateurs) sont clairement reliés au comportement spécifique d'une substance chimique, car c'est la nature d'un produit qui va conditionner son impact sur un environnement, et non la nature du biote dans lequel la contamination se produit.

Certains de ces critères (Kow, P_{vap}, hydrosolubilité) sont des caractéristiques physico-chimiques de base, qui donnent des données primaires permettant d'appréhender le comportement de celle-ci dans l'environnement. D'autres (BCF, KOC, t_{1/2} ...) sont des données secondaires qui quantifient la distribution et la persistance de la substance en fonction du temps dans les différents récepteurs environnementaux. D'autres encore sont considérés pour la valeur toxicologique qu'ils apportent, et quantifient ainsi la nocivité d'un produit quelconque sur un milieu d'émission.

Les critères dits environnementaux (ex. densité, température, granulométrie du sédiment, profondeur, viscosité...) ne seront pas retenus comme éco-indicateurs de l'impact d'une substance, car ils symbolisent un milieu spécifique, et ne sont pas généralisables à tout le milieu marin, ni spécifiques à une substance donnée, comme le sont les critères précédemment listés.

Par ailleurs, ce tableau final est un document de pré-évaluation qui sera à vérifier, confirmer et valider à partir des méthodologies proposées par la DCE pour évaluer le degré d'impact d'un polluant. Il existe en effet certainement d'autres approches de l'évaluation de l'impact (au niveau écotoxicologique) d'un polluant .

Remarques :

* Il faut noter la concordance de ces critères retenus avec quelques critères pris en compte dans Simple Box, qui est le module de caractérisation des processus d'émission d'une pollution dans une zone géographique précise, utilisé par l'ENSAM. Il serait donc logique dans cette étude de trouver communément les mêmes substances les plus impactantes sur l'environnement considéré que celles qui sont évaluées par les logiciels de calcul d'impact (utilisés par l'ENSAM).

* Il faut également noter le manque de données concernant la quantité des substances mises en jeu, critère pourtant prioritaire si l'on souhaite connaître l'impact d'une substance émise dans un milieu donné ; les critères de classement et de hiérarchisation de leur impact seront donc QUALITATIFS.

* De même, par manque de critères pouvant qualifier la pollution biologique, cette dernière ne pourra être prise en compte au niveau de l'éco-indicateur final. Pourtant, au cours du cycle de vie d'un navire, certaines de ces activités tendent à émettre un tel type de pollution, comme le dragage ou encore le problème des ballasts.

Cette problématique sera précisée aux Annexes D et E, et est à considérer à l'avenir dans le cadre du projet CONVENAV, dans la mesure où elle conditionne un des dangers majeurs pour le domaine marin.

3^{ème} PARTIE : Eco-indicateurs et hiérarchisation des substances pertinentes pour l'environnement marin

La définition et la cotation des éco-indicateurs effectuée, l'étape suivante est la finalisation de la hiérarchisation des substances pertinentes pour le milieu marin (cf. Tableau 9).

Il s'agit d'associer à la valeur des côtes de ces éco-indicateurs une valeur d'impact, ainsi qu'un compartiment d'impact. Il sera ainsi possible de connaître, parmi toutes les substances listées, celles qui sont les plus impactantes au niveau du milieu marin (sédiments et eau de mer) et de la santé humaine ...et par conséquent au niveau d'une zone géographique donnée.

I. Hiérarchisation des données

I.1. Données relatives aux substances pertinentes

a. Origine de ces données

Considérant les compartiments impactés (le milieu marin et la santé humaine, ndlr), il est logique de trouver respectivement les données écotoxicologiques et toxicologiques relatives aux substances pertinentes pour ce biote.

(1) Une des sources bibliographiques de ces données se trouve dans les fiches toxicologiques de l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles). Ces fiches constituent une synthèse de l'information, à jour au 4^{ème} trimestre 2008, disponible concernant une substance (ou groupe de substances) et ces dangers et impacts avérés sur l'homme et les autres êtres vivants.

(2) Une autre source bibliographique intéressante concerne les fiches toxicologiques et environnementales des substances chimiques de l'INERIS (Institut National de l'Environnement industriel et des RISques). Ces fiches, à la différence de celles de l'INRS, s'intéressent davantage à l'aspect « risque et impact sur l'écosystème » concerné par une exposition ponctuelle, chronique et/ou accidentelle à une substance chimique

Au niveau de l'INERIS, les informations disponibles sur une substance concernent notamment sa volatilité, sa solubilité, sa toxicité envers les mammifères et l'homme, ses effets insidieux et les phrases de risque associées ; en bref, tous les paramètres physico-chimiques décrivant son comportement dans l'écosystème et sa nocivité pour l'homme.

Alors qu'au niveau de l'INRS, elles concernent sa bioaccumulation, sa biodégradabilité, sa toxicité envers le milieu aquatique, et son comportement dans le milieu.

N.B. : Certaines fiches peuvent comporter des données qui ne sont plus à jour, notamment les rubriques étiquetage et données réglementaires, actuellement mises en vigueur par le REACH (Registration, Evaluation and Autorisation of CHemicals) depuis juin 2007.

Il appartiendra donc de vérifier la réglementation en vigueur, qui d'ici 2010, prendra le nom de GHS (Global Harmonized System), obligatoire pour l'étiquetage et la classification des substances, en complément du REACH, et mettra en place une fixation de seuils à ajuster

dans l'avenir pour tout ce qui concerne la toxicité et l'écotoxicité ; seuils qui seront harmonisés au niveau international et non européens (comme l'est actuellement le REACH).

(3) En cas de manque de données (en effet, seules quelques centaines de substances sont "fichées"), l'HSDB (Hazardous Substances Data Bank) s'avère très intéressant de part l'exhaustivité proposée au niveau des critères caractérisant une substance donnée.

Pour information, cette base de données décrit de manière exhaustive une substance, selon tous les paramètres connus à ce jour ; comme son métabolisme, ses propriétés physico-chimiques, sa pharmacologie, sa toxicité, les réglementations et standard environnementaux qui la concernent, ses données de sécurité, ses méthodes d'analyse, son utilisation courante ou encore les traitements médicaux d'urgence à adopter en cas d'exposition (**11**).

b. Résultats

Grâce à ces bases de données (éco)toxicologiques, il est possible de trouver, pour chaque substance préalablement listée (cf. Tableau 3), les valeurs associées à chaque critère de classement retenu pour le projet CONVENAV.

Ensuite, à partir de la cotation des valeurs de ces critères (définie dans le Tableau 9), il est possible de quantifier chaque substance selon la côte attribuée à chacun des éco-indicateurs.

Le tableau ci-après détaille les cotations des critères propres à chaque substance pertinente pour le milieu marin :

Remarques :

* Les chiffres en rouge dans le tableau correspondent à des valeurs de côte associées à des phrases de risque décrivant les substances concernées, du fait du manque de données écotox correspondantes (cf. légende du Tableau 9).

Ces cotations auront donc une moins grande influence sur la hiérarchisation d'une substance par-rapport à une autre substance dont la cotation proviendrait de données écotox.

* Il faut également noter la non-prise en compte des substances *Particulates < 2.5µm* et *Particulates > 2.5µm and < 10µm* (cf. Tableau 10), qui correspondent à des particules en suspension non quantifiables par ces critères de classement.

Il sera admis théoriquement que ces particules en suspension, de tailles proches du micron, sont des cas particuliers : ils sont jugés très impactants pour la santé humaine et l'environnement car ils peuvent véhiculer des substances toxiques voire cancérigènes sur de grandes distances (métaux lourds, dioxines, HAP...) et pénétrer par les voies respiratoires et dans le sang par le biais des toxiques qu'ils véhiculent.

* Pour évaluer le bon choix des critères de classement, il faut savoir que sur les 58 substances évaluées, 66% des données ont été trouvées pour le critère *Bioaccumulation*, contre 53% pour la *Biodégradabilité*, 79% pour la *Toxicité aquatique*, 71% pour les *Effets insidieux* ou encore 83% pour le critère *Toxicité (mammifères)* ; soit en moyenne, près des **2/3 des données trouvées**.

Tableau 10 : Cotation des différents critères retenus en fonction de la substance étudiée

