



HAL
open science

**Bénéfices et limites d'une approche CSP/ACV pour
l'écoconception de systèmes complexes ; application à
une navette maritime à motorisation hybride
Application navette maritime**

Nicolas Tchertchian, Pierre-Alain Yvars, Dominique Millet

► **To cite this version:**

Nicolas Tchertchian, Pierre-Alain Yvars, Dominique Millet. Bénéfices et limites d'une approche CSP/ACV pour l'écoconception de systèmes complexes ; application à une navette maritime à motorisation hybride Application navette maritime. 2012. hal-00832425

HAL Id: hal-00832425

<https://hal.science/hal-00832425>

Preprint submitted on 11 Jun 2013

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.

Bénéfices et limites d'une approche CSP/ACV pour l'écoconception de systèmes complexes ; application à une navette maritime à motorisation hybride

Application navette maritime

Nicolas Tchertchian¹, Pierre-Alain Yvars², Dominique Millet¹

'Ecodesign & Optimization of Products' Lab'

S U P M E C A - Toulon, Quartier Mayol, Maison des Technologies, 83000 Toulon, France

ABSTRACT

Cet article vise à répondre à l'inexistence d'outils d'écoconception pour les phases amont de la conception de produits, particulièrement dans le domaine des systèmes complexes. Un système complexe possède de nombreux sous-systèmes interdépendants, plusieurs alternatives de conception pour chaque sous-système, des conditions d'utilisation variables affectant le choix des solutions technologiques et des performances environnementales ; c'est en outre un système qui évolue tout au long du cycle de vie et en interaction avec l'environnement extérieur. Ces caractéristiques mènent rapidement à un grand nombre de configurations à évaluer pour identifier le système optimal sur le plan de l'environnement (de façon multicritère et sur l'ensemble du cycle de vie). Pour éco-concevoir un tel système le plus en amont possible nous avons élaboré, à partir de la littérature, 3 approches méthodologiques différentes, chacune faisant intervenir l'outil « Life Cycle Assessment »: (1) l'approche intuitive du concepteur basée sur des règles simplistes ou du Pareto combinée au LCA, (2) l'approche basée sur des plans d'expériences combinée au LCA, et (3) l'utilisation d'algorithmes de résolution de problème basé sur le calcul par intervalles combinée au LCA. Ces trois démarches « Pareto/ACV », Plan d'expériences/ACV et CSP/ ACV ont été testées dans un projet d'éco-conception d'un système complexe : une navette maritime de transport de passager à motorisation hybride. Les résultats obtenus par chacune des 3 démarches sont évalués selon différents critères : temps d'utilisation, de formation, d'exploration du champ du possible, d'interprétabilité des résultats et de ré exploitabilité. Les résultats font apparaître que la démarche CSP/ ACV présente des avantages en particulier sur les critères d'exploration du champ du possible, d'interprétation des résultats et sur le gain de temps permis par la ré exploitation des résultats obtenus sur des systèmes proches.

1 INTRODUCTION

L'intégration de la dimension environnementale dans le processus de conception de ces systèmes est un processus délicat. En effet un système complexe consiste en un ensemble interdépendants de sous-ensembles hétérogènes, par conséquent l'objectif de la conception de système complexe est d'assurer l'intégration appropriée de diverses fonctions, des techniques et des solutions technologies en respectant les meilleures performances environnementales sur son cycle de vie (Argarwal and Mukkamala, 2005). Aujourd'hui les approches traditionnelles d'écoconception permettent soit de réaliser des évaluations environnementales à des fin curatives (LCA) Hauschild et al. (2005), soit d'orienter le concepteur vers des solutions améliorées par le biais de « guidelines » (Wimmer and Züst, 2001). Ces deux types d'approches, utilisées pour concevoir des systèmes complexes, conduisent le plus souvent à des sous-optimisations locales inadaptées à la conception de systèmes complexes. Il est alors nécessaire de mettre en œuvre de nouvelles pratiques d'écoconception plus adaptées à la conception de systèmes complexes.

Une navette maritime pour le transport de passagers, par exemple, est un système complexe qui possède de nombreux sous-systèmes interdépendants, plusieurs alternatives de conception pour chaque sous-système, des conditions d'utilisation variables affectant le choix des solutions technologiques et des performances environnementales, c'est un système qui évolue tout au long du cycle de vie (usure, refit) et en interaction avec l'environnement extérieur (Kolb, 2009), (Cilliers 1998).

La solution pour diminuer la consommation d'énergie repose sur une combinaison de solution : changement technologique, redéfinition du besoin des utilisateurs, redimensionnement au juste nécessaire des performances, utilisation de matières renouvelables...

46 Dans cet article nous proposons une approche méthodologique originale permettant de s'affranchir des problèmes de
 47 configuration de produits complexes en utilisant une approche par contraintes (CSP : Constraint Satisfaction Problem). De
 48 cette façon l'évaluation environnementale du système n'est plus faite à la fin du processus de conception de produit mais
 49 lors de la phase de définition de l'architecture du système.

50 Dans la section 2 nous définissons les caractéristiques d'un système complexe.

51 Dans la section 3 nous procédons à un état des lieux des outils d'éco-évaluation et d'amélioration environnementale et
 52 dresserons un cahier des charges pour une méthode d'écoconception de systèmes complexes.

53 Dans la partie 4, trois approches X/ ACV pour la conception de systèmes complexes sont présentées de façon théorique:
 54 Pareto/ ACV, Plans d'expériences/ ACV et CSP/ ACV. En partie 5, ces 3 approches méthodologique différentes sont
 55 appliquées dans le cadre de la conception d'une nouvelle navette maritime de transport de passagers à technologie
 56 hybride; dans la dernière partie de cet article nous discuterons des résultats et performances de ces 3 approches par rapport
 57 au cahier des charges défini en partie 2 puis introduirons les développements futurs de l'approche CSP/ACV.
 58

59 1.1 (Cilliers, 1998)Outils et méthodes d'écoconception

60 De nombreux outils d'écoconception sont présentés dans la littérature. Des synthèses très exhaustives de ces outils sont
 61 disponibles dans la littérature, nous citerons les travaux de Zhang et al. (1997), Beauman et al. (2002), Alting and Legarht
 62 (1995), Gungor and Gupta (1998), Hauschild et al. (2005), Ilgin and Gupta (2009), Bovea and Pérez-Belis (2012). Sur la
 63 base de ces états de l'art nous avons analysé puis classifié les outils selon deux catégories : les outils pour des systèmes
 64 simples et les outils pour des systèmes complexes (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Systèmes « Simples »		Systèmes « Complexes »	
Methods and Tools	Case study	Methods and Tools	Case study
Les outils d'évaluation simplifiés : Simplified LCA, MIPS, MET Martix	Coffee Machine (Brezet and Van Hemel, 1997), Visser (1995)	LCA	Car (VW) Ship (LCA-Ship, 2004)
		Design of Experiments	Propulsion de véhicule de transport spatial (Unal et al., 1993)
		Linear programming/ LCA	mineral-processing system producing boron products (Azapagic and Clift, 1999)
EcoPas	electric fruit juice (Dewulf, 03)	Computational approach	Hull form Optimisation (van der Ploeg, 2011)
Environmental QFD	Vacuum cleaner (Erzner) Air dryer (Hermann, 2007)		
Ecodesign Pilot	Water Kettle (Wimmer, 01)		
LIDS Wheel	Coffee Machine (Visser, 95)		
The Ten Golden Rules	Squeezer, Mini chopper, clipper (Luttrop and Lagerstedt, 2006)		
Specific Guidelines	Choix matériaux (White, grey and black list) (Volvo) AT&T checklists (Allenby, 2000) Kodak Guidelines (Betz and Vogel, 1996) ...		

65 **Table 1 : Outils et méthodes d'écoconception**

66 1.2 Outils et méthodes d'écoconception de produits complexes

67 3.2.1 Approche Pareto/ ACV

68 La première approche s'appuie sur une combinaison « Pareto »/ ACV ; elle peut être, de façon générique, décomposée en
 69 6 phases consécutives (cf. flowchart 1).

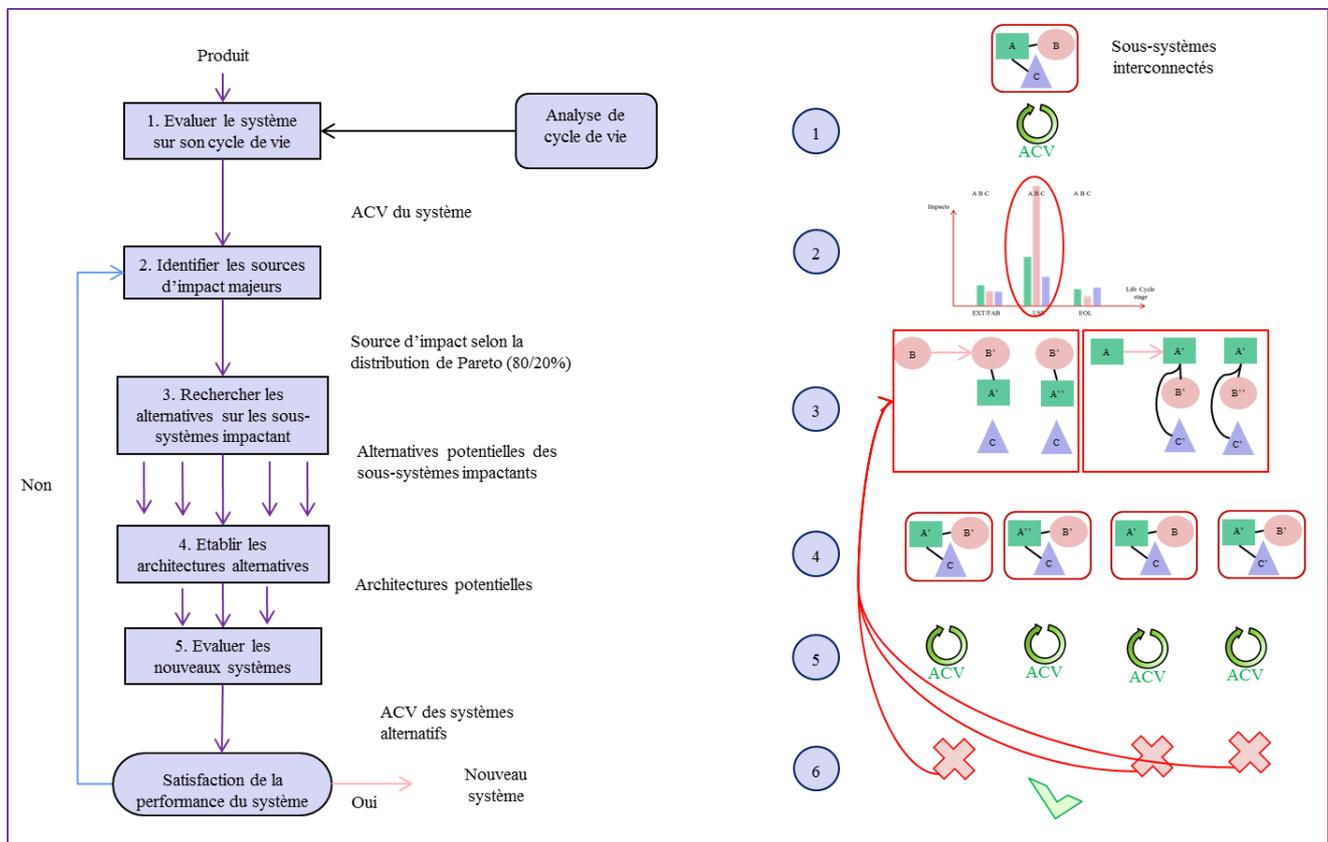
70 L'approche « Pareto »/ ACV consiste à une optimisation intuitive des systèmes ou sous-systèmes apparaissant comme les
 71 plus impactants. Selon la loi empirique de Pareto, environ 80 % des effets sont le produit de 20 % des causes, en se
 72 focalisant sur ces 20% du système le concepteur peut espérer une réduction importante des impacts environnementaux.
 73 Dans cette approche le concepteur prend appuie sur sa compréhension implicite du système. Ce raisonnement intuitif
 74 consiste à optimiser par tâtonnement les éléments des principaux sous-systèmes afin d'améliorer globalement les
 75 performances du système. Classiquement, dans le domaine des transports les critères d'optimisation sont la masse du
 76 système, les modes de fonctionnement et les critères économiques et environnementaux.

77 Après identification des sources d'impacts majeurs et d'une recherche de solutions alternatives, il est alors nécessaire de
 78 réitérer des analyses de cycle de vie. A chaque itération l'objectif est d'affiner la définition du nouveau système et de
 79 réduire les impacts du système sur le cycle de vie.

80 Cette approche très « naturelle » elle est toutefois très consommatrice de temps car chaque solution alternative doit être
 81 évaluée par une ACV ; ceci est d'autant plus long s'il existe des relations de couplage entre les différents sous-ensembles,
 82 induisant de ce fait leur complet redimensionnement à chaque itération. Par ailleurs, en se focalisant sur 20% du système,
 83 cela limite l'exploration du champ des solutions possibles. Enfin les résultats sont peu réutilisables pour l'éco-conception
 84 de systèmes similaires.

85 Appliqué aux systèmes complexes, l'ACV encourage le concepteur à se concentrer sur des solutions alternatives
 86 appropriées sur des étapes du cycle de vie identifiées comme critiques ; leur intérêt environnemental peut enfin être évalué
 87 en modifiant la modélisation ACV du cycle de vie du produit actuel. L'utilisation itérative de l'ACV est un moyen long et
 88 fastidieux pour améliorer les performances environnementales d'un produit.

89 Certains auteurs comme Dewulf et al. (2005) ont amélioré cette approche en modélisant les paramètres principaux du
 90 produit et en les pondérant par des poids environnementaux issus de la méthode Eco-Indicateur 99 (EI99). Cette approche
 91 permet d'identifier, pour des produits relativement simples et sans couplage (electric fruit juice), les configurations
 92 générant les impacts les plus faibles.



93
 94 **Figure 1 : Flowchart approche Pareto/ ACV**

95 3.2.2 Approche Plan d'expérience/ ACV

96 La deuxième approche s'appuie sur une combinaison plan d'expérience/ ACV et peut, elle aussi, être décomposée en 6
 97 phases consécutives (cf. flowchart 2). Cette approche a été déployé de façon plus détaillé pour identifier des pistes
 98 d'amélioration sur une machine à café (Millet et al., 2010).

99 Dans l'approche plan d'expériences /ACV, une distinction est faite entre des sous-systèmes dits « actifs » (SSA) et des
100 sous-systèmes « passifs » (SSP). La notion de sous-système « actifs » sous-entend une consommation de matières ou
101 d'énergie en phase d'utilisation du système. Par exemple la consommation énergétique globale d'un véhicule résulte
102 majoritairement de la consommation du moteur, des éléments électriques et des systèmes de commandes. Au contraire,
103 les sous-systèmes produits dits « passifs » n'influencent pas ou interagissent indirectement sur la performance énergétique des
104 sous-systèmes « actifs » (par exemple la coque d'un bateau). Afin de définir les axes d'amélioration d'un produit ou d'un
105 système, l'élaboration d'un modèle générique constitue une étape importante. Le modèle générique correspond à un
106 produit défini fonctionnellement (sans spécifier les technologies intervenant dans les SSA et SSP). Il rend compte des
107 interactions entre les sous-systèmes. La Figure 10 représente la modélisation générique d'une navette maritime à
108 passagers.

