



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/6381>

To cite this version :

Marion PRINCAUD, Alain CORNIER, Daniel FROELICH, Yves PIERSON - Développement d'un outil d'éco-conception et d'évaluation des impacts d'un navire sur l'environnement marin - 2009

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Développement d'un outil d'éco-conception et d'évaluation des impacts d'un navire sur l'environnement marin

Présentation des articles

Marion Prinçaud* - Alain Cornier - Daniel Froëlich*** - Yves Pierson******

Arts et Métiers ParisTech
Institut « Conception, Mécanique et Environnement »
Savoie Technolac – BP 295
73375 Le Bourget du Lac Cedex
*marion.princaud@ensam.eu
**alain.cornier@ensam.eu
***daniel.froelich@ensam.eu
****DCNS
Rue Choiseul
53311 Lorient
yves.pierson@dcnsgroup.com

RÉSUMÉ. Par une démarche proactive en éco-conception, DCNS, leader européen de la construction navale, souhaite disposer d'un outil permettant d'évaluer les impacts sur l'environnement et en particulier sur l'environnement aquatique, ainsi que d'un outil d'éco-conception qui permette d'améliorer la conception. C'est dans ce cadre qu'un consortium réunissant tous les spécialistes concerné, (Arts et Métiers ParisTech, Ifremer, SITA Suez, Bureau VERITAS et DCNS) a vu le jour.

ABSTRACT. By a proactive approach in ecodesign, DCNS, a major French shipbuilder, wants to create a tool to assess the impacts on the aquatic environment, but also an eco-design tool making it possible to improve design. It is in this context that a consortium gathering all specialists (Arts et Métiers ParisTech, Ifremer, SITA Suez and Bureau VERITAS) was born.

MOTS-CLÉS : éco-conception, navires, Analyse de Cycle de Vie (ACV), méthodologie, évaluation environnementale.

KEYWORDS: ecodesign, ships, Life Cycle Assessment (LCA), methodology, environmental assessment.

1. Introduction

Aujourd'hui, prévoir les impacts environnementaux d'un produit dès sa phase de conception est une vraie valeur ajoutée face à la concurrence, d'autant qu'il n'existe pas encore de réelles obligations de préservation environnementale concernant les navires militaires. Quand, en plus, il s'agit d'un produit aussi complexe qu'un navire, cela représente un réel défi, tant intellectuel qu'économique et éthique.

Ce défi a été proposé et un projet a été monté : le projet CONVENAV (CONception et cycle de VieEnvironnemental des NAVires). Il fait l'objet d'un consortium entre DCNS, Arts et Métiers ParisTech, l'Ifremer, Sita Suez et le Bureau Veritas. Dans le contexte actuel de remise en question de chacun de nos actes et de leurs conséquences sur l'environnement, DCNS veut améliorer les performances environnementales de ses navires. Le but du projet est de développer des outils d'éco-conception et de suivi pour le secteur naval (militaire en premier lieu, puis civil à terme).

Ce projet bénéficie d'un financement sur trois ans, avec un budget chiffré à un million d'euros (600k€ de subventions). Une partie du financement est attribué à chacun des participants du consortium. Une autre est prévue pour le développement informatique de l'outil d'éco-conception et d'évaluation environnementale des impacts. Une dernière partie sera dédiée au développement d'un outil de suivi.

Le choix d'un navire éco-conçu s'explique par une volonté d'innovation technologique, de compétitivité face à des concurrents moins soucieux vis-à-vis des problématiques environnementales, de prise d'initiative face aux directives et réglementations maritimes qui deviennent de plus en plus contraignantes pour les navires civils.

Le seul outil quantitatif d'évaluation environnementale actuellement disponible est l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). 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. 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 consiste donc à créer à la fois une méthodologie d'évaluation des impacts des navires sur l'environnement, avec un « zoom » sur le milieu aquatique, puisque c'est le lieu de prédilection des navires, mais aussi un outil d'éco-conception permettant d'améliorer les performances environnementales de ces navires.

2. Etat des lieux

La problématique est transverse à trois grandes thématiques :

- Les notions de conception et éco-conception
- Les navires
- L'environnement marin

Ces thématiques sont toutes concernées et encadrées par des réglementations et des directives, qu'elles soient locales (comme pour le port de Los-Angeles), nationales, européennes ou internationales.

2.1. *Le cadre réglementaire*

La réglementation intervient à tous les niveaux. Aujourd'hui, elle s'intéresse particulièrement aux substances nocives et/ou toxiques, que cela soit pour l'Homme ou pour les écosystèmes. Elle établit des seuils, voire interdit l'utilisation de certaines molécules (amiante, mercure, ...). Les différentes réglementations, législations et autres textes de préconisation (MARPOL, Convention de Bâle, Convention sur le démantèlement des navires, ...) permettent principalement de poser des limites à ne pas dépasser (émissions de substances, utilisation de certains matériaux restreinte ou interdite, ...).

Un autre point de préoccupation est la question particulièrement épineuse du démantèlement des navires, qui actuellement se fait à plus de 85% dans les pays asiatiques (Inde, Pakistan et Bangladesh) [Lloyds Register 2000]. La convention de Bâle a décrit un chantier de démantèlement type, qui, sur le terrain, n'est jamais suivi.

2.2. *La thématique environnement marin*

En parallèle mais aussi en convergence des thématiques « navires » et « conception, éco-conception », se place la thématique « environnement marin ». Si les thématiques « conception, éco-conception » et « navire » sont assez connues, ou théoriquement accessibles, il n'en est pas de même pour le thème de l'environnement marin. En effet, il prend en compte toute la partie « scientifique » du projet, avec les sujets relatifs à la biologie, à l'écologie, à l'écotoxicologie, à la chimie, à la géochimie, à la biochimie, ... c'est la partie la plus laborieuse à obtenir.

C'est à ce niveau que se situe un maximum d'incertitudes et de lacunes pour les bases de données. Cette partie de l'étude nécessite une veille et une mise à jour constantes des données. Quand ces dernières sont absentes, c'est par principe de précaution que des valeurs seuils sont définies et acceptées (en général par des

réglementations). C'est pour cette thématique que le cadre législatif est le plus important car il sert à combler des manques de références, ou à prendre les devants face à de nouvelles réglementations qui seront bientôt mises en place (par exemple, une législation pour les eaux de ballast).

