



## Eco-conception navale

Pratiques actuelles et futures dans les activités de construction navale civile et militaire, en France et à l'étranger



Stéphane FAUVAUD  
Patricia FORGENEUF  
Frédéric LE JONCOUR



DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ARMEMENT



# **Eco-conception navale**



Stéphane Fauvaud  
Patricia Forgeneuf  
Frédéric Le Joncour

# **Eco-conception navale**

**Pratiques actuelles et futures dans les activités  
de construction navale civile et militaire,  
en France et à l'étranger**

Centre d'information et de documentation de l'armement

---

Ministère de la défense et des anciens combattants  
Direction générale de l'armement  
Direction de la stratégie  
Centre d'information et de documentation de l'armement  
9, boulevard Liédot  
16021 Angoulême cedex  
(tél.) 05 45 37 19 19 – (fax) 05 45 37 19 98  
Site Internet : <http://www.defense.gouv.fr/dga/liens/le-cedocar>

Le centre d'information et de documentation de l'armement n'est pas responsable des informations hébergées par des sites Internet librement accessibles, et ne peut garantir ni la pérennité des adresses URL, ni le contenu des pages, ni l'exactitude des informations.

Crédit photographique : STX France SA (p. 61).

Copyright © 2011 – Centre d'information et de documentation de l'armement – Tous droits réservés

*Les auteurs remercient Clément Deken et Richard Matez,  
experts à la direction technique de la direction générale de l'armement,  
pour avoir initié cette étude et contribué à sa réalisation par leur soutien,  
et Lucie Merle pour la gestion du programme étude amont OCEAN.*



# Table des matières

<b>Table des figures</b>	11
<b>Liste des tableaux</b>	13
<b>Principaux acronymes et abréviations</b>	15
<b>Avant-propos</b>	17
<b>Partie 1. <i>Contexte, initiatives, projets</i></b>	19
<b>1 Introduction</b>	21
1.1 Consommation croissante et développement durable	21
1.2 Contexte réglementaire environnemental	23
1.2.1 Union européenne	24
1.2.2 Organisation maritime internationale	25
1.3 L'éco-conception, pour une conception <i>consciente</i> de l'environnement	28
1.3.1 Définition et principes	28
1.3.2 Outils d'éco-conception	29
1.3.3 Un domaine de recherche actif	30
Références	31
<b>2 Défense et environnement</b>	37
2.1 Défense française, armement et environnement	37
2.1.1 L'engagement du ministère de la défense	37
2.1.2 La marine nationale et la protection de l'environnement	38
2.1.3 La dimension environnementale dans les programmes d'armement	38
2.2 Défense européenne et Atlantique-Nord	40
2.2.1 Agence européenne de défense	40
2.2.2 Organisation du traité Atlantique-Nord	40
2.3 Impact environnemental d'un navire de guerre	41
2.3.1 Signature polluante d'un navire	41
2.3.2 Navire respectueux de l'environnement et spécificité militaire	42
Références	43

<b>3 Des navires en service aux navires du futur : quelques initiatives et projets</b>	<b>47</b>
3.1 Pôles de compétitivité français, syndicats professionnels français et européens, Grenelle de la mer	48
3.1.1 Projets des pôles de compétitivité français	48
3.1.2 Groupement des industries de construction et activités navales	48
3.1.3 Confédération européenne des industries nautiques	48
3.1.4 Le Grenelle de la mer français	49
3.2 Quelques initiatives industrielles à l'étranger	49
3.3 L'amélioration des performances environnementales des navires en service	58
3.4 Des réalisations de navires verts...	59
3.5 ... aux projets de navires du futur	60
Références	66
<b>Partie 2. Fonctions du bord, technologies innovantes</b>	<b>73</b>
<b>4 Une maîtrise indispensable de la consommation d'énergie</b>	<b>75</b>
Références	79
<b>5 Motorisation, propulsion, puissance, hydrodynamique</b>	<b>81</b>
5.1 Moteurs diesel avancés	81
5.2 Récupérateurs d'énergie thermique	84
5.3 Moteurs de type <i>isoengine</i>	85
5.4 Moteurs hydrojets	85
5.5 Propulsion par pods	85
5.6 Systèmes intégrés de puissance	86
5.6.1 Stockage stationnaire d'énergie électrique : généralités	86
5.6.2 Programme européen POSE <sup>2</sup> IDON	89
5.6.3 Programme étasunien Next Generation Integrated Power System	89
5.6.4 L'approche de la Royal Navy britannique	90
5.7 Hydrodynamique et système propulsif	90
5.7.1 Amélioration de l'hydrodynamique du navire	90
5.7.2 Hydrodynamique et hélices : quelques aspects	92
5.7.3 Lubrifiants et coussinets pour éléments de ligne d'arbre	94
5.8 Le navire tout électrique	94
5.8.1 Un survol historique (1830-2000)	94
5.8.2 Intérêt du concept	95
5.8.3 Exemples de navires militaires tout électrique récents	97
5.8.4 Des navires à propulsion magnétohydrodynamique ?	97
Références	98
<b>6 Energie et ressources</b>	<b>107</b>
6.1 Biocarburants	107
6.1.1 Définitions	107
6.1.2 Initiatives et projets	108
6.2 Gaz naturel	109

6.3	Hydrogène et piles à combustible	110
6.4	Soleil	114
6.5	Vent	115
6.6	Houle	117
	Références	117
<b>7</b>	<b>Gestion et traitement des déchets</b>	<b>123</b>
7.1	Eaux de cale	123
7.2	Eaux grises, eaux noires	126
7.3	Déchets solides	128
7.4	Emissions atmosphériques	129
	Références	134
<b>8</b>	<b>Peintures antisalissures, eaux de ballast et sédiments</b>	<b>139</b>
8.1	Peintures antisalissures	139
8.1.1	Introduction	139
8.1.2	Peintures antisalissures avec biocides	141
8.1.3	Revêtements anti-adhésion (ou à faible énergie de surface)	143
8.1.4	Une perspective : le biomimétisme	144
8.2	Eaux de ballast et sédiments	144
	Références	160
<b>9</b>	<b>Bruit et vibrations</b>	<b>165</b>
9.1	Introduction	165
9.2	Exemples de travaux théoriques et appliqués	165
	Références	167
<b>10</b>	<b>Logiciels</b>	<b>169</b>
10.1	Logiciels pour l'éco-conception	169
10.2	Optimisation de fonctions	170
10.2.1	Emissions atmosphériques	170
10.2.2	Hydrodynamique navale	170
10.2.3	Bruit et vibrations	170
	Références	171
	<b>Partie 3. Epilogue</b>	<b>173</b>
<b>11</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>175</b>
11.1	Bilan général de l'étude	175
11.2	Essai de prospective technologique pour les navires militaires	176

<b>Annexe A – Définition des niveaux de maturité d'une technologie (<i>technology readiness level</i>, TRL)</b>	181
<b>Annexe B – Niveaux de maturité (TRL) de quelques technologies</b>	183
<b>Annexe C – Organisations et syndicats professionnels français et étrangers de l'industrie navale</b>	185
<b>Annexe D – Liste de conférences</b>	189
<b>Contents</b>	195

# Table des figures

<b>Figure 1.</b> Répartition géographique des zones spéciales et particulièrement sensibles sur le plan environnemental (PSSA)	26
<b>Figure 2.</b> Cycle de vie d'un produit	28
<b>Figure 3.</b> Classement des principaux outils d'éco-conception selon leur finalité	31
<b>Figure 4.</b> Contraintes et facteurs d'influence sur l'éco-conception des programmes navals	40
<b>Figure 5.</b> Flux d'entrée et de sortie (matière, énergie) d'un navire	41
<b>Figure 6.</b> Vue d'artiste du concept de navire civil Eoseas (STX Europe)	61
<b>Figure 7.</b> Ordres de grandeur de la capacité des systèmes de stockage stationnaire d'électricité	87
<b>Figure 8.</b> Principales méthodes de traitement des particules solides et des eaux de ballast	145
<b>Figure 9.</b> Perspective d'utilisation possible de quelques technologies, selon une estimation de leur degré de maturité (TRL) actuel	179
<b>Figure A1.</b> Définition des niveaux de maturité d'une technologie (TRL)	182



# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Répartition des familles d'outils d'éco-conception selon leur finalité	30
<b>Tableau 2.</b> Principales émissions et sources d'émissions d'un navire de guerre	42
<b>Tableau 3.</b> Liste de projets maritimes des pôles de compétitivité mer Bretagne, mer PACA et EMC2	51
<b>Tableau 4.</b> Projets d'industriels français et étrangers	62
<b>Tableau 5.</b> Taux de SO <sub>x</sub> maximal autorisé dans le fioul selon les zones maritimes et les législations	76
<b>Tableau 6.</b> Réduction potentielle de consommation de carburant en fonction de la méthode utilisée	77
<b>Tableau 7.</b> Réduction des émissions de CO <sub>2</sub> en fonction de la technologie mise en œuvre	79
<b>Tableau 8.</b> Ordres de grandeur du rendement thermique de moteurs pour des applications navales	81
<b>Tableau 9.</b> Principales modifications des moteurs proposées par des industriels en vue d'applications navales	83
<b>Tableau 10.</b> Ordres de grandeur de la capacité de stockage et du temps de réponse (décharge) de quelques technologies de stockage stationnaire de l'énergie électrique	88
<b>Tableau 11.</b> Estimation de la diminution possible de la résistance à l'avancement du navire obtenue par des solutions hydrodynamiques	93
<b>Tableau 12.</b> Principaux types de piles à combustible	111
<b>Tableau 13.</b> Méthodes de séparation des huiles dans les eaux de cale des navires	124
<b>Tableau 14.</b> Comparaison qualitative des traitements biologiques et physico-chimiques des eaux grises et noires	127
<b>Tableau 15.</b> Valeurs indicatives de réduction des émissions de CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , CO, HC et de particules selon la méthode choisie	131
<b>Tableau 16.</b> Exemples de systèmes de revêtement commerciaux	142
<b>Tableau 17.</b> Systèmes industriels de traitement des eaux de ballast	147
<b>Tableau B1.</b> Etat de maturité (TRL) atteint par quelques technologies	183



## Principaux acronymes et abréviations

ACV : Analyse dy cycle de vie  
ACWS : Antifouling Coatings for war Ships  
ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie  
AED : Agence européenne de défense  
AFNOR : Association française de normalisation  
ASTM : American Society of Testing and Materials  
BPHU : Bâtiment de plaisance hors d'usage  
CEDOCAR : Centre d'information et de documentation de l'armement de la DGA  
CHEAr : Centre des hautes études de l'armement de la DGA  
CO : Monoxyde de carbone  
CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone  
CORICAN : Conseil d'orientation de la recherche et de l'innovation pour la construction et les activités navales  
COV : Composés organiques volatiles (*Volatile Organic Compounds* : VOC)  
CSCN : Chambre syndicale des chantiers navals  
DCMT : Danish Centre for Maritime Technology  
DEEE : Déchets d'équipements électriques et électroniques  
DGA : Direction générale de l'armement (ex-délégation générale pour l'armement)  
DICOd : Délégation à l'information et à la communication de la défense  
DMFC : Direct methanol fuel cell (pile à combustible à méthanol direct)  
DS : Direction de la stratégie de la DGA  
DSTL : Defence Science and Technology Laboratory (ministère de la défense, Royaume-Uni)  
DT : Direction technique de la DGA  
DTU : Technical University of the Denmark  
ECHA : European Chemicals Agency  
EGR : Exhaust Gas Recirculation  
EMA : Etat-major des armées  
EMC2 : Ensembles métalliques composites complexes  
EMM : Etat-major de la marine  
EPWG : Environmental Protection Working Group (groupe de travail de l'OTAN)  
ESS-21 : Environmentally Sound Ship for the 21st century (concept de navire de l'OTAN)  
EuP : Energy-using Products  
FRC : Foul release coating  
FREMM : Frégates multi-missions  
GICAN : Groupement des industries de construction et activités navales  
GRI : Global reporting initiative  
HVP : Huile végétale pure  
ICES : International Council for the Exploration of the Sea  
IFREMER : Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer  
IMO : International Maritime Organisation  
INLS : Improved Navy Lighterage System  
IPS : Integrated Power System  
ISIGE : Institut supérieur d'ingénierie et de gestion de l'environnement

ISO : International standard organisation  
 JOCE : Journal officiel des Communautés européennes  
 JORF : Journal officiel de la République française  
 JOUE : Journal officiel de l'Union européenne  
 LBTS : Land Based Test Site (at the Ships Systems Engineering Station, Philadelphia, Pennsylvania, USA)  
 LCCP : Life cycle climate performance  
 LCS : Littoral Combatant Ship  
 LPD : Landing Platform Dock  
 MCFC : Molten carbonate fuel cell (pile à combustible à carbonate fondu)  
 MCG/7 : Maritime Capability Group 7 on Maritime Environmental Protection (groupe de travail de l'OTAN)  
 MEOA : Département management environnemental des opérations d'armement de la DGA  
 MEPC : Marine Environment Protection Committee (comité pour la protection de l'environnement marin) de l'OMI  
 NGIPS : Next Generation Integrated Power System  
 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration  
 NO<sub>x</sub> : Oxydes d'azote  
 NRE : Nouvelles régulations économiques  
 OMI : Organisation maritime internationale  
 ONG : Organisation non gouvernementale  
 ONR : Office of Naval Research  
 ONU : Organisation des Nations unies  
 OTAN : Organisation du traité Atlantique-Nord  
 PAFC : Phosphoric acid fuel cell (pile à combustible à acide phosphorique)  
 PEA : programme étude amont  
 PEMFC : Proton exchange membrane fuel cell (pile à combustible à membrane d'échange de protons)  
 ppm : partie par million  
 PSSA : Particularly sensitive sea areas  
 REACH : Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals  
 REP : Responsabilité élargie du producteur  
 RoHS : Restriction of use of certain substances in electric and electronic equipment  
 RSE : Responsabilité sociétale des entreprises  
 RSN : Republic of Singapore Navy  
 SAIL : Smart Action In Logistics (programme de la marine de guerre de la République de Singapour)  
 SECA : Sulphur Emissions Control Area  
 SGA : Secrétariat général pour l'administration, ministère de la défense  
 SiC : Carbure de silicium  
 SMQ : Service central de la modernisation et de la qualité de la DGA  
 SOFC : Solid oxide fuel cell (pile à combustible à oxyde solide)  
 SO<sub>x</sub> : Oxydes de soufre  
 SWG-12 : Special Working Group 12 (groupe de travail de l'OTAN)  
 TBT : Tributylétain  
 TRL : Technology readiness level  
 UE : Union européenne  
 UV : Ultraviolet  
 VHU : Véhicules hors d'usage  
 VOC : Volatile organic compounds (Composés organiques volatiles : COV)  
 WaCoReG : Water-Cooled Residual Gas  
 WHR : Waste Heat Recovery  
 WHRU : Waste Heat Recovery Unit

## Avant-propos

Les pratiques d'éco-conception dans le domaine naval doivent faire l'objet d'une réflexion spécifique, en cohérence avec la stratégie globale affichée par la direction générale de l'armement (DGA) pour l'ensemble des futurs systèmes d'armement. L'objectif est la réduction, dès la phase de conception et durant tout le cycle de vie (utilisation opérationnelle, entretien, gestion de la fin de vie), de l'impact sur l'environnement des futurs navires.

Dans ce cadre, le programme étude amont (PEA) 071903 OCEAN sur la *Réduction de l'empreinte environnementale des navires* devrait permettre d'identifier et d'évaluer les pratiques d'éco-conception – actuelles et prévisibles – et les technologies mises en œuvre ou émergentes pour prendre en compte tous les critères environnementaux (réduction des rejets dans l'eau et dans l'air, réduction des consommations...).

Pour définir les prestations complémentaires à mener dans le cadre de ce PEA, le centre d'information et de documentation de l'armement (CEDOCAR) a réalisé une étude documentaire préalable dans le but d'apporter des éléments d'information sur les diverses pratiques d'éco-conception dans le domaine naval, civil et militaire, en France et à l'étranger.

### Objet et périmètre de l'étude

Le périmètre technique de l'étude a été limité aux bâtiments de surface civils (petites embarcations, navires de plaisance, marine fluviale, marine marchande de transport et de croisière) et militaires (petits bâtiments, frégates, pétroliers...), et à leurs systèmes navals associés.

L'étude était destinée à :

- identifier les entités qui mènent des réflexions ou mettent déjà en pratique l'éco-conception pour les navires : organismes étatiques (civils et militaires), chantiers navals (civils et militaires), sociétés spécialisées dans des secteurs particuliers (équipements électriques et électroniques ; mécanique ; énergie...), sociétés de classification, universités et écoles ;
- collecter des documents méthodologiques (processus techniques, outils logiciels, normes, guides...) décrivant des mesures ou des technologies adaptées à la réduction ou la suppression des impacts sur l'environnement (pollution, consommation de ressources, nuisances sonores...).

Les principaux systèmes navals et fonctions associées considérés ont été : la coque et la structure ; les matériaux ; les auxiliaires de coque ; le système propulsif ; la production d'énergie ; la maîtrise des flux (matières dangereuses, gaz à effet de serre, déchets...), des ressources (eau, combustible...), de l'énergie, du bruit des navires...

## **Méthodologie de recherche de l'information**

De multiples sources d'information ont été consultées – revues, actes de congrès, ouvrages, rapports, presse... – à partir de bases de données spécialisées et d'Internet ; toutefois, les données recueillies proviennent essentiellement d'Internet.

## **Organisation du rapport d'étude**

Le cadre économique, réglementaire et sociétal (§ 1), qui incite ou contraint les armateurs et constructeurs à la mise en service de navires respectueux de l'environnement, est d'abord évoqué dans la première partie de cette étude. Les démarches engagées par le ministère de la défense français en faveur de l'environnement, en particulier dans le domaine naval (§ 2), sont ensuite présentées, ainsi que des initiatives et projets français et étrangers de navires du futur (§ 3).

La seconde partie de l'étude présente un panorama des méthodes et des technologies disponibles ou en cours de développement destinées à maîtriser et augmenter l'indépendance énergétique des navires vis-à-vis des ressources fossiles (§§ 4 et 6), à améliorer les performances de leur système propulsif (§ 5), à gérer et traiter leurs déchets (§ 7 et 8), à conserver l'intégrité de leur coque face aux bioalissures (§ 8) et à limiter leur signature acoustique (§ 9) ; quelques outils logiciels d'éco-conception et d'optimisation de fonctions techniques sont évoqués (§ 10) avant de proposer une conclusion générale (§ 11).

Les annexes A et B donnent la définition du degré de maturité atteint par une technologie (TRL) et la maturité de quelques technologies évoquées dans l'étude. Des organismes et syndicats professionnels français et étrangers, et des conférences majeures sont listés respectivement en annexes C et D.

# Partie 1

## *Contexte, initiatives, projets*

« Recouvrant, au large, les eaux des océans du monde, à une distance d'environ mille six cents kilomètres de la côte, se trouvait une pellicule mono-moléculaire, mince mais élastique, constituée d'un complexe de polymères à longue chaîne saturés, engendrés à l'intérieur de la mer par les grandes quantités de déchets industriels déversés dans les bassins océaniques pendant les cinquante dernières années. Cette membrane résistante et perméable à l'oxygène gisant entre les deux faces air-eau empêchait presque toute évaporation des eaux de surface dans l'atmosphère. Bien que la structure de ces polymères eût été rapidement identifiée, on ne trouva aucun moyen de les faire disparaître. »

James Graham Ballard



# Introduction

Avec le développement du modèle de consommation des pays riches, l'homme a pris conscience de la dégradation provoquée sur l'environnement par ses activités et par une exploitation irraisonnée des ressources naturelles ; il s'est aperçu de la dimension finie de l'espace dans lequel il vit. La protection de l'environnement devient ainsi un enjeu pour lequel Etats et organisations internationales établissent des conventions et protocoles, s'accordent sur des principes ou des règlements, tandis que l'éco-conception apparaît peu à peu dans l'industrie.

## 1.1 Consommation croissante et développement durable

Il y a environ 10000 ans – début de l'époque néolithique, caractérisée par des mutations techniques et sociales importantes –, une économie de production basée sur l'agriculture et l'élevage a commencé à apparaître chez des groupes humains, conduisant souvent à leur sédentarisation. Cette évolution majeure du mode de vie des hommes a généré une influence sur la biosphère. Toutefois, ces premières modifications du milieu restaient mineures par rapport à celles qui sont apparues avec la révolution industrielle, vers la moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, puis après la seconde guerre mondiale. Le déplacement des équilibres existants entre le milieu et les activités humaines a alors modifié – de façon rapide et extensive – les écosystèmes, et le modèle de société de consommation développé par les pays industrialisés (essentiellement occidentaux) en est largement responsable. En effet, en substituant à la satisfaction des besoins fondamentaux de l'homme (*i.e.* assurer sa subsistance) une croissance continue de la consommation, les flux de matière et d'énergie nécessaires au système de production de biens ont créé une dégradation de l'état environnemental de la planète.

Les impacts environnementaux locaux (pollutions...), régionaux (dégradation des sols, diminution des ressources en eau, modification de la dynamique de la biodiversité...), ou planétaires (effet de serre additionnel, modification de la distribution de la biodiversité, changement climatique...) peuvent être répartis en quatre grandes classes de problèmes (Le Pochat 2005) :

- le changement climatique<sup>1</sup> ;
- la diminution et la mutation des ressources biotiques et abiotiques<sup>2</sup> ;

---

<sup>1</sup> A travers une perspective historique et par une approche scientifique pluridisciplinaire, Merlin (2011) dresse un état particulièrement clair des certitudes, des hypothèses probables ou possibles et des incertitudes sur la connaissance et la compréhension du climat. D'autre part, un panorama des méthodes et outils d'étude du climat et de son avenir est donné par Jeandel & Mosseri (2011).

- les pollutions<sup>3</sup> ;
- les atteintes à la biodiversité<sup>4</sup>.

Cependant, au-delà des bouleversements écologiques, des conséquences sociales, sociétales, économiques, financières et, *in fine*, géostratégiques, sont prévisibles : risque de tensions entre pays pour la maîtrise des ressources (énergie, matières premières, eau) ; problèmes sanitaires et de santé publique ; déplacements massifs de populations...

L'altération des écosystèmes, les problématiques éthiques, mais aussi la mise en évidence de limites physiques (ressources, espace) au modèle de croissance, ont conduit à penser à un modèle de développement économique plus respectueux de la nature, conceptualisé par la notion de « développement durable »<sup>5</sup>. A travers cette notion, qui vise à assurer le développement des sociétés tout en préservant la planète pour les générations futures, il s'agit de trouver un équilibre entre l'efficacité économique et la faisabilité technique, l'équité sociale et le respect de l'environnement. Cadre conceptuel dominant, le développement durable a été considéré comme modèle mondial de référence lors de la convention de Rio de Janeiro (1992) sur la biodiversité.

Cette prise de conscience a conduit des organisations internationales, en particulier l'Organisation des Nations unies (ONU), à établir des conventions et des protocoles d'application pour la protection de l'environnement (Helsinki en 1985, Montréal en 1987, Kyoto en 1997, etc. ; cf. la liste donnée par Le Pochat 2005). Les réglementations internationales, européennes et nationales reposent sur des principes fondamentaux, en particulier :

- le principe d'action préventive et de correction, qui vise à l'utilisation des meilleures techniques disponibles à un coût économiquement acceptable ;
- le principe de responsabilité environnementale, qui permet notamment d'impliquer un industriel dans la prévention et la limitation des risques de préjudice sur la santé et des dommages environnementaux liés à la production, l'utilisation et la fin de vie de ses produits. Le principe de responsabilité partagée étend la responsabilité de l'industriel à ses fournisseurs ou sous-traitants. Le principe de responsabilité environnementale est lié au principe de payeur-pollueur, lequel précise que les préjudices sur l'environnement sont financés par ceux qui les ont créés ;

---

<sup>2</sup> Biotique : relatif au monde du vivant ; abiotique : où la vie est absente, impossible (d'après *Le Nouveau Petit Robert*, Dictionnaires Le Robert).

<sup>3</sup> Des pollutions marines ont été provoquées par les naufrages de l'*Exxon-Valdès* (1989), de l'*Erika* (1999), de *Deep Water Horizon* (2010), par exemple. Les catastrophes de Bhopal (1984) et de Tchernobyl (1986) sont deux exemples de pollutions terrestres.

<sup>4</sup> La déforestation en Amazonie, par exemple, contribue à l'appauvrissement de la biodiversité.

<sup>5</sup> La notion de développement économique plus respectueux de la nature trouve ses origines au début du XX<sup>e</sup> siècle, où, aux Etats-Unis et en Europe, se sont développées deux approches antinomiques (Soichot 2011, p. 114-115) : une conception conservationniste, vision utilitariste et anthropocentrique où l'homme doit gérer et préserver les ressources pour s'assurer de la pérennité de leur exploitation ; une conception préservationniste, où l'homme n'est qu'un élément du système naturel, et où les autres éléments possèdent une valeur supérieure à celle qu'une utilisation humaine leur attribue. Le développement durable associe le principe de progrès, dans une perspective capitaliste de développement économique et social, et la protection de l'environnement. L'idée de décroissance, apparue plus récemment et portée par des courants de pensée plus marginaux, est une position alternative minoritaire, plus critique que celle des promoteurs du développement durable à l'égard du modèle capitaliste, fondée sur la qualité plutôt que la quantité et sur la coopération plutôt que la compétition (Latouche 2003, 2011).

- le principe de précaution, qui oblige à considérer des risques potentiels d'un produit ou service sans avoir, avec les connaissances du moment, de certitudes scientifiques et techniques sur l'existence ou l'ampleur du danger<sup>6</sup>. Cette absence de certitudes ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ;
- le principe de participation (ou de gouvernance), qui invite le public à s'impliquer dans le débat sur le développement durable, et les industriels à engager des actions volontaristes. Cette notion a notamment été introduite en 1998 par la Convention d'Aarhus sur l'accès à l'information et la participation du public en matière d'environnement (CEE-ONU 1998) ; l'agence européenne des produits chimiques (ECHA), par exemple, répond à ce principe dans le cadre de la directive (dite REACH) sur l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation de substances chimiques (§ 1.2.1) ;
- le principe de solidarité, destiné à partager équitablement les ressources de la planète afin de subvenir aux besoins de ses habitants ;
- le principe de proximité, qui prévoit que l'élimination et la valorisation des déchets favorisent leur traitement dans des installations situées au plus près de leur lieu de production ;
- le principe de gestion écologiquement rationnelle, issu de la Convention de Bâle sur les mouvements transfrontaliers des déchets, permet d'assurer que des déchets et des déchets dangereux sont gérés en vue de garantir la protection de la santé humaine et de l'environnement contre leurs effets nuisibles ;
- le principe de responsabilité élargie du producteur (REP), qui vise à faire peser sur le producteur la responsabilité de la gestion en fin de vie de son produit et l'élimination des déchets résultants ; ce principe est directement lié aux directives européennes ou nationales sur l'élimination des déchets dans divers secteurs professionnels tel que, par exemple, les véhicules hors d'usage (VHU), les emballages, les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), les pneus, les textiles ou encore les bâtiments de plaisance hors d'usage (BPHU) (§ 1.2.1).

## 1.2 Contexte réglementaire environnemental

Une réglementation en faveur de l'environnement est élaborée soit par des Etats ou groupes d'Etats, soit par des organisations internationales. Des textes à portée générale ou plus spécifiques au milieu marin ont déjà été adoptés ou sont en préparation. Dans ce contexte, l'Union européenne et l'Organisation maritime internationale (OMI) ont un rôle important<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> L'application du principe de précaution suscite régulièrement la controverse. A ce sujet, voir par exemple la « Contre-enquête/Planète » publiée dans *Le Monde* daté du samedi 8 mai 2010, p. 4-5.

<sup>7</sup> Aux principes et cadre réglementaire évoqués §§ 1.1 et 1.2 s'ajoutent des textes tels que la convention UNCLOS sur le droit de la mer et la convention OSPAR pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est. Davies (2006) a dressé un bref inventaire de la réglementation européenne et internationale (OMI) sur les émissions dans l'air, tandis qu'Iversen (2009) a précisé le cadre d'application – air, eaux usées et de ballast, déchets – des principales législations internationales en vigueur (MARPOL 79/78, protocoles de Kyoto et de Montréal, US Clean Air Act, lois allemandes). Des conséquences possibles sur l'industrie navale du

## 1.2.1 Union européenne

L'Union européenne construit un cadre législatif général – contraignant ou incitatif –, dont les textes sont progressivement transposés en droit français. Quelques mesures importantes peuvent être évoquées (Le Pochat 2005 ; Reyes Carrillo 2007 ; Lacoste et al. 2011 ; Schiesser 2011).

- Le *Livre vert sur la politique intégrée des produits* (UE 2001a) promeut l'intégration des coûts environnementaux dans le prix des produits, la préférence du consommateur pour des produits écologiques et l'éco-conception des produits<sup>8</sup>. Le *Livre vert* constitue une incitation plutôt qu'une contrainte. Divers instruments sont proposés, en particulier la mise en œuvre du principe pollueur-payeur, l'application d'une fiscalité différenciée selon les performances environnementales des produits et la responsabilité environnementale des entreprises.
- Des directives sur les produits visent notamment à : réduire les déchets issus des VHU (directive 2000/53/CE ; cf. JOCE 2000) ; recycler les DEEE (directive 2002/96/CE ; cf. JOUE 2003b) ; collecter et valoriser les emballages (directives 94/62/CE et 2004/12/CE ; cf. JOCE 1994 et JOUE 2004a) ; limiter l'usage de substances nocives pour la santé humaine et l'environnement (directive 2006/121/CE, dite REACH, et directive 2002/95/CE sur la restriction de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques, dite RoHS ; cf. respectivement JOUE 2006, et JOUE 2003a) ; améliorer l'efficacité des produits liés à l'énergie (ErP, directive 2009/125/CE ; cf. JOUE 2009)<sup>9</sup>.
- La responsabilité sociétale des entreprises (RSE), inscrite dans un *Livre vert* de la Commission européenne (UE 2001b) et soutenue en France par la loi relative aux nouvelles régulations économiques (NRE)<sup>10</sup>, incite les entreprises à intégrer volontairement les préoccupations sociales et environnementales dans leurs activités commerciales, et à aller au-delà de la satisfaction à leurs obligations juridiques. La future norme ISO 26000 définira les lignes directrices relatives à la responsabilité sociétale (ISO 2008)<sup>11</sup>.
- La directive sur la responsabilité environnementale des entreprises (UE 2004) fixe un cadre réglementaire en vue de la prévention et de la réparation des dommages environnementaux (règles sur les objectifs de réparation, moyens de détermination et de sélection des mesures de réparation...)<sup>12</sup>.

---

protocole de Kyoto sur le changement climatique, ainsi que des recommandations (notamment la recherche d'équipements et de systèmes moins polluants et consommateurs d'énergie), ont été proposées par Breslin (2006).

<sup>8</sup> <http://ec.europa.eu/environment/ipp/2001.developments.htm> ;

[http://europa.eu/legislation\\_summaries/consumer\\_safety/l28011\\_fr.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/consumer_safety/l28011_fr.htm)

<sup>9</sup> La directive ErP remplace et étend la directive EuP 2005/32/CE (cf. JOUE 2005) aux produits consommateurs ou non d'énergie.

<sup>10</sup> En particulier l'article 116 sur le compte rendu social et environnemental des sociétés françaises cotées en bourse.

<sup>11</sup> Voir également le site : <http://www.afnor.org/profils/centre-d-interet/developpement-durable>. Sur les fondements institutionnels, normatifs et théoriques de la RSE, voir la revue de Bouyoud (2010).

<sup>12</sup> Le Parlement français a adopté la loi 2008-757 du 1<sup>er</sup> août 2008 relative à la responsabilité environnementale et à diverses dispositions d'adaptation au droit communautaire dans le domaine de l'environnement. Ce texte reprend notamment les grands principes de la directive européenne 2004/35 du 21 avril 2004 relatifs à la prévention et la réparation des dommages environnementaux (UE 2004).

- Lors des appels d'offre pour des achats publics, les administrations sont désormais incitées et autorisées à inclure des clauses relatives à la qualité environnementale des produits ; la directive européenne 2004/17/CE porte ainsi sur les secteurs de l'eau, de l'énergie, des transports et des services postaux (JOUE 2004b).
- La déclaration environnementale des produits, désignée également d'écolabel, est une démarche volontaire de l'industriel qui s'engage à respecter un cahier des charges environnemental, ce qui l'autorise à valoriser la qualité environnementale de son produit par l'affichage d'un écolabel<sup>13</sup>. Les trois types de déclarations environnementales sont les suivants<sup>14</sup> :
  - (i) la déclaration de type I atteste que le produit est conforme à un cahier des charges normalisé ; un écolabel officiel est délivré par une tierce partie (Association française de normalisation, Union européenne...) ;
  - (ii) la déclaration de type II, ou auto-déclaration, est un engagement sincère de l'entreprise, non soumis à la vérification par une tierce partie, de son respect de la norme ;
  - (iii) la déclaration de type III améliore la communication des entreprises grâce à un éco-profil (*i.e.* un ensemble de données quantifiées obtenues par analyse du cycle de vie du produit), qui permet aux clients de comparer les performances environnementales de produits similaires<sup>15</sup>.

La déclaration environnementale d'un produit – une stratégie du marketing vert – peut être efficace pour des produits de grande consommation destinés à un large public. Toutefois (Le Pochat 2005), dans le cas de produits « industriels » achetés par des clients professionnels (administrations, donneurs d'ordre...), les coût, performance fonctionnelle et fiabilité restent des critères essentiels de sélection ; la performance environnementale deviendra un paramètre discriminant si, à prix équivalent, les fonctionnalités du produit sont accrues, ou si des économies potentielles sont attendues lors de l'utilisation ou de la fin de vie du produit.

## 1.2.2 Organisation maritime internationale

Depuis le début des années 1970, avec un renforcement significatif durant cette dernière décennie, le thème de la protection de l'environnement maritime et atmosphérique a fait l'objet d'une succession de dispositions réglementaires contraignantes, sous la forme de conventions internationales adoptées par l'OMI. Ces conventions définissent et fixent notamment les conditions pour lesquelles un rejet polluant est possible ou non, selon divers critères (type d'effluent, distance par rapport aux côtes,

---

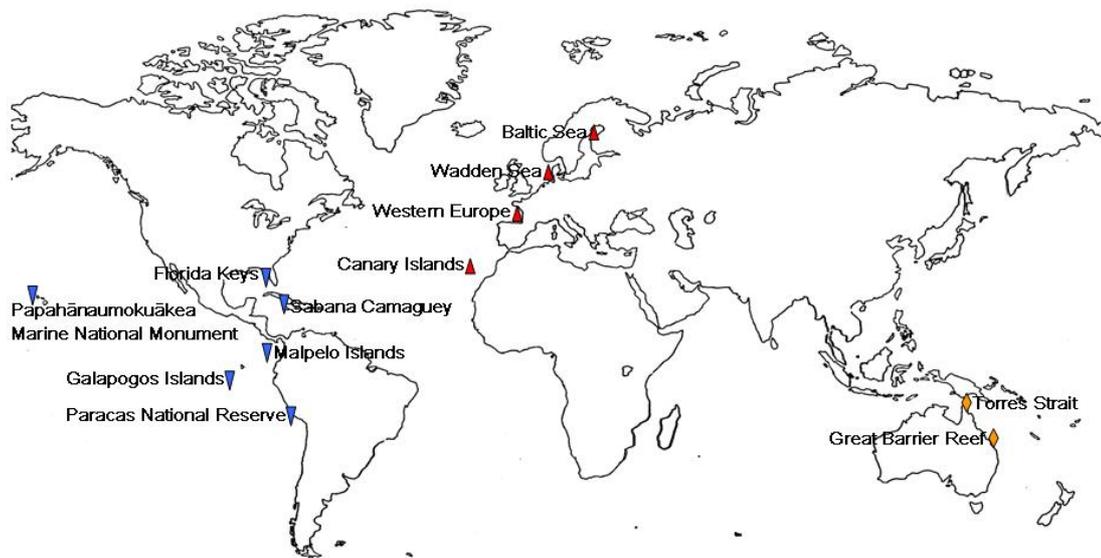
<sup>13</sup> Le site <http://domsweb.org/ecolo/labels.php>, par exemple, recense des écolabels européens, canadiens et asiatiques. L'Union européenne délivre un label écologique (<http://www.eco-label.com/french>), symbolisé par une fleur, dont les modalités d'attribution devraient être modifiées (Brethomé 2009). Des agréments de conformité à des standards (par exemple, RINA Clean-Sea, RINA Clean-Air, BV Cleanship, DNV Clean, ABS ES ou LR EP) sont également délivrés par des organismes de certification (voir § 3.3). D'autre part, la fédération des industries nautiques (FIN) a développé un label Bateau bleu attribué aux navires neufs et équipements (*cf.* : <http://www.fin.fr/frameset.asp?langue=fr>).

<sup>14</sup> Les principes généraux sur les règles d'étiquetage sont donnés par la norme ISO 14020. Les déclarations de types I, II et III sont respectivement définies par les normes ISO 14024, ISO 14021 et ISO 14025. Les déclarations environnementales participent à la communication environnementale des entreprises, dont la norme ISO 14063 indique les lignes directrices.

<sup>15</sup> Lorsque l'entreprise compare son produit à un produit concurrent, les données de l'analyse du cycle de vie doivent être certifiées par un organisme indépendant.

acceptabilité du milieu récepteur, seuil de rejet...), ainsi que celles permettant de définir des équipements embarqués de prévention de la pollution.

La résolution A.927(22), adoptée depuis 1978 par l'OMI, a notamment introduit les notions de zones spéciales et de zones particulièrement sensibles sur le plan environnemental (PSSA) où ces dispositions sont plus sévères (IMO 2002, 2006). Les critères définissant ces zones sont multiples (diversité de l'éco-système, sensibilité à la dégradation face à des événements naturels ou des activités humaines, critères social, culturel et économique). De nouvelles zones sont régulièrement proposées et ajoutées<sup>16</sup> (figure 1).



**Figure 1.** Répartition géographique des zones spéciales et particulièrement sensibles sur le plan environnemental (PSSA).

*Figure 1. Geographical distribution of the particularly sensitive sea areas (PSSA).*

La convention internationale MARPOL 73/78 pour la prévention de la pollution par les navires a été adoptée par l'OMI en 1973. Cette convention inclut six annexes régulièrement révisées et amendées par le comité pour la protection de l'environnement marin (MEPC) ; elles fixent des règles pour prévenir et limiter les nuisances environnementales liées à la fois à l'activité maritime et aux accidents des navires<sup>17</sup>. Des mesures concrètes sont à mentionner.

<sup>16</sup> Le site Internet de l'OMI (<http://www.imo.org>) en dresse la liste ; la dernière PSSA adoptée (résolution MEPC.171(57) du 4 avril 2008) est la zone pacifique étasunienne de Papahānaumokuākea. Voir également : Roberts, J., *Proactive environmental planning for emerging shipping routes in Arctic waters*, The World Conservation Union ; [http://www.balticmaster.org/media/files/file\\_480.ppt](http://www.balticmaster.org/media/files/file_480.ppt)

<sup>17</sup> Ces annexes portent sur les règles relatives à la prévention de la pollution par les hydrocarbures (annexe I), par les substances liquides transportées en vrac (annexe II), par les substances nuisibles transportées en colis (annexe III), par les eaux usées (annexe IV) et les ordures des navires (annexe V), et par l'atmosphère par les navires (annexe VI). L'application des annexes I, II et VI est obligatoire, alors que celle des annexes III, IV et V est facultative (Bougataya et al. 2007).

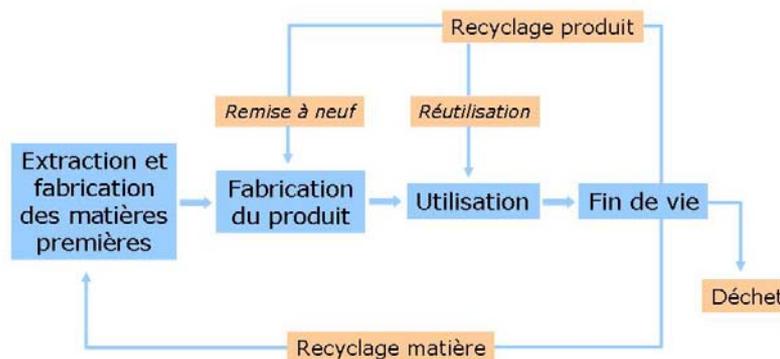
- Si la marine marchande rejette seulement 3 % de l'ensemble du CO<sub>2</sub> d'origine anthropique, 75 % des émissions d'oxydes de soufre proviennent de l'activité maritime (§ 4). L'OMI a donc précisé des seuils limites autorisés pour le rejet de polluants atmosphériques tels que les oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), les composés organiques volatiles, particules, etc. Ainsi, le taux maximal de soufre dans les carburants, fixé aujourd'hui à 4,5 %, devra être de 3,5 % en 2012 et de seulement 0,5 % en 2020. Dans le cadre de la révision de l'annexe VI de la convention MARPOL 73/78, les émissions de NO<sub>x</sub>, actuellement autorisées jusqu'à 17,6 g kWh<sup>-1</sup>, devront avoir été réduites de 20 % en 2011 et de 80 % en 2016 (Blosseville & Remoué 2008). D'autre part, des zones spéciales ont été définies comme SECA (Sulphur Emissions Control Area), domaines maritimes dans lesquels les rejets de polluants doivent répondre à des normes plus strictes que celles appliquées à l'échelle mondiale ; la mer Baltique, la Manche, la mer du Nord et, depuis mars 2010, des côtes d'Amérique du Nord sont déclarées zones SECA ; d'autres zones comme le Mexique, la Méditerranée, la mer Noire ou encore l'Atlantique du Nord-Est sont évoquées pour être classées SECA (Minguet 2009). Enfin, des Etats peuvent prendre des initiatives plus contraignantes que la réglementation internationale (tableau 5).
- Le rejet des eaux de cale fait l'objet de la résolution MEPC.107(49), adoptée par l'OMI en 2003 (OMI 2003). Cette résolution indique qu'au-delà d'un taux résiduel en hydrocarbures de 15 parties par million (ppm), les eaux de cale doivent être traitées par les navires avant de pouvoir être rejetées en mer (§ 7.1).
- La résolution MEPC.159(55), adoptée en 2006 par l'OMI, précise que les eaux usées (communément désignées « eaux noires » et « eaux grises ») doivent être purifiées et désinfectées par les navires (OMI 2006a) ; la validation du respect des équipements de traitement des eaux usées aux critères fixés est prévue par la délivrance de certificat de conformité (§ 7.2).
- La convention internationale AFS/CONF/26 a été adoptée en 2001 par l'OMI pour contrôler les systèmes antisalissures nuisibles sur les navires (IMO 2001). En raison des dégâts sur l'écosystème marin, l'utilisation de peintures antisalissures au tributylétain (TBT) a ainsi été interdite par l'OMI depuis 2008 (§ 8.1). Ce biocide est notamment un perturbateur hormonal.
- La convention internationale BWM/CONF/36 de 2004 prévoit des mesures pour la gestion et le contrôle du transfert d'organismes aquatiques et d'agents pathogènes par les eaux de ballast et sédiments des navires (§ 8.2). Pour recevoir un agrément, les équipements du bord pour le traitement de ces eaux doivent répondre à des critères de qualité (OMI 2004).
- La convention internationale SR/CONF/45 de 2009 pour le recyclage sûr et écologiquement rationnel des navires (OMI 2009) prévoit des dispositions relatives au navire ainsi qu'aux installations de recyclage ; elles visent à prévenir, limiter, réduire au minimum et, dans la mesure du possible et dans la pratique, éliminer les accidents, lésions corporelles et autres effets dommageables du recyclage des navires sur la santé de l'homme et sur l'environnement.
- Fourni par le constructeur lors de la livraison d'un navire, l'inventaire des matières potentiellement dangereuses pour la santé et l'environnement (usuellement appelé cartographie des substances dangereuses) – qui s'est substituée à la notion de « passeport vert » – dresse la liste, le poids et la localisation des matières et matériaux nocifs à bord du bâtiment afin d'en faciliter son démantèlement ultérieur (OMI 2006b) ; cette cartographie doit être mise à jour par l'exploitant durant toute la vie opérationnelle d'un navire.

## 1.3 L'éco-conception, pour une conception consciente de l'environnement

### 1.3.1 Définition et principes

La production de biens et services est au cœur du développement des sociétés de consommation. La réduction des impacts environnementaux nécessite alors d'améliorer le mode de création des produits. Dans ce contexte, l'éco-conception est une approche d'ingénierie pertinente pour l'industrie. Le rapport technique international ISO/TR 14062:2002, décliné en France par la norme expérimentale XP ISO/TR 14062, définit l'éco-conception comme l'« intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit [afin de réduire] des impacts environnementaux négatifs des produits tout au long du cycle de vie. » (AFNOR 2003)<sup>18</sup>. En pratique, l'éco-conception vise à obtenir le meilleur équilibre entre des contraintes écologiques et des exigences économiques dans la conception des produits. L'objectif pour l'entreprise est de minimiser les impacts négatifs qui pourraient résulter de la réalisation de produits, tout en répondant aux exigences de performance, de qualité et de compétitivité (Reyes Carrillo 2007). L'éco-conception, démarche de conception *consciente* de l'environnement, peut alors conduire à une évolution des pratiques industrielles pour les rendre compatibles avec un développement durable.

L'éco-conception repose sur deux approches fondamentales, multi-étapes et multi-critères (Le Pochat 2005 ; Reyes Carrillo 2007 ; Cornet 2008). Dans les deux cas, le cycle de vie du produit – *i.e.* l'ensemble des étapes de réalisation du produit, de l'acquisition des matières premières à son élimination – est la notion essentielle (figure 2).



**Figure 2.** Cycle de vie d'un produit. Quatre phases sont mises en évidence : l'obtention des matières premières, la fabrication, l'utilisation et la fin de vie du produit. Le déroulement du cycle de vie est rythmé par des étapes de transport.

**Figure 2.** *Life-cycle of a product. Four steps are shown: the raw materials acquisition, the manufacturing, the use and the end-of-life of the product. There are also transportation steps inserted during the course of the product life-cycle. (Figure adaptée de / Adapted from Le Pochat 2005.)*

<sup>18</sup> Voir également le projet international de guide sur l'éco-conception (ISO 2009).

L'approche multi-étapes consiste à minimiser les impacts environnementaux des différentes phases de réalisation du produit, tout en limitant les transferts de pollution susceptibles d'apparaître. L'approche multi-critères intègre, pour l'ensemble des étapes du cycle de vie, un ensemble d'impacts jugés pertinents lors de la conception du produit. Cette dernière approche, plus complexe à mettre en œuvre, nécessite d'optimiser des systèmes à plusieurs paramètres non indépendants (variables liées) ; la solution résultante doit pouvoir conduire à des choix de conception tels que les impacts environnementaux et les transferts de pollution soient aussi réduits que possible.

La prise en compte de l'environnement dans les activités de développement de produits industriels représente une difficulté importante pour les entreprises. En effet, la diversité des connaissances scientifiques nécessaires (génie industriel, physique, chimie, biologie, écologie, sciences sociales...), la difficulté d'accès aux données (multiplicité ou absence, incertitudes associées...), la difficulté d'interprétation de l'information environnementale, la complexité des méthodes et outils disponibles, mais aussi la nécessité d'une évolution organisationnelle et culturelle de l'entreprise sont autant d'éléments qui rendent complexe la mise en œuvre d'une démarche d'éco-conception (Cornet 2008).

Les conventions et protocoles internationaux (§ 1.1) sur le développement durable traduisent une prise de conscience sociétale, rapportée par les médias et relayée par la demande des clients et des donneurs d'ordre vers les entreprises. Toutefois, l'application et le respect de la réglementation constituent une incitation forte pour les entreprises à éco-concevoir.

### **1.3.2 Outils d'éco-conception**

La démarche d'éco-conception repose sur deux phases essentielles : l'évaluation et l'amélioration environnementales. L'évaluation environnementale consiste à identifier, évaluer, hiérarchiser et quantifier les impacts environnementaux du cycle de vie du produit. L'amélioration environnementale doit conduire à des propositions et recommandations de conception qui, tout en répondant aux besoins de l'utilisateur, prennent également en compte les diverses contraintes environnementales (type de clients, attentes sociétales, concurrence, directives européennes, écolabels...).

De nombreux outils d'éco-conception sont disponibles, basés sur des approches qualitatives ou quantitatives. Dans sa synthèse des initiatives françaises en éco-conception, AFNOR (2008) distingue des outils normatifs génériques (applicables à tous les domaines d'activité, quelles que soient la taille et la localisation de l'entreprise) et sectoriels (outils opérationnels dédiés à des secteurs d'activité particuliers), et des outils non normatifs (logiciels, guides, outils méthodologiques...).

Plusieurs auteurs ont recensé, classé et décrit ces outils (voir, par exemple, les revues données par Buttel-Bellini & Janin 1999a,b ; Janin 2000 ; Patingre 2003 ; Le Pochat 2005 ; Reyes Carrillo 2007 ; Schiesser 2011 ; voir également Lanquetin 2008). Le tableau 1 reprend la classification proposée dans Le Pochat (2005) : quelques outils d'éco-conception, regroupés en trois familles, sont répartis selon leur finalité, l'évaluation et l'amélioration environnementales.

**Tableau 1.** Répartition des familles d’outils d’éco-conception selon leur finalité.  
**Table 1.** Distribution of the eco-design tool families, according to their function (Le Pochat 2005).

	<b>Evaluation environnementale</b>	<b>Amélioration environnementale</b>	<b>Evaluation et amélioration environnementale</b>
<b>Familles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ACV</li> <li>• ACV simplifiée</li> <li>• Matrices</li> <li>• <i>Checklists</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lignes directrices (<i>guidelines</i>)</li> <li>• Manuels</li> <li>• Normes</li> <li>• Créativité environnementale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Logiciels* (ACV simplifiée et DfX**)</li> <li>• Eco-indicateurs</li> <li>• Outils paramétriques</li> <li>• Outils d’organisation</li> </ul>

\* : Reyes Carrillo (2007) a recensé plus de 120 logiciels d’éco-conception.