109 Une recherche créative doit permettre à une équipe de conception multidisciplinaire de générer des alternatives potentielles
110 d'amélioration pour chaque sous-système. Cette recherche doit être menée objectivement, c'est-à-dire sans négliger un
111 sous-système, car du fait des interdépendances entre sous-systèmes, la meilleure performance environnementale peut
112 résulter d'un axe d'amélioration portant sur un sous-système a priori non-significatif sur le plan environnemental.

113 Chaque voie d'amélioration de chaque sous-système doit ensuite être quantifiée en termes de nature de matériau m , w
114 weight, e energy, r reliability et eol end of life. Ce travail prospectif peut être facilité :

- 115 • soit par similitudes avec des produits concurrents ou connexes exploitant déjà ce type d'axe d'amélioration
- 116 • soit en faisant appel à des spécialistes techniques à qui l'on demandera d'estimer les performances atteignables
117 par tel axe d'amélioration

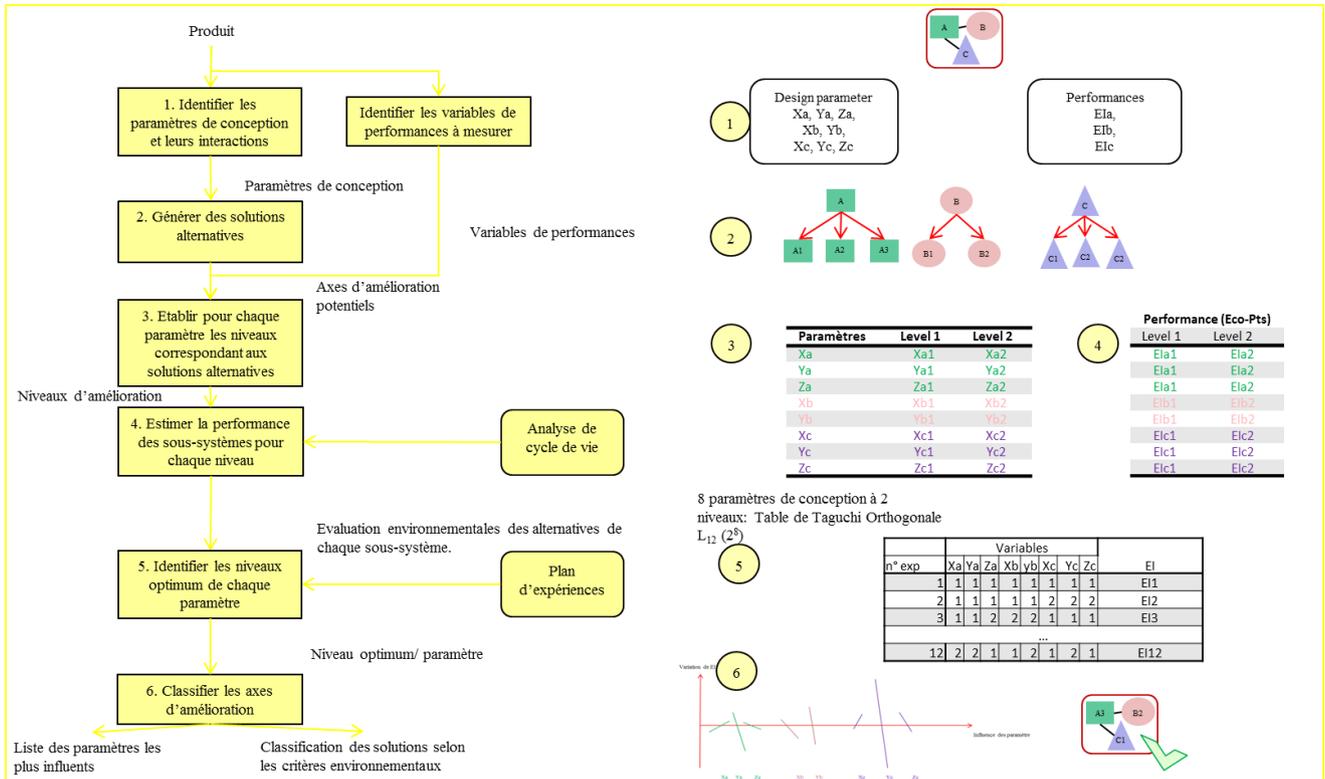
118 Il existe plusieurs types de plans d'expériences, les plans factoriels sont les plus utilisés car ils sont les plus simples à
119 mettre en œuvre. Selon le nombre de variables et le nombre de niveaux envisagés, le nombre de variantes qu'il faudrait
120 théoriquement évaluer peut être important (il correspond à : nombre de niveaux des paramètres \wedge nombre de paramètres)
121 Ceci conduit à utiliser des matrices d'expériences optimisées ayant une précision voisine tout en étant plus économe
122 conduit à utiliser. Parmi ces matrices optimisées citons : Plackett-Burman Matrix (Plackett and Burman, 1946),
123 Experiments with mixtures (Scheffé, 1958), Rechtschaffner designs (Rechtschaffner, 1967), Doehlert designs (Doehlert,
124 1970), Hoke designs (Hoke, 1974), Taguchi designs (Taguchi, 1989),...

125 Pour éviter ce travail fastidieux, nous utilisons la méthode de Taguchi qui permet de simuler à partir du modèle générique
126 un nombre restreint de configurations de produit. Une évaluation environnementale de ce nombre restreint de
127 configurations est ensuite réalisée par l'intermédiaire d'un logiciel ACV exploitant le paramétrage du modèle générique.
128 La méthode Eco-Indicateur 99 peut être utilisée car elle fournit un 'end-point score' facilement interprétable par l'équipe
129 de conception (tout autre indicateur pourrait aussi convenir, tel que le GWP ou l'ODP). En comparant la performance
130 environnementale EI (Point) obtenue avec celle du produit générique, nous obtenons un taux d'amélioration noté $Ta(\%)$.

131 Chaque axe d'amélioration potentiel peut finalement être caractérisé par un taux d'amélioration correspondant à un gain
132 (ou une perte) environnemental par rapport au produit générique.

133 L'interprétation des résultats du plan d'expériences permet de comprendre l'influence des différents paramètres sur le
134 résultat global et de hiérarchiser les axes d'amélioration potentiels.

135



136

137 **Figure 2 : Flowchart approche DoE/ ACV**

138 **1.3 Cahier des charges pour éco concevoir des systèmes complexes en amont de la conception**

139 Les approches présentées ci-avant présentent les inconvénients suivants : elles sont longues à utiliser (1), demande une
 140 expertise et des connaissances spécifiques (2), sont inaptes à hiérarchiser de façon rigoureuse (3), présente des résultats
 141 difficiles à interpréter, (4) et génère un champ exploré restreint (5) et enfin ne permettent pas de ré-exploiter (6)
 142 facilement les résultats d'études précédentes.

143 1. Peu consommateur de temps

144 Les principaux freins à l'utilisation des méthodes et outils en écoconception dans l'industrie sont la complexité de mise en
 145 œuvre, le temps requis pour les appliquer et le besoin de connaissances environnementales pour bien les exploiter. C'est
 146 pourquoi ces outils, qui sont essentiels pour l'intégration des exigences environnementales en conception, doivent être
 147 faciles à utiliser et rapide à appliquer.
 148 Dans l'état des lieux des méthodes d'évaluation et d'amélioration en écoconception Bovea and Pérez-Belis (2012)
 149 montrent que ces outils varient considérablement dans leur complexité, qualité et temps requis pour les appliquer, et
 150 aucune classification claire n'a été élaborée pour permettre de choisir la technique la plus appropriée à la situation
 151 considérée.

152 2. Facile à assimiler par le concepteur

154 La pratique des méthodes et des outils d'écoconception, dans industrie, semble toujours aussi limitée d'après Karlsson and
 155 Luttrupp (2006), Baumann et al. (2002) et Ernzer and Birkhofer (2005). Lenox et al. (1996) reconnaît que lorsqu'une
 156 compagnie met en place une stratégie d'écoconception, elle est habituellement effectuée par des spécialistes avec comme
 157 conséquences des résultats qui ne sont pas exploités efficacement tout au long du processus de développement (Lindhal,
 158 2006).
 159 De plus ces méthodes et outils, compliquées, doivent, pour être successful, être utilisés par l'utilisateur au quotidien ou au
 160 moins de façon régulière. Sinon, l'utilisateur tend à oublier comment utiliser la méthode ou les fonctions spécifiques de
 161 l'outil et les temps de mise en œuvre augmentent. Andriankaja (2012) conclu, entre autre, que l'intégration dans le

162 processus de conception est liée à l'appropriation de l'outil d'écoconception par l'équipe de conception et cela passe par
163 une simplification de l'étape de modélisation du produit et des résultats plus facilement interprétables pour le concepteur.

164
165 3. Rigoureux

166 Un nouvel outil ne doit pas s'appuyer de façon prépondérante sur des règles empiriques invérifiables ; en effet, l'activité
167 de conception est déjà bien trop hyper-contrainte pour se payer le luxe d'investiguer des voies 'sans issues'. Il est donc
168 nécessaire d'adopter une démarche scientifique permettant de mesurer le plus explicitement et le plus justement possible
169 en début de conception le potentiel des voies d'améliorations envisageables. Cette scientificité de la démarche est une
170 nécessité pour relever le défi du développement durable ; ce n'est que par un apprentissage organisationnel fiable (donc
171 quantitatif), multi-niveaux et sur le long terme que pourra émerger/se créer/se développer un nouveau champ de
172 connaissances dans le domaine des règles d'éco-conception.

173
174 4. Des résultats facilement interprétables

175 Les résultats obtenus par les méthodes et outils d'écoconception doivent permettre d'améliorer significativement le produit
176 pendant toute sa phase de développement. Pour répondre à ce besoin il est nécessaire que les résultats obtenus soient
177 facilement interprétables par le collectif impliqué.

178 Sinon cela peut conduire à des conclusions erronées et parfois à des stratégies d'entreprises contre-performantes au plan
179 environnemental.

180 Une méthode d'écoconception doit être suffisamment fiable et facile d'utilisation pour permettre une interprétation des
181 résultats d'évaluation des impacts multicritères. Par exemple en identifiant parmi les résultats obtenus ceux qui sont fiables
182 et ceux qui doivent être confirmés par une analyse plus approfondie (par une analyse de sensibilité sur les paramètres du
183 modèle). Actuellement, seule la connaissance pointue des modèles permet d'estimer la fiabilité des conclusions et donc de
184 mener une interprétation des résultats.

185 Les résultats obtenus sont difficiles à interpréter car ils font intervenir une multitude de critères, qu'il faut analyser. La
186 prise en compte de chaque critère indépendamment des autres peut conduire à des résultats contradictoires.

187 Il est nécessaire de faciliter l'interprétation des résultats et améliorer la prise de décision basée sur des indicateurs
188 environnementaux multicritères (Andriankaja et al., 2012). Une solution est l'utilisation d'un indicateur unique (issu de
189 l'agrégation de différents indicateurs) mais sujet à polémique dans la communauté scientifique ou bien de focaliser
190 l'analyse sur un nombre limité d'indicateurs spécifiques au type de système étudié.

191
192
193 5. Exploration du champ du possible

194
195 Nous avons souligné que les guidelines reposaient sur des séries de règles empiriques souvent contradictoires. Pour en
196 exploiter les forces, sans les inconvénients, il est indispensable de multiplier les voies à investiguer. C'est à travers la
197 multiplication de ces pistes qu'un résultat robuste, dans le sens où il n'entraîne que des contradictions non-significatives,
198 peut être obtenu. Par ailleurs, comme le souligne Dierneder and Schield (1998) dans un cadre plus général, l'intérêt des
199 outils d'aide à la conception est de » to compare a higher number of different promising solution first enough ».

200
201 6. Facilement ré-exploitable

202 La capitalisation d'expérience, de règles de conception, la constitution de données d'un modèle évitent de repartir de zéro
203 lors de la réutilisation d'une méthode ou d'un outil dans processus de développement de produit et ainsi gagner du temps.

204 De cette façon, les concepteurs les plus expérimentés transfèrent leurs connaissances aux nouveaux employés. De plus,
205 l'utilisation des méthodes et outils définies facilite la possibilité de capitaliser les travaux précédents qui ont été
206 documentés et réalisés selon un cheminement bien connue. Ceci réduit également le risque d'erreurs et de problème dans
207 les délais. Le risque d'échec diminue, comme l'a souligné Lindahl (2006) dans une enquête : *'It is easier to follow a
208 signed road than to walk in the dark.'*

209
210 **2 PROPOSITION D'UNE APPROCHE COUPLANT CSP/ACV**

211 Dans cette section nous proposons une approche algorithmique spécifique permettant de contrer les deux approches
212 précédemment critiqué. Nous avons opté pour une approche basée sur la Constraint Satisfaction Problem (CSP).

213 Cette troisième approche s'appuie sur une combinaison « Problème de satisfaction de contraintes»/ ACV et s'articule en 6
214 phases consécutives (cf. flowchart 3).

215 Le besoin lié à la modélisation physique de système complexe en conception architecturale, consiste à pouvoir caractériser
216 plusieurs configurations de conception les unes par rapport aux autres en terme de performances environnementales. Plus
217 précisément, ce sont les valeurs des variables qui déterminent le système, qui constituent le besoin en conception. En
218 conception préliminaire la satisfaction des contraintes numériques du problème de conception n'est pas facile, en effet les
219 données dont disposent le concepteur sont souvent imprécises et les paramètres du système mal définis. Ces problèmes
220 sont généralement sous-contraints, i.e., il existe un très grand nombre de solutions, voire un nombre infini si les domaines
221 sont continus. Ce type de problème peut s'exprimer en termes de CSP (Montanary, 1974). Au cours des deux dernières
222 décennies, certains membres de la communauté des sciences de l'ingénieur ont utilisé cet outil dans le cadre de leurs
223 recherches. Ils ont démontré que l'usage des CSP pouvait être intéressant dans les domaines tels que la préconception
224 (Scaravetti, 2004), la résolution de problèmes de dimensionnement (Yvars et al., 2009), d'optimisation (Hao and Merlet,
225 2004), (Yvars, 10), de configuration de plateforme de produit (Xie et al., 2005).