2.3. La thématique « navire »

Les navires ont certaines caractéristiques qui leur sont propres et particulières :

- Ils sont en contact avec le milieu aquatique tout au long de leur vie (dès la fin de la phase de fabrication jusqu'à celle du démantèlement en passant par la phase d'utilisation)
- Ce sont des produits à longue durée de vie (30 ans en moyenne pour les bateaux militaires)
- Ils font l'objet de grands projets de réglementations (convention de Bâle, directives de l'OMI, inventaire des substances dangereuses, ...)
- Les navires font l'objet de régulières rénovations et améliorations (maintenance, peintures, évolution des équipements par obsolescence, ...)
- Il existe de nombreux types de bateaux (du caboteur au tanker, du voilier au porte-avion, ...) qui ont des modes de fonctionnement totalement différents et assez typiques, tant au niveau des consommations ou des rejets, qu'en temps et zones de navigation
- Pour les navires motorisés, c'est toujours la phase d'exploitation qui est la plus impactante sur l'environnement
- Ces produits ne sont créés qu'en petites séries, voire en version prototype
- La conception et la fabrication sont des processus longs, qui peuvent même être en partie simultanés, mais qui se déroulent généralement l'une après l'autre

Cette dernière caractéristique va nous permettre d'effectuer une Analyse de Cycle de Vie (ACV) dès la phase de conception. Et de là, de créer un outil basé sur l'ACV.

3. Conception et éco-conception

3.1. Notions générales en conception et éco-conception

C'est en intervenant dès les premières phases de conception que les impacts sur l'environnement peuvent être améliorés. Le rapport de l'ONU sur le 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 ».

La conception d'un produit, quel qu'il soit, est bâtie sur un schéma classique, défini par la norme ISO 14062 (Figure 1). 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.

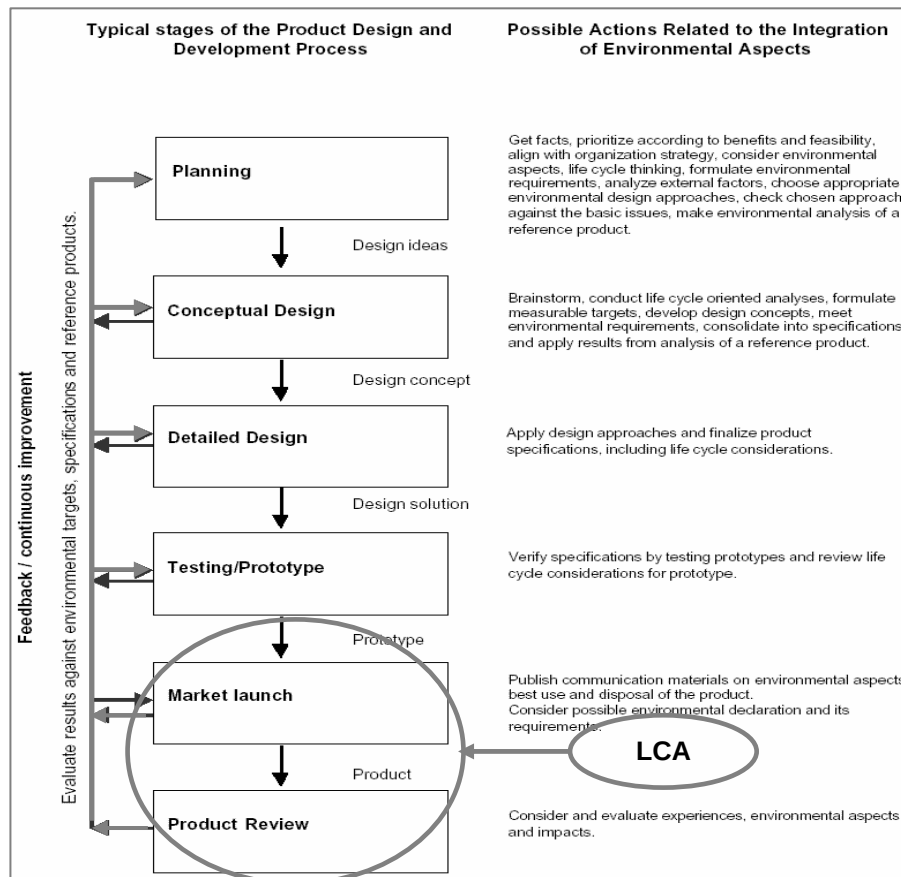


Figure 1. Intégration des aspects environnementaux dans le processus de conception d'un produit, d'après la norme ISO 14062

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 [AFNOR 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.

L'éco-conception repose sur deux principes fondamentaux [Le POCHAT 2005] :

- 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) (Figure 2)
- 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.

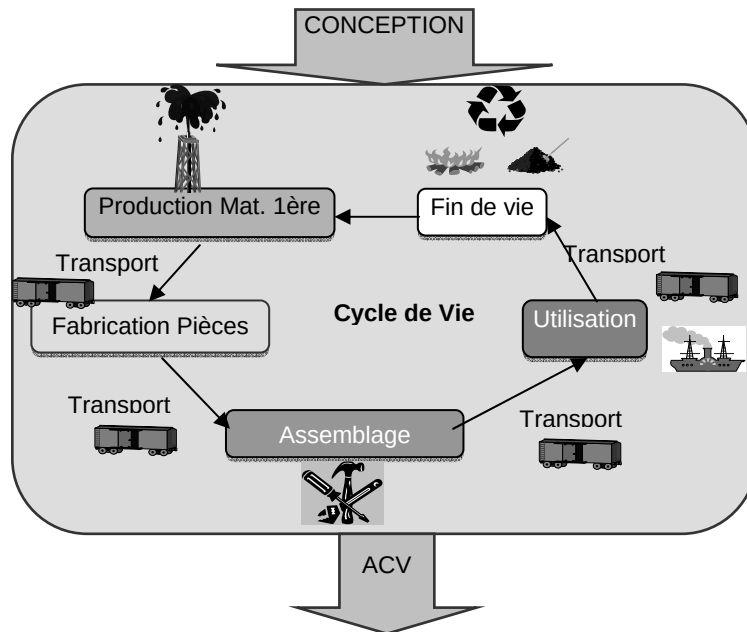


Figure 2. Schéma d'un cycle de vie classique, avec les étapes, les entrants et les sortants.

3.2. Notion d'Analyse de Cycle de Vie

Il existe différents outils disponibles pour étudier, quantifier et qualifier les impacts d'un produit sur l'environnement (ESQCV, guidelines, ACV, critères réglementaires, ...).

Les caractéristiques mêmes d'un navire (longues durée de conception, de vie, ...) permettent l'utilisation de l'outil d'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Il permet de calculer les impacts sur l'environnement d'un produit, tout au long de sa vie. On ne peut effectuer une ACV qu'à la condition *sine qua none* d'avoir réalisé un inventaire complet des entrants et des sortants mis en jeu pour ce produit. On obtient ainsi des données pour cinq étapes d'un cycle de vie :

- la production de matières premières
- la fabrication des pièces
- l'assemblage du produit
- l'utilisation du produit
- la fin de vie

Pour chacune de ces phases, il faut considérer le transport, ainsi que les entrants (énergie et matières) et les sortants (les émissions dans l'eau et dans l'air, les déchets). Communément, le cycle de vie peut se résumer aux trois grandes phases que sont la fabrication, l'utilisation et la fin de vie.