\*\* : *Design for X*,  $X = \{environment, energy\ efficiency, disassembly, sustainability, recyclability\dots\}$ .

L’analyse du cycle de vie (ACV) a été définie par l’Organisation internationale de normalisation (ISO) comme la « compilation et l’évaluation des entrants et sortants, ainsi que des impacts potentiels environnementaux d’un système de produits au cours de son cycle de vie » (ISO 1997). Les normes ISO 14040 et 14044 apporte une aide à l’analyse et à l’interprétation du cycle de vie du produit (ISO 2006a,b). Une synthèse de commentaires sur l’ACV est donnée par Fauvaud (2004). Les principes généraux, la démarche séquentielle et les principales méthodes d’ACV utilisées actuellement sont présentés par Jolliet et al. (2010). Un exemple d’ACV de frégates de type La Fayette est donné par Prinçaud et al. (2010), dans le cadre du projet Convenav (tableau 3) de développement d’un outil unique d’évaluation et d’amélioration environnementale<sup>19</sup>.

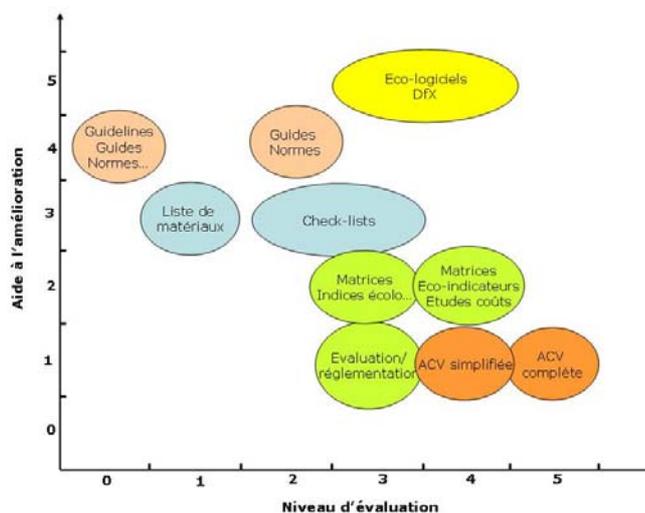
Des logiciels d’ACV sont disponibles, mais Khalifa (2009) remarque que les résultats qu’ils délivrent sont souvent trop simplistes pour apporter une aide réelle en éco-conception.

La figure 3, établie d’après les travaux de Janin (2000), illustre l’évaluation et l’amélioration environnementales apportées par les principaux outils d’éco-conception ; il n’apparaît pas d’outil où l’amélioration est jugée « nulle ».

### 1.3.3 Un domaine de recherche actif

L’adoption de l’éco-conception par l’entreprise peut être le résultat de divers facteurs tels que la pression du marché et la pression sociétale, l’incitation des pouvoirs publics et de la réglementation, la demande des clients et des utilisateurs de produits « verts », la recherche de compétitivité et d’innovation, l’amélioration de la productivité et la réduction des coûts, ou encore l’anticipation de la législation et la conviction du besoin de réduire les impacts environnementaux (AFNOR 2008 ; Cornet 2008). Dans ce contexte, l’éco-conception fait l’objet de nombreuses recherches sur l’évaluation environnementale, le développement d’outils et de méthodes, la fin de vie des produits, l’intégration de l’éco-conception dans l’entreprise (Le Pochat 2005).

<sup>19</sup> Il existe une approche spécifique destinée à réduire l’impact climatique des installations frigorifiques par une limitation de l’émission de gaz fluorocarbonés qui appauvrissent la couche d’ozone. Cette approche est basée sur le concept de cycle de vie de performance climatique (*life cycle climate performance – LCCP*) (voir Kaniaru et al. 2007 ainsi que : *Réchauffement planétaire : les défis du secteur du froid*, communiqué de l’IIIF, institut international du froid (IIF).



**Figure 3.** Classement des principaux outils d'éco-conception selon leur finalité.

*Figure 3.* Classification of the main eco-design tools, according to their function.

(Figure établie d'après / Based on data from Janin 2000.)

## Références

AFNOR, 2003, *Management environnemental. Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produits*, norme expérimentale XP ISO/TR 14062, janvier 2003.

AFNOR, 2008, *Panorama des initiatives françaises dans le domaine de l'éco-conception. Synthèse*, norme expérimentale XP ISO/TR 14062, juin 2008.

Blosseville, T., & Remoué, A., 2008, Les bateaux virent au vert, *L'Usine Nouvelle*, N° 3111, 17 juillet 2008, 62-65.

Bougataya, I., De Bruyne, C., & M'baki Helu, P., 2007, MARPOL et ses annexes : quelle efficacité ?, *Neptunus*, vol. 13 2007/2, Centre de droit maritime et océanique, Université de Nantes.

Bouyouf, F., 2010, *Le management stratégique de la responsabilité sociale des entreprises*, thèse de doctorat, Laboratoire d'investigation en prospective stratégique et organisation, Conservatoire national des arts et métiers, Paris, France, avril 2010.

Breslin, D. A., 2006, Climate change and the future of shipping and ship design, *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.

Brethomé, G., 2009, Le label écologique européen à la recherche d'un second souffle, *Le Monde*, dimanche 2-lundi 3 août 2009, 5.

Buttel-Bellini, B., & Janin, M., 1999a, Eco-conception : état de l'art des outils disponibles, in : *Les techniques de l'ingénieur*, G 6 010-1-G 6 010-12.

Buttel-Bellini, B., & Janin, M., 1999b, Eco-conception : état de l'art des outils disponibles (Pour en savoir plus), in : *Les techniques de l'ingénieur*, Doc. G 6 010-1-G 6 010-10.

CEE-ONU, 1998, *Convention sur l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement*, Commission économique pour l'Europe des Nations-Unies (CEE-ONU), 25 juin 1998.

Cornet, J., 2008, *Les freins à l'adoption d'une approche d'eco-conception dans le processus de développement de produits : le cas des petites et moyennes entreprises*, mémoire de maître ès sciences appliquées en aménagement, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, Canada, octobre 2008.

Davies, M., 2006, Emissions trading for ships – a european perspective, *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.

Fauvaud, S., 2004, *Management environnemental 'produit' et référentiels de substances à risque : un panorama. Pour une application aux matériels d'armement*, Centre de documentation de l'armement, Délégation générale pour l'armement, novembre 2004.

IMO, 2001, *International convention on the control of harmful anti-fouling systems on ships*, AFS/CONF/26, 18 October 2001, International Maritime Organisation.

IMO, 2002, *Resolution A.927(22), adopted on 29 November 2001. Guidelines for the designation of special areas under MARPOL 73/78 and guidelines for the identification and designation of particularly sensitive sea*, 15 January 2002, International Maritime Organisation.

IMO, 2006, *Resolution A.982(24), adopted on 1 December 2005. Revised guidelines for the identification and designation of particularly sensitive sea areas*, 6 February 2006, International Maritime Organisation.

ISO, 2006a, *Management environnemental. Analyse du cycle de vie : principes et cadre*, norme internationale ISO 14040:2006.

ISO, 2006b, *Management environnemental. Analyse du cycle de vie : exigences et lignes directrices*, norme internationale ISO 14044:2006.

ISO, 2008, *Lignes directrices relatives à la responsabilité sociétale*, traduction française élaborée par l'AFNOR du projet de norme ISO/CD 26000 du 12 décembre 2008.

ISO, 2009, *Environmental management systems – Guide on eco-conception*, Projet ISO TC 207/SC 1/WG 4 N031 du 9 mars 2009.

Iversen, I., 2009, *The Wilb. Wilhelmsen Group, a total provider of environmental solutions for ships*, présentation de Wilhelmsen Ships Equipment AS, in : *The Norway-Singapore Energy Conference : Sustainable Marine Transportation*, 19<sup>th</sup> march 2009, The St. Regis Singapore, Singapore.

Jeandel, C., & Mosseri, R. (dir.), 2011, *Le climat à découvert. Outils et méthodes en recherche climatique*, CNRS éditions.

Janin, M., 2000, *Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus*, thèse de doctorat, Institut conception, mécanique et environnement, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, Chambéry, France, 28 avril 2000.

JOCE, 1994, *Directive 94/62/CE du Parlement européen et du Conseil du 20 décembre 1994 relative aux emballages et aux déchets d'emballages*, Journal officiel des Communautés européennes, L 365/10-L 365/23, 31 décembre 1994.

JOCE, 2000, *Directive 2000/53/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage*, Journal officiel des Communautés européennes, L 269/34-L 269/42, 21 octobre 2000.

Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., & Shaked, S., 2010, *Analyse du cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan*, 2<sup>e</sup> édition, coll. « Ingénierie de l'environnement », Presses polytechniques et universitaires romandes.

JOUE, 2003a, *Directive 2002/95/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques*, Journal officiel de l'Union européenne, L 37/19-L 37/23, 13 février 2003.

JOUE, 2003b, *Directive 2002/96/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques*, Journal officiel de l'Union européenne, L 37/24-L 37/38, 13 février 2003.

JOUE, 2004a, *Directive 2004/12/CE du Parlement européen et du Conseil du 11 février 2004 modifiant la directive 94/62/CE relative aux emballages et aux déchets d'emballages*, Journal officiel de l'Union européenne, L 47/26-L 47-31, 18 février 2004.

JOUE, 2004b, *Directive 2004/17/CE du Parlement européen et du Conseil du 31 mars 2004 portant coordination des procédures de passation des marchés dans les secteurs de l'eau, de l'énergie, des transports et des services postaux*, Journal officiel de l'Union européenne, L 134/1-L 134/113, 30 avril 2004.

JOUE, 2005, *Directive 2005/32/CE du Parlement européen et du Conseil du 6 juillet 2005 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits consommateurs d'énergie et modifiant la directive 92/42/CEE du Conseil et les directives 96/57/CE et 2000/22/CE du Parlement européen et du Conseil*, Journal officiel de l'Union européenne, L 191/29-L 191/58, 22 juillet 2005.

JOUE, 2006, *Directive 2006/121/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 modifiant la directive 67/548/CEE du Conseil concernant le rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives relatives à la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses afin de l'adapter au règlement (CE) n° 1907/2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), et instituant une agence européenne des produits chimiques*, Journal officiel de l'Union européenne, L 396/850-L 396/856, 30 décembre 2006.

JOUE, 2009, *Directive 2009/125/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie (refonte)*, Journal officiel de l'Union européenne, L 285/10-L 285/35, 31 octobre 2009.

Kaniaru, D., Shende, R., Stone, S., & Zaelke, D., 2007, La fortification du protocole de Montréal : une assurance contre le changement brusque de climat, *Sustainable Development Law & Policy Publication*, Mars 2007.

Khalifa, K., 2009, ACV : de l'insuffisance des logiciels existants, *Environnement & TECHNIQUE*, N° 292, décembre 2009, 75-80.

- Lacoste, R., Robiolle, M., Vital, X., 2011, *L'écoconception en électronique*, coll. « Technique et ingénierie », série « EEA », Dunod.
- Lanquetin, D., 2008, La place de la recyclabilité dans l'analyse du cycle de vie, in : *Nouvelles matières premières*, 26 juin 2008, Strasbourg, France.
- Latouche, S., 2003, Pour une société de décroissance, *Le Monde diplomatique*, novembre 2003, 18-19.
- Latouche, S., 2011, *Vers une société d'abondance frugale. Contresens et controverses sur la décroissance*, coll. « Les petits libres », Mille et une nuits.
- Le Pochat, S., 2005, *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, Centre de Paris, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, Paris, France, 18 novembre 2005.
- Merlin, J.-C., 2011, *Comment va la Terre ? Climat et réchauffement*, à paraître.
- Minguet, B., 2009, Enjeux sur les combustibles marins, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.
- OMI, 2003, *Resolution MEPC.107(49), adopted on 18 July 2003. Revised equipment for machinery space bilge of ships*, Organisation maritime internationale.
- OMI, 2004, *Conférence internationale sur la gestion des eaux de ballast des navires. Convention internationale de 2004 pour le contrôle et la gestion des eaux de ballast et sédiments des navires. Texte adopté par la conférence, BWM/CONF/36*, 16 février 2004, Organisation maritime internationale.
- OMI, 2006a, *Resolution MEPC.159(55), adopted on 13 October 2006. Revised guidelines on implementation of effluent standards and performance tests for sewage treatment plants*, Organisation maritime internationale.
- OMI, 2006b, *Directives de l'OMI sur le recyclage des navires, édition récapitulative de 2006*, Organisation maritime internationale.
- OMI, 2009, *Convention internationale de Hong Kong pour le recyclage sûr et écologiquement rationnel des navires, SR/CONF/45*, 19 mai 2009, Organisation maritime internationale.
- Patingre, J.-F., 2003, Panorama des méthodes et outils de l'éco-conception, in : J. Vigneron, J.-F. Patingre & P. Schiesser (dir.), 2003, *Eco-concevoir : appliquer et communiquer*, Economica, 39-48.
- Prinçaud, M., Cornier, A. & Froëlich, D., 2010, Developing a tool for environmental impact assessment and eco-design for ships, *Journal of Engineering for the Maritime Environment* 224(M3), 207-224.
- Reyes Carrillo, T., 2007, *L'éco-conception dans les PME : les mécanismes du cheval de Troie méthodologique et du choix de trajectoires comme vecteurs d'intégration de l'environnement en conception*, thèse de doctorat, Université du Sud Toulon-Var, Toulon, France, 14 décembre 2007.
- Schiesser, P., 2011, *Eco-conception. Indicateurs, méthodes, réglementation*, coll. « Technique et ingénierie », série « Conception », Dunod.

Soichot, M., 2011, *Les musées et centres de sciences face au changement climatique. Quelle médiation muséale pour un problème socioscientifique*, thèse de doctorat, Muséum national d'histoire naturelle, Paris, France, 26 janvier 2011.

UE, 2001a, *Livre vert sur la politique intégrée des produits*, document COM(2001) 68 final, Commission des communautés européennes, 7 février 2001.

UE, 2001b, *Livre vert. Promouvoir un cadre européen pour la responsabilité sociale des entreprises*, document COM(2001) 366 final, Commission des communautés européennes, 18 juillet 2001.

UE, 2004, *Directive 2004/35/CCE du Parlement européen et du Conseil du 21 avril 2004 sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux*, Journal officiel de l'Union européenne, L 143/56-L 143/75, 30 avril 2004.



## Défense et environnement

Le déploiement de forces et d'équipements militaires, mais aussi la conduite de programmes d'armement, impactent le milieu naturel ou urbain, national ou international. Les matériels de défense doivent être conçus pour que leurs performances environnementales répondent aux exigences réglementaires – voire les anticipent –, tout en garantissant leurs performances opérationnelles. L'éco-conception des navires de guerre devient une nécessité.

### 2.1 Défense française, armement et environnement

Par son large champ d'action – occupation d'espaces naturels et urbains, activités opérationnelles et industrielles –, la défense est directement impliquée par la problématique du développement durable. En effet, l'entraînement des armées sur le territoire national et les interventions sur les théâtres d'opération, mais aussi les choix techniques lors de la conception des systèmes d'arme, sont susceptibles de porter atteinte à l'intégrité de l'environnement. La volonté du ministère de la défense pour préserver le milieu a incité les directions et états-majors – en particulier l'état-major de la marine et la direction générale de l'armement (DGA) – à engager des démarches ou poursuivre les actions en cours.

#### 2.1.1 L'engagement du ministère de la défense

Les dates clés des principales actions menées par le ministère de la défense depuis 1978 sont rappelées par SGA (2009). En 2003, le ministère de la défense français a adhéré aux principes de la Charte sur l'environnement, adossée depuis 2005 à la Constitution de la V<sup>e</sup> République<sup>20, 21</sup>. Il s'est engagé, en particulier, à inscrire les préoccupations environnementales dans le cahier des charges des programmes d'armement. A l'issue du Grenelle de l'environnement, un *Plan d'action environnement de la défense* a été élaboré en 2007 (DICoD 2007 ; Morin 2007) et mis à jour en 2009 (Morin 2009) ; il inscrit notamment le démantèlement comme l'une des étapes du cycle de vie des matériels d'armement, systématise l'évaluation de la performance environnementale des équipements militaires et permet à la

<sup>20</sup> En novembre 2002, un séminaire intergouvernemental a posé les bases d'une *Stratégie nationale de développement durable*, adoptée le 3 juin 2003 pour cinq ans. Le 25 juin 2003, le Conseil des ministres a été favorable au projet de loi constitutionnelle relatif à la Charte de l'environnement ; deux ans plus tard, ce projet a été adopté par le Parlement réuni en congrès à Versailles (loi constitutionnelle n° 2005-205 du 1<sup>er</sup> mars 2005 relative à la Charte de l'environnement).

<sup>21</sup> La délégation à l'information et à la communication de la défense (DICoD) a publié en juin 2005 la brochure *La culture du développement durable au ministère de la défense* (cf. DICoD 2005).

DGA de demander aux industriels la cartographie des substances dangereuses présentes dans les matériels livrés. En 2008, le *Livre blanc* de la défense et de la sécurité nationale a réaffirmé la nécessité – déjà exprimé dans CHEAr (2005) – de maîtriser les coûts de possession des équipements militaires, notamment le coût de démantèlement, dans le respect des règles environnementales (Mallet 2008)<sup>22</sup>.

Pour le suivi des actions engagées, le ministre dispose depuis 2006 d'un tableau de bord environnemental. Depuis 2008, un rapport de développement durable est publié (SGA 2009). Inspiré du référentiel GRI (*global reporting initiative*, conçu et utilisé par des entreprises privées), il donne au public une information sur l'implication du ministère et sa mise en œuvre de la stratégie nationale de développement durable.

## 2.1.2 La marine nationale et la protection de l'environnement

Les missions de la marine nationale relèvent à la fois d'enjeux opérationnels (dissuasion pour la protection des intérêts vitaux de la nation, prévention et intervention lors de crise ou de conflit) et d'actions de service public (secours en mer, prévention et lutte contre les pollutions marines...). Au milieu des années 1980, la marine s'est engagée dans une démarche volontariste de respect du milieu marin, avec l'application des mesures de la convention MARPOL 73/78 sur les rejets de déchets à la mer (Jaskierowicz et al. 2003). Par la suite, les décisions des organisations internationales sur le développement durable, l'évolution des mentalités et l'élaboration d'un cadre juridique environnemental ont conduit la marine nationale – soucieuse, par ailleurs, de transmettre au public une image favorable – à se doter de navires « propres ». L'adaptation et l'évolution des bâtiments de la marine sont en effet nécessaires pour respecter une réglementation complexe, anticiper l'évolution et le durcissement des règles existantes – qui tendent à faire disparaître les dérogations consenties à des matériels de défense –, ou réduire le coût de possession des équipements. Dans le cadre du *Plan d'action environnement de la défense* (§ 2.1.1), la marine associe à ses navires désarmés, en service et futurs une cartographie des substances dangereuses afin de faciliter leur démantèlement ou permettre leur cession (DICoD 2007). Par ailleurs, un schéma directeur « environnement » de la marine a été élaboré en 2005 (SGA 2009).

## 2.1.3 La dimension environnementale dans les programmes d'armement

Au sein du ministère de la défense, la préparation du futur et la conduite des programmes d'armement, destinés à équiper les forces, sont confiées à la DGA. Il y a une dizaine d'années, une démarche de management environnemental a été initiée avec, en particulier, la création d'un bureau de protection de l'environnement (2001)<sup>23</sup> et d'un département éco-conception (2004) – devenu département de management environnemental des opérations d'armement (MEOA), rattaché à la direction technique (DT) de la DGA.

---

<sup>22</sup> La revue *L'Armement* N° 84 (décembre 2003), publiée par la DGA, dresse un large panorama consacré à « La protection de l'environnement » par le ministère de la défense. Depuis 2004, les nombreux travaux et études – par exemple pour l'élaboration d'une liste « DGA » de substances dangereuses (Fauvaud 2004 ; Lamour 2007), sur l'intégration du développement durable au domaine de l'armement (CHEAr 2005 ; IRSEM 2010), sur le démantèlement des navires (MIDN 2007 ; Lebacq & Wohrer 2008) ou sur le traitement en fin de vie des matériels de défense (Fauvaud & Forgeneuf 2007) – et les fréquents colloques (notamment la série de conférences *Défense et environnement : une nouvelle manière de penser*, organisées en 2007, 2008 et 2009, <http://www.3bconseils.com>) témoignent de la vivacité du thème « environnement et défense ».

<sup>23</sup> Ce bureau dépend actuellement du service central de la modernisation et de la qualité (SMQ) de la DGA. Il existe également un bureau environnement au secrétariat général pour l'administration (SGA) du ministère de la défense.

La prise en compte de l'environnement dans les programmes d'armement est évoquée dans l'instruction générale N° 1516 (EMA & DGA 2010a,b) sur le déroulement et la conduite des opérations d'armement, mais également dans le *Plan d'action environnement de la défense* (§ 2.1.1)<sup>24</sup> et dans les actions de recherches technologiques (DGA 2009b). D'autre part, selon la directive interarmées PIA 05-302, l'état-major des armées doit pouvoir connaître les effets directs et indirects sur l'environnement des armements utilisés en opération extérieure (EMA 2004). Plus généralement, le respect (et l'anticipation) de la réglementation en vigueur et l'exigence d'exemplarité de l'action de l'Etat justifient la prise en compte du respect de l'environnement. Enfin, l'amélioration de la performance environnementale des équipements peut avoir un intérêt sur les performances fonctionnelles du matériel (augmentation de l'autonomie par une diminution de consommation, par exemple)<sup>25</sup>.

Parmi les actions menées (SGA 2009, 2011), la mention de clauses environnementales est autorisée dans les contrats, l'éco-conception des matériels est généralisée et les industriels devront fournir à la DGA une cartographie des substances dangereuses présentes dans les équipements livrés (§ 2.1.1). Des dispositifs technologiques ont déjà été mis en place à bord de bâtiments récents, par exemple pour l'amélioration du traitement des eaux usées ou l'incinération des déchets solides.

La figure 4 illustre, pour les programmes navals, les contraintes et facteurs d'influence qui s'exercent sur l'éco-conception des équipements.

La démarche d'éco-conception menée à la DGA se traduit notamment par des collaborations avec des organismes de recherche civile ou des industriels pour les technologies duales, par des programmes études amont (PEA) pour les problématiques spécifiques, ou par la mise à disposition, sur le site intranet (*Totem*) de la DGA, d'un guide méthodologique (*EDEN*<sup>26</sup>) pour intégrer l'environnement et d'un logiciel (*SimaPro7*) d'analyse du cycle de vie (DGA 2009a). Dans le domaine naval, un outil (*ODEON*<sup>27</sup>) d'évaluation de l'impact environnemental d'un navire a été élaboré par Desville (2007a,b) à partir de l'outil *ODESSA*<sup>28</sup>, et un corpus documentaire est disponible sur l'espace *Agora éco-conception*.

---

<sup>24</sup> Dès janvier 2007, la DGA avait rédigé un plan d'action dont les actions prioritaires portaient sur les substances dangereuses et le démantèlement des matériels de défense (Ganne 2007).

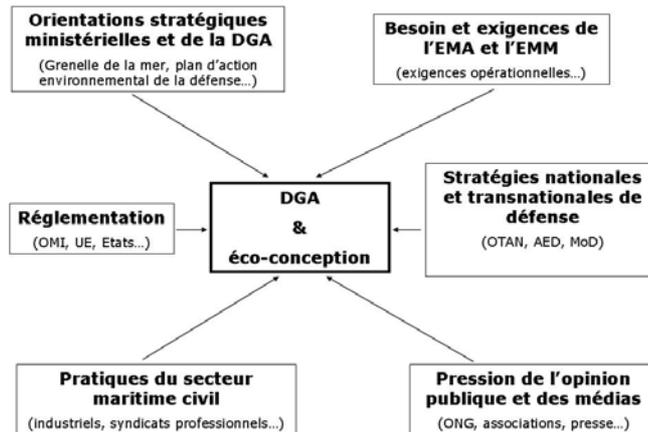
<sup>25</sup> Deligne (2008) constate cependant la difficulté à prendre en compte les impacts environnementaux dans la préparation et la conduite des opérations d'armement, en raison notamment des contradictions qui existent entre les directives gouvernementales et les responsables d'opération. D'autre part, Paulin (2008) souligne le dilemme auquel est confronté l'Etat, qui doit inclure le surcoût d'évaluation de l'environnement dans les programmes d'armement tout en veillant à la maîtrise des coûts de possession des matériels militaires.

<sup>26</sup> *EDEN* : Ensemble des Démarches Environnementales ; voir le site Intranet :

<http://totem.dga.defense.gouv.fr/actusdga/02-04-eden-pour-des-programmes-toujours-plus-verts>

<sup>27</sup> *ODEON* : Outil de Diagnostic Environnemental pour les Opérations et programmes Navals (Desville 2007a,b ; DGA 2007a,b).

<sup>28</sup> *ODESSA* : Outil de Diagnostic Environnemental pour la Spécification des Systèmes d'Armes.



**Figure 4.** Contraintes et facteurs d'influence sur l'éco-conception des programmes navals.

*Figure 4. Constraints and parameters influencing the eco-design of naval programmes.*

(Figure adaptée de / Adapted from Desville 2007a,b.)

## 2.2 Défense européenne et Atlantique-Nord

### 2.2.1 Agence européenne de défense

Un rapport d'étude a été remis récemment par BMT Defence Services Ltd. à l'Agence européenne de défense (AED) (Buckingham 2009a,b). Il recense les axes d'amélioration de la performance énergétique des plateformes navales. Bien que de nombreuses technologies soient évaluées (historique, avantages, degré de maturité [TRL]<sup>29</sup> atteint...), l'approche reste toutefois partielle ; les automates de surveillance des performances des équipements, ou les systèmes centralisés d'optimisation énergétique, par exemple, ne sont pas traités. De plus, le rendement d'une technologie est souvent donné sans être comparé à une technologie de référence existante, ou sans corrélation avec l'intégration de la technologie à bord du navire (voir également DGA 2010).

### 2.2.2 Organisation du traité Atlantique-Nord

Au sein de l'Organisation du traité Atlantique-Nord (OTAN), la protection de l'environnement naval, dès 1994, a été un thème de rapprochement avec les pays de l'Europe centrale et orientale, et fait l'objet de réflexions, développements et échanges réguliers entre pays participants (Matez 2003).

Toujours dans le domaine naval, plusieurs collaborations internationales (études de législations, rédaction de guides assurant l'interopérabilité, évaluations de technologies innovantes, réalisations de démonstrateurs technologiques) ont été menées depuis le début des années 1990 autour du concept Environmentally Sound Ship for the 21<sup>st</sup> Century (ESS-21) au sein du groupe de travail spécial SWG-12 (Special Working Group), dont les activités sont assurées depuis 2006 par le Maritime Capability Group 7 (MCG/7) on Maritime Environmental Protection. Les réunions sont semestrielles et abordent des thèmes variés et régulièrement actualisés selon les enjeux environnementaux prioritaires du moment (traitement des eaux usées et des eaux de ballast, émissions atmosphériques, peintures

<sup>29</sup> TRL : *technology readiness level* ; échelle d'évaluation du degré de maturité atteint par une technologie (cf. annexe A).

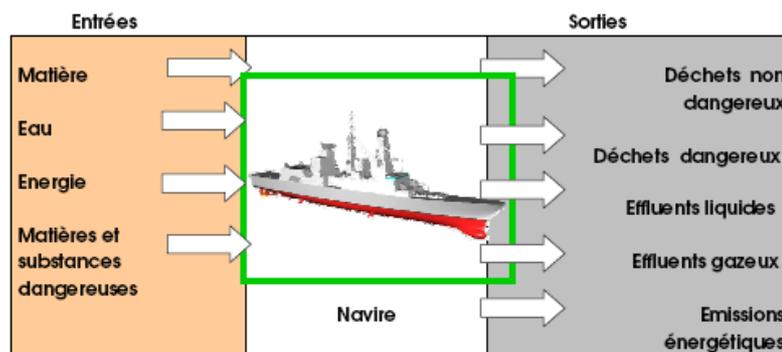
antisalissures, traitement des déchets, etc.) ; chaque nation apporte diverses contributions étatiques au sein de ce groupe (voir, par exemple, OTAN 2009).

L'Environmental Protection Working Group (EPWG) élabore les accords de normalisation (STANAG). Les STANAG 2510 et 7141, par exemple, traitent respectivement de la gestion des déchets et de la protection de l'environnement au cours d'activités militaires dirigées par l'OTAN.

## 2.3 Impact environnemental d'un navire de guerre

### 2.3.1 Signature polluante d'un navire

Un navire – civil ou militaire – peut être assimilé à une ville où des individus développent une activité en autonomie (Matez 2003). Tout au long de son cycle de vie, le bateau reçoit des flux de matière et d'énergie qu'il consomme et rejette sous forme de déchets, effluents, émissions, nuisances (figure 5).



**Figure 5.** Flux d'entrée et de sortie (matière, énergie) d'un navire.

*Figure 5. Inputs and outputs (materials, energy) of a ship* (Desville 2007a,b).

Cette circulation de flux d'entrée et de sortie génère des impacts sur l'environnement atmosphérique, marin et terrestre : émissions dans l'air de  $\text{NO}_x$ , de  $\text{SO}_x$ , de carbone ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), de VOC, de particules fines (diamètre  $< 10 \mu\text{m}$ ) ; rejets en mer en phase d'exploitation ou lors d'accidents ; pollution des eaux et des sols, en particulier lors du traitement des déchets et pendant le recyclage des navires (Kjeoy 2009). Les principales émissions – sources de nuisances – d'un bâtiment de guerre (tableau 2) ont été inventoriées par Lahiri (2004).

Desvilles (2007a,b) a identifié plusieurs conséquences sur l'environnement et les hommes :

- acidification de l'air, puis des pluies ;
- contribution à l'effet de serre ;
- appauvrissement de l'ozone stratosphérique (15-50 km d'altitude) et création d'ozone troposphérique (0-15 km d'altitude) ;

- modification de l'équilibre des écosystèmes marins (altération des habitats, déplacement de micro-organismes, eutrophisation...);
- épuisement des ressources naturelles (fossiles, matériaux) et occupation d'espace (déchets);
- nuisances physiologiques (liées, par exemple, à la toxicité de produits ou à des émissions électromagnétiques<sup>30</sup>);
- nuisances physiques (dus à des émissions acoustiques, à la chaleur, ou encore à des courants aquatiques provoqués par des pompes de refroidissement, par exemple).

**Tableau 2.** Principales émissions et sources d'émissions d'un navire de guerre.

*Table 2. Main emissions and emission sources of a warship (Lahiri 2004).*

Toxiques	Thermiques	Sonores	Electromagnétiques
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eaux usées (de cale, buanderie, cambuse...)</li> <li>• Fumées de tirs (de missiles)</li> <li>• NO<sub>x</sub></li> <li>• SO<sub>x</sub></li> <li>• COV</li> <li>• Hydrocarbures non brûlés</li> <li>• CO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Machinerie<sup>31</sup></li> <li>• Fumées de tirs</li> <li>• Carbofluoro-carbones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bruit induit par la propulsion</li> <li>• Bruit de traînée</li> <li>• Bruit des machines transmis par la coque</li> <li>• Hélicoptères en opérations</li> <li>• Explosions sous-marines</li> <li>• Transmission du sonar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transmission radar</li> <li>• Contre mesures électroniques</li> </ul>

### 2.3.2 Navire respectueux de l'environnement et spécificité militaire

Un « navire respectueux de l'environnement » (Matez 2003) doit être capable de maîtriser son impact environnemental et sa signature polluante. Toutefois, les performances opérationnelles du bâtiment doivent être préservées ou améliorées. Les marins doivent en effet assurer une présence permanente en mer grâce à l'autonomie du navire, conserver leur liberté d'action et leur mobilité au sein des théâtres d'opération, et, plus généralement accéder à des zones internationales aux réglementations environnementales contraignantes. C'est par exemple le cas des zones portuaires; si des sites possèdent des équipements à quai pour le traitement des déchets des navires de passage, d'autres peuvent refuser l'accès à des bateaux dépourvus de systèmes de gestion de leurs déchets.

<sup>30</sup> Une exposition à des rayonnements électromagnétiques pourrait même provoquer la mort d'organismes vivants.

<sup>31</sup> mais aussi refoulement dans la mer des eaux de refroidissement.

## Références

Buckingham, J., 2009a, *European Defence Agency. Overall platform energy efficiency study, Volume one: technology report*, BMT Defence Services, Reference 36513/R4486, Issue 01, April 2009.

Buckingham, J., 2009b, *European Defence Agency. Overall platform energy efficiency study, Volume two: assessment report*, BMT Defence Services, Reference 36513/R4500, Issue 01, April 2009.

CHEAr, 2005, *Armement et développement durable*, version du 16 mai 2005, Comité 12 groupe A, 41<sup>e</sup> session nationale (2004-2005), Centre des hautes études de l'armement.

Deligne, S., 2008, *La prise en compte du développement durable dans la préparation et la conduite des opérations d'armement : analyse des efforts entrepris et recommandations*, rapport de stage en administration centrale, Ecole nationale d'administration.

Desville, L., 2007a, *Eco-conception des navires militaires : définition d'un outil d'intégration de l'environnement dans les programmes d'armement navals*, thèse professionnelle, Institut supérieur d'ingénierie et de gestion de l'environnement, Mines Paris & Délégation générale pour l'armement, Paris, France, mars-septembre 2007.

Desville, L., 2007b, *Eco-conception des navires militaires : définition d'un outil d'intégration de l'environnement dans les programmes d'armement navals*, note stratégique, Institut supérieur d'ingénierie et de gestion de l'environnement, Mines Paris & Délégation générale pour l'armement, Paris, France, septembre 2007.

DGA, 2007a, *ODEON V 1.0 : outil de diagnostic environnemental pour les opérations et programmes navals. Guide de conception*, Guide DGA, Délégation générale pour l'armement, septembre 2007.

DGA, 2007b, *ODEON V 1.0 : outil de diagnostic environnemental pour les opérations et programmes navals. Fascicule utilisateur*, Guide DGA, Délégation générale pour l'armement, septembre 2007.

DGA, 2009a, *Développement durable et éco-conception : une opportunité pour la DGA*, Délégation générale pour l'armement.

DGA, 2009b, *Plan stratégique de recherche & technologie de défense et de sécurité – Edition 2009*, Direction générale de l'armement, octobre 2009.

DGA, 2010, *AED – rapport OPEE. Analyse DGA, v0.2*, Direction générale de l'armement, mars 2010.

DICoD, 2005, *La culture du développement durable au ministère de la défense*, Délégation à l'information et à la communication de défense, juin 2005.

DICoD, 2007, *Le plan d'action environnement du ministère de la défense*, dossier de presse, Délégation à l'information et à la communication de défense, mardi 27 novembre 2007.

EMA, 2004, *Directive interarmées sur la protection de l'environnement en opération, PLA 05-302*, document N° 514 DEF/EMA/EMP.5/NP du 17 mai 2004, Etat-major des armées.

EMA & DGA, 2010a, *Instruction générale N° 125/DEF/EMA/PLANS/COCA – N° 1516/DEF/DGA/DP/SDM relative au déroulement et la conduite des opérations d'armement – tome I*, 26 mars 2010, Etat-major des armées et direction générale de l'armement. (BOC N° 15 du 15 avril 2010, texte 4.)

EMA & DGA, 2010b, *Instruction générale N° 125/DEF/EMA/PLANS/COCA - N° 1516/DEF/DGA/DP/SDM relative au déroulement et la conduite des opérations d'armement – tome II (documents types)*, 26 mars 2010, Etat-major des armées et direction générale de l'armement. (BOC N° 15 du 15 avril 2010, texte 3.)

Fauvaud, S., 2004, *Management environnemental 'produit' et référentiels de substances à risque : un panorama. Pour une application aux matériels d'armement*, Centre de documentation de l'armement, Délégation générale pour l'armement, novembre 2004.

Fauvaud, S., & Forgeneuf, P. (coord.), 2007, *Traitement en fin de vie des matériels de défense : aperçu des pratiques à l'étranger*, Etude DRI-RI 06-05, Centre de documentation de l'armement, Délégation générale pour l'armement, juin 2007.

Ganne, X., 2007, *Plan d'action environnement (opérations d'armement) 2007-2008*, Edition 1.3 du 24 janvier 2007, Délégation générale pour l'armement.

IRSEM, 2010, *Impact des exigences environnementales sur l'industrie de défense européenne*, Retranscription des conférences du 26 novembre 2009, in : *Les Travaux de l'IRSEM*, n° 1, avril 2010, Institut de recherche stratégique de l'école militaire.

Jaskierowicz, D., Valayer, S., Dos Santos Justo, M., Brière, M., & Fredon, N., 2003, La Marine nationale et l'environnement, *L'Armement*, N° 84, décembre 2003, 52-60.

Kjeoy, H., 2009, Shipping in an environmental perspective. How DNV is responding to ship-owners needs, présentation de Det Norske Veritas AS, in : *The Norway-Singapore Energy Conference : Sustainable Marine Transportation*, 19<sup>th</sup> march 2009, The St. Regis Singapore, Singapore.

Lahiri, D., 2004, *Imposing environmental impact criteria on warship design philosophy*.

Lamour, M., 2007, *Rapport d'information N° 3609 relatif au démantèlement des navires de guerre*, Commission de la défense nationale et des forces armées, Assemblée nationale, 24 janvier 2007.

Lebacqz, X., & Wohrer, C., 2008, French strategy and experiences regarding ship recycling, présentation conjointe Premier ministre/Secrétariat général de la mer, in : *Ship recycling Conference*, Lloyd's list events, 13-14 May 2008, Courthouse Hotel Kempinski, London, Royaume-Uni.

Mallet, J.-C. (coord.), 2008, *Défense et Sécurité nationale. Le Livre blanc*, Odile Jacob/La documentation Française.

Matez, R., 2003, Programme et environnement : le concept de navire respectueux de l'environnement, *L'Armement*, N° 84, décembre 2003, 75-81.

MIDN, 2007, *Rapport de la mission interministérielle portant sur le démantèlement des navires civils et militaires en fin de vie*, Premier ministre, mars 2007.

MINDEF, 2007, *Instruction générale N° 1514 du 7 mai 1988 sur le déroulement des opérations d'armement*, Edition 5 du 30 mars 2007, Ministère de la défense. (En cours de révision.)

Morin, H., 2007, *Plan d'action environnement du ministère de la défense*, lettre N° 018503 DEF du 21 décembre 2007, Ministère de la défense.

Morin, H., 2009, *Nouveau plan d'action environnement du ministère de la défense*, lettre N° 017234 DEF du 9 décembre 2009, Ministère de la défense.

OTAN, 2009, Meeting followed by a workshop on *Shipboard air pollution prevention and bio-fouling*, Maritime Capability Group 7 (MCG/7) on Maritime Environmental Protection, 19-22 October, 2009, Royal Australian Navy (RAN) Naval Base HMAS Watson, Sydney, Australia.

Paulin, C., 2008, *Aspects économiques de la prise en compte de l'environnement dans les programmes d'armement*, *Recherches & Documents* n° 10/2008, Fondation pour la recherche stratégique, 5 mai 2008.

SGA, 2009, *Rapport développement durable du ministère de la défense*, Secrétariat général pour l'administration, Ministère de la défense, juillet 2009.

SGA, 2011, *Rapport développement durable du ministère de la défense et des anciens combattants pour 2010*, Secrétariat général pour l'administration, Ministère de la défense et des anciens combattants, septembre 2011.



## Des navires en service aux navires du futur : quelques initiatives et projets

Les règles nationales et internationales sur l'environnement et les exigences du marché (§ 1.2) incitent fortement les industriels à adapter et améliorer leurs matériels et produits. Ainsi, depuis quelques années, les constructeurs de navires civils et militaires tentent de développer des bateaux aux nuisances réduites. De tels bâtiments ont déjà été réalisés et fonctionnent, mais de nombreuses études portent sur des projets de navires nouveaux ou sur des systèmes et équipements du bord. Les aspects technologiques privilégiés portent généralement sur les modes de propulsion alternatifs ou hybrides, l'amélioration et l'optimisation des moteurs thermiques et de leur utilisation, l'hydrodynamique du navire, la gestion et le traitement des eaux et des déchets, le démantèlement en fin de vie ou encore l'éco-conception (par exemple, Blosserville & Remoué 2008 ; Pélaprat 2008, Chauveau 2011)<sup>32</sup>.

Bien que les navires de guerre montrent des spécificités (§ 2.3.2 ; Matez 2003), les progrès réalisés dans le secteur civil nourrissent les efforts des marines militaires, en particulier pour les bâtiments de surface (cf. Cousquer 2009 pour la DGA).

Les paragraphes qui suivent présentent les initiatives majeures des pôles de compétitivité français, des syndicats professionnels français et européen et les engagements du Grenelle de la mer (§ 3.1), d'organismes étrangers (§ 3.2), de sociétés qui proposent des solutions pour l'amélioration des navires en service (§ 3.3) ; des exemples de navires verts en service et de projets de navires écologiques du futur sont évoqués respectivement §§ 3.4 et 3.5.

---

<sup>32</sup> Voir aussi : Navigation. Les bateaux passent au vert, « Cahier technologies », in : *Les dossiers de La Recherche*, N° 44, août 2011, 81-98.

Isabelle Autissier a également consacré son émission *In extremis* du samedi 23 juillet 2011 (16-17 h) sur France-Inter au thème « Des navires pour le futur » ; les invités étaient Vincent Groizeleau, rédacteur en chef du site Internet *Mer et Marine* (<http://www.meretmarine.com>), Xavier Leclerc, directeur de STX Europe, et Christine Bossard, de l'association Robin des Bois (<http://www.franceinter.fr/emission-in-extremis-des-navires-pour-le-futur>).

## 3.1 Pôles de compétitivité français, syndicats professionnels français et européen, Grenelle de la mer

### 3.1.1 Projets des pôles de compétitivité français

Pour favoriser la compétitivité des entreprises et leur capacité d'innovation, la France a lancé en 2004 une nouvelle politique industrielle. Des pôles de compétitivité<sup>33</sup> ont ainsi été créés dans les territoires pour permettre d'associer des entreprises, centres de recherche et organismes de formation autour de domaines d'activité analogues, et de dégager ainsi des synergies autour de projets innovants menés en commun pour conquérir des marchés identifiés (DGE 2006 ; DIACT 2009a,b). Toutefois, la notion de territoires se révèle parfois trop réductrice, et les pôles de compétitivité tendent alors vers un fonctionnement en réseaux inter-régionaux, autour de thèmes fédérateurs. Cette évolution peut poser des difficultés liées, en particulier, aux périmètres de financement des différents acteurs.

Dans le domaine naval, les régions Bretagne (pôle mer Bretagne), Provence-Alpes-Côte d'Azur (pôle mer PACA) et Pays de Loire (pôle EMC2)<sup>34</sup> sont particulièrement actives. Les projets en cours portent sur le développement d'outils spécifiques pour l'éco-conception ou pour une gestion optimale de l'utilisation des navires, le traitement des déchets et des effluents, la mise au point de carburants de substitution au gazole, la recherche de matériaux nouveaux, etc. (tableau 3)<sup>35</sup>. De nombreuses entreprises, écoles, universités ou laboratoires apportent une contribution aux projets<sup>36</sup>.

### 3.1.2 Groupement des industries de construction et activités navales

La chambre syndicale des chantiers navals (CSCN) – qui a fusionné en mai 2009 avec le groupement industriel des constructions et armements navals (GICAN) pour former le groupement des industries de construction et activités navales (GICAN) – a engagé une démarche de réflexion sur le navire du futur. Des objectifs et thèmes de recherche et d'innovations pour obtenir un navire économe, propre et sûr sont proposés par CSCN (2008a) ; une liste des technologies concernées, de leur état de maturité et de projets français et européens en cours est donnée par CSCN (2008b).

### 3.1.3 Confédération européenne des industries nautiques

La confédération européenne des industries nautiques<sup>37</sup> a fait réaliser un panorama de l'impact des activités nautiques sur l'environnement (ECNI 2009). La conception et la construction du bateau de plaisance – notamment l'emploi des matériaux composites – sont abordées, ainsi que les nuisances associées à l'utilisation du bateau (émissions d'hydrocarbures, bruit, eaux usées, peintures antisalissures...).

---

<sup>33</sup> <http://www.competitivite.gouv.fr>

<sup>34</sup> EMC2 : ensembles métalliques composites complexes.

<sup>35</sup> Mentionné dans le tableau 3, le projet SSD, qui rassemble des partenaires institutionnels et industriels, n'est toutefois pas directement lié à un pôle de compétitivité.

D'autres projets de pôles sont compilés dans : *Demain la mer. Les 150 projets maritimes des pôles de compétitivité*, Dossier spécial de la revue *le marin*, 27 juin 2008, 13-20.

<sup>36</sup> Bien qu'elle ne soit pas organisée en pôle de compétitivité, la filière nautique – entreprises, laboratoires universitaires, centre de recherche pour l'architecture et l'industrie nautique (CRAIN) – de la Rochelle est particulièrement active pour développer des innovations en faveur de navires respectueux de l'environnement (voir à ce sujet l'article de Thomas 2010).

<sup>37</sup> European Confederation of Nautical Industries (ECNI), <http://www.ecni.org>

### 3.1.4 Le Grenelle de la mer français

Lancé en février 2009 par le ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, le Grenelle de la mer<sup>38</sup> a réuni tous les acteurs du monde maritime pour contribuer à l'élaboration d'une stratégie nationale marine. Une liste de 137 engagements a été établie à partir de propositions élaborées par des groupes de travail, soumises lors d'une consultation nationale puis de tables rondes finales (Millet et al. 2010).

Pour atteindre les engagements du Grenelle et préciser les modalités pour y parvenir, des groupes de travail, missions parlementaires et comités opérationnels ont été constitués. Un groupe *ad hoc* (N° 12) est consacré au navire du futur (Poimboeuf et al. 2010). Dans leur rapport, Poimboeuf et al. (2010) retracent la genèse et indiquent les missions du conseil d'orientation de la recherche et de l'innovation pour la construction et les activités navales (CORICAN), chargé de définir et valider une stratégie française pour la recherche et le développement technologique à travers notamment un programme industriel « Navire du futur » – les objectifs proposés par le Grenelle sont une diminution de 50 % de la consommation d'énergies fossiles et de l'impact des navires sur l'environnement, une meilleure sûreté et sécurité des navires et la compétitivité de la filière navale. Poimboeuf et al. (2010) identifient une liste de technologies innovantes pour les plate-formes navales et proposent des navires expérimentaux pour tester et valider en mer différentes technologies ; au-delà de ces plate-formes d'essai, des prototypes de concept de navires pourraient être envisagés. La préparation (nationale) et la promotion (internationale) d'un éco-label par le CORICAN est prévue. Les initiatives allemande, italienne, japonaise et néerlandaise sont également présentées.

## 3.2 Quelques initiatives industrielles à l'étranger

A l'étranger, divers projets, similaires à ceux des pôles de compétitivité français, ont été identifiés.

- Au Danemark, le projet Green Ship of the Future vise à développer des stratégies pour réduire de 30 % les émissions de CO<sub>2</sub>, et de 90 % les émissions de SO<sub>x</sub> et NO<sub>x</sub>, par rapport au niveau moyen d'émissions de la flotte mondiale en 2007. La Danish Maritime Foundation coordonne le projet auquel participent une dizaine d'industriels (MAN Diesel, A. P. Moller-Maersk, DFDS, ABB...), la Aalborg University, le Danish Centre for Maritime Technology (DCMT, incluant sa Force Technology) et la Technical University of the Denmark (DTU). Les efforts se focalisent sur la machinerie, la propulsion et l'optimisation du fonctionnement des systèmes de bord. Les technologies étudiées sont multiples : moteurs diesel et nouveaux carburants (par exemple fuel émulsifié à l'eau) ; systèmes de récupération des gaz chauds (*waste heat recovery unit*, WHRU) ; filtres à particules ; pompes de refroidissement de l'eau des moteurs ; automatisation du recueil d'information et de la gestion des moteurs ; gaz naturel liquéfié ; film lubrifiant d'air sous la coque ; hélices avec pales dédoublées... (Aalborg 2008 ; Eefsen 2008a,b ; Segercrantz 2009)<sup>39</sup>.
- Lighthouse est une initiative stratégique nationale suédoise destinée à assurer la compétitivité de son secteur maritime. Les thèmes de recherche, d'éducation et d'innovation sont de nature économique, législative, environnementale, technique ou encore logistique. Au sein de Lighthouse, l'environnement maritime et la réduction de la consommation énergétique et des

<sup>38</sup> <http://www.legrenelle-mer.fr/spip.php?>

<sup>39</sup> Voir aussi : 'Green Ship' project exploits existing technology, *DIESELFACTS*, N° 1, 12 (2009).

émissions des navires définissent le champ d'étude du projet Ecoship. Le Department of Shipping and Marine Technology de Chalmers University of Technology et la School of Business, Economics and Laws de Goteborg University sont des acteurs de Lighthouse<sup>40</sup>.