Substance	CAS N°	Bioaccumulation		Biodégradation		Mobilité		Toxicité aquatique		Comportements et effets sur l'homme				
		log P	FBC	R/NR	t1/2	KOC	Solubilité	EC/LC/IC ₅₀	NOEC	Pvap	Peau/œil	Effets insidieux	Voie cutanée LD50	Inhalation LC50
Acenaphthene	83-32-9	1	1-2	-	0	0	0	3	1-2	0	-	-	0	-
Acenaphthylene	208-96-8	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
Acrolein	107-02-8	0	0	-	0	1	2	2-3	très toxique	3	2	0	1	4
Ammonia	7664-41-7	-	-	-	-	-	2	2-3	-	3	2	-	-	1-2
Antimony	7440-36-0	-	-	-	-	NC	0	1	0	NC	-	-	3	-
Arsenic/Arsenic, ion	7440-38-2	-	1-2	-	2	NC	0	3-4	1-3	NC	-	2	3-4	4
Barite	13462-86-7	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	2	2	-
Barium	7440-39-3	-	-	-	-	NC	-	1	-	NC	-	-	-	-
Benzene	71-43-2	0	0	0	0	1	2	1	0-1	3	2	2	0	3-4
Benzene, 1,2-dichloro-	95-50-1	1	1-3	-	1	0	-	1-2	-	1	1-2	0	2	2
Benzene, chloro-	108-90-7	0	0	0	0	1	2	1-2	0-1	2	-	non classé	0	3-4
Benzene, ethyl-	100-41-4	1	0	1	-	1	1	2	0	1	-	-	0	2
Benzene, hexachloro-	118-74-1	3	1-3	-	-	0-1	0	2-4	2-3	0	-	1	0	-
Benzene, pentachloro-	608-93-5	3	2-3	1	1	0	0	2-3	2	0	-	-	-	-
Benzo(a)pyrene	50-32-8	3	1-3	1	2	0	0	4	-	0	1-2	1	3-4	1
Beryllium	7440-41-7	-	-	-	-	NC	0	-	-	NC	2	1	-	4
Butadiene	106-99-0	0	0	-	-	1	2	-	-	3	-	1	-	0
Cadmium	7440-43-9	-	1-2	-	1	-	0	2	2-3	NC	-	1	-	4
Cadmium, ion	/	-	-	-	-	-	-	3-4	2-3	-	-	-	-	-
Chloroform	67-66-3	0	0	1	1	1	2	1	0	3	2	1	-	2-3
Chromium	7440-47-3	-	-	-	1	NC	0	3-4	1-3	NC	-	-	-	2-3
Chromium VI	/	-	0-3	-	-	-	-	-	1-2	NC	2-3	2	0-1	4
Chromium, ion	/	-	1-3	-	-	-	-	-	0-2	NC	-	0	-	-
Cobalt	7440-48-4	-	0	-	-	NC	0	1	0	NC	1-2	-	-	0-2
Copper/Copper, ion	7440-50-8	-	-	-	2	NC	-	2-3	0	NC	-	0	1	1
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	/	3	3	-	2	0	0	4	-	0	-	2	4	-
Ethane, 1,2-dichloro-	107-06-2	0	0	-	-	1	2	0	0	3	2	1	2	0-2
Ethene	74-85-1	0	0	-	-	1	1	-	-	3	1-2	0	1	-
Ethene, chloro-	75-01-4	0	0	-	0-1	1	2	-	-	3	-	2	-	-
Ethene, tetrachloro-	127-18-4	0	0	1	1	-	-	0	0	2	-	1	-	-
Ethylene oxide	75-21-8	0	-	-	-	0	miscible	-	-	3	2	1	-	3
Formaldehyde	50-00-0	0	-	-	-	1	-	1-2	1	3	2	1	-	3-4
Hydrogen chloride	7647-01-0	-	0	-	-	-	-	1	-	3	2	non classé	1	3
Hydrogen fluoride	7664-39-3	-	-	-	-	-	2	-	-	3	3	0	-	4
Hydrogen sulfide	7783-06-4	-	0	-	-	-	2	3-4	-	3	-	-	-	4
Lead	7439-92-1	-	0	-	1	NC	0	3-4	1-2	NC	-	1	-	2-3
Mercury	7439-97-6	0	1-3	-	2	-	0	3-4	2-3	0	-	non classé	-	3
Methane, bromo-, Halon 1001	74-83-9	0	0	1	-	1	2	3-4	-	3	2	-	-	3
Methane, dichloro-, HCC-30	75-09-2	0	0	1	1	1	2	0	0	3	-	1	-	4
Methane, tetrachloro-, CFC-10	56-23-5	0	0	1	0	1	2	0-1	1-2	3	-	1	0	-
Molybdenum	7439-98-7	-	-	-	-	-	0	-	-	NC	1-2	-	-	-
m-Xylene / 1,3-Diméthylbenzène	108-38-3	1	-	1	-	1	1	2	1	1	2	1	0	2-3
Nickel/Nickel, ion	7440-02-0	-	0-2	-	1	NC	0	-	2	NC	1-2	2	-	-
Nitrogen oxides	11104-93-1	-	-	-	-	NC	1	-	-	3	2	2	-	4
o-Xylene / 1,2-Diméthylbenzène	95-47-6	1	-	1	-	1	1	2	0-1	1	2	1	0	2-3
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons (carcinogenic)	/	-	depends	depends	-	0	0	4	3-4	depends	depends	2	depends	depends
Phenol	108-95-2	0	0	-	0	1	2	1-2	0-1	1	2	0	4	3
Phenol, pentachloro-	87-86-5	3	1-3	-	0	0-1	2	1-2	0-1	0	2	1	-	4
Propylene oxide	75-56-9	0	-	-	0	1	2	0	-	3	1-2	1	3	-
Selenium	7782-49-2	-	1-3	-	-	NC	0	2-3	1	0	-	-	0	3
Sodium dichromate	10588-01-9	-	-	-	-	NC	2	3-4	1-2	NC	2	1	-	3-4
Styrene	100-42-5	1	-	0-1	-	1	2	2	-	1	2	-	4	3-4
Sulfur dioxide	7446-09-5	-	-	-	-	-	2	3	-	2	2	0	-	3
Thallium	7440-28-0	-	-	1	-	-	0	-	-	NC	-	-	4	-
Tin/Tin, ion	7440-31-5	2	-	-	-	-	0	-	-	NC	-	0	0-1	-
Toluene / Méthylbenzène	108-88-3	0	0	0	-	1	2	2	0-1	2	2	-	0	3-4
Tributyltin compounds	/	-	2-3	0	1	-	2	3-4	-	-	1-2	2	-	-
Vanadium/Vanadium, ion	7440-62-2	-	depends	-	-	0 ou 1 (pH)	0	1-3	-	NC	1-2	-	3-4	-
Zinc/Zinc, ion	7440-66-6	-	0	0	2	NC	0	2-3	1-2	NC	2	0	3-4	2

* Ne sera pas détaillé dans cette étude le tableau de valeurs concernant chaque critère de classement en fonction de la substance étudiée, mais uniquement les valeurs cotées à partir du Tableau 9, par souci d'exploitabilité.

I.2. Choix des normes de classement

Une fois les cotations des critères trouvées pour chaque substance évaluée, il s'agit de hiérarchiser cette dernière en fonction de ces critères cotés.

La Figure X illustre le classement proposé, selon la catégorie d'impact touchée par l'émission d'une substance donnée :

- Ainsi, les *lignes en bleu* représentent les cas de figure d'une **substance soluble et impactante sur l'eau de mer**, dont les caractéristiques dépendent de ses niveaux de toxicité (à plus ou moins long terme), de bioaccumulation et de biodégradabilité.
- Les *lignes en beige* représentent les cas de figure d'une **substance insoluble** (cotation de la colonne C2 : 0) **et impactante sur les sédiments marins** du fait de son affinité avec la phase particulaire et de son niveau de toxicité.
- Les *lignes en rouge* représentent les cas de figure d'une **substance (semi-)volatile** (cf. cotation de la colonne E1) **et impactante sur la santé humaine** du fait du caractère nocif et de ces niveaux de nocivité, de toxicité et d'effets insidieux envers les mammifères et, en particulier, l'homme.
- Enfin, la dernière *ligne* concerne toutes les **substances ne répondant pas aux descriptions des lignes précédentes** ; ces substances seront considérées comme "faiblement impactantes", et non pas "non impactantes" car ces substances ont été listées (cf. Tableau 3) comme étant pertinentes pour le biote considéré dans le projet CONVENAV.

Le tableau suivant représente ainsi le même classement, mais cette fois-hiérarchisé selon la valeur d'impact (+++, ++, +, NO) associée.

Le choix d'une telle méthodologie de classement par ordre décroissant d'impact est en effet logique dans le cadre de notre étude, dans la mesure où il est nécessaire d'établir les substances mises en jeu dans l'activité des navires qui sont le plus impactantes pour l'environnement marin (et, à défaut, la santé humaine).

Remarques :

* Le choix de si peu de critères de classement apparaît évident à la lecture de ce tableau : il ne suffit au minimum que d'une colonne cotée et au maximum de quatre d'entre elles pour déterminer l'impact d'une substance sur une catégorie d'impact. Aussi, pour une substance donnée, le manque de données/cotations concernant quelques critères de classement n'est pas dommageable.

* Pour la santé humaine, il faut noter que le cas d'une substance à impact moyen (soit une valeur d'impact notée "+ ") n'est pas mentionné ; cela ne concerne en effet que quelques métaux lourds pour lesquels des fiches de spéciation de métaux permettent de définir au mieux leurs impacts propres (ex. chrome, cobalt).

Tableau 11 : Classement par catégorie d'impact d'une substance pertinente pour le milieu marin (+++ : très fort impact, ++ : fort impact, + : impact moyen, NO : impact faible voire négligeable)

Norme	A	B	C1	C2	D1	D2	E1	E2	E3	E4	VALEUR D'IMPACT	CATEGORIE D'IMPACT		
	Bioaccumulation	Biodegradation	KOC	Solubilité	Toxicité aigue	Toxicité chronique	Pvap	Peau-oeil	Effets insidieux	Toxicité humaine		Sédiments marins	Eau de mer	Santé humaine
1					4						+++			
2	≥2				3						+++			
		≥1			3						+++			
3					2-3						+ / ++			
4	≥2				2	non 0					++			
		≥1			2	non 0					++			
5						1-2					+			
6	≥2				1	non 0					+			
		≥1			1	non 0					+			
7	≥2		1	≥1							+ / ++			
		≥1	1	≥1							+ / ++			
8						≥2					++			
9	≥2	≥1				≥1					+			
10	≥2		0	0	≥3						+++			
		≥1	0	0	≥3						+++			
11	≥2		0	0	2						++			
		≥1	0	0	2						++			
12	≥2		0	0	1						+			
		≥1	0	0	1						+			
13							≥1	3	OU 2	OU ≥3	+++			*
14							≥1	2	OU 1	OU 2	++			*
15	≥2	≥1						3	OU 2	OU ≥3	+++			*
16	Tout produit ne répondant pas aux critères évoqués dans les normes précédentes										NO			

Les normes 1 à 9 représentent les cas des substances impactantes sur l'environnement aquatique

Les normes 10 à 12 représentent les cas des substances impactantes sur les sédiments marins

Les normes 13 à 15 représentent les cas des substances impactantes sur la santé humaine

Tableau 12 : Classement par valeur d'impact d'une substance pertinente pour le milieu aquatique (légende identique)

Norme	A	B	C1	C2	D1	D2	E1	E2	E3	E4	VALEUR D'IMPACT	CATEGORIE D'IMPACT		
	Bioaccumulation	Biodegradation	KOC	Solubilité	Toxicité aigue	Toxicité chronique	Pvap	Peau-oeil	Effets insidieux	Toxicité humaine		Sédiments marins	Eau de mer	Santé humaine
1					4						+++			
2							≥1	3	OU 2	OU ≥3				*
3	≥2		0	0	≥3									
		≥1	0	0	≥3									
4	≥2				3									
		≥1			3									
5	≥2	≥1						3	OU 2	OU ≥3				
6					3						++			
7						≥2								
8							≥1	2	OU 1	OU 2				
9	≥2		0	0	2									
		≥1	0	0	2									
10	≥2				2	non 0								
		≥1			2	non 0								
11					2						+ / ++			
12	≥2		1	≥1										
		≥1	1	≥1										
13						1-2					+			
14	≥2		0	0	1									
		≥1	0	0	1									
15	≥2				1	non 0								
		≥1			1	non 0								
16	≥2	≥1				≥1								
17	Tout produit ne répondant pas aux critères évoqués dans les normes précédentes										NO			

I.3. Tableau final

Pour rappel, la méthode employée pour déterminer le niveau et la catégorie d'impact d'une substance émise par l'activité d'un navire est résumée ci-dessous :