Les calculs effectués par le logiciel d'ACV (en l'occurrence, le logiciel SimaPro) nous donnent des résultats en termes de catégories d'impacts (pondérés ou non). On peut alors identifier les sources de « pollution », qu'elles soient dues à une substance ou à un process. Cette identification permet alors de faire un retour sur le modèle, et plus particulièrement en conception, en essayant d'autres solutions censées être moins impactantes sur l'environnement. L'ACV est donc un outil d'aide à la décision.

Le fait que l'ACV soit un outil complet lui donne un certain avantage : il compile à la fois les sciences dites « pures » (chimie, physique, biologie, ...) et les techniques mathématiques (analyse multicritères, calculs d'incertitudes, ...).

Le principal défaut de cet outil découle directement de son avantage : il est tellement complet qu'il en devient trop complexe. Et quand il s'agit de faire l'ACV d'un navire, cela devient un travail de spécialiste en ACV, qui est à la fois long et fastidieux, mais aussi coûteux.

Ainsi, pour le projet CONVENAV, si nous voulons utiliser l'outil d'ACV comme base d'un outil d'éco-conception, nous devons répondre à une triple contrainte :

- le simplifier suffisamment pour qu'il soit toujours complet, sensible aux variantes de conception envisagées, et acceptable d'après la norme ISO 14040

- qu’il soit utilisable par les concepteurs de DCNS (qui ne sont pas des spécialistes en logiciels d’ACV)
- qu’il puisse être utilisé à différentes étapes du cycle de conception, ce qui sous-entend que tout ne soit pas intégralement défini au niveau du produit.

4. Application à la conception d’un navire

Pour le produit que nous étudions, un navire, il nous faut considérer à la fois les approches globales et multicritères. Le fait d’étudier la conception de 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 [COWI, 2007]. Savoir aborder un navire militaire en termes de conception et d’évaluation environnementale donnera toute l’expérience pour appliquer ces outils à des navires moins complexes tels que les tankers et autres bateaux cargos qui représentent la majorité de la flotte internationale.

La construction d’un navire, et en particulier d’un navire militaire armé, ne se décide pas du jour au lendemain. Elle passe nécessairement par des étapes bien définies, qui sont suivies pendant la phase de conception. C’est le même processus de conception que celui défini par la norme ISO (Figure 1).

A DCNS, le processus de conception acté par le référentiel ISO 9001 définit une succession de phases. Pour chacune de ses phases, les concepteurs et architectes ont des objectifs précis en termes de précision et de « densité » de données. Plus le projet avance, plus les données sont précises et nombreuses.

La connaissance des bilans de masse (bilan massique de tous les composants d’un produit), et donc aussi des entrants et des sortants, doit nous permettre de réaliser des ACV plus ou moins « précises » pour les différentes phases de conception. Les résultats obtenus après une ACV doivent permettre un retour en conception à chacune des étapes clés de la conception (en avant projet et en développement).

4.1. Quelques notions sur la structuration et la construction d’un navire

DCNS conçoit ses navires sur la base d’une arborescence produit du navire répartie en plusieurs systèmes : flotteur, mobilité, vie à bord, auxiliaires et servitudes, communication et navigation, sécurité, et de combat. Dans l’objectif d’un outil applicable à tout type de navires, le système combat étant spécifique aux bateaux armés, et 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. 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. 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 se crée, en particulier pour la modélisation d'un cycle de vie en vue de réaliser une ACV de ce bateau (Tableau 1).

Tableau 1. Extrait de l'arborescence produit d'une frégate

Arborescence produit			
Systèmes	Sous-systèmes	Famille d'éléments	Rubriques
flotteur			
vie à bord			
mobilité	propulsion		
	sauvegarde de propulsion		
	manoeuvrabilité	carlingages	
		éléments de liaison	attaches et matériels de fixation
			traversées de ponts
			...

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

S'il 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. 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 navires, excepté ceux en bois, sont assemblés en anneaux, ou tranches. Ces anneaux possèdent plusieurs étages, appelés ponts, et sont cloisonnés (Figure 3). A travers ces anneaux, on retrouve tous les systèmes.

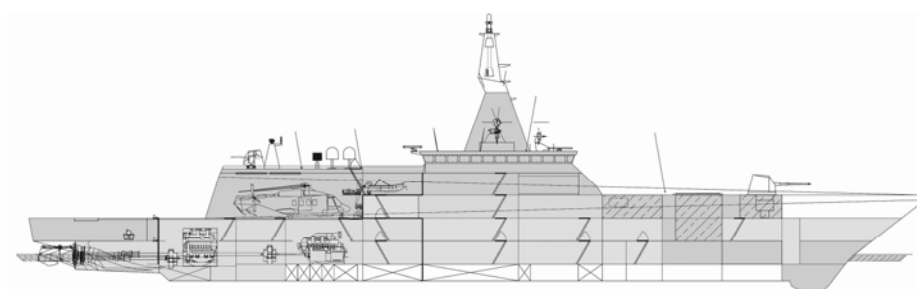


Figure 3. Schéma de la structure générale d'une frégate, avec son découpage transversal (anneaux) et longitudinal (ponts)

4.2. Les acteurs de la conception d'un navire

Pendant la conception d'un bateau de DCNS, différentes compétences sont attribuées en fonction des tâches définies :

- l'architecte, 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.
- 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 quel matériel ils ont besoin, et le positionne dans le navire.
- Les technologues, dont la fonction est dédiée à la mise en place des technologies à bord du navire. Ils choisissent le matériel standard dans des catalogues de référence (tuyauterie, câbles, instrumentation,...) et privilégient les technologies qui fonctionnent à tous les coups.

4.3. Analyse du processus de conception d'un navire

La conception d'un navire s'effectue en plusieurs étapes (avant-projet, avant-projet détaillé, développement et industrialisation). Nous laisserons de côté, pour l'instant, la phase d'avant-projet détaillé. Pour chacune des autres étapes, nous pouvons mettre en évidence un processus de conception et effectuer une ACV du navire. Deux points importants sont à noter : 1) le but du projet CONVENAV n'est pas d'avoir des ACV complètes, mais seulement des arborescences communes pour identifier les éléments qui permettront de créer l'outil d'éco-conception ; 2) les ACV ne prennent en compte que les phases de construction et d'utilisation. Pour la phase de fin vie, nous sommes en train de créer de nouveaux modules pour le recyclage et la réutilisation, car jusqu'à présent, seules la mise en décharge et la valorisation énergétique existent dans le logiciel. Or, pour faire une ACV complète, il faut considérer ces quatre options possibles pour la fin de vie, sachant que pour notre étude, différents scénarii de fin de vie seront considérés (du chantier de démantèlement le plus propre au plus polluant, avec différentes technologies possibles).

Quelle que soit la phase de conception, on retrouvera toujours le même schéma global, la même logique de réflexion et d'avancement : une boucle de conception itérative (Figure 4). Plus un projet avance, plus cette boucle s'affine, les données devenant plus précises et moins « flexibles ». Les hypothèses fixées en début de réflexion se voient validées (ou invalidées) pour chaque étape du cycle.