226 Un CSP (Constraint Satisfaction Problem) est défini par :

227 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, un ensemble de variables, n étant le nombre de variables du problème. Pour garder en généralité,
228 nous dirons que ces variables peuvent être de conception, de performance ou d'état. Les variables de conception
229 structurent la conception et permettent de distinguer par leurs valeurs deux configurations de conception. C'est
230 l'instanciation de toutes les variables de conception qui définit totalement une solution de conception potentielle. Les
231 variables de performance permettent de traduire l'état ou la qualité d'une alternative de conception et de la comparer par
232 rapport à une référence définie par le cahier des charges ou liée à l'état de l'art associé à l'entreprise ou au secteur
233 industriel concerné. Ces caractéristiques sont liées à la traduction physique d'une configuration donnée et sont
234 généralement directement liées aux variables de conception.

235 $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$, un ensemble de domaines. Chaque domaine, associé à une variable, peut être discret ou continu.

236 $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_p\}$, un ensemble de contraintes, p étant le nombre de contraintes du problème. Les contraintes
237 traduisent comment les fonctions structurantes sont réalisées par le système pendant la situation de vie de référence. Les
238 contraintes sont sous forme de relations explicites entre plusieurs variables. Cette relation impose des restrictions sur les
239 domaines de valeurs possibles pour les variables du problème. Plus précisément, elle peut être une combinaison logique de
240 plusieurs contraintes élémentaires, parmi les suivantes :

241 • les contraintes extensives : la relation d'une contrainte en extension décrit une liste explicite et exhaustive des
242 combinaisons possibles – ou au contraire impossibles – de valeurs (m -uplets) entre les m variables en jeu dans la
243 contrainte.

244 • les contraintes intensives : la relation d'une contrainte en intension, est une équation ou une inéquation explicite reliant
245 les variables entre elles (égalité, inégalité), elle fait intervenir des fonctions algébriques et des fonctions transcendentes.

246 • les contraintes logiques : contraintes conditionnelles (SI ... ALORS), conjonction de contraintes (ET logique), disjonction
247 de contraintes (OU logique) permettent d'obtenir des combinaisons de contraintes. Les contraintes logiques permettent
248 d'établir des relations de composition entre composants du système et de définir les « composants » dont l'état de
249 fonctionnement varie au cours du cycle de vie.

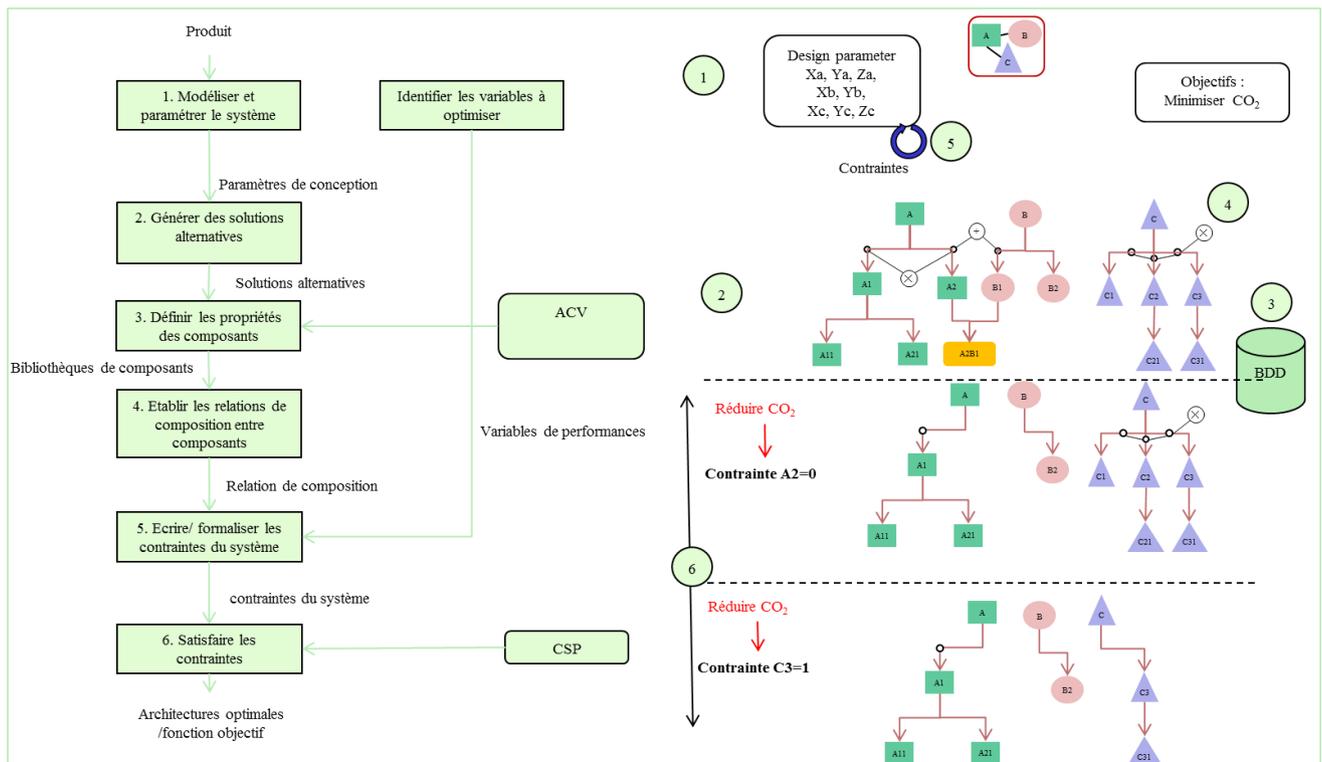
250 Les critères environnementaux interviennent dans l'approche CSP comme des contraintes à satisfaire pour répondre à un
251 objectif d'optimisation environnementale. En fonction des objectifs demandés par le concepteur, l'algorithme de résolution
252 va indiquer, si elles existent, les architectures du système et les modes de fonctionnement qui respecteront ces contraintes.
253

254 Chacune des contraintes porte sur une partie de l'ensemble des variables dont elle restreint les domaines D . Résoudre un
255 CSP revient à instancier chacune des variables de X dans son domaine de valeurs tout en satisfaisant l'ensemble des
256 contraintes C du problème. Il faut toutefois distinguer deux types de CSP : les CSP discrets et les CSP continus.

257 La résolution par satisfaction de contraintes garantit un ensemble complet de solutions et permet à l'équipe de conception
 258 selon des variables de performances et contraintes spécifiques de choisir une solution valable du problème de conception.
 259 La résolution d'un Problème de satisfaction de contraintes » s'effectue généralement par réduction de domaine. En effet
 260 l'objectif de la propagation de contraintes est de remplacer un CSP initial par un CSP équivalent, mais avec un espace de
 261 recherche plus restreint. Le moyen le plus basique pour réduire l'espace de solution est de procéder par essai-erreur ou par
 262 dichotomie. Un moyen plus systématique, et qui s'appuie sur l'arithmétique des intervalles de (Moore, 1966) et
 263 propagation de contraintes de (Mackworth, 1977) est l'utilisation de techniques de filtrage.
 264

265 La propagation de contraintes permet, à partir d'un ensemble de contraintes et de domaines, d'inférer des contraintes et des
 266 domaines plus restrictifs (Chenouard, 2007). Le principe d'une inférence est alors de propager les informations contenues
 267 dans une contrainte aux contraintes voisines. Ces inférences sont basées sur l'application de techniques filtrage de
 268 domaines, aussi appelées techniques de consistance, qui permettent de filtrer les valeurs ou les ensembles de valeurs qui
 269 participent à une solution.
 270

271 Les techniques de filtrage de domaines les plus utilisées sont l'Arc-Consistency (Mackworth, 1977, Debruyne and
 272 Bessiere, 2001) pour les CSP discrets, la Hull-Consistency (Lhomme, 1993, Benhamou, 1995, Benhamou and Older,
 273 1997) et la Box-Consistency (Chiriaev and Walster, 1997, Benhamou et al., 1999) pour les CSP discrets et continus.
 274



275

276 **Figure 3 : Flowchart approche CSP/ ACV**

277 **Fig. 1**

278 Comme le souligne Chenouard (2007), l'utilisation des CSP en conception préliminaire offre l'avantage d'une grande
 279 souplesse dans l'expression de la connaissance et la modification des modèles et permet de résoudre des problèmes
 280 génériques. C'est cet aspect qui est recherché en conception, car il exprime la connaissance sans définir comment la traiter.
 281 Ainsi, il est plus facile de la manipuler et de la réutiliser.

282 **3 CASE STUDY: PASSENGER FERRY**

283 **3.1 Definition of a passenger ferry system**

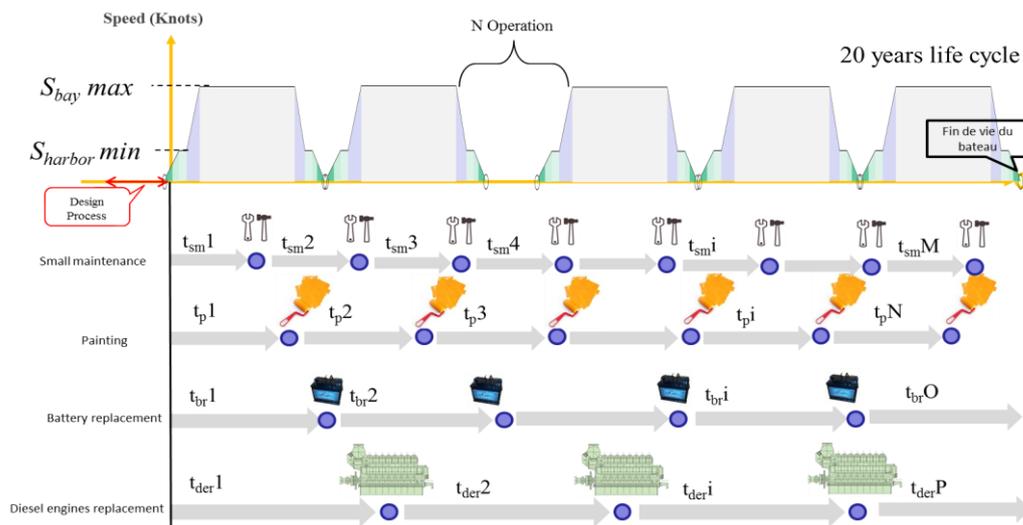
284 Le système étudié est une navette maritime de transport de passagers faisant la traversée de la rade de Toulon. La navette à
 285 reconcevoir est équipé d'une coque en aluminium, deux moteurs diesel (250kW) et d'un petit générateur électrique (27kW)

286 pour l'alimentation des auxiliaires en énergie. La capacité de transport de la navette est de 96/97 passagers. Le cycle
 287 d'utilisation est défini sur le schéma 4. La navette maritime de Toulon dessert 3 lignes exploitées 7 jours /7 pendant 365
 288 jours par an. Chaque navette réalise 24 traversées quotidiennes dans la rade.

289 En tenant compte de divers facteurs, 300 jours d'exploitation par an seront utilisés comme unité fonctionnelle. La durée de
 290 vie de la navette est de 20 ans. Les moteurs diesel sont remplacés approximativement entre 12500 heures soit 500 000 km
 291 environ.

292 Une navette maritime à passagers est un système complexe composé de 5 sous-ensembles principaux : Coque et
 293 superstructure, Génération de puissance, Dispositif de déplacement, Energie et Auxiliaire.

294 Le but du projet de conception est de définir l'architecture et l'état du système pour chaque séquence du cycle d'usage en
 295 fonction des conditions d'utilisation et de critères d'évaluation (variables de performances) préétablis (environnemental,
 296 technique, économique et sécurité). Dans le cas du transport des passagers en secteur interurbain, les performances du
 297 bateau sont fortement liées aux conditions de l'utilisation.



298
 299 **Figure 4 : Cycle de vie d'une navette maritime à passagers**

300 **Fig. 2**

301

302 Le cycle d'utilisation d'une navette maritime à passagers se compose de différentes séquences d'utilisation. Le cycle
 303 typique de la navette maritime dans la rade de Toulon est représenté Figure 4. Ce cycle est divisé en 10 séquences,
 304 chacune correspondant à un état d'utilisation. Chaque séquence (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) est définie par
 305 une durée, une énergie consommée (moteur électrique, auxiliaire propulseur d'étrave...) et énergie produite (par les
 306 générateurs électriques, sources externes renouvelables).

307 La méthodologie ACV utilisée dans les 3 approches permet d'évaluer le système sur n'importe quel indicateur d'impact
 308 environnemental. Pour l'étude de cas suivant, un choix d'indicateurs a été fait pour décrire les aspects les plus significatifs
 309 des impacts d'un bateau sur l'environnement :

310 Nous utiliserons les indicateurs de la méthode CML (Guinée et al., 2001): Abiotic depletion, Acidification, Eutrophisation,
 311 Global Warming Potential (GWP), Ecotoxicity, Photochemical, ainsi que l'indicateur agrégé de la méthode Eco-indicateur
 312 99 (single score) pour les industriels. Les données de chaque matériau sont extraites de la base de données Suisse
 313 Ecoinvent® V2 à l'aide du logiciel Simapro® 7.2.

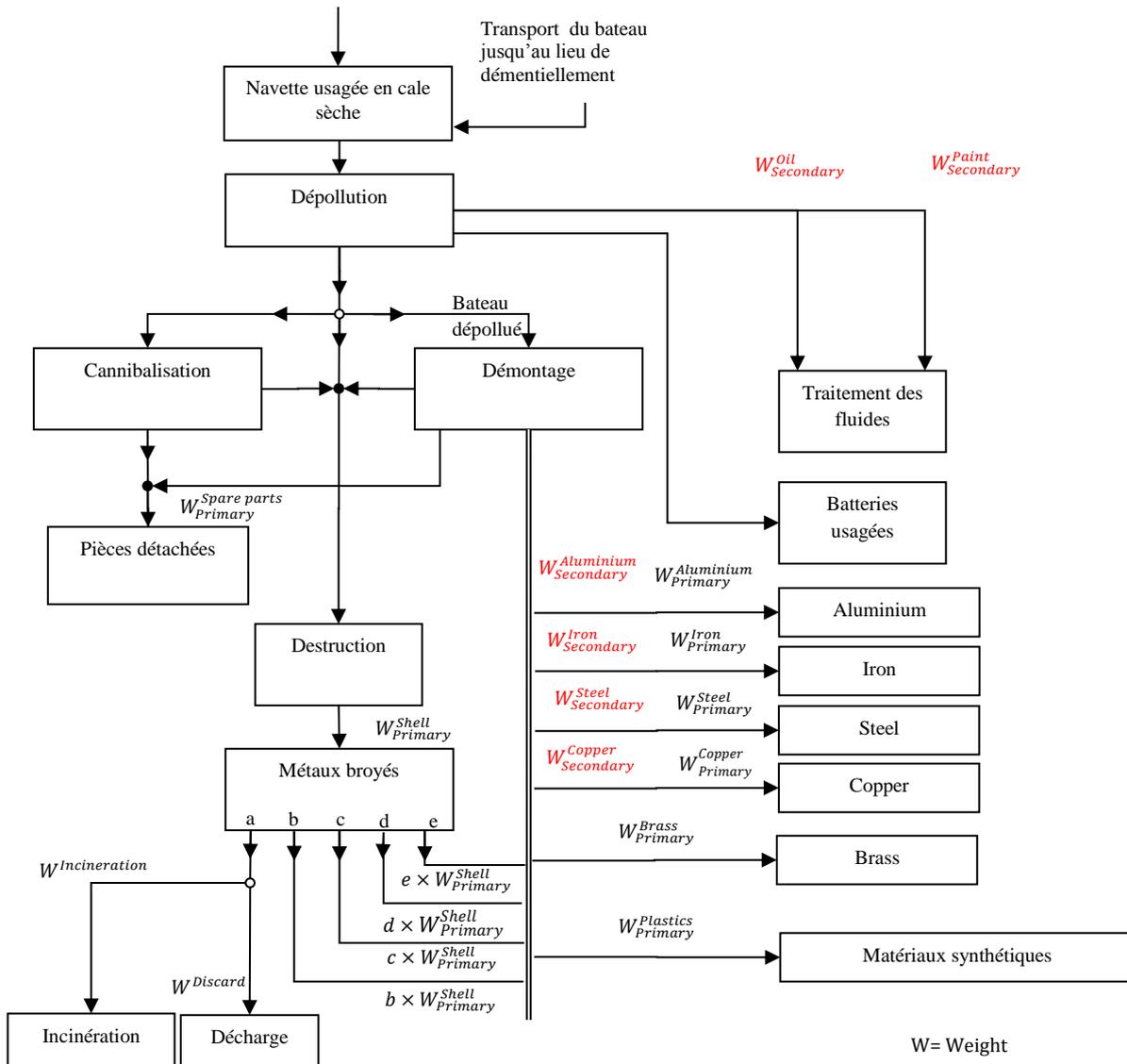
314

315 Hypothèse fin de vie

316 Le schéma, ci-dessous, présente le cycle de fin de vie envisageable et simulé dans cette étude. Ce cycle intègre les
 317 différentes filières de fin de vie généralement rencontré dans le processus de démantèlement de navires.