- Une série de travaux sur les navires verts a été initiée par la marine de guerre de la République de Singapour (Republic of Singapore Navy, RSN) à travers le programme Smart Action In Logistics (SAIL). Des études ont déjà porté sur les peintures antisalissures exemptes d'étain, les peintures faiblement absorbantes du rayonnement ultra-violet solaire (pour la diminution de la chaleur interne du navire), des volets articulés (*stern flap system*) réducteurs de consommation de fuel (environ 5 %). Parmi les futurs axes de recherche figurent l'amélioration de l'efficacité de la propulsion par des hélices dotées d'un revêtement, la réduction de la traînée du navire par la création de micro-bulles d'air ou encore l'intégration de piles à combustible (Lee et al. 2004).
- Le projet IP-Hercules<sup>41</sup> (voir aussi §§ 5.1 et 7.4), débuté en 2003 et soutenu par la Commission européenne, a pour objectif d'améliorer et développer de nouvelles technologies pour les moteurs diesel marins afin d'augmenter leur rendement, diminuer les émissions et rejets, et améliorer leur fiabilité (par exemple, MAN 2007). Le consortium réunit des partenaires industriels, universitaires et des armateurs. Le projet est piloté par Wärtsilä Corporation et MAN Diesel ; sa première phase s'est achevée en 2007 (période 2003-2007) ; une seconde phase a débuté en septembre 2008 (Kyrtatos 2007a,b, 2009 ; Nicholls 2007).
- Le projet METHAPU (§ 6.3), qui s'étend sur la période 2006-2010, vise à évaluer la maturité des technologies basées sur le méthanol et à valider le fonctionnement des piles à combustibles à oxydes solides utilisant du méthanol à bord des navires commerciaux. Les impacts environnementaux à court et long termes et la compatibilité de ces technologies avec la réglementation sont également des axes de recherche de ce projet supporté par l'Union européenne<sup>42</sup> (Methapu 2007 ; Motor Ship 2007 ; Wärtsilä 2009).

---

<sup>40</sup> Larsson, L., Research in the thematic area ECO SHIP within Lighthouse, Chalmers University of Technology ; Södahl, B., *New requirements for SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub>-challenges and opportunities for the shipping industry*, Lighthouse Maritime Competence Centre ; Södahl, B., & Nikopoulou, Z., *LIGHTHOUSE-Research and education for sustainable shipping. Emission trading*, Lighthouse Maritime Competence Centre.

<sup>41</sup> <http://www.ip-hercules.com>

<sup>42</sup> *Validation of renewable methanol based auxiliary power system for commercial vessels* (METHAPU) est un consortium de cinq partenaires : Wärtsilä (Finlande), Wallenius Marine (Suède), Lloyd's Register (Royaume-Uni), l'université de Gêne (Italie) et Det Norske Veritas (Norvège). Le projet est piloté par Wärtsilä (<http://www.methapu.eu/Oskari2.aspx?cmd=1>).

**Tableau 3.** Liste de projets maritimes des pôles de compétitivité mer Bretagne, mer PACA et EMC2.

*Table 3. List of maritime projects of the competitiveness clusters mer Bretagne, mer PACA and EMC2.*

Thème	Nom du projet	Dates de début/fin (durée)	Nature du projet	Pôle de compétitivité
<b>Outils d'éco-conception</b>	Convenav (CONception et cycle de Vie Environnemental des NAVires) <sup>43</sup>	Janvier 2008/ Décembre 2010 (36 mois)	Développement d'outils nouveaux (basés sur l'ACV et Simapro) qui, dès la conception, mais aussi durant l'exploitation, les phases de maintenance ou de modification et lors de la déconstruction, permettront d'évaluer et réduire les impacts environnementaux des navires. Ces outils sont destinés aux architectes, constructeurs, équipementiers et exploitants et pourront également être utilisés par des sociétés de classification pour l'éco-labellisation.	Mer Bretagne
	Eonav (Exploitation Optimisée des NAVires pour réduire les consommations d'énergie et les émissions) <sup>44</sup>	Décembre 2009/ Novembre 2011 (36 mois)	Mise au point d'un outil d'aide à la décision pour la conception et l'exploitation de tous types de navires afin de réduire les consommations d'énergie et les émissions atmosphériques. Etapes du projet : réalisation de mesures réelles ; définition d'un simulateur de performances ; définition et conception.	Mer Bretagne, Mer PACA et EMC2
	SSD (Sustainable Ship Design) <sup>45</sup>	Février 2008/ Juillet 2009 (18 mois)	Développement d'un logiciel pour déterminer le profil environnemental d'un navire au cours de son cycle de vie. Mise en commun d'une base de données. Evaluation et réduction des impacts environnementaux. SSD est un assemblage de modules d'analyse du cycle de vie élémentaires, applicable à une arborescence navire figée.	(Hors pôle :) Conseil régional des Pays de Loire, ADEME, et une dizaine d'entreprises

<sup>43</sup> Voir : *Fiches descriptives de projets*, Pôle de compétitivité mer Bretagne, ainsi que DCNS (2009), Pierson et al. (2009), et Prinçaud et al. (2010).

<sup>44</sup> Pierson et al. (2009) ainsi que : Pierson, Y., *EONAV. Exploitation Optimisée des NAVires pour réduire les consommations d'énergie et les émissions*, dossier pour labellisation, Pôle de compétitivité mer Bretagne. Pour une analyse du contexte réglementaire d'Eonav, voir Claudepierre (2010).

<sup>45</sup> Mer et Marine (2008b) ; Simon & Tincelin (2008) ; Castelnerac (2009a,b) ; DCNS (2009) ; Pierson et al. (2009) ; Matez & Chapon (2010).

**Tableau 3 (suite).**  
*Table 3 (continued).*

<b>Thème</b>	<b>Nom du projet</b>	<b>Date de début/fin (durée)</b>	<b>Nature du projet</b>	<b>Pôle de compétitivité</b>
<b>Hydrodynamique et motorisation</b>	Optnav <sup>46</sup>	Novembre 2008/ ?	Optimisation des performances hydrodynamiques des navires (coque, propulseurs, appendices). Intégration d'outils de simulation et de conception.	Mer Bretagne, Mer EMC2
	Heol <sup>47</sup>	Février 2007 / ?	Développement d'une vedette à passagers respectueuse de l'environnement et accessible à tous (notamment aux handicapés). Modification de la carène (réduction de la consommation énergétique ; atténuation des vagues générées par le bateau pour la préservation de la faune, la flore et le littoral côtier). Motorisation hybride (électro-diesel). Panneaux solaires, voile d'appoint pour l'amélioration du bilan énergétique. Matériaux recyclables avec système de récupération et de traitement des effluents. Utilisation des eaux de pluie pour les sanitaires.	Mer Bretagne
	Déesse (Diesel Electro Engine Solar Ship Eco-compatible) <sup>48</sup>	Avril 2007/ Mars 2010 (36 mois)	Développement d'une navette maritime à motorisation hybride diesel électro-solaire.	Mer PACA

<sup>46</sup> *Fiches descriptives de projets*, Pôle de compétitivité mer Bretagne.

<sup>47</sup> *Ibidem*, et PNR (2009).

<sup>48</sup> *Fiches descriptives de projets*, Pôle de compétitivité mer PACA, ainsi que Avellan (2008) et DCNS (2009).

**Tableau 3 (suite).**  
*Table 3 (continued).*

<b>Thème</b>	<b>Nom du projet</b>	<b>Dates de début/fin (durée)</b>	<b>Nature du projet</b>	<b>Pôle de compétitivité</b>
<b>Revêtements antisalissures</b>	Paintclean <sup>49</sup>	Avril 2006/ Janvier 2011	Recherche de peintures antisalissures ( <i>antifouling</i> ) de nouvelle génération, sans risque pour la faune et la flore, à base de molécules actives, pour protéger les carènes de navires et les équipements immergés des organismes marins indésirables.	Mer Bretagne
	Ecopaint <sup>50</sup>	Février 2007/ Janvier 2011 (48 mois)	Mise au point de revêtements non toxiques à fonctionnalité antisalissure. Réduction de la traînée hydrodynamique afin de diminuer ou éliminer les solvants organiques, d'inhiber l'adhésion et la croissance des salissures marines et de favoriser la durabilité des performances des revêtements.	Mer PACA
	BioPainTrop <sup>51</sup>	Décembre 2009/ Décembre 2012	Recherche de peintures antisalissures intégrant des molécules actives en milieu corallien et issues des ressources marines tropicales de l'île de La Réunion. Ces molécules tropicales seront ensuite intégrées aux peintures Paintclean et Ecopaint pour être testées comme revêtement en milieu tempéré et tropical.	Mer Bretagne, Mer PACA et Qualitropic
	ACWS (Antifouling Coatings for War Ships)	Juillet 2008/ Juillet 2011	Evaluation de technologies antisalissures émergentes et développement de méthodes d'essais accélérés (< 1 an) de nouveaux produits. Applications aux navires de guerre. Projet entre la France, le Royaume-Uni et les Pays-Bas, avec la participation d'industriels et de laboratoires universitaires (DCNS, DSTL, universités de Southampton, Toulon-Var...) (Martin 2010 ; voir également § 8.1.1).	<i>(Hors pôle de compétitivité :) Agence européenne de défense</i>

<sup>49</sup> *Fiches descriptives de projets*, Pôle de compétitivité mer Bretagne, ainsi que Duguey (2008).

<sup>50</sup> *Fiches descriptives de projets*, Pôle de compétitivité mer PACA ; voir aussi Ecopaint (2010).

<sup>51</sup> *Fiches descriptives de projets*, Pôle de compétitivité mer Bretagne.

**Tableau 3 (suite).**  
*Table 3 (continued).*

<b>Thème</b>	<b>Nom du projet</b>	<b>Dates de début/fin (durée)</b>	<b>Nature du projet</b>	<b>Pôle de compétitivité</b>
<b>Revêtements antisalissures (suite)</b>	AMBIO	Mars 2005/ Février 2010	Etude de l'influence des surfaces nanostructurées sur l'adhésion des organismes marins ; développement de revêtements superhydrophobes à hétérogénéité de surface. Participation de 31 partenaires industriels et de la recherche de 12 pays européens (Callow 2010 ; voir également § 8.1.1).	<i>(Hors pôle de compétitivité :) Commission européenne</i>
<b>Matériaux bio-composites</b>	Navecomat <sup>52</sup>	Octobre 2007 / ? (36 mois)	Mise au point de matériaux bio-composites haute performance, constitués d'un renfort en fibre végétale et d'une matrice biodégradable pour navire de plaisance.	Mer Bretagne
<b>Biocarburants</b>	Marine bio fuel <sup>53</sup>	Janvier 2007/ ? (36 mois)	Utilisation d'huile végétale pure (HVP) comme carburant moteur.	Mer PACA
	CIM 1 & 2 <sup>54</sup>	? / ? (12 mois)	Etude de carburants de substitution au gazole, par adjonction de carburants « biomer ». Etude de faisabilité de l'utilisation de piles à combustible.	Mer PACA
	Shamash <sup>55</sup>	Décembre 2006 / ? (36 mois)	Production de biocarburants lipidiques à partir de microalgues <sup>56</sup> .	Mer PACA

<sup>52</sup> *Ibid.*

<sup>53</sup> *Fiches descriptives de projets*, Pôle de compétitivité mer PACA.

<sup>54</sup> *Ibid.*

<sup>55</sup> *Ibid.*

**Tableau 3 (suite).**  
*Table 3 (continued).*

<b>Thème</b>	<b>Nom du projet</b>	<b>Dates de début/fin (durée)</b>	<b>Nature du projet</b>	<b>Pôle de compétitivité</b>
<b>Traitement des déchets et des eaux usées</b>	Iwest (Integrated Waste to Energy Shipboard Technology) <sup>57</sup>	Septembre 2009/Août 2012 (36 mois)	Développement de solutions innovantes pour l'élimination des déchets opérationnels d'un paquebot. Réduction des nuisances environnementales potentielles au port. Valorisation du potentiel énergétique des déchets par génération d'un gaz de synthèse valorisable (réalisation et essais d'un pilote à terre).	Mer EMC2
	Nacre (NAvire Conduit dans le Respect de l'Environnement) <sup>58</sup>	Janvier 2008/ ? (36 mois)	Elaboration de solutions intégrées, efficaces et rentables, pour la gestion et le traitement des déchets des navires de commerce et militaires, neufs et anciens.	Mer Bretagne
	Cycleaux-1 <sup>59</sup>	Octobre 2006 / ? (36 mois)	Réutilisation des eaux usées pour un usage sanitaire et technique : application aux eaux grises dans le bâtiment et aux eaux usées dans les navires.	Mer EMC2
	Hycare <sup>60</sup>	Mars 2008/ ?	Contrôle de la teneur en hydrocarbures des eaux de cale. Mise au point de nouveaux capteurs de mesure.	Mer Bretagne

<sup>56</sup> Une description du projet Shamash est donnée par Guillot & Cadoret (2008) et INRIA (2008, 2009) ; des résultats et perspectives sont présentés par Cadoret & Bernard (2008). Shamash est également évoqué par Calu (2006).

<sup>57</sup> Pélerin (2009a) donne une présentation du projet Iwest. Voir également DGA (2009b) pour la grille d'analyse du projet par la DGA.

<sup>58</sup> *Fiches descriptives de projets*, Pôle de compétitivité mer Bretagne, ainsi que : Pôle mer Bretagne (2007), Matez (2008), DCNS (2009), Pierson et al. (2009), et Therene & Mange (2009), DCNS (2010). Voir aussi DGA (2008) pour la grille d'analyse du projet Nacre par la DGA.

<sup>59</sup> Une description du projet Cycleaux-1 est proposée par Thomas & Jaglin (2006).

**Tableau 3 (suite).**  
*Table 3 (continued).*

<b>Thème</b>	<b>Nom du projet</b>	<b>Dates de début/fin (durée)</b>	<b>Nature du projet</b>	<b>Pôle de compétitivité</b>
<b>Climatisation</b>	Climat+ (CLIMatisation Marine Terrestre+) <sup>61</sup>	Septembre 2009/ ? (36 mois)	Optimisation de la climatisation à bord des navires par l'amélioration des performances énergétiques et la miniaturisation des équipements.	Mer EMC2
	MERITA <sup>62</sup>	Janvier 2010 / ? (36 mois)	Développement d'une machine de conversion de l'énergie acoustique en énergie thermique (technologie thermo-acoustique) afin de produire du froid sans compresseur. Ce procédé écologique, qui utilise des gaz neutres en récupérant les rejets thermiques des moteurs, doit permettre au secteur naval de réaliser d'importantes économies d'énergie.	Mer Bretagne, Mer PACA
<b>Communication sans fil</b>	SAPHIR <sup>63</sup>	Septembre 2009/ ?	Développement de l'installation à bord d'un réseau de communication sans fil entre les capteurs et les coffrets d'alarmes afin d'alléger le navire, réduire sa consommation énergétique et diminuer les coûts de mise en œuvre et de maintenance.	Mer Bretagne

<sup>60</sup> *Fiches descriptives de projets*, Pôle de compétitivité mer Bretagne.

<sup>61</sup> L'ensemble du projet Climat+ est présenté par Moutte (2009). Voir aussi DGA (2009a) pour la grille d'analyse du projet par la DGA.

<sup>62</sup> *Fiches descriptives de projets*, Pôle de compétitivité mer Bretagne. Voir aussi DGA (2010) pour la grille d'analyse du projet par la DGA.

<sup>63</sup> *Ibid.*

Tableau 3 (suite).  
*Table 3 (continued).*

Thème	Nom du projet	Dates de début/fin (durée)	Nature du projet	Pôle de compétitivité
<b>Localisation pollution en mer</b>	Rapace 2 (Récupération Assistée PAr Capteurs Embarqués) <sup>64</sup>	?/fin 2009 (36 mois)	Localisation de la pollution en mer.	Mer PACA

<sup>64</sup> *Fiches descriptives de projets*, Pôle de compétitivité mer PACA.

### 3.3 L'amélioration des performances environnementales des navires en service

Des solutions pour optimiser le fonctionnement des navires en service et adapter les navires anciens – notamment lors de travaux en cale sèche – à la problématique environnementale sont proposées par diverses sociétés, par exemple :

- Kongsberg Gruppen ASA<sup>65</sup>, en Norvège. L'amélioration des performances des moteurs, la gestion de la puissance disponible, l'optimisation du profil de la coque, de l'allure et du fonctionnement du navire sont quelques possibilités offertes par cette société pour la marine marchande et de croisière (Brynsrud 2009) ;
- Deltamarin Ltd<sup>66</sup>, en Finlande. Sa méthodologie de conception des bâtiments se déroule selon un processus en quatre étapes : choix de la configuration générale du bâtiment ; organisation des systèmes et équipements du bord ; étude et utilisation de systèmes et équipements efficaces ; protection et sécurisation des installations. Les axes d'amélioration portent notamment sur la génération d'une d'énergie électrique, la propulsion par pods (pour les ferries), la disposition en étages de la machinerie (pour les tankers), l'optimisation du profil hydrodynamique du navire, des systèmes de gestion de l'eau et des déchets (Kanerva & Salama 2004 ; Deltamarin 2006)<sup>67</sup> ;
- Guangzhou Shipyard International Company, Ltd. (GSI)<sup>68</sup>, en Chine. Son approche Green Ship Building Technology propose la conception de navires (marine marchande et de croisière) selon la méthode des « 3R »<sup>69</sup>. Les principales améliorations et études sont dédiées (He-ping 2008) à la propulsion électrique, la forme des carènes et l'allègement des structures, l'optimisation des chemins de câbles et de canalisations, l'assemblage d'éléments modulaires, la sélection de matériaux non polluants, recyclés et recyclables (en limitant leur variété et privilégiant les matériaux légers) et l'amélioration des techniques de construction (soudage, peinture...) ;
- Samsung Heavy Industries<sup>70</sup>, en Corée. Sa démarche de conception ou d'adaptation des navires vise en particulier à réduire les émissions atmosphériques pour être en conformité avec les agréments – par exemple RINA Clean-Sea, RINA Clean-Air, BV Cleanship, DNV Clean, ABS ES ou LR EP – délivrés par les agences de notations (Maeng 2007).
- Guido Perla & Associates, Inc.<sup>71</sup>, aux Etats-Unis. Cette société contribue à l'optimisation des formes de carène ou à la simplification des procédés d'assemblage de la structure du navire (Scholz & Townsend 2009) ;

---

<sup>65</sup> <http://www.kongsberg.com/en/KOG.aspx>

<sup>66</sup> <http://www.deltamarin.com>

<sup>67</sup> Voir également : *Fuel saving & environmental*, Deltamarin Ltd.

<sup>68</sup> <http://www.chinagsi.com/en/main>

<sup>69</sup> La méthode des « 3R » consiste à : réduire la consommation de matériaux et d'énergie ainsi que la pollution sur l'environnement lors de la construction et de l'utilisation des navires ; recycler tous les ensembles, sous-ensembles et éléments possibles lors des opérations de maintenance ; réutiliser les matériaux après le démantèlement des bateaux.

<sup>70</sup> <http://www.shi.samsung.co.kr/Eng>

<sup>71</sup> Siège social de GPA situé aux Etats-Unis ; [http://www.gpai.com/about\\_history.shtml](http://www.gpai.com/about_history.shtml)

- Ecoship Engineering AB (Suède). Cette société, qui associe également cinq partenaires industriels<sup>72</sup>, effectue des recherches et développements destinés à améliorer la sûreté des bateaux de transport et l'efficacité des performances des navires. Ses solutions d'éco-conception reposent sur des analyses des cycles de vie et de coût (Ecoship 2001, 2006).
- SSPA Sweden AB<sup>73</sup>, en Suède (optimisation du profil hydrodynamique).

### 3.4 Des réalisations de navires verts...

Des navires déjà en service intègrent des concepts et solutions en faveur de l'environnement. Quelques exemples permettent d'illustrer concrètement les innovations mises en œuvre.

- Le *British Emerald*, un navire citerne de gaz naturel liquéfié de British Petroleum, construit par Hyundai Heavy Industry (HHI)<sup>74</sup> en Corée, est équipé de quatre moteurs hybrides diesel-électrique Wärtsilä, réduisant la consommation de fuel de 20 % ; ce type de propulsion, plus coûteux (2 à 4 %) qu'un système classique de turbines à vapeur, semble rentabilisé en cinq ans (Siuru 2007).
- En Australie, Solar Sailor Holding Ltd. (SSHL)<sup>75</sup> a développé une motorisation hybride qui associe un système de propulsion classique – acceptant des carburants alternatifs – avec des moteurs électriques alimentés par une énergie solaire (des ferries de 60 à 150 passagers sont en service à Sydney, Shanghai et San Francisco) ; en outre, pour des tankers de transport d'eau entre la Tasmanie et l'Australie, des voiles apportent un supplément d'énergie aux navires (Siuru 2007 ; Blossville & Remoué 2008).
- Les sociétés de transport de marchandise APL Ltd<sup>76</sup> et Ulstein Group modernisent leur flotte et s'équipent de navires intégrant des technologies éco-compatibles (formes de carène spécifiques ; ailerons prolongeant le moyeu d'hélice [*propeller boss cap with fins*, PBCF] ; peintures au silicone pour la coque ; traitement des déchets ; fuel émulsifié...) (Huat 2009 ; Ulstein 2009).
- Roadships Holdings a confié à STX Canada Marine la transformation de ses cargos porte-remorques pour les équiper d'une propulsion au gaz naturel liquéfié<sup>77</sup>.
- Construit par Nichols Brothers Boat Builders et Kvichak Marine Industries, le *Gemini* est le premier exemplaire d'une flotte de ferries catamarans (capacité de 149 passagers) commandés par la San Francisco Bay Area Water Emergency Transportation Authority (WETA) et destinés à la navigation en baie de San Francisco aux États-Unis (Meredith 2009)<sup>78</sup>.

---

<sup>72</sup> FKAB, Ocke Mannerfelt Design AB, EMC Europe Marine Control B.V., Callenberg Electro AB/Callenberg Fläkt Marine, IUC Skåne AB ; <http://www.ecoship.com/index.htm>

<sup>73</sup> <http://www.sspa.se/services/hydrodynamic-design/green-ships-energy-saving>

<sup>74</sup> <http://english.hhi.co.kr>

<sup>75</sup> [http://www.solarsailor.com/compagny\\_overview.htm](http://www.solarsailor.com/compagny_overview.htm)

<sup>76</sup> <http://www.apl.com/homeport>

<sup>77</sup> Green machine to get updated design, *The Naval Architect*, N° 9, September 2009, 116-118.

<sup>78</sup> Parmi les innovations, une filtration catalytique des gaz NO<sub>x</sub> est prévue, le carburant est un mélange de fuel à basse teneur en soufre et de biodiesel, des panneaux solaires apportent un complément d'énergie au dispositif principal, le navire est équipé de déflecteurs (*interceptors*) ajustables et sa capacité de transport est accrue [voir également : The new eco-friendly ferry, *Maritime Reporter & Engineering News* 71(1), 10 (2009)]. WETA avait déjà

- Le *Green Dolphin*, de Foss Maritime (Etats-Unis), est un navire prototype de 23,7 m de long et 10,4 m de large. L'énergie pour la propulsion est fournie par une combinaison de sources : des batteries délivrent jusqu'à 225 kW à des moteurs électriques, et des moteurs diesel auxiliaires ont chacun une puissance de 300 kW. La puissance totale du navire est de 3,7 MW. La diminution estimée d'émissions de NO<sub>x</sub> et de particules est de 44 % ; la réduction de consommation de fuel devrait être de 20 à 30 %, réduisant d'autant les émissions de SO<sub>x</sub> et de CO<sub>2</sub> (Henderson 2008).
- Les bâtiments de ravitaillement de plateformes pétrolières *VS 491 CD* (du Suédois Vik-Sandvik) et *UT731 CD* (du Norvégien Farstad) sont équipés de moteurs hybrides électro-diesel, fournis respectivement par Wärtsilä (2 x 8 MW) et Rolls-Royce<sup>79</sup>.
- Le navire citerne côtier japonais *Nadeshiko Maru* mesure 70 m de long et pèse 749 tonnes. Il est équipé de quatre groupes électrogènes diesel de 410 MW et d'un système de propulsion électrique. La gestion électrique du bord est centralisée pour l'ensemble des fonctions (propulsion, servitudes, installations de sécurité...). La structure est une double coque et des hélices contra-rotatives ont été installées. Il s'agit du quatrième navire « super écologique » construit au Japon (Maru 2008).
- Des bus de mer sont en service à La Rochelle (France) depuis 1998. Les deux derniers mis en service opèrent quotidiennement dans le chenal de La Rochelle. Ce sont des catamarans en matériaux métalliques composites (sandwich d'aluminium), propulsés par pods orientables synchrones à aimants permanents, disposants d'hélices de grand diamètre et à rotation lente ; des panneaux solaires apportent jusqu'à 20 % de l'énergie nécessaire (Pallu de la Barrière 2009).
- Le trimaran rapide néo-zélandais *Earthrace* (24 m de long) est équipé de deux moteurs Cummins Mercruiser de 350 kW qui fonctionnent avec un carburant 100 % biodiesel ; il atteint une vitesse maximale de 45 nœuds<sup>80</sup>.

### 3.5 ... aux projets de navires du futur

Le navire du futur ne se limitera pas à la seule dimension environnementale : ce sera un navire économe, opérationnel, sûr, propre et intelligent<sup>81</sup>.

De nombreuses études et projets sont en cours. Quelques initiatives norvégienne<sup>82</sup>, suédoise<sup>83</sup>, taïwanaise<sup>84</sup>, japonaise<sup>85</sup>, chinoise et hollandaise<sup>86</sup> sont présentées dans WWF (2005). D'autre part, la North Sea Foundation (Utrecht, Pays-Bas) et la European Federation for Transport & Environment

---

fait réaliser une étude comparative particulièrement détaillée des modes de propulsion et carburants alternatifs (McMullen & Hamilton 2002).

<sup>79</sup> Hybrid power enhances offshore economy, *Marine Propulsion*, August/September 2008, 237-242.

<sup>80</sup> Boosting biodiesel as a marine fuel, *Marine Propulsion*, August/September 2007, 181 ; Eco boat runs on biofuel, human fat, *MarineNews*, February 2008, 8-9.

<sup>81</sup> C'est la notion portée par le GICAN et les pôles de compétitivité français dans le cadre du Grenelle de la mer.

<sup>82</sup> Green ships research programme et TRESHIP (Technologies for Reduced Environmental Impact from Ships).

<sup>83</sup> Ecoship.

<sup>84</sup> Evergreen Post-Panamax Ships.

<sup>85</sup> Super Ecoships.

<sup>86</sup> Green Scrapping Policy (Chine et Pays-Bas).

(Bruxelles, Belgique) promeuvent un développement soutenable du trafic maritime par la réalisation de navires verts à travers le concept Clean Ship (NSF & TE 2005)<sup>87</sup>. Le concept de navire futuriste, 22 CF (22<sup>nd</sup> Century Frigate), du ministère de la défense britannique devrait être équipé de nombreux automatismes et intégrer également un ensemble de technologies compatibles avec la problématique environnementale (Scott 2010).

Le tableau 4 rassemble les caractéristiques principales de projets français et étrangers récents<sup>88</sup> :

- Eoseas et EcoShip (figure 6), respectivement navires de croisière et militaire (France) ;
- Orcele et Inbishop, respectivement navires de croisière et péniche (Suède et Norvège) ;
- NYK Super Eco Ship 2030 et ISHIN-I, respectivement paquebot et navire roulier (Japon) ;
- Evergreen Post-Panamax Ships, cargos plus larges que les Panamax (Taïwan).



**Figure 6.** Vue d'artiste du concept de navire civil Eoseas.

*Figure 6.* Artist view of the Eoseas ship concept (STX Europe).

<sup>87</sup> Voir également : *Seas at risk, Policy analysis. The Clean Ship Concept: a strategy for uncoupling growth in shipping from environmental harm*, November 30, 2007.

<sup>88</sup> D'autres démarches peuvent être citées. Dans le cadre du projet suisse ECOPRAO, l'école polytechnique fédérale de Lausanne, l'université de Lausanne et l'architecte naval R. Amacher ont entrepris l'éco-conception d'un voilier de type *Prao* (catamaran asymétrique) en privilégiant une coque en bois contreplaqué, un profil de voiles optimisé et l'utilisation de matériaux recyclables (Boucher et al. 2007). Karolina Adolfsson (<http://www.studiodoo.se>) – qui travaille notamment pour FKAB Marine Design (<http://www.fkab.com>), concepteur de bateaux civils de tous types – propose également quelques concepts de navires innovants. gCaptain (2009) a rassemblé son « Top 10 » des navires verts en projet ou en service.

**Tableau 4.** Projets d'industriels français et étrangers.

*Table 4. French and foreign industrial projects.*

<b>Principaux industriels ou organismes</b>	<b>Nom du projet</b>	<b>Type de marine</b>	<b>Nature du projet</b>	<b>Principaux axes d'amélioration ou d'étude</b>	<b>Pays</b>
STX Europe	Eoseas	De croisière	Réalisation d'un pentamaran (coque centrale et quatre flotteurs) de 305 m de long et de 60 m de large, à partir des concepts développés dans le cadre du programme Ecorizon®.	Propulsion assistée par des voiles (12400 m <sup>2</sup> ). Panneaux solaires (1000 m <sup>2</sup> ). Centrale au gaz naturel liquéfié. Centrale de retraitement des déchets organiques. Recyclage de l'eau. Récupération des eaux de pluie. Matériaux recyclables. Climatisation naturelle par système de double peau. Optimisation de l'hydrodynamique (notamment coussin d'air sous la coque). (Voir : Pélerin 2008, 2009b ; Leclercq et al. 2009 ; STX Europe 2009 ; STX France 2009.)	France

Tableau 4 (suite).  
Table 4 (continued).

Principaux industriels ou organismes	Nom du projet	Type de marine	Nature du projet	Principaux axes d'amélioration ou d'étude	Pays
DCNS <sup>89</sup>	Ecoship	Militaire	Eco-conception d'un bâtiment d'intervention et de souveraineté (BIS) dont l'impact environnemental sera réduit de moitié.	Coque en aluminium. Ventilation et chauffage par échangeurs double flux. Réutilisation des eaux grises. Architecture optimisée (profil du navire, coque, hélice). Aérodynamisme amélioré et efficace. Revêtement antisalissures (silicone). (Optionnel : panneaux solaires et aile de traction [ <i>keite surf</i> ]). (Voir : Accary 2008 ; DCNS 2008c ; Mer et Marine 2008a ; Barbaux 2009 ; Henno 2009.)	France
The Wilh. Wilhelmsen Group	Orcelle	Marchande	Eco-conception de bâtiments de transport maritime de type catamaran ou pentamaran.	Propulsion électrique (panneaux solaires, piles à combustible, voiles, houle). Navire sans ballast. Architecture particulière (catamaran, pentamaran) <sup>90</sup> . (Voir : Desville 2007a ; Nielsen 2007 ; Moore 2008.) <sup>91</sup>	Suède et Norvège

<sup>89</sup> DCNS a engagé une réflexion sur l'éco-conception de l'ensemble du cycle de vie des navires militaires (DCN 2006, 2007a,b ; DCNS 2007a,b ; Le Roy 2009 ; Pierson et al. 2009), dont cinq axes de recherche ont été retenus (DCNS 2008b) : analyse du cycle de vie ; sources d'énergie ; rendement énergétiques ; déchets et émissions ; traçabilité et démantèlement. Des voies innovantes ont été identifiées et ont fait l'objet de fiches de synthèse, canevas de possibles études amont (DCNS 2008a). Par ailleurs, DCNS participe à plusieurs projets des pôles de compétitivité (tableau 3), notamment Convenav, SSD, Déesse et Nacre (DCNS 2009 ; Garcia & Pierson 2009 ; Pierson et al. 2009) ainsi qu'au projet européen POSE<sup>2</sup>IDON (DCNS 2008b ; Mirzaian & Flury 2009 ; Pierson et al. 2009 ; voir également : BMT leads electric shipping consortium study, *mer*, N° 33, March 2009, 37 ; EU projects puts Euro 23m into electric shipping, *Digital Ship*, January/February 2009, 25). DCNS pilote également le projet SILENV sur la pollution sonore des navires décrit § 9.

<sup>90</sup> Des concepts nouveaux développés dans le cadre du projet Orcelle pourraient être mis en application en 2010, et la plupart en 2025 (O'Rourke 2006).

<sup>91</sup> ...mais aussi : *Green flagship*, document Wallenius Wilhelmsen (non daté) ; Blueprint for the ultimate green ship, *Marine Propulsion*, August/September 2006, 34-35 ; Environmentally friendly shipping – a ship operators view, Interview: Arild Iversen, *mer*, March 2008, 14-15.

Tableau 4 (suite).  
Table 4 (continued).

Principaux industriels ou organismes	Nom du projet	Type de marine	Nature du projet	Principaux axes d'amélioration ou d'étude	Pays
Consortium d'entreprises et d'industriels <sup>92</sup>	Inbiship	Fluviale	Eco-conception d'un navire de transport fluvial innovant. (Ce projet s'inscrit dans le cadre du programme Intermodeship.)	Propulsion électrique ou hybride (electro-diesel). Propulsion par pods rétractables. Forme optimisée de la carène. (Voir : van Heerd 1998 ; Eco-ship 2006 ; Radojicic 2006 ; Schweighofer 2009.)	Européens
Nippon Yusen Kabushiki Kaisha (NYK Line)	NYK Super Eco Ship 2030	De croisière	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réalisation de NYK Super Eco Ship 2030, paquebot de 353 m de long et 54,6 m de large.</li> <li>Tests de panneaux solaires sur cargo<sup>93</sup>.</li> </ul>	(Projet similaire à Eoseas de STX Europe.) Association de moteurs au gaz naturel liquifié (puissance totale de 40 MW). Panneaux solaires (1 à 2 MW). Voiles (1 à 3 MW). Propulsion à l'aide d'hélices contra-rotatives sur pods <sup>94</sup> .	Japon

<sup>92</sup> Ce projet européen rassemble trois instituts de recherche (MARIN, VBD, NEA), sept fournisseurs de matériels et équipements (dont Volvo Penta, NEWAGE Int., EI Marine et ABB Azipod Oy), six chantiers navals (parmi lesquels Grave et Van Grevensteins' Scheepswerf), une compagnie de transport (Chemgas) et trois sociétés de classification (Bureau Veritas, Germanischer Lloyd et Lloyd's Register).

<sup>93</sup> En décembre 2008, NYK et Nippon Oil Corporation ont installé sur un cargo (navire roulier) de 60000 tonnes (capacité de transport de 6400 véhicules) de Toyota Motor Corporation un ensemble de 328 panneaux solaires, qui fourniront 40 kW, soit moins de 0,3 % de la puissance nécessaire à la propulsion du navire. Deux années de tests permettront d'évaluer la fiabilité et l'endurance de l'installation aux conditions de navigation (eau salée, vibration, vent...) et de montrer l'intérêt d'une génération mixte de puissance (NYK 2008 ; ADIT 2009b ; voir aussi : EU projects puts Euro 23m into electric shipping, *Digital Ship*, January/February 2009, 25 ; A little ray of sunshine, *The Naval Architect*, January 2009, 35).

<sup>94</sup> Cf. Super Eco-Ship support center, [http://www.nmri.go.jp/eco-pt/index\\_e.html](http://www.nmri.go.jp/eco-pt/index_e.html) (National Maritime Research Institute), ainsi que : NYK gives glimpse of future, *The Naval Architect*, June 2009, 41.

Tableau 4 (suite).  
*Table 4 (continued).*

Principaux industriels ou organismes	Nom du projet	Type de marine	Nature du projet	Principaux axes d'amélioration ou d'étude	Pays
Mitsui O.S.K. Lines (MOL)	ISHIN One (Innovations in Sustainability backed by Historically proven, INtegrated technologies)	Marchande	Concept de navire roulier visant à réduire les coûts énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre.	Pont supérieur couvert de panneaux solaires. Machines et système propulsif optimisés. Carène hydrodynamique et hydrophobe. Recherche des routes les plus économiques. Batteries rechargeables pour une utilisation à quai. (Voir : Mer et Marine 2009 ; Mol 2009.)	Japon
Evergreen Marine Corporation	Evergreen Post-Panamax Ships	Marchande	Amélioration de la sûreté des cargos. (Mise en service de dix Panamax de nouvelle génération en 2007.)	Modes de propulsion alternatifs. Double coque. Réservoirs de fuel placés le long des cloisons transverses (plutôt que sur les côtés ou au fond du navire). Revêtements. Gestion et traitement des déchets. (Voir : WWF 2005 ; Chang 2006 ; Evergreen 2009a,b.)	Taiïwan

## Références

- Aalborg, 2008, *Green ship of the future*, Presentation series, September 2008, Aalborg Industries.
- Accary, M., 2008, Les navires militaires du futur, présentation de DCNS, in : *Les mardis de la mer*, 16 décembre 2008, Institut français de la mer et Centre d'études de la mer de l'Institut catholique de Paris, Paris, France.
- ADIT, 2009b, *Fin de voyage pour un navire marchand équipé de systèmes photovoltaïques*, Agence pour la diffusion de l'information technologique, BE Japon 513, 11 septembre 2009, [http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/060/60439\\_vi.htm](http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/060/60439_vi.htm)
- Avellan, C., 2008, *Aménagement et gestion des ports : l'effort de R&D vers de nouvelles solutions disponibles*, Pôles de compétitivité mer Bretagne et mer PACA, 11 juin 2008, Brest, France.
- Barbaux, A., 2009, L'Ecoship divise par deux son empreinte carbone, *L'Usine Nouvelle*, N° 3152, 18 juin 2009, 58.
- Blosseville, T., & Remoué, A., 2008, Les bateaux virent au vert, *L'Usine Nouvelle*, N° 3111, 17 juillet 2008, 62-65.
- Boucher, J., Amacher, R., & Vionnet, S., 2007, *ECOPRAO : éco-conception pour la construction navale*, Usine21, 5 février 2007.
- Brynsrud, L., 2009, Green ship – Vessel performance. Cost efficient vessel operation, présentation de Kongsberg Gruppen ASA, in : *The Norway-Singapore Energy Conference : Sustainable Marine Transportation*, 19<sup>th</sup> March 2009, The St. Regis Singapore, Singapore.
- Cadoret, J.-P., & Bernard, O., 2008, La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis, *Journal de la Société de Biologie* 2002, 201-211.
- Callow, J. A., 2010, *Advanced Nanostructured Surfaces for the Control of Biofouling (AMBIO), Final activity report*, <http://www.ambio.bham.ac.uk/index.shtml>
- Calu, G., 2006, *Biodiesel et micro-algues*, 1<sup>er</sup> février 2006, [http://www.spectrosciences.com/print\\_article.php3?id\\_article=26](http://www.spectrosciences.com/print_article.php3?id_article=26)
- Castelnerac, P.-G., 2009a, *Un logiciel pour calculer l'impact environnemental des navires*, interview de Pierre-Georges Castelnerac par Guillaume Gomis à propos de SSD, La radio de la mer, <http://www.laradiodelamer.com>
- Castelnerac, P.-G., 2009b, *SSD, un logiciel pour calculer l'impact environnemental des navires*, interview de Pierre-Georges Castelnerac par Guillaume Gomis à propos de SSD, enregistrement audio, La radio de la mer, <http://www.laradiodelamer.com>
- Chang, K.-C., 2006, Evergreen – Creating a better life for the future, *Journal of Commerce Transpacific Maritime Conference*, March 6, 2006, Long Beach, CA, USA.
- Chauveau, L., 2011, Les bateaux se mettent au vert, *Sciences et Avenir*, N° 774, août 2011, 78-80.

Claudepierre, M., 2010, *Projet R&D Eonav : analyse du contexte réglementaire (tâche 1.1, livrable D01)*, document référence D01 indice A du 21 juin 2010, Bureau Veritas.

Cousquer, J., 2009, Pôle « Architectures et techniques des systèmes navals », présentation de la DGA, in : *Séminaire Etudes Amont DCNS*, Délégation générale pour l'armement, 22 janvier 2009, Hôtel Mercure Paris Suffren Tour Eiffel, Paris, France.

CSCN, 2008a, Pour une politique navale française en recherche et innovation - Le navire du futur, présentation de la Chambre syndicale des chantiers navals, in : *Les mardis de la mer*, 16 décembre 2008, Institut français de la mer & Centre d'études de la mer de l'Institut catholique de Paris, Paris, France.

CSCN, 2008b, *Le navire du futur : technologies* (fichier Microsoft® Excel), Chambre syndicale des chantiers navals.

DCN, 2006, *Ecoconception des navires. Vision DCN*, Direction des constructions navales, réunion entre la direction des constructions navales, l'état-major de la marine et la délégation générale pour l'armement, décembre 2006.

DCN, 2007a, *Réduction consommations énergétiques des navires*, Direction des constructions navales, réunion entre la direction des constructions navales, l'état-major des armées, l'état-major de la marine et la délégation générale pour l'armement, 29 mars 2007.

DCN, 2007b, *ISO 14001 Eco-conception*, Direction des constructions navales, réunion entre la direction des constructions navales, l'état-major des armées, l'état-major de la marine et la délégation générale pour l'armement, 29 mars 2007.

DCNS, 2007a, *L'éco-conception appliquée à un navire : concepts, méthodes et outils*, DCNS, juillet 2007.

DCNS, 2007b, *Les émissions de gaz du navire*, DCNS, juillet 2007.

DCNS, 2008a, *Principales innovations attendues dans le domaine naval, et enjeux associés*, DCNS (21 janvier 2008), incluant 12 fiches de propositions d'étude amont (les plus récentes sont datées de 2009).

DCNS, 2008b, *Ecoconception des navires*, présentation de DCNS, in : *Défense et environnement. 2<sup>e</sup> conférence : une nouvelle manière de penser*, 30 mai 2008, Institut des hautes études de défense nationale, Paris, France.  
([http://www.science-ethique.org/site\\_3bconseils/page.php?id=52](http://www.science-ethique.org/site_3bconseils/page.php?id=52))

DCNS, 2008c, *Ecoship*, DCNS, septembre 2008.

DCNS, 2009, *Projets Convenav, SDD, Déesse, POSE2IDON, et Nacre*, DCNS, réunion entre DCNS et la délégation générale pour l'armement, 7 janvier 2009.

DCNS, 2010, *Réunion d'avancement du projet NACRE*, DCNS, 2 avril 2010.

Deltamarin, 2006, *Green shipping world*, présentation de Deltamarin, Ltd., in : *Ship design workshop. Environmental issues to be considered*, October 3, 2006.

Desville, L., 2007a, *Eco-conception des navires militaires : définition d'un outil d'intégration de l'environnement dans les programmes d'armement navals*, thèse professionnelle, Institut supérieur d'ingénierie et de gestion de l'environnement, Mines Paris & Délégation générale pour l'armement, Paris, France, mars-septembre 2007.

- DGA, 2008, *Grille d'analyse du projet Nacre* (fichier Microsoft® Excel), Délégation générale pour l'armement.
- DGA, 2009a, *Grille d'analyse du projet Climat+* (fichier Microsoft® Excel), Délégation générale pour l'armement.
- DGA, 2009b, *Grille d'analyse du projet Invest* (fichier Microsoft® Excel), Délégation générale pour l'armement.
- DGA, 2010, *Grille d'analyse des projets de pôle – Projet MERITA* (fichier Microsoft® Excel), Direction générale de l'armement, 11 janvier 2010.
- DGE, 2006, *Les pôles de compétitivité en France*, Direction générale des entreprises, ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, septembre 2006.
- DIACT, 2009a, *La répartition officielle des territoires d'intervention des 71 pôles de compétitivité*, 12 janvier 2009, Direction interministérielle de l'aménagement et de la compétitivité des territoires, Ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi.
- DIACT, 2009b, *Carte des 71 pôles de compétitivité français*, juillet 2009, Direction interministérielle de l'aménagement et de la compétitivité des territoires, Ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi.
- Duguey, C., 2008, Peindre la coque sans polluer, *Sciences Ouest*, N° 256, juillet-août 2008.
- ECNI, 2009, *L'impact environnemental du nautisme. Une approche du cycle de vie pour une plaisance bleue*, seconde édition, juin 2009, Confédération européenne des industries nautiques (ECNI).
- Ecopaint, 2010, *Ecopaint PACA*, 31 mars 2010.
- Ecoship, 2001, *Ecoship. Container feeder ship*, Ecoship Engineering AB.
- Ecoship, 2006, *Ecoship. European projects*, Ecoship Engineering AB.
- Eefsen, T., 2008a, Green ship of the future, présentation du Danish Center for Maritime Technology (DCMT), in : *18<sup>th</sup> KIMO International Annual Conference*, 4<sup>th</sup> october 2008, Tønder, Denmark.
- Eefsen, T., 2008b, Green ship of the future, présentation du Danish Center for Maritime Technology (DCMT), in : *Blue Conference*, 4<sup>th</sup> december 2008, Frederikshavn, Denmark.
- Evergreen, 2009a, *Vessel particulars. Introducing Evergreen's special S-type series of green ships*, <http://www.evergreen-line.com>
- Evergreen, 2009b, *Creating a brighter tomorrow. New technology for shipbuilding*, <http://www.evergreen-line.com>
- Garcia, J., & Pierson, Y., 2009, *La démarche écoconception au sein de DCNS*, DCNS, réunion entre DCNS et la délégation générale pour l'armement, 7 janvier 2009.
- gCaptain, 2009, *Skysails – Plus – Top 10 green ship designs*, April 22, 2009, <http://gcaptain.com/maritime/blog/ocean-kites-top-10-green-ship-designs/>
- Guillot, D., & Cadoret, J.-P., 2008, Biodiesel. Les microalgues, carburant de demain ?, *Les nouvelles de l'Ifremer n° 98 publiées dans 'le marin' du 1<sup>er</sup> février 2008*.

- Anderson, K., 2008, Industry engagement reduces fuel and other stresses, *Marine Propulsion*, August/September 2008, 217-218.
- Henno, J., 2009, « Ecoship », le navire militaire qui défend la mer, *Les Echos*, 18 mars 2009, 11.
- He-ping, H., 2008, *The development trend of green ship building technology*, Guangzhou Shipyard International Company, Ltd., 13 december 2008.
- Huat, T. Y., 2009, Reducing environmental impact. NOL/APL point of view, présentation de APL Ltd., in : *The Norway-Singapore Energy Conference : Sustainable Marine Transportation*, 19<sup>th</sup> March 2009, The St. Regis Singapore, Singapore.
- INRIA, 2008, *Le projet Shamash*, Institut national de recherche en informatique et en automatique.
- INRIA, 2009, *Projet Shamash*, Institut national de recherche en informatique et en automatique.
- Kanerva, M., & Salama, H., 2004, *Elements for environmentally sustainable ship design*, Deltamarin, Ltd., April 28-29, 2004.
- Kyrtatos, N. P., Kleimola, M., & Marquard, R., 2007a, The HERCULES project: a major R&D effort for marine engines of high efficiency and low emissions, Abstract of the paper N° 31, in : *25<sup>th</sup> CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology*, Conseil international des machines à combustion, 21-24 May, 2007, Vienna, Austria.
- Kyrtatos, N. P., 2007b, An overview of phase I (2003-2007): the integrated project IP-Hercules, in : *Final Meeting & Forum*, 5/9/2007, Brussels, Belgium.
- Kyrtatos, N. P., 2009, *Wärtsilä and MAN Diesel gain EU approval for HERCULES-Beta project*, Press release, Wärtsilä Corporation, 1 April 2009.
- Leclercq, X., Pélerin, E., & Breux, E., 2009, *Ecorizon®. Dossier de presse*, STX Europe, 16 mars 2009.
- Lee, K. L., Ong, L. K., & Leow, K. S., 2004, *Making green ship a reality*, Institute of Marine Engineering, Science & Technology (IMarEST).
- Le Roy, 2009, Navire économe, propre, sûr et intelligent, présentation de DCNS, in : *Séminaire Etudes Amont DCNS*, Délégation générale pour l'armement, 22 janvier 2009, Hôtel Mercure Paris Suffren Tour Eiffel, Paris, France.
- Maeng, S. B., 2007, Samsung environmental package, présentation de Samsung Heavy Industries, in : *Asia-Pacific Green Ship Technology Conference*, October 16-17, 2007, Singapore.
- MAN, 2007, On reduction and in service measurements of PM from large 4-stroke Diesel engines, in : *11<sup>th</sup> ETH-Conference on combustion generated nanoparticles*, 12-15 August 2007, ETH-Zentrum, Zurich, Switzerland.
- Martin, C., 2010, *Antifouling Coatings for War Ships (ACWS)*, Poster présenté à : *15<sup>th</sup> International Congress on Marine Corrosion and Fouling (15<sup>th</sup> ICMCF)*, 25-29 July 2010, Newcastle University, United Kingdom.

Maru, 2008, *Navire super écologique motorisé électrique*, 19 mai 2008, <http://sciencelinks.jp/fr/content/view/549/258>

Matez, R., 2003, Programme et environnement : le concept de navire respectueux de l'environnement, *L'Armement*, N° 84, décembre 2003, 75-81.

Matez, R., 2008, *Projet NACRE – Note de présentation*, Délégation générale pour l'armement, 24 novembre 2008.

Matez, R., & Chapon, Y., 2010, *ECONAV – Journée thématique « Les bateaux du futur », 5 mars 2010*, compte rendu, Direction générale de l'armement.

McMullen, J. J., & Hamilton, B. A., 2002, *New technologies and alternative fuels. Working paper on alternative propulsion and fuel technologies review*, Prepared by John J. McMullen Associates, Inc. and Booz Allen Hamilton for Water Transit Authority, May 2, 2002.

Mer et Marine, 2008a, *Eco-conception : une nouvelle démarche dans la construction navale*, 29 octobre 2008, [http://www.meretmarine.com/article\\_imprimer.cfm?id=109119](http://www.meretmarine.com/article_imprimer.cfm?id=109119)

Mer et Marine, 2008b, *L'éco-conception : avenir de la construction navale ?*, 22 décembre 2008, <http://www.meretmarine.com/article.cfm?id=109119>

Mer et Marine, 2009, *MOL dévoile un nouveau concept de navire roulier*, 13 octobre 2009, <http://www.meretmarine.com/article.cfm?id=111370>

Meredith, P., 2009, *GEMINI: clean, lean and green: a new ferry for Bay*, <http://www.professionalmariner.com>

Methapu, 2007, *Validation of renewable methanol based auxiliary power system for commercial vessels*, 24 May 2007, <http://www.methapu.eu/Oskari2.aspx?cmd=1>

Millet, A., Larrieu, C., Colonna-d'Istria, D., & Marill, X., 2010, *Le Grenelle de la Mer : des engagements pour préparer l'avenir*, Document référence Dicom-CAB/BRO/09024, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, mai 2010.