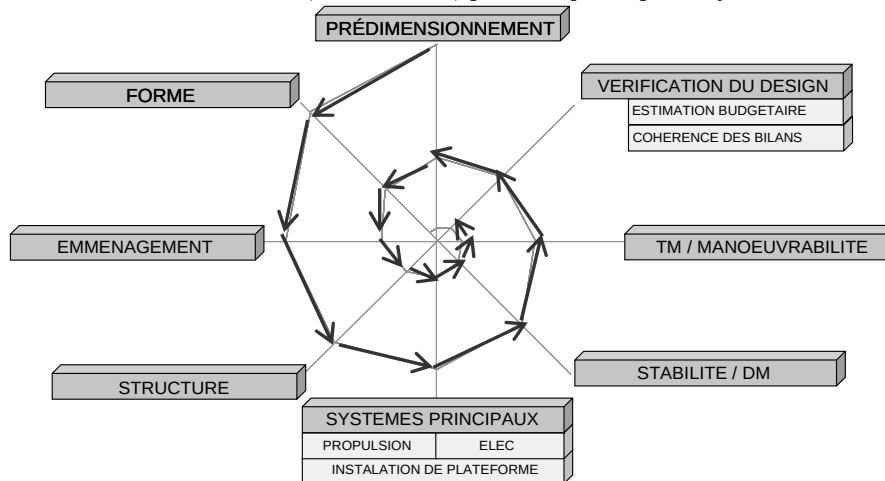


Figure 4. La boucle de conception itérative appliquée à un navire. Chacune de ces étapes est répétée jusqu'à l'obtention d'un niveau de précision suffisant et acceptable. La conception ne peut avancer tant qu'une étape n'est pas satisfaite et satisfaisante.

4.3.1. *Le processus de conception en phase d'avant-projet*

La phase d'avant-projet permet de déterminer la faisabilité technique et l'estimation budgétaire. C'est à cette occasion que différents concepts peuvent être envisagés. Ce sont principalement des systémiers et l'architecte qui interviennent au cours de cette étape.

Cette phase est elle-même subdivisée en sous-étapes. Dans un premier temps, il faut faire un état des lieux des exigences à prendre en compte. Ensuite, les concepteurs se basent sur un catalogue qui décrit plusieurs types de navires. Ce catalogue est une référence de conception qui permet d'avoir les premiers grands bilans pour les allocations en terme d'exigences (devis de masse, consommations énergétiques, bilan thermique, ...). A partir de là, le pré-dimensionnement des systèmes principaux devient assez détaillé, alors que celui des systèmes non principaux reste plus approximatif. Les études concernant les aménagements, la coque et la structure sont déjà bien définies et permettent d'avoir un plan d'emménagement d'ensemble. A cette étape de conception, le bilan de masse, et le profil de consommation de la propulsion et le bilan thermique sont définis à plus ou moins 20 %.

Il faut noter que le dimensionnement de l'appareil propulsif est quasiment toujours déterminé en fonction de la vitesse maximale à atteindre, même si cette dernière n'est que très rarement utilisée pendant la phase de vie du navire. Les navires militaires sont ainsi pratiquement tous surdimensionnés par rapport à leur utilisation courante.

Prenons un exemple que nous allons suivre au cours de chaque étape du processus de conception : la tuyauterie d'évacuation des eaux usées de la buanderie qui s'intègre aux réseaux des eaux grises (toutes les eaux usées de consommation courante d'un navire). Pour la phase d'avant-projet, l'architecte et les systémiers concernés vont déterminer, en fonction de la situation de la buanderie et du local de traitement ou de stockage des eaux grises, le cheminement de cette tuyauterie, sa longueur et son matériau. Les options techniques et technologiques qui sont faites (stockage des eaux grises ou traitement puis évacuation par exemple) déterminent la localisation de la tuyauterie, l'espace et l'énergie qui lui sont alloués,... qui lui seront alloués. Ainsi, en phase d'avant-projet, les possibilités d'action et de choix se portent sur les technologies, la localisation et le métrage des réseaux.

4.3.2. *Le processus de conception en phase de développement*

Cette phase de conception se fait elle aussi en plusieurs étapes. Après la signature du contrat, les choix technologiques et architecturaux ont été arrêtés. Il faut alors fiabiliser le développement. Ensuite, l'architecture détaillée est figée, de même que la structure. L'emménagement des zones est affiné par une finalisation de la conception des systèmes. A ce stade, le bilan de masse est déterminé à plus ou moins 5 à 10 %. Les études fonctionnelles vont être détaillées, puis les études

d'emménagement seront finalisées. Sur les plateaux de conception, tous les acteurs interviennent : l'architecte, les emménageurs, les coquiers, les systémiers et les technologues. Ces derniers travaillent en relation avec les fournisseurs.

Pendant cette phase, les premiers travaux de réalisation de la coque du navire peuvent être initialisés alors que les études fonctionnelles ne sont pas achevées.

Revenons à l'exemple du réseau d'évacuation des eaux usées. À cette phase, les technologues entrent en jeu. Ils définissent les équipements de façon plus précise, en choisissant leurs fournisseurs. Ici, cela se manifestera par une précision sur le choix du dimensionnement du réseau, avec par exemple, des données plus précises concernant le diamètre des tuyaux à utiliser.

4.3.3. *Le processus de conception en phase d'industrialisation*

Cette phase de conception se résume principalement à la réalisation du produit, avec une validation de la conception. Théoriquement, l'arborescence produit est entièrement définie, de même que le bilan de masse associé. Au niveau des concepteurs, les choix sont terminés, sauf si de nouvelles technologies s'avèrent inadéquates ou inaptes lors des essais.

Pour continuer sur l'exemple des réseaux de tuyauterie en conception, à ce stade, il n'y a pas de nouvelles informations fournies. Le dimensionnement est précis, et seules des corrections peuvent être effectuées si elles s'avèrent nécessaires. Dans ce cas-là, il peut y avoir un retour vers les systémiers et les technologues pour trouver une nouvelle solution.

4.4. Analyse du cycle de vie et appropriation de la démarche de conception d'un navire

Différentes ACV ont été réalisées sur la base du bilan de masse pour :

- Un navire en phase d'avant-projet (Ecoship)
- Un navire en phase de développement (frégate FREMM)
- Un navire industrialisé (frégate La Fayette)

Ces ACV ont permis de :

- Affiner et formaliser l'arborescence produit d'un navire, en validant le lien entre toutes les données du bilan de masse et l'ensemble systèmes / sous-systèmes
- Valider la possibilité de réaliser une ACV à chacune des phases de conception

- Identifier les méthodes de travail et le niveau de précision recherché par les systémiers dans la définition de leurs équipements pour chaque phase de développement.

La modélisation de ces navires nous permet d'identifier les principaux impacts et leurs origines au niveau du navire.