318 Le cycle de fin de vie comporte des opérations d'incinération, de recyclage, de réutilisation et de mise en décharge.
 319 Concernant l'étape de recyclage les matériaux, leur revente et réutilisation dans un nouveau cycle de vie est en dehors des
 320 frontières définies pour cette étude. De même les opérations nécessaires pour rétablir les propriétés physiques des
 321 matériaux « recyclés » n'ont pas été recherchées pour cet inventaire.

322 Dans la boucle de fin de vie sont comptabilisés les éléments qui sont changés lors des opérations de maintenances (en
 323 rouge dans le diagramme ci-dessous), par exemple les moteurs.



324
 325 **Figure 5 : Définition du cycle de fin de vie de la navette maritime**

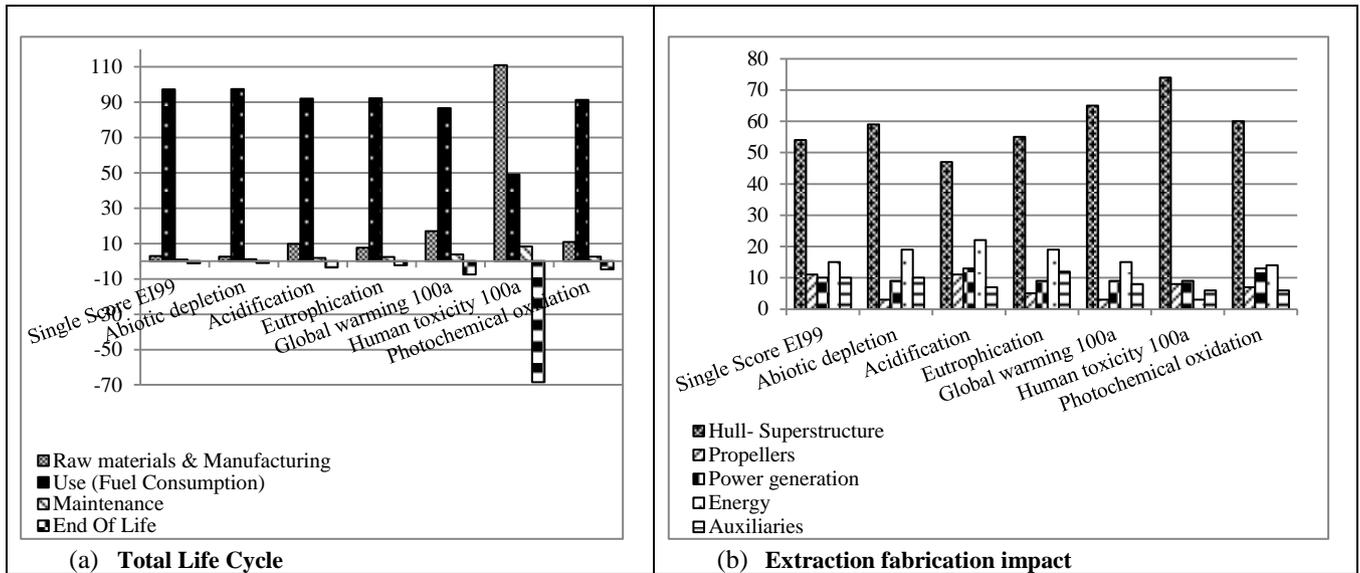
326

327 **3.1 "Pareto" / LCA approach**

328 La mise en œuvre de l'approche Pareto/ LCA sur le cas d'étude suit successivement les 6 phases du flowchart 1 (Figure
329 1) :

330 **Phase 1** : Evaluer le système sur son cycle de vie

331 Une Analyse de Cycle de Vie est réalisée sur une des navettes effectuant actuellement la traversée de la Rade de Toulon
332 (Figure 6 a). Un focus sur la phase extraction-Fabrication (Figure 6 b) permet de déterminer quels sont les sous-systèmes
333 de la navette qui doivent être traité prioritairement.



334 **Figure 6 : Life Cycle Assessment of current passenger ferry**

335 **Phase 2** : Identifier les sources d'impacts majeurs

336 L'évaluation environnementale de la navette maritime de transport de passagers (Figure 6 a) montre que la phase
337 d'utilisation est la plus impactante sur les principaux indicateurs. La phase d'utilisation se compose principalement de la
338 consommation de carburant pour le fonctionnement des moteurs pour la propulsion et du générateur électrique pour les
339 auxiliaires mais également de la maintenance (le changement des moteurs, huile usagé, le renouvellement de la peinture
340 antifouling pour la coque). L'extraction de l'aluminium nécessaire à la fabrication de la coque et de la superstructure
341 représente plus de 50% de la fabrication de la navette (Figure 6 b).

342 **Phase 3** : Rechercher les alternatives sur les sous-systèmes impactant

343 Dans une approche intuitive le concepteur travaille sur la forme de la coque afin de réduire le coefficient de traînée en
344 entraînant une diminution des impacts de la phase d'utilisation et/ ou en diminuant le poids de la coque en choisissant un
345 matériau à la fois résistant et léger afin de réduire l'impact à l'extraction/à fabrication. La diminution de la consommation
346 peut aussi passer par la reconception de la motorisation (moteur Diesel plus propre, downsizing, moteurs électriques,
347 hybridation Diesel/ Electrique), ou par l'amélioration du rendement de la propulsion (rendement de l'hélice). Le **Erreur !**
348 **Source du renvoi introuvable.** présente quelques paramètres qui vont servir à établir des architectures alternatives.

Hull Drag (N)	Propellers Efficiency	Diesel Engine Power (kW)	Motor Power (kW)	Generator Power (kW)	Battery Weight (kg)
$R_{Hull_0} = 18\ 800N$	$e_0^3 = 0,5$	$P_{Engine_0} = 350kW$	$P_{Motor_0} = 0kW$	$P_{Generator_0} = 20kW$	$W_{Battery_0} = 300kg$
$R_{Hull_1} = 17\ 200N$	$e_1^3 = 0,6$	$P_{Engine_1} = 250kW$	$P_{Motor_1} = 20kW$	$P_{Generator_1} = 150kW$	$W_{Battery_1} = 4000kg$
$R_{Hull_2} = 15\ 700N$	$e_2^3 = 0,7$	$P_{Engine_2} = 150kW$	$P_{Motor_2} = 150kW$	$P_{Generator_2} = 300kW$	$W_{Battery_2} = 500kg$

349 **Table 2 : Sous-systèmes influents et alternatives**

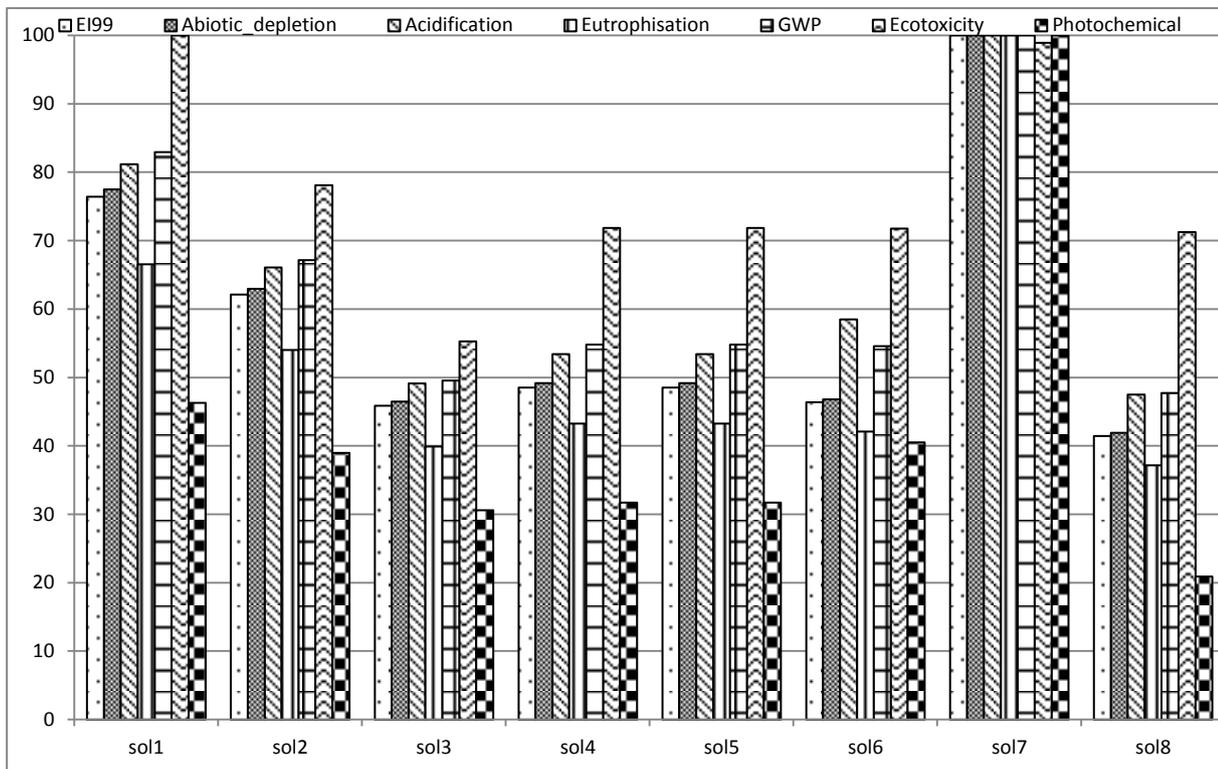
350 **Phase 4 et 5:** Etablir les architectures alternatives/ et évaluation des architectures

351 L'équipe de conception a établi différentes alternatives (variantes) de navettes issues de 3 principales architectures :
 352 Diesel, Hybride Diesel/ Electrique et Electrique. L'architecture électrique est constituée d'une motorisation électrique pour
 353 la propulsion, de batteries et d'un générateur électrique (Moteur Diesel + Alternateur) fournissant en énergie le moteur
 354 électrique et rechargeant les batteries. L'architecture hybride combine deux sources d'énergie : électrique et thermique. Il
 355 existe plusieurs variantes qui font cohabiter les deux types de propulsions électrique et thermique et peuvent fonctionner
 356 en même temps. Un système de récupération d'énergie permet de recharger les batteries pendant les phases de freinage. Et
 357 enfin l'architecture conventionnelle, la navette est propulsée par un moteur thermique optimisée dans les zones de pleine
 358 puissance ou sous-dimensionné afin de réduire la consommation de diesel.

359 Après que le concepteur a exploré différentes variantes pour chacune des 3 architectures propulsives, des analyses de cycle
 360 de vie sont réalisées itérativement jusqu'à obtenir la meilleure solution selon les critères.

	Hull	Propulsion	Propellers	Energy	Architecture
1	$R_{Hull_0} = 18800N$ (Aluminium)	$P_{Engine_0} = 350kW$ $P_{Generator_0} = 20kW$	$e^3_0 = 0,5$	$W_{Battery_0} = 300kg$ (NiMH)	Current ferry
2	$R_{Hull_1} = 17200N$ (Aluminium)	$P_{Engine_0} = 350kW$ $P_{Generator_0} = 20kW$	$e^3_0 = 0,5$	$W_{Battery_0} = 300kg$ (NiMH)	Hull optimized
3	$R_{Hull_2} = 15700N$ (Aluminium)	$P_{Engine_0} = 350kW$ $P_{Generator_0} = 20kW$	$e^3_0 = 0,5$	$W_{Battery_0} = 300kg$ (NiMH)	Hull very optimized
4	$R_{Hull_1} = 17200N$ (Aluminium)	$P_{Engine_0} = 350kW$ $P_{Generator_0} = 20kW$	$e^3_2 = 0,7$	$W_{Battery_0} = 300kg$ (NiMH)	Hull and propellers optimized
5	$R_{Hull_1} = 17200N$ (Aluminium)	$P_{Engine_1} = 250kW$ $P_{Generator_0} = 20kW$	$e^3_2 = 0,7$	$W_{Battery_0} = 300kg$ (NiMH)	Downsizing, Hull and propellers optimized
6	$R_{Hull_1} = 17200N$ (Aluminium)	$P_{Engine_1} = 250kW$ $P_{Motor_1} = 20kW$ $P_{Generator_0} = 20kW$	$e^3_2 = 0,7$	$W_{Battery_0} = 300kg$ (NiMH)	Serie Parallel Hybrid
7	$R_{Hull_1} = 17200N$ (Aluminium)	$P_{Motor_2} = 150kW$ $P_{Generator_2} = 300kW$	$e^3_2 = 0,7$	$W_{Battery_1} = 4000kg$ (NiMH)	Electric Shaft
8	$R_{Hull_1} = 17200N$ (Aluminium)	$P_{Engine_1} = 150kW$ $P_{Generator_0} = 20kW$	$e^3_2 = 0,7$	$W_{Battery_0} = 300kg$ (NiMH)	Diesel Optimized, BSFC = 188g/kWh

361 **Table 3: Processus itératif d'analyse de cycle de vie**



362

363 **Figure 7 : Impacts environnementaux de chaque solution sur le cycle de vie complet**

364 **Phase 6 : Satisfaction de la performance du système**

365 La Figure 7 représente les impacts des 8 architectures sur les 7 éco-indicateurs sélectionné. Le résultat agrège les impacts
 366 de chaque phase du cycle de vie. Première remarque, au fur et à mesure des itérations (Table 3) les impacts
 367 environnementaux décroissent sur la plupart des indicateurs, à l'exception de la solution 7 qui est la moins bonne,
 368 l'objectif est donc d'atteindre les performances de la solution 8 sans devoir réaliser toutes les évaluations précédentes.
 369 Deuxième remarque, dans cette approche, seule la phase à vitesse maximale est modélisée car elle correspond à 80% du
 370 trajet, or c'est sur cette phase que le fonctionnement du moteur diesel est optimal (*i.e.* le Brake Specific Fuel
 371 Consumption est minimal). Cela explique en partie pourquoi les architectures « diesel » (sol3 et sol8) apparaissent comme
 372 les meilleures.