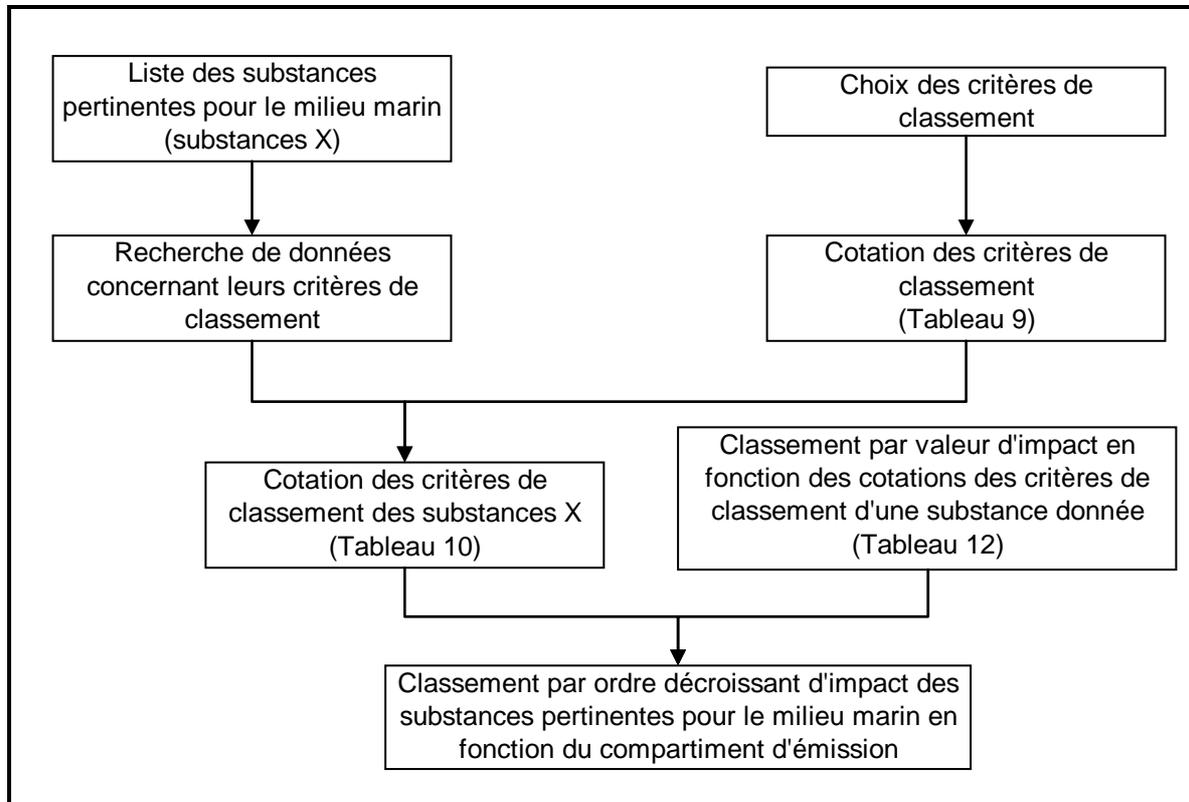


Figure 6 : Méthodologie effectuée pour la hiérarchisation des substances pertinentes pour le milieu marin

Ainsi, la mise en commun des *Tableaux 10* et *12* de cette étude permet d'établir un tableau général de hiérarchisation des substances pertinentes pour l'environnement marin, selon la catégorie d'impact et la valeur de celui-ci ; présenté ci-après au *Tableau 13*.

Remarque :

* Pour rappel, les substances *Particulates < 2.5µm* et *Particulates > 2.5µm and < 10µm*, non prises en compte dans le *Tableau 10*, ne figurent pas dans ledit tableau de hiérarchisation. Elles seront toutefois jugées très impactantes pour la santé humaine et l'environnement (cf. remarque du paragraphe I.1.b de ce chapitre).

Tableau 13 : Tableau de hiérarchisation des substances émises par l'activité des navires et pertinentes pour le milieu marin

Catégorie d'impact	EAU DE MER	SEDIMENTS MARINS	SANTE HUMAINE
Très fort impact	Benzo(a)pyrene Arsenic/Arsenic ion Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin Hydrogen sulfide PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons (carcinogenic) Chromium VI Lead Mercury Benzene, hexachloro- Tributyltin compounds	Arsenic Benzo(a)pyrene Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin Lead Mercury PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons (carcinogenic) Zinc Benzene, hexachloro- Benzene, pentachloro-	Benzene Benzene, chloro- Benzo(a)pyrene Chromium VI Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin Ethene, chloro- Formaldehyde Hydrogen chloride Hydrogen fluoride Hydrogen sulfide Nitrogen oxides Phenol Phenol, pentachloro- Styrene Toluene / Méthylbenzène Tributyltin compounds Arsenic/Arsenic ion Mercury Cadmium/Cadmium ion PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons (carcinogenic)
Fort impact	Acrolein Ammonia Chromium/Chromium ion Sulfur dioxide Vanadium/Vanadium ion Sodium dichromate Selenium Nickel/Nickel ion Methane, bromo-, Halon 1001 Cadmium/Cadmium ion Benzene, pentachloro- m-Xylene / 1,3-Diméthylbenzène Copper/Copper ion	Cadmium Nickel Chromium Copper	Acrolein Ammonia Benzene, ethyl- Butadiene Chloroform Ethane, 1,2-dichloro- Ethene Ethene, tetrachloro- Methane, bromo-, Halon 1001 Methane, dichloro-, HCC-30 Benzene, hexachloro- Benzene, pentachloro- Chloroform Ethylene oxide Lead m-Xylene / 1,3-Diméthylbenzène Nickel/Nickel ion Selenium Sodium dichromate Thallium Vanadium/Vanadium ion Antimony Propylene oxide
Impact moyen	Acenaphthene Zinc/ion Methane, dichloro-, HCC-30 Formaldehyde Ethene, tetrachloro- Ethene, chloro- Cobalt Benzene Benzene, 1,2-dichloro- Benzene, chloro- Benzene, ethyl- Antimony Toluene / Méthylbenzène Styrene Phenol Phenol, pentachloro- o-Xylene / 1,2-Diméthylbenzène Chloroform Methane, tetrachloro-, CFC-10	Vanadium Thallium Selenium Tin	Acenaphthene Benzene, 1,2-dichloro- Methane, tetrachloro-, CFC-10 o-Xylene / 1,2-Diméthylbenzène Zinc/ion Chromium ion
Impact faible voire négligeable	Hydrogen chloride Hydrogen fluoride Nitrogen oxides Ethylene oxide Ethane, 1,2-dichloro- Ethene Butadiene Propylene oxide	Acenaphthene Acrolein Ammonia Benzene Benzene, 1,2-dichloro- Benzene, chloro- Benzene, ethyl- Butadiene Chloroform Ethane, 1,2-dichloro- Ethene Ethene, chloro- Ethene, tetrachloro- Ethylene oxide Formaldehyde Hydrogen chloride Hydrogen fluoride Hydrogen sulfide Methane, bromo-, Halon 1001 Methane, dichloro-, HCC-30 Methane, tetrachloro-, CFC-10 m-Xylene / 1,3-Diméthylbenzène Nitrogen oxides o-Xylene / 1,2-Diméthylbenzène Phenol Phenol, pentachloro- Propylene oxide Sodium dichromate Styrene Sulfur dioxide Toluene / Méthylbenzène	Chromium Cobalt
No Data	Acenaphthylene Barite Barium Beryllium Molybdenum Thallium Tin/Tin ion	Acenaphthylene Antimony Barite Barium Beryllium Chromium VI/Chromium ion Cobalt Molybdenum Tributyltin compounds	Acenaphthylene Beryllium Barite Barium Copper/Copper ion Molybdenum Tin/Tin ion

II. Conclusion

La connaissance de l'origine de l'impact d'un navire sur l'écosystème et des conséquences liées à son cycle de vie est nécessaire pour envisager une réduction de la pollution (et indirectement, de l'exposition) mise en jeu.

C'est dans ce cadre que l'IFREMER a établi, de manière hiérarchique, les substances (chimiques, principalement) majoritaires qui impactent sur les compartiments aquatiques que sont les sédiments marins et l'eau de mer. Ce sont en résumé les métaux lourds les plus toxiques (arsenic, plomb, mercure...), les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques, ndlr) et les dioxines qui sont mises en valeur qualitativement par cette étude.

A titre de comparaison, parmi les substances ainsi listées, certaines d'entre elles appartiennent au groupe des 33 substances prioritaires établies par la DCE pour lutter contre les rejets de substances dangereuses contaminant l'eau et les sols. C'est le cas notamment du cadmium, du mercure, des chloroalcanes, de l'hexachlorobenzène, du pentachlorobenzène ou encore des composés du tributylétain ... classées comme "substances prioritaires dangereuses" par la Directive Européenne du 23 octobre 2000 concernant les pollutions aquatiques d'origine anthropique.

L'approche par catégorie d'impact met en évidence l'importance des problèmes liés à l'activité des navires. En effet, quelque soit la source d'émission de la pollution (cf. Annexe A), les effets de cette dernière seront répartis au niveau du sédiment, de la colonne d'eau et de l'atmosphère. Aussi ces substances, de nature très variable, peuvent perturber le milieu marin de façon plus ou moins importante, comme le démontre le Tableau 13.

Ce tableau sera par la suite réutilisé dans la méthodologie d'évaluation de l'éco-indicateur (résumée à la Figure 7), pour qualifier le potentiel de toxicité d'une substance, côté sous la forme :

Tableau 14 : Cotation du potentiel de toxicité d'une substance (attribuées à partir des données du Tableau 13)

Impact de la substance	Symbolique	Cotation
Aucune donnée	ND	0
Faible voire négligeable	NO	1
Moyen	+	2
Fort	++	3
Très fort	+++	4

4^{ème} PARTIE : Masses d'eau et impact d'un navire sur le milieu marin

La connaissance du degré d'impact des polluants émis par un navire n'est pas suffisante pour déterminer l'impact qu'aura un navire sur l'écosystème marin tout au long de son cycle de vie.

Des données concernant la masse de polluants mise en jeu par le navire sont également indispensables, car elles pondèrent ce degré d'impact : en effet, une substance toxique aura un effet différent si elle est rejetée dans le milieu en plus ou moins grande quantité. Ces données seront à fournir par l'ENSAM, grâce au logiciel SimaPro.

A ces deux critères, l'un qualitatif et l'autre quantitatif, s'ajoute la volonté pour l'ENSAM d'avoir un outil d'évaluation de l'effet d'un navire sur une zone géographique marine donnée (aussi appelée masse d'eau).

C'est dans cette perspective que le travail supplémentaire demandé à IFREMER d'émettre un indicateur théorique de la sensibilité des masses d'eau vis-à-vis d'une pollution marine, prend tout son sens.

I. Sensibilité des zones maritimes vis-à-vis une pollution

Un des objectifs principaux de ce projet est de définir la notion de "navire écologiquement propre". Pour cela, il est nécessaire d'identifier les zones marines dans lesquelles un navire est susceptible d'émettre une pollution au cours de son cycle de vie, ainsi que leur sensibilité respective, de manière à réduire les conséquences environnementales dues à cette pollution sur l'environnement marin. Les impacts sont en effet très variables selon les masses d'eau, tout comme les méthodologies de protection et de gestion de celles-ci.