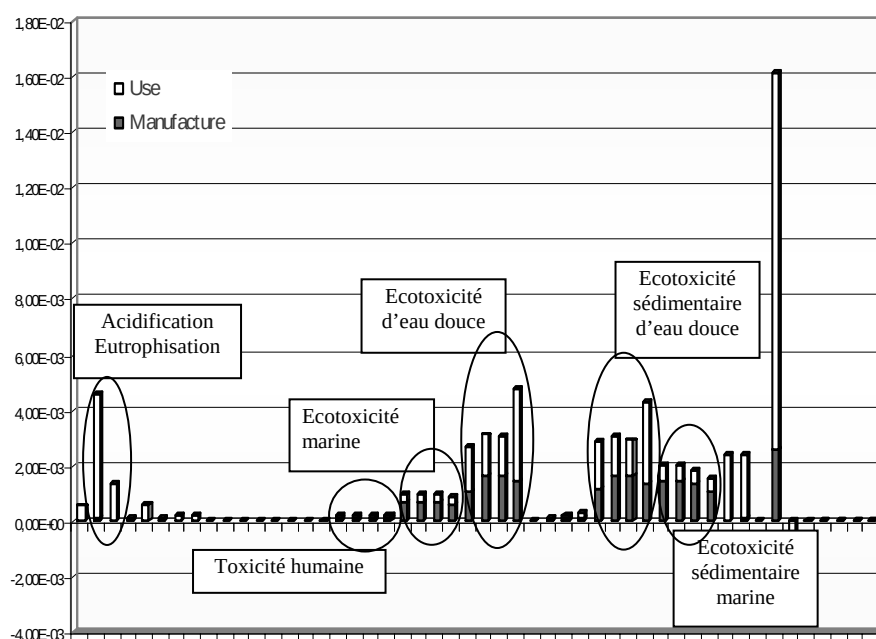


Figure 5. Résultats de l'ACV de la frégate La Fayette, par la méthode calcul d'impact CML 2001 (valeur de l'impact en millipoints, en fonction des catégories d'impact). On constate que c'est bien la phase d'utilisation qui est la plus impactante.

Nous avons choisi de calculer nos ACV avec la méthode de calcul d'impact CML 2001. En effet, après comparaison avec d'autres méthodes (EI 99, EDIP,...) c'est CML 2001 qui a été retenue. Elle est plus adaptée à notre cas d'étude, car elle prend en compte plus de substances, elle se base sur un compartimentage spatial plus complet, et surtout, elle prend en compte des catégories d'impact qui définissent bien le milieu marin, telles que les écotoxicités aquatique marine et d'eau douce, les écotoxicités sédimentaires marine et d'eau douce, ...

Dans un premier temps, on peut comparer les phases de construction et d'utilisation du navire (Figure 5). On constate ainsi deux résultats : 1) les impacts sont surtout sur les écotoxicités (pour l'eau douce et l'eau salée, avec leurs

compartiments sédimentaires associés), l'acidification, et l'eutrophisation ; 2) c'est bien la phase d'utilisation qui est la plus impactante pour la frégate. Ce résultat avait déjà été estimé par DCNS par un ratio de la répartition des impacts de 10-30 % pour la construction, de 70-90 % pour l'utilisation et de 5 % pour la fin de vie. Ce résultat est cohérent avec le cycle de vie d'un navire, qui est surtout représenté par sa phase d'utilisation d'une durée d'une trentaine d'années, avec une grosse consommation d'énergie (carburant, électricité, ...). Ce premier résultat permet déjà d'orienter les concepteurs sur les matériaux et technologies en cause, c'est-à-dire principalement le moteur.

Dans un second temps, chacune de ces deux phases de vie peut être passée à la loupe. L'impact de chaque système peut être calculé, et grâce au logiciel d'ACV, la source principale est identifiable, qu'elle soit un matériau utilisé, ou un process.

Pour la phase de fabrication, l'impact de chacun des systèmes est calculé (Figure 6). On constate clairement que plus de 50 % des impacts sont dus uniquement à la fabrication du système flotteur (la coque, sa structure, et ses peintures).

Pour la phase d'utilisation, on calcule l'impact de chacun des « systèmes de vie » du navire : la consommation en eau, la production électrique à bord, la propulsion du navire et la maintenance (Figure 7). Là encore, la cause principale des impacts environnementaux reste l'utilisation du moteur (production d'électricité et propulsion).

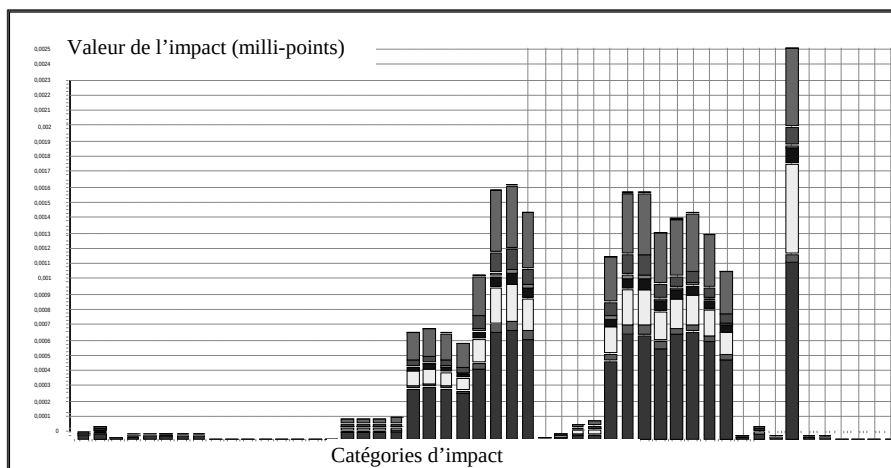


Figure 6. Résultats de l'ACV de la frégate La Fayette, pour la phase de construction et par la méthode de calcul d'impact CML 2001. Les différentes nuances de gris représentent les différents systèmes du navire. Les deux qui impactent le plus sont les systèmes flotteur et mobilité.

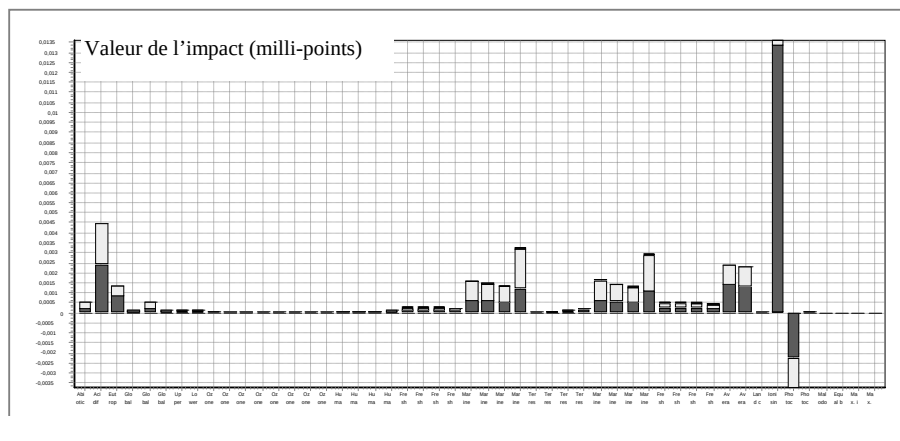


Figure 7. Résultats de l'ACV de la frégate La Fayette, pour la phase d'utilisation et par la méthode de calcul d'impact CML 2001. Les différentes nuances de gris représentent les différents systèmes de vie (consommation en eau, production électrique à bord, propulsion du navire et maintenance). Les deux qui impactent le plus sont la production électrique à bord et la propulsion du navire.