373 **3.2 Design of Experiment/ LCA approach**

374 La mise en œuvre de l'approche Design of Experiment/ LCA sur le cas d'étude suit successivement les 6 phases du
 375 flowchart 2 (Figure 2) :

376 **Phase 1 : Identifier les paramètres de conception et les variables de performances à mesurer**

377 La navette maritime étant un système relativement complexe, nous nous limiterons dans ce chapitre aux paramètres les
 378 plus influent (Table 4) ont été identifiés comme influent sur la performance environnementale de la navette sur le cycle de
 379 vie (Figure 6) : Profil, Masse et matériaux de la coque, caractéristique du mode de propulsion (Electrique et/ou Diesel),
 380 rendement de l'hélice et dimensionnement du stockage de l'énergie.

381 Les variables de performances prises en compte sont les impacts environnementaux sur les indicateurs de la méthode EI99
 382 et CML.

383 **Phase 2 : Générer des solutions alternatives**

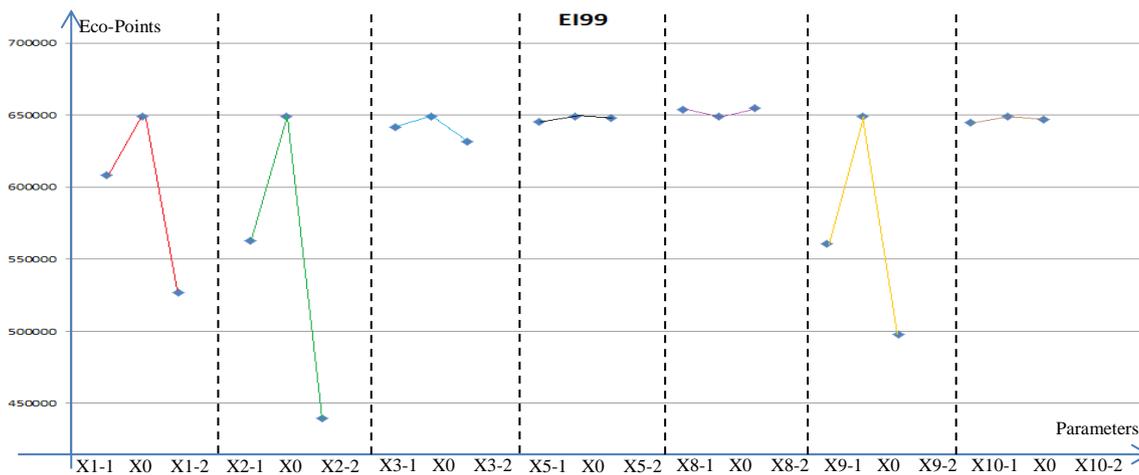
384 Les solutions alternatives sont générées en faisant varier les paramètres de conception (X1 à X10) (Table 4).

385 **Phase 3** : Etablir pour chaque paramètre les niveaux correspondant aux solutions alternatives

Elements	Parameters Xi	Reference	Level 1 L1	Level 2 L2
Hull	X1 – Drag	18 500 N	17 200 N	15 500 N
Hull	X2 – Weight	40 tonnes	30 ton	20 ton
Hull	X3 – Materials	Aluminium	Fiber	Steel
Diesel Engine	X4 – Presence	1	0	1
Diesel Engine	X5 – Power	250kW	120kW	200kW
Motor	X6 – Presence	0	0	1
Motor	X7 – Power	n/a	40	120
Generator	X8 – Power	40kW	100kW	250
Propeller	X9 – efficiency	0,5	0,6	0,7
Battery	X10 – Materials	Lead	Lithium	Nickel

386 **Table 4: Solutions alternatives pour chaque paramètre**

387 **Phase 4** : Estimer la performance des sous-systèmes pour chaque niveau



388 **Figure 8: Effet des paramètres de conception sur l'indicateur EI99**

390 **Phase 5** : Identifier le niveau optimum de chaque paramètre

391 Le système de propulsion est décrit par de nombreux paramètres de conception (parfois couplés). Mais pour cette étude de
 392 cas nous avons simplifié le système avec 8 paramètres de conception non couplés et 2 niveaux pour chacun. Une table
 393 orthogonale L12 (2^8) de Taguchi (Table 6) est employée pour expérimenter quelques solutions possibles et pour identifier
 394 l'effet de chaque paramètre de conception des sous-systèmes sur la performance globale du système de propulsion.

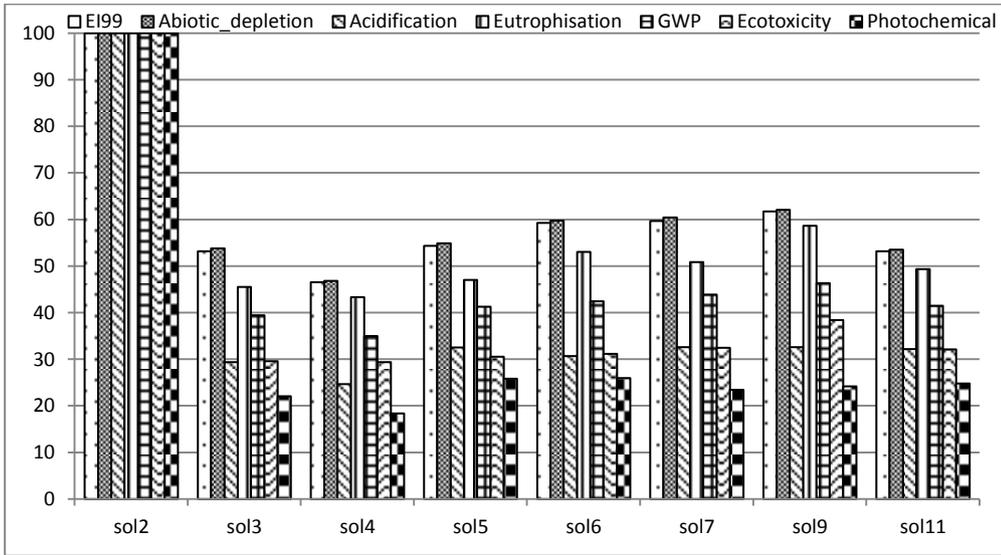
n° exp.	Variables										Subsets				
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	Hull	Propulsion	Propellers	Energy	Architecture
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Incompatible				
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	$R_{Hull_1} = 17000N,$ $W_{Hull_1} = 30t$ Aluminium	$P_{Motor_2} = 120kW$ $P_{Generator_1} = 250kW$	$e^3 = 0,7$	$W_{Battery_2}$ NiMH	Electric
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	$R_{Hull_1} = 17000N,$ $W_{Hull_1} = 30t$ Steel	$P_{Engine_2} = 200kW$ $P_{Generator_1} = 100kW$	$e^3 = 0,7$	$W_{Battery_2}$ NiMH	Diesel
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	$R_{Hull_1} = 17000N,$ $W_{Hull_2} = 20t$ Fiber	$P_{Engine_2} = 200kW$ $P_{Generator_2} = 250kW$	$e^3 = 0,6$	$W_{Battery_1}$ Li-Io	Diesel
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	$R_{Hull_1} = 17000N,$ $W_{Hull_2} = 20t$	$P_{Engine_2} = 200kW$ $P_{Generator_2} = 250kW$	$e^3 = 0,6$	$W_{Battery_2}$ NiMH	Electric

											Steel	$P_{Motor_1} = 40kW$			
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	$R_{Hull_1} = 17000N,$ $W_{Hull_2} = 20t$ Steel	$P_{Engine_1} = 120kW$ $P_{Generator_1} = 100kW$ $P_{Motor_2} = 120kW$	$e^3_2 = 0,7$	$W_{Battery_1}$ Li-Io	Hybride
7											$R_{Hull_2} = 15500N,$ $W_{Hull_1} = 30t$ Steel	$P_{Engine_1} = 120kW$ $P_{Generator_2} = 250kW$	$e^3_2 = 0,6$	$W_{Battery_2}$ NiMH	Diesel
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	Incompatible				
9											$R_{Hull_2} = 15500N,$ $W_{Hull_1} = 30t$ Fiber	$P_{Engine_1} = 120kW$ $P_{Generator_1} = 100kW$ $P_{Motor_1} = 40kW$	$e^3_2 = 0,6$	$W_{Battery_2}$ NiMH	Hybride
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	Incompatible				
11											$R_{Hull_2} = 15500N,$ $W_{Hull_2} = 20t$ Fiber	$P_{Engine_1} = 120kW$ $P_{Generator_1} = 100kW$ $P_{Motor_1} = 40kW$	$e^3_2 = 0,6$	$W_{Battery_2}$ NiMH	Hybride
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	Incompatible				

395 **Table 5: Results of the simplified Design of Experiment/ LCA**

396 **Phase 6 :** Classifier les axes d'amélioration

397 Sur 11 évaluations 8 architectures) sont exploitables (Table 6). La Figure 9 représente l'impact des 8 architectures sur les 7
398 éco-indicateurs sélectionné. Le résultat agrège les impacts de chaque phase du cycle de vie. Un bateau possède toutefois
399 beaucoup plus de 10 variables de conception discrètes à 2 niveaux. Ces variables ne suffisent pas à décrire toutes les
400 configurations du système. Les nombreuses variables couplées ne permettent par ailleurs pas d'évaluer la totalité des
401 solutions possibles, ni d'exclure les solutions non-possibles (composants non compatibles).



402
403 **Figure 9 : Impact environnemental de chaque solution sur le cycle de vie**

404 **3.3 CSP/ LCA approach**

405 La mise en œuvre de l'approche CSP/ LCA sur le cas d'étude suit successivement les 6 phases du flowchart 3 (Figure 3) :

406 **Phase 1 :** Modéliser, paramétrer le système et identifier les variables à optimiser

407 Un modèle de la structure du système est présenté Figure 10, dans notre cas la modélisation de la navette ne suffit pas. En
408 effet il est nécessaire de considérer le cycle de vie du système (Figure 4).

409 **Phase 2 :** Générer des solutions alternatives

410 Pour chacun des composants suivants, une bibliothèque est créée pour définir l'ensemble des solutions disponibles pour le
 411 système (par exemple la Table 7 représente les moteurs disponibles pour le système). Cette bibliothèque prend la forme
 412 d'une table de contrainte. Une table de contrainte est une contrainte globale qui représente les valeurs de combinaison
 413 possibles d'un jeu de variables de contrainte. Dans notre cas, chaque ligne d'une table de contrainte est un n-uplet de
 414 valeurs cohérentes. Si une ou plusieurs valeurs d'une variable de contrainte sont exclues pendant la résolution tout le n-
 415 uplet lié à cette valeur est enlevé de la table aussi.
 416

Diesel Engine	P ^{Engine}	W ^{Engine}	Type Battery	D _M	DoD
1	120000	900	1	50	60
2	150000	1000	2	75	60
3	200000	1100	3	100	75

417 **Table 6: Components library (extract)**

418

419 Si durant la propagation, la puissance propulsive P est réduit à l'intervalle [100000, 170000] Watt, alors la ligne de la table
 420 correspondant au type 3 est supprimée de la table. Le domaine de définition de la masse est par conséquence réduit à
 421 l'intervalle [900, 1000].

422 **Phase 3** : Déclarer les variables du système

423 Le processus de modélisation comprend la déclaration des variables de chaque sous-ensemble du système, en annexe
 424 Table A.1. Dans notre application, les domaines sont mixtes : nous avons à la fois des variables à valeurs discrètes et des
 425 variables à valeurs continues. Par exemple, les variables d'activation / désactivation des sous-systèmes sont des variables
 426 booléennes (0/1) par conséquent, leur domaine est D = {0, 1}, alors que dans le même temps, les variables représentant la
 427 dynamique du système sont à valeurs réelles dans un intervalle ouvert ou fermé (par exemple, le domaine de la variable «
 428 vitesse du navire » est D = [0, 12]).

429 Pour l'évaluation environnementale il est nécessaire de déclarer des variables matériaux rendant compte de la composition
 430 en matériaux de chaque sous-ensembles ou composant. Par exemple :

$$EI_{Component\ j}^{Indicator\ i} = EI_{Extraction}^{Indicator\ i} + EI_{Manufacturing}^{Indicator\ i} + EI_{Distribution}^{Indicator\ i} + EI_{Use}^{Indicator\ i} + EI_{EoL}^{Indicator\ i}$$

$$EI_{Extraction\ j}^{Indicator\ i} = \sum_{k=1}^n W_{Material\ k}^{Component\ j} \times EI_{Material\ k}^{Indicator\ i}$$

$$EI_{Manufacturing\ j}^{Indicator\ i} = \sum_{k=1}^n W_{Material\ k}^{Component\ j} \times EI_{Process\ k}^{Indicator\ i}$$

431 $EI_{Component\ j}^{Indicator\ i}$ est l'impact environnemental du composant j selon l'indicateur i (des méthodes EI99 et CML).

432 $EI_{Material\ k}^{Indicator\ i}$ est l'impact environnemental d'un kilogramme de matière k selon l'indicateur i (des méthodes EI99 et CML).

433 $EI_{Process\ k}^{Indicator\ i}$ est l'impact environnemental pour la mise en forme d'un kilogramme de matière k selon l'indicateur i (des
 434 méthodes EI99 et CML).

435 $W_{Material\ k}^{Component\ j}$ est la masse de matière contenue dans le composant j

436 $EI_{Extraction\ j}^{Indicator\ i}$ est l'impact environnemental nécessaire à l'extraction des matériaux du composant j selon l'indicateur i (des
 437 méthodes EI99 et CML).

438 $EI_{Manufacturing\ j}^{Indicator\ i}$ est l'impact environnemental nécessaire à la fabrication du composant j selon l'indicateur i (des
439 méthodes EI99 et CML).

440 $EI_{logistic\ j}^{Indicator\ i}$ est l'impact environnemental du transport du composant j selon l'indicateur i (des méthodes EI99 et CML).

441 $EI_{Use\ j}^{Indicator\ i}$ est l'impact de l'utilisation du composant j selon l'indicateur i (des méthodes EI99 et CML).

442 Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Table 8 présente les valeurs d'impacts environnementaux/ kg pour quelques
443 matériaux selon les 7 indicateurs choisis.