Mirzaian, A. & Flury, G., 2009, POSE<sup>2</sup>IDON (Power Optimized Ship for Environment with <sup>2</sup>electric innovative Designs ON board) - Industrial interest and perspectives, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.

Mol, 2009, *MOL completes concept for series of new generation vessels. First announcement: ISHIN-I car carrier*, September 10, 2009, <http://www.mol.co.jp/pr-e/2009/e-pr-2780.html>

Moore, M., 2008, *Energy and emissions challenges. An operator's perspective*, Wallenius Wilhelmsen Logistics.

Motor Ship, 2007, Methanol as an alternative fuel, *The Motor Ship*, January 2007, 95.

Moutte, J.-P., 2009, *CLIMAT+.* « CLImatisation MArine Terrestre », Pôle de compétitivité EMC2, 28 avril 2009.

Nicholls, C., 2007, A Herculean task, *The Naval Architect – Marine Power and Propulsion Supplement 2007*, 3-10.

Nielsen, P., 2007, Clean and efficient power production and propulsion. What is the future?, présentation de Wallenius Marine AB, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.

NSF, & TE, 2005, *The Clean Ship. Towards an integrated approach of sustainable shipping*, The North Sea Foundation and European Federation for Transport & Environment.

NYK, 2008, *NYK-Nippon Oil joint project: using solar power for ship propulsion*, Press release, August 26, 2008.

O'Rourke, R., 2006, *Navy ship propulsion technologies: options for reducing oil use – Background for Congress*, updated December 11, 2006, order code RL33360, Congress Research Service Report for Congress.

Pallu de la Barrière, P., 2009, Le transport de passagers à propulsion électrique sans émission, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.

Pélaprat, P., 2008, DCNS met le cap sur des bateaux propres, *Industrie et Technologies*, N° 901, juin 2008, 74-75.

Pélerin, E., 2009a, *I.W.E.S.T. Integrated Waste to Energy Shipboard Technology*, 8<sup>e</sup> FUI, Pôle de compétitivité EMC2, 27 avril 2009.

Pélerin, E., 2009b, Le concept *EOSEAS* de STX France, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.

Pierson, Y., Bonnard, C., & Rolland, L., 2009, présentation de la démarche écoconception de DCNS, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.

PNR, 2009, *Parc naturel régional du golfe du Morbihan – Horizon 2021*, version 2.4 du 22 avril 2009, Syndicat intercommunal d'aménagement du golfe du Morbihan.

Poimboeuf, J.-M., Griot, A., et 38 co-auteurs, 2010, *Le Grenelle de la Mer. Groupe ad hoc Navire du futur*, groupe n° 12, rapport du 12 avril 2010.

Pôle mer Bretagne, 2007, *Fiches d'analyse et de synthèse du projet Nacre*, Pôle de compétitivité mer Bretagne.

Prinçaud, M., Cornier, A. & Froëlich, D., 2010, Developing a tool for environmental impact assessment and eco-design for ships, *Journal of Engineering for the Maritime Environment* 224(M3), 207-224.

Radojic, D., 2006, Innovations in shipbuilding, présentation de University of Belgrade & Danube Project Centre, in : *The 3<sup>rd</sup> Danube Summit*, 18-19 October 2006, Budapest, Hongrie.

Scholz, I., & Townsend, C., 2009, A vignette on efficient design and constructability, *Maritime Reporter & Engineering News*, May 2009, 28-30.

Schweighofer, J., 2009, Recent development activities in inland waterway transport, document de via donau, Guest lectures, *Kul-24.4110 Ship Project*, Spring 2009, April 16<sup>th</sup>, 2009.

Scott, R., 2010, Imagining the future frigate, *Janes's Navy International* 115(7), September 2010, 10-11.

- Segercrantz, H., 2009, Denmark goes greener, *The Naval Architect*, N° 4, 21-22.
- Simon, L., & Tincelin, T., 2008, *SSD. L'éco-conception, avenir de la construction navale ?*, communiqué de presse, 24 novembre 2008.
- Siuru, B., 2007, Greener ships o the horizon, *Diesel & Gas Turbine Worldwide*, September 2007, 59-63.
- STX Europe, 2009, *STX Europe présente EOSEAS : réinventer la croisière*, film d'animation, STX Europe.
- STX France, 2009, *Présentation Ecorizon® à la DGA*, STX France Croisière SA, 10 septembre 2009.
- Therene, D., & Mange, E., 2009, Projet NACRE, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.
- Thomas, I., & Jaglin, J.-L., 2006, *CYCLEAUX-1. Réutilisation des eaux usées à usages sanitaire et technique : application aux eaux grises dans le bâtiment et aux eaux usées dans les navires*, Pôle de compétitivité EMC2, 12 mai 2006.
- Thomas, T., 2010, Le nautisme rochelais passe au vert, carbone, *L'Usine Nouvelle*, N° 3196, 10 juin 2010, 43-45.
- Ulstein, T., 2009, Ulsteins contribution to sustainable marine operation and transportation, présentation d'Ulstein Group, in : *The Norway-Singapore Energy Conference : Sustainable Marine Transportation*, 19<sup>th</sup> march 2009, The St. Regis Singapore, Singapore.
- van Heerd, J., 1998, INBISHIP common European inland vessel concept, *MARIN Report*, Nb. 65, December 1998, 6-7.
- Wärtsilä, 2009, *Methapu*, Wärtsilä Corporation.
- WWF, 2005, Global green shipping initiatives: audit and overview, Document IGS 05/3/ (18 february 2005) du World Wide Found (WWF), *North Sea Ministerial Meeting on Environmental Impacts of Shipping and Fisheries*, Issue Group on Sustainable Shipping, 1-2 march 2005, Hamburg, Allemagne.

# Partie 2

## *Fonctions du bord, technologies innovantes*

« Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir. »

Jules Verne



## Une maîtrise indispensable de la consommation d'énergie

Un navire respectueux de l'environnement se caractérise par son impact réduit sur le milieu dans lequel il évolue. Or, le fonctionnement d'un bateau génère des flux d'entrée (ressources) et de sortie (émissions), traceurs de sa nuisance sur le milieu (§ 2.3.1). Le contrôle de ces flux permet de diminuer la signature polluante du navire. Utiliser les ressources strictement nécessaires, d'une part, limiter les émissions et récupérer les pertes énergétiques, d'autre part, conduit à la maîtrise de la consommation d'énergie du bateau : un navire « propre » doit également être « économe ».

Pour assurer sa marche, un navire est généralement équipé de moteurs thermiques qui consomment une quantité importante de carburant, source de rejets atmosphériques. Pour le transport maritime, secteur en croissance, près de 50000 bateaux sillonnent annuellement les mers. Même si ce mode de transport reste particulièrement économe et faible émetteur de CO<sub>2</sub> et de particules fines de matière, les rejets de NO<sub>x</sub> et SO<sub>x</sub> sont relativement importants et devraient augmenter de 3 à 4 % par an durant les dix prochaines années (Chapuy 2009 ; Minguet 2009)<sup>95</sup>.

Avec la diminution des ressources pétrolières<sup>96</sup> et leur coût élevé, la réduction de la consommation de carburant vise à la fois un objectif environnemental – réduire les émissions de polluants atmosphériques, contraintes par les législations – et économique – diminuer la facture énergétique du navire. Minguet (2009) pense toutefois que les combustibles actuels ne pourront être remplacés qu'à long terme, et Gätjens (2007a,b) estime que le moteur diesel restera le principal mode de production d'énergie à bord des navires, au moins pendant les vingt prochaines années.

Le tableau 5 résume les taux d'émissions de SO<sub>x</sub> permis par l'annexe VI de la convention MARPOL 73/78, par la directive 2005/33/EC de l'Union européenne et par les Etats-Unis (voir également § 1.2).

<sup>95</sup> Les navires marchands sont responsables d'environ 75 % des émissions d'oxydes de soufre et de 3 % des émissions de CO<sub>2</sub>. (Voir, par exemple : Politicians to act on emissions if green initiatives stall, *mer*, April 2008, 40-42.)

<sup>96</sup> L'état réel des réserves pétrolières reste controversé, mais elles semblent de quelques dizaines d'années au rythme actuel de production (par exemple, Bento 2010). Favennec (2011) et Paillard (2011) livrent leurs analyses sur les défis énergétiques à venir.

**Tableau 5.** Taux de SO<sub>x</sub> maximal autorisé dans le fioul selon les zones maritimes et les législations\*.

*Table 5. Maximum SO<sub>x</sub> rate authorized in fuel oils for various maritime areas and legislations\*.*

(D'après / From : *Low sulphur guidelines*, Wärtsilä Corporation, 9 January 2006 ;

Levander 2008 ; Minguet 2009 ; Claudepierre 2010.)

Echéance	Type de navires	Zones	Taux de SO <sub>x</sub> émis autorisé (%)	Législation
19 mai 2006	Tous	SECA (Baltique)	1,5	MARPOL
11 août 2006	Tous	SECA (Baltique)	1,5	UE
11 août 2006	Navires de passagers	Toute l'UE	1,5	UE
11 août 2007	Tous	SECA (Mer du Nord et Manche britannique)	1,5	UE
22 novembre 2007	Tous	SECA (Mer du Nord et Manche britannique)	1,5	MARPOL
1 <sup>er</sup> janvier 2010	Tous	Tous les ports de l'UE et la côte ouest des Etats-Unis	0,1	UE et Etats-Unis
1 <sup>er</sup> janvier 2010	Navires fluviaux	Toutes voies fluviales de l'UE	0,1	UE
1 <sup>er</sup> mars 2010	Tous	SECA	1,0	MARPOL
1 <sup>er</sup> janvier 2012	16 ferries grecs	Ports grecs	0,1	UE
2012	Navires à moins de 24 milles marins des côtes		0,1	Etat-Unis (Californie)
1 <sup>er</sup> janvier 2015	Tous	SECA	0,1	MARPOL

\* : SECA : SO<sub>x</sub> Emissions Control Area ; UE : Union européenne

Des axes de maîtrise et de réduction de la consommation énergétique des navires ont été proposés par de nombreux auteurs (par exemple Saint-M'leux 2006 ; Eskola 2008 ; Le Roy 2009 ; Minguet 2009). Trois étapes du cycle de vie du bateau sont particulièrement visées : la conception, l'utilisation et la maintenance.

La forme du navire et son système de propulsion seront particulièrement étudiés durant la phase de conception pour assurer :

- l'optimisation du profil hydrodynamique du bateau ;
- l'amélioration des performances de la ligne et du système propulsif ;
- l'allègement du navire ;
- l'emploi de nouvelles sources d'énergie ;
- une motorisation diesel aux performances améliorées, ou une motorisation hybride ou tout électrique ; des turbocompresseurs à géométrie variable ;

- la récupération d'énergie thermique (moteurs à cycle récupérateur, récupération d'énergie perdue au profit de fonctions spécifiques) ;
- la réutilisation des eaux usées (grises, noires, de réfrigération)...

En service, l'optimisation du profil opérationnel sera essentielle et s'appuiera sur :

- le routage météorologique ;
- l'optimisation de l'assiette du navire pour atteindre une vitesse économique ;
- le suivi en continu et en temps réel des performances en service (et des consommations associées)...

Les opérations de maintien en condition opérationnelle veilleront à améliorer les interactions entre la coque et l'eau par :

- un brossage de la coque et l'application d'un revêtement antisalissures ;
- un polissage de l'hélice...

Ces exemples restent des indications et ne constituent pas une liste exhaustive des paramètres influant la réduction de la consommation énergétique.

Le tableau 6 donne quelques ordres de grandeur de la réduction de consommation de carburant attendue selon la méthode considérée.

**Tableau 6.** Réduction potentielle de consommation de carburant en fonction de la méthode utilisée.  
*Table 6. Possible cut in fuel consumption for various implemented methods* (Lehmann 2007a,b).

Méthode	Navires neufs	Navires existants
Vitesse réduite	10 %	10 %
Route optimisée	10 %	10 %
Motorisation principale avancée	5-10 %	-
Profil du navire efficient	5-10 %	-
Système propulsif optimisé	2-8 %	2-5 %
Gouvernail efficient	2-8 %	2-5 %

Aux Etats-Unis, la stratégie de l'US Navy pour limiter sa dépendance aux hydrocarbures repose sur quatre principes (O'Rourke 2006) :

- la réduction de la consommation énergétique des navires (utilisation, par exemple, de bulbes d'étrave, de volets arrière, de récupérateurs thermiques, de propulseurs électriques intégrés, de piles à combustibles...);
- l'utilisation de combustibles alternatifs, en particulier biodiesels et fuels synthétiques (diesel de Fischer-Tropsch); l'US Navy s'est récemment fixée un objectif volontariste d'emploi de sources énergétiques alternatives de 17 % actuellement à 50 % en 2020 (Jean 2010);
- l'installation de chaufferies nucléaires à bord des navires amphibies d'assaut et des grands destroyers<sup>97</sup>;
- la mise en œuvre, sur des navires auxiliaires ou d'évacuation par la mer, de voiles et de panneaux solaires.

Dans le domaine des énergies alternatives, le Naval Research Laboratory de l'US Navy explore également diverses voies évoquées par Freeman (2009) :

- production de fuel synthétique produit directement à partir de l'eau de mer (conversion catalytique de l'hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau);
- utilisation de la chaleur des eaux tropicales pour vaporiser du propylène liquide destiné à alimenter des turbines;
- réalisation de panneaux photovoltaïques flexibles et étude d'un revêtement photovoltaïque;
- utilisation de l'énergie électrique produite par des micro-organismes pour alimenter des micro-senseurs;
- développement de piles à combustible; extraction d'hydrates de méthane des fonds marins.

Le tableau 7 (voir aussi § 7.4) rassemble quelques valeurs de réduction attendue des émissions de CO<sub>2</sub>.

---

<sup>97</sup> Cette solution est jugée pertinente pour des prix du baril de pétrole atteignant respectivement \$70 pour les navires amphibies d'assaut et \$178 pour les grands destroyers.

**Tableau 7.** Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction de la technologie mise en œuvre.  
**Table 7.** Possible cut in CO<sub>2</sub> emissions for various implemented (Sharma & Pal 2006 ; Eefsen 2008a,b).

Méthode	Réduction des émissions de CO <sub>2</sub>
Récupération de chaleur (WHR)	~20 %
Circulation d'air sous la coque	~15 %
Amélioration des performances des moteurs	~3 %
Optimisation du circuit de refroidissement	~1,5 %
Optimisation des pompes et des circuits auxiliaires	~1 %

## Références

- Bento, N., 2010, *La transition vers une économie de l'hydrogène : infrastructures et changement technique*, thèse de doctorat, Université de Grenoble, Grenoble, France, 12 mars 2010.
- Chapuy, J.-F., 2009, Exhaust gas emission control today and tomorrow – Application on MAN B&W two-stroke marine diesel engines, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.
- Claudepierre, M., 2010, *Projet R&D Eonav : analyse du contexte réglementaire (tâche 1.1, livrable D01)*, document référence D01 indice A du 21 juin 2010, Bureau Veritas.
- Eefsen, T., 2008a, Green ship of the future, présentation du Danish Center for Maritime Technology (DCMT), in : *18<sup>th</sup> KIMO International Annual Conference*, 4<sup>th</sup> october 2008, Tønder, Denmark.
- Eefsen, T., 2008b, Green ship of the future, présentation du Danish Center for Maritime Technology (DCMT), in : *Blue Conference*, 4<sup>th</sup> december 2008, Frederikshavn, Denmark.
- Eskola, J., 2008, The business environment: emissions, energy cost, competent crew, in : *European Cruise Industry Conference*, 25-26<sup>th</sup> February, 2008, Brussels, Belgium.
- Favenec, J.-P., 2011, Le « peak oil », menace ou phantasme des mondes de l'énergie ?, *Sécurité globale*, N° 15, printemps 2011, 41-48.
- Freeman, B., 2009, *Naval Research Lab looks to sea, sun for energy solutions*, Story number NNS091016-28, October 16, 2009.
- Gätjens, H. J., 2007a, Prime mover-Are there alternatives to the diesel engine?, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Gätjens, H. J., 2007b, Prime mover/Are there alternatives to the diesel engine?, présentation du Bureau Veritas, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Jean, G. V., 2010, *National DEFENSE XCIV(677)*, April 2010, 36-37.

Lehmann, D., 2007a, Improved propulsion with tuned rudder systems, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.

Lehmann, D., 2007b, Improved propulsion with tuned rudder systems, présentation de Becker marine systems, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.

Le Roy, 2009, Navire économe, propre, sûr et intelligent, présentation de DCNS, in : *Séminaire Etudes Amont DCNS*, Délégation générale pour l'armement, 22 janvier 2009, Hôtel Mercure Paris Suffren Tour Eiffel, Paris, France.

Levander, O., 2008, Alternative fuels for ships, présentation de Wärtsila, in : *Hållbara Transporter 2008*, October 14, 2008, Stockholm, Sweden.

Minguet, B., 2009, Enjeux sur les combustibles marins, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.

O'Rourke, R., 2006, *Navy ship propulsion technologies: options for reducing oil use – Background for Congress*, updated December 11, 2006, order code RL33360, Congress Research Service Report for Congress.

Paillard, C.-A., 2011, Défis énergétiques et enjeux stratégiques au XXI<sup>e</sup> siècle, *Sécurité globale*, N° 15, printemps 2011, 49-60.

Saint-M'leux, R.-P., 2006, Prospective dans les transports – Domaine maritime civil, présentation d'Aker Yards SA, in : *Les nouvelles énergies pour la défense*, 14 novembre 2006, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.

Sharma, P., & Pal, B. K., 2006, Reduced NO<sub>x</sub> and smoke emission, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.

## Motorisation, propulsion, puissance, hydrodynamique

Face aux exigences de réduction de l'impact de ses activités sur l'environnement, l'industrie maritime doit s'adapter pour répondre à la réglementation et maîtriser sa dépense énergétique. Les armateurs et concepteurs cherchent à améliorer les équipements existants sur les navires en service et étudient des voies innovantes pour les futurs navires. Ce chapitre traite de quelques aspects de la motorisation, du système propulsif et de l'hydrodynamique du navire ; le navire tout électrique est également abordé.

### 5.1 Moteurs diesel avancés

L'amélioration des performances des moteurs diesel est l'une des approches principales pour limiter la consommation de carburant et les émissions atmosphériques polluantes (§§ 4 et 7.4). Le tableau 8 donne des ordres de grandeur du rendement de quelques types de moteurs pour applications navales, alors que Kolle & Lien (2001) ont décrit l'influence du régime de combustion sur la consommation de fuel et les émissions des moteurs.

**Tableau 8.** Ordres de grandeur du rendement thermique de moteurs pour des applications navales.

Pour un type de moteur, le rendement varie selon sa taille, sa vitesse, le couple délivré, etc.

**Table 8.** *Magnitudes of the thermal efficiency of naval engines. For a given engine, efficiency depends on its size, its speed, the output torque, etc.* (Altmann et al. 2004 ; Wahlström et al. 2006 ; Gätjens 2007a ; Meslin & Baranger 2009).

Type de moteur	Rendement (%)
Diesel basse vitesse (60-250 tours par minute)	48-54
Diesel moyenne vitesse (250-1000 tours par minute)	43-50
Diesel haute vitesse (1000 tours par minute)	40-43
Turbine à gaz (10 MW)	32-39
Turbine à vapeur	30-37
Moteur gaz-diesel, moyenne vitesse	43-50
Turbine gaz-vapeur	40-47
Moteur à gaz (cycle d'Otto), moyenne vitesse	~46
Moteur à gaz (cycle d'Otto), haute vitesse	37-40
Hydrogène-pile à combustible (MCFC, SOFC, PEMFC)	~50

Dans le cadre des projets européens Green Ship of the Future (§ 3.2) et IP-Hercules (voir aussi §§ 3.2 et 7.4), deux principaux fabricants de moteurs marine – Wärtsilä et MAN Diesel – étudient et testent les moteurs de future génération. Les efforts des motoristes portent notamment sur (MAN 2007 ; Eefsen 2008a,b)<sup>98, 99</sup> :

- l'optimisation des éléments du moteur (chambres de combustion, pistons, valves électro-hydrauliques...) pour assurer une meilleure combustion (Herranen et al. 2007 ; Herrmann et al. 2007 ; Kallio et al. 2007) ;
- un contrôle et une gestion électronique du système d'injection de gasoil ou de lubrification des cylindres<sup>100</sup> ;
- une nouvelle conception des pompes et systèmes auxiliaires – intégrant le suivi continu de la puissance nécessaire – et du circuit de refroidissement ;
- des turbocompresseurs à vitesse variable, des turbochargeurs (Codan & Mathey 2007 ; Wik & Hallback 2007<sup>101</sup>) ;
- le couplage de machines individuelles (moteur diesel, turbine à gaz<sup>102</sup>, turbocompresseur...) pour atteindre un rendement supérieur à celui du système complet ;
- la diminution du frottement des éléments en contact ;
- des gasoils modifiés ou alternatifs ;
- le captage et le filtrage des émissions (§ 7.4).

Le tableau 9 rassemble les principales modifications apportées par quelques fabricants sur leurs moteurs de navires.

---

<sup>98</sup> Voir aussi : Major R&D project will mould next generation engines, *Marine Propulsion*, October/November 2007, 39-42. Dans ce contexte, il faut également noter la création récente du DC Ecotech, un nouveau centre de recherche de Wärtsilä pour le développement de produits « verts » (Improving the environment, *mer*, April 2009, 14-15). Wärtsilä participe également au projet Suédois EffShip sur la réduction des émissions atmosphériques des navires (§ 7.4).

<sup>99</sup> DGCIS (2011, p. 206-207) donne un aperçu général des principaux développements en cours ou à venir pour l'amélioration des moteurs à combustion interne.

<sup>100</sup> La gamme de moteurs deux temps RT-flex de Wärtsilä est ainsi équipée d'une rampe d'injection commune, qui assure au gasoil une pression constante (Aeberli & McMillan 2002 ; Paro 2005 ; Schmid & Weisser 2005 ; Schmid 2007a,b ; Bui 2009 ; voir également : Derating for higher economy and lower emissions, *Marine Propulsion*, August/September 2008, 279-284). Quant aux travaux réalisés par MAN Diesel SE, ils sont décrits par Tinschmann et al. (2007).

<sup>101</sup> Un turbochargeur, développé par ABB, est décrit dans : CIMAC circle talks emissions, *mer*, November 2008, 34-35.

<sup>102</sup> Un moteur deux temps MAN Diesel a, par exemple, été associé à un turbocompresseur pour exploiter la chaleur des gaz d'échappement (VTA technology shows fuel savings, *mer*, November 2008, 26-27).

**Tableau 9.** Principales modifications des moteurs proposées par des industriels en vue d'applications navales.  
*Table 9.* Main changes of engines proposed by companies for naval applications (Wahlström et al. 2006).

Industriel	Modifications sur le moteur
Wärtsilä	Retardement de l'injection Cycle de Miller Augmentation du taux de compression Augmentation du rendement du turbochargeur Augmentation de la pression maximale dans les cylindres Rampe d'injection commune
MAN B&W	Augmentation de l'intensité et variation de l'injection de gasoil Augmentation du taux de compression Cycle de Miller Rampe d'injection commune Système de contrôle électronique de la lubrification
Caterpillar	Augmentation du taux de compression Augmentation de la pression dans les cylindres Augmentation de la pression de l'air d'admission Ajustement de l'injection du gasoil
FMC	Injection double étages Cycle de Miller Augmentation du rapport course-alésage Ajustement de la compression Turbochargeur double étages Basse température d'admission
Yanmar	Retardement de l'injection Réduction du temps de combustion Augmentation du taux de compression Augmentation de la pression d'admission Réduction de la taille des gicleurs Augmentation du nombre de gicleurs

La composition du fuel influe sur la quantité et la composition chimique des rejets polluants des moteurs de type marine, justifiant l'étude et la mise au point de fuels à basse teneur en soufre<sup>103</sup>. Cependant, les fuels faiblement soufrés doivent être associés à un lubrifiant pour éviter une usure

<sup>103</sup> Voir, par exemple : *Operation on low-sulphur fuels two-stroke engines*, MAN B&W Diesel A/S ; *Operating on low sulphur fuel. Keeping vessels operating effectively in the light of IMO's MARPOL Annex VI, DIESELFACTS*, N° 3, 12-13 (2005) ; *Low sulphur guidelines*, Wärtsilä Corporation, 9<sup>th</sup> January 2006. D'autre part, la société japonaise Nippon Oil Corporation (NOC) propose un ensemble de carburants et lubrifiants « propres » (NOC 2009 ; cf. aussi § 6.1.2).

prématurée des pièces des moteurs en contact, notamment les cylindres et pistons (Kaminis 2007a,b ; Spivey 2007)<sup>104</sup>. Kaminis (2007b) a montré par ailleurs que l'adjonction d'un système de purification des fumées (§ 7.4) dans le circuit de production d'énergie avait un effet bénéfique sur la lubrification des éléments du moteur. Enfin, des distillats de fuel à faible taux de soufre sont disponibles ; toutefois, Kaminis (2007a) fait remarquer qu'ils sont sources d'importants rejets de CO<sub>2</sub>.

Des fuels avec additifs (par exemple cétane ou additifs métalliques) assurent une meilleure combustion et une diminution des fumées noires, une prévention contre les frottements et les dépôts, et, finalement, une durée de vie prolongée des moteurs. L'Infineum F7450, par exemple, est un additif de la société britannique Chevron Fuel & Marine Marketing (FAMM) ; il complète le gasoil qui alimente une paire de moteurs MTU du porte-conteneurs *Deseo* reliant les pays du Bénélux. L'Octamar est un autre additif, fabriqué par Innospec (Spivey 2007).

L'élimination des fumées d'huile de carter moteur est obtenue par deux méthodes principales, la filtration ou – plus efficace et rentable – la séparation centrifuge. Le système par centrifugation Alfa Laval Alfdex (séparation centrifuge) a ainsi été proposé par Esplin & Svensson (2006)<sup>105</sup>.

## 5.2 Récupérateurs d'énergie thermique

L'énergie perdue à l'échappement des moteurs thermiques peut être récupérée pour produire de la vapeur destinée à chauffer des espaces de vie, alimenter une turbine à gaz génératrice d'électricité ou encore contribuer au cycle thermodynamique des systèmes auxiliaires de réfrigération (Buckingham 2009b). La réduction des émissions en NO<sub>x</sub> et CO<sub>2</sub> peut atteindre respectivement jusqu'à environ 10 % et 20 %. La récupération des gaz chauds contribue également à diminuer la température des émissions et à réduire la signature infrarouge du navire, ce qui présente un avantage pour les bâtiments militaires.

Le schéma de principe d'une installation de récupération de chaleur est donné par Schmidt & Weisser (2005). Un récupérateur de chaleur, optimisé pour des moteurs à deux temps, a été mis au point par MAN Diesel<sup>106</sup>. Clayton Industries<sup>107</sup> propose aussi des unités récupératrices de gaz chauds pour l'industrie navale.

Le paquebot *Queen Mary 2*, par exemple, est déjà largement équipé de récupérateurs de chaleur. La turbine à gaz WR-21 de Rolls-Royce, associée à un refroidisseur de Honeywell et à un récupérateur de chaleur d'Ingersoll Rand Energy Systems (IRES), constitue le système intégré de propulsion électrique sélectionné pour les destroyers britanniques de type T45 (Colin 2003 ; Filliau 2003).

---

<sup>104</sup> Ce n'est pourtant pas l'avis de Wahlström et al. (2006) qui estiment que la qualité supérieure des gasoils à basse teneur en soufre génère moins de frottement entre les éléments mécaniques et limite le besoin de lubrification.

<sup>105</sup> Voir aussi : Time to curb pollution from crankcase gas, *Marine Propulsion*, August/September 2008, 26-27 ; The unseen emission – revealed as a threat, *mer*, September 2008, 40-42.

<sup>106</sup> Reduce fuel consumption and CO<sub>2</sub>. Utilise waste heat and save costs with the thermo efficiency system (TES), *Dieselfacts* 3, 1-2 (2005).

<sup>107</sup> <http://www.claytonindustries.com/index.jsp>

## 5.3 Moteurs de type isoengine

Le principe de fonctionnement d'un moteur de type *isoengine* est basé sur la compression quasi-isotherme de l'air et la combustion isobare du mélange air-carburant dans des cylindres séparés des cylindres qui délivrent la puissance (Coney et al. 2004). Cette technologie, développée depuis 1992 par RWE Innogy Plc, présente plusieurs avantages, notamment de faibles taux d'émissions de CO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>, un rendement thermique et électrique supérieur aux moteurs thermiques conventionnels et la possibilité d'utiliser divers types de carburants (par exemple gaz naturel, distillats d'hydrocarbures, biocarburants gazeux). Encore au stade de développement, Buckingham (2009b) estime que des navires militaires ne pourront être équipés de tels moteurs que vers 2024.

## 5.4 Moteurs hydrojets

Les moteurs hydrojets assurent rapidité et facilité de manœuvre, performances indispensables aux ravitailleurs de plateformes pétrolières offshore ou à des navires de transport de passagers, par exemple. Les moteurs hydrojets de la société américaine Cummins – conformes aux directives américaines, européennes et de l'OMI sur les émissions atmosphériques polluantes – sont populaires aux Etats-Unis et en Asie ; la division stratégie de la marine de Singapour a ainsi équipé un navire de 40 m de long de moteurs Cummins<sup>108</sup>. Des remorqueurs du programme Improved Navy Lighterage System (INLS) de l'US Navy sont équipés de moteurs hydrojets Wärtsilä (Boardman et al. 2005). Les sociétés Rolls-Royce et Voith proposent également des moteurs hydrojets<sup>109</sup>, et OCOR Corporation a fait breveter un rotor contra-rotatif, solution moins polluante pour moteurs hydrojet<sup>110</sup>.

## 5.5 Propulsion par pods

Les pods sont des propulseurs azimutaux animés par un moteur électrique situé sous la ligne de flottaison<sup>111</sup>. Ils présentent plusieurs avantages, notamment une amélioration de la manœuvrabilité du navire grâce à leur rotation azimutale, un faible encombrement, un positionnement aisé sur la coque, un lien direct avec la source de puissance, sans ligne d'arbre intermédiaire (Bui 2009 ; Cordier & Morand 2009 ; Gaudin & Julliard 2009). Des navires civils comme des ferries sont équipés de pods.

Deux systèmes de pods particuliers doivent être signalés (Buckingham 2009b) : les pods contra-rotatifs et les pods *rim driven* (Buckingham 2009b ; Semail 2009).

- Dans un système de propulseurs contra-rotatifs, le second pod est monté dans l'axe et en aval du premier pod, et les hélices des deux pods tournent en sens contraire ; le second pod récupère ainsi l'énergie de rotation du vortex généré par le premier pod. Des couples de contra-pods Azipod<sup>®</sup> d'ABB Drives sont décrits par Turtiainen (2005). D'autre part, Wärtsilä a conclu un

---

<sup>108</sup> Clean and compact power for fast offshore deliveries, *Marine Propulsion*, August/September 2008, 213.

<sup>109</sup> Voith (2008) et : *Propulsion. Moving your business in the right direction*, Rolls-Royce.

<sup>110</sup> Waterjet propulsion with a twist, *Marine News*, May 2009, 8.

<sup>111</sup> Schwandt, R., *Azimuthing thrusters for 'GREEN' full electric vessels*, Schottel GmbH.

accord industriel avec IHI Marine United Inc. (IHIMU) pour intégrer les propulseurs contra-rotatifs de IHIMU dans ses solutions électro-diesel<sup>112</sup>.

- Un pod *rim driven* est tel que le carénage du propulseur accueille à la fois le stator et le rotor du moteur, le rotor étant constitué par l'hélice, dont les extrémités des aubes sont pourvues d'aimants permanents ; le vortex qui sert à la propulsion est canalisé et traverse le propulseur par le centre. Les pods *rim driven* sont des propulseurs récents qui présentent plusieurs avantages sur les moteurs hydrojets (§ 5.4), par exemple leur capacité à délivrer un couple de rotation élevé, la fixation des aubes du rotor au carénage du propulseur, la position azimutale possible ou encore la faible cavitation résiduelle. En revanche, l'immersion du moteur est un inconvénient. Plusieurs pods *rim driven* sont disponibles sur le marché, par exemple Olympic Octopus de Rolls-Royce (Wheater 2008a), EPS de Van der Velden Marine Systems (Van der Velden 2009), le propulseur tunnel de Brunvoll (Brunvoll 2009), Rimjet de General Dynamics Electric Boat<sup>113</sup>.

Comme les pods sont situés à l'extérieur du navire, leurs vibrations se propagent essentiellement dans le milieu marin ; la signature des navires civils et militaires (type BPC ; cf. § 5.8.3) munis de pods est connue et peu satisfaisante vis-à-vis des critères de discrétion acoustique des navires militaires. D'autre part, les pods sont particulièrement vulnérables en cas de choc. Aussi les applications militaires sont-elles encore limitées. Deux bâtiments de projection et de commandement (BPC) français ont été les premiers navires de guerre à utiliser une propulsion par pods<sup>114</sup> (§ 5.8.3). Aux Etats-Unis, le démonstrateur *Sea Jet* de navire électrique militaire de l'Office of Naval Research (ONR) est propulsé par des pods Rimjet de General Dynamics Electric Boat (Rosamond 2008)<sup>115</sup>. La Royal Navy britannique reste prudente et a décidé de ne pas généraliser l'adoption des pods sur l'ensemble de ses navires (Hamson et al. 2006)<sup>116</sup>.

## 5.6 Systèmes intégrés de puissance

### 5.6.1 Stockage stationnaire d'énergie électrique : généralités

Avec la diminution des énergies fossiles et les réglementations sur l'environnement, mais aussi pour sa souplesse d'utilisation, l'énergie électrique prend une place croissante dans de nombreuses applications ; dans le secteur naval, le concept de navire « tout électrique » – pour lequel un système électrique est capable de pourvoir en énergie à la fois les moyens de propulsion, les systèmes d'arme et les équipements pour la vie du bord – connaît un regain d'intérêt depuis quelques années (cf. § 5.8).

Les diverses technologies de stockage stationnaire d'électricité font appel à des processus et phénomènes basés sur la mécanique, l'hydraulique, la thermique, l'électrochimie... Elles se distinguent (figure 7) selon la capacité de stockage des systèmes (Brunet et al. 2010a,b ; Odru 2010 ; DGCIS 2011).

---

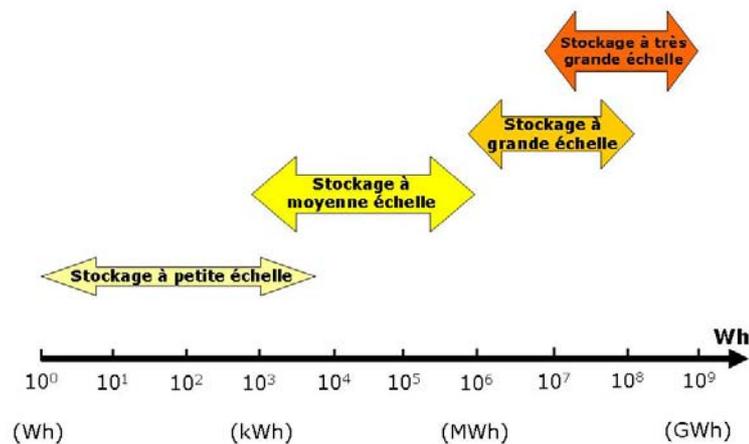
<sup>112</sup> Wärtsilä cooperates, *The Naval Architect*, April 2009, 14.

<sup>113</sup> <http://www.gdeb.com>

<sup>114</sup> Il s'agit de pods de technologie civile ; il n'y a pas eu, en France, de développement spécifique pour des pods militaires.

<sup>115</sup> Voir aussi : Employees are recognized for RimJet contributions, *Electric Boat News*, July 2008, 7.

<sup>116</sup> Le ministère de la défense britannique prévoit des propulseurs pods *rim driven* pour son concept 22CF (22<sup>nd</sup> Century Frigate) de navire du futur (Scott 2010).



**Figure 7.** Ordres de grandeur de la capacité des systèmes de stockage stationnaire d'électricité. Le stockage électrique à très grande échelle regroupe les stations de transfert d'énergie par pompage ou par compression d'air ; le stockage à grande échelle comprend les accumulateurs électrochimiques au plomb et au nickel-cadmium, l'électrochimie à circulation, le stockage de chaleur à haute température avec réfractaire et turbine ; les stockages à moyenne et petite échelles rassemblent les supercondensateurs, les accumulateurs électrochimiques (Pb-acide, Li-métal-air, Na-S...), les volants d'inertie, l'air comprimé (bouteilles), les piles à combustible, les supraconducteurs.

**Figure 7.** Capacity magnitudes of electrical stationary storage systems. Energy transfer stations by pumps or compressed air rely on very large scale electrical storage; large scale storage includes among others Pb and Ni-Cd electrochemical accumulators, heat storage using refractories and turbines; medium and low scale storage gathers the supercapacitors, electrochemical (Pb-acid, Li-metal-air, Na-S...) accumulators, inertial wheels, compressed air, fuel cells, superconductors. (D'après / From DGCIS 2011.)

Un système de fourniture d'énergie est d'autant plus efficient que son énergie spécifique ( $\text{Wh kg}^{-1}$ ) et sa puissance spécifique ( $\text{W kg}^{-1}$ ) sont élevées (Searle & Broussely 2003). Ainsi, par exemple, les supercondensateurs ne stockent qu'une faible quantité d'énergie mais sont capables de la délivrer en un temps très bref, générant une puissance très élevée<sup>117</sup>.

Pour répondre à divers besoins tels que le secours et la sécurité de fonctionnement, la régulation de charges, l'amélioration de la qualité de tension, l'apport en énergie doit être essentiellement de trois types (Amiet 2003)<sup>118</sup> :

- continu ou de longue durée (plusieurs heures, plusieurs jours et plus) ; il peut être assuré, par exemple, par des piles à combustible ou des systèmes électro-diesel ;
- transitoire (quelques minutes à quelques heures) ; les piles et accumulateurs électrochimiques, les condensateurs, les alternateurs inertiels répondent à cette fonction ;

<sup>117</sup> Sur l'emploi de supercondensateurs, voir § 5.8.1 l'exemple de la navette (catamaran) électrique commandée par Cap l'Orient à STX France.

<sup>118</sup> Il convient toutefois de noter que, pour un électricien, quelques secondes sont considérées comme un régime « continu », et un régime « transitoire » ne dépasse pas l'heure.

- impulsif (quelques nanosecondes à quelques secondes) ; les supercondensateurs, les bobines supraconductrices peuvent satisfaire cette exigence.

Le tableau 10 donne les capacités de stockage et les temps de réponse (à la décharge) caractéristiques de quelques technologies ; il s'agit seulement d'ordres de grandeur indicatifs.

**Tableau 10.** Ordres de grandeur de la capacité de stockage et du temps de réponse (décharge) de quelques technologies de stockage stationnaire de l'énergie électrique.

*Table 10. Magnitudes of the storage capacity and response time (discharge) of some electrical stationary storage technologies (Benchrifa et al. 2007).*

Technologie	Capacité de stockage	Temps de réponse caractéristique
Pile à combustible (hydrogène liquide ; 23 K)	$\sim 10^2$ MWh- $10^2$ GWh	$\sim 10^2$ s
Pile à combustible (hydrogène comprimé ; 200-350 bars)	$\sim 10^2$ MWh- $10^2$ GWh	$\sim 10^1$ s
Volant d'inertie	$\sim 10^0$ - $10^1$ kWh	$\sim 10^0$ - $10^1$ s
Batterie lithium	$\sim 10^{-1}$ - $10^2$ MWh	$\sim 10^{-1}$ s
Supraconducteur	$\sim 10^0$ kWh	$\sim 10^{-2}$ s
Supercondensateur	$\sim 10^0$ kWh	$\sim 10^{-2}$ s

L'accumulateur électrochimique reste actuellement le principal moyen de stockage de grande capacité d'énergie électrique. En particulier, la technologie lithium-ion offre une tension élevée, une énergie et une puissance spécifiques élevées, et une longue durée de vie sans besoin de maintenance (Searle & Broussely 2003) ; elle permet de couvrir une large gamme d'applications. Les supercondensateurs, également sources d'énergie (mais sans réaction) électrochimique, permettent d'assurer des performances à basse température ou lors d'appel de charge ultra-rapide.

Les systèmes de stockage magnétique à supraconducteurs<sup>119</sup> possèdent une forte densité d'énergie et une puissance élevée, avec un nombre de cycles pratiquement infini et un besoin de maintenance limité. La compensation de creux de tension, la correction des imperfections de tension ou encore l'apport de charges impulsives (pour des armes électriques, par exemple) sont des applications possibles. L'emploi des bobines supraconductrices reste contraint par les dispositifs cryogéniques nécessaires au refroidissement des matériaux (actuellement  $\sim 20$  à  $30$  K). Toutefois, le développement de matériaux supraconducteurs à haute température critique ( $> \sim 77$  K) permet l'émergence de moteurs supraconducteurs, intéressants pour la propulsion navale (Tixador 2003).

<sup>119</sup> La résistivité d'un matériau supraconducteur devient nulle en dessous d'une température critique.

## 5.6.2 Programme européen POSE2IDON

Le programme européen POSE<sup>2</sup>IDON (déjà évoqué dans le tableau 4) vise à généraliser l'emploi de l'énergie électrique à bord des navires par le développement de technologies innovantes, notamment la supraconductivité à haute température. La société Converteam SAS est ainsi impliquée dans l'étude de générateurs et moteurs supraconducteurs synchrones pour la propulsion, de moyens de transmission et de distribution de l'énergie électrique (courant continu) par câbles et terminaisons supraconducteurs à haute température<sup>120</sup>, d'éléments de stockage de l'énergie, de connexion à quai, d'auxiliaires de courant alternatif et courant continu (Mirzaian & Flury 2009).

## 5.6.3 Programme étasunien Next Generation Integrated Power System

Aux Etats-Unis, le Land-Based Test Site (LBTS) de la Ships Systems Engineering Station (Philadelphia, Pennsylvania, USA) est dédié aux essais de différents types de moteurs et, plus généralement, à l'étude de systèmes intégrés de puissance, désignés NGIPS (Next Generation Integrated Power System)<sup>121</sup>. L'objectif est notamment de développer le concept de navires militaires tout électrique (§ 5.8). Pour cela, diverses initiatives sont engagées (Lundquist 2009). Le système de puissance des destroyers DDG 1000 classe *Zumwalt* de l'US Navy repose sur le test de moteurs associés selon des configurations variées, et sur l'évaluation des caractéristiques résultantes (couple, vitesse, puissance de sortie, consommation de carburant...). La combinaison de turbines à gaz est étudiée afin d'éviter la mise au point de nouvelles turbines. Un moteur à induction (18 MW) fabriqué par Alstom – similaire à ceux installés sur le destroyer type T45 récemment mis en service, le *HMS Daring* de la Royal Navy britannique – est également testé, de même qu'un moteur à aimants permanents (36 MW) de DRS Technologies. La propulsion des DDG 1000 classe *Zumwalt* devrait être assurée au moyen de moteurs supraconducteurs à haute température synchrones (36,5 MW chacun), fabriqués par American Superconductor Corporation (AMSC) et Northrop Grumman. Ces moteurs, petits et légers, fournissent une puissance supérieure à celle produite par des moteurs synchrones conventionnels ; ils permettraient aussi de doubler la cadence de tir de missiles<sup>122</sup>. D'autre part, un système totalement automatique de distribution de courant électrique continu est en phase de développement ; il doit être capable de déclencher les actions appropriées en cas de dysfonctionnement ou de panne, avec une intervention minimale d'opérateurs. DRS Technologies et General Atomics Electromagnetic Systems mettent au point un moteur électrique hybride : un moteur à aimants permanents, alimenté par une petite turbine à gaz, fournira la puissance au navire lors de déplacement à vitesse réduite. Par ailleurs (McGroarty et al. 2005), l'US Naval Surface Warfare a montré l'intérêt d'un moteur-générateur à volant d'inertie (unité de 25 kWh de Beacon Power Corporation) pour le stockage d'énergie à bord.

---

<sup>120</sup> Pour bénéficier totalement des avantages d'un moteur supraconducteur, il est en effet essentiel que l'ensemble du réseau et des éléments électriques qui lui sont associés possèdent également des propriétés supraconductrices. Des détails sur les moteurs supraconducteurs à haute température et sur leurs performances sont apportés par Buckingham (2009b).

<sup>121</sup> It's electric, *Marine Reporter and Engineering News*, March 2009, 33.

<sup>122</sup> Ces moteurs délivrent un courant alternatif ; ils pourraient équiper des navires LPD et LCS (*cf.* : Ship-size HTS propulsion motor passes tests, *Warship Technology*, March 2009, 33-34 ; Ambitious of all-electric navy get reality check, *National Defense*, June 2009, 9). Par ailleurs, Siemens développe également des moteurs supraconducteurs à haute température (Siemens 2006).

## 5.6.4 L'approche de la Royal Navy britannique

Pour la Royal Navy britannique, la puissance et la propulsion des futurs navires de combat (3500 tonnes) reposent sur l'utilisation de technologies avancées telles que des turbines à gaz couplées directement à des alternateurs (sans boîte de vitesse intermédiaire), des moteurs à aimants permanents, des moteurs supraconducteurs à haute température, des piles à combustibles ou encore des composants électroniques de puissance à base de carbure de silicium (SiC) (Casson et al. 2006)<sup>123</sup>.

## 5.7 Hydrodynamique et système propulsif

L'amélioration du rendement du système propulsif du navire participe à réduire les coûts opérationnels liés au prix élevé du pétrole et à réduire les émissions atmosphériques polluantes. Les mesures pour augmenter l'efficacité de la propulsion s'appuient notamment sur une optimisation de l'hydrodynamique du navire et sur des propulseurs novateurs (Bindel 2002 ; Kanerva 2005 ; Mewis & Hollenbach 2006 ; Bovis 2009 ; Bui 2009 ; Cordier et Morand 2009).

### 5.7.1 Améliorations de l'hydrodynamique du navire

L'hydrodynamique navale traite du rapport entre le navire et l'eau qui l'entoure afin de diminuer la résistance à l'avancement, d'atteindre les performances optimales de la propulsion et d'assurer la tenue à la mer. Le déplacement du navire est en effet freiné par les vagues qu'il génère lors de son mouvement et par la viscosité du milieu qui crée une friction sur la coque et des variations de pression dans le sillage du navire. La résistance des vagues augmente avec la vitesse et dépend de la forme du bateau ; la friction sur la coque est directement liée à la surface mouillée et la pression de sillage à la forme de la coque<sup>124</sup>. La meilleure interaction possible entre les éléments immergés (carène, hélices, appendices...) et l'eau est donc recherchée<sup>125</sup>.

- L'adaptation du profil et des dimensions du navire – pour une allure considérée – minimise la puissance effective nécessaire à la propulsion (puissance *versus* accroissement de longueur, par exemple ; Bui 2009) ; la longueur du navire peut être augmentée à l'aide d'artifices tels que bulbe d'étrave<sup>126</sup> et jupes diverses (jupe arrière – *duck tail* –, volets, *interceptor*...). Hollenbach & Friesch (2007b) estiment que la consommation de carburant peut être réduite jusqu'à 25 % et 7 % en optimisant respectivement les dimensions principales et la forme du navire.

---

<sup>123</sup> Le concept 22CF (22<sup>nd</sup> Century Frigate) de navire du futur du ministère de la défense britannique nécessitera des générateurs électriques de puissance pour des systèmes d'arme tels que des composants micro-onde à haute puissance, des canons électromagnétiques, des lasers, etc. (Scott 2010).

<sup>124</sup> Bensow, R. E., *Streamlining a 'green' ship*.

<sup>125</sup> C'est notamment le but du projet Optnav du Pôle mer Bretagne (tableau 3) d'optimiser les performances hydrodynamiques des navires (coque, propulseurs, appendices) et d'intégration des outils de simulation et de conception.

<sup>126</sup> ForestWave Navigation a mis au point un navire soutier exempt de bulbe d'étrave, considérant que celui-ci n'est utile que pendant 20 % du temps de navigation (de Jong 2010).