I.1. Zones à considérer

Les différentes zones géographiques prises en compte sont les **zones côtières, portuaires et de haute mer**.

Ces zones sont elles-mêmes subdivisées en sous-zones marines, car le milieu marin est une mosaïque d'écosystèmes particuliers, tant du point de vue biologique, géographique, abiotique que biotique.

Ces sous-zones marines coïncident avec des zones dans lesquels les navires peuvent être associés (qu'ils soient à quai, en (dé)construction ou en navigation) et sont présentées ci-dessous :

Haute mer :	Zones siège de gires Zones comportant des courants marins en direction des côtes
Eaux portuaires :	Ports en eau profonde Ports en estuaire Ports sur un fleuve
Eaux côtières :	Estuaires/Deltas

<p>Lagunes et baies semi-fermées Côtes rocheuses Côtes vaseuses Côtes sableuses Zones de nourriceries de poissons Zones d'aquaculture Zones à forte fréquentation touristique Aires marines protégées et parcs naturels marins</p>
--

I.2. Indexation de ces zones en fonction de leur caractéristiques géomorphologiques

a. Introduction

L'idée est de parvenir de manière purement théorique (aucune étude scientifique n'ayant été encore réalisée sur ce sujet) à émettre des **indices de sensibilité de ces milieux à une pollution...**

- **de nature quelconque.**

On va en effet généraliser ces indices à tous les types de polluants, qu'ils soient hydrocarbures, métaux lourds, organochlorés, dioxines ou autres.

En pratique, ce n'est pas réaliste car le milieu réagira différemment en fonction du type de polluant car chaque polluant, de part ses propriétés intrinsèques, a un niveau de toxicité et un comportement dans le milieu (s'évapore, se dissout, coule, flotte) propres.

Mais en théorie, peu d'indicateurs permettent de qualifier la sensibilité d'un milieu vis-à-vis d'un polluant donné.

Pour illustrer ce constat, après l'échouage de l'Amoco Cadiz a été proposé, d'après D'Ozouville et al., un indice de vulnérabilité du littoral breton face à une pollution accidentelle par les hydrocarbures, selon le protocole déjà développé par Hayes et al., 1976 (12, 13).

Cet indice peut s'apparenter à l'indicateur ESI (Environmental Sustainability Index), qui qualifie l'indice de sensibilité géomorphologique de chaque unité morphosédimentaire du faciès littoral. Cet indicateur est présenté à l'Annexe F.

On peut donc estimer hypothétiquement que l'on peut généraliser cet indice à tout polluant, vu le faible nombre d'indicateurs de la sensibilité du milieu marin.

On se basera donc, à défaut de données bibliographiques sur le sujet, sur des observations du comportement géomorphologique de ces zones (hydrodynamisme, confinement géographique, biodiversité...) pour évaluer ces indices.

- **Et de catégorie d'impact quelconque.**

On va en effet estimer qu'au sein d'une même zone marine donnée, les sensibilités d'un polluant vis-à-vis des sédiments marins et de l'eau de mer sont de valeurs égales ; et ce, quelle que soit la nature du polluant en question.

Cette estimation se base sur trois constats/hypothèses :

* en comparaison avec les milieux terrestres nettement diversifiés, le milieu marin apparaît relativement homogène ; celui-ci, quel que soit la latitude, présente toujours trois compartiments : la colonne d'eau, le substrat (dur ou meuble) et le compartiment biologique (faune et flore)

* dans SimaPro (logiciel d'ACV exploité par l'ENSAM), les contributions en termes de pollution sur les catégories *eau de mer* et *sédiments marins* sont identiques.

* les polluants déposés sur les sédiments peuvent s'accumuler et nuire aux organismes benthiques vivant à proximité, et en même temps être remis en suspension du fait des courants et marées, et ainsi contaminer la colonne d'eau entière.

b. Tableau de sensibilité des zones marines

Les valeurs d'indice de sensibilité des zones susceptibles d'être impactées par la pollution émise par un navire, sont présentées ci-dessous :

Tableau 15 : Indice de vulnérabilité théorique des zones marines

Indice de vulnérabilité	Type de zone	Description et caractéristiques
10	Zones humides littorales (lagunes, baies semi-fermées, étangs)	Très productives aux plans halieutique et aquacole
		Milieux confinés et fragilisés: faible profondeur, superficie réduite, hydrodynamisme faible
		Accumulation définitive de polluants, sauf en cas de tempêtes ou de marées de vives-eaux
		Facteurs limitants : salinité, température, oxygénation, courants, sels nutritifs
9	Schorres / Marais médiolittoraux alimentés en eau marine	Encroûtement en surface
		Hydrodynamisme restreint
		Pollution en profondeur du substrat
		Système enclavé, alimenté uniquement au cours de marées de vives-eaux
9	Zones vaseuses ABRITEES	Percolation en profondeur due aux organismes fouisseurs et aux mouvements d'eaux interstitielles
8	Estuaires/Deltas	Secteur-clé pour le trafic fluvial, l'économie et le recrutement de plusieurs poissons
		Ecosystème fragile souvent associé à des nurseries/frayères de poissons
		Milieu propice à l'accumulation et au stockage des contaminants
		Haute productivité en terme de biomasse et d'éléments nutritifs pour la vie marine
8	Ports en estuaire	Sites abrités (eaux stagnantes et accumulation de polluants)
		Sensibilité accentuée par les multiples sources de pollution localisées dans les ports (relargage métaux après dragage, peintures anti-salissures, etc)
		Proximité des estuaires, secteurs-clés très sensibles
7	Ports sur un fleuve	Sites abrités (eaux stagnantes et accumulation de polluants)
		Sensibilité accentuée par les multiples sources de pollution localisées dans les ports (relargage métaux après dragage, peintures anti-salissures, etc)
6	Plages sableuses ou à graviers, galets, cailloux ABRITEES	Percolation rapide
		Faible courantologie
		Formation en surface d'une couche durcie voire d'une croûte
5	Côtes rocheuses ABRITEES	Dépôts de pellicules fines dans les cuvettes/fractures/fissures car faible courantologie
		Accumulation dans les anfractuosités
4	Ports en eau profonde	Exposition relative de la zone Zone plus exposée du fait des activités maritimes
3	Côtes rocheuses, plages sableuses ou à graviers EXPOSEES	Temps de récupération rapide
		Courantologie, Marées
		Dépôts en surface de la plage, polluants décollables et transportables ailleurs (auto-épuration)
2	Zones comportant des courants marins en direction des côtes	Grande dilution et éloignement des côtes MAIS
		Présence de courants superficiels ramenant des polluants parfois très loin de leur lieu d'émission, s'ils sont persistants toutefois
1	Zones sièges de gires	Pas/peu de courants
		Grande dilution (masse d'eau "infinie")
		Grande profondeur (sédiment, colonne d'eau)

	Haute mer
	Zone côtière
	Zone portuaire

Cet indice va de 1 (zone marine peu sensible à une pollution quelconque) à une valeur 10 (extrêmement sensible).

Il est à noter que ces indices sont purement théoriques. Dans la mesure où aucune étude scientifique ne s'est encore penchée sur le sujet, le classement de ces zones se basera que sur des **facteurs géomorphologiques**, censés qualifier la vulnérabilité d'une zone marine vis-à-vis d'une exposition, de quelque type qu'elle soit.

Ces facteurs sont l'**hydrodynamisme**, le **confinement au plan géographique**, le **taux de renouvellement des eaux** ainsi que la nature de la **biodiversité** présente dans la zone.

C'est la seule manière trouvée pour hiérarchiser les zones entre elles, sachant qu'il est difficile de comparer grossièrement un port d'une côte, et encore moins d'une zone océanique éloignée du littoral.

En effet, les espaces marins les plus menacés de pollution sont ceux qui sont directement influencés par les activités anthropiques et qui sont les plus confinés au plan géographique ou hydrodynamique, le taux de renouvellement des eaux particulièrement faible, concourant à y concentrer les polluants. **(14)**

Ainsi, par exemple, on considère généralement que les eaux côtières sont plus vulnérables à une telle pollution par-rapport à la haute mer, vu que la dilution y est moins forte et que les zones de reproduction des espèces aquatiques y sont localisées.

c. Cas particuliers

A cela s'ajoutent les quatre autres zones géographiques auxquelles sont associées une fonction biologique (nurseries de poissons, zone d'aquaculture, aires marines protégées et parcs naturels marins) ou autre (zones à forte fréquentation touristique).

Ces zones sont donc à protéger à long terme, car une contamination aura un impact néfaste sur la vie aquatique ou humaine, et donc sur un plus vaste biote.

Cependant, comme les sensibilités de ces zones ne dépendent pas uniquement du biote qu'elles possèdent (mais aussi de critères géomorphologiques), elles sont à classer également en fonction de la zone géographique concernée par ces quatre milieux biologiques (cf. Tableau 14).

Pour cette raison, ces milieux feront l'objet d'un classement à part, comme suit :

Tableau 16 : Classement des quatre milieux spécifiques (A > B > C > D en terme de vulnérabilité du milieu)

Sous-indice de vulnérabilité	Type de zone	Description et caractéristiques
A	Zones à forte fréquentation touristique	Critère santé humaine primordial
B	Zones d'aquaculture	Activités de production animale ou végétale en milieu aquatique (bord de mer, rivières et étangs)
		Activités de nature (pisciculture, ostréiculture, mytiliculture, conchyliculture, etc) et de sensibilité (zooplancton, phytoplancton, poissons d'eau douce et d'eau de mer, mollusques, A donc des conséquences sur la consommation de produits de la mer par l'homme
C	Zones de nurseries de poissons	Zones de reproduction externe des espèces marines, notamment exploitées commercialement
D	Aires marines protégées et parcs naturels marins	Domaine exclusivement réservé à la protection de la nature à long terme

N.B. Pour donner un ordre d'idée de l'utilisation combinée de ces deux tableaux pour classer les masses d'eau, une zone balnéaire située au niveau d'un estuaire (indice 8A) sera plus sensible qu'un bassin ostréicole estuarien (indice 8b).

Tous ces indices, basés uniquement sur la connaissance et les caractéristiques de ces milieux marins et non sur des données scientifiques fiables (qui n'existent pas sur ce sujet), seront donc à être étudiés dans un processus de validation ultérieur au travail mené par IFREMER sur le projet CONVENAV.

d. Conclusion

La combinaison de ces valeurs avec des données concernant le profil d'usage d'un navire (c'est-à-dire le temps passé par celui-ci dans une zone géographique précise) permettra, par la suite, de connaître la vulnérabilité du profil de route du navire au cours de son cycle de vie, ainsi que les diverses contributions des masses d'eau dans l'évaluation globale de l'impact d'un navire sur le milieu marin.

II. Indicateur de l'impact d'un navire selon la masse d'eau impactée

De par la spécificité des activités d'un navire, de sa typologie propre, et du profil d'usage qu'il en est fait : les mêmes pollutions se déclinent différemment selon chaque zone géographique impactée.