		Environmental Impacts							
		EI99	CML Indicators						
		Single score	Abiotic depletion	Acidification	Eutrophication	Global warming 100a	Human toxicity 100a	Photochemical oxidation	
Materials	Aluminium	1kg	0,845	0,0701	0,0578	0,00499	11,9	52,6	0,00477
	Iron	1kg	0,104	0,0139	0,0059	0,000652	1,5	0,672	0,000873
	Steel	1kg	0,102	0,0127	0,00527	0,00105	1,48	0,491	0,000817
	Copper	1kg	2,2	0,0154	0,14	0,00419	2,02	86,8	0,00528
	...								
	Diesel	1kg	0,277	0,0241	0,0047	0,00054	0,59	0,158	0,0003
	Ni-MH	1kg	5,41	0,402	1,099	0,0311	57,25	38,81	0,043
	Lead	1kg	4,221	0,415	0,476364192	0,0312	48,98	17,04	0,019
	...								

444 **Table 7: Extrait de la bibliothèque matériaux**

445 **Phase 4** : Etablir les relations de composition entre composants

446 Le graphe de décomposition structurelle de la navette (modèle Figure 10) intègre les différentes configurations existantes.
447 Il permet de décrire le produit par une décomposition de ses parties constituantes : en Ensembles, sous-ensembles,
448 composants.

449 En utilisant les travaux de Yvars (2010), le modèle graphique de la Figure 10 permet d'obtenir le type de relations
450 suivantes :

451 **Equ(Hull, Exc(Mono, Tri))** : Choix entre une coque de type mono-structure ou trimaran

452 **Equ(Mono, Exc(SPH¹(1,1), ES²(1,1)))** : Une navette monocoque est compose d'une architecture propulsives SPH ou ES.

453 **Equ(SPH, And(Engine(2,2), Motor(2,2), Propellers(2,2), Bow Thruster(1,1)))** : Une architecture propulsive de type SPH
454 comprend deux moteurs Diesel, deux moteurs électriques et un propulseur d'étrave.

455 **Equ(ES, And(Generator(1,2), Exc(Pod(2,2), And(Motor(2,2), Propeller(2,2), Bow Thruster(1,1))))** : Une architecture
456 propulsive de type ES comprend un ou deux générateurs et soit deux Pods soit l'association de deux moteurs, de deux
457 hélices et d'un propulseur d'étrave.

458

Sous ensemble (déplacement & génération de puissance)	Before propagation		After propagation	
	Cardinalité min	Cardinalité max	Cardinalité min	Cardinalité max
Engine	0	2	2	2
Motor	0	2	2	2
Propeller	0	2	2	2
Bow Thruster	0	1	0	1
Pod	0	2	0	0
Generator	0	3	0	0

459 **Table 8: Propagation des contraintes architecture SPH**

460

¹ SPH: Serie-Parallel Hybrids

² ES: Electric Shaft

461 Supposons que le concepteur choisisse à présent une architecture propulsive SPH. Par propagation de contraintes nous
462 obtenons la réduction de domaine du Table 8.

463

464 **Phase 5** : Ecrire/ formaliser les contraintes du système

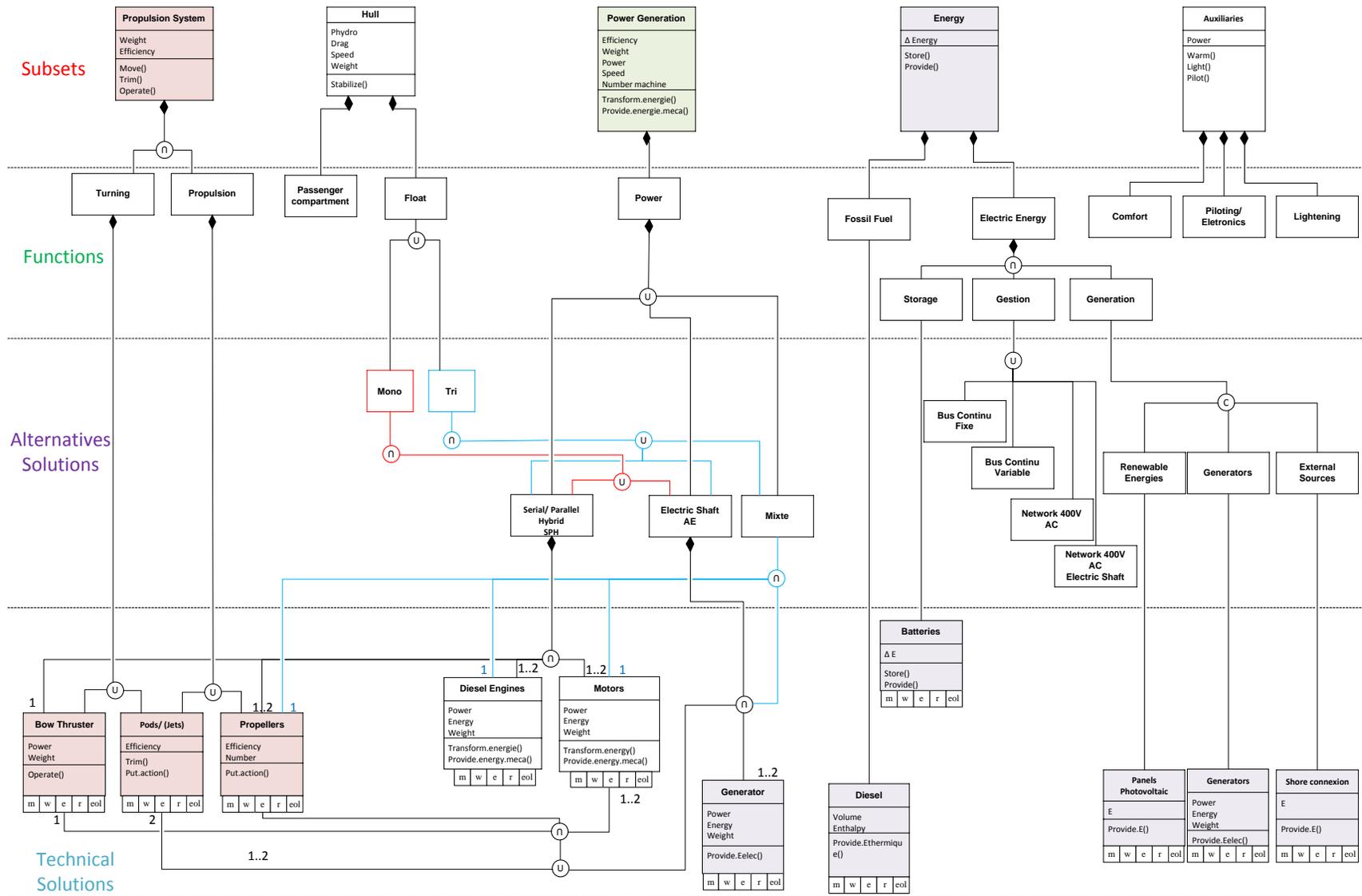
465 Le processus de modélisation comprend la déclaration des variables de chaque système (correspondant à la phase 3) sur un
466 intervalle fini ou un ensemble de valeurs discrètes.

467 Une fois toutes les variables déclarées les contraintes sont ajoutées. Les contraintes sont des relations entre les variables
468 (équations linéaires et non linéaires), appels de fonction, inéquations, tables de contraintes (cf. le Table 7),... par
469 conséquent, en programmation par contraintes, les connexions entre les éléments du modèle sont faites en ajoutant les
470 contraintes d'égalité entre les différentes variables du système. Les équations régissant le modèle sont données en annexes
471 2.

472

473

474



Parameters (m: material, w: weight, e: energy, r: reliability, eol: end of life, W recy: Weight of materials recycling, W reuse: Weight of part reuse)

475

Components

Libraries

476

Figure 10 : Modélisation structurale de la navette

477 **Phase 6** : Satisfaire les contraintes

478 L'objectif est de déterminer l'architecture de la navette ainsi que l'état de fonctionnement optimal de la navette sur le cycle
 479 de vie défini Figure 4 par propagation des contraintes décrites dans la phase précédentes. L'implémentation de cet exemple
 480 a été réalisé en C++ à l'aide de la bibliothèque de programmation par contraintes IlogCP (Ilog, 2006).

481 Les résultats présentés (Table 10) de la résolution par CSP permettent de spécifier le système propulsif de la navette en
 482 fonction des objectifs :

483 Un objectif est de minimiser l'impact de la phase d'utilisation ; l'autre objectif est de minimiser l'impact de la phase
 484 d'extraction est de fabrication. A Pareto front of optimal designs can be obtained at the end of this procedure.

485
 486 La solution 2 est obtenue en minimisant d'abord l'impact environnemental des phases extraction-fabrication, puis en
 487 minimisant l'impact de la phase d'utilisation, l'architecture (Table 10) obtenue est basée sur une motorisation thermique
 488 optimisée.

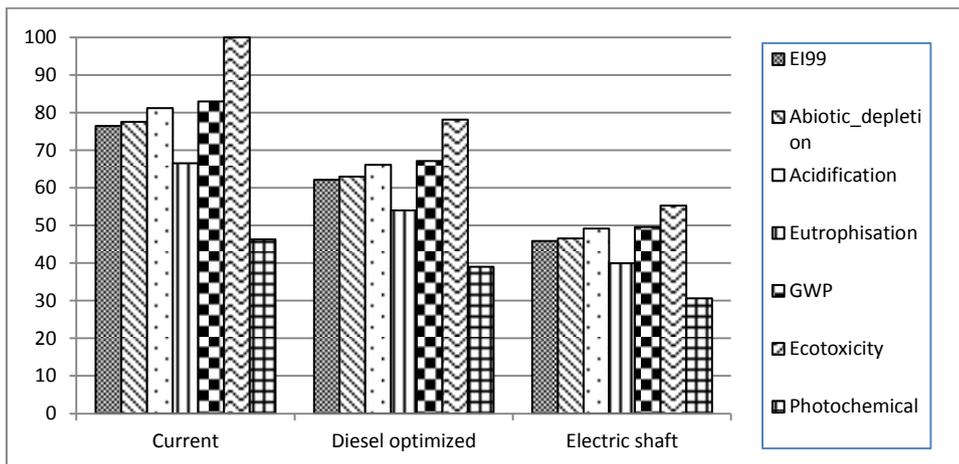
489
 490 La solution 3 est obtenue en minimisant d'abord l'impact environnemental de la phase d'utilisation, puis en minimisant
 491 l'impact des phases extraction-fabrication, l'architecture (Table 10) obtenue est basée sur une motorisation hybride de type
 492 arbre électrique (Electric shaft).

	Hull	Propulsion	Propellers	Energy	Architecture
1	W ^{Hull} = 40000 Kg L= 60,0 ton R ^{Hull} = 13390 N (11kts)	P ^{Engine} = 350kW P ^{Generator} = 20kW N ^{Engine} = 2 N ^{Generator} = 1	e ₃ = 0,5	W ^{Battery} = 300 kg D _M = 50 Wh/kg (Pb)	Current ferry
2	W ^{Hull} = 15000 Kg L= 27,0 ton R ^{Hull} = 6190.16 N (11kts)	P ^{Engine} = 120kW P ^{Generator} = 20kW N ^{Engine} = 2 N ^{Generator} = 1	e ₃ = 0,5	W ^{Battery} = 224 kg D _M = 50 Wh/kg (NiMH)	Diesel
3	W ^{Hull} = 15000Kg L= 26,4 ton R ^{Hull} = 6457.24 N (11kts)	P ^{Motor} = 40kW P ^{Generator} = 150kW N ^{Motor} = 2 N ^{Generator} = 1	e ₃ = 0,5	W ^{Battery} = 1277,2 kg D _M = 50 Wh/kg (NiMH)	Electric Shaft

494 **Table 9: Spécifications des solutions générées par l'approche CSP/ACV**

495

496 Chaque simulation génère, automatiquement, l'analyse de cycle de vie (LCA) de la solution obtenue. La Figure 11 permet
 497 de comparer l'architecture actuelle avec le deux solutions optimales. La solution 3 est la meilleure si l'on considère le
 498 cycle de vie global de la navette. Le gain obtenu atteint environ 50% pour la solution 3.



499

500 **Figure 11 : Impact environnemental de chaque solution sur le cycle de vie**

501 Outre les spécifications physiques du système l'association CSP/LCA permet de spécifier les modes de fonctionnements
 502 de chaque sous-système au cours de la mission, par exemple pour la solution 3 (Figure 12)

Seq	Speed (kts)	Energy provided (Wh)	Energy consumption (Wh)	Fuel consumption (g)	Exhaust CO2 (kg)	Exhaust SO2 (kg)	Exhaust NOx (g)	Energy batterie (Wh)	capacity (%)	Activity		
										A _{engine}	A _{motor}	A _{Generator}
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38315,00	100,00	No	No	No
1	2	0,00	808,33	0,00	0,00	0,00	0,00	38315,00	100,00	No	Yes	No
2	3	0,00	592,78	0,00	0,00	0,00	0,00	37506,70	97,89	No	Yes	No
3	5	0,00	4850,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36913,90	96,34	No	Yes	No
4	8	1132,50	808,33	226,50	0,70	9,06E-04	16,31	32063,90	83,69	No	No	Yes
5	12	20813,30	24250,00	4162,66	12,90	1,67E-02	299,71	32388,10	84,53	No	No	Yes
6	8	240,78	808,33	48,16	0,15	1,93E-04	3,47	28951,30	75,56	No	No	Yes
7	5	0,00	4850,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28383,80	74,08	No	Yes	No
8	3	0,00	538,89	0,00	0,00	0,00	0,00	23533,80	61,42	No	Yes	No
9	2	0,00	808,33	0,00	0,00	0,00	0,00	22994,90	60,02	No	Yes	No

503
 504 **Figure 12 : Modes de fonctionnement de la navette au cours de la mission**

505 **DISCUSSION & CONCLUSION**

506
 507 Dans cet article nous avons présenté une approche originale d'écoconception de système complexe associant ACV et CSP
 508 et nous l'avons comparé à ACV/ Pareto et ACV/ DoE. Il en ressort que :

- 509 • L'approche « de Pareto »/ ACV semble plus particulièrement utile pour des problèmes d'optimisation locale ; elle
 510 permet de répondre rapidement à des problèmes de choix de matériaux ou des choix de configurations simples.
- 511 • L'approche Plan d'expérience/ ACV semble elle plus adaptée à des problèmes de configuration de produits (choix
 512 d'architectures) lorsque les fonctionnalités des produits sont figées.
- 513 • L'approche CSP/ ACV semble plus particulièrement destinée à traiter des problèmes d'optimisation globale
 514 (choix de technologies) incluant l'optimisation fonctionnelle du système. Elle semble peu adaptée à des problèmes
 515 d'optimisation locale.