5. L'outil d'éco-conception

Comme nous l'avons vu précédemment, les navires sont des produits très complexes et assez uniques en terme de conception. Ils ont une longue phase de conception, mais aussi une longue durée de vie, et surtout, ils ne sont pas vraiment construits en série, avec, au maximum, pour la même gamme, seulement 5 à 6 bateaux construits. Ce type de produit pourrait être comparable aux camions, aux trains, aux avions, voire même aux navettes spatiales. Il nous faut donc mettre au point une méthodologie pour créer un outil d'évaluation d'impact et d'éco-conception innovant. A ces fins, nous devons nous approprier la conception d'un navire et ses spécificités. C'est ce que nous avons vu en partie dans le paragraphe précédent, et que nous allons approfondir ci-dessous. Nous allons aussi voir comment l'outil va être élaboré, et comment il sera intégré pour finalement évaluer les impacts d'un navire sur l'environnement marin.

5.1. Une appropriation de la conception d'un navire

Pour arriver à créer un outil d'éco-conception et d'évaluation environnementale des navires, un consortium a été monté. Il réunit toutes les compétences nécessaires : les concepteurs (et « clients » du projet) chez DCNS, la réglementation chez Bureau Veritas, les spécialistes en filières fin de vie chez Sita Suez, les spécialistes de la mer chez Ifremer, et enfin, ceux qui constituent le fil rouge du

projet, mais aussi qui réunissent les pièces du puzzle chez Arts et Métiers ParisTech. Dans un premier temps, il a fallu établir un dialogue entre tous ces protagonistes, chacun ayant une tâche bien définie.

Nous nous sommes appropriés la conception d'un navire, avec :

- ses différentes étapes : des phases d'avant-projet à l'industrialisation en passant par le développement
- ses intervenants : les architectes, les systémiers, les technologues mais aussi les fournisseurs
- ses limites : économiques, techniques, technologiques, législatives, ...

Cette appropriation est passée par la modélisation des cycles de vie de trois navires, qui représentent chacun une phase de conception. Le but de ces modélisations n'est pas d'avoir une ACV complète, mais de connaître l'arborescence produit de ces navires, pour en ressortir une arborescence type, généralisable à tout type de navire, qu'il soit un tanker ou un paquebot. Ainsi, pour chaque système identifié, la conception est différente si on se place en phase d'avant-projet ou de développement. Plus le projet avance en conception, plus il est précis, en termes qualitatif et surtout quantitatif. Par contre, plus il avance, moins la latitude d'action des concepteurs est grande.

5.2. La méthodologie d'éco-conception

Reprenons l'exemple sur le réseau d'évacuation des eaux grises partant de la buanderie. En avant-projet, ce sont donc des décisions sur les technologies, la localisation et le métrage qui sont prises. En phase de développement, les choix s'effectuent quant aux fournisseurs, pour définir précisément les caractéristiques des matériaux. En phase d'industrialisation, ce sont surtout des corrections à ces choix qui sont faites, si nécessaires.

Cet exemple est assez représentatif du travail à effectuer pour identifier tous les éléments, tous les paramètres qui constitueront les variables de notre outil de conception. Pour chaque système, sous-système et rubrique, nous identifions les paramètres clés qui pourront servir aux concepteurs, mais qui seront aussi réintégrables à l'outil qui calculera les impacts sur l'environnement.

Comme nous l'avons déjà expliqué, le but de cette étude est d'intégrer un outil basé sur l'ACV dans un processus de conception.

L'outil va se construire de la façon suivante. Après la modélisation des navires dits de référence, nous avons mis en avant une structure du navire découpée en systèmes / sous-systèmes / rubriques, en fonction de chaque phase de conception. Pour chacun de ces éléments nous avons identifié les principaux paramètres variables (comme la masse, le matériau employé, la consommation électrique,...) (Tableau 2). Cette première étape est faite en coordination avec le personnel de DCNS concerné, car il est indispensable d'avoir leur mode de fonctionnement lors

d'une conception de navire. En effet, ce sont eux les décideurs, et ils savent si, par exemple, une technologie est modifiable ou non. Nous apportons une première sélection de paramètres variables (ceux que l'on retrouve dans le logiciel d'ACV), et ils décident de la pertinence de chacun de ces paramètres. Dans l'ensemble, c'est surtout une variation quantitative des données qui existe entre les phases de conception. Le niveau qualitatif est pratiquement entièrement défini dès la phase d'avant-projet, et cela pour la majorité des éléments du devis de masse du navire.

Tableau 2. *Un exemple de quelques paramètres identifiables pour la coque, en fonction des phases de conception et des phases de vie.*

		phases de vie		
		fabrication	utilisation	fin de vie
phases de conception	avant-projet	masse / longueur matériaux process de fabrication process d'assemblage	maintenance	découpe % recyclage % réutilisation ...
	développement	masse / longueur ...		
	industrialisation	...		

L'outil d'éco-conception sera le résultat du croisement et de la compilation de plusieurs matrices de données :

- une matrice purement « base de données » : extraites des bases de données utilisées par SimaPro, ce sont des bases de données à la fois sur les matériaux et les substances, mais aussi sur les process mis en jeux lors de la fabrication et de l'assemblage
- une matrice « arborescence produit » : elle fera apparaître les systèmes, sous-systèmes et rubriques généralisables à l'ensemble des bateaux
- une matrice « données d'entrée » : les informations et paramètres utiles aux concepteurs, en fonction de la phase de conception, comme par exemple, la masse, le type de matériau, ...

Le couplage de ces matrices sera basé sur la méthode de calcul d'impact CML 2001, ce qui permettra d'obtenir une valeur d'impact par catégorie d'impact (Figure 8). En ce qui concerne la différenciation entre les phases de conception, c'est principalement au niveau de la matrice « données d'entrée » que se situeront les

variations. Typiquement, en phase d'avant projet, les paramètres seront moins nombreux, car pas totalement définis par les concepteurs.

Cet outil doit permettre d'obtenir des résultats aussi fiables que ceux d'une ACV complète, mais qui seront simplifiés. Effectivement, les catégories d'impact auront été « sélectionnées » pour leur pertinence vis-à-vis de l'étude et des types de résultats attendus par les concepteurs, dans le but d'une éco-conception. L'objectif est de faciliter l'approche que vont en avoir les utilisateurs, pour non seulement l'entrée des données, mais aussi pour la sortie des résultats.