C'est dans ce sens qu'a été mise en place une méthodologie à partir des données précédemment citées, à partir desquelles on peut déterminer un indicateur de l'impact global d'une substance émise par un navire.

La figure suivante illustre la méthodologie employée pour émettre cet indicateur.

N.B. On reconnaît certaines étapes de cette méthodologie, développées par IFREMER et présentées dans ce rapport ; et qui aboutissent à l'émission d'un éco-indicateur de l'impact d'un navire sur le milieu marin. C'est notamment le cas pour les étapes :

* *Potentiel de toxicité d'un polluant* : **Tableau 14, issu du Tableau 13**

* *Compartimentage des zones marines en sous-zones géographiques* : **§ I.1 (b et c) de la 4^{ème} Partie**

* *Indice de sensibilité des sous-zones géographiques marines à une pollution* : **Tableaux 15 et 16**

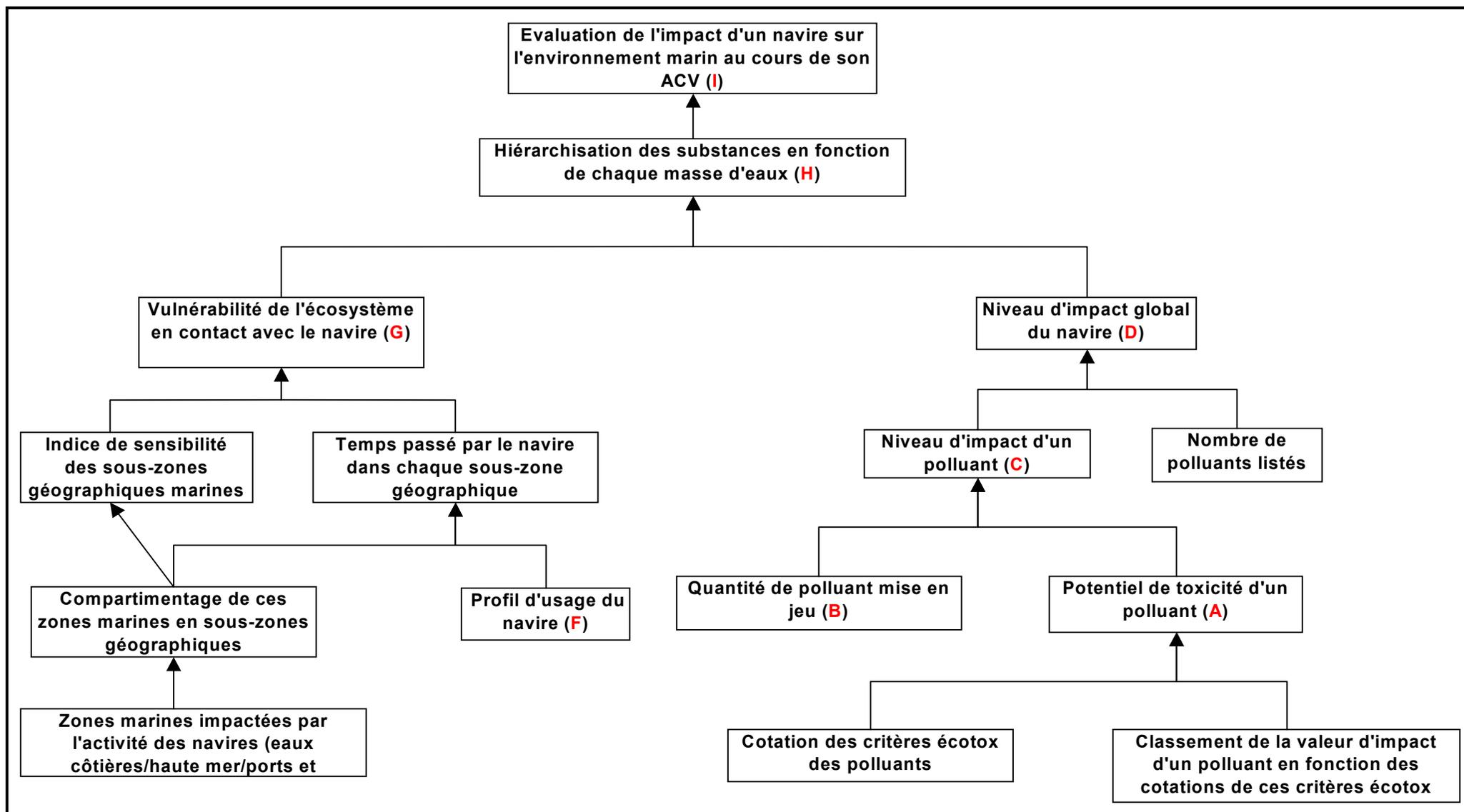


Figure 7 : Outil d'évaluation théorique de l'impact d'un navire selon la masse d'eau considérée

Ce système se base sur une association du niveau d'impact vis-à-vis d'un compartiment d'impact (sédiments marins, eau de mer, santé humaine) et de l'indice de vulnérabilité des milieux de récepteurs (eaux côtières, hauturières ou portuaires/estuariennes) de la pollution anthropique liée à l'activité des navires.

Le résultat donne lieu à l'établissement d'un éco-indicateur du risque induit par une substance émise par un navire selon le profil (lieu et origine d'émission, et milieu d'exposition) de la pollution engendrée.

Le résumé de l'association de ces facteurs (A à I) est explicité à l'Annexe G.

III. Conclusion

Le tableau d'indexation proposé n'est qu'un document de base, fondé sur une approche théorique et descriptive des masses d'eau. En aucun cas ce document ne peut servir de référence à un travail sur le sujet. Il va sans dire que, pour proposer une méthodologie d'évaluation d'impact d'un navire (et des polluants qui le caractérisent) dans le temps imparti, un tel travail ne sert qu'à pré-évaluer la sensibilité d'une masse d'eau susceptible d'être impactée.

Ces résultats devront donc être vérifiés, confirmés et validés par des expérimentations et des recherches pertinentes et de long terme, vu la diversité des polluants, des zones géographiques marines, des types de navire et des compartiments d'impact (sédiments marins, eau de mer, etc.) à considérer.

Par ailleurs, ces données s'intègrent clairement dans une démarche d'évaluation de l'impact, car elles fournissent une information supplémentaire : l'état de l'écosystème potentiellement impacté après une exposition (aigüe ou chronique) à une pollution anthropique.

Ce renseignement est indispensable car il entre dans la logique de la démarche de l'ENSAM de suivi et d'évaluation du suivi de la pollution marine générée par l'activité des navires, et qui dépend des nature et comportement des substances émises (cf. 2^{ème} et 3^{ème} Parties de ce rapport), mais également de la zone d'impact (cf. 4^{ème} Partie).

Conclusion générale

La présente étude avait pour objectif d'identifier les substances les plus pertinentes pour le milieu marin du point de vue de leur dangerosité, susceptibles d'être rejetées par l'activité des navires, qu'il soit en construction, à quai ou en mer ou en démantèlement.

En se basant sur un travail bibliographique et des entretiens, l'étude met en évidence la prépondérance et l'importance relative des différentes substances, principalement chimiques, mises en jeu dans le milieu marin par l'activité des navires.

Cette étude porte premièrement sur la présentation du cadre d'étude du projet CONVENAV, et de l'intégration au sein de l'ACV (analyse du cycle de vie) d'un navire d'un éco-indicateur établi par l'IFREMER pour déterminer le type et niveau d'impact d'une substance émise par un navire.

Elle porte ensuite sur la méthodologie de classement et de hiérarchisation des substances retenue, qui est assez proche de celle employée au sein du GESAMP pour établir les annexes du MARPOL 73/78.

L'approche envisagée est alors davantage qualitative que quantitative, dans la mesure où nous ne disposons pas des données concernant les masses de polluants émises par l'activité des navires. De plus, la pollution ainsi engendrée n'englobera ni les émissions et expositions d'origine accidentelle (jugées trop rares), ni la pollution biologique dûe en partie au déballastage des navires, et au biofouling sur les coques.

La finalité de l'étude est ainsi d'établir un éco-indicateur permettant de hiérarchiser qualitativement les polluants en fonction de leur niveau d'impact et du milieu (environnemental et géographique) exposé à cette pollution.

L'approche traite donc le problème selon les sources de pollution généralement observées, et est adaptée à l'environnement impacté. Elle ne tient pas compte à ce stade de la typologie du navire, ni des quantités mises en jeu.

A partir de cet éco-indicateur de l'impact d'une substance émise par un navire, la suite possible serait :

- de lui associer la connaissance des quantités de polluants émises selon la typologie du navire
- d'attribuer un critère de vulnérabilité à l'écosystème impacté ; critère dépendant des conditions environnementales du milieu, du comportement de la substance émise dans celui-ci et de l'origine d'émission de cette dernière.

On aura ainsi la possibilité d'évaluer selon le profil d'usage d'un bateau, sa typologie, les masses (aspect quantitatif) et le niveau d'impact (aspect qualitatif) des pollutions correspondant à son cycle de vie, c'est-à-dire sa construction, sa mise en service et son démantèlement.

L'intérêt de cette évaluation est alors d'exploiter au mieux l'activité d'un navire de sorte que les processus qui induisent une pollution, qu'elle soit ponctuelle ou chronique, puissent être réduits voire repensés, dans le cadre d'une méthodologie de développement durable à terme.

Références bibliographiques

- (1) **Marchand M., Tissier C., Tixier C. & Tronczynski J. (2004)** – Les contaminants chimiques dans la Directive Cadre sur l'Eau – Document de synthèse IFREMER : 31 pp.
- (2) **Marchand M. & Tissier C. (2005)** – Analyse du risque chimique en milieu marin : l'approche méthodologique européenne – Collection Comportement des polluants - IFREMER : 124 pp.
- (3) **Document de travail commun IFREMER/ENSAM (2008)** – Mise en place d'une nouvelle méthodologie d'évaluation de l'impact – Rapport ENSAM 20 pp.
- (4) **Marchand M. (2008)** - Les sources d'information sur les substances chimiques – Formation Analyse du Risque Chimique (19-20 mars 2008 Aix-en-Provence) – Ifremer/INERIS – 30 pp.
- (5) **Ramade F. (2007)** – Introduction à l'écotoxicologie : Fondements et applications – Ed. Tec & Doc Lavoisier – 618 pp.
- (6) **Kantin R. (2005)** – Généralités sur le comportement des produits pétroliers déversés en mer – Document de synthèse IFREMER
- (7) **Agence Eau Seine Normandie (2008)** – Guide pratique des substances toxiques dans les eaux douces et littoral du bassin Seine-Normandie – Document de synthèse - Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. 31 pp.
- (8) **Les Journées d'Information du Cedre (2001)** – Les pollutions accidentelles des eaux au-delà du pétrole brut : Maîtriser le risque et gérer la réponse – Publication Marchand M. – Ifremer Nantes - 15 pp.
- (9) **Mazoyer V. (1998)** – Classification des risques phytosanitaires pour la conchyliculture du littoral charentais – Rapport de stage - Ifremer/INRA/ESITPA – 63 pp.
- (10) **INRS (2001)** – Fiche toxicologique n° 0 : A propos des fiches toxicologiques - Document de synthèse – 15 pp.
- (11) **Site Internet TOXNET** : géré par l'United States National Library of Medicine. TOXNET Toxicology Data Network: HSDB (Hazardous Substances Data Bank) - <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB>
- (12) **D'Ozouville L., Berné S., Sundlach E., Hayes M.O. (1981)** – Evolution de la pollution du littoral breton par les hydrocarbures de l'Amoco Cadiz entre mars 1978 et novembre 1979. Actes du colloque international AMOCO CADIZ, conséquences d'une pollution accidentelle par les hydrocarbures – Publications du CNEXO.
- (13) **Marchand M.** – Amoco Cadiz : Bilan du Colloque sur les Conséquences d'une Pollution Accidentelle par Hydrocarbures. Brest. Novembre 1979 – Publication 2001 – Rapport Ifremer – 93 pp.