516

Critères d'évaluation des approches X/ACV	Approche méthodologique		
	« Pareto »/ ACV	Plan d'expérience/ ACV	CSP/ ACV
1. Consommation temps	--	-	-
2. Formation & Assimilation	+	-	--
3. Rigueur des résultats	+	+	+
4. Interprétabilité des résultats	--	-	+
5. Exploration du champ du possible	-	+	+
6. Ré exploitation des résultats	-	-	++

517 **Table 10: Evaluation des 3 approches X/ ACV**

518 A partir des critères définis au paragraphe 2 pour élaborer une méthodologie adaptée à l'écoconception de systèmes
 519 complexes, nous avons classifié les 3 approches « Pareto »/ ACV, Plan d'expériences/ ACV et CSP/ ACV cf. Table 10.

520 L'évaluation que nous proposons est qualitative et subjective de la part des auteurs mais argumentée et discutée ci-dessous.
 521 L'échelle de valeur va du moins bon (--) au meilleur (++) pour chaque critère.

522 Approche Pareto/ ACV

- 523 1. Consommation temps : L'approche Pareto/ ACV, bien qu'elle ne se concentre que sur 20 % des principaux
 524 contributeurs (processus et composants) d'impacts, est une méthode d'optimisation fastidieuses. Car elle implique
 525 pour chaque alternative proposée de réaliser une évaluation ACV qui est une méthode d'évaluation couteuse en
 526 temps
- 527 2. Formation & Assimilation : C'est une approche qui est bien adaptée à l'utilisation par des concepteurs. En effet
 528 par leur expérience du métier et leur connaissance du produit, le concepteur peut facilement identifier les
 529 principaux contributeurs d'impacts. Par contre le concepteur doit se former la méthodologie d'analyse de cycle de

- 530 vie ou travailler de concert avec un spécialiste. L'Analyse de Cycle de Vie est maintenant de plus en plus
531 pratiquée dans l'industrie.
- 532 3. Rigueur des résultats : L'approche Pareto/ ACV repose sur l'utilisation de règles générale, de connaissances en
533 conception basées sur des règles empiriques. Sur des systèmes complexes, avec des sous-systèmes interconnectés
534 ces règles empiriques sont souvent invérifiables. Ce sont ces sommes d'approximation qui engendre un manque
535 de qualité dans les résultats des différentes ACV.
- 536 4. Interprétation des résultats : Les résultats obtenus par l'approche Pareto /ACV sont difficilement interprétables
537 car l'approche employé ne repose pas sur des modèles approfondis mais sur une simplification du système à
538 quelques processus et composants générant ainsi diminution de la fiabilité des résultats et donc une interprétation
539 difficile.
- 540 5. Exploration du champ du possible : En se focalisant sur 20% du système, cela limite l'exploration du champ des
541 solutions possibles. Comme nous l'avons souligné l'intérêt des outils d'écoconception est de pouvoir comparer le
542 plus grand nombres de solutions potentielles ce qui est contradictoire avec une approche Pareto/ ACV qui permet
543 une simplification en minimisant les pistes d'investigation.
- 544 6. Ré exploitation des résultats : Ré exploitation des résultats : Les résultats obtenus par une approche Pareto/ ACV
545 ne sont pas ré-exploitable. La validation de chaque alternative nécessite une nouvelle analyse de cycle de vie.

546 Approche Plan d'Expériences/ ACV

- 547 1. Consommation temps : Travail fastidieux qui nécessite de réaliser une somme d'analyses souvent inutiles et
548 couteuses en temps. Dans l'étude de cas sur 11 évaluations seulement 7 étaient exploitables.
- 549 2. Formation & Assimilation : C'est une approche qui est bien adaptée à l'étude de petits produits comme l'a montré
550 l'étude réalisée par Millet et al. sur une machine à café. Mais dans le cas de systèmes complexes la mise en place
551 est beaucoup plus délicates et demande une plus grande maitrise de la méthode de Taguchi.
- 552 3. Rigueur des résultats : L'approche Plan d'expérience/ ACV s'appuie sur une modélisation complète du produit.
553 Plus le nombre de paramètres évalués est grand plus les résultats obtenus sont robustes. L'approche ne peut être
554 rigoureuse que si chaque paramètre possède un nombre de niveaux suffisant pour représenter une grande variété
555 d'alternatives.
- 556 4. Interprétation des résultats : Dans l'étude de cas, le navire était représenté par seulement 10 Variables discrètes
557 (2 niveaux) ce qui ne nous permettait pas d'évaluer l'ensemble des solutions possibles, ni d'exclure les solutions
558 non possibles (sous-systèmes/ composants non compatibles). Dans le cas d'un modèle complet et d'un nombre
559 d'alternatives suffisant il devient possibles d'interpréter les évaluations obtenues mais au détriment d'une mise en
560 œuvre plus longues. Un des avantages d'utiliser les plans d'expériences et de pouvoir quantifier l'effet des
561 variables de conception sur la performance environnementale du système.
- 562 5. Exploration du champ du possible : Le principal problème de l'utilisation du plan d'expérience, comme nous
563 l'avons montré sur l'étude de cas, c'est l'impossibilité de contrôler la faisabilité d'une solution. En effet 7
564 architectures (peu détaillées) sur 11 évaluées étaient exploitables. De plus dans l'étude de cas nous ne prenions
565 pas en compte le cycle d'exploitation et les modes de fonctionnement.
- 566 6. Ré exploitation des résultats : Les résultats obtenus sont difficilement ré exploitable dans le sens où la
567 modification, l'ajout et la suppression d'une variable nécessite de recommencer les X expériences.

568 Approche CSP/ ACV

- 569 1. Consommation temps : L'application de l'approche CSP/ ACV ne demande pas une grande quantité de temps
570 d'utilisation contrairement aux deux approches précédentes. Cependant la phase de modélisation du système
571 (définition des variables de conception, variables de performance et contraintes) et la phase la plus fastidieuse. Il
572 est nécessaire de recueillir des informations sur chaque processus et composant du système, sur le cycle
573 d'exploitation, les cycles de maintenances...
- 574 2. Formation & Assimilation : Toutefois les méthodes d'optimisation basées sur les outils numériques (CSP,
575 algorithmes génétiques et autres outils) sont des outils d'informaticiens. Ils sont généralement mal adaptés au
576 langage des concepteurs de produits.
- 577 3. Rigueur des résultats : La résolution par satisfaction de contraintes garantit un ensemble complet de solutions et
578 permet à l'équipe de conception selon des variables de performances et contraintes spécifiques de choisir une
579 solution valable du problème de conception.
- 580 4. Interprétation des résultats : Le recours aux simulations permet de comprendre entièrement tous les facteurs
581 impliqués dans le processus. En utilisant des outils de simulation, il est possible d'évaluer leurs incidences sur

- 582 l'environnement. Ces simulations permettent ainsi de connaître la contribution des paramètres sur la performance
583 des produits et ainsi focaliser le processus d'optimisation sur les points bloquants de la conception.
584 5. Exploration du champ du possible : L'approche CSP/ ACV permet de simuler toutes les architectures satisfaisant
585 les contraintes du système. En effet l'utilisation de bibliothèque de composants et de bases de données
586 environnementales permet l'évaluation simultanée de tous les composants afin de validées la ou les variables de
587 performances recherchées par le concepteur.
588 6. Ré exploitation des résultats : Grâce à la modélisation de bibliothèque de composants il est aisément possible de
589 ré-exploiter le modèle sur un autre système. Par exemple, il est possible de transposer le modèle sur une gamme
590 de bateaux différente (plus long, plus rapide, un cycle d'exploitation différent, ...). Lors de la résolution du
591 modèle, l'architecture satisfaisant les nouvelles contraintes intégrera de nouveaux composants.
592
593

594 L'approche CSP/ ACV est une approche originale adaptée au problème de conception de système complexe.
595 En effet la complexité du système ne permet pas une identification évidente de la solution optimale. Les interactions qui
596 régissent le système demandent l'utilisation d'outils qui peuvent être intégrés dès les premières phases de la conception
597 afin d'éviter le risque d'agir trop tardivement dans le processus. Dans cet article nous avons considéré les caractéristiques
598 fonctionnelles comme figés. Les développements ultérieurs de notre approche viseront à intégrer ces aspects fonctionnels
599 et répondre à la question suivante :

600 Quelle est l'influence des spécifications fonctionnelles sur la performance environnementale d'un système complexe ?
601

602 **ACKNOWLEDGEMENT**

603 We would like to thank the F.U.I for financial support on project n°092906555. We would like to thank all industrial
604 partners: STR, Moteurs Baudouin and ECA Robotics for contribution on the case study.
605

606 **REFERENCES**

- 607
608 [1] Agarwal, N., Mukkamala, R., 2005. Design of complex systems: issues and challenges. The 24th Digital Avionics Systems Conference
609 (DASC'05).
610 [2] Allenby B. R., 2000. Implementing Industrial Ecology: The AT&T Matrix System. *Interfaces*. 30 (3), 42-54.
611 [3] Alting, L., Legarht, J. B., 1995. Life Cycle Engineering and Design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 44 (2), 569-580
612 [4] Azapagic A., Clift R., 1999. The application of life cycle assessment to process optimization. *Computers and Chemical Engineering*. 23, 1509-
613 1526.
614 [5] Baumann, H., Boons, F., Bragd, A., 2002. Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. *Journal of
615 Cleaner Production*. 10 (5), 409-425.
616 [6] Benhamou, F., Older W., J., 1997. Applying Interval Arithmetic to Real", Integer and Boolean Constraints. *Journal of Logic Programming*. 32 (1),
617 1-24.
618 [7] Benhamou F., 1995. Interval constraint logic programming. In: Podelski, A., (Eds.), *Constraint Programming : Basics and Trends*. Volume 910 of
619 *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, pp.1-21.
620 [8] Benhamou F., Goulard F., Granvilliers L., Puget J.-F., 1999. Revising Hull and Box Consistency. In: De Schreye, D., (Eds.), *Proceedings of
621 International Conference on Logic Programming*, Las Cruces, USA. The MIT Press, pp. 230-244.
622 [9] Betz G., Vogel H., 1996. The environmentally friendly product. *Practical guide for environmentally-conscious engineering, design and production*.
623 Luchterhand, Neuwied.
624 [10] Bocquet J. C., Patay E., Schindler A., Duzert A., 2007. How to build a design product and its end-product system? An original approach called
625 SCOS. *Proceedings of the 11th International Conference on Engineering Design (ICED'97)*, Paris
626 [11] Boothroyd, G., 1993. Cutting out the excess. *Manufacturing Breakthrough*. 2 (3), 21-27.
627 [12] Bovea, M.D., Pérez-Belis, V., 2012. A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process.
628 *Journal of Cleaner Production*, 20 (1), 61-71.
629 [13] Brezet, H., van Hemel, C., (Eds.), *ECODESIGN: A promising approach to sustainable production and consumption*. Paris: UNEP; 1997.
630 [14] Chenouard, R., 2007. *Résolution par satisfaction de contraintes appliquée à l'aide à la décision en conception architecturale*. PhD Thesis, ENSAM.
631 Paris.
632 [15] Chiriaev, D., Walster, G.W., 1997. Interval arithmetic specification. Manuscript J3/97-199 for ANSI X3J3.
633 [16] Cilliers, P., 1998. *Complexity and postmodernism: Understanding complex systems*, London: Routledge.
634 [17] Debruyne R., Bessiere C., 2001. Domain Filtering Consistencies. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 14, 205-230.
635 [18] Dewulf, W., Willems, B., Dufloy, JR., 2005. Estimating the environmental profile of early design concepts for an electric fruit juicer using the
636 Eco-Pas methodology. *Life Cycle Engineering International Conference*, Grenoble, France.
637 [19] Dienerder, S., Schield, R., 1998. Computer aided conceptual design method for mecatronics system in process oriented heavy machinery. 6th
638 FIC colloque Skövde.
639 [20] Doehlert, D.H., 1970. Uniform shell designs. *Applied Statistics*. 19, 231-239.
640 [21] Ernzer, M., Birkhofer, H., 2005. Requirements for environmentally friendly and marketable products. In: Abele, E., Anderl, R., Birkhofer, H.
641 (Eds.), *Environmentally-Friendly Product Development. Methods and Tools*. Springer-Verlag, London.
642 [22] Fussler, C., James, P., 1996. *Driving Eco Innovation: A Breakthrough Discipline For Innovation And Sustainability*. London: Pitman Publishing.
643 [23] Goedkoop, and Spreinsma. (2001). *The Eco-indicator 99 – A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment – Methodology annex*.
644 Pré consultants, 22 june 2001, 3rd edition, 144p.