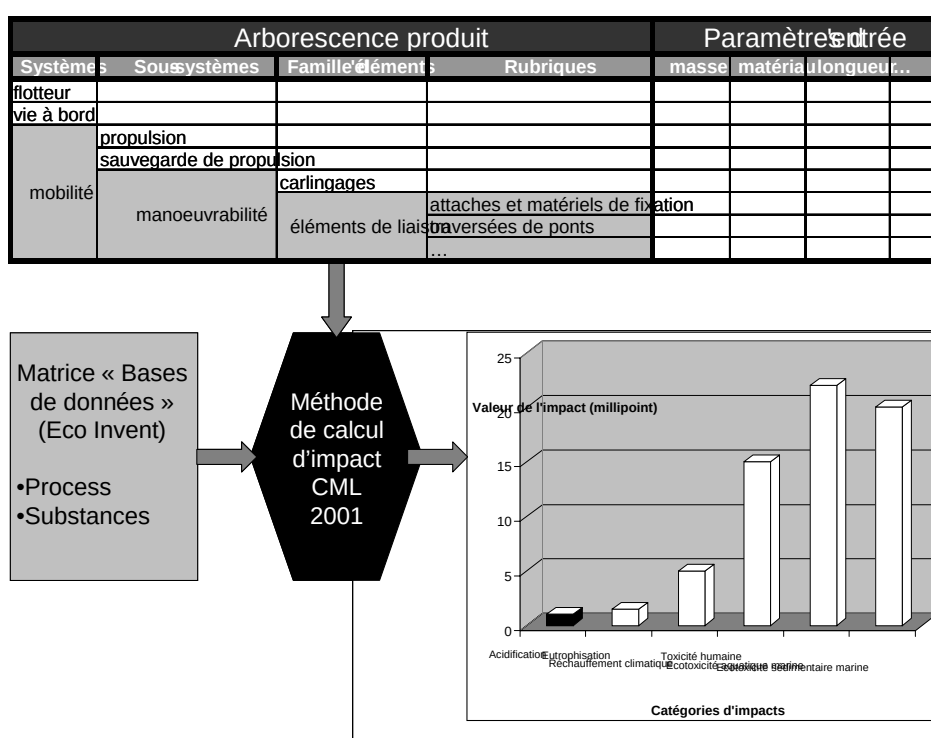


Figure 8. La trame de l'outil de conception : une combinaison par la méthode de calcul d'impact CML 2001, entre une matrice « bases de données » et une matrice « arborescence produit et ses paramètres d'entrée ». Le résultat obtenu sera du type graphique, et donnera des valeurs d'impact pour les catégories d'impact retenues.

Pour simplifier l'interface entre l'utilisateur et l'outil, ce dernier sera présenté de façon à être intuitif, avec une sélection de la phase de conception, puis de la phase de vie, ensuite du système, du sous-système, de la rubrique et enfin de la sous-

rubrique. Cette dernière, grâce à une modélisation 3D du futur navire pourra facilement être localisée, ce qui donnera une information supplémentaire en termes de conception. Par exemple, en vue d'une future déconstruction, pouvoir localiser un groupe de pièces qui aura le même scénario de fin de vie, peut permettre de concevoir leur installation dans une même zone du bateau. Après la sélection de la sous-rubrique, l'utilisateur pourra choisir les paramètres qu'il souhaite (Figure 9). Au final, il doit être possible d'avoir des données plus globales pour définir les principaux paramètres d'un sous-système, voire d'un système.

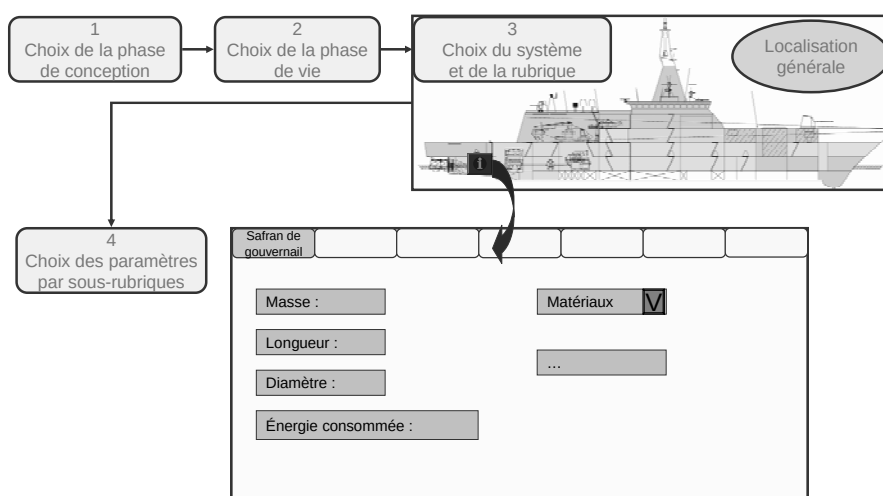


Figure 9. Une interface possible pour le choix des caractéristiques des sous-rubriques

Parallèlement à ce côté « choix technique », nous disposerons de résultats de type ACV, vu que notre outil est basé entièrement sur de l'ACV. Ainsi, nous pourrons identifier les sources de pollution, et ainsi orienter les concepteurs vers les éléments « prioritaires ». Cela doit devenir une vraie synergie entre les concepteurs et l'analyste environnemental. Avec le temps et l'appropriation de cet outil par chacun, si le budget et les technologies le permettent, les éléments les plus impactants seront améliorés.

6. Conclusions et perspectives : vers une évaluation des impacts environnementaux

Le but du projet est de créer un outil qui soit capable de faire de l'éco-conception, mais aussi de l'évaluation d'impact sur l'environnement marin. En fait, la partie de l'outil ne touchant qu'à la conception va être couplée à une nouvelle matrice de calcul d'impact qui va permettre de différencier les impacts d'un navire en fonction de sa zone de navigation. En effet, la grosse spécificité d'un bateau par rapport à un produit plus « classique », c'est qu'il passe toute sa vie en contact avec l'eau. Mais cette eau n'est pas toujours constante. Il existe autant de masses d'eaux différentes que de types de sols. Et elles ont toutes des comportements différents, en particulier face aux substances qu'elles reçoivent. D'où le réel intérêt de créer de nouveaux compartiments aquatiques, pour mieux évaluer les impacts d'un navire.