(14) Site internet du Forum Environnement SEME (Surveillance Environnement Marin Estuarien) : seme.uqar.qc.ca

Tiré notamment des sources bibliographiques suivantes :

Amiard-Triquet C., 1989. - Bioaccumulation et nocivité relatives de quelques polluants métalliques à l'égard des espèces marines. - Bull. Ecol., 20(2):129-151.

Beupoil C., 1993.- "Estuaires : pollutions et capacité d'acceptation". Formation des inspecteurs des installations classées sur les spécificités des milieux marins et estuariens. Rapport DRIRE Bretagne, 61 p.

Boutier B. & Alzieu C., 1991. - Les contaminants des sédiments littoraux: les niveaux et leur signification. In: C.R. Congrès "L'écotoxicologie des sédiments" 5-7 juin, La Rochelle, 14 p.

Cossa D. & P. Lassus, 1989. Le cadmium en milieu marin. Biogéochimie et écotoxicologie. Rapports scientifiques et techniques de l'IFREMER. no 16. 111 p.

Cossa, D., F. Elbaz-Poulichet, M.Gnasnia-Barelli & M. Roméo., 1993. Le plomb en milieu marin. Biogéochimie et écotoxicologie. Rapports scientifiques et techniques de l'IFREMER. no 3, 76p.

Glémarec M. & Hily C., 1997. - Variabilité naturelle et perturbations anthropiques des écosystèmes sédimentaires. De la tolérance à l'opportunisme. In Les biocénoses marines et littorales françaises des côtes Atlantique, Manche et Mer du Nord. Muséum Nat. Hist. Nat., Paris, 273-281.

(15) Dilhac B. (2001) Identification des rejets de substances chimiques en milieu marin par les activités industrielles et portuaires - Rapport de stage – IFREMER Brest 43 pp.

(16) IMO (2006) – MARPOL : éd. Récapitulative de 2006 : Articles, Protocoles, Annexes Et Interprétations Uniformes de la Convention Internationale de 1973 pour la Prévention de la Pollution par les navires, telle que modifiée par le protocole de 1978 – IMO – pages 259 à 262

(17) Le Marin (2008) – Eaux de ballast : une convention sur le papier – Article de presse du 12 décembre 2008- page 22

(18) Alzieu C. (1999) - Dragage et environnement marin : état des connaissances - Collection Comportement des polluants - IFREMER : 223 pp.

(19) Geffard O. (2001) - Toxicité potentielle des sédiments marins et estuariens contaminés : évaluation chimique et biologique, biodisponibilité des contaminants - Thèse IFREMER : 376 pp.

Annexes

ANNEXE A : Sources d'émission associées à l'activité des navires (15)

L'origine de la pollution étudiée dans le cadre du projet CONVENAV est évidemment liée au cycle de vie d'un navire. C'est donc une pollution de nature anthropique qui comporte des lieux et des sources d'émission divers et variés.

A ce sujet, il est intéressant de connaître ces sources de pollution et de les associer à une des trois zones géographiques où séjourne majoritairement un navire au cours de son cycle de vie ; à savoir les zones estuariennes et portuaires, les zones côtières et la haute mer.

N.B : Il ne sera abordé dans ce paragraphe que le problème de contamination selon la source d'émission et non selon le type de navire ou encore la typologie de la zone géographique concernée, de manière à améliorer l'exploitabilité de ces données.

Zones estuariennes et portuaires

Selon les différentes études liées aux pollutions en aval des fleuves, aux pollutions portuaires, et de l'avis général des acteurs et gestionnaires des ports, plusieurs types de contaminations chimiques en milieu marin dues aux activités des navires peuvent être mises en évidence :

- la contamination la plus importante est celle liée à la protection des navires contre la corrosion et les salissures, et en particulier aux peintures antifouling. Il faut en effet lutter contre les salissures qui réduisent la vitesse et la manœuvrabilité des navires, augmentent la consommation de carburant et facilitent la corrosion. Les principaux polluants mis en jeu sont les suivants :

Tableau 17 : Polluants mis en jeu lors de la protection des navires

Nature des polluants	Protection des navires contre la corrosion	Protection des navires contre les salissures
Zinc	X	
Aluminium	X	
Composés organométalliques (TBT)		X
Cuivre		X
Pesticides		X
Solvants de peintures (xylène...)	X	X
Détergents	X	X

Les émissions de ces contaminants auront lieu lorsque le navire sera à quai (stationnement naval) et durant les opérations de carénage (révision périodique de la coque).

- pour les cas de pollution chronique, la contamination par hydrocarbures (huiles et carburants) représente également une problématique très significative pour la majorité des ports et à la frontière entre eau de mer/eau douce. Cette contamination est générée par l'utilisation et l'entretien des moteurs et des cales/soutes de navire, détaillée ci-dessous :

Tableau 18 : Polluants concernés par types d'activité

Nature des polluants	Avitaillement en carburant	Gaz d'échappement	Huiles usagées	Vidange des cales machines	Eaux de ballast	Nettoyage des soutes et des citernes
Hydrocarbures lourds, résidus huileux. <i>Persistants</i>	Rare		X	X	X	X
Hydrocarbures légers/volatils. <i>Non persistants</i>	X	X				
Détergents				X		X

Il s'agit dans le cas des ports de plaisance et de pêche de pollution chronique plus ou moins continue. A l'inverse, les activités dans les ports de commerce sont en général mieux maîtrisées et réglementées, mais les quantités mises en jeu sont beaucoup plus importantes, tout comme les pertes associées qui relèveront davantage d'un caractère accidentel que chronique, caractère non pris en compte dans cette étude, de part sa rareté.

- la manutention et le stockage des marchandises solides en vrac, qui mettra en jeu de la pollution carbonée (matières organiques), azotée/phosphorée (nutriments) et bactérienne (micro-organismes), des métaux, des matières minérales et des matières en suspension...émises par les poussières véhiculées et les pertes d'éléments figurés (de taille supérieure aux poussières) générées par cette activité.
- et la gestion des eaux usées.

N.B : Cette dernière activité ne sera pas prise en compte dans cette étude car le rejet des eaux grises (lavabo, douche, cuisine) est de nos jours réglementé et celui des eaux noires (toilettes) est interdit. De plus, il n'existe pas à l'heure actuelle de modules de rejet dans les logiciels d'ACV utilisés (ex .SimaPro) nécessaires pour la prise en compte de ces eaux et de leurs impacts associés.

Les différents types de polluants mis en jeu sont donc généralement :

Tableau 19 : Différents types de polluants mis en jeu en fonction des principales sources de pollution

Type de polluants	Protection des navires (corrosion et fouling)	Utilisation des moteurs et cales de navires	Manutention et stockage de marchandises en vrac	Eaux usées
Métaux	X		X	
Hydrocarbures		X		
Détergents	X	X		X
Solvants	X			
Matières minérales	X		X	

Zones côtières et hauturières

Ces deux zones sont réunies dans ce paragraphe car les modes de contamination du milieu marin dus à l'activité des navires sont relativement identiques dans ces deux zones géographiques. On notera ainsi les sources de pollution suivantes :

- la vie à bord, comprenant à la fois les entretiens des soutes et moteurs, la gestion des eaux usées et la consommation de carburant.
- le déballastage en pleine mer, pour libérer les citernes de l'eau stockée afin de donner au navire une meilleure stabilité et afin de recevoir au point de chargement un certain type de cargaison. En effet, les eaux de ballast restant attachées aux parois des citernes ou restées au fond lors d'un précédent déchargement, se retrouvent plus ou moins souillées et transférées dans les zones portuaires et/ou marines lors de vidange postérieures.
- le dragage (opération de transfert des sédiments vers une zone pour en faciliter l'accès), car il est reconnu que l'immersion est une voie de transfert des contaminants vers le milieu marin.

ANNEXE B : Présentation de l'Annexe II de MARPOL 73/78

Ce profil de dangers prend en compte quatre types de préoccupations en cas de déversements accidentels en mer :

- Dommages aux ressources marines
- Dangers pour la santé humaine
- Réduction de l'agrément des sites
- Interférences avec d'autres usages de la mer

Cela a conduit à définir pour chaque substance un profil de risque selon cinq catégories d'effet :

- A - Bioaccumulation et biodégradation
- B - Dommages causés aux ressources vivantes (toxicités aquatiques aiguë et chronique)
- C - Risque pour la santé humaine (ingestion, inhalation, contact cutané)
- D – Risque à long terme pour la santé (irritation, corrosion, effets insidieux)
- E - Interférences avec les autres usages de la mer

Sont alors définies des côtes (de 0 à 6) relatives à chaque critère de classement illustrant la catégorie, qui sont **(16)** :

- Pour la catégorie A, séparée en sous-colonnes A1 (Bioaccumulation) et A2 (Biodégradation) :

Tableau 20 : Critères GESAMP adoptés vis-à-vis de la bioaccumulation

Log P	FBC	Bioaccumulation estimée	Côte GESAMP
<1 ou >7 ou M>700	Non mesurable	Non bioaccumulable	0
1 à 2	1 à <10	Bioaccumulation très lente	1
2 à 3	10 à <100	Bioaccumulation lente	2
3 à 4	100 à <500	Bioaccumulation légère (<1 mois)	3
4 à 5	500 à <4000	Produit bioaccumulable (>1 mois)	4
5 à 7	>4000	Très bioaccumulable (plus. mois)	5

Pour la sous-colonne A2, il suffisait de préciser si la substance est facilement biodégradable (R), difficilement biodégradable (NR) ou si c'est une substance inorganique (inorg).