- 645 [24] Gres, S., 2002. Approche pour la conception de systèmes complexes. Techniques de l'Ingénieur.
- 646 [25] Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., et al., 2001. CML-Guide to Life Cycle Assessment. Institute of Environmental Sciences
- 647 (CML), Leiden University, NL
- 648 [26] Gungor, A., Gupta, S.M., 1999. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. Computers and Industrial
- 649 Engineering. 36, 811-853.
- 650 [27] Hao F., Merlet J.P., 2005. Multi-criteria optimal design of parallel manipulators based on interval analysis. Mechanism and Machine Theory. 40
- 651 (2), 157-171.
- 652 [28] Hauschild, M., Jeswiet, J., Alting, L., 2005. From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. Manufacturing
- 653 Engineering 3, 1-21.
- 654 [29] Herrmann, D., 2007. Taguchi optimization in the design of a printer registration system. Journal of Engineering Design, 18 (1), 1-11.
- 655 [30] Andriankaja, H., Bertoluci, G., Millet, D., 2012. Development and integration of a simplified environmental assessment tool based on an
- 656 environmental categorisation per range of products, Journal of Engineering Design. Available online
- 657 [31] Hoke, A. T., 1974. Economical Second-Order Designs Based on Irregular Fractions of the $3n$ Factorial. Technometrics. 16, 375-384.
- 658 [32] Ilgin, M.A., Gupta, S.M., 2010. Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the
- 659 art. Journal of Environmental Management. 91, 563-591.
- 660 [33] Ilog, IlogCP, Reference Manual, Ilog, Gentilly, France, 2006.
- 661 [34] Janin, M., 2000. Démarche d'éco-conception en entreprise, un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus. PhD Thesis, ENSAM. Paris
- 662 [35] Karlsson, R., Luttrupp, C., 2006. EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers in this special
- 663 issue. Journal of Cleaner Production. 14, 1291-1298.
- 664 [36] Larroudé V., Yvars P.A., Millet D., Chenouard R., Bernard A., Inversion of emission model using constraint propagation on tables and intervals,
- 665 Application to Ship-Ecodesign, in Research in Interactive Design, (Proc. IDMME'10), Bordeaux, France.
- 666 [37] LCA-ship, 2002. Design tool for energy efficient ships - A Life Cycle Analysis Program for Ships, Final report.
- 667 [38] Le Pochat, S., Bertoluci, G., Froelich, D., 2007. Integrating ecodesign by conducting changes in SMEs'. Journal of Cleaner Production. 15 (7),
- 668 671-680.
- 669 [39] Lenox, M., Jordan, B., Ehrenfeld, J., 1996. Diffusion of design for environment: a survey of current practice. Proceedings of the IEEE
- 670 International Symposium on Electronics and the Environment, pp. 25-30.
- 671 [40] Lhomme O., 1993. Consistency Techniques for Numeric CSPs. Proceedings of IJCAI-93, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, pp. 232-238.
- 672 [41] Luttrupp, C., Lagerstedt, J., 2006. EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product
- 673 development. Journal of Cleaner Production. 14 (15-16), 1396-1408.
- 674 [42] Vangheluwe, M., Mees, J., Janssen, C., 2007. Monitoring programme on air pollution from sea-going vessels (MOPSEA). Technical report,
- 675 Belgian Science Policy.
- 676 [43] Mackworth A.K., 1977. Consistency in Networks of Relations. Artificial Intelligence. 8 (1), 99-118,
- 677 [44] Lindahl, M., 2006. Engineering designers' experience of design for environment methods and tools – Requirement definitions from an interview
- 678 study. Journal of Cleaner Production. 14 (5), 487-496.
- 679 [45] Millet, D., Tchertchian, N., Brissaud, D., 2009. How to identify the most promising areas of environmental improvement at the early stage of the
- 680 design process. Int. J. Design Engineering. 2 (3), 299-319.
- 681 [46] Montanari U., 1974. Networks of Constraints: Fundamental Properties and Applications to Picture Processing. Information Science. 7(2), 95-132.
- 682 [47] OECD, (2007). Cutting Transport CO2 Emissions. What Progress? OECD-CEMT, Paris.
- 683 [48] Phadke, S. M., 1989. Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- 684 [49] Plackett, R.L., Burman, J.P., 1946. The Design of Optimum Multifactorial Experiments. Biometrika. 33 (4), 305-25.
- 685 [50] R. E. Moore. Interval Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs N. J., 1966
- 686 [51] Rechtschaffner, R.L., 1967. Saturated Fractions of $2n$ and $3n$ Factorial Designs. Technometrics. 9, 569-575.
- 687 [52] Scaravetti D., 2004. Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire, PhD Thesis,
- 688 ENSAM. Bordeaux.
- 689 [53] Scheffé, H. (1958). Experiments With Mixtures. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), Vol. 20, No. 2, pp. 344-
- 690 360, Blackwell Publishing
- 691 [54] Taguchi, G., Elsayed, E., Hsiang, T., 1989. Quality Engineering In Production System. New York McGraw Hill.
- 692 [55] Tchertchian, N., Millet, D., 2011. Design for Remanufacturing: What performances can be expected? International Journal of Environmental
- 693 Technology and Management. 15 (1), 28-49.
- 694 [56] Tchertchian, N., Liang, H. and Millet, D., 2009. The influence of the multiple life cycles on the environmental impact of a product. Proc. ICED
- 695 2009 17th Int. Conf. Engineering Design, Stanford University, CA, USA.
- 696 [57] Unal, R., Stanley, D.O., Joyner, C.R., 1993. Propulsion system design optimization using the Taguchi method. IEEE Transactions on Engineering
- 697 Management. 40(3), 315-322.
- 698 [58] Van der Ploeg, A., 2011. A Comparison of Several Strategies to Optimize a Ship's Aft Body. Journal of Ship Production and Design. 27 (4), 202-
- 699 211.
- 700 [59] Vautier J.-F., 2001. Systèmes complexes : Présentation générale. Management Industriel, Techniques de l'Ingénieur.
- 701 [60] Visser, W., 1995. Reduce, reuse, recycle; Development of a take-back system for the Veromatic professional coffee machine. Faculty of Industrial
- 702 Design Engineering, Section MPO, Delft University of Technology
- 703 [61] Volvo Standards 1009, 1 & 1009, 2 & 1009, 11 Corporate standards for materials. Black, gray and white list of materials
- 704 [62] Wimmer, W., Züst, R., 2003. ECODESIGN Pilot, Product-Investigation-, Learning- and Optimization-Tool for Sustainable Product Development.
- 705 Alliance for Global Sustainability Bookseries , Vol. 3, 2003, 112 p., ISBN: 978-1-4020-1090-3.
- 706 [63] Xie, H., Henderson, P., Kernahan, M., 2005. Modelling and solving engineering product configuration problems by constraint satisfaction.
- 707 International Journal of Production Research. 43 (20), 4455-4469.
- 708 [64] Yvars, P.-A., 2010. A Constraint-Based Approach to the Composition Relation Management of a Product Class in Design. Journal of Computing
- 709 and Information Science in Engineering. 10 (3), (8 pages).
- 710 [65] Yvars, P.A., Lafon, P., Zimmer, L., 2009. Optimization of mechanical system: Contribution of constraint satisfaction method. International
- 711 Conference on Computers & Industrial Engineering, 1379-1384.
- 712 [66] Zhang, H., Kuo, T., Lu, H., Huang, S., 1997. Environmentally conscious design and manufacturing: a state-of-the-art survey. Journal of
- 713 Manufacturing Systems. 16, 352-371
- 714
- 715

716
717 Contact
718 Nicolas Tchertchian
719 Supmeca toulon, LISMMA laboratory,
720 Maison des technologies, 83000 Toulon, France,
721 Nicolas.tchertchian@supmeca.fr
722

723

724

725

726

727

728

729

730

731

732

733

734

735

736

737

738

739

740

741

742

743

744

745

746

A. Nomenclature of the Variables

Sous-système	Variables	Index	units	Equations	Domaine
Hull	Effective Power	P_e	Watt	Equation 1	[0, ∞]
	Hull drag (Resistance)	R^{Hull}	N.m	Equation 2	[0, ∞]
	Speed	s	cts		[0,12]
	Facteur de forme	K^{Hull}	%		[0, 100]
	Weight	W^{Hull}	Kg		[0, ∞]
	Load	L^{Hull}	Kg	Equation 4	[0, ∞]
	Materials	M^{Hull}	Kg		{Steel, Aluminium, Fiber, ...}
Sous-système Génération de puissance					
Engine	Power	P^{Engine}	kW	Equation 4	[0, ∞]
	Speed	S^{Engine}	RPM		[0, ∞]
	Torque	T^{Engine}	N.m		[0, ∞]
	Weight	W^{Engine}	Kg		[0, ∞]
	Materials	M^{Engine}	Kg		{Steel, Cast Iron, copper, aluminium, ...}
	Brake Specific Fuel Consumption	BSFC	g/kWh	Equation 5	
Motor	Power	P^{Motor}	kW	Equation 4	[0, ∞]
	Speed	S^{Motor}	RPM		[0, ∞]
	Torque	T^{Motor}	N.m		[0, ∞]
	Weight	W^{Motor}	Kg		[0, ∞]
	Materials	M^{Motor}	Kg		{Steel, Cast Iron, copper, aluminium, ...}
Generator	Power	$P^{Generator}$	kW		[0, ∞]
	Speed	$S^{Generator}$	RPM		[0, ∞]
	Torque	$T^{Generator}$	N.m		[0, ∞]
	Weight	$W^{Generator}$	Kg		[0, ∞]
	Materials	$M^{Generator}$	Kg		{Steel, Cast Iron, copper, aluminium, ...}
Sous-système					
Dispositif de déplacement (Propellers)	Propulsion Power	$p^{propellers}$	W	Equations 7, 8 and 9	
	Effective power	$P_e^{propellers}$	W	Equation 6	
	Propeller Speed	$S^{propellers}$	RPM		[0, 1000]
	Masse	W	Kg		
	Shafting efficiency e_1	e^1	%		[96, 98]
	Transmission efficiency	e^2	%		[96, 100]
	Propeller efficiency	e^3	%		[50, 100]
Sous-système					
Gestion d'énergie (Batterie)	Capacité max	$C^{battery}$	Wh	Equations 19	[0, ∞]
	Weight	$W^{Battery}$	Kg		[0, ∞]
	Densité Massique	D_M	Wh/kg		[30, 2500]
	Depth of Discharge	DoD	%		[0, 100]
	Energie(t)	$E^{Battery}$	Wh	Equations 24	[0, ∞]
	Capacité(t)	$c^{battery}$	%	Equations 21 and 22	[0, ∞]
System					
Ship	CO ₂ emission	Em_{CO_2}	Kg	Equations 15	[0, ∞]
	SO ₂ emission	Em_{SO_2}	Kg	Equations 16	[0, ∞]
	NO _x emission	Em_{NO_x}	g	Equations 17 and 18	[0, ∞]
	Fuel consumption	W^{fuel}	g	Equations 14	[0, ∞]
	Energy consumption	E_c^{Ship}	Wh	Equations 10 and 12	[0, ∞]
	Energy production	E_p^{Ship}	Wh	Equations 11 and 13	[0, ∞]

Table A.1: Paramètres de conception de la navette (summerized)

752 La variable binaire *Configuration* notée $Co^{component}$ traduit la présence du composant dans l'architecture du système.753 $Co^{component} \in \{0, 1\}$.754 La variable entière *Number* notée $N^{component}$ définie le nombre d'un composant dans l'architecture du système. $N^{component} \in$ 755 $[0, N]$.

756 La variable binaire *Activity* notée $A^{component}$ traduit l'état d'un composant dans l'architecture du système, elle est
 757 susceptible de varier lors de chaque séquence. $A^{component}_i \in \{0, 1\}$. Lorsque $A^{component}_i = 0$, le composant est inactif durant
 758 la séquence i .

760 **B. Equations of the models**

761 L'étude hydrodynamique de la coque du bateau s'appuie sur des outils de CFD (Computational Fluid Dynamics)
 762 performants. Ils permettent de tester différentes formes de coques en accord avec le cahier des charges. Les résultats issus
 763 des simulations numériques sont ensuite validés par des tests à échelles à échelles réduites en bassin de carène.
 764

765 **Table B.1: Equations of the Hull model**

$Pe^{Hull} = R^{Hull} \times s$	1
$R^{Hull} = K \times (-9,46006. 10^{-5}s^3L^{2,84} + 0.135267132s^2L^{1,89} - 2,644005. 10^{-3}sL^{3,10} + 3,106298. 10^{-3}L^{3,03})$	2
$L^{Hull} = N^{Engine} \times Pr^{Engine} \times W^{Engine} + N^{Generator} \times Pr^{Generator} \times W^{Generator} + N^{Motor} \times Pr^{Motor} \times W^{Motor} + W^{Battery} + W^{Hull}$	3

766

767 La courbe de tendance de la résistance à l'avancement de la coque suit une cubique $f(s^3)$. La régression puissance (Power
 768 regression) permet de modéliser la résistance à l'avancement pour différentes charges, l'équation 2 modélise la résistance à
 769 l'avancement en prenant en compte une variable supplémentaire (la Charge) $R = f(s, L)$. La validité du modèle est respectée
 770 jusqu'à 20 kts, donc dans le domaine de vitesse des navettes : $v \in [0, 12]$ kts. Pour la modélisation de la trainée de
 771 différents bateaux, un facteur de forme sera utilisé : $K = (1 + X\%)$, avec $X = 0, 10, 20, 30\%$ par exemple.
 772

773 **Table B.2: Equations of the Diesel Engine model**

Diesel Engine Power $Power\ engine = \lambda \times Speed\ engine^3$	4
Brake Specific Fuel Consumption $BSFC = \alpha. S^{Engine^4} + \beta. S^{Engine^3} + \gamma. S^{Engine^2} + \delta. S^{Engine} + \varepsilon$	5
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ et λ dépendent du type de moteurs diesel choisi	

774

775 La puissance effective (ou puissance hydrodynamique) est différente de la puissance aux moteurs (Puissance propulsive),
 776 seule une fraction de l'énergie de rotation est convertie en poussée sur les propulseur. En effet le long de la chaîne
 777 propulsive il y a des pertes. Parmi les rendements suivants :
 778 Transmission efficiency = 96% to 98% (gear friction and heat)
 779 Shafting efficiency = 97% to 98% (bearing friction and shaft torsion)
 780 Hull efficiency = 90% to 100% (pressure regions affecting the hull)
 781 Propeller efficiency = 50% to 70% (hydrodynamic losses)
 782

783 **Table B.3: Equations of the propeller model**

$Pe^{Hull} = p^{Propeller}$	6
$p^{Propeller} = P^{Propeller} \times e^{Propellers}$	7
$e^{Propellers} = e_1 \times e_2 \times e_3$	8
$P^{Propeller} = N^{Engine} \times A^{Engine} \times C_0^{Engine} \times P^{Engine} + N^{Motor} \times A^{Motor} \times C_0^{Motor} \times P^{Motor}$	9

784 **Table B.4: Equations of electric energy model**

$Pc^{ship} = N^{Motor} \times Co^{Motor} \times P^{Motor} + N^{Engine} \times Co^{Engine} \times P^{Engine} + N^{Auxiliary} \times Co^{Auxiliary} \times P^{Auxiliary}$	10
$Pp^{ship} = N^{Generator} \times Co^{Generator} \times P^{generator} + N^{sp} \times Co^{sp} \times P^{sp} + \dots$	11
$Ec^{ship}_i = \frac{d_i \times Pc^{ship}}{3600}$	12
$Ep^{ship}_i = \frac{d_i \times Pp^{ship}}{3600}$	13
sp : solar panel	

785

786 **Table B.5: Equations of the fuel consumption model**

$W^{fuel}_i = N^{Generator} \times Co^{Generator}_i \times P^{Generator} \times d_i \times BSFC^{Generator}_i + N^{Engine} \times Co^{Engine}_i \times P^{Engine} \times d_i$ $\times BSFC^{Engine}_i$	14
---	----

787

788 **Table B.6: Equations of the emission model**

789

Emission CO2: EmCO2 (MOPSEA Model, (Vangheluwe, 2007))	
$EmCO_2 = 3100 \times 10^{-6} \times W^{Fuel}_i$	15
Emission SO2: EmSO2 (MOPSEA Model)	
$EmSO_2 = 4 \times 10^{-6} \times W^{Fuel}_i$	16
Emission NOx: EmNOx (IMO II)	
if $S^{Engines} < 200$ Rpm,	
$EmNO_x = 14.4 \times (N^{Generator} \times Co^{Generator}_i \times P^{Generator} \times d_i + N^{Engine} \times Co^{Engine}_i \times P^{Engine} \times d_i)$	17
if $S^{Engines} \geq 200$ Rpm,	
$EmNO_x = 42.882 \times (S^{Generator-0.266} \times N^{Generator} \times Co^{Generator}_i \times P^{Generator} \times d_i + S^{Generator-0.266} \times N^{Engine} \times Co^{Engine}_i \times P^{Engine} \times d_i)$	18

790

791 **Table B.7: Equations of the battery model**

$C^{battery} = W^{Battery} \times D_M$	19
$c^{battery}_0 = 100\%$	20
$c^{battery}_i = E^{battery}_i / C^{battery}$	21
$c^{battery}_i \geq DoD^{Battery}$	22
for $i = 0, E^{battery}_0 = C^{battery}$	23
for $i \neq 0, E^{battery}_i = E^{battery}_{i-1} - Ec^{ship}_{i-1} + Ep^{ship}_{i-1}$	24

792