- Des tunnels d'étrave carénés (propulseurs transverses<sup>127</sup>) et des appendices carénés (lignes d'arbre, chaises d'arbre) réduisent la traînée et améliorent la propulsion du bateau (Cordier & Morand 2009).
- Une solution innovante est l'utilisation d'une peinture à base de silicone, qui permet de diminuer la rugosité de la carène ; toutefois, selon Cordier & Morand (2009), la réduction du frottement reste difficile à évaluer<sup>128</sup>.
- La réduction de la traînée du navire peut être obtenue par la création de micro-bulles d'air sous la coque du navire (Buckingham 2009b)<sup>129</sup>. L'efficacité de cette méthode dépend de nombreux paramètres – notamment du point de fonctionnement du propulseur, du taux d'air injecté, de la rugosité de la coque, du taux de micro-bulles créées et de leur trajectoire, de la vibration de la poupe ; les performances optimales sont constatées pour des vitesses faibles à moyennes. Selon Wärtsilä (cité par Buckingham 2009b), la réduction de la consommation de gasoil est d'environ 15 % pour un tanker, 7,5 % pour un porte-conteneur et 3,5 % pour un ferry. Pour les navires de guerre, l'écran de micro-bulles présent autour de la coque sert de déflecteur de l'énergie acoustique et réduit le bruit du système propulsif.
- La lubrification à l'air de la surface mouillée est une autre voie prometteuse pour réduire la résistance à l'avancement. Elle consiste à créer une couche d'air entre la coque et l'eau pour diminuer la traînée du navire (pour une revue historique et technique, voir Matveev 2003). Bien que cette solution ait été proposée au XIX<sup>e</sup> siècle par Froude et Laval, les tentatives de mise en pratique sont longtemps restées infructueuses. L'étude théorique du concept n'a été réellement entreprise qu'à partir des années 1960, notamment par le russe A. A. Butuzov, suivie par des tests de laboratoire et des expériences en grandeur réelle sur des barges et péniches. Le premier navire rapide lubrifié à l'air apparut au début des années 1970, à l'initiative du russe I. Matveev. Depuis les années 1990, des recherches sur ce concept se sont développées, en particulier en Europe, aux Etats-Unis, en Corée et en Australie ; les avancées sont toutefois difficiles à estimer car, du fait des enjeux commerciaux et militaires<sup>130</sup>, peu de données ont été rendues publiques. Selon Choi (2008), la réduction de la friction entre la coque et l'eau pourrait atteindre 5 à 15 % pour des navires marchands. Parmi les sociétés particulièrement dynamiques sur le sujet, le néerlandais DK Group a adapté et expérimenté cette solution sur son navire *ACS Demonstrator* de 83 m de long, en collaboration avec Germanischer Lloyd, FORCE Technology et Lyngsø Marine, composante de SAM Electronics (DK Group 2008 ; Johannesson 2008)<sup>131</sup>. De son côté, après presque dix ans de recherche et développement, la compagnie norvégienne Effect Ships International a abouti à la mise au point d'un concept de navire monocoque de 20 x 5,6 m

---

<sup>127</sup> Un exemple de conception de Rolls-Royce est donné par Wheeler (2008a).

<sup>128</sup> Un démonstrateur du système Stena AirMAX, développé par la compagnie suédoise Stena Bulk, a été testé au printemps 2010 (<http://www.motorship.com/features101/ships-and-shipyards/airmax-prototype-demonstrator-gets-airborne>).

<sup>129</sup> Les effets de la rugosité de surface des revêtements antisalissures sur leurs performances hydrodynamiques ont été étudiés par Howell & Behrends (2006).

<sup>130</sup> L'Office of Naval Research (ONR) étatsunien, par exemple, s'intéresse à ce concept (Matveev 2003).

<sup>131</sup> Voir aussi : Feel it coming in the air, *The Naval Architect*, January 2009, 26-27, ainsi que : Euronews, Actualités Hi-Tech, enregistrement vidéo sur le système de lubrification par air de DK Group, <http://www.euronews.net>.

propulsé par deux moteurs hydrojet Volvo IPS 6000<sup>132</sup>. Le concept Eoseas de STX Europe (tableau 4) aura également une coque lubrifiée à l'air.

- La mise au point de surfaces superhydrophobes est un autre moyen pour améliorer le glissement de l'eau sur la surface du navire – mais aussi pour lutter contre les bio-salissures (§ 8.1.3) –, et l'imitation des solutions inventées par la nature (biomimétisme ; voir § 8.1.4) offrent aux scientifiques et aux ingénieurs une source d'inspiration inépuisable (Sanchez et al. 2005 ; Guillot & Meyer 2008). En effet, l'association d'aspérités microscopiques au caractère hydrophobe naturel d'une surface aboutit parfois à des propriétés de mouillage et d'adhésion particulières, favorisant l'évacuation rapide des gouttes d'eau<sup>133</sup> ; c'est ainsi le cas, par exemple, des feuilles de hêtre, de nénuphar, de tulipe, de chou-rave, de lotus (Reyssat & Quéré 2006 ; Guillot & Meyer 2008), mais aussi des ailes de canard (Denny 2008 ; Prakash et al. 2008) ou encore des pattes de gerris.

Un exemple d'adaptation réussie du vivant à son milieu est donné par les dauphins, dont les performances à la nage sont extraordinaires<sup>134</sup>. Si l'observation de leur peau a révélé une surface particulièrement lisse et visqueuse – motivant des recherches pour la réalisation de revêtements antisalissures (§ 8.1.4) –, les relations entre la peau et la morphologie globale des dauphins ne sont pourtant pas encore bien comprises (Weisbuch 2001). Les effets d'échelle, qui jouent en effet un rôle important, ne sont pas connus précisément, et le couplage entre l'hydrodynamique macroscopique et les propriétés de mouillage des surfaces fait l'objet de recherches. Duez (2008) a ainsi mis en évidence le lien fort qui peut apparaître entre les échelles micro et nanoscopiques, représentatives de la mouillabilité des surfaces, et l'échelle macroscopique caractéristique de l'écoulement.

## 5.7.2 Hydrodynamique et hélices : quelques aspects

L'optimisation des caractéristiques principales d'une hélice et une turbulence faible du milieu environnant conduisent à une amélioration du rendement des propulseurs<sup>135</sup>.

- Le nombre de tours et le diamètre de l'hélice sont les paramètres principaux à prendre en compte pour augmenter l'efficacité des hélices, bien que le détail du profil des pales ne soit pas à négliger (Schmid 2007a,b). Des hélices à pas variable (pales orientables) sont également proposées par les industriels<sup>136</sup>. D'autre part, l'emploi de matériaux composites plutôt que métalliques permet d'alléger l'hélice (voir l'exemple de l'hélice de grand diamètre du britannique QinetiQ cité par Buckingham 2009a).
- Un propulseur fonctionnera d'autant mieux que le fluide en amont et en aval de l'hélice générera peu de turbulence. Choi (2008) donne un panorama des solutions envisageables pour

---

<sup>132</sup> Comfortable craft could have range of applications, *Warship Technology*, October 2009, 13-15.

<sup>133</sup> L'ouvrage de de Gennes et al. (2005) traite en détail des phénomènes de capillarité, de mouillage et de la physique des interfaces.

<sup>134</sup> C'est également le cas des requins (Guillot & Meyer 2008).

<sup>135</sup> Un modèle dynamique d'hélice et une loi de commande en poussée d'un propulseur électrique ont été développés par Vonnet (2008a,b) ; un état de l'art de la modélisation des propulseurs électriques est également proposé.

<sup>136</sup> Par exemple : *Propulsion. Moving your business in the right direction*, Rolls-Royce.

assurer la convergence de l'écoulement au voisinage de l'hélice<sup>137</sup> : ailerons de coque ; ailettes ; bulbe de moyeu d'hélice<sup>138</sup> ; stator de gouvernail ; déflecteur de vortex obtenu par la forme du gouvernail<sup>139</sup> ; etc.

Pour réduire les turbulences entre le gouvernail et l'hélice, Wärtsilä a conçu, avec Becker Marine Systems, un ensemble intégré gouvernail-propulseur, Energopac ; l'emploi de matériaux composites permet d'alléger le système (Lehmann 2007a,b ; Nijland 2008 ; Wärtsilä 2008).

- L'augmentation du nombre d'hélices, combinée avec l'accroissement de leur diamètre, peut également avoir un effet bénéfique sur la propulsion<sup>140</sup>. Diverses configurations permettent d'associer les hélices : double lignes d'arbre porte-hélice, pods (§ 5.5), ensembles de paires de pods contra-rotatifs, accompagnés ou non de pods seuls, etc. Eskola (2008) donne des exemples de telles combinaisons.
- Des revêtements de surface furent appliqués durant la seconde guerre mondiale sur des hélices en acier pour limiter leur érosion par cavitation. Depuis la fin des années 1960, l'US Navy, l'US Maritime Administration et la Royal Navy britannique font des recherches sur des revêtements polymères, à la fois pour améliorer la résistance à la cavitation des hélices et les protéger des salissures marines (§ 8.1). La Royal Canadian Navy a constaté que les revêtements permettent de diminuer le courant imposé ou la consommation d'anodes sacrificielles (Anderson 2005). Hormis une fonction protectrice, un revêtement de surface améliore l'interaction entre l'hélice et l'eau et diminue la résistance à l'avancement.

Le tableau 11 donne des estimations de diminution de résistance à l'avancement obtenue par l'optimisation de la forme du navire et de l'interaction entre l'hélice et le gouvernail, ainsi que par la réduction de la rugosité de surface de la coque (Hollenbach & Friesch 2007a ; Choi 2008).

**Tableau 11.** Estimation de la diminution possible de la résistance à l'avancement du navire obtenue par des solutions hydrodynamiques ; ces valeurs ne sont pas cumulatives.

*Table 11.* Assessment of the possible cut in the vessel resistance with various hydrodynamic solutions; these are not cumulative values (Hollenbach & Friesch 2007a ; Choi 2008 ; Buckingham 2009b).

	<b>Diminution possible de la résistance à l'avancement</b>
Optimisation de la forme du navire	~1-4 %
Optimisation de l'interaction entre l'hélice et le gouvernail	~3-6 %
Diminution de la rugosité de surface de la coque	~6 %
Création de micro-bulles d'air	~3 % ?
Lubrification à l'air	5-15 %

<sup>137</sup> Des compléments sont donnés par Radojic (2006) et Bertram (2009), ou encore dans : Norwegian owner to be first with Becker's Mewis duct, *mer*, March 2009, 34 ; Kessler, J., *Schneekluth wake-equalizing-duct (WED). Use of the wake equalizing duct of Schneekluth design on fast container vessels of medium size*, Schneekluth..

<sup>138</sup> Boss cap tops performance, *The Naval Architect*, June 2009, 43.

<sup>139</sup> Becker optimises profile of established rudder systems, *mer*, September 2008, 60-69.

<sup>140</sup> Par ailleurs, une propulsion par hélices multiples facilite la manœuvre du navire et assure la redondance du système propulsif en cas de défaillance (Carlton 2007a,b).

### 5.7.3 Lubrifiants et coussinets pour éléments de ligne d'arbre

Des lubrifiants non toxiques et biodégradables de pièces de la ligne propulsive ont été mis au point. Les huiles HYDROX BIO 68 et HYDROX BIO 100 de Vickers sont par exemple agrémentées par MAN Diesel<sup>141</sup>.

La société Railko Marine fabrique des coussinets et manchons en matériau composite pour gouvernail. Ils peuvent être utilisés à sec, partiellement ou totalement lubrifiés à l'huile ou à l'eau de mer. La gamme Railko CY160LS fait partie de la première génération de coussinets dépourvus d'amiante (renfort imprégné de résine phénolique). D'autres coussinets lubrifiés à l'huile sont également proposés (gamme Sternsafe<sup>TM</sup>) ; plus résistants et durables que les produits existants, leur fonctionnement est compatible avec des lubrifiants biodégradables (Biswell 2007)<sup>142</sup>.

## 5.8 Le navire tout électrique

### 5.8.1 Un survol historique (1830-2000)

Selon Aucouturier (2001), l'histoire du bateau électrique peut être résumée en quatre étapes principales (des compléments sont apportés par Graham et al. 2005 ; Gleaves 2009).

- De 1830 à 1918, des travaux de pionniers sont réalisés notamment par Von Jacobi et le comte de Molin, mais c'est l'ingénieur Gustave Trouvé qui, en 1881, présente l'*Eurêka*, un bateau équipé d'un moteur électrique hors-bord. En 1886, Siemens fabrique un moteur électrique pour l'*Elektra*, un bateau de 11 m de long et 2 m de large pour 30 passagers. Le tanker russe *Vandal* est doté en 1903 d'une propulsion électro-diesel du suédois ASEA (actuellement intégré à ABB). Aux Etats-Unis, la propulsion électrique concerne d'abord des sous-marins. En 1908, le navire de guerre *Lightship LS-88* est construit avec une propulsion électro-diesel. En 1913, la propulsion du navire de commerce *Tynemount* est assurée à l'aide d'un moteur à induction. Le navire de combat *USS New Mexico* est également propulsé à l'aide de moteurs électriques (1918).
- Entre les deux guerres mondiales, les applications de l'invention de Trouvé sont supplantées par le moteur à explosion, qui utilise un pétrole abondant et peu coûteux. Le trans-Atlantique *SS Normandie* est néanmoins propulsé par quatre moteurs turbo-électriques synchrones.
- A partir de 1970, le bateau électrique devient attractif grâce aux activités de loisir, avec la mise sur le marché – principalement aux Etats-Unis et dans les pays anglo-saxons – de petits bateaux de pêche équipés de moteurs électriques hors-bord.
- Un marché émergent apparaît au début des années 1990, avec la disponibilité de sources d'énergie diversifiées. Les moteurs hybrides électro-diesel sont ainsi utilisés pour l'entraînement

---

<sup>141</sup> Green lubes get green light, *The Naval Architect*, N° 11, January 2009, 37.

<sup>142</sup> Des triglycérides d'origine végétale peuvent remplacer les dérivés pétrochimiques des lubrifiants ; un biolubrifiant a par exemple été réalisé dans le cadre du projet européen Ibiolab. L'enjeu des recherches actuelles sur les biolubrifiants est de reproduire des formulations complexes et garantir performances techniques et avantages écologiques (James 2009).

de la ligne d'arbres des navires de fort tonnage. Les progrès réalisés sur les batteries permettent d'utiliser des moteurs électriques sur des bateaux de pêche-promenade, de transport collectif de passagers (par exemple, Venise à la fin des années 1980 ; Strasbourg ; Nantes ; La Rochelle)<sup>143</sup>, mais aussi de tourisme fluvial. Les moteurs électro-solaires apportent un complément d'énergie à la source principale (cas du récent *Ferry Boat*<sup>144</sup>, par exemple) ou donne aux navires une autonomie totale (bateaux à passagers en service sur la lac Léman, en Suisse<sup>145</sup>). Quant aux piles à combustible, leur utilisation nécessite des infrastructures de distribution et de stockage d'hydrogène, ou sa production à bord des navires.

## 5.8.2 Intérêt du concept

Le concept de navire tout électrique (Filliau et al. 2000, 2001a,b,c ; Froidurot 2002 ; Filliau 2003 ; Lundquist 2009) est basé sur l'électricité utilisée comme unique fournisseur de puissance pour l'ensemble des fonctions du bord – appareils propulsifs, réseaux électriques de bord, armes... Il offre une flexibilité architecturale dans l'agencement et la répartition des machines – avec, éventuellement, la suppression de la ligne d'arbre –, garanti la disponibilité des installations et la redondance des réseaux électriques, rend le navire plus maniable, limite la maintenance, réduit la consommation énergétique et les émissions polluantes<sup>146</sup>, facilite l'évolution et la modernisation du navire... Andrews et al. (2004) observent que, depuis le milieu des années 1990, les navires tout électrique de guerre ont fait l'objet de nombreux efforts, en particulier de l'US Navy<sup>147</sup> et à travers le programme franco-britannique de frégates *Horizon*. Ils insistent également sur l'opportunité offerte au concepteur de

---

<sup>143</sup> Plus récemment, l'emploi de supercondensateurs pour le stockage d'énergie électrique est la solution retenue pour la navette électrique commandée par Cap l'Orient, la communauté d'agglomération de Lorient, à STX France. Conçu par ce dernier en collaboration avec Stirling Design International (SDI), ce catamaran de 22,1 m de long et 7,2 m de large, dont la livraison est prévue pour l'été 2012, fera des traversées en rade de Lorient. L'énergie stockée, nécessaire à une rotation, sera régénérée pendant les escales (voir : STX Lorient vend son premier navire doté de super-condensateurs, *Mer et Marine*, 26 avril 2011, <http://www.meretmarine.com/article.cfm?id=115950>).

<sup>144</sup> Le *Ferry Boat* appartient à la ville de Marseille et assure des navettes de transport collectif entre la mairie et la place aux Huiles (durée de 3 à 4 minutes). Il s'agit d'un catamaran « amphidrome » (*i.e.* dont la proue et la poupe sont identiques) de 13 x 4,7 m, équipé de 25 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques, propulsé par deux moteurs électriques de 15 kW chacun de type synchrones « brushless » (*cf.* : *Bref historique du Ferry Boat*, <http://ferryboat-marseille.com>).

<sup>145</sup> Voir également le projet de construction de BMT Nigel Gee Ltd (BMT Group Ltd) d'un ferry catamaran tout électrique de 25 m de long, d'une capacité de transport de 150 passagers, destiné à la navigation en zones côtières et dans des estuaires chinois ; ce navire devrait être livré à la mi-2012 (*BMT Nigel Gee goes green*, August 8, 2011 ; <http://www.bmt.org/News/?/3/0/851>).

<sup>146</sup> C'est notamment pour cette raison que la marine marchande est intéressée par les sources d'énergie électro-diesel ; les émissions polluantes peuvent en effet être réduite jusqu'à 15 % (*cf.* : Green agenda drives diesel electric, *The Naval Architect-Marine Power & Propulsion Supplement*, 2008, 24). Plus généralement, les avantages d'une propulsion électro-diesel sont présentés par Oberhokamp (2007a,b). Des projets de navires existent tels, par exemple, aux Etats-Unis, des remorqueurs à propulsion hybride électro-diesel envisagés par Foss Maritime Company, et General Electric et C-MAR (*cf.* : Foss to build hybrid tug, *Marine News*, March 2007, 10-12 ; GE, C-MAR to demo hybrid tug tech, *Marine News*, June 2008, 12 ; Foss hybrid tug in construction in Rainier, *Marine News*, October 2008, 12).

<sup>147</sup> Des technologies pour le stockage d'énergie retenues par l'US Navy s'appuient sur des solutions électro-chimiques (piles à combustible, batteries de nouvelles générations), électro-statiques (super condensateurs), électro-mécaniques (systèmes à volant d'inertie), thermiques (systèmes à air comprimé) ou encore magnétiques (systèmes supraconducteurs). Voir : Electric ships drive energy storage development, *Warship Technology*, January 2010, 24-27.

s'affranchir de la contrainte imposée par la présence de la traditionnelle ligne d'arbre porte-hélice pour revoir et optimiser l'architecture générale du navire.

La conception et le choix des caractéristiques opérationnelles et fonctionnelles de la configuration électrique (éléments de génération, conversion et distribution de puissance, de stockage d'énergie, besoins pour la propulsion et les systèmes d'arme) d'un navire tout électrique sont discutés par Filliau (2003), Graham et al. (2005), Valkeejärvi (2005), Hodge et al. (2008) ou encore Rosamond (2008). Un modèle dynamique d'hélice et une loi de commande en poussée d'un propulseur électrique sont développés par Vonnet (2008a,b).

Outre les avantages d'une propulsion électrique déjà cités, Froidurot (2002) et Meslin & Baranger (2009) ajoutent que :

- un couple de travail élevé peut être atteint dès les basses vitesses de rotation du moteur ; la manœuvre du bateau est ainsi facilitée et l'utilisation d'hélices de grand diamètre est possible<sup>148</sup> ; de plus, le temps de réponse d'un moteur électrique est plus rapide que celui d'un moteur diesel<sup>149</sup> ;
- des réducteurs et variateurs mécaniques ne sont plus nécessaires entre le moteur et l'hélice : le rendement du système propulsif peut atteindre 90 %<sup>150</sup>, et le poids et le volume de toute la chaîne de propulsion sont diminués ;
- le niveau d'émission acoustique et vibratoire (de la chaîne propulsive) est faible ;
- un moteur électrique peut continuer à fonctionner en mode dégradé après un choc ;
- un moteur électrique chauffe moins qu'un moteur à combustion interne, ce qui réduit sa signature infrarouge<sup>151</sup>.

En revanche, les matériaux de construction d'un moteur électrique (aimants, cuivre...) rendent son prix plus élevé que celui d'un moteur thermique<sup>152</sup>, et les opérateurs de maintenance doivent posséder une meilleure qualification. Toutefois, le principal inconvénient du mode tout électrique est la moindre discrétion magnétique liée aux importants courants de fuite des moteurs électriques, limitant ainsi la furtivité des navires et augmentant leur vulnérabilité, notamment vis-à-vis des mines (Froidurot 2002)<sup>153</sup>.

---

<sup>148</sup> ... diminuant ainsi la cavitation. (Pour une brève description du phénomène de cavitation, voir : Bensow, R. E., *Streamlining a 'green' ship*.)

<sup>149</sup> Plus précisément, comme le moteur électrique est alimenté par un alternateur diesel, la rapidité de réaction du système propulsif électrique est assurée par une réserve d'énergie dans laquelle puiser, le temps que l'alternateur diesel s'adapte.

<sup>150</sup> ... pour des vitesses du navire inférieures à sa vitesse maximale.

<sup>151</sup> Il convient toutefois de préciser qu'un système de propulsion électrique (*i.e.* l'association du moteur électrique et de son alternateur diesel) chauffe autant qu'une propulsion diesel.

<sup>152</sup> La comparaison des coûts reste néanmoins difficile car un moteur électrique nécessite actuellement un moteur thermique pour fonctionner.

<sup>153</sup> Quant à la signature électromagnétique, il est aujourd'hui possible de la réduire convenablement.

### 5.8.3 Exemples de navires militaires tout électrique récents

Des navires militaires étrangers et français tout électrique, en service ou en développement, sont rapportés par Filliau (2003), Hodge & Mattick (2008) et Lundquist (2009)<sup>154</sup>.

- Les pays-Bas ont mis en service en 1998 un bâtiment amphibie néerlandais de 13000 tonnes, le LPD (Landing Platform Dock) *Rotterdam*.
- Les frégates britanniques type 23, développées dans les années 1980 et mises en service à partir de 1990, ont été les premiers bâtiments à propulsion électrique. Deux pétroliers ravitailleurs de 30000 tonnes ont été mis en service en 2001, et deux LPD de 15000 tonnes en 2002 et 2004. Les frégates anti-aériennes T45 en construction, les Futur Surface Combatant et les futurs porte-avions de classe *Queen Elizabeth* seront également des navires tout électrique (cf. aussi § 5.2)<sup>155</sup>.
- L'Allemagne a construit le bâtiment océanographique *WFE5*.
- En France, le bâtiment hydrographique *d'Entrecasteaux* (1971), le bâtiment hydrographique et océanographique (BHO) mis en service en 2002, ainsi que deux bâtiments de projection et de commandement (BPC) de 2005 et 2006 sont des navires tout électrique<sup>156</sup>, de même que les frégates européennes multi-mission (FREMM) franco-italiennes.
- Aux Etats-Unis, le bâtiment amphibie d'assault *USS Makin Island* (LHD 8) est tout électrique, combinant turbine à gaz et propulsion électrique. Le Littoral Combatant Ship (LCS) *USS Freedom* (LCS-1) est équipé de turbines à gaz Rolls-Royce MT30, version « marine » du moteur MT30 des avions Boeing 777 (Rabulan 2008)<sup>157</sup>. Les trois destroyers DDG 1000 classe *Zumwalt* seront également équipés de deux turbines à gaz principales (Rolls-Royce MT30 version « marine ») et de deux turbines secondaires qui alimenteront des moteurs produisant un courant alternatif de 4160 V, redressé en courant continu<sup>158</sup> ; des moteurs supraconducteurs à haute température synchrones assureront la propulsion (§ 5.6.3)<sup>159</sup>.

### 5.8.4 Des navires à propulsion magnétohydrodynamique ?

La combinaison d'un champ magnétique et d'un champ électrique dans l'eau de mer crée un champ de forces électromagnétiques volumiques (forces de Laplace-Lorentz), dites forces magnétohydrodynamiques<sup>160</sup>, capables de propulser un navire par réaction (Thibault 1995 ; Guillou 2004). Le passage de courant électrique dans l'eau de mer provoque toutefois une chute de tension aux électrodes, du fait de l'électrolyse de l'eau, et un échauffement par effet Joule au cœur de l'écoulement – outre ces inconvénients, le rendement propulsif est également affecté par des pertes mécaniques, par frottement visqueux, et par des dissipations liées aux inhomogénéités de champ

---

<sup>154</sup> Voir également le programme européen POSEIDON, évoqué tableau 4 et § 5.6.2.

<sup>155</sup> IFEP confers numerous advantages on CVF, *Warship Technology*, March 2010, 38-39.

<sup>156</sup> Ces deux BPC ont été les premiers navires militaires à utiliser une propulsion par pods (§ 5.5).

<sup>157</sup> Les systèmes de puissance des programmes DDX et LCS sont testés au LBTS (§ 5.6.3).

<sup>158</sup> Providing power for future platforms, *Marine Propulsion*, August/September 2006, 95.

<sup>159</sup> Un Ship Service Fuel Cell est également évoqué par Kickulies (2005) ; il s'agit pour l'US Navy de mettre au point un navire électrique, dont l'énergie sera produite par une usine autonome de 2,5 MW diesel-pile à combustible.

<sup>160</sup> Le père de la magnétohydrodynamique moderne est le russe Andréï Sakharov.

(Thibault et al. 1992). Un champ magnétique fort, qui ne contribue pas aux dissipations, et des courants électriques modérés, sont donc nécessaires pour obtenir des propulseurs efficaces et atteindre des rendements de l'ordre de 50 à 80 %, selon le type de navires et les conditions de navigation. Un tel mode de propulsion présente au moins deux avantages : la suppression de l'hélice et de pièces mécaniques mobiles, et la possibilité d'atteindre des vitesses élevées, supérieures à celles des bâtiments actuels.

Après les travaux de pionniers durant les années 1960, un regain d'intérêt est apparu à la fin des années 1980, en particulier au Japon et aux Etats-Unis (Thibault et al. 1992). Pour démontrer la faisabilité industrielle de la propulsion magnétohydrodynamique, et en vue d'applications civiles (cargos, navires brise-glace, grands bateaux rapides, sous-marins...), les Japonais ont réalisé une vedette de 30 m de long et de 280 tonnes, la *YAMATO-1*, présentée en 1992, capable de se déplacer à une vitesse d'environ 6 nœuds à partir d'un champ magnétique de 2 teslas et d'un courant de 2000 ampères<sup>161</sup>. Aux Etats-Unis, les recherches, financées par le Department of Defense, ont porté sur des études théoriques, validées expérimentalement en laboratoire. Le but est de réaliser une propulsion magnétohydrodynamique à haut rendement (50 à 70 %), à partir d'aimants supraconducteurs à base de niobium et titane. Des efforts de recherche et développement ont également été entrepris en France, à l'initiative de quatre laboratoires grenoblois et de Jeumont Schneider Industrie (Thibault et al. 1992).

L'avenir et le développement de la propulsion magnétohydrodynamique sont directement liés à la mise en œuvre de bobines supraconductrices de grandes dimensions, capables de délivrer des champs magnétiques intenses ( $\sim 10$  T), et à la disponibilité de matériaux supraconducteurs à haute température critique (*cf.* § 5.6.1).

## Références

Aeberli, K., & McMillan, J., 2002, Common rail at sea: the Sulzer RT-flex engine, in : *The Motor Ship Marine Propulsion Conference*, 10-11 April 2002, Copenhagen, Denmark.

Altmann, M., Weindorf, W., & Weinberger, M., 2004, *Life cycle analysis results of fuel cell ships. Recommendations for improving cost effectiveness and reducing environmental impacts*, Final Report, DTR-4.5-LBST-05.2004 Rev. 2, 21 July 2004.

Amiet, M., 2003, Nouvelles sources d'énergie moyenne puissance : introduction, in : *Science et défense 2003 – Futures énergies embarquées*, 2-3 décembre 2003, Centre des hautes études de l'armement (CHEAr), 205-207.

Anderson, C. D., 2005, The benefits of coating propellers, in : *Naval Platform Technology Seminar 2005*, 17-18 May 2005, Singapore, Republic of Singapore.

Andrews, D., Greig, A., & Pawling, R., 2004, The implications of an all electric ship approach on the configuration of a warship, in : *Proceedings IMarEST part D of I.Mar.E.S.T. 7<sup>th</sup> International Naval Engineering Conference (INEC)*, March 2004, 132-146.

---

<sup>161</sup> Le critère de performance n'était pas dans les objectifs initiaux du projet.

- Aucouturier, J.-L., 2001, Véhicule et bateau électriques : vers un renouveau durable ?, in : Y. Michaux (dir.), 2001, *Qu'est-ce que les technologies ?*, série « Université de tous les savoirs », vol. 5, Editions Odile Jacob, 372-382.
- Benchrif, R., Bennouna, A., & Zejli, D., 2007, Rôle de l'hydrogène dans le stockage de l'électricité à base des énergies renouvelables, in : *Deuxième workshop international sur l'hydrogène 2WIH2*, 27-29 octobre 2007, Ghardaïa, Algérie.
- Bertram, V., 2009, Options for raising propulsive efficiency, *Marine Propulsion*, August/September 2009, 177-178.
- Bindel, S., 2002, Hydrodynamique navale, in : *Encyclopaedia Universalis*, corpus 11, Encyclopaedia Universalis France S.A., 662-669.
- Biswell, T., 2007, Bearing for longer shaft life, *Wärtsilä Technical Journal* 02.2007, 37-39.
- Boardman, R., Thornton, D., Schoonman, H., & Verbeek, R., 2005, Wärtsilä waterjets for US Navy INLS program, *Wärtsilä Marine News*, Nb. 1, 26-30.
- Bovis, A., 2009, *Hydrodynamique navale : théorie et modèles*, coll. « Les cours », Presses de l'ENSTA.
- Brunet, Y. (dir.), 2009a, *Problématique du stockage d'énergie*, Traité « EGEM », série « Génie électrique », Hermes science publications.
- Brunet, Y. (dir.), 2009b, *Technologies du stockage d'énergie*, Traité « EGEM », série « Génie électrique », Hermes science publications.
- Brunvoll, 2009, *Rim driven thruster. A new thruster concept*, Brunvoll AS.
- Buckingham, J., 2009a, *European Defence Agency. Overall platform energy efficiency study, Volume one: technology report*, BMT Defence Services, Reference 36513/R4486, Issue 01, April 2009.
- Buckingham, J., 2009b, *European Defence Agency. Overall platform energy efficiency study, Volume two: assessment report*, BMT Defence Services, Reference 36513/R4500, Issue 01, April 2009.
- Bui, Y., 2009, Vers des navires toujours plus économes, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.
- Casson, P., Wood, J., Bricknell, D., Daffey, K., & Partridge, R., 2006, Power and propulsion for the new global combatant, in : *Warship 2006 – Future Surface Warships*, The Royal Institution of Naval Architects Symposium, 20-21 June 2006, London, United Kingdom.
- Carlton, J. S., 2007a, Twin screw propulsion: some aspects of propulsion efficiency, manoeuvrability in relation to redundancy, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Carlton, J. S., 2007b, Twin screw propulsion: some aspects of propulsion efficiency, manoeuvrability in relation to redundancy, présentation de Lloyd's Register, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.

- Choi, Y. B., 2008, *Energy saving devices*, DSME, November 6, 2008.
- Codan, E., & Mathey, C., 2007, Emissions – A new challenge for turbocharging , Abstract of the paper N° 245, in : *25<sup>th</sup> CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology*, Conseil international des machines à combustion, 21-24 May, 2007, Vienna, Austria.
- Colin, R., 2003, The WR-21 intercooled recuperated gas turbine engine – Integration into future warships, Paper IGTC2003Tokyo OS-203, in : *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*, November 2-7, 2003, Tokyo, Japan.
- Coney, M. W., Linnemann, C., & Abdallah, H. S., 2004, A thermodynamic analysis of a novel high efficiency reciprocating internal combustion engine – the isoengine, *Energy* 29, 2585-2600.
- Cordier, S., Morand, L., 2009, Réduction de la puissance propulsive des navires, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.
- de Jong, M., 2010, Un navire économe en soutes, *JMM*, 22 janvier 2010, 25.
- de Gennes, P.-G., Brochard-Wyart, F., & Quéré, D., 2005, *Gouttes, bulles, perles et ondes*, coll. « Echelles », Editions Belin. (Edition accompagnée d'un cédérom.)
- Denny, M. W., 2008, The intrigue of the interface, *Science* 320, 886.
- DGCIS, 2015, *Technologies clés 2015*, Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services, Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie.
- DK Group, 2008, *First trials of the ACS-Air cavity system*, enregistrement video, DK Group, September 2008.
- Duez, C., 2008, *Effets du mouillage en hydrodynamique macroscopique : traînée, impacts et ruissellement*, thèse de doctorat, Laboratoire de physique de la matière condensée et nanostructures, Université Claude Bernard Lyon I, Lyon, France, 18 novembre 2008.
- Eefsen, T., 2008a, Green ship of the future, présentation du Danish Center for Maritime Technology (DCMT), in : *18<sup>th</sup> KIMO International Annual Conference*, 4<sup>th</sup> october 2008, Tønder, Denmark.
- Eefsen, T., 2008b, Green ship of the future, présentation du Danish Center for Maritime Technology (DCMT), in : *Blue Conference*, 4<sup>th</sup> december 2008, Frederikshavn, Denmark.
- Eskola, J., 2008, The business environment: emissions, energy cost, competent crew, in : *European Cruise Industry Conference*, 25-26<sup>th</sup> February, 2008, Brussels, Belgium.
- Esplin, T., & Svensson, U., 2006, Innovative, eco-minded crankcase oil mist removal, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.
- Filliau, G., Bondu, A., & Mazodier, L., 2000, Le navire tout électrique. Propulsion et production d'énergie, document D 5 610-1/610-13, in : *Techniques de l'ingénieur*, 10 novembre 2000.

Filliau, G., Bondu, A., & Mazodier, L., 2001a, Le navire tout électrique. Etat de l'art des composants, document D 5 615-1/615-15, in : *Techniques de l'ingénieur*, 10 février 2001.

Filliau, G., Bondu, A., & Mazodier, L., 2001b, Le navire tout électrique. Evolutions et systèmes de conduite, document D 5 620-1/615-10, in : *Techniques de l'ingénieur*, 10 février 2001.

Filliau, G., Bondu, A., & Mazodier, L., 2001c, Le navire tout électrique (pour en savoir plus), document Doc. D 5 625-1/625-2, in : *Techniques de l'ingénieur*, 10 février 2001.

Filliau, G., 2003, Application du concept de navire tout électrique aux nouveaux bâtiments navals, in : *Science et défense 2003 – Futures énergies embarquées*, 2-3 décembre 2003, Centre des hautes études de l'armement (CHEAr), 255-262.

Froidurot, B., 2002, *Discretion magnétique des machines électriques de propulsion navale*, thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, 30 septembre 2002.

Gätjens, H. J., 2007a, Prime mover-Are there alternatives to the diesel engine?, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.

Gaudin, C., & Julliard, L., 2009, Bénéfice d'une propulsion compacte sur un ro-pax, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.

Gleaves, S., 2009, Electro propulsion – It's time to get onboard, *Marine Reporter & Engineering News*, April 2009, 34-40.

Graham, S., French, C., & Roskilly, T., 2005, All electric ship – Economics versus technology, in : *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Naval Platform Technology Seminar (NPTS 2005)*, held at Singapore on May 17-18, 2005, 78-89.

Guillot, A., & Meyer, J.-A., 2008, *La bionique. Quand la science imite la Nature*, coll. « UniverSciences », Dunod.

Guillou, B., 2004, *Navires à propulsion magnétohydrodynamique*, mémoire de fin d'étude, Ecole nationale de la marine marchande du Havre-Ste Adresse, Année DESMM 2003/2004.

Hamson, K., Pocock, M., Vibert A., & Bridges, R., 2006, Assessing military option – What is the prospect of the UK Navy adopting pods?, *mer*, March 2006. (Article repris par le Royal Belgian Institute of Marine Engineers.)

Herranen, M., Huhtala, K., Vilenius, M., & Liljenfeldt, G., 2007, The electro-hydraulic valve actuation (EHVA) for medium speed diesel engines – Development steps with simulations and measurements, Abstract 07PFL-476 in : *SAE World Congress 2007*, April 16-19, 2007, Cobo Center, Detroit, Michigan, USA.

Herrmann, K., Schulz, R., & Weisser, G., 2007, Development of a reference experiment for large diesel engine combustion system optimization, Abstract of the paper N° 98, in : *25<sup>th</sup> CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology*, Conseil international des machines à combustion, 21-24 May, 2007, Vienna, Austria.

Hodge, C. G., & Mattick, D. J., 2008, The electric warship then, now and later, in : *9<sup>th</sup> International Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC 2008)*, April 1-3, 2008, Hamburg, Deutschland.

- Hollenbach, U. & Friesch, J., 2007a, Efficient hull forms – what can be gained?, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Hollenbach, U. & Friesch, J., 2007b, Efficient hull forms – what can be gained?, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Howell, D., & Behrends, B., 2006, A review of surface roughness in antifouling coatings illustrating the importance of cutoff length, *Biofouling* 22, 401-410.
- James, O., 2009, Les lubrifiants au régime bio, *L'Usine Nouvelle*, N° 3153, 25 juin 2009, 56-58.
- Johannesson, J., 2008, *A new age of innovation: efficiency optimization's vital role in an era of economic downturn and high fuel prices*, DK Group Netherlands BV.
- Kallio, I., Rantanen, P., Imperato, M., Antila, E., Sarjovaara, T., Larmi, M., Huhtala, K., & Liljenfeldt, G., 2007, The design and operation of the fully controllable medium-speed research engine EVE, Abstract of the paper N° 163, in : *25<sup>th</sup> CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology*, Conseil international des machines à combustion, 21-24 May, 2007, Vienna, Austria.
- Kaminis, G. S., 2007a, Environmental and lubricating protection of marine diesel engines. Part A: distilled fuels, *TANKEROperator*, August/September 2007.
- Kaminis, G. S., 2007b, Environmental and lubricating protection of marine diesel engines. Part B: scrubber technology, *TANKEROperator*, October 2007.
- Kanerva, M., 2005, Energy saving in ships, présentation de Deltamarin, Ltd., in : *Meriliikenne ja Ympäristö*, December 8-9, 2005, Hanasaari, Espoo, Finland.
- Kickulies, M., 2005, Fuel cell systems for Maritime application, in : *2<sup>nd</sup> Annual Conference on Green Ship Technology*, Lloyd's List events, 13-14 April 2005, Amsterdam, the Netherlands.
- Kolle, L., & Lien, S.-I., 2001, 'Green efforts for existing ships'. *Fuel pretreatment summary report*, Marintek report, Reference nb. 2001-238105-20511233, May 5, 2001, Norwegian Marine Technology Research Institute.
- Lehmann, D., 2007a, Improved propulsion with tuned rudder systems, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Lehmann, D., 2007b, Improved propulsion with tuned rudder systems, présentation de Becker marine systems, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Lundquist, E., 2009, Naval power. Solutions to drive tomorrow's fleet, *Marine Reporter & Engineering News*, June 2009, 64-69.
- MAN, 2007, On reduction and in service measurements of PM from large 4-stroke Diesel engines, in : *11<sup>th</sup> ETH-Conference on combustion generated nanoparticles*, 12-15 August 2007, ETH-Zentrum, Zurich, Switzerland.
- Matveev, K., 2003, Air-cavity ships are ready for a wider market, *Speed at Sea*, February 2003, 13-16.

- McGroarty, J., Schmeller, J., Hockney, R., & Polimeno, M., 2005, Flywheel energy storage system for electric start and an all-electric ship, Paper ADM001931 in : *Proceedings of the 2005 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS 2005)*, held in Philadelphia, PA (USA) on July 25-27, 2005.
- Meslin, F., & Baranger, L., 2009, Hydrogène énergie : une nouvelle opportunité pour les applications maritime et fluviale, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.
- Mewis, F., & Hollenbach, U., 2006, Special measures for improving propulsive efficiency, *NewsWave* 2006/1, 1-4.
- Mignotte, D., Lars, B., & Consonetti, C., 2009, Les différentes évolutions des turbines à gaz en propulsion navale militaire, consommation de gazole et émissions, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.
- Mirzaian, A. & Flury, G., 2009, POSE<sup>2</sup>IDON (Power Optimized Ship for Environment with <sup>2</sup>electric innovative Designs ON board) - Industrial interest and perspectives, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.
- Nijland, M., 2008, Energopac – Improving the efficiency of propulsion, *Twentyfour7*, April 2008, 45-47.
- NOC, 2009, *Environmentally friendly fuels and lubricants/Efficiency of raw material production process*, Nippon Oil Corporation, [http://www.eneos.co.jp/english/company/research\\_and\\_development/e71\\_encore\\_flub.html](http://www.eneos.co.jp/english/company/research_and_development/e71_encore_flub.html)
- Oberhokamp, F., 2007a, Diesel-electric propulsion concepts-How to match environmental and economical challenges?, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Oberhokamp, F., 2007b, Diesel-electric propulsion concepts-How to match environmental and economical challenges?, présentation de Thyssen Krupp Marine Systems, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Odru, P. (dir.), 2010, *Le stockage de l'énergie*, coll. « UniverSciences », Dunod.
- Paro, D., 2005, Technical improvements for ships, in : *Haagen-Smit Symposium. Ships, trains, and the future of goods transport*, 18-21 April, 2005, Aptos, California, USA.
- Prakash, M., Quéré, D., & Bush, J. W. M., 2008, Surface tension transport of prey by feeding shorebirds: the capillarity ratchet, *Science* 320, 931-934.
- Rabulan, J., 2008, Rolls-Royce: looking to extend influence, *Marine Reporter & Engineering News* 70(9), 24-25.
- Reyssat, M., & Quéré, D., 2006, L'effet lotus, *Pour la Science*, N° 347, septembre 2006, 34-40.
- Rosamond, J., 2008, All systems go as electric solutions power future ships, *Jane's Navy International*, May 2008.

- Sanchez, C., Arribart, H., & Giraud Guille, M. M., 2005, Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems, *Nature materials* 4, 277-288.
- Schmid, H., 2007a, Efficient propulsion for seagoing vessels, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Schmid, H., 2007b, Efficient propulsion for seagoing vessels, présentation de Wärtsilä Switzerland Ltd., in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Schmid, H., & Weisser, G., 2005, Marine technologies for reduced emissions, in : *Green Ship Technology, 2<sup>nd</sup> Annual Conference*, Lloyd's List events, April 13-14, 2005, Amsterdam, The Netherlands.
- Scott, R., 2010, Imagineering the future frigate, *Janes's Navy International* 115(7), September 2010, 10-11.
- Searle, J., & Broussely, M., 2003, Nouvelles sources d'énergie électrochimique de moyenne puissance, in : *Science et défense 2003 – Futures énergies embarquées*, 2-3 décembre 2003, Centre des hautes études de l'armement (CHEAr), 209-220.
- Semail, E., 2009, Evolution des systèmes de propulsions électriques des navires, présentation d'Arts et Métiers ParisTech, in : *Systèmes électriques pour véhicules du futur*, Journées « Electrotechnique » 2009 du Club EEA, 11-12 mars 2009, Lille, France.
- Siemens, 2006, *Siemens marine solutions: new concepts and solutions for the 'green ship'*, Reference number I&S 0906.5597e, Siemens AG, September 26, 2006.
- Spivey, D., 2007, How distillate fuel additives can benefit operators, *Marine Propulsion*, August/September 2007, 175-178.
- Thibault, J.-P., 1995, Propulsion magnétohydrodynamique en eau de mer, *Onde électrique*, vol. 75, N° 2, 19-23.
- Thibault, J.-P., Convert, D., Alémany, A., & Etay, J., 1992, Des navires pour le troisième millénaire ?, *La Recherche*, vol. 23, N° 247, octobre 1992, 1180-1182.
- Tinschmann, G., Taschek, M., Haberland, H., & Eilts, P., 2007, Combustion system development for IMO Tier 2, Abstract of the paper N° 148, in : *25<sup>th</sup> CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology*, Conseil international des machines à combustion, 21-24 May, 2007, Vienna, Austria.
- Tixador, P., 2003, Stockage d'énergie par bobine supraconductrice, in : *Science et défense 2003 – Futures énergies embarquées*, 2-3 décembre 2003, Centre des hautes études de l'armement (CHEAr), 221-229.
- Turtiainen, M., 2005, Green shipping. Meeting tighter environmental regulations while improving fuel efficiency, *ABB Review* 3/2005, 54-57.
- Van der Velden, 2009, *The EPS<sup>TM</sup> thruster*, Van der Velden® Marine Systems.
- Voith, 2008, *Voith water jet*, Voith Turbo GmbH & Co. KG.

Vonnet, M., 2008a, *Modélisation dynamique et commande d'un propulseur naval*, thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 9 décembre 2008.

Vonnet, M., 2008b, *Modélisation dynamique et commande d'un propulseur naval*, soutenance de thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 9 décembre 2008.

Wahlström, J., Karvosenoja, N., & Porvari, P., 2006, *Ship emissions and technical emission reduction potential in the Northern Baltic Sea*, Reports of Finnish Environment Institute 8, June 2006, Finnish Environment Institute.

Wärtsilä, 2008, *More efficient propulsion solutions with Energopac*, Wärtsilä Corporation.

Weisbuch, C., 2001, La peau du dauphin : un matériau-système extraordinaire, in : C. Sanchez (dir.), 2001, *Biomimétisme et matériaux*, série « Arago », N° 25, Observatoire français des techniques avancées (OFTA), OFTA Editeur et Editions Tec&Doc, 133-138.

Wheater, P., 2008a, Driving efficient propulsion, *The Naval Architect*, July/August 2008, 47-55.

Wik, C., & Hallback, B., 2007, Utilisation of 2-stage turbo charging as an emission reduction mean on a Wartsila 4-stroke medium-speed diesel engine, Abstract of the paper N° 101, in : *25<sup>th</sup> CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology*, Conseil international des machines à combustion, 21-24 May, 2007, Vienna, Austria.



## Energie et ressources

Le souci de réduire les émissions atmosphériques nocives et de limiter la dépendance aux hydrocarbures incite à rechercher des solutions alternatives aux énergies d'origine fossile ; les biocarburants, le gaz naturel, l'hydrogène, le soleil, le vent, la houle sont autant de voies explorées.

### 6.1 Biocarburants

#### 6.1.1 Définitions

Un biocarburant – désigné aussi agrocarburant – est un carburant produit à partir de matières végétales ou animales non fossiles, appelées biomasse. Il y a quatre types de biomasse (Poitrat 2009a,b) :

- la biomasse agricole, issue de cultures annuelles qui produisent les éléments de base (sucre, amidon, acides gras...) et leurs déchets (paille, rafles, coques, cannes, fanes, etc.) ;
- la biomasse lignocellulosique, agricole ou forestière, obtenue à partir de cultures annuelles (bois, sorgho...), de plantes à croissance rapide (par exemple, jatropha) ou de produits ligneux des cultures (déchets de bois, de taillis...) ;
- les déchets organiques des activités d'élevage (lisier, boues de de station d'épuration...) et les sous-produits des industries agroalimentaires (saindoux de porcs, suif de bovins et d'ovins, graisses de volailles<sup>162</sup>, graisses d'os), papetières, de transformation du bois... ;
- la biomasse provenant des algues marines, aquatiques et des micro-organismes.

La biomasse agricole, obtenue à partir de cultures dédiées, produit des biocarburants de première génération : le biodiesel est tiré des huiles végétales et de leurs esters, le bioéthanol des alcools et des éthers. Ce type de production est en compétition directe avec les cultures destinées à l'alimentation (par exemple, Chasnier 2010). Les biodiesels présentent plusieurs avantages par rapport au pétrole (non toxicité<sup>163</sup>, biodégradabilité, basse teneur en soufre, absence de molécules aromatiques,

<sup>162</sup> Voir, par exemple, Labussière (2011).

<sup>163</sup> A condition qu'ils soient obtenus dans le cadre d'une agriculture « raisonnée », notamment sans pesticides.

recyclabilité...), mais leurs effets sur les moteurs modernes équipés de filtres à particules restent encore peu connus<sup>164</sup>. D'autre part, les biodiesels base ester (obtenus par transestérification), hydrophiles, ne sont pas compatibles avec des applications marines car ils encrassent les systèmes de filtration des navires<sup>165</sup>.

La biomasse lignocellulosique produit des biocarburants de deuxième génération (Boust et al. 2008). Bien que les risques de déforestation existent, la valorisation des résidus et déchets organiques est privilégiée, limitant ainsi l'antagonisme entre l'usage alimentaire et non alimentaire.

Les biocarburants de troisième génération – hydrogène, algocarburants –, issus de la biomasse des algues ou des micro-organismes (Legrand 2010), font l'objet de travaux de recherche et de développement<sup>166</sup>.

### 6.1.2 Initiatives et projets

En France, le projet CM 1&2 (pôle de compétitivité de la région PACA) vise à mettre au point des biocarburants pour les moteurs marins existants ; les projets Marine bio fuel et Shamash (également soutenus par la région PACA) étudient respectivement l'utilisation de biocarburants totalement oléagineux et lipidiques à base de microalgues<sup>167</sup> (voir tableau 3).

A l'étranger quelques initiatives ont été identifiées.

- La société japonaise Nippon Oil Corporation (NOC) propose par exemple un ensemble de biocarburants et biolubrifiants (NOC 2009 ; cf. aussi § 5.1).
- En Europe, le projet METHAPU a pour objectif de mettre au point des carburants au méthanol (§§ 3.2 et 6.3).
- La Green Ship Initiative du Great Lakes Environmental Research Laboratory (GLERL<sup>168</sup>) a développé le B100, biodiesel de soja (100 %) utilisé par les navires fédéraux de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). De faibles émissions dans l'air, un haut pouvoir lubrifiant et une capacité à ne pas encrasser les injecteurs de moteurs caractérisent le B100 (NOAA 2006, 2007).
- Le California Institute of Technology et la société DNA2.0 (Etats-Unis) ont créé une quinzaine d'enzymes capables de dégrader la cellulose en sucres simples pour la production de bioéthanol cellulosique (ADIT 2009a).

---

<sup>164</sup> Coping with biodiesel – The new challenge, *mer*, September 2007, 18-20.

<sup>165</sup> C'est la raison pour laquelle l'US Navy poursuit ses efforts et a testé, au cours d'une année, une douzaine de biocarburants dans son laboratoire de Patuxent River (Feinman 2009).

<sup>166</sup> Pour un panorama synthétique des biocarburants et de leurs propriétés, des filières de production, des travaux réalisés dans divers pays et des futurs enjeux, voir Ballerini (2007) et Ballerini & Alazard-Toux (2011). L'état d'avancée, les enjeux et les priorités d'action sur la filière industrielle française des biocarburants sont donnés par CGDD (2009).