- Pour la catégorie B :

Tableau 21 : Critères GESAMP adoptés vis-à-vis de la toxicité aquatique

B1 - Toxicité aiguë (LC50)	B2 - Toxicité chronique (NOEC)	Côte GESAMP
Nulle (>1000 mg/L)		0
Négligeable (100 à 1000 mg/L)		1
Faible (10 à 100 mg/L)	Faible (>1 mg/L)	2
Modérée (1 à 10 mg/L)	Moyenne (0.1 à 1 mg/L)	3
Forte (0.1 à 1 mg/L)	Forte (0.001 à 0.1 mg/L)	4
Très forte (0.01 à 0.1 mg/L)	Très forte (0.001 à 0.01 mg/L)	5
Extrême (<0.01 mg/L)	Extrême (< 0.01 mg/L)	6

- Pour la catégorie C :

Tableau 22 : Critères GESAMP adoptés vis-à-vis de la toxicité envers les mammifères

C1-Toxicité orale DL50 (mg/kg)	C2-Toxicité par voie cutanée DL50 (mg/kg)	C3-Toxicité par inhalation CL50 (mg/kg)	Côte GESAMP
> 2000	> 2000	> 20	0
300 – 2000	1000 – 2000	10 – 20	1
50 – 300	200 – 1000	2 – 10	2
5 – 50	50 – 200	0.5 – 2	3
< 5	< 50	< 0.5	4

- Pour la catégorie D :

Tableau 23 : Critères GESAMP adoptés vis-à-vis des effets physiques et à long terme sur la santé humaine

D1-Irritation et corrosion cutanées	D2-Irritation et corrosion oculaires	D3-Effets à long terme sur la santé	Côte GESAMP
Non irritant	Non irritant	C-Cancérogène M-Mutagène R-Reprotoxique S-Sensibilisant A-Risque d'aspiration T-Toxicité systémique pour certains organes cibles L-Lésions pulmonaires N-Neurotoxique I-Immunotoxique	0
Légèrement irritant	Légèrement irritant		1
Irritant	Irritant		2
Fortement irritant ou corrosif	Fortement irritant		3

- Pour la catégorie E :

Tableau 24 : Critères GESAMP adoptés vis-à-vis de l'altération des produits de la mer ("tainting"), de l'environnement et des agréments côtiers

E1-Tainting	E2-Effets physiques sur l'environnement et les habitats benthiques	E3-Interférence avec les agréments côtiers	
		Cotation	Description / Action
NT : Not tainting T : Tainting test positive	Fp : Persistant floater F : Floater S : Sinking substance	0	Pas d'interférence / danger
		1	Peu supportable
		2	Modérément supportable
		3	Très insupportable

Ce qui aboutit à un classement des produits en catégories de pollution décroissante et va d'une catégorie X (substances les plus dangereuses et toxiques pour l'homme et l'environnement) à une catégorie Z (substances dont la faible toxicité requérant néanmoins un contrôle et une législation en vigueur afin d'éviter toute pollution chronique, dommageable à terme). La catégorie OS représente les substances dont l'impact environnemental est négligeable, voire non connu.

N.B : Ces 4 catégories sont similaires aux catégories A, B, C, D (cf. Tableau 5).

Ce classement se traduit par le profil de risques du GESAMP, comme indiqué ci-contre :

Appendices de l'Annexe II

Appendice 1

Directives pour le classement en catégories des substances liquides nocives*

Le classement des produits en catégories de pollution se fonde sur une évaluation de leurs propriétés se traduisant par le profil de risques du GESAMP, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Norme	A1 Bio-accumulation	A2 Bio-dégradation	B1 Toxicité aiguë	B2 Toxicité chronique	D3 Effets à long terme sur la santé	E2 Effets sur la flore et la faune marines et les habitats benthiques	Cat.
1			≥5				X
2	≥4		4				
3		NR	4				
4	≥4	NR			CMRTNI		
5			4				Y
6			3				
7			2				
8	≥4	NR		Non 0			
9				≥1			
10						Fp, F ou S si non inorganique	
11					CMRTNI		
12	Tout produit ne satisfaisant pas aux critères des normes 1 à 11 et 13						Z
13	Tous les produits identifiés comme suit : ≤2 dans la colonne A1; R, dans la colonne A2; blanc dans la colonne D3; non Fp, F ou S (si non organique) dans la colonne E2; et 0 (zéro) dans toutes les autres colonnes du profil de risques du GESAMP						OS

* Se reporter aux Directives révisées pour l'évaluation provisoire des liquides transportés en vrac, circulaire MEPC.1/Circ.512, telle que modifiée.

Figure 8 : Classement tiré de l'annexe II du MARPOL 73/78 des substances selon GESAMP

ANNEXE C : Phrases de risque

Ces phrases de risque sont issues de la fiche toxicologique n°0 de l'INRS, qui détaille les critères (éco)toxicologiques retenus pour évaluer la dangerosité et l'impact d'une substance chimique sur l'homme et son environnement. **(10)**

Elles seront reprises dans le tableau de classement retenu pour le projet CONVENAV, en cas de manque de données, comme indiqué au Tableau 9 de cette étude.

Tableau 25 : Liste des phrases de risque utilisées comme données dans le tableau de cotation des critères de classement

SYMBOLE	DESCRIPTION
R20	Nocif par inhalation
R21	Nocif par contact avec la peau
R23	Toxique par inhalation
R24	Toxique par contact avec la peau
R26	Très toxique par inhalation
R27	Très toxique par contact avec la peau
R29	Au contact de l'eau, dégage des gaz toxiques
R31	Peut devenir facilement inflammable
R34	Provoque des brûlures
R35	Provoque de graves brûlures
R36	Irritant pour les yeux
R37	Irritant pour les voies respiratoires
R38	Irritant pour la peau
R40	Possibilité d'effets irréversibles
R41	Risque de lésions oculaires graves
R42	Peut entraîner une sensibilisation par inhalation
R43	Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau
R45	Peut causer le cancer
R46	Peut causer des altérations génétiques héréditaires
R48	Risque d'effets graves pour la santé en cas d'exposition prolongée
R49	Peut causer le cancer par inhalation
R50	Très toxique pour les organismes aquatiques
R51	Toxique pour les organismes aquatiques
R52	Nocif pour les organismes aquatiques
R53	Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique
R58	Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement
R66	L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau
R67	L'inhalation de vapeurs peut provoquer somnolences et vertiges

ANNEXE D : Ballastage et pollution biologique

Le rejet des eaux de ballast est, avec la destruction des habitats, la surexploitation des ressources et la pollution d'origine terrestre, une des quatre menaces majeures pesant sur les océans.

La vidange des ballasts est une opération indispensable à la sécurité des navires de charge pour éviter d'importants stress à la structure d'un navire et des risques plus grands à l'équipage. Sur certains navires les volumes peuvent aller jusqu'à 50 000 m³. La vidange des ballasts est une opération qui peut être très longue (de 15 à 41 heures).

Les navires ont besoin de ballaster pour assurer leur stabilité et le bon fonctionnement de leur appareil propulsif. Environ 45 000 navires de commerce transportent chaque année 10 milliards de m³ d'eau de mer d'un point à l'autre du globe, occasionnant le déplacement de 7 000 espèces différentes par jour : bactéries, phytoplancton, zooplancton, crustacés, poissons, macro-algues. Certains organismes vivants résistant au pompage et à un séjour dans les ballasts peuvent devenir, dans les ports ou les côtes où ils atterrissent, des menaces à long terme plus graves pour l'écosystème que des marées noires.

Les études montrent que moins de 3% de ces espèces rejetées parviennent à s'établir dans de nouvelles régions. Mais une seule espèce envahissante, nuisible ou pathogène ainsi transférée peut suffire à dégrader l'écosystème local.

Pour répondre à ce problème, l'OMI a mis en place en 2004 la Convention internationale pour le contrôle et la gestion des eaux de ballast et sédiments de navires. Elle prévoit l'obligation pour les navires de renouveler au moins 95% des eaux de ballast en haute mer dans un premier temps, puis de disposer d'un système de gestion/traitement des eaux de ballast afin de pouvoir garantir le respect d'une teneur minimale en micro-organismes vivants et autres organismes aquatiques nuisibles ou pathogènes. Cette convention n'entrera en vigueur que lorsque 30 pays représentant 35 % du tonnage enregistré l'auront ratifié, soit 2011 au plus tôt (17).

Une mention particulière doit être faite relativement aux sédiments de ballasts (décantation des matières en suspension lorsque l'on pompe dans les eaux turbides) : ces sédiments sont susceptibles de contenir des formes de résistances de bactéries pathogènes ou des kystes d'algues toxiques. Il conviendra de **ne pas remettre ces sédiments dans le milieu**, notamment lors du carénage ou de la destruction d'un navire.

<p>Le navire est donc vecteur de pollution biologique invisible, qui n'est pas dû à la production et à l'exploitation de celui-ci, mais à la présence d'espèces importées (proliférantes, nuisibles et/ou pathogènes), de bactéries et d'algues toxiques...qui sont amenées par les eaux de ballast et par les salissures/biofouling sur les côtes.</p>

ANNEXE E : Dragage et pollution

Dans cette partie ne sera abordé que l'aspect chimique de la pollution, et pas l'aspect bactériologique et encore moins son aspect viral.

Les opérations de dragages consistent à enlever les sédiments qui se sont accumulés dans les chenaux et les darses de manière à permettre aux bateaux d'accéder aux quais. Des préoccupations relatives à l'impact des dragages et immersions dans l'environnement sont apparues dès qu'il a été établi que les sédiments pouvaient véhiculer des masses importantes de contaminants toxiques pour l'homme et le biotope marin. Le devenir des boues de dragage est ainsi devenu un problème et l'évaluation des dangers liés à cette activité une nécessité pour les gestionnaires.

Une étude très détaillée a été effectuée par l'Ifremer à ce sujet : *Dragages et environnement marin : Etat des connaissances (18)*, dont voici les principales conclusions :

- Même si la pratique des dragages n'est pas à remettre en cause, du fait des entraves à la navigation ou de l'incidence économique qui en résulteraient, elle ne peut être poursuivie qu'en prenant en considération les contraintes de préservation des écosystèmes côtiers et portuaires. Car **à long terme, le problème des sédiments fortement pollués ne peut être résolu que par la suppression des sources de contamination (anthropiques)**.
- Les sédiments côtiers et estuariens renferment de nombreuses substances dont certaines présentent un caractère toxique affirmé : métaux lourds, hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP), organochlorés (PCB), pesticides et biocides divers.

Remarques :

* le transport et la dispersion des matières en suspension constituent des facteurs essentiels pour la détermination de la nature et de l'ampleur des impacts environnementaux.