A terme, cet outil d'éco-conception et d'évaluation d'impact environnemental doit pouvoir permettre de :

- faire une évaluation de l'impact de n'importe quel navire
- faire une évaluation de l'impact du navire étudié en fonction de la phase de conception
- faire une évaluation de l'impact du navire étudié en fonction de la phase de vie
- permettre un retour en conception en identifiant les sources de pollution
- améliorer les performances environnementales du navire

Mais pour pouvoir mettre en œuvre cette démarche d'éco-conception, et dans l'optique d'une amélioration des performances environnementales, il est nécessaire de sensibiliser tous les acteurs et décideurs qui travaillent sur la conception des navires. Et il faut leur permettre d'évaluer que chaque choix, chaque décision prise en conception a une incidence sur les impacts environnementaux finaux. Car l'analyste environnemental ne fournira que des préconisations d'améliorations, et cela sera non seulement à l'architecte, maître d'œuvre et détenteur de la répartition budgétaire mais aussi aux systémiers et aux technologues, en trouvant de nouvelles technologies d'optimiser l'impact environnemental des navires.

Remerciements

Pour leur collaboration au sein du consortium, les auteurs remercient :

- Jade Garcia, Christophe Chabert, Jacques Motreff, Yves Pierson et Catherine Bonnard de DCNS
- Olivier Lefort, Daniel Masson et Mehdi Abadane d'Ifremer
- Laurent Galtier et Anthony Simao de Sita Suez

- Philippe Corrigan du Bureau Veritas
- Et enfin Carole Charbuillet, Claire Mabit, Alexandre Morcillo, et François Privat des Arts et Métiers ParisTech

6. Bibliographie

- ALEXANDER Brett, BARTON Geoff, PETRIE Jim, ROMAGNOLI Jose, “Process synthesis and optimisation tools for environmental design: methodology and structure”, *Computers and Chemical Engineering* 24 (2000) 1195-1200
- ALTING Leo, BRABECH LEGARTH Jens, “Life Cycle Engineering and Design”, *Annals of the CIRP Vol. 44/2/1995*
- AZAPAGIC A., “Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation”, *Chemical Engineering Journal* 73 (1999) 1±21
- AZAPAGIC A., MILLINGTON A. and COLLETT A., “Methodology for integrating sustainability considerations into process design,”, 2006 *Institution of Chemical Engineers, Trans IChemE, Part A*, June 2006, *Chemical Engineering Research and Design*, 84(A6): 439–452
- BOEGLIN, VEUILLET « Introduction à l’analyse de cycle de vie (ACV) », département éco-conception & consommation durable/direction clients, *note de synthèse externe*, mai 2005
- BRANDES L.J., Den HOLLANDER H., Van De MEENT D. “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, report n° 719101029, December 1996
- CORNIER, HOULOT, JALMAIN, LE FOLL, AUTRET, CONAN « Elaboration d’un passeport vert pour une frégate de type FREMM, phase 2 du programme: rédaction du guide utilisateur du Passeport Vert », version (provisoire) 06/06/07
- DREYER L., NIEMANN A., HAUSCHILD M. “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, 2003
- DUFLOU J., DEWULF W., SAS P., “Pro-active Life Cycle Engineering Support Tools”, *Dept. of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium*
- FAGNENT, MARCADE « Développement d’outils d’éco-conception pour les navires militaires civils », rapport de stage, juin 2008
- GOEDKOOOP « SimaPro 7 – introduction into LCA », v.4.2, feb. 2008

- GOEDKOOPT, SPRIENSMA « The Eco-indicator 99 – A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment – Methodology annex », *Pré consultants*, 3rd edition, 22 June 2001
- HARSCOET E., FROELICH D “Use of LCA to evaluate the environmental benefits of substituting chromic acid anodizing (CAA) », *Journal of Cleaner Production* 16 (2008) 1294e1305, 2007
- HERMANN B.G., KROEZE C., JAWJIT W. “Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performances indicators”, *Cleaner Prod.* 15, 1787-1796, 2007
- HUIJBREGS M. “Priority assessment of toxic substances in the frame of LCA – Development and application of the multi-media fate, exposure and effect model USES-LCA”, University of Amsterdam, May 1999.
- HUNKELER David, « Societal LCA Methodology and Case Study », *Int J LCA* 11 (6) 371 – 382 (2006)
- HUNKELER David, VANAKARI Evdokia, “EcoDesign and LCA Survey of Current Uses of Environmental Attributes in Product and Process Development”, *Int. J. LCA* 5 (3) 145 – 151, 2000
- IMO (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION), “Guidelines for the development of the ship recycling plan”, *MEPC/Circ.419*, 12 November 2004
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION “guidelines for the development of the ship recycling plan”, *MEPC/Circ.419*, 12 November 2004
- ISO 14040: 2006 “Environmental management -- Life cycle assessment - Principles and framework » *International Standard Organisation*, 2006
- ISO 14044: 2006 “Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines” *International Standard Organisation*, 2006
- ISO 14062: 2002 “Environmental management -- Integrating environmental aspects into product design and development” *International Standard Organisation*, 2002
- JANIN M. « Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu: construire la cohérence entre outils et processus », thèse de doctorat, ENSAM, Chambéry, 2000
- LE POCHAT S. « Intégration de l'éco-conception dans les PME: proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits », thèse de doctorat, ENSAM, Chambéry, 2005
- MILLET D., BISTAGNINO L., LANZAVECCHIA C., CAMOUS R., POLDMA T. « Does the potential of the use of LCA match the design team needs? », *Journal of Cleaner Production* 15 (2007) 335e346, 2005

- OECD “Towards sustainable development: environmental indicators”, *OECD*, Paris, 1998
- PANT Rana, VAN HOOFF Gert, SCHOWANEK Diederik, FEIJTEL Tom C.J., KONING Arjan de, HAUSCHILD Michael, PENNINGTON David W., OLSEN Stig I. and ROSENBAUM Ralph, “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, 2004
- REAP J., ROMAN F., DUNCAN S., BRAS B. “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, 2008
- ROSENBAUM Ralph K. & BACHMANN Till M. & SWIRSKY GOLD Lois & HUIJBREGTS Mark A. J. & JOLLIET Olivier & JURASKE Ronnie & KOEHLER Annette & LARSEN Henrik F. & MACLEOD Matthew & MARGNI Manuele & MCKONE Thomas E. & PAYET Jérôme & SCHUHMACHER Marta & VAN de MEENT Dik & HAUSCHILD Michael Z., “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, 2008
- SINGH R.J., MURTY H.R., GUPTA S.K., DIKSHIT A.K. “An overview of sustainability assessment methodologies”, *Ecological Indicator*, May 2008
- SMEETS E., WETERINGS R. “Environmental indicators typology and overview” *European Environment Agency*, Copenhagen, Denmark, 1999
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY AND SCIENCE APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION. “Introduction to LCA” *LCAccess - LCA 101*. 2001.
- VAN BERKEL René, WILLEMS Esther and LAFLEUR Marije, “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, 1997
- VAN BERKEL René and LAFLEUR Marije, “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, 1997
- VAN BERKEL René, VAN KAMPEN Michela, KORTMAN Jaap, “Opportunities and constraints for Product-oriented Environmental Management Systems (PEMS)”, *Journal of Cleaner Production* 7 (1999) 447–455