<sup>167</sup> Le biodiesel d'algues est une source d'énergie particulièrement intéressante, mais sa production massive reste encore un défi (Calu 2006 ; Legrand 2010).

<sup>168</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Etats-Unis ; <http://www.glerl.noaa.gov>

- Le Department of Defense (DoD, Etats-Unis) a passé un contrat avec la société Solazyme, Inc. pour la mise au point d'une production en grande quantité de son biocarburant à base d'algues, Soladiesel<sup>®</sup>F-76 (Rousseau 2009). Si les propriétés et les performances de ce biocarburant sont compatibles avec les exigences fonctionnelles militaires, l'US Navy pourra l'utiliser à bord de ses navires<sup>169</sup>.
- La firme américaine PetroAlgae a signé avec le Chili un protocole leur permettant de produire massivement et de manière tout à fait indépendante du biocarburant à partir de microalgues cultivées en étangs fermés<sup>170</sup>.

## 6.2 Gaz naturel

Le gaz naturel (principalement du méthane) peut être stocké sous forme liquide (température typique de -160 °C) ou de gaz comprimé (pression jusqu'à 250 bars). Par rapport au gasoil, le carburant gaz naturel produit 20 à 30 % de moins de gaz carbonique, les émissions de molécules azotées sont réduites de 80-90 %, et les émissions de composés soufrés et de particules sont insignifiantes<sup>171</sup>.

Avant une utilisation courante du gaz naturel liquéfié à bord des navires, plusieurs problèmes restent toutefois à résoudre. Pour des navires de grande capacité, le stockage de gaz occupe en effet un volume important, jusqu'à quatre fois celui nécessaire au stockage de carburant – problème qui ne se pose pas dans le cas des méthaniers, puisque le gaz est la ressource transportée. D'autre part, des équipements portuaires doivent être disponibles et capables d'assurer un remplissage rapide des cuves des navires, pour lesquels le séjour au port dure parfois seulement le temps d'une brève escale et n'excède pas deux heures. Il existe de plus des problèmes de sécurité, liés aux risques d'explosion des réservoirs de gaz, pour les équipages et les passagers à bord des navires, mais aussi pour le personnel à quai ; dans le cas des navires militaires, le risque d'explosion est accru lorsque les bâtiments sont pris pour cibles et soumis à de tirs de missiles ou de torpilles. Enfin, la réglementation actuelle n'autorise pas les navires propulsés au gaz naturel liquéfié à accueillir des passagers pour de longs trajets.

Le gaz naturel a servi de carburant dès la mise en service du premier navire citerne de gaz, en 1964. L'utilisation du gaz naturel sur d'autres types de bateaux, plus récente et très limitée, n'a débuté qu'en 1982 avec la mise en service de l'*Accolade II*, un navire australien de transport de graviers, puis, en 1985 et 1987, de deux petits ferries (voitures et passagers) canadiens, en 2000 d'un ferry norvégien (capacité de 100 véhicules) et en 2007 de cinq ferries norvégiens – notamment le *Begensfjord*, d'une longueur de 130 m et d'une capacité d'accueil de 590 passagers (Einang 2007). Depuis le milieu des années 2000, d'autres initiatives ont été prises<sup>172</sup>.

- Les premiers navires au monde (132,8 m de long, 5600 tonnes) utilisant seulement le gaz naturel liquéfié ont été commandés par la compagnie norvégienne Sea-Cargo AS et seront livrés en

<sup>169</sup> Voir aussi O'Rourke (2006) sur la stratégie de l'US Navy pour réduire sa dépendance aux hydrocarbures.

<sup>170</sup> <http://energiedelamer.blogspot.com/2010/04/petroalgae-vend-une-license.html>

<sup>171</sup> Les avantages du gaz naturel liquéfié et ses modes de production sont décrits par exemple par van der Gaag (2008, 2009).

<sup>172</sup> Svensen (2008) observe que l'utilisation du gaz naturel permettra d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ; les piles à combustibles présentent aussi une solution alternative aux hydrocarbures. D'autre part, He-ping (2008) estime que l'utilisation d'un moteur au gaz plutôt qu'au gasoil peut permettre d'économiser 35 % sur le coût du carburant et réduire *de facto* les émissions atmosphériques.

2010. Ils assureront des opérations de transport de marchandises dans le nord de l'Europe (Baltique, Norvège, Grande-Bretagne). Rolls-Royce est responsable de la conception des navires et de la fourniture des équipements essentiels<sup>173</sup>.

- En France, le projet Eoseas de STX France (tableau 4) intègre une centrale au gaz naturel pour faire fonctionner des générateurs qui assureront l'alimentation en électricité et la production de chaleur et de froid. D'autre part, au début de l'année 2011, STX France et Brittany Ferries ont initié une collaboration sur le projet Power Efficient GAS Innovative Ship (PEGASIS), destiné à développer un ferry équipé d'un système propulsif au gaz naturel liquéfié<sup>174</sup>.
- Pour étendre sa gamme de produits, Wärtsilä propose désormais des moteurs hybrides fuel-gaz qui peuvent équiper des navires de faible à fort tonnage tels, par exemple, des remorqueurs (Pagni 2008), des unités de transport, de stockage et de ravitaillement de gaz naturel (Ehrström 2005) ou des navires de transport de gaz naturel (comme le *M32* et *N32* de Gaz de France ; cf. Paro 2005<sup>175</sup>). En outre, Wärtsilä et Aker Yards se sont associés pour concevoir un navire de croisière (300 m de long, 40 m de large, 10000 tonnes) équipé d'une chaufferie duale diesel-gaz naturel liquéfié (Berisa 2007 ; Levander 2007a,b ; Levander 2008).
- La société Hamworthy Combustion a mis au point un dispositif de réduction (d'au moins 80 %) des émissions en NO<sub>x</sub> issues des moteurs au gaz naturel (Price 2008).
- Mitsui O.S.K. Lines, Ltd. et CleanAir Logix, Inc. ont terminé les tests d'un système de production de puissance à partir de gaz naturel liquéfié. Ce système s'adapte à de multiples fréquences et tensions de fonctionnement<sup>176</sup>.

## 6.3 Hydrogène et piles à combustible

Une pile à combustible fonctionne selon le principe de l'électrolyse inverse, découvert en 1838 par le suisse Christian Friedrich Schoenbein : lorsque de l'hydrogène et de l'oxygène sont mis en contact, leur combinaison forme de l'eau et s'accompagne d'une génération de courant électrique et d'un dégagement de chaleur. En 1839, l'anglais William Robert Grove perçoit l'intérêt de cette découverte pour produire de l'énergie électrique et, entre 1842 et 1844, il réalise la première pile à combustible hydrogène-oxygène (Bento 2010 ; Lucchese 2010). Les piles à combustible présentent plusieurs avantages pour les navires : rendement électrique élevé, généralement supérieur à celui d'un moteur diesel ; faibles émissions de carbone et composés soufrés ; absence de rejets d'azote ; discrétion acoustique ; absence de vibration ; faible signature infrarouge...

Toutefois, plusieurs obstacles freinent le développement commercial des piles à combustible, en particulier leur coût élevé, la difficulté de retraitement des piles en fin de vie, le manque d'industriels pour assurer la production et la maintenance des équipements, le déficit de formation des équipages et

---

<sup>173</sup> First ever LNG-fueled cargo ships, *Maritime Reporter & Engineering News* 70(11), 18 (2008).

<sup>174</sup> STX France et Brittany Ferries s'allient pour concevoir un navire propulsé au GNL, *Mer et Marine*, 24 avril 2011, <http://www.meretmarine.com/article.cfm?id=115682>

<sup>175</sup> Ainsi que : Thijssen, B., *Efficient and environmentally friendly machinery systems for LNG carriers*, Wärtsilä technical paper, <http://www.wartsila.com>

<sup>176</sup> Enterprise boldly goes green, *The Naval Architect*, January 2009, 44.

le manque de retour d'expérience. Mais les principaux inconvénients des piles à combustible sont la production de l'hydrogène<sup>177</sup>, la sécurité de stockage et le type de stockage<sup>178</sup> ; ce dernier occupe en effet un volume important, parfois difficilement compatible avec la place disponible à bord des navires.

Les principaux types de piles à combustible (tableau 12) utilisent un électrolyte à oxyde solide (*solid oxide fuel cell*, SOFC), à carbonate fondu (*molten carbonate fuel cell*, MCFC), à acide phosphorique (*phosphoric acid fuel cell*, PAFC) ou à membrane à échange de protons (*proton exchange membrane fuel cell*, PEMFC ; *direct methanol fuel cell*, DMFC). Les deux types généralement adoptés pour le domaine naval sont les piles à combustible PEMFC et SOFC. Une pile à combustible produit de l'électricité avec un rendement typique de l'ordre de 50 %.

**Tableau 12.** Principaux types de piles à combustible.  
**Table 12.** *Main types of fuel cells* (Fauvarque 2001 ; Karst 2009).

Type de pile	Température de fonctionnement (°C)	Electrolyte	Principales applications
Alcaline (AFC)	60-80	KOH (aqueux)	Spatial
Acide phosphorique (PAFC)	180-220	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Cogénération
Méthanol (DMFC)	60-100	Membrane polymère conductrice de protons	Téléphonie mobile
Carbonate fondu (MCFC)	600-660	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> et K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> fondus dans une matrice LiAlO <sub>2</sub>	Cogénération ; production centralisée d'électricité
Oxyde solide (SOFC)	700-1000	Céramiques Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et ZrO <sub>2</sub>	Cogénération ; production centralisée d'électricité ; automobile
Membrane à échange de protons (PEMFC)	60-100	Membrane polymère conductrice de protons (de type Nafion™)	Automobile ; téléphonie mobile ; cogénération ; marine

<sup>177</sup> L'hydrogène est obtenu principalement par reformage de combustibles fossiles, par électrolyse de l'eau ou par gazéification de la biomasse (par exemple, Alleau 2007 ; Meslin & Baranger 2009).

<sup>178</sup> L'hydrogène peut être stocké selon divers modes, par exemple sous forme gazeuse (sous une pression de plusieurs centaines de bars) ou liquide (à une température d'environ -250 °C), sous forme d'hydrures métalliques ou complexes, adsorbé par du charbon actif, des nanotubes ou des nanofibres de carbone, emprisonné dans des molécules de type fullerène.

Les premières piles à combustible navales, fournies par Siemens, ont été utilisées au début des années 2000, à bord de sous-marins allemands type U-212 (9 piles PEMFC de 34 kW chacune, alimentées par de l'hydrogène liquéfié)<sup>179</sup>.

A la demande de la San Francisco Bay Area Water Transit Authority, la conception et l'architecture d'un ferry expérimental, alimenté en électricité par des piles à combustible, ont été proposées par McMullen (2003). Par ailleurs, une analyse des émissions gazeuses de bateaux pourvus de piles à combustible (MCFC, SOFC et PEMFC) a été réalisée par Altmann et al. (2004) pour évaluer la réduction des impacts environnementaux par rapport aux moteurs diesel. Prochainement, Bureau Veritas prévoit la publication d'un guide pour l'utilisation des piles à combustible dans le domaine naval<sup>180</sup>.

Plusieurs projets développent actuellement des piles à combustibles destinées à être embarquées sur des navires de surface (Guignot & Larrieu 2009 ; Laursen 2009a<sup>181</sup>).

- La Mission Hydrogène a débuté fin 2005 dans la région des Pays de la Loire. Un bateau de 6 m de long, pour des activités de loisir, intègre une pile à combustible de 1,2 kW et un stock d'hydrogène pour 8 h d'autonomie. Une navette à passagers est à l'étude pour la traversée de l'Erdre à Nantes. La production d'hydrogène par des éoliennes offshore et l'installation de piles à combustible à bord de bateaux de pêche est un autre projet de la Mission Hydrogène (Meslin & Baranger 2009).
- Des partenaires publics et privés<sup>182</sup> ont fait construire un navire destiné à des promenades dans les calanques (Bouches-du-Rhône). Dans ce projet, baptisé Perseis, une motorisation hybride (pile à combustible pour sortir du port et dans les calanques, et moteur thermique en pleine mer) est prévue. Deux piles à combustible de type PEMFC de 25 kW chacune seront alimentées à l'hydrogène et à l'oxygène purs. Ces gaz, produits par électrolyse, à quai et durant la nuit, seront stockés sous 200 à 400 bars. L'utilisation d'hydrogène à bord des navires est actuellement interdite, mais le consortium espère faire évoluer la législation en cours et obtenir des dérogations pour effectuer des essais au début de 2012<sup>183</sup>.
- SMART-H<sub>2</sub> (*Sustainable Marine and Road Transport, Hydrogen in Iceland*), piloté par Icelandic New Energy, Ltd.<sup>184</sup>, est un vaste programme islandais qui vise à une utilisation généralisée de l'hydrogène à l'horizon de l'année 2050 (Skúlason & Maak 2007). Le ferry *Elding*, d'une capacité

---

<sup>179</sup> Cell door opens to cleaner and more efficient power, *Marine Propulsion*, April/May 2007, 85-86. Siemens développent également des piles SOFC et estime que des générateurs de forte puissance (1 MW) pourraient être opérationnels en 2012 (voir : Fuel cells take small steps toward reality, *The Naval Architect*, March 2007, 24-26).

<sup>180</sup> Fuel cell guidelines for shipping, *mer*, April 2009, 38 ; Can fuel cells be a realistic powering option?, *Marine Propulsion*, August/September 2009, 51-54.

<sup>181</sup> Mais aussi : Cell door opens to cleaner and more efficient power, *Marine Propulsion*, April/May 2007, 85-86 ; Fuel cell for future power generation, *mer*, November 2007, 16-19 ; Countdown to seagoing debuts for fuel cells, *Marine Propulsion*, April/May 2008, 55-56. D'autre part, Svensen (2008) indique que la production du kilowatt coûte plus du double avec une pile à combustible qu'avec un moteur diesel. Le concept de navire du futur, 22 CF (22<sup>nd</sup> Century Frigate), du ministère de la défense britannique envisage des piles à combustible (hydrogène ou méthanol) comme source de puissance principale (Scott 2010).

<sup>182</sup> Croisières Marseille calanques, Arts et métiers ParisTech, Helion, Transdev Cap Provence.

<sup>183</sup> Voir : Des piles à combustible pour préserver les calanques, *Environnement Magazine*, N° 1698, juin 2011, 62.

<sup>184</sup> [http://www.newenergy.is/en/icelandic\\_new\\_energy/](http://www.newenergy.is/en/icelandic_new_energy/)

de 150 passagers, possède ainsi des moteurs auxiliaires à base de piles PEMFC (puissance de 10 à 15 kW), conçus par H2 Logic au Danemark ; l'hydrogène est stocké dans quatre réservoirs maintenus sous 350 bars<sup>185</sup> ; une période de tests de 18 mois est prévue à partir de juin 2008 (Siuru 2007 ; Henderson 2008).

- Le projet européen METHAPU (*Validation of renewable methanol based auxiliary power system for commercial vessels*), qui s'étend sur la période 2006-2010, vise à évaluer la maturité des technologies basées sur le méthanol et à valider le fonctionnement des piles SOFC utilisant ce carburant à bord des navires commerciaux (§ 3.2). Les impacts environnementaux à court et long termes et la compatibilité de ces technologies avec la réglementation sont également des axes de recherche de ce projet piloté par Wärtsilä<sup>186</sup> (Methapu 2007 ; Motor Ship 2007 ; Öster 2009 ; Wärtsilä 2009). D'autre part, Wärtsilä a conçu une pile prototype SOFC de 20 kW alimentée en méthanol et installée sur l'*Undine*, un navire roulier fourni par Wallenius Marine. L'objectif est de commercialiser des générateurs de 50 à 500 kW<sup>187</sup>. Au-delà du méthanol, l'utilisation du gaz naturel et du bio-gaz est envisagée.
- FellowSHIP<sup>188</sup> est un autre projet européen, initié en 2003 et piloté par Det Norske Veritas (DNV). Une pile MCFC de 320 kW, alimentée au gaz naturel liquéfié, a été réalisée par le groupe allemand MTU CFC Solutions GmbH<sup>189</sup> et montée à bord du *Viking Energy*, un ravitailleur de plateformes offshore<sup>190</sup>. La réalisation d'un démonstrateur de 4 MW est envisagée.
- Dans le cadre du programme Zemships, supporté financièrement par l'Union européenne et qui a débuté en 2006, la navette de transport intérieur *FCS Altermasser* (26 m de long et 5 m de large ; capacité de 100 personnes) navigue depuis l'été 2008 sur le lac Alster et ses canaux, à Hambourg (Allemagne). La période de test est de deux ans. Elle est équipée de deux piles à combustible PEMFC de 48 kW chacune, fabriquées par Proton Motor Fuel Cell GmbH. L'hydrogène gazeux est stocké sous 350 bars (Mertens 2008 ; Müller-Remer 2008 ; Sattler 2008 ; Stolper 2008 ; Vogler 2008<sup>191</sup>).
- Le remorqueur hollandais *Green Tug* produit son courant électrique à l'aide de deux piles PEMFC de 100 kW fabriquées par la société hollandaise NedStack Fuel Cell technology B.V. L'hydrogène est maintenu gazeux sous 430 bars (Wijismuller 2008<sup>192</sup>).

---

<sup>185</sup> Le stockage de l'hydrogène à l'état solide est possible, mais des recherches et développements sont nécessaires pour que les technologies atteignent leur maturité (Osborn et al. 2009).

<sup>186</sup> METHAPU est un consortium qui associe Wärtsilä (Finlande), Wallenius Marine (Suède), Lloyd's Register (Royaume-Uni), l'université de Gênes (Italie) et Det Norske Veritas (Norvège) ; <http://www.methapu.eu/Oskari2.aspx?cmd=1>

<sup>187</sup> Wärtsilä collabore avec un partenaire danois, Topsoe. Voir : Ecotech offers environmental solutions, *The Naval Architect*, January 2009, 36.

<sup>188</sup> Parmi les autres participants figurent Wärtsilä Automation Norway, Eidesvik Offshore, Vik-Sandvik et MTU CFC Solutions (Tronstad 2004 ; Sandaker 2006).

<sup>189</sup> <http://www.fuelcellmarkets.com>

<sup>190</sup> Une pile MCFC similaire (de MTU Onsite Energy) a été installée récemment sur le *Viking Lady* ; une période de tests d'environ dix mois a débuté (voir : HotModule fuel cell sets sail on OSV, *Marine Propulsion*, February/March 2010, 39-40).

<sup>191</sup> Voir également : ZemShip first fuel cell-driven passenger ship, *Marine Reporter Engineering News*, May 2009, 33 ; *Zemships – One hundred passengers and zero emissions*, document Zemships de 2008.

<sup>192</sup> Voir aussi : Fuel cell guidelines for shipping, *mer*, April 2009, 38.

- Depuis le milieu des années 1990, l'US Navy a engagé des travaux sur les piles à combustible (Hoffman 2001 ; Kickulies 2005 ; ONR 2008). Une frégate en projet sera propulsée par pods, alimentés en courant électrique par piles PEMFC. L'ONR a choisi la technologie MCFC dans ses projets de développement de piles à combustible, dont l'hydrogène sera produit à partir de gasoil. L'ONR étudie également les mécanismes de conversion de la décomposition de micro-organismes marins en énergie électrique (ONR 2010).

## 6.4 Soleil

Des réalisations et projets qui incluent des panneaux solaires ont déjà été cités (§ 3.4 et tableau 4). D'autres expériences, allemande, japonaise et française, sont à mentionner<sup>193</sup>.

- Sur le lac Alster à Hambourg (Allemagne), la navette de transport intérieur *Altersonne* (26 m de long, 5 m de large ; capacité de 100 personnes) fonctionne en exploitant l'énergie solaire grâce à des panneaux photovoltaïques (Müller-Remer 2008).
- Le cargo roulier japonais de 60000 tonnes de l'armateur NYK Line (tableau 4) a été équipé de panneaux photovoltaïques. Des tests en environnement réel viennent de se terminer (ADIT 2009b) et l'armateur et l'affrêteur affirment vouloir continuer le développement de cette technologie.
- Le trimaran français *Solar Odyssey* (18 m de long pour une largeur maximale de 12 m) va commencer une première phase de tests de navigation en avril 2010. Ce multicoque, conçu par Lemer Pax (Nantes), dispose de 110 m<sup>2</sup> de panneaux solaires, et sa propulsion et sa gouverne sont assurées par un safran intégrant moteur électrique et hélice dans un pod torpille<sup>194</sup>.
- Le projet PlanetSolar, initié par le suisse R. Domjan, consiste à réaliser un catamaran d'une longueur de 30 m, équipé de quatre moteurs électriques et deux hélices semi-immergées. Ce prototype de démonstration technologique de 70 tonnes (dont 12 tonnes de batteries au lithium), couvert par 500 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques standard du marché<sup>195</sup> (mais néanmoins triés et sélectionnés) – ceux situés sur les extrémités latérales étant rétractables pour faciliter l'accès en zone portuaire –, sera armé par deux personnes (R. Domjan et G. d'Aboville). L'objectif est de naviguer à une vitesse moyenne de 7,5 nœuds autour du monde. Une mise à l'eau en 2010 et des essais au large des côtes européennes ont précédé le départ pour un tour du monde, qui devrait se terminer en 2012 ; des données d'environnement de zones maritimes peu fréquentées seront recueillies et transmises à Météo France et à l'institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER), partenaires du projet. Dans sa version commerciale (larges volumes à bord), ce navire pourrait transporter jusqu'à 60 passagers (Matez & Chapon 2010 ; voir également Domjan & Jaunin 2010).

---

<sup>193</sup> Scott (2010) note également que les superstructures du navire concept du futur, 22 CF (22<sup>nd</sup> Century Frigate), du ministère de la défense britannique seront recouvertes de panneaux photovoltaïques.

<sup>194</sup> *Solar Odyssey, trimaran électro-solaire*, Lemer Pax innovative. Voir également : *Le trimaran Solar Odyssey exposé à Lorient* (<http://www.enerzine.com/1036/9546+le-trimaran-solar-odyssey-expose-a-lorient+.html>).

<sup>195</sup> 1 m<sup>2</sup> de panneau photovoltaïque permettra de produire jusqu'à 150 W, lorsque le soleil sera au zénith ; <http://www.planetsolar.org>

Toutefois, c'est la société australienne Solar Sailor Holdings Ltd. (SSHL)<sup>196</sup> qui apparaît la plus avancée dans l'exploitation de l'énergie solaire (*cf.* aussi § 3.4). Elle propose une gamme de générateurs de puissance hybrides qui équipent déjà des navettes portuaires ou ferries côtiers d'une capacité de transport de 100 à 600 passagers (Solarsailor 2007 ; Laursen 2009b)<sup>197</sup>.

## 6.5 Vent

Jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, les navires étaient totalement ou partiellement propulsés par leurs voiles. Avec l'apparition des turbines à vapeur et des moteurs diesel, les voiles furent progressivement délaissées jusqu'à disparaître presque totalement après la seconde guerre mondiale. Un timide regain d'intérêt apparut à la fin des années 1970, avec l'augmentation du prix du pétrole. Actuellement, la limitation des émissions gazeuses des navires suscite un nouvel attrait pour l'énergie éolienne. Plusieurs techniques permettent de capter la force du vent, notamment des voiles souples ou rigides, des rotors éoliens, des ailes de traction (STC 2007)<sup>198</sup>.

Les sociétés allemande SkySails GmbH & Co. KG (Skysails 2008a,b)<sup>199</sup> et américaine KiteShip Corp.<sup>200</sup> fournissent des ailes de traction (*kites*), et la société britannique Shadotec plc<sup>201</sup> a conçu des voiles orientables contrôlées par ordinateurs.

Deux partenariats ont été récemment créés :

- une entreprise conjointe associe les allemands SkySails GmbH & Co. KG et Zeppelin Power Systems GmbH & Co. KG pour développer et fournir des systèmes hybrides diesel-éoliens<sup>202</sup> ;
- un programme de recherche commun entre le britannique Shadotec plc et les norvégiens Wilhelmsen Marine Consultans (WMC) et Petroleum Geo-Services AS (PGS) a été établi pour développer et étendre le potentiel commercial du système Shadotec à une gamme d'applications marines<sup>203</sup>.

Quelques navires civils et militaires sont – ou seront – équipés de dispositifs éoliens pour compléter le système propulsif principal<sup>204</sup>.

- Le navire usine gros porteur *MS Beluga SkySails* (140 m de long), appartenant à la compagnie Beluga Shipping GmbH basée à Brême (Allemagne) et utilisé par DHL Global Forwarding, est

---

<sup>196</sup> <http://www.solarsailor.com>

<sup>197</sup> Voir encore : Circle Line to go solar, *Marine News*, March 2008, 8, ainsi que l'enregistrement vidéo disponible sur le site Internet de Solar Sailor.

<sup>198</sup> Une voile de traction peut présenter des risques pour l'environnement proche (circulation aérienne, navires à proximité), mais aussi pour le navire lui-même si la voile vrille. Ces risques ont été examinés par Pettersen Stavdal & Mestl (2008).

<sup>199</sup> <http://www.skysails.com> ; voir également l'enregistrement vidéo de SkySails.

<sup>200</sup> <http://www.kiteship.com>

<sup>201</sup> <http://www.shadotec.com/index.html>

<sup>202</sup> SkySails have lift off, *The Naval Architect*, January 2009, 38.

<sup>203</sup> Wind power to set sail again, *mer*, July/August 2008, 19-20.

<sup>204</sup> Des ailes de traction sont également prévues pour apporter une énergie complémentaire au navire conceptuel, 22 CF (22<sup>nd</sup> Century Frigate), du ministère de la défense britannique (Scott 2010).

pourvu d'une voile SkySails de 320 m<sup>2</sup> ; selon la force du vent, les coûts de carburant pourraient être réduits de 10 à 35 % (DHL 2008)<sup>205</sup>.

- Le concept de paquebot innovant Eoseas de STX (tableau 4) dispose de 12000 m<sup>2</sup> de voiles soutenues par cinq mâts.
- Une partie de l'énergie nécessaire à la propulsion du navire en projet E-Ship 1 (130 m de long), conçu par l'allemand Enercon GmbH, sera fournie par des rotors Flettner (Enercon 2008 ; Schiess 2009)<sup>206</sup>. Ce type de propulseur fonctionne avec l'effet Magnus : un cylindre en rotation sous l'action du vent crée une force latérale perpendiculaire à la direction du vent, capable de mouvoir le bateau<sup>207</sup>.
- La compagnie de transport maritime à la voile (CTMV) a commandé en 2007 des bateaux à voiles pour assurer le transport de vins et de denrées par cabotage, de la France vers l'Europe du nord (CTMV est basée à Dublin, en Irlande, et une implantation est prévue à Bordeaux)<sup>208</sup>. Les navires auront une longueur de 47,7 m, une largeur de 10 m et une capacité de charge de 200 tonnes. L'essentiel de la navigation sera réalisée à la voile (75 % du temps), à une vitesse de 6 à 14 nœuds (l'optimum est d'environ 11 nœuds). Armés de 7 membres d'équipage, avec une capacité d'accueil de 6 passagers en cabine double, ces navires auront une coque en acier et des superstructures en alliage d'aluminium ; des batteries et un groupe électrogène de 30 kW fonctionnant au biodiesel permettront d'effectuer les manœuvres difficiles à la voile (Groizeleau 2007 ; Matez & Chapon 2010).
- Projet du bureau d'étude Avel Vor Technologie (AVT)<sup>209</sup>, labellisé en février 2007 par le pôle mer Bretagne, le bateau laboratoire *Grand Largue*, ancien chalutier en bois de 16 m de long pour 65 tonnes, a été gréé en goélette avec deux mâts de 13 m sur lesquels sont installées trois voiles auxiliaires (surface totale de 85 m<sup>2</sup>). Le positionnement de ces voiles est automatique et optimisé (par apprentissage à partir de méthodes issues de l'intelligence artificielle) en fonction des conditions de vent. Une approche multicritère permet d'adapter en temps réel la route du navire ; l'asservissement du moteur propulsif à la position des voiles lui assure un rendement maximum et réduit la consommation de carburant. Avec 15 à 20 nœuds de vent et une vitesse du navire de 8 nœuds, l'économie de carburant peut atteindre 35 %. Un remorqueur de 21 m de long est équipé de ce système depuis 2009.
- Pour réduire ses coûts de carburant dans le cadre du démantèlement de bases militaires américaines stationnées en Europe, le Military Sealift Command de l'US Navy devrait équiper ses navires de transport d'un système SkySails, similaire à celui du *MS Beluga SkySails* (MSC 2008).

---

<sup>205</sup> Avec seulement cinq exemplaires de voiles SkySails vendus en 10 ans, cette technique ne semble toutefois pas encore attirer les utilisateurs (Un cerf-volant à la proue d'un navire, *Industrie & Technologies*, N° 933, mai 2011, 8).

<sup>206</sup> Voir encore : Innovative 'E-Ship 1' launched in Kiel, *Maritime Reporter & Engineering News* 70(9), 58 (2008). Pour une vue d'artiste d'un tanker doté de rotors Flettner, voir Bui (2009).

<sup>207</sup> En 1852, le physicien allemand Heinrich Gustav Magnus découvrit ce phénomène, désigné « effet Magnus » ; au début des années 1920, l'allemand A. Flettner fut le premier à expérimenter l'effet Magnus pour propulser un navire.

<sup>208</sup> <http://www.ctmv.eu>

<sup>209</sup> <http://www.avel-vor.fr/societe.php>

- L'US Navy va lancer une nouvelle flotte de trimarans (15 m de long) de surveillance côtière sans pilote. Une voile rigide, associée à des ailerons et volets élévateurs, permettra d'adapter continuellement la vitesse du bateau (Matthews 2009).

## 6.6 Houle

Construit par Tsuneishi Shipbuilding Company, le catamaran japonais en alliage d'aluminium *Suntory Mermaid II* (9,5 m de long, 3,5 m de large, 3 tonnes) est équipé d'un jeu de panneaux mobiles qui récupèrent l'énergie hydrolienne des oscillations verticales des vagues pour la convertir en puissance motrice, tel le mouvement d'un dauphin. Le navire est également équipé de panneaux solaires et d'une voile. Le *Suntory Mermaid II* a parcouru environ 7000 km (Hawaïi-Japon) en 111 jours à la vitesse moyenne de 1,5 nœud (Geoghegan 2008 ; Richard 2008)<sup>210</sup>. Selon DCNS (2007), le projet Orcelle (§ 3.5 et tableau 4) devrait intégrer un système d'exploitation de l'énergie hydrolienne. Cela sera probablement le cas également du concept de navire du futur, 22 CF (22<sup>nd</sup> Century Frigate), du ministère de la défense britannique (Scott 2010).

## Références

ADIT, 2009a, *Caltech et DNA2.0 ont mis au point des enzymes performantes pour la production de bioéthanol cellulosique*, Agence pour la diffusion de l'information technologique, BE Etats-Unis 160, 6 avril 2009, <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/58528.htm>

ADIT, 2009b, *Fin de voyage pour un navire marchand équipé de systèmes photovoltaïques*, Agence pour la diffusion de l'information technologique, BE Japon 513, 11 septembre 2009, [http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/060/60439\\_vi.htm](http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/060/60439_vi.htm)

Alleau, T., 2007, *L'hydrogène, énergie du futur ?*, coll. « Bulles de sciences », EDP Sciences.

Altmann, M., Weindorf, W., & Weinberger, M., 2004, *Life cycle analysis results of fuel cell ships. Recommendations for improving cost effectiveness and reducing environmental impacts*, Final Report, DTR-4.5-LBST-05.2004 Rev. 2, 21 July 2004.

Ballerini, D., 2007, *Le plein de biocarburants ? Enjeux et réalité*, Editions Technip.

Ballerini, D., & Alazard-Toux, N., 2011, *Les biocarburants. Etat des lieux, perspectives et enjeux du développement*, Editions Technip.

Bento, N., 2010, *La transition vers une économie de l'hydrogène : infrastructures et changement technique*, thèse de doctorat, Université de Grenoble, Grenoble, France, 12 mars 2010.

---

<sup>210</sup> Des descriptions et schémas sont également donnés dans : Bateau navigue grâce aux vagues, 31 mars 2008 ; How the Suntory Mermaid II works, *Star-Bulletin* ; The wave powered boat, *Marine News*, September 2008, 42.

- Berisa, M., 2007, New cruise ship concept from Wärtsilä, *Twentyfour* 7(2), 51-54.
- Boust, F., Girard, P., & Van de Steene, L., 2008, Biocarburants de seconde génération, document RE 110-1/110-13, in : *Techniques de l'ingénieur*, 10 octobre 2008.
- Bui, Y., 2009, Vers des navires toujours plus économes, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.
- Calu, G., 2006, *Biodiesel et micro-algues*, 1<sup>er</sup> février 2006, [http://www.spectrosciences.com/print\\_article.php3?id\\_article=26](http://www.spectrosciences.com/print_article.php3?id_article=26)
- CGDD, 2009, *Etude « Filières vertes » : les filières industrielles stratégiques de la croissance verte*, Commissariat général au développement durable, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, octobre 2009.
- Chasnier, J., 2010, Les agrocarburants accaparent les terres africaines, *Environnement Magazine Hebdo*, N° 67, lundi 6 septembre 2010, 7.
- DCNS, 2007a, *Les émissions de gaz du navire*, DCNS, juillet 2007.
- DHL, 2008, *Transport écologique : un navire à propulsion par le vent pour DHL*, 26 février 2008, <http://www.physicalsupplychains.com>
- Domjan, R., & Jaunin, R., 2010, *PlanetSolar*, Editions Favre.
- Einang, P., 2007, A gaseous evolution, *Propulsion*, September 2007, 50-56.
- Enercon, 2008, *Christening and launch of 'E-Ship' in Kiel*, Enercon GmbH press release, August 1<sup>st</sup>, 2008.
- Fauvarque, J.-F., 2001, Les batteries et piles dans un environnement durable, in : Y. Michaux (dir.), 2001, *Qu'est-ce que les technologies ?*, série « Université de tous les savoirs », vol. 5, Editions Odile Jacob, 297-309.
- Feinman, M., 2009, Navy biofuels. U.S. Navy testing everything from algae to animals fats, *Biofuels Journal* 7(4), July/August 2009, 57.
- Geoghegan, J., 2008, *Wave runner: a new propulsion system for boats ditches the diesel*, February 22, 2008, <http://www.popsci.com/gear-gadgets/article/2008-02/wave-runner>
- Groizeleau, V., 2007, Transport maritime : des français lancent une flotte de voiliers marchands, *Mer et Marine*, 25 juin 2007, [http://www.meretmarine.com/article\\_imprimer.cfm?id=105089](http://www.meretmarine.com/article_imprimer.cfm?id=105089)
- Guignot, Y., & Larrieu, P.-Y., 2009, Piles à combustible : bientôt sur les navires ?, *Le Monde Maritime*, avril/mai 2009, 24-25.
- Henderson, K., 2008, Industry engagement reduces fuel and other stresses, *Marine Propulsion*, August/September 2008, 217-218.

- He-ping, H., 2008, *The development trend of green ship building technology*, Guangzhou Shipyard International Company, Ltd., 13 december 2008.
- Karst, N., 2009, *Gestion de l'eau dans les micropiles à combustible*, thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, 4 septembre 2009.
- Kickulies, M., 2005, Fuel cell systems for Maritime application, in : *2<sup>nd</sup> Annual Conference on Green Ship Technology*, Lloyd's List events, 13-14 April 2005, Amsterdam, the Netherlands.
- Labussière, M., 2011, Des paysans de Dordogne roulent à la graisse de canard, *Le Monde*, mardi 14 juin 2011, 10.
- Laursen, W., 2008a, Treatment systems meet tougher discharge rules, *Marine Propulsion*, August/September 2008, 163-164.
- Laursen, W., 2009b, Solar hybrids get down to business, *Marine Propulsion*, April/May 2009, 67-68.
- Legrand, J., 2010, Les micro-algues fourniront-elles un jour le carburant de nos véhicules ?, in : *Energies à volonté ! Vers des ressources propres et renouvelables*, *Dossier Pour la science*, N° 69, octobre-décembre 2010, 62-63.
- Levander, O., 2007a, Gas-fuelled plant drives greener cruising, *Marine Propulsion*, August/September 2007, 80-82.
- Levander, O., 2007b, Cruising on gas, *mer*, May 2007, 54-57.
- Levander, O., 2008, Alternative fuels for ships, présentation de Wärtsila, in : *Hållbara Transporter 2008*, October 14, 2008, Stockholm, Sweden.
- Lucchese, P., 2010, L'hydrogène est-il incontournable ?, in : *Energies à volonté ! Vers des ressources propres et renouvelables*, *Dossier Pour la science*, N° 69, octobre-décembre 2010, 112-117.
- Matez, R., & Chapon, Y., 2010, *ECONAV – Journée thématique « Les bateaux du futur », 5 mars 2010*, compte rendu, Direction générale de l'armement.
- Matthews, W., 2009, Sailorless sailboats – Harbor wing tests long-endurance C4ISR catamaran, *Defense News* 24(34), 56.
- McMullen, 2003, *Development of a hybrid fuel cell ferry*, Prepared by John J. McMullen Associates, Inc. for Water Transit Authority, August 21, 2003.
- Mertens, A., 2008, Fuel cell systems for zero emission ships: the Zemships propulsion system and beyond, présentation de Proton Motor Fuel cell GmbH, in : *First 'Zemships – Zero emission ships' Conference*, October, 22, 2008, Hamburg, Germany.
- Meslin, F., & Baranger, L., 2009, Hydrogène énergie : une nouvelle opportunité pour les applications maritime et fluviale, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.

- Methapu, 2007, *Validation of renewable methanol based auxiliary power system for commercial vessels*, 24 May 2007, <http://www.methapu.eu/Oskari2.aspx?cmd=1>
- MSC, 2008, *U.S. Navy charters world's first kite-powered cargo ship*, Military Sealift Command Public Affairs press release, October 6, 2008.
- Motor Ship, 2007, Methanol as an alternative fuel, *The Motor Ship*, January 2007, 95.
- Müller-Remer, G., 2008, Construction and design of Zemships and first – Operation experiences, présentation de ATG Alster-Touristik GmbH, in : *First 'Zemships – Zero emission ships' Conference*, October, 23, 2008, Hamburg, Germany.
- NOAA, 2006, *NOAA Green Ship Initiative. Development of biodiesel and bio-products in marine applications*, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce, August 2006.
- NOAA, 2007, Up close: NOAA's Green Ship Initiative led by Dennis Donahue and GLERL's ship operations group, *NOAA News Online (Story 231)*, August 23, 2007.
- NOC, 2009, *Environmentally friendly fuels and lubricants/Efficiency of raw material production process*, Nippon Oil Corporation, [http://www.eneos.co.jp/english/company/research\\_and\\_development/e71\\_encore\\_flub.html](http://www.eneos.co.jp/english/company/research_and_development/e71_encore_flub.html)
- ONR, 2008, *Fuel cell program*, ONR program code 33, Office of Naval Research, August 2008.
- ONR, 2010, *From bacteria to electricity: the future of green energy*, Press release, April 19, 2010, Office of Naval research.
- O'Rourke, R., 2006, *Navy ship propulsion technologies: options for reducing oil use – Background for Congress*, updated December 11, 2006, order code RL33360, Congress Research Service Report for Congress.
- Osborn, W., Markmaitree, T., Shaw, L. L., Ren, R., Hu, J., Kwak, J. H., & Yang, Z., 2009, Solid-state hydrogen storage: storage capacity, thermodynamics, and kinetics, *JOM* 61(4), 45-51.
- Öster, H., 2009, Onboard fuel cell: opens the way to reduced emissions, *Twentyfour* 7(3), 33-36.
- Pagni, J., 2008, New, greener LNG TUG concept, *Twentyfour* 7(3), 64-65.
- Paro, D., 2005, Technical improvements for ships, in : *Haagen-Smit Symposium. Ships, trains, and the future of goods transport*, 18-21 April, 2005, Aptos, California, USA.
- Pettersen Stavdal, T. & Mestl, T., 2008, Reduction of risks from ships kites through attention zones, *The Motorship*, January 2008, 32-33.
- Poitrat, E., 2009a, Biocarburants, document BE 8 550v2-1/550v2-19, in : *Techniques de l'ingénieur*, 10 juillet 2009.
- Poitrat, E., 2009b, Biocarburants (pour en savoir plus), document Doc. BE 8 550v2-1/550v2-5, in : *Techniques de l'ingénieur*, 10 juillet 2009.
- Price, R., 2008, NOx emissions, boilers and the LNG re-gasification ship, *mer*, October 2008, 18-21.

- Richard, M. G., 2008, *The Suntary Mermaid II: a wave-powered boat (!!!)*, February 29, 2008, <http://www.treehugger.com/files/2008/02/suntary-mermaid-ii-wave-powered-boat.php>
- Rousseau, F., 2009, *Solazyme signe avec l'US Navy pour la fourniture d'algo-carburant*, 11 septembre 2009.
- Sandaker, K., 2006, Fuel cell technology in ships, Eidesvik Offshore ASA, *Green Shipping World*, 2 October 2006, København, Denmark.
- Sattler, G., 2008, The role of fuel cells in ship operation – Current applications and future developments, in : *First 'Zemships – Zero emission ships' Conference*, October, 23, 2008, Hamburg, Germany.
- Schiess, H., 2009, Projet E-Ship : toute la force du vent, *Connectivity* 1, 31-32.
- Scott, R., 2010, Imagineering the future frigate, *Janes's Navy International* 115(7), September 2010, 10-11.
- Siuru, B., 2007, Greener ships o the horizon, *Diesel & Gas Turbine Worldwide*, September 2007, 59-63.
- Skúlason, J. B., & Maak, M., 2007, *Sustainable Marine and Road Transport, H<sub>2</sub> in Iceland*, Iceland New Energy, February 5, 2007.
- Skysails, 2008a, *Turn wind into profit*, November 2008, SkySails GmbH & Co. KG.
- Skysails, 2008b, *Technology information*, November 2008, SkySails GmbH & Co. KG.
- Solarsailor, 2007, *Technology solutions – Safe, efficient hybrid marine power*, Solar Sailor Holdings Ltd. (SSHL), May 2007.
- STC, 2007, *Wind*, version 01, April 2007, STC-Group.
- Stolper, A., 2008, What is zemship?, présentation de Behörde für Stadtenwicklung und Umwelt, in : *First 'Zemships – Zero emission ships' Conference*, October, 23, 2008, Hamburg, Germany.
- Svensen, T., 2008, DNV looks to the future, *mer*, July/August 2008, 17-18.
- Tronstad, T., 2004, *FellowSHIP – Fuel cells for low emission ships. A brief project presentation*, FellowSHIP.
- van der Gaag, P., 2008, Bio-LNG: a clean and cool biofuel for ships, présentation de Holland Innovation Team (HIT), in : *Reducing emissions to air from shipping*, L'loyd's Maritime Academy, 12-13 November 2008, London, United Kingdom.
- van der Gaag, P., 2009, *Bio-LNG: hernieuwbaar, schoon en goedkoper dan fossiele brandstoffen*, présentation de Holland Innovation Team (HIT), January 29, 2009, SenterNovem, Utrecht, Germany.
- Vogler, F., , A., 2008, Safety and classification procedures of fuel cell ships, présentation de Germanischer Lloyd AG, in : *First 'Zemships – Zero emission ships' Conference*, October, 23, 2008, Hamburg, Germany.
- Wärtsilä, 2009, *Methapu*, Wärtsilä Corporation.

Wijsmuller, M., Clean tugs for clean cities, *Marine Reporter & Engineering News*, October 2008, 24-26.

## Gestion et traitement des déchets

Un navire nuit à son environnement tant par sa consommation de matière et d'énergie que par ses rejets. La prise en compte du traitement des déchets – émissions atmosphériques, eaux usées, corps solides – participe à la préservation du milieu.

### 7.1 Eaux de cale

La cale, partie la plus basse du navire, recueille des eaux et des fluides qui s'échappent d'équipements opérationnels (évaporateurs, machines auxiliaires, système de propulsion, moteurs...). Les eaux de cale, mélanges de fluides miscibles ou en émulsion<sup>211</sup>, sont composées d'eau et de nombreux autres constituants : huiles, graisses, cambouis, fuels, lubrifiants, surfactants, sels, détergents, trace de métaux, glycols, etc.

Le rejet de ces eaux en mer est régi par la résolution MEPC.107(49), adoptée le 18 juillet 2003 par l'OMI, mais aussi par d'autres règles (Alaska-Murkowski Act, par exemple). La norme OMI MEPC 107(49) limite à 15 parties par million (ppm) la teneur en hydrocarbures des eaux autorisées au rejet en mer ; au-delà de ce seuil, ces eaux doivent être traitées avant leur rejet (OMI 2003).

Le traitement des effluents huileux et des émulsions est réalisé selon des méthodes variées. Les huiles en phase libre dans l'eau sont plus faciles à séparer que celles dans les émulsions. Pour ces dernières, les performances des équipements dépendent notamment de la nature de l'huile traitée, de la taille des gouttelettes et de la stabilité de l'émulsion. Le tableau 13 rassemble les principales méthodes de traitement des eaux de cale.

---

<sup>211</sup> Une émulsion est un mélange (intrinsèquement instable) de deux liquides non miscibles, dont l'un est sous forme de gouttelettes en suspension dans l'autre. La taille typique des gouttelettes est de l'ordre de quelques micromètres (de Gennes et al. 2005). Un élément tensio-actif peut être présent ou non.

**Tableau 13.** Méthodes de séparation des huiles des eaux de cale des navires.  
**Table 13.** *Oil-water separation methods in bilge water processing* (Seifert & Svensson 2006b).

Procédé	Avantages	Inconvénients	Critère < 15 ppm atteint (*)
Séparation par centrifugation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Opération en continu</li> <li>Traitement de volumes importants</li> <li>Procédé éco-compatible et flexible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût d'investissement élevé</li> <li>Forte consommation d'énergie</li> <li>Produits chimiques nécessaires</li> </ul>	Oui
Stockage dans des bacs de rétention puis pompage à terre	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faible coût d'investissement</li> <li>Procédé simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bacs de grande capacité nécessaires</li> <li>Coût élevé de destruction des déchets</li> </ul>	-
Séparation par gravitation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faible coût d'investissement</li> <li>Procédé simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bacs de grande capacité nécessaires</li> <li>Coût élevé de mise en œuvre ; travail pénible</li> </ul>	Très difficile
Floculation et filtration	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût d'investissement modéré</li> <li>Equipements fixes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût élevé de mise en œuvre</li> <li>Process par étapes successives</li> <li>Volumes traités limités</li> <li>Produits chimiques nécessaires</li> <li>Rejets de déchets</li> </ul>	Oui
Filtres de coalescence	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coût d'investissement modéré</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bacs de grande capacité nécessaires</li> <li>Coût élevé de destruction des déchets</li> </ul>	Difficile
Evaporation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eau totalement propre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entartrage, dépôts</li> <li>Forte consommation d'énergie</li> </ul>	Oui
Membrane de filtration tangentielle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Très bonne qualité de traitement (**)</li> <li>Offre commerciale élargie (**)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flux traité sous pression (**)</li> </ul>	Oui (**)
Electro-coagulation			Problématique
Systèmes biologiques		<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensible à la nature de l'huile et des produits chimiques</li> <li>Développements futurs nécessaires</li> </ul>	Problématique

(\*) : taux maximum de contamination résiduelle de l'eau autorisé par la norme OMI MEPC 107(49).

(\*\*) Données de 2010 communiquées par R. Matez (DGA/DT).

Pour recevoir un agrément de l'OMI, les équipements de traitement des eaux huileuses doivent disposer d'un système de contrôle continu de la teneur en hydrocarbures résiduelles<sup>212</sup>. Des recommandations de base pour la conception de séparateurs huile-eau ont été apportées par Van Hemmen (2006). Des séparateurs huile-eau compatibles ou dépassant les exigences de l'OMI sont déjà sur la marché<sup>213</sup> :

- SKIT du Britannique RWO ;
- ClearWater, MariSep et MariPower de l'Allemand EMS Ship Supply ;
- Multi-Phase Emulsion Breaker (MPEB) de l'Allemand Mahle NFV ;
- Wavestream 4STAND de Wave International, basée en Grande-Bretagne ;
- Ultra-Sep de Coffin World Water Systems (Etats-Unis) ;
- la série M Senitec du Suédois Wärtsila ;
- les FRL Fluid Systems (sélectionnés par exemple par la Royal Navy britannique pour ses destroyers type 45) ;
- BilgeMaster de GEA Westfalia Separator GmbH (Allemagne) ;
- Increased Assurance Discharge Monitoring System (IADMS) et SmartSafe de Rivertrace Engineering (Grande-Bretagne) ;
- Crystal Sea de la société canadienne Genoil, Inc. ;
- les systèmes de filtration du Danois DMA Sorption ;
- AQ 1.1 de Aquatek Environmental, Inc. (Etats-Unis) ;
- Oily Water Pod – équipement destiné à suppléer une panne du séparateur principal – de Barwil Unitor Ships Service (Norvège) ;
- Ultrion de la société anglaise Nalfleet Marine Chemicals ;
- EcoStream, PureVent, PureBilge et Eliminator<sup>TM</sup> du Suédois Alfa Laval (Esplin & Svensson 2006 ; Seifert & Svensson 2006a ; Fisk 2008<sup>214</sup>) ;

---

<sup>212</sup> Dans ce cadre, le projet Hycare (tableau 3) du pôle de compétitivité mer Bretagne vise au développement d'un système de mesure fiable de la teneur en hydrocarbures des eaux huileuses ; l'objectif est notamment d'obtenir une homologation de l'OMI.

<sup>213</sup> Ces systèmes sont décrits par Laursen (2008a) et dans : Satisfying tougher bilge discharge standards, *Marine Propulsion*, June/July 2007, 63-66 ; Wider options in OWS equipment selection, *Marine Propulsion*, August/September 2007, 51-53 ; Emulsion polishing techniques gain approval, *Marine Propulsion*, June/July 2008, 64-66.