* Pour l'élimination des sédiments faiblement contaminés, le recours à des zones dispersives n'est pas dépourvu de risques environnementaux et exige l'étude du devenir et des effets des matériaux dispersés. Les zones de haute mer, situées en des points éloignés de la côte, constituent rarement sur le plan de l'environnement une solution souhaitable pour la prévention de la pollution marine (de plus l'opération est onéreuse).

* les sédiments sont essentiellement caractérisés par leur granulométrie et leur composition. La biodisponibilité des xénobiotiques dépend des caractéristiques du sédiment, des propriétés physico-chimiques du composé (spéciation) et de l'organisme lui-même (habitat, mode alimentaire) (Förstner et Wittman, 1979 ; Landrum et Robbins, 1990). Les sédiments sont aussi caractérisés par leur Ph, leur potentiel rédox, leur salinité, leur teneur en oxygène et en sulfures. Ces paramètres gèrent la répartition des contaminants entre les différentes phases d'un sédiment, ainsi que leur biodisponibilité (19).

- Le devenir ultime des déblais de dragage pose de très nombreux problèmes d'ordre technique et environnemental. Ainsi, une attention toute particulière doit être portée

aux opérations qui se réalisent à proximité des zones sensibles, qu'elles soient d'intérêt biologique (cultures marines, frayères...), économique (exploitation des ressources) ou touristique. La répétition de ces opérations engendre un volume considérable de sédiments remaniés et entraîne des modifications notables sur l'environnement marin. La pérennité des dépôts dépend des conditions hydrodynamiques dominantes. La présence de sable sur le fond permet de penser que des dépôts de sédiments vaseux sont éventuellement déplacés. A l'inverse, un fond vaseux offre des conditions favorables pour le piégeage des déblais de nature sableuse.

Il est difficile de quantifier l'impact d'un toxique sur un environnement car cela dépend de paramètres environnementaux divers et variés (profondeur de sédiment, granulométrie, teneurs en aluminium et carbone organique total, teneurs en micropolluants, type de sédiment vaseux/fin...) D'où l'utilisation de critères de classement dans cette étude relativement exhaustifs pour décrire et qualifier l'impact d'une substance donnée sur ce phénomène.

ANNEXE F : Indice de vulnérabilité géomorphologique du littoral

Figure 9 : Index de vulnérabilité appliqué à la côte nord de la Bretagne (d'après d'Ozouville et al.)

	Index	Types de côtes Exemples	Accumulation des hydrocarbures	Nettoyage	Durée de la pollution
ZONES A HAUTE ÉNERGIE	1	Côtes et promontoires rocheux	— La réflexion des vagues sur les rochers ne permet pas aux hydrocarbures de s'y déposer pendant une tempête.	— Très difficile d'accès. — Autonettoyage suffisant.	Quelques semaines
	2	Plate-forme rocheuse d'érosion	— Partie supérieure de l'estran.	— Difficile d'accès. — Autonettoyage suffisant, seules resteront polluées les parties abritées des rochers. — Si nécessaire, nettoyage au jet haute pression.	Quelques mois
	3	Plage de sable fin	— Interstratification dans le sédiment. — Migration lente en profondeur. — Emulsion dans l'eau interstitielle.	— Facile d'accès. — Mise en œuvre de moyens mécaniques permettant le raclage de la surface de la plage. — Éviter le mélange sable et hydrocarbures.	1 à 2 ans
	4	Plage de sable moyen à grossier	— Interstratification dans le sédiment. — Migration rapide en profondeur. — Emulsion dans l'eau interstitielle.	— Facile d'accès. — Pas de tranchées sur la plage. — Utilisation des moyens mécaniques réduits au minimum surtout quand il y a des hydrocarbures sur la plage. — Lorsqu'il y a des hydrocarbures enfouis dans le sédiment, méthode de hersage ou de labourage mais sans toucher le substratum. — Autonettoyage par le jeu d'érosion et d'accrétion du sable sur les plages.	1 à 3 ans
	5	Plage de graviers et de galets	— Migration rapide des hydrocarbures en profondeur; peu ou pas de dépôts en surface.	— Utilisation d'engins mécaniques pour favoriser l'autonettoyage. Déplacement des galets vers le bas de la plage, formation de sillons.	3 à 5 ans
ZONES A FAIBLE ÉNERGIE	6	Côtes rocheuses et plates-formes d'érosion	— Accumulation des hydrocarbures dans les anfractuosités des rochers. — Rochers recouverts d'une fine pellicule.	— Accès difficile. — Nettoyage au jet haute pression.	3 à 5 ans
	7	Plage de sable fin à moyen	— Percolation en profondeur. — Pollution de la zone subtidale par les marées (mélange des hydrocarbures et des sédiments fins). — Formation en surface d'une couche durcie après un an.	— Accès facile. — Intervention rapide pour le nettoyage : mise en œuvre de moyens mécaniques pour le raclage de la surface mais éviter de faire un mélange sable + hydrocarbures. — Biodégradation.	> 5 ans
	8	Plage de sable grossier et de galets	— Percolation rapide en profondeur jusqu'au substratum. — Formation d'une croûte de galets et d'hydrocarbures après un an.	— Accès souvent facile. — Moyens mécaniques pour favoriser l'autonettoyage. — Nettoyage au jet haute pression.	> 5 ans
	9	Vasières	— Percolation en profondeur due aux organismes fouisseurs et mouvements d'eau interstitielle.	— Accès difficile. — Faible autonettoyage dû aux marées. — Favoriser la biodégradation.	> 10 ans
	10	Marais	— Encroûtements en surface. — Migration dans le sédiment.	— Accès facile à difficile. — Nettoyage manuel. — Favoriser la biodégradation. — Pas d'engins mécaniques. — Autonettoyage nul.	> 10 ans

Cette figure est tirée des références bibliographiques (12) et (13).

Elle montre notamment que les zones les plus sensibles sont celles qui sont les plus abritées géographiquement parlant, et dont l'hydrodynamisme est le plus limitant possible.

En terme de sédimentologie, les polluants seront majoritairement piégés dans des zones à granulométrie la plus faible possible : ainsi ce seront les milieux à sédiments fins qui seront les plus fragilisés par une pollution marine.

ANNEXE G : Résumé de la méthodologie de pré-évaluation de l'impact d'un navire

A = Potentiel de toxicité (de 0 à 4)

A = Facteur de caractérisation permettant de s'affranchir de l'unité de masse d'un polluant dans le calcul de C

B = Masse de substance émise (unité : masse de substance/durée d'exposition)

C = Niveau d'impact d'une substance sur une catégorie d'impact (unité : masse /durée d'exposition) , pondéré par leur potentiel de toxicité

$C = A \times B$ (unité de référence à déterminer)

D = Niveau d'impact global d'un navire (unité : masse /durée d'exposition)

D = Somme des niveaux d'impacts des substances émises, pondérés par leur potentiel de toxicité

$D = \sum C$

E = Indice de sensibilité d'une zone géographique marine à une pollution du milieu marin (sédiments marins et eau de mer regroupés, pour les raisons développées au § I.2.a de la 4^{ème} Partie), allant de 1 à 10 et de A à D

F = Profil d'usage du navire (de 0 à 100 % de temps passé dans une zone géographique marine)

G = Vulnérabilité des zones géographiques, pondérée par le profil d'usage

G = Produit de E par F pour chaque zone géographique/masse d'eau considérée

$G = E \times F$

H = Valeur de l'impact du navire en fonction de la zone géographique

H = Produit de D par G pour chaque zone géographique/masse d'eau considérée

$H = D \times G$

H = Matrice finale, combinant les valeurs de D et G sous forme de valeurs quantitatives, qui seront définies par l'ENSAM après mise en application de cette méthodologie avec les valeurs issues des différents modèles de navires modélisés

I = Impact global d'un navire sur une catégorie d'impact, en fonction de son profil d'usage et de la sensibilité de l'écosystème en contact (et donc des masses d'eau associées) au cours de son cycle de vie

$I = \sum G_i$, où les valeurs de i (de 1 à n) représentent les n zones géographiques impactées par le navire

DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION ENVIRONNEMENTALE BASE SUR L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE INTEGRE AU PROCESSUS DE CONCEPTION

RESUME : L'éco-conception est aujourd'hui une démarche qui interpelle de plus en plus le monde industriel. C'est l'un des meilleurs moyens pour prendre en compte les impacts d'un produit sur l'environnement, i.e. les évaluer et les améliorer. Or intégrer l'éco-conception dans un processus de conception et pouvoir en faire dès l'avant-projet, s'avère extrêmement difficile lorsque les produits sont très complexes car soumis à de nombreuses contraintes (réglementaires, techniques, technologiques,...). C'est à cette problématique qu'ont été confrontés les concepteurs de DCNS, constructeur naval, et à laquelle, par le biais de cette thèse, nous avons essayé de répondre.

En créant des briques de données, basées sur le modèle de briques technologiques auxquelles sont ajoutées les informations nécessaires à une évaluation environnementale, il devient possible d'intégrer le paramètre environnemental dans le processus de conception, en tant qu'outil d'aide à la décision. La méthodologie proposée permet alors s'affranchir des habituels points faibles d'une démarche d'évaluation environnementale (l'accès aux bases de données) et d'amélioration environnementale (le manque de connaissances métiers spécifiques aux produits). Ainsi, un outil d'éco-conception « complet », l'OCEAN, basé sur l'ACV et dédié aux navires a été développé sur ce principe.

Mots clés : éco-conception, ACV (Analyse de Cycle de Vie), méthodologie, intégration, outil, paramètre environnemental, brique de données, évaluation environnementale, amélioration des performances, éco-indicateur spécifique, navire, océan.

DEVELOPMENT OF AN ENVIRONMENTAL DECISION SUPPORT TOOL BASED ON LIFE CYCLE ANALYSIS INTEGRATED INTO A DESIGN PROCESS

ABSTRACT: Eco-design is an approach that is increasingly used in the industrial world today. It is one of the best ways to take into account the environmental impacts of a product on the environment, i.e. to assess and improve them. Yet integrating eco-design into the design process as early as the preliminary design stage is extremely difficult when products are very complex, since they are subjected to numerous constraints (regulatory, technical, technological...). The designers at the shipbuilding company DCNS were confronted with this problem, and we have tried to help them answer it in this paper.

When environmental aspects are integrated further upstream in the design process, through the creation of data bricks based on the technological brick model (a concept frequently used in most companies), it is easier to deploy an eco-design approach based on appropriate, effective and efficient tools. The methodology proposed here makes it possible to avoid the usual drawbacks of environmental assessment (access to data bases) and environmental improvement (the lack of specific professional knowledge specific to the products). Based on this principle, we developed a "complete" eco-design tool called OCEAN, designed for shipbuilding and based on lifecycle analysis (LCA).

Keywords : eco-design, LCA (Life Cycle Analysis), methodology, integration, decision support tool, environmental parameter, data brick, environmental assessment, performance improvement, specific eco-indicator, ship, ocean.