<sup>214</sup> Voir aussi : Bilge water treatment via PureBilge, *Marine Reporter Engineering News*, May 2009, 35.

- MiniSep VM de Victor Marine Ltd. (Royaume-Uni)<sup>215</sup> ;
- BOSS de Recovered Energy, Inc. (Etats-Unis)<sup>216</sup> ;
- White Box, système automatisé du Suédois Marinfloc, compatible avec le système de pilotage et de contrôle SmartSafe de Rivertrace Engineering Ltd. (Grande-Bretagne)<sup>217</sup> ;
- Petro-Liminator<sup>®</sup> d'EnSolve Biosystems, Inc. (Etats-Unis) ; ce séparateur biomécanique, installé initialement en janvier 2000 sur un navire de transport de minerai de la région des grands lacs américains, équipe désormais de nombreux autres navires (Penny & Suominen-Yeh 2006).

Le Naval Surface Warfare Center Carderock Division a développé et testé son système intégré AOPA (*automated oil pollution abatement*) de gestion, contrôle et traitement automatique des eaux huileuses générées à bord des navires de l'US Navy et du US Department of Defense (Hopko 2009).

## 7.2 Eaux grises, eaux noires

Plusieurs organisations et Etats (OMI, Union européenne, Etats-Unis...) ont fixé des critères de pureté pour le rejet à la mer des eaux usées, grises – chargées en matières polluantes non infectieuses – et noires – contenant des matières infectieuses – des navires<sup>218</sup>. Ces critères, issus de normes ou de textes de loi (par exemple résolution OMI MEPC.159(55) ; US Coast Guard regulations ; California Senate Bill 771 law ; Alaska-Murkowski Act), apportent des contraintes sur les performances des systèmes de traitement des eaux usées (Markel 2006 ; Nicholls 2008 ; OMI 2006).

Deux aspects font actuellement l'objet d'une attention particulière au sein des groupes de travail de l'OMI : les déchets médicamenteux – en particulier ceux qui incluent des molécules susceptibles de perturber le système endocrinien – et les déchets contenant des agents bactériologiques.

Les eaux usées peuvent être traitées par des procédés physico-chimiques et/ou biologiques (Thomas & Jaglin 2006 ; Chen 2007).

Les traitements physico-chimiques consistent à filtrer l'eau sur sable et/ou par membranes, puis à la désinfecter à l'aide de produits chimiques ou par rayonnement ultraviolet (UV) dans le cas de contact avec l'homme. Des traitements par coagulation et oxydation avancée (TiO<sub>2</sub> et UV) sont également pratiqués. Lors des traitements biologiques, des micro-organismes dégradent biologiquement et transforment en biomasse les matières organiques des eaux usées (le procédé de réacteur biologique à membrane marque une avancée significative dans la qualité de traitement des rejets). Des traitements

---

<sup>215</sup> Victor separates the spoils, *The Naval Architect*, January 2008, 83-85.

<sup>216</sup> BOSS oily water separators, *Marine News*, December 2008, 39.

<sup>217</sup> Blocking the magic pipe, *The Naval Architect*, January 2009, 40-41.

<sup>218</sup> Selon l'American Society of Testing and Materials (ASTM), citée par Markle (2006), les eaux grises proviennent des dalos, de la vaisselle, des lavabos, salles de bain, douches, buanderies, fontaines à eau ainsi que des systèmes réfrigérants ; les effluents issus de déchets industriels et infectieux ainsi que des cadavres humains et animaux ne sont pas inclus dans les eaux grises. Les eaux noires sont des déchets d'origine humaine (eaux des toilettes, urine, cadavres...), médicale (drains, médicaments...) ou animale (cadavres).

hybrides, physico-chimiques et biologiques, combinent biodégradation avec une ou plusieurs étapes telles que coagulation, floculation, filtration, UV, oxydation avancée...

Le tableau 14 compare qualitativement les procédés physico-chimiques et biologiques.

**Tableau 14.** Comparaison qualitative des traitements biologiques et physico-chimiques des eaux grises et noires.

*Table 14. Qualitative comparison between biological and physical-chemical methods for grey and black waters processing (Markle 2006).*

	Traitement biologique	Traitement physico-chimique
Temps d'incubation	> 168 h	Aucun
Temps de traitement	Long	Court
Encombrement	Important	Faible
Sensibilité aux produits caustiques	Importante (biomasse)	Faible
Intervention d'un opérateur	Fréquente	Peu fréquente
Désinfection	UV ou chlore	Chlore
Remplacement des membranes	2-5 ans ?	-
Complexité du procédé	Elevée	Peu élevée
Application	Navires de grande taille	Navires de tailles petite et moyenne
Prix du système	Elevé	Moindre
Coût de mise en œuvre et d'entretien	Elevé	Réduit

Plusieurs sociétés proposent des systèmes dont les performances sont déjà conformes aux exigences réglementaires, ou sont en cours de test et de validation<sup>219</sup>.

- Le système Scanship Advanced Wastewater Purification Plant (AWP) de STX équipe les ferries construits par STX sur son chantier français de Saint-Nazaire (Nicholls 2008).
- Harmworthy Water Systems a conçu les systèmes Mk II et Mk III Membrane BioReactor (MBR), installés sur des ferries et navires de luxe anciens (par exemple *Eurodam*) ou nouveaux (*Seabourn Odyssey*, *Queen Victoria*). En partenariat avec les constructeurs, Harmworthy adapte ses équipements à la configuration du navire (Chen 2007 ; Laursen 2008b ; Nicholls 2008).
- Le système Memrod de l'Allemand RWO Marine Water Technology, en service sur des ferries (type *Celebrity*), a également été fourni aux marines nationales italienne, pour équiper le porte-avions *Cavour*, et allemande, pour cinq corvettes modernes (Laursen 2008b<sup>220</sup>).

<sup>219</sup> En France, le projet Cycleaux-1 (tableau 3) du pôle de compétitivité EMC2 étudie la possibilité de réutilisation des eaux usées pour une utilisation sanitaire et technique, dans le cadre d'une optimisation des ressources en eaux (Thomas & Jaglin 2006).

<sup>220</sup> Voir aussi : RWO keeps up with environmental regs, *The Naval Architect*, September 2009, 86.

- DCNS a retenu Evac pour traiter les eaux usées produites à bord des frégates multi-missions FREMM (Laursen 2008b).
- Les unités Maripur de Aco Marine sont également conformes à la règle MEPC 159(55), tandis que le système de Holland Marine Services Amsterdam (HMSA) est en phase de test de conformité à cette règle (Laursen 2008b) et a été retenu par STX pour équiper le BPC *Dixmüide*.
- Raritan a mis au point un procédé de traitement par du sel marin qui, transformé en acide hypochloré dans une chambre à électrodes, devient un puissant bactéricide<sup>221</sup>.

Markel (2006) a décrit le développement d'un système de traitement des eaux grises et noires par oxydation avancée, le Navalís Poseidon System<sup>TM</sup>.

Smith & Day (2005) ont présenté l'approche de QinetiQ pour la mise au point du système de gestion des déchets (eaux de cale, eaux grises et noires, déchets alimentaires et sanitaires, déchets solides...) des navires de la Royal Navy britannique ; les eaux grises et noires, les déchets sanitaires, sont traités à l'aide d'un bioréacteur membranaire, dont un prototype de démonstration a été installé sur la frégate de type 23 *HMS Grafton*.

Enfin, un système de microanalyse par chromatographie et détection ampérométrique de cinq perturbateurs endocriniens<sup>222</sup>, présents dans des produits chimiques environnemetaux, a été développé par Wu (2009). Ces cinq perturbateurs présents dans des eaux usées ménagères peuvent être séparés en 12 minutes à partir d'un faible volume de solvant.

## 7.3 Déchets solides

De nombreux déchets solides sont générés à bord des navires. Le tri sélectif en amont, *i.e.* par l'ensemble de l'équipage, facilite la collecte et l'envoi vers la déchetterie du bord (voir l'exemple du porte-avions français *Charles de Gaulle* rapporté par Jaskierowicz et al. 2003). Le Norvégien Delitek AS propose des systèmes de compactage des cartons et plastiques (PVC) recyclables, et de broyage des filtres à huile usagés, des pots de peinture inutilisés, du verre<sup>223</sup>. Un incinérateur de papiers, cartons, textiles, etc., destiné aux porte-avions de l'US Navy, a été mis au point à partir d'un système commercial (Marx et al. 2006). La destruction de déchets de combustibles peut être réalisée par arc plasma, dont Kaldas et al. (2006) présentent un dispositif compatible avec les exigences de l'OMI. Cette dernière a émis une liste de recommandations pratiques pour éviter le rejet des déchets solides à la mer (IMO 2010). L'incinérateur par pyrolyse des déchets solides et alimentaires du navire *HMS Ocean* de la Royal Navy britannique est décrit par Smith & Day (2005)<sup>224</sup>.

<sup>221</sup> Ce procédé est conforme à l'US Coast Guard certification Type 1 Marine Sanitation Device (voir : Better waste treatment with saltwater, *mer*, March 2007, 43).

<sup>222</sup> 2,4-Dichlorophénol (DCP), 4-tert-butylphénol (PB), bisphénol A (BPA), 17a-ethynylestradiol (EE2) et 4-nonylphénol (NP).

<sup>223</sup> *Marine waste compactors in stainless steel (models DT-500MKII and DT-1500MKII)*, Delitek AS ; *Marine waste compactors in stainless steel (models DT-1500B, DT-1000B, DT-120s and DT-500GC)*, Delitek AS ; *DT-500MKII & DT-1500MKII 'Green ship' waste compactors (standard versions) – User-/Service manual*, Delitek AS.

<sup>224</sup> Voir également : Managing waste on the UK's QE class aircraft carriers, *Warship Technology*, nb. 5, May 2010, 30-32.

## 7.4 Emissions atmosphériques

Les émissions atmosphériques des moteurs diesel forment un ensemble de gaz, vapeurs, aérosols et particules, constitués de carbone et d'oxydes de carbone, d'azote et d'oxydes d'azote, d'eau, d'oxydes de soufre, d'aldéhydes, d'hydrocarbures aromatiques polycycliques produits lors de la combustion. La nature, les caractéristiques et les nuisances sur l'environnement des rejets atmosphériques sont décrites par Fridell (2008). Dans le cadre du projet européen Hercules (§§ 3.2 et 5.1), la composition des particules de matière émises par les moteurs diesel marine et leur transformation à la surface des océans ont été étudiées respectivement par Lauer et al. (2005) et Petzold et al. (2006).

Dans leur revue des techniques disponibles pour diminuer ces émissions, Wahlström et al. (2006) dégagent différentes approches<sup>225</sup> :

- agir sur la conception du moteur pour améliorer son rendement (réduction essentiellement de  $\text{NO}_x$ )<sup>226</sup> grâce à l'optimisation de la combustion et de l'injection de carburant, l'utilisation de rampes d'injection commune, de turbochargeurs, l'adaptation du cycle d'Otto en cycle de Miller, l'amélioration de la lubrification des éléments mécaniques en contact (§ 5.1)... ;
- influencer sur les processus au sein du moteur avec un carburant émulsifié à l'eau, par une réduction non-catalytique sélective, par une recirculation des gaz d'échappement ;
- traiter les émissions<sup>227</sup> par des méthodes de purification à l'eau de mer, de réduction catalytique sélective, de filtrage des particules, d'oxydation.

D'autres voies possibles sont l'utilisation de carburants à basse teneur en soufre ou alternatifs (diminution principalement de  $\text{SO}_x$ ), le recours à d'autres sources d'énergie (§ 6) ou l'optimisation de l'hydrodynamique du navire (§ 5.7.1) et de son profil opérationnel ; à quai, l'alimentation électrique du bord peut être produite et apportée par des équipements portuaires – s'ils sont disponibles et compatibles avec les systèmes du bord –, plutôt que par les moteurs auxiliaires du navire (Laursen 2009)<sup>228</sup>.

---

<sup>225</sup> Voir également Sharma & Pal (2006), DCNS (2007), Fridell (2008), de Kat et al. (2009) ainsi que la revue comparative des modes de propulsion et carburants alternatifs réalisée par McMullen & Hamilton (2002) pour la Water Transit Authority. Les méthodes de réduction des émissions de particules sont décrites par Hellen (2007). Il faut noter que la réglementation de l'OMI sur les émissions polluantes n'est pas actuellement applicable aux turbines à gaz. Si ces dernières rejettent moins de  $\text{NO}_x$  que les moteurs diesel, elles sont en revanche plus polluantes en  $\text{CO}_2$  (Mignotte et al. 2009).

<sup>226</sup> L'urée est une substance organique d'abord connue pour être produite par le foie des organismes vivants à partir de la dégradation des acides aminés. Depuis une dizaine d'années, cette molécule a été reconnue (notamment en Norvège) pour ses propriétés qui abaissent sensiblement le niveau d'émission d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) dans les gaz d'échappement des moteurs thermiques (par exemple diesel). L'urée [ $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$  ou  $\text{O}=\text{C}(\text{NH}_2)_2$ ] se présente sous forme liquide : mélangée au carburant à l'échappement et portée à haute température avec les gaz, elle se décompose en  $\text{CO}_2$  et en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) qui réagit avec les oxydes d'azote pour générer du  $\text{N}_2$  gazeux et de l'eau. Aucun navire de la marine nationale française ne semble actuellement doté de procédés de réduction sélective basés sur l'injection d'urée (source : R. Matez, 2010).

<sup>227</sup> ... mais aussi refroidir les gaz d'échappement (voir : *Sea water scrubber for cleaning and cooling diesel exhaust gas*, Department of Naval Architecture and Marine Engineering).

<sup>228</sup> Ou encore : Cold-ironing aims to limite missions in harbour, *The Naval Architect*, January 2007, 23-24.

Le projet Suédois EffShip (1<sup>er</sup> décembre 2009-31 mars 2013), qui réunit huit partenaires industriels<sup>229</sup>, est destiné à identifier et évaluer les technologies disponibles et émergentes aptes à limiter les émissions atmosphériques des navires. Parmi les thèmes retenus, les moteurs, les carburants alternatifs, les récupérateurs de chaleur, les purificateurs de gaz, les énergies alternatives seront étudiés ; le cargo roulier Mk III de Swedish Orient Line sera utilisé comme banc d'essai pour tester et comparer les différentes technologies (SSPA 2009)<sup>230</sup>.

Les émissions de NO<sub>x</sub> peuvent être estimées par des simulations de dynamique des fluides. Kilpinen et al. (2005) en donnent une illustration par l'étude d'un moteur à quatre temps de moyenne vitesse avec injection directe de carburant. Par ailleurs, la société Tecnicas (filiale du Bureau Veritas) a élaboré un outil de calcul paramétrique – incluant des caractéristiques techniques, des calculs de performance, des résultats statistiques, des données de constructeurs – pour évaluer les rejets de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> et SO<sub>x</sub> de navires civils (voir § 10.2.1 et références associées).

Le tableau 15 propose une estimation de la réduction possible des émissions de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HC et de matières particulaires selon les méthodes adoptées.

---

<sup>229</sup> SSPA Sweden AB, ScandiNAOS, Wärtsilä, S-MAN AB, D.E.C. Marine AB, Chalmers Shipping and Marine Technology, StoraEnso AB et Göteborg Energi.

<sup>230</sup> Des concepts et solutions innovantes pour les navires verts (systèmes de récupération de chaleur, moteurs supraconducteurs à haute température, équipements de traitements des eaux grises...) sont également mentionnés dans Siemens (2006, 2008).

**Tableau 15.** Valeurs indicatives de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, HC et de particules selon la méthode choisie.

*Table 15. Indicative values of cut in CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, HC emissions and particles, according to the selected process*

(Sharma & Pal 2006 ; Wahlström et al. 2006 ; Eefsen 2008a,b)<sup>231</sup>.

Méthode	Réduction du CO <sub>2</sub>	Réduction des NO <sub>x</sub>	Réduction des SO <sub>x</sub> , CO, HC	Réduction des particules	Application à des moteurs	Coût
Récupération de chaleur (WHR)	~20 %	10 %				
Amélioration du rendement du moteur	~1-3 %	30 %			2 et 4 temps	20-100 € par tonne de NO <sub>x</sub>
Utilisation d'un moteur à gaz-fuel		≤ 90 %				
Injection d'émulsion fuel-eau		30-50 %	HC et CO : ≤ 50 %	moyen	2 et 4 temps	
Injection directe d'eau à haute pression dans les cylindres (avant combustion)		40-60 %		faible	4 temps	350-410 € par tonne de NO <sub>x</sub>
Emploi d'un gasoil à bas taux de soufre (1,5 % au lieu de 2,7 %)			SO <sub>2</sub> : 40 %	18 %	2 et 4 temps	1230-2050 € par tonne de SO <sub>2</sub>
Emploi d'un gasoil à bas taux de soufre (0,5 % au lieu de 2,7 %)			SO <sub>2</sub> : 80 %	20 %	2 et 4 temps	1440-1690 € par tonne de SO <sub>2</sub>

<sup>231</sup> Voir encore : Emission control, two-strokes, *Propulsion*, September 2007, 18-22. Le domaine d'application à des moteurs deux ou quatre temps est donnée dans : Arming engines to tackle tougher Tiers, *Marine Propulsion*, April/May 2009, 47.

**Tableau 15 (suite).**  
**Table 15 (continued).**

<b>Méthode</b>	<b>Réduction du CO<sub>2</sub></b>	<b>Réduction des NO<sub>x</sub></b>	<b>Réduction des SO<sub>x</sub>, CO, HC</b>	<b>Réduction des particules</b>	<b>Application à des moteurs</b>	<b>Coût</b>
Injection continue avant les cylindres d'un mélange d'air comprimé avec un brouillard aqueux		10-30 %	HC, CO et SO <sub>2</sub> : inchangés	0,25 %		
Humidification de l'air d'admission		60-80 %	?	moyen	4 temps	200-310 € par tonne de NO <sub>x</sub>
Recirculation des gaz d'échappement (EGR)		≤ 50 %	?	très faible	2 temps	
Réduction catalytique sélective (SCR)		90-99 %	HC et CO : 70-90 % ; SO <sub>2</sub> : inchangé	faible	2 et 4 temps	310-810 € par tonne de NO <sub>x</sub>
Purification des gaz d'échappement (par eau de mer)			SO <sub>2</sub> ≤ 90-95 %	80 %	2 et 4 temps	320-580 € par tonne de SO <sub>2</sub>

Les fabricants de moteurs diesel (MAN Diesel, Wärtsilä...) développent des solutions telles que l'injection de fuel émulsifié à l'eau (Eckert et al. 2007) ou d'eau à haute pression dans la chambre de combustion, l'humidification de l'air d'admission, l'emploi de moteurs gaz-fuel<sup>232</sup>. La récupération de chaleur et le filtrage des émissions polluantes sont pris en compte<sup>233</sup>. De plus, pour promouvoir les technologies et solutions de purification des gaz d'échappement, une association, The Exhaust Gas Cleaning Systems Association (EGCSA), a été créée le 29 mars 2009 à l'initiative d'Aalborg Industries, Clean Marine, Krystallon (filiale de BP), Marine Exhaust Solutions et Wärtsilä<sup>234</sup>.

La mesure des NO<sub>x</sub> émis est essentielle pour adapter les méthodes de réduction les plus appropriées (par exemple, Ioannou et al. 2007). L'identification et le suivi de la quantité de gaz émis (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, etc.) nécessitent des capteurs industriels de précision et à réponse rapide tels ceux de Quantum Cascade Laser<sup>235</sup> ou Martek Marine<sup>236</sup>.

Le groupe allemand Heinzmann propose des systèmes de recirculation des gaz (EGR) et de réduction des particules<sup>237</sup>.

Pour réduire les émissions de fumées, Wärtsilä apporte, par exemple, des améliorations sur ses moteurs à quatre temps ZA40 et ZA40S qui équipent déjà des navires de croisière et des navires rouliers (Hupli & Troberg 2005). La technique de purification des fumées par eau de mer est décrite, par exemple, par Hassellöv & Turner (2008). Un dispositif basé sur cette technique a été mis au point par Krystallon et fonctionne depuis décembre 2005 sur le ferry *mv Pride of Kent* de P&O (Osbourne 2006).

Des moteurs de MAN B&W et Wärtsilä ont été modernisés avec le système de réduction catalytique sélective du suédois Munters<sup>238</sup>, tandis que Xiao et al. (2009) ont étudiés les performances de la réduction catalytique à basse température des NO<sub>x</sub> par le NH<sub>3</sub>.

---

<sup>232</sup> Pour MAN Diesel, voir : *Exhaust gas emission control today and tomorrow. MAN B&W two-stroke marine diesel engines*, MAN Diesel ; *Reducing two-stroke emissions, DIESELFACTS*, N° 3 (2007) ; *MAN ends up in Tiers, The Naval Architect*, April 2009, 28-29. Le système TES (*Thermo-Efficiency-System*), développé par MAN B&W pour des moteurs deux temps, est décrit par Knudsen (2007a,b).

Les solutions mises en oeuvre par Wärtsilä sont données par Paro (2005), Filancia (2007) ou Schmid (2007a,b). Les nouveaux systèmes de réduction catalytique sélective sont décrits dans : *NOR NOx-reducing system wins debut orders, Marine Propulsion*, August/September 2008, 29 ; *Ecotech offers environmental solutions, The Naval Architect*, January 2009, 36 ; *SCR ready for ultimate NOx cuts, Marine Propulsion*, April/May 2009, 52-53. D'autre part, Wärtsilä propose des moteurs à quatre temps gaz-fuel (gamme 50DF) utilisés sur des navires citernes de gaz naturel liquéfié (Schmid 2006). La disposition à bord d'un ferry ropax de purificateurs de fumées de Wärtsilä est décrite dans : *Solutions for scrubbing sulphur from exhaust gas, Marine Propulsion*, December/January 2007-8, 21-22.

Pour sa flotte de cargos rouliers, Wallenius a adopté des solutions proposées et développées par MAN Diesel et Wärtsilä (voir : *PCTCs put environmental protection into practice, Marine Propulsion*, August/September 2006, 37-38).

<sup>233</sup> L'injection directe d'eau et la réduction catalytique sélective sont mises en oeuvre par Wärtsilä avec ses moteurs basse vitesse RT-flex (voir : *Meeting the next NOx emission challenges, Marine Propulsion*, August/September 2007, 29-30) ; la combinaison de l'eau injectée avec les gaz résiduels (méthode WaCoReG, *water-cooled residual gas*) est décrite par Schmid & Weisser (2005).

<sup>234</sup> Association for Exhaust Gas Cleaning Systems, *Maritime Reporter & Engineering News*, April 2009, 27.

<sup>235</sup> Laser-based gas sensors ease emissions monitoring, *Marine Propulsion*, February/March 2008, 19-20.

<sup>236</sup> New legal driver for emissions monitoring, *The Naval Architect*, September 2007, 18.

<sup>237</sup> Heinzmann systems squeeze NOx and PM emissions, *Marine Propulsion*, April/May 2008, 37.

<sup>238</sup> SCR technique continues to excite Scandinavian owners, *The Naval Architect*, January 2007, 22.

La société Ecospec Global Technology Pte Ltd (Singapour) a développé le système CSNOx qui traite, au cours d'un processus unique, les émissions de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> et de particules. Un procédé électrique convertit le CO<sub>2</sub> atmosphérique en bicarbonates rejetés dans l'eau, tandis que le SO<sub>2</sub> et les NO<sub>x</sub> sont convertis respectivement en sulfates et nitrates, présents naturellement dans l'eau. Les particules sont épurées et triées pour être traitées comme des déchets solides (Ecospec 2009)<sup>239</sup>. Le système CSNOx sera installé sur le futur cargo conçu par le néerlandais ForestWave Navigation (de Jong 2010).

## Références

Chen, W., 2007, Solutions for waste and sewage treatment onboard ship, présentation de Hamworthy Group, in : *Asia-Pacific Green Ship Technology Conference*, October, 16-17, 2007, Singapore.

DCNS, 2007, *Les émissions de gaz du navire*, DCNS, juillet 2007.

de Gennes, P.-G., Brochard-Wyart, F., & Quéré, D., 2005, *Gouttes, bulles, perles et ondes*, coll. « Echelles », Editions Belin. (Edition accompagnée d'un cédérom.)

de Jong, M., 2010, Un navire économe en soutes, *JMM*, 22 janvier 2010, 25.

de Kat, J. O., Cerup-Simonsen, B., Laursen, P. B., & Petersen, J. B., 2009, An integrated approach towards operation of ships with reduced emissions, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.

Eckert, P., Velji, A., & Spicher, U., 2007, Numerical investigations of fuel-water emulsion combustion in DI-diesel engines, Abstract of the paper N° 140, in : *25<sup>th</sup> CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology*, Conseil international des machines à combustion, 21-24 May, 2007, Vienna, Austria.

Ecospec, 2009, *Cleaning up the ocean for bluer skies by CSNOx proces*, Ecospec.

Eefsen, T., 2008a, Green ship of the future, présentation du Danish Center for Maritime Technology (DCMT), in : *18<sup>th</sup> KIMO International Annual Conference*, 4<sup>th</sup> october 2008, Tønder, Denmark.

Eefsen, T., 2008b, Green ship of the future, présentation du Danish Center for Maritime Technology (DCMT), in : *Blue Conference*, 4<sup>th</sup> december 2008, Frederikshavn, Denmark.

Esplin, T., & Svensson, U., 2006, Innovative, eco-minded crankcase oil mist removal, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.

Filancia, A., 2007, Exhaust gas scrubbing for marine applications, présentation de Wärtsilä, in : *Asia-Pacific Green Ship Technology Conference*, October, 16-17, 2007, Singapore.

---

<sup>239</sup> Voir aussi : True green technology for emission control, *mer*, March 2009, 39-10.

- Fisk, S., 2008, Beyond the mist lies clarity, *The Naval Architect*, September 2008, 34-36.
- Fridell, E., 2008, *Emissions to air from shipping*, Swedish Environmental Research Institute, December 16, 2008.
- Hassellöv, I.-M., & Turner, D., 2008, *Seawater scrubbing – reduction of SO<sub>x</sub> emissions from ship exhausts*, Chalmers University of Technology.
- Hellen, G., 2007, Tightening the screw on particulates, *Marine Propulsion*, August/September 2007, 32.
- Hopko, S., 2009, Carderock develops fully Automated Oil Pollution Abatement system, *Currents*, Summer 2009, 6-17.
- Hupli, J., & Troberg, M., 2005, The smokeless Sulzer ZA40S, *Marine News*, N° 1, 23.
- IMO, 2010, *Interpretations of, and amendments to, MARPOL and related instruments. Solving the problem of marine litter by making MARPOL Annex V SMART*, MEPC 60/6/8, 15 January 2010, International Maritime Organisation.
- Ioannou, M., Alexandrakis, N., & Kyrtatos, N. P., 2007, Individual cylinder ultra-fast NO measurement for marine diesel engines, Abstract of the paper N° 13, in : *25<sup>th</sup> CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology*, Conseil international des machines à combustion, 21-24 May, 2007, Vienna, Austria.
- Jaskierowicz, D., Valayer, S., Dos Santos Justo, M., Brière, M., & Fredon, N., 2003, La Marine nationale et l'environnement, *L'Armement*, N° 84, décembre 2003, 52-60.
- Kaldas, A., Picard, I., Chronopoulos, C., Chevalier, P., Carabin, P., Holcroft, G., Alexander, G., Spezio, J., Mann, J., & Molintas, 2006, Plasma arc waste destruction system (PAWDS). A novel approach to waste elimination aboard ships, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.
- Kilpinen, P., Wennström, J., Kavaljer, M., & Carucci, J. H., 2005, Towards more complete NO emission prediction by CFD in marine diesel engines, Abstract in : *Fifth International Symposium Towards Clean Diesel Engines (TCDE) 2005*, 2-3 June 2005, Lund, Sweden.
- Knudsen, T. S., 2007a, Exhaust gas for power generation – How efficient are state-of-the-art methods?, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Knudsen, T. S., 2007b, Exhaust gas for power generation. How efficient are state-of-the-art methods?, présentation de MAN Diesel, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Lauer, P., Kurok, C., & Petzold, A., 2005, Particulate emission and composition from marine diesel engines for different fuels, in : *European Aerosol Conference (EAC) 2005*, 28 August- 2 September 2005, Ghent, Belgium.
- Laursen, W., 2008a, False positives: fact or fiction?, *Marine Propulsion*, June/July 2008, 63.
- Laursen, W., 2008b, Treatment systems meet tougher discharge rules, *Marine Propulsion*, August/September 2008, 163-164.

- Laursen, W., 2009, Ship emissions in port must be curbe, *Marine Propulsion*, April/May 2009, 55-57.
- Markle, S. P., 2006, Design and prototype development of advanced oxidation black and gray water treatment systems, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.
- Marx, S., Nguyen, T., Bourgeault, J., & Hansen, J., 2006, The adaptation of a commercial-off-the-shelf (COTS) solid waste incinerator for use aboard U.S. Navy aircraft carriers, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.
- McMullen, J. J., & Hamilton, B. A., 2002, *New technologies and alternative fuels. Working paper on alternative propulsion and fuel technologies review*, Prepared by John J. McMullen Associates, Inc. and Booz Allen Hamilton for Water Transit Authority, May 2, 2002.
- Nicholls, C., 2008, Wastewater regs ripple through, *The Naval Architect*, February 2008, 34-35.
- OMI, 2003, *Resolution MEPC.107(49), adopted on 18 July 2003. Revised equipment for machinery space bilge of ships*, Organisation maritime internationale.
- OMI, 2006, *Resolution MEPC.159(55), adopted on 13 October 2006. Revised guidelines on implementation of effluent standards and performance tests for sewage treatment plants*, Organisation maritime internationale.
- Osbourne, A., 2006, Sea water scrubbing, présentation de Krystallon, in : *Green Shipping World Conference*, September 2006, Copenhagen, Denmark.
- Paro, D., 2005, Technical improvements for ships, in : *Haagen-Smit Symposium. Ships, trains, and the future of goods transport*, 18-21 April, 2005, Aptos, California, USA.
- Penny, R. L., & Suominen-Yeh, M., 2006, Biological bilge water treatment system, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.
- Petzold, A., Weinzierl, B., Fiebig, M., Lichtenstern, M., Lauer, P., Gurk, C., Franke, K., & Weingartner, E., 2006, *Particulate emission from ship engines: emission properties and transformation in the marine boundary layer*, Abstract in : *7<sup>th</sup> International Aerosol Conference 2006*, September 10-15, 2006, Saint Paul, Minnesota, USA.
- Schmid, H., 2006, Marine propulsion technology for reduced emissions, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.
- Schmid, H., 2007a, Efficient propulsion for seagoing vessels, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.
- Schmid, H., 2007b, Efficient propulsion for seagoing vessels, présentation de Wärtsilä Switzerland Ltd., in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.

Schmid, H., & Weisser, G., 2005, Marine technologies for reduced emissions, in : *2<sup>nd</sup> Annual Conference on Green Ship Technology*, Lloyd's List events, 13-14 April 2005, Amsterdam, the Netherlands.

Seifert, C. S., & Svensson, U., 2006a, Ballast water treatment system improves operational efficiency, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.

Seifert, C. S., & Svensson, U., 2006b, Treatment of emulsified bilge/oily wastewater – Oil content below 5 ppm, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.

Sharma, P., & Pal, B. K., 2006, Reduced NO<sub>x</sub> and smoke emission, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.

Siemens, 2006, *Siemens marine solutions: new concepts and solutions for the 'green ship'*, Reference number I&S 0906.5597e, Siemens AG, September 26, 2006.

Siemens, 2008, *Green ship for an environmentally compatible course*, Siemens AG.

Smith, G., & Day, C., 2005, Advances in integrated waste management, in : *2<sup>nd</sup> Annual Conference on Green Ship Technology*, Lloyd's List events, 13-14 April 2005, Amsterdam, the Netherlands.

SSPA, 2009, *EffShip. Efficient Shipping with low emissions*, EffShip-Project description, October 21, 2009.

Stewart, J., 2007, Ballast water management. Overview of current ballast water management technologies, présentation d'International Maritime Technology Consultants, Inc., in : *Asia-Pacific Green Ship Technology Conference*, October, 16-17, 2007, Singapore.

Thomas, I., & Jaglin, J.-L., 2006, *CYCLEAUX-1. Réutilisation des eaux usées à usages sanitaire et technique : application aux eaux grises dans le bâtiment et aux eaux usées dans les navires*, Pôle de compétitivité EMC2, 12 mai 2006.

Van Hemmen, H. F., 2006, Initial recommendations for bilge oily water separator system design and operation, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.

Wahlström, J., Karvosenoja, N., & Porvari, P., 2006, *Ship emissions and technical emission reduction potential in the Northern Baltic Sea*, Reports of Finnish Environment Institute 8, June 2006, Finnish Environment Institute.

Wu, T., 2009, *Développement et applications des systèmes microanalytiques dans le domaine de l'environnement*, thèse de doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, Cachan, France, 17 juillet 2009.

Xiao, Y., Zhou, P., & Zhang, W., 2009, An investigation into catalysts to improve low temperature performance in the selective catalytic reduction of NO with NH<sub>3</sub>, *Journal of Marine Engineering and Technology*, No. A14, 19-26.



## Peintures antisalissures, eaux de ballast et sédiments

La lutte contre la diffusion et la dispersion d'espèces marines dans les écosystèmes indigènes est une des préoccupations de l'OMI. Les deux principaux vecteurs de transport d'espèces sont les surfaces immergées des navires, sur lesquelles les biosalissures marines se fixent et, surtout, les opérations de ballastage et déballastage.

### 8.1 Peintures antisalissures<sup>240, 241</sup>

#### 8.1.1 Introduction

Les biosalissures marines apparaissent dès qu'une surface est plongée dans un milieu naturel marin ou en rivière. Des colonies d'organismes vivants – micro-organismes (bactéries, larves, protozoaires...), macroalgues, vers, crustacés, mollusques, etc. – s'accumulent rapidement et se fixent sur la surface immergée (Aldred & Clare 2008). Les biosalissures ont des conséquences néfastes importantes sur les performances des navires (perte de vitesse, manœuvrabilité diminuée...), sur l'intégrité des structures et des matériaux, dégradés par la biocorrosion, mais également sur l'équilibre des écosystèmes locaux avec l'introduction d'organismes exotiques.

Difficile à prévoir et à contrôler, l'apparition des biosalissures dépend du traitement antisalissure appliqué à la coque, mais aussi du type et du profil opérationnel (vitesse et fréquence de navigation) du navire (Willsher 2007a,b). Cependant, des biosalissures fixées sur la coque immergée accentuent sa rugosité de surface, ce qui augmente la résistance à l'avancement du navire, dégrade ses performances hydrodynamiques et accroît sa consommation énergétique (Koehl 2007 ; Goldie 2009).

Les navires militaires passent typiquement près de la moitié de leur temps au port. Les longues périodes au mouillage favorisent la formation de biosalissures. Cette conséquence est particulièrement pénalisante pour ces navires qui naviguent à des vitesses généralement élevées (>~20 nœuds) et pour

---

<sup>240</sup> Ce chapitre est largement redevable à Jean-Pierre Pautasso (DGA/DT).

<sup>241</sup> La recherche de produits de substitution au chrome hexavalent et au cadmium pour la protection contre la corrosion semble faire l'objet de peu de publications concernant le secteur naval. Heimann & Simpson (2006) décrivent toutefois un procédé alternatif testé par l'US Navy, un traitement de conversion appliqué à des boulons. Une brève synthèse des divers procédés alternatifs est donnée par Lévêque (2007).

lesquels des délais allongés entre passages au bassin (6 à 10 ans ; 12 ans pour les porte-avions de l'US Navy) sont recherchés.

La protection des carènes et des équipements immergés est assurée par l'application d'une peinture antisalissure. Celle-ci empêche le développement d'organismes indésirables en constituant une barrière entre la surface à préserver et le milieu marin. Les revêtements mis en œuvre se caractérisent par la libération ou non de molécules bioactives (biocides) au cours de l'immersion du film de peinture (lixiviation). Une peinture antisalissure est alors constituée d'un liant (matrice), de divers éléments (pigments, charges, additifs), et éventuellement de biocides.

Depuis une cinquantaine d'années, l'évolution des matrices et l'apparition de revêtements contenant des composés métalliques, en particulier des dérivés stanniques, ont permis d'améliorer la durée de vie et l'efficacité des peintures antisalissures. L'année 1976 a en effet été marquée par le dépôt d'un brevet sur des peintures antisalissures autopolissantes (§ 8.1.2) contenant un composé organostannique, le tributylétain (TBT). Malgré leur efficacité, des études montrèrent toutefois, dès 1980, que le TBT avait des conséquences particulièrement néfastes sur l'environnement – destruction d'organismes marins, changement de sexe chez les buccins, déformation de la coquille des huîtres... (Fay et al. 2008a,b ; Yvon 2008). Aussi, en 1989, la directive européenne 89/677/CEE a restreint l'utilisation des peintures au TBT aux navires de moins de 25 m de long (JORF 1989), et depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2008, l'OMI a étendu l'interdiction d'usage de ces peintures à l'ensemble de la flotte. De plus, la directive européenne 98/8/CE a renforcé la législation sur les biocides en autorisant seulement l'usage de ceux présents sur une liste positive (JOCE 1998) ; pour inscrire de nouveaux biocides à la liste positive, l'industriel doit désormais démontrer préalablement l'efficacité du produit par un protocole de tests (ECB 2008). Ce durcissement de la réglementation risque d'induire des effets similaires à ceux de la directive REACH (§ 1.2.1), par exemple conduire un produit à être interdit, ou l'industriel à abandonner sa production en raison du coût trop élevé d'évaluation de la dangerosité des substances contenues par rapport au volume fabriqué.

Le remplacement du TBT par des produits performants pose un défi majeur. En effet, à travers le monde, environ 4000 espèces de biosalissures (Avellan 2008) réparties dans une douzaine de zones océaniques (Brady 2005) ont été identifiées, et la prise en compte des diverses biosalissures locales conduit à la conception de formules antisalissures complexes et non universelles.

Les solutions de substitution reposent sur deux approches principales : les revêtements libérants des biocides autorisés et les revêtements exempts de biocides. Au cours d'une intervention publique, Chantal Compère a dressé un large panorama des méthodes de lutte contre les biosalissures, de leurs avantages et de leurs inconvénients (Gonthier & Compère 2007). Des revues des développements récents sont proposées par Hugues et al. (2003), Brady (2005), Fay et al. (2008a,b), Hellio & Yebra (2009) ou Pautasso (2009). Quelques produits disponibles sur le marché sont recensés par Goldie (2008), tandis que DES (2009) préconise des systèmes de peintures et revêtements pour les navires de la Royal Navy britannique.

Diverses actions collaboratives ont été initiées ou sont actuellement en cours pour la recherche et le développement de systèmes antisalissures innovants. Financé par la Commission européenne, le projet AMBIO a réuni durant 5 ans (de mars 2005 à février 2010) 31 partenaires de l'industrie et de la recherche de 12 pays européens pour étudier l'influence des surfaces nanostructurées sur l'adhésion des organismes marins et développer de nouveaux revêtements superhydrophobes (voir également tableau 3). Environ 500 revêtements ont été réalisés et évalués en laboratoire, et 15 d'entre-eux ont

fait l'objet de tests représentatifs des conditions réelles d'utilisation. Il semble qu'une hétérogénéité convenablement choisie de la nature chimique et/ou de la topographie (nanoreliefs) de la surface soit plus appropriée pour limiter l'accrochage des bio-salissures qu'une surface homogène ; c'est le concept de surface « ambiguë » (Callow 2010 ; Callow & Callow 2011). Le projet européen ACWS (Antifouling Coatings for War Ships) de l'AED – auquel participent la France (pilote), le Royaume-Uni et les Pays-Bas, et en partenariat avec des industriels, laboratoires privés et universitaires (DCNS, TNO, Defence Science and Technology Laboratory [DSTL], université de Southampton, université du Sud Toulon-Var... ; voir également tableau 3) – vise à évaluer, pour des navires de guerre, les technologies antisalissures émergentes aux performances durables (6-10 ans) et à développer des méthodes d'essais accélérés (< 1 an) de nouveaux produits (EDA 2009 ; Pautasso 2009 ; Martin 2010). En France, les deux principaux projets sont Paintclean et Ecopaint (auxquels il faut y associer BioPaintTrop) ; portés respectivement par les pôles de compétitivité mer Bretagne et mer PACA (ainsi que par Qualitropic pour BioPaintTrop), ces projets sont dédiés à la mise au point de systèmes antisalissures de nouvelle génération (tableau 3).

### 8.1.2 Peintures antisalissures avec biocides

Au cours des dernières décennies, la longévité des peintures antisalissures contenant des biocides a considérablement augmenté, passant de moins de 2 ans au cours des années 1960-1970 à plus de 5 ans à partir de la seconde moitié des années 1970. Pour cela, l'évolution des matrices des peintures a suivi successivement trois étapes essentielles.

- Dans les matrices polymères dures insolubles dans l'eau, les biocides diffusent par l'intermédiaire des pores formés après solubilisation des pigments solubles. La matrice conserve sa forme initiale. En revanche, la quantité de biocides libérée, incontrôlée, chute rapidement en dessous du seuil de prévention des salissures et la durée de vie de ces peintures est limitée à 12 à 18 mois.
- Les peintures érodables possèdent une matrice polymère dont la solubilité dans l'eau est plus ou moins importante ; leur durée de vie est prolongée jusqu'à environ 2 ans. Toutefois, la quantité de biocides délivrés reste trop élevée, notamment en début d'immersion.
- Les peintures autopolissantes se caractérisent par leur matrice dont le polymère, une fois les biocides libérés, s'hydrolyse<sup>242</sup> et disparaît. La matrice s'érode couche par couche au contact de l'eau de mer et le taux de lixiviation est contrôlé. La quantité de biocides relâchés est maintenue constante et peut être ajustée – propriété favorable pour l'environnement. La durabilité de ces peintures dépasse 5 ans et peut atteindre 10 ans dans le cas des revêtements à base de TBT.

Bien que les revêtements exempts de TBT possèdent une nocivité moindre que les systèmes de peinture à base d'étain<sup>243</sup>, la pression réglementaire incite à la recherche de molécules non toxiques (§ 8.1.1). Des biocides minéraux (oxydes de cuivre, par exemple) et des biocides organiques (zinc pyrithione, acrylates silyl à base de polymère acrylique...) sont des substituants usuels au TBT. Cependant, la chute des performances des revêtements sans TBT est sensible dès 3 à 5 ans d'utilisation (5-10 ans pour les dépôts avec TBT). Le tableau 16 donne des exemples de produits

---

<sup>242</sup> L'hydrolyse est la décomposition chimique d'un corps par fixation d'eau.

<sup>243</sup> Les biocides à base de cuivre peuvent néanmoins avoir des effets néfastes sur la faune et la flore (Haslbeck & Vos 2006 ; Fay et al. 2008a,b).

commerciaux. Des enzymes, incorporées dans les revêtements, peuvent également être utilisées comme biocides (voir Olsen et al. 2007 pour une revue).

Des solutions peuvent provenir du milieu vivant. Les espèces marines peu mobiles ou fixées sont particulièrement vulnérables. Pour espérer survivre, elles doivent produire des substances toxiques pour leurs prédateurs. Les algues macrophytes, par exemple, produisent des substances chimiques variées tels que des tannins, peptides, acides gras, etc. (Fay et al. 2008a,b). Pour les micro-organismes marins (bactéries et diatomées), un état des connaissances sur les substances antisalissures (anti-algues et anti-larves) qu'ils émettent a été dressé par Dobretsov et al. (2006) et Viano (2010) (voir également Klein et al. 2010 pour des développements récents). La pharmacognosie marine offre ainsi un vaste champ d'investigation pour la mise au point de molécules biologiquement actives, biocides naturels non toxiques – Sea-Nine<sup>®</sup>, par exemple (Blache 2008). C'est dans cette perspective que s'inscrivent les projets français Paintclean et BioPaintrop (tableau 3).

**Tableau 16.** Exemples de systèmes de revêtement commerciaux.

*Table 16. Examples of commercial coating systems* (Goldie 2008).

Revêtements autopolisants avec biocides	Revêtements anti-adhésion
<p><i>Systèmes d'acrylates cuivreux</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• gamme Intersmooth 460 (International Paint)</li> <li>• Olympic, Oceanic et Globic NCT (Hempel)</li> </ul> <p><i>Système d'acrylates de zinc</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sea Grandprix (Chugoku Marine Paints)</li> </ul> <p><i>Systèmes d'acrylates silyl</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• gamme SeaQuantum (Jotun Paints)</li> <li>• ABC3, et gammes Sigma Alpha Gen et Sigma EcoFleet (PPG)</li> </ul>	<p><i>Systèmes d'élastomères de silicones</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intersleek 700 (International Paint)<sup>244</sup></li> <li>• gamme Hempasil (Hempel)</li> <li>• Sea Lion (Jotun Paints)</li> <li>• Sigma Glide (PPG)</li> <li>• Bioclean HB (Chugoku Paints)</li> </ul> <p><i>Système d'hydrogel de silicone</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hempasil X3 (Hempel)<sup>245</sup></li> </ul> <p><i>Système de polymères fluorés</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intersleek 900 (International Paint)<sup>246</sup></li> </ul> <p><i>Matrice vinylester renforcée de particules de verre</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecospeed (Subsea Industries)<sup>247</sup></li> <li>• Seawax<sup>®</sup> (Seawax Marine Coatings)</li> </ul> <p><i>Système sans biocides à base d'oxydes cuivreux, ni silicone, ni Téflon</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seawax<sup>®</sup> Fouling Release (Seawax Marine Coatings)<sup>248</sup></li> </ul>

<sup>244</sup> O'Leary (2007) ; Solution to fouling at lower speeds, *The Naval Architect*, March 2007, 12-13.

<sup>245</sup> D'une durée de vie de 90 mois, ce revêtement, efficace même à faible vitesse (8-10 nœuds), réduit la consommation de carburant de 4 à 8 % la première année (voir : Covering all the bases for the future, *mer*, April 2009, 21-24 ; Hydrogel technology makes smooth entrance, *The Naval Architect*, April 2009, 33.)

<sup>246</sup> O'Leary (2007) ; Solution to fouling at lower speeds, *The Naval Architect*, March 2007, 12-13 ; Fuel savings for ULCCs from foul-release coating systems, *Marine Propulsion*, October/November 2007, 49 ; *Intersleek<sup>®</sup> 900*.

### 8.1.3 Revêtements anti-adhésion (ou à faible énergie de surface)

La caractéristique des revêtements anti-adhésion (FRC, *foul release coating*), à base de fluoropolymères ou de silicones, est de diminuer les forces d'interaction entre la surface à protéger et les salissures marines. Exempts de biocides, ces revêtements consistent à créer un film mince dont l'énergie de surface, le coefficient de frottement et la rugosité sont faibles et sur lequel les salissures se fixent difficilement et se décrochent lors du déplacement du navire<sup>249</sup>. L'effet d'anti-adhésion est toutefois partiel (il subsiste toujours un biofilm<sup>250</sup>) et n'est efficace qu'à grande vitesse pour que les macro-salissures se détachent. Ces revêtements sont mécaniquement peu résistants (dureté, résistance à l'abrasion), leur durabilité est incertaine au-delà de 5 ans, et ils peuvent propager des espèces invasives. La majorité des revêtements anti-adhésion disponibles sur le marché sont des élastomères de silicones (polymères polydiméthylsiloxane), et il existe un risque lié à la migration d'huiles siliconnées. En revanche, ils semblent être favorables sur les performances hydrodynamiques du navire<sup>251</sup>. Des développements récents ont conduit à la mise au point de revêtements d'hydrogel de silicone et de polymères fluorés (tableau 16)<sup>252</sup>.

Matrice dure sans biocide et nettoyable, le produit Ecospeed (tableau 16) a été développé par la compagnie belge Subsea Industries selon une autre technique. Son procédé consiste à déposer sur la surface à protéger une couche épaisse (~1 mm) et lisse de vinylester renforcée de particules de verre. Les bonnes performances de cette technique – excellente résistance aux salissures, grande durabilité, réduction de la traînée du navire – ont conduit la marine militaire belge à utiliser cette solution dès 2004 pour protéger l'ensemble de sa flotte (Goldie 2008). Il faut cependant brosser la couche déposée pour qu'elle assure son rôle protecteur ; les conséquences sont une dégradation de la rugosité de surface et une dispersion non maîtrisée des résidus du brossage au fond de l'eau.

La société Seawax Marine Coatings propose le produit Seawax® Fouling Release (tableau 16), un revêtement anti-adhésion exempt de biocides d'oxydes cuivreux, de silicone et de Téflon, qui devient auto-nettoyant et limite l'accrochage de micro-organismes dès que le navire atteint une vitesse de 5 nœuds. Solution aqueuse, ce revêtement est déposé sur des surfaces immergées (en acier, aluminium, fer, bois et polyester sauf polypropylène et polyéthylène) après application d'une couche primaire d'accrochage.

---

*Fluoropolymer foul release coating*, International Marine Coatings, July 2008 ; Foul-release smoothes hull efficiency, *Marine Propulsion*, August/September 2008, 287.

<sup>247</sup> Goldie (2008) ; Glass flake breakthrough for Ecospeed, *The Naval Architect*, June 2007, 82 ; Covering all the bases for the future, *mer*, April 2009, 21-24.

<sup>248</sup> <http://www.seawaxmarinecoatings.com> ; voir également : Seawax, un antifouling écologique, *Environnement Magazine*, N° 1698, juin 2011, 65.

<sup>249</sup> La question de l'intérêt de tels revêtements se pose alors pour les navires de guerre qui séjournent fréquemment au port.

<sup>250</sup> La définition et la description du cycle de vie d'un biofilm sont données par Valt (2008). Voir également Haras (2005).

<sup>251</sup> L'influence de la rugosité de surface sur les performances hydrodynamiques des revêtements antisalissures a été étudiée par Howell & Behrends (2006).

<sup>252</sup> Voir également la revue de Webster et al. (2007).

### 8.1.4 Une perspective : le biomimétisme

La réalisation de surfaces biomimétiques superhydrophobes (§ 5.7.1) et/ou actives – *i.e.* capables d'adapter leurs propriétés physico-chimiques lors de stimuli extérieurs (lumière, température, champ électrique, solvant) – pourrait permettre de combattre les bio-salissures. La très grande diversité des organismes marins et leur faculté d'adaptation montrent toutefois que les nombreux paramètres à prendre en considération (chimie, texture, dynamique de surface...) rendent quasiment impossible la conception de revêtements totalement et universellement antisalissures (Genzer & Efimenko 2006).

Une autre approche biomimétique repose sur l'observation de la remarquable aisance des dauphins dans le milieu marin. L'étude de la structure de la peau de ces cétacés a révélé une surface particulièrement lisse et visqueuse, striée d'un réseau de canaux nanométriques – trop fins pour que des larves de mollusques puissent s'accrocher – tapissés d'un gel contenant des enzymes destructrices des protéines des bactéries et des algues (Baum et al. 2002 ; Dettmar 2009). A partir de cet exemple, une équipe américaine, conduite par Rahul Ganguli et soutenue par un financement du Department of Defense américain, a eu l'idée de recouvrir la coque de navire d'un tissu métallique formant un réseau de pores, desquels suinte une substance chimique qui devient visqueuse au contact de l'eau de mer (Marks 2009). Les premiers tests de ce projet, réalisés avec différentes associations de matériaux, montrent que le procédé limite la croissance de colonies bactériennes *Pseudoalteromonas carrageenovora* à la surface de la coque (Ganguli et al. 2009).

Par ailleurs, les travaux de l'ONR ont conduit au développement de deux produits antisalissures non toxiques. Sharklet™, conçu en partenariat avec l'université de Floride (Etats-Unis), mime la texture et les propriétés anti-microbiennes de la peau des requins. L'autre procédé, mis au point avec l'université de Washington (Etats-Unis), prévient la fixation de protéines par des modifications moléculaires de l'environnement proche de la surface de la coque du navire (ONR 2009).

Toutefois, même si l'approche biomimétique offre des perspectives intéressantes, des contraintes réglementaires pourraient limiter ou interdire les solutions proposées en raison du risque de transfert d'espèces aquatiques nuisibles indésirables dans le milieu marin.

## 8.2 Eaux de ballast et sédiments

Les matériaux de ballast sont destinés à lester le bateau pour modifier son tirant d'eau, son assiette ou assurer sa stabilité. Des matériaux solides (pierres, sable...) étaient employés avant les années 1880. Depuis l'introduction de coques en acier et la mise au point des techniques de pompage, l'utilisation de l'eau s'est largement répandue comme matériau de ballast.

Il y a des milliers d'espèces aquatiques – végétales et animales, à des stades de développement divers – contenues dans les eaux lestées au départ d'un navire. Or, le rejet de ces eaux lors de l'opération de délestage peut introduire des espèces exotiques – *i.e.* non présentes naturellement dans le milieu considéré – dans l'écosystème d'arrivée, menaçant la biodiversité indigène, avec le risque de conduire à des conséquences écologiques, sanitaires, économiques et environnementales graves.

Le traitement des eaux de ballast et sédiments des navires est donc nécessaire pour éliminer les micro-organismes et les bactéries des eaux lestées et délestées – le texte BWM/CONF/36 a été adopté par

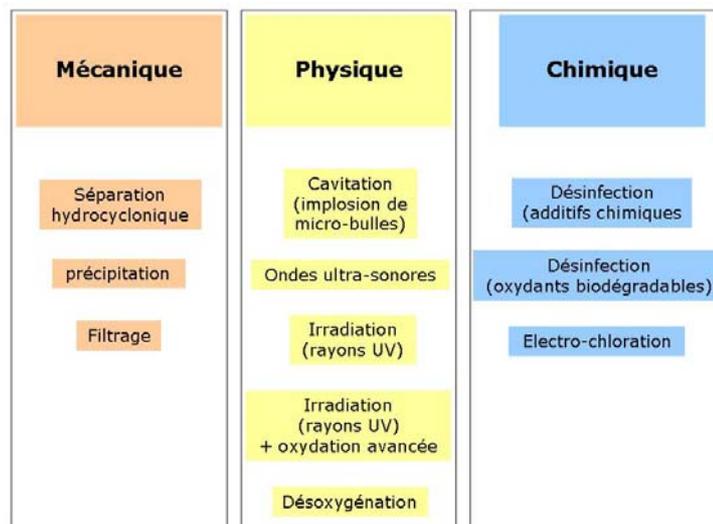
l'OMI en 2004 lors d'une conférence internationale (OMI 2004)<sup>253</sup>. Pour cela, diverses approches – mécanique, physique, chimique – sont possibles. Mesbahi (2005), Peickert (2007), Stewart (2007) et Fürstenberg (2008) proposent un panorama des principales méthodes disponibles (figure 8).

L'approche mécanique, principalement destinée à retirer les particules solides et sédiments de l'eau, repose sur des méthodes telles que la séparation par centrifugation à l'aide d'un hydrocyclone, la précipitation (coagulation, floculation) par procédé magnétique, le tri par barrière physique (filtrage)...

Les méthodes physiques permettent de déstabiliser et détruire les espèces indésirables contenues dans l'eau par chaleur, cavitation (implosion de micro-bulles), ondes ultra-sonores, irradiation par rayons UV, irradiation par rayons UV et oxydation avancée (avec du dioxyde de titane), désoxygénation<sup>254</sup>, etc.

Les procédés chimiques consistent à purifier et désinfecter l'eau des organismes nuisibles à partir de substances actives ou d'additifs chimiques (ozone, peroxyde d'hydrogène, acide peracétique<sup>255</sup>, chlore ou dioxyde de chlore, Seakleen<sup>®</sup><sup>256</sup>...), d'oxydants biodégradables (notamment exempts de chlore), par chloration électrolytique (le chlore utilisé comme désinfectant est obtenu en cassant le chlorure de sodium dissous dans l'eau de mer), par électrodialyse, etc.

La plupart des systèmes disponibles procèdent d'abord à l'élimination des particules solides avant d'épurer l'eau.



**Figure 8.** Principales méthodes de traitement des particules solides et des eaux de ballast.

*Figure 8. Main methods for particle and ballast water processing (Peickert 2007).*

<sup>253</sup> Des Etats (par exemple le Canada, l'Australie, les Etats-Unis, la Nouvelle-Zélande, le Chili, l'Argentine, Israël) et des ports et régions (Vancouver, la région des Grands lacs nord-américains...) imposent aux navires des règles sur la gestion des eaux de ballast.

<sup>254</sup> Un gaz inerte en sursaturation dans le milieu asphyxie les organismes vivants.

<sup>255</sup> Les produits Peraclean<sup>®</sup> Ocean sont des solutions stabilisées d'acide peracétique, de peroxyde d'hydrogène, d'eau et d'acide acétique.

<sup>256</sup> Le principe actif est la vitamine K.

Le tableau 17 compile divers systèmes de traitement des eaux de ballast proposés par des industriels européens, américains, asiatiques et africains ; la technologie mise en œuvre est mentionnée ainsi que son éventuelle certification de conformité par une autorité, en particulier l'OMI (voir Lloyds 2010 ainsi que les références associées au tableau 17).

L'absence de ballast éviterait le traitement des eaux de ballast et, grâce à l'allègement du navire, réduirait la puissance propulsive nécessaire au déplacement du bateau et diminuerait la consommation de carburant. Le concept de navire sans ballast a ainsi été développé en 2001 par M. Parsons et M. Kotinis (Parsons et al. 2007, 2008a,b<sup>257</sup>). Des tunnels, dont les extrémités sont ouvertes, sont aménagés en fond de coque et s'étendent sur toute la longueur du navire. Lors du mouvement du bateau, de l'eau circule dans ces tunnels et la distribution naturelle des pressions sur la coque assure l'équilibre du navire. Ce concept peut être appliqué, par exemple, sur des porte-conteneurs de conception nouvelle.

---

<sup>257</sup> Voir aussi : Aalbers et al. (2005), et : Innovative designs negate need for treatment, *Ballast Water Treatment*, Summer 2009, 26-27.

**Tableau 17.** Systèmes industriels de traitement des eaux de ballast.  
(La technologie appliquée et la certification du système sont mentionnées.)  
*Table 17. Industrial systems to process ballast waters. (Technologies and certifications are mentioned.)*

<b>Fabricant</b>	<b>Pays</b>	<b>Nom du système</b>	<b>Type de technologie</b>	<b>Description de la technologie</b>	<b>Certification</b>	<b>Références</b> (voir en fin de tableau)
Aquaworx ATC GmbH	Allemagne	AquaTriComb	Mécano-physique	Filtration + ultra-sons + traitement UV	<i>IMO basic</i> (juillet 2009)	1-2-3-4
Hamann AG et Evonik	Allemagne	SEDNA (Safe, effective de-activation of non-indigenous aliens)	Mécano-chimique	Hydrocyclone + filtration (50 µm) + biocide (acide peracétique et peroxyde d'hydrogène)	<i>Final IMO</i> (avril 2008) ; <i>Type approval IMO</i> (juin 2008)	1-3-5-6-7
Jos. L. Meyer GmbH	Allemagne		Mécano-chimique	Filtration + désinfection liquide		7
MAHLE Industrie filtration GmbH	Allemagne	Ocean Protection System (OPS)	Mécano-physique	Filtration + traitement UV	En attente (prévu 2010)	8-9

**Tableau 17 (suite)**  
*Table 17 (continued).*

<b>Fabricant</b>	<b>Pays</b>	<b>Nom du système</b>	<b>Type de technologie</b>	<b>Description de la technologie</b>	<b>Certification</b>	<b>Références</b> (voir en fin de tableau)
RWO	Allemagne	CleanBallast	Mécano-chimique	Filtration + électrolyse (EctoSys)	<i>Final IMO</i> (juillet 2009) ; <i>Type approval IMO</i> (prévu fin 2009)	1-3-7-8-10-11
ATLAS-DANMARK	Danemark	ABTS	Mécano-chimique	Filtration + biocide		1-12
Ntorreiro	Espagne	Ballastmar	Mécano-chimique	Filtration + électrolyse + neutralisation		1-13
Auramarine Ltd.	Finlande	Crystal Ballast	Physique	Traitement UV-C		1-14
MetaFil AS	Norvège	OceanSaver	Mécano-physico-chimique	Filtration + cavitation hydrodynamique + désoxygénation (sursaturation en azote gazeux) + électrolyse	<i>Final IMO approval</i> (octobre 2008) ; <i>Type approval IMO</i> (avril 2009)	1-3-7-8-15-16-17

**Tableau 17 (suite)**  
*Table 17 (continued).*

<b>Fabricant</b>	<b>Pays</b>	<b>Nom du système</b>	<b>Type de technologie</b>	<b>Description de la technologie</b>	<b>Certification</b>	<b>Références</b> (voir en fin de tableau)
OptiMarin	Norvège	OptiMarin Ballast System	Mécano-physique	Filtration + traitement UV	<i>Type approval IMO</i> (prévu fin 2009)	1-7-8-18
Qingdao Headway tech Co. Ltd	Norvège	OceanGuard BMWS	Mécano-physico-chimique	Filtration + ultra-sons + électrocatalyse		1-19
Wilhemsen Ships Equipment (WSE)	Norvège	Unitor Ballast Water treatment (UBWT)	Physico-chimique	Cavitation (ultra-sons) + électro-chloration + traitement par l'ozone	<i>Final IMO</i> (juillet 2009)	20-21
Hamworthy (ex GreenShip)	Pays-Bas	Sedinox®	Mécano-chimique	Hydrocyclone (Sedimentor®) + électrolyse (Termanox®)	<i>Final IMO</i> (juillet 2009) ; <i>Final approval IMO</i> (juillet 2009)	1-3-17-22-23-24-25-26-27
ATG Willand	Royaume Uni		Mécano-physique	Hydrocyclone + traitement UV		1-7-28

**Tableau 17 (suite)**  
*Table 17 (continued).*

<b>Fabricant</b>	<b>Pays</b>	<b>Nom du système</b>	<b>Type de technologie</b>	<b>Description de la technologie</b>	<b>Certification</b>	<b>Références</b> (voir en fin de tableau)
Hanovia	Royaume Uni	UV Desinfection	Mécano-physique	Filtration + désinfection par UV		29-30
Alfa Laval (en collaboration avec Wallenius Water)	Suède	PureBallast	Mécano-chimique	Filtration + technologie d'oxydation avancée (radicaux hydroxyyles)	<i>IMO final</i> (juillet 2007) ; <i>Type approval IMO</i> (juin 2008)	1-3-31-32-33
Siemens	Royaume Uni, Etats-Unis, Allemagne	SiCure	Mécano-chimique	Séparation physique + électrolyse		1-34
Ecochlor	Etats-Unis	Ecochlor BWTS	Mécano-chimique	Filtration + biocide (dioxyde de chlore)	<i>IMO basic</i> (octobre 2008) ; <i>Final IMO approval</i> et <i>Type approval IMO</i> (prévu 2009)	1-3-8-35-36

**Tableau 17 (suite)**  
*Table 17 (continued).*

<b>Fabricant</b>	<b>Pays</b>	<b>Nom du système</b>	<b>Type de technologie</b>	<b>Description de la technologie</b>	<b>Certification</b>	<b>Références</b> (voir en fin de tableau)
EcologiQ	Etats-Unis, Canada	BallaClean	Physique	Désoxygénation		1
Electrichlor	Etats-Unis	Electrichlor	Chimique	Biocide (hypochlorite de sodium)		1-8-37
Eltron Water Systems	Etats-Unis	Eltron PeroxEgen	Physico-chimique	Electrolyse (peroxyde d'hydrogène) + traitement UV		17-38
Environmental Technologies Inc. (ETI)	Etats-Unis	BWDTS	Physico-chimique	Ozone + ultra-sons		1-39
Ferrate treatment technologies LLC	Etats-Unis	Ferrator	Chimique	Biocide (ferrate)		1-40

**Tableau 17 (suite)**  
*Table 17 (continued).*

<b>Fabricant</b>	<b>Pays</b>	<b>Nom du système</b>	<b>Type de technologie</b>	<b>Description de la technologie</b>	<b>Certification</b>	<b>Références</b> (voir en fin de tableau)
Hyde Marine	Etats-Unis	Hyde Guardian	Mécano-physique	Filtration + traitement UV	<i>Type approval IMO</i> (avril 2009)	1-3-41-42
Hyde Marine	Etats-Unis	SeaKleen	Chimique	Biocide (menadione)	Commercialisé en 2008	1-5-41-42
MARENCO	Etats-Unis		Mécano-physique	Filtration + traitement UV	<i>WA general conditional</i>	1-43
Maritime Solutions Inc.	Etats-Unis	MSI System	Mécano-physico-chimique	Hydrocyclone + traitement UV ou biocide (Seakleen®)		1-44
MH Systems	Etats-Unis	MHS Ballast Water Treatment	Physique	Désoxygénation + saturation de gaz carbonique	<i>WA conditional</i>	1-29-45
NEI	Etats-Unis	Venturi Oxygen Stripping (VOS)	Mécano-physique	Désoxygénation (peroxyde d'hydrogène) + cavitation	<i>Type approval IMO</i> (septembre 2008)	1-3-29-46-47-48

**Tableau 17 (suite)**  
*Table 17 (continued).*

<b>Fabricant</b>	<b>Pays</b>	<b>Nom du système</b>	<b>Type de technologie</b>	<b>Description de la technologie</b>	<b>Certification</b>	<b>Références</b> (voir en fin de tableau)
Nutech 03 Inc.	Etats-Unis	SCX 2000, Mark III	Chimique	Ozone		1-49
Severn Trent De Nora	Etats-Unis	BalPure	Chimique	Génération par électrolyse d'hypochlorite de sodium + agent neutralisant (bisulfite de sodium)	<i>WA conditional</i>	1-17-50-51
China Ocean Shipping company (COSCO)/Tsinghua University	Chine	Blue Ocean Shield	Mécano-physique	Hydrocyclone + filtration + traitement UV	<i>IMO basic</i> (juillet 2009)	1-3-52
Sunrui CFCC	Chine	Sunrui BWMS	Mécano-chimique	Filtration + biocide + agent neutralisant (thiosulfate de sodium)		1

**Tableau 17 (suite)**  
*Table 17 (continued).*

<b>Fabricant</b>	<b>Pays</b>	<b>Nom du système</b>	<b>Type de technologie</b>	<b>Description de la technologie</b>	<b>Certification</b>	<b>Références</b> (voir en fin de tableau)
21 <sup>st</sup> Century Shipbuilding Co. Ltd	Corée	Blue Ocean guardian	Mécano-physique	Filtration + plasma + traitement UV		1
Hyundai Heavy Industries Co. Ltd.	Corée	EcoBallast	Mécano-physique	Filtration + traitement UV	<i>IMO basic</i> (juillet 2009)	1-3-53
Hyundai Heavy Industries Co. Ltd.	Corée	HiBallast	Mécano-chimique	Filtration + électrolyse + agent neutralisant		1
Kwang San Co. Ltd.	Corée	En-Ballast	Mécano-chimique	Filtration + électrolyse + agent neutralisant		1
NK-03	Corée	BlueBallast	Chimique	Ozone	<i>Final IMO</i> (juillet 2009)	1-3-54

**Tableau 17 (suite)**  
*Table 17 (continued).*

<b>Fabricant</b>	<b>Pays</b>	<b>Nom du système</b>	<b>Type de technologie</b>	<b>Description de la technologie</b>	<b>Certification</b>	<b>Références</b> (voir en fin de tableau)
Panasia Co. Ltd.	Corée	GloEn-Patrol	Mécano-physique	Filtration + traitement UV	<i>IMO basic</i> (avril 2008)	1-3-55-56
Techcross Inc.	Corée	Electro-Cleen	Chimique	Oxydation électrochimique + agent neutralisant (thiosulfate de sodium)	<i>IMO final approval</i> (octobre 2008) ; <i>Type approval IMO</i> (décembre 2008)	1-3-7-8-57
Hitachi Plant technology/Mitsubishi Heavy Industries	Japon	ClearBallast	Mécano-physique	Coagulation + séparation magnétique + filtration	<i>Final IMO</i> (juillet 2009)	1-3-8-58-59-60
Toagosei Group/JFE Engineering Corp.	Japon	JFE-BWMS	Mécano-physico-chimique	Filtration + cavitation + biocide (hypochlorite de sodium) + agent neutralisant	<i>IMO basic</i> (octobre 2008)	1-3-7-8-61
Kuraray	Japon		Mécano-physico-chimique	Filtration + cavitation + agent chimique		62-63

**Tableau 17 (suite)**  
*Table 17 (continued).*

<b>Fabricant</b>	<b>Pays</b>	<b>Nom du système</b>	<b>Type de technologie</b>	<b>Description de la technologie</b>	<b>Certification</b>	<b>Références</b> (voir en fin de tableau)
Mitsubishi Heavy Industries	Japon	Hybrid System	Mécano-chimique	Filtration + électrolyse		1-7
Mitsui Engineering Japan Association of Marine Safety (JAMS)	Japon	Special Pipe Hybrid BWMS ozone	Mécano-chimique	Traitement mécanique + ozone	<i>IMO basic</i> (octobre 2006)	1-3-7-64
Hi Tech Marine	Australie	SeaSafe-3	Physique	Heat treatment	<i>Queensland EPA</i>	1
Resource Ballast Technologies	Afrique du Sud	Unitor BWTS	Mécano-physico-chimique	Cavitation + ozone + biocide (hypochlorite de sodium) + filtration	<i>IMO basic</i> (avril 2008)	1-3-65

### Références

- (1) Dobroski, N., Scianni, C., Takata, L., & Falkner, M., 2009, *October 2010 update: ballast water treatment technologies for use in California waters*, prepared by the California state lands commission, Marine invasive species program, October 15, 2009.
- (2) *AquaTriComb™ (ATC). Ballast water treatment. Product information*, Aquaworx Deutschland GmbH.
- (3) IMO, 2009, *List of ballast water management systems that make use of active substances which received Basic Approval from IMO*, International Maritime Organisation September 2009.
- (4) IMO, 2008, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Application for final approval of the AquaTriCom™ ballast water treatment system*, MEPC 59/2/8, 16 December 2008, International Maritime Organisation.

- (5) Mackey, T. P., Wright, D. A., & Dawson, R., 2003, Ongoing development of two ballast water treatment technologies based on full-scale testing in Baltimore harbour, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2003*, August 20-22, 2003, Sheraton National Hotel, Arlington, VA, USA.
- (6) Ballast system gets early approval, *The Naval Architect*, September 2008, 79-80.
- (7) IMO, 2006, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Report of the ballast water review group*, MEPC 55/WP.4, 11 October 2006, International Maritime Organisation.
- (8) Alfa Laval employs oxidation and no added chemicals, *Ballast Water Treatment*, Summer 2009, 38-44.
- (9) Mahle, 2008, *Ocean protection system OPS*, Technical information, MAHLE Industriefiltration GmbH, September 2008.
- (10) RWO's clean ballast !, *mer*, September 2007, 40-41.
- (11) IMO, 2008c, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Application for final approval of the RWO ballast water management system (CleanBallast)*, MEPC 59/2, 28 November 2008, International Maritime Organisation.
- (12) *Atlas ballast water treatment system*, Atlas-Danmark ApS.
- (13) *Ballastmar*<sup>®</sup>. *Ballast water treatment*, N. Torreiro S.L.
- (14) *CrystalBallast*<sup>™</sup>. *Ballast water treatment for the benefit of the seas*, Auramarine Ltd.
- (15) Whose duty is it to manage corrosion?, *Ballast Water Treatment*, Summer 2009, 28-29.
- (16) Combining BWT with corrosion protection, *Marine Propulsion*, August/September 2007, 47-48.
- (17) Space and power needs influence system choice, *Marine Propulsion*, June/July 2008, 54-56.
- (18) *OptiMarin, OptiMarin ballast system*, OptiMarin AS.
- (19) *OceanGuard ballast water management*, Qingdao Headway Technology Co., Ltd.
- (20) Ballast water treatment for BW, *The Naval Architect*, November 2008, 18.
- (21) *Unitor Ballast Water Treatment System*, Document 010909/No 707040/rev.01, Wilhelmsen Ships Equipment.
- (22) *Greenship's ballast water management system – SEDINOX*<sup>®</sup>, <http://www.greenship.nl>
- (23) Ballast water management – the green solution, *The Motorship*, January 2006.
- (24) Hamworthy snaps up Greenship, *The Naval Architect*, April 2009, 10.
- (25) Waiting for ballast approval, *The Naval Architect*, May 2009, 31-35.
- (26) IMO, 2008, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Application for final approval of the Greenship Sedinox ballast water management system*, MEPC 58/2/6, 12 December 2008, International Maritime Organisation.
- (27) *Greenship's sediment reduction system (Sedimentor*<sup>®</sup>), document Greenship.
- (28) Hesse, K., Zhou, P., & Leigh, T., 2008, *Treatment of ballast water*, United States patent No. US 7,374,692 B2, May 20, 2008.
- (29) Wheater, P., 2008b, Progress made on new systems, *mer*, November 2008, 29-33.
- (30) *Ultraviolet technology. UV disinfection in ship ballast water treatment*, Document 910195-001-01, Hanovia Ltd.
- (31) Alfa Laval, 2008, *Alfa Laval's PureBallast receives Green Ship Technology Award*, Press release, 20 March 2008.
- (32) Seifert, C. S., & Svensson, U., 2006a, Ballast water treatment system improves operational efficiency, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.

- (33) *Turning the tide PureBallast*, enregistrement vidéo de Alfa Laval.
- (34) IMO, 2008, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Application for basic approval of the Siemens SiCURE™ ballast water management system (CleanBallast)*, MEPC 59/2/11, 19 December 2008, International Maritime Organisation.
- (35) Echoclor, 2009, *The Ecochlor® ballast water treatment system*, Echoclor, Inc.
- (36) IMO, 2008, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Application for basic approval of the Ecochlor® ballast water treatment system*, MEPC 58/2/2, 20 March 2008, International Maritime Organisation.
- (37) Bentley, M. B., 2002, *Ballast water treatment*, August 2002, Electricchlor, Inc.
- (38) Eltron, 2007, *PeroxEgen™ hydrogen peroxide water treatment system*, document Eltronresearch & Development, Inc.
- (39) Maddox, T. L., 2009, *On-board water treatment and management process and apparatus*, United States patent No. US 7,595,003, B2, September 29, 2009.
- (40) Ferrate, 2009, *The Ferrator®*, Ferrate Treatment Technologies, LLC.
- (41) Alien invaders – nowhere to hide, *mer*, September 2007, 31-33.
- (42) Hyde seeks approval, *The Naval Architect*, May 2008, 62.
- (43) Nguyen, H., Fowler, W. M., Roop, H., & Nishida, R. Y., 2004, *Ballast water treatment systems including related apparatus and methods*, Pub. No. WO/2004/002895, 08.01.2004.
- (44) Fredricks, R. E., Miner, J. G., & Constantine, C. P., 2009, Maritime solutions ballast water treatment system: a shipboard trial, [http://www.nmri.go.jp/main/cooperation/ujnr/24ujnr\\_paper\\_us/Environmental\\_Science\\_and\\_Engineering/ESE\\_Fredericks\\_Miner.pdf](http://www.nmri.go.jp/main/cooperation/ujnr/24ujnr_paper_us/Environmental_Science_and_Engineering/ESE_Fredericks_Miner.pdf)
- (45) Husain, M., Felbeck, H., Apple, R., Altshuller, D., & Quirnbach, C., 2003, Ballast water treatment by de-oxygenation with elevated CO2 for a shipboard installation – a potential affordable solution, in : *2nd International Ballast Water Treatment R & D Symposium*, 21-23 July 2003, IMO, London, United Kingdom.
- (46) Approval lifts NEI, *The Naval Architect*, May 2008, 59.
- (47) *VOS ballast water treatment technology*, NEI Treatment Systems, LLC.
- (48) NEI, 2007, *Life cycle cost of the venturi oxygen stripping™ ballast tank corrosion protection system in double hull ships*, NEI Treatment Systems, LLC, April 24, 2007.
- (49) van Leeuwen, J., Jennings, M. D., Mueller, R. A., & Robinson, J. H., 2008, *Ballast water treatment system and method without off-gas*, United States patent No. US 7,381,338, B2, June 3, 2008.
- (50) Matousek, R. C., Hill, D. W., Herwig, R. P., Cordell, J. R., Nielsen, B. C., Ferm, N. C., Lawrence, D. J., & Perrins, J. C., 2006, Electrolytic system for treatment of ballast water, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.
- (51) Severn, 2009, *BalPure® overview*, Severn Trent De Nora, LLC.
- (52) IMO, 2008 *Harmful aquatic organisms in ballast water. Application for basic approval of the blue ocean shield ballast water management system*, MEPC 59/2/2, 5 December 2008, International Maritime Organisation.
- (53) IMO, 2008, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Application for basic approval of the HHI ballast water management system (EcoBallast)*, MEPC 59/2/4, 9 December 2008, International Maritime Organisation.

- (54) IMO, 2008, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Application for final approval of the NK-O3 BlueBallast system (ozone)*, MEPC 59/2/3, 8 December 2008, International Maritime Organisation.
- (55) IMO, 2008, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Application for final approval of the GloEn-Patrol™ ballast water treatment system*, MEPC 59/2/7, 16 December 2008, International Maritime Organisation.
- (56) *GloEn-Patrol™ (ballast water treatment system)*, Panasia Co., Ltd.
- (57) IMO, 2007, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Application for final approval of a ballast water management system using active substances (electro-clean electrolytic disinfection)*, MEPC 57/2/1, 7 September 2007, International Maritime Organisation.
- (58) Gregg, M., Rigby, G., & Hallegraef, G. M., 2009, Review of two decades of progress in the development of management options for reducing or eradicating phytoplankton, zooplankton and bacteria in ship's ballast water, *Aquatic Invasions* 4, 521-565.
- (59) Hitachi, & MHI, 2007, *Coagulation and magnetic separation technology 'Hitachi ballast water purification system' obtained basic approval from IMO and will start shipboard testing*, Hitachi Plant Technologies, Ltd. and Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., April 7, 2007.
- (60) IMO, 2008, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Application for final approval of the Hitachi ballast water purification system*, MEPC 59/2/5, 11 December 2008, International Maritime Organisation.
- (61) IMO, 2007, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Application for basic approval of the ballast water management system using 'TG Ballastcleaner and TG Environmentalguard' as active substances*, MEPC 57/2/8, 26 December 2008, International Maritime Organisation.
- (62) ADIT, 2009, *Nouveau système de purification des eaux de ballast*, Agence pour la diffusion de l'information technologique, BE Japon 516, 12 octobre 2009, <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/60783.html>
- (63) Kuraray, 2009, *New ballast water management system developed that is safe and conserves energy and space owing to the use of a special filter*, News releases 2009, Kuraray Co. Ltd., October 5, 2009.
- (64) IMO, 2006, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Basic approval of the active substances used by special pipe ballast water management system (combined with ozone treatment)*, MEPC 55/2, 12 April 2006, International Maritime Organisation.
- (65) IMO, 2008, *Harmful aquatic organisms in ballast water. Report of the fifth meeting of the GESAMP-ballast water working group (GESAMP-BWWG)*, MEPC 57/2/10, 25 January 2008, International Maritime Organisation.

## Références

- Aalbers, A., van der Nat, C., & van Rietbergen, E., 2005, Ballast water free ship design, in : *2<sup>nd</sup> Annual Conference on Green Ship Technology*, Lloyd's List events, 13-14 April 2005, Amsterdam, the Netherlands.
- Aldred, N., & Clare, A. S., 2008, The adhesive strategies of cyprids and development of barnacle-resistant marine coatings, *Biofouling* 24, 351-363.
- Avellan, C., 2008, *Aménagement et gestion des ports : l'effort de R&D vers de nouvelles solutions disponibles*, Pôles de compétitivité mer Bretagne et mer PACA, 11 juin 2008, Brest, France.
- Baum, C., Meyer, W., Stelzer, R., Fleischer, L.-G., & Siebers, D., 2002, Average nanorough skin surface of the pilot whale (*Globicephala melas*, Delphinidae): considerations on the self-cleaning abilities based on nanoroughness, *Marine Biology* 140, 653-657.
- Blache, Y., 2008, Produits naturels marins pour l'élaboration de revêtements antisalissure respectueux de l'environnement, in : *8<sup>e</sup> rencontres technologiques matériaux innovation eco-conception (MIEC)*, 29-30 octobre 2008, La Seyne-sur-Mer, France.
- Brady, R. F., 2005, Fouling-release coatings for warships, *Defence Science Journal* 55, 75-81.
- Callow, J. A., 2010, *Advanced Nanostructured Surfaces for the Control of Biofouling (AMBIO)*, Final activity report, <http://www.ambio.bham.ac.uk/index.shtml>
- Callow, J. A., & Callow, M. E., 2011, Trends in development of environmentally friendly fouling-resistant marine coatings, *Nature Communications* 2, doi:10.1038/ncomms1251.
- DES, 2009, *Warpaint*, Issue 28, March 2009, Defence Equipment & Support, Ministry of Defence, United Kingdom.
- Dettmar, C., 2009, New hull coatings cut fuel use, protect environment, *Currents: The Navy's Environmental Magazine*, vol. 2009, nb. 4, 36-38.
- Dobretsov, S., Dahms, H.-U., & Qian, P.-Y., 2006, Inhibition of biofouling by marine microorganisms and their metabolites, *Biofouling* 22, 43-54.
- ECB, 2008, *Technical notes for guidance in support of Annex VI of directive 98/8/EC of the European Parliament and the Council concerning the placing of biocidal products on the market. Common principles and practical procedures for the authorisation and registration of products*, European Chemicals Bureau, February 2008.
- EDA, 2009, *Annual report on R&T activities 2009*, Research and Technology Directorate, European Defence Agency.
- Fay, F., Linossier, I., Dufau, C., Bourgougnon, N., & Vallee-Rehel, K., 2008a, Peintures marines *antifouling* de nouvelle génération, document RE 106LAB, in : *Techniques de l'ingénieur*, 10 décembre 2008.
- Fay, F., Linossier, I., Dufau, C., Bourgougnon, N., & Vallee-Rehel, K., 2008b, Peintures marines *antifouling* de nouvelle génération, document RE 106, in : *Techniques de l'ingénieur*, 10 décembre 2008.

Fürstenberg, S., 2008, *Ballast water management systems. Available technologies*, DNV Maritime Solutions, 05/06/2008.

Ganguli, R., Mehrotra, V., & Dunn, B., Bioinspired living skins for fouling mitigation, *Smart Materials and Structures* 18, 104027-104034.

Genzer, J., & Efimenko, K., 2006, Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: a review, *Biofouling* 22, 339-360.

Goldie, B., 2008, Modern antifouling aid fuel economy, *Marine Propulsion*, October/November 2008, 59-62.

Goldie, B., 2009, Determining fuel savings from antifouling coatings, *Marine Propulsion*, October/November 2009, 71-74.

Gonthier, Y., & Compère, C., 2007, *Quelle stratégie vis-à-vis des salissures, de l'entretien et de l'étanchéité ? (carénage, peintures, antifouling, produits d'entretiens, colles et joints)*, 28 octobre 2007, De Navigato Econav.

Haras, D., 2005, Biofilms et altérations des matériaux : de l'analyse du phénomène aux stratégies de prévention, *Matériaux & Techniques* 93 Hors-Série, 27-41.

Haslbeck, E., & Vos, M., 2006, Quantifying copper release from antifouling coatings, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.

Heimann, N., & Simpson, G. T., 2006, Surface mineralization as an environmental benign alternative to cadmium plating and hexavalent chromate treatment for corrosion protection, in : *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.

Hellio, C., Yebra, D. M. (eds.), 2009, *Advances in marine antifouling coatings and technologies*, Woodhead Publishing Limited.

Howell, D., & Behrends, B., 2006, A review of surface roughness in antifouling coatings illustrating the importance of cutoff length, *Biofouling* 22, 401-410.

Hugues, C., Bressy, C., & Margaillan, A., 2003, Les différentes approches de protection marine antisalissure par peinture, *Annales de Chimie Science des Matériaux* 28(3), 91-107.

JORF, 1989, *Directive 89/677/CEE du Conseil, du 21 décembre 1989, portant huitième modification de la directive 76/769/CEE concernant le rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des états membres relatives à la limitation de la mise sur le marché et de l'emploi de certaines substances et préparations dangereuses*, Journal officiel de la République française, N° L 398, 0019-0023, 30 décembre 1989.

JOCE, 1998, *Directive 98/8/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 février 1998 concernant la mise sur le marché des produits biocides*, Journal officiel des Communautés européennes, L 123/1-L123/63, 24 avril 1998.

- Klein, G. L., Dufour, A., & Compère, C., 2010, De nouvelles voies d'inhibition des biofilms. Des micro-organismes producteurs de nouvelles molécules actives, *Matériaux & Techniques* 98(1), 2-4.
- Koehl, M. A. R., 2007, Mini review: hydrodynamics of larval settlement into fouling communities, *Biofouling* 23, 357-368.
- Lévêque, R., 2007, *Traitements et revêtements de surface des métaux*, coll. « Technique et ingénierie », Série « Mécanique et matériaux », Dunod/L'Usine Nouvelle, 425-435.
- Lloyds, 2010, *Ballast water treatment technology. Current status*, February 2010, Lloyd's Register.
- Marks, P., 2009, Slimy skin will cut fuel costs by keeping ship's bottoms clean, *NewScientist*, 26 September 2009, 4.
- Martin, C., 2010, *Antifouling Coatings for War Ships (ACWS)*, Poster présenté à : *15<sup>th</sup> International Congress on Marine Corrosion and Fouling (15<sup>th</sup> ICMCF)*, 25-29 July 2010, Newcastle University, United Kingdom.
- Mesbahi, E., 2005, Recent research on ballast water management, in : *2<sup>nd</sup> Annual Conference on Green Ship Technology*, Lloyd's List events, 13-14 April 2005, Amsterdam, the Netherlands.
- O'Leary, C., 2007, Developing coatings for bio-fouling control – Environmental and bottom line impact on shipping, présentation d'International Marine Coatings, *Asia-Pacific Green Ship Technology Conference*, October, 16-17, 2007, Singapore.
- Olsen, S. M., Pedersen, L. T., Laursen, M. H., Kill, S., & Dam-Johansen, K., 2007, Enzyme-based antifouling coatings: a review, *Biofouling* 23, 369-383.
- OMI, 2004, *Conférence internationale sur la gestion des eaux de ballast des navires. Convention internationale de 2004 pour le contrôle et la gestion des eaux de ballast et sédiments des navires. Texte adopté par la conférence*, BWM/CONF/36, 16 février 2004, Organisation maritime internationale.
- ONR, 2009, *Biofouling prevention coatings*, ONR program code 33 and 34, Office of Naval Research, July 2009.
- Parsons, M. G., & Kotinis, M., 2007, *Hydrodynamic optimization testing of ballast-free ship design*, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan, October 30, 2007.
- Parsons, M. G., Thurnau, A. F., & Kotinis, M., 2008a, Ballast free ship: will it work?, *Marine Reporter & Engineering News*, May 2008, 24-28.
- Parsons, M. G., & Kotinis, M., 2008b, *Further development and optimization of the ballast-free ship design concept*, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan, October 30, 2008.
- Pautasso, J.-P., 2009, Le développement durable. Une vraie tempête pour les systèmes de peinture destinés à la protection des navires, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.

Peickert, C., 2007, Ballast water management, présentation de Germanischer Lloyd, in : *Asia-Pacific Green Ship Technology Conference*, October, 16-17, 2007, Singapore.

Stewart, J., 2007, Ballast water management. Overview of current ballast water management technologies, présentation d'International Maritime Technology Consultants, Inc., in : *Asia-Pacific Green Ship Technology Conference*, October, 16-17, 2007, Singapore.

Valt, A., 2008, *Etude de deux procédés de polymérisation d'un précurseur gazeux dans un plasma radiofréquence basse pression et liquide déposé sur un substrat active par décharge à barrière diélectrique à pression atmosphérique : application aux propriétés antifouling*, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 26 septembre 2008.

Viano, Y., 2010, *Recherche de molécules non-toxiques actives en antifouling à partir d'organismes marins en Méditerranée*, thèse de doctorat, Université du Sud Toulon-Var, Toulon, France, 16 juin 2010.

Webster, D. C., Chisholm, B. J., & Stafslie, S. J., 2007, *Biofouling* 23, 179-192.

Willsher, J., 2007a, The effect of biocide free foul release systems on vessel performance, in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.

Willsher, J., 2007b, The effect of biocide free foul release systems on vessel performance, présentation d'International Paint Ltd., in : *Ship Efficiency, 1<sup>st</sup> International Conference*, October 8-9, 2007, Hamburg, Germany.

Yvon, Y., 2008, *Développement d'une méthode de décontamination active des sédiments portuaires pollués en tributylétain par électromigration*, thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l'Adour, Pau, France, 7 novembre 2008.



## Bruit et vibrations

### 9.1 Introduction

La réduction du bruit et des vibrations émis par les navires est nécessaire pour assurer le confort de l'équipage et des passagers<sup>258</sup>, limiter les nuisances sur l'environnement marin ou au voisinage des installations portuaires, et, pour les bâtiments de guerre – mais aussi les navires de pêche – garantir leur discrétion acoustique pour éviter d'être détectés. Les sources génératrices d'ondes acoustiques sont multiples et peuvent être des surfaces immobiles sollicitées par des efforts fluctuants, des machines ou éléments tournants ou vibrants, des surfaces libres soumises à des chocs, des phénomènes de cavitation, etc. Les moteurs, les machines auxiliaires, le système propulsif ou la structure participent ainsi à rendre le navire bruyant. Une revue des sources de vibrations et de leur mode de propagation dans l'eau et dans l'air est donnée par Fournier (2009a,b).

Les deux méthodes principales de lutte contre le bruit sont soit de le réduire à la source (en utilisant, par exemple, un socle inertiel et des supports résilients pour le montage d'une machine), soit d'empêcher sa propagation à l'aide de matériaux absorbants ou réfléchissants. Cependant, ces deux méthodes, purement passives, sont peu efficaces pour éliminer les vibrations du domaine des basses fréquences. Le recours à des méthodes actives est alors nécessaire : des actionneurs – sources de contre-bruit – réduisent le bruit originel par interférences destructives (Mangiante 2008a,b)<sup>259</sup>.

### 9.2 Exemples de travaux théoriques et appliqués

De nombreux travaux sont réalisés pour maîtriser les bruits d'un navire (par exemple, Audoly et al. 2008). Des éléments de management de projet – synthèse des spécifications techniques, choix des méthodes de réduction du bruit, inspection des dispositions mises en place... – pour la réalisation d'un navire à émissions sonores maîtrisées sont fournis par Fischer (2006). Des outils

---

<sup>258</sup> Dans le but d'analyser et limiter les facteurs de risque de perte d'audition des équipages de l'US Navy, Bowes et al. (2006) ont développé – au profit du Department of Navy américain – un outil de calcul (à l'aide de Microsoft® Excel) destiné à évaluer le retour sur investissement des mesures prises pour réduire les bruits de l'ensemble d'une plateforme navale ou d'espaces individuels.

<sup>259</sup> Un système de contrôle actif des bruits et vibrations a été développé par Wesslink (2009 ; cf. § 10.2.3).

numériques pour l'évaluation et l'amélioration de la discrétion acoustique, disponibles dans le commerce (par exemple NASTRAN, PRIMODAL, RAYON) ou développés pour des besoins spécifiques, sont présentés par Marin-Curtoud (2008).

Une analyse théorique du comportement vibratoire du système moteur-plots élastiques-structure du navire, ainsi que des conseils pour la conception, sont donnés par Tso et al. (2002). Un dispositif de plots élastiques pour trains d'engrenages, le système ATB, a été conçu par Renk AG, filiale du groupe MAN<sup>260</sup>. L'étude des performances d'un plot actif « double étage » pour alternateur diesel (pour sous-marin) a été réalisée par Bosio & Noé (2008), tandis que l'Allemand MTU commercialise de tels supports actifs<sup>261</sup>. Le bruit émis par le navire espagnol *Miguel Oliver* d'étude océanographique et des zones de pêche est conforme aux critères de l'International Council for the Exploration of the Sea (ICES) ; ses générateurs de puissance électro-diesel sont montés sur des bases doubles flexibles associées à des plots élastiques<sup>262</sup>. Enfin, le logiciel Odeon d'ØDS permet de sélectionner des solutions pratiques et économiques pour améliorer l'isolation sonore des salles des machines (§ 10.2.3)<sup>263</sup>.

Des ondes acoustiques sont aussi produites par les vibrations de l'hélice du navire. En portant le nombre de pales de quatre à cinq et en modifiant leur profil et leur forme, le niveau sonore de l'hélice en matériau composite de la compagnie norvégienne Sleipner peut être réduit jusqu'à 75 %<sup>264</sup>. Une autre source de bruit importante est due à l'interaction de l'hélice avec la coque et le gouvernail du navire. L'analyse expérimentale de la signature acoustique d'un tel système a été réalisée par Mer et al. (2008). Cette source de bruit a fait l'objet d'une attention particulière pour le navire de prospection pétrographique *Ramform Sterling* de la société Petroleum Geo-Services (PGS) ; la combinaison d'une hélice carénée et d'un gouvernail aux vibrations limitées contribue à rendre ce navire à propulsion hybride électro-diesel particulièrement silencieux (Pakarinen 2008).

Dans le but de réduire les nuisances sonores liées à l'activité maritime, la commission européenne a confié à DCNS le pilotage du projet SILENV (Ship oriented Innovative soLutions to rEduce Noise & Vibrations). D'une durée de 36 mois pour un budget d'environ 5 M€ (dont 3,5 M€ proviennent de la commission européenne), l'objectif de ce projet est de proposer des limites de bruit et des recommandations associées pour différents types de navires à travers un « green label acoustique ». Une quinzaine de partenaires européens, industriels et organismes de recherche, participent au projet. Les études porteront sur les effets du bruit sur les équipages et les passagers à bord des navires, sur les nuisances sonores au voisinage des installations portuaires et sur l'impact du bruit sur la faune marine (DCNS 2009).

Un groupe de travail de l'OMI a été constitué pour étudier le bruit généré par les navires commerciaux et les nuisances induites sur la vie marine. Trois sources principales ont été identifiées : l'hélice, les moteurs et la coque. La nature et le niveau du bruit et des vibrations ont

---

<sup>260</sup> Renk solution for noise damped thrust blocks, *The Motor Ship*, May 2006.

<sup>261</sup> MTU moves into active engine mounting, *Marine Propulsion*, April/May 2008, 109.

<sup>262</sup> Seal of silent approval for Spanish research vessel, *Marine Propulsion*, August/September 2007, 34-35 ; Meeting ICES noise and vibration criteria, *mer*, September 2007, 50-52.

<sup>263</sup> Pour une méthode de prédiction de l'atténuation du bruit, voir : Reducing noise in engine rooms, *Marine Propulsion*, December/January 2007/8, 49-50. D'autre part, Pellicier & Planeau (2008) ont développé un logiciel de calcul pour modéliser le comportement acoustique des locaux techniques des navires (*cf.* § 10.2.3).

<sup>264</sup> Reduced noise from Q-Prop 'Skew' propeller, *mer*, March 2008, 44.

été estimés. Des solutions et options technologiques sont proposées pour améliorer la conception du navire et réduire les bruits ; les avantages et les difficultés de mise en œuvre sont recensés, et une estimation approximative des coûts est donnée, dans une échelle relative qualitative (*i.e.* coûts faibles, moyens ou élevés) (IMO 2009).

## Références

Audoly, C., Sessarego, J.-P., & Lasaygues, P. (dir.), 2008, *Journées « Acoustique et applications navales »*, recueil de résumés d'interventions, Société française d'acoustique & Centre national de la recherche scientifique, 24-25 novembre 2008, Marseille, France.

Bosio, R. & Noé, M., 2008, Etude d'un plot actif pour la suspension d'un diesel alternatif pour sous marin et essai d'un démonstrateur en usine, in : Audoly, C., Sessarego, J.-P., & Lasaygues, P. (dir.), 2008, *Journées « Acoustique et applications navales »*, recueil de résumés d'interventions, Société française d'acoustique & Centre national de la recherche scientifique, 24-25 novembre 2008, Marseille, France.

Bowes, M. D., Shaw, G. B., Trost, R. P., & Ye, M., 2006, *Computing the return on noise reduction investments in Navy ships: a life-cycle cost approach*, CRM D0014732.A2/Final, September 2006, The CNA Corporation.

DCNS, 2009, *La commission européenne confie à DCNS le pilotage d'un projet de recherche visant à diminuer la pollution sonore des navires*, communiqué de presse, DCNS, 24 novembre 2009.

Fischer, R., 2006, Elements of a successful ship noise control project, *Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS) 2006*, American Society of Naval Engineers, 23-25 January 2006, Hilton Crystal City, Arlington, VA, USA.

Fournier, G., 2009a, Hydroacoustique et bruit des navires, in : *Les techniques de l'ingénieur*, BR 2 030-1-BR 2 030-13.

Fournier, G., 2009b, Hydroacoustique et bruit des navires (Pour en savoir plus), in : *Les techniques de l'ingénieur*, Doc. BR 2 030-1.

IMO, 2009, *Noise from commercial shipping and its adverse impacts on marine life*, MEPC 60/18, 18 december 2009, International Maritime Organisation.

Mangiante, G., 2008a, Contrôle actif des bruits. Bases théoriques, in : *Les techniques de l'ingénieur*, BR 3 010-1-BR 3 010-20.

Mangiante, G., 2008b, Contrôle actif des bruits. Bases théoriques (Pour en savoir plus), in : *Les techniques de l'ingénieur*, Doc. BR 3 010-1-Doc. BR 3 010-2.

Marin-Curtoud, P., 2008, Outils numériques utilisés en discrétion acoustique, in : Audoly, C., Sessarego, J.-P., & Lasaygues, P. (dir.), 2008, *Journées « Acoustique et applications navales »*, recueil de résumés d'interventions, Société française d'acoustique & Centre national de la recherche scientifique, 24-25 novembre 2008, Marseille, France.

Mer, L., Esparcieux, P., & Fournier, P., 2008, Analyse expérimentale de la signature acoustique d'un bâtiment de surface dûe à l'interaction coque/ligne d'arbre/propulseur, in : Audoly, C., Sessarego, J.-P., & Lasaygues, P. (dir.), 2008, *Journées « Acoustique et applications navales »*, recueil de résumés d'interventions, Société française d'acoustique & Centre national de la recherche scientifique, 24-25 novembre 2008, Marseille, France.

Pakarinen, R., 2008, Silence is golden, *Twentyfour*7(3), 66-67.

Pellicier, A., & Planeau, V., 2008, Calcul du champ acoustique à l'intérieur des locaux de navires à l'aide de la FMM, in : Audoly, C., Sessarego, J.-P., & Lasaygues, P. (dir.), 2008, *Journées « Acoustique et applications navales »*, recueil de résumés d'interventions, Société française d'acoustique & Centre national de la recherche scientifique, 24-25 novembre 2008, Marseille, France.

Tso, Y., Forrest, J., & Norwood, C., 2002, *Foundation design methods for ship noise reduction*.

Wesselink, J. M., 2009, *Rapid prototyping system for broadband multichannel active noise and vibration control*, thesis of doctor, University of Twente, Enschede, The Netherlands, November 26, 2009.

## Logiciels

La nature des outils d'éco-conception et leur répartition par grandes familles ont été présentées (§ 1.3.2). Tous secteurs d'activité confondus, Reyes Carrillo (2007) a recensé plus de 120 logiciels.

Pour la marine civile, la Shipping Federation of Canada, association d'armateurs et d'opérateurs établis au Canada, a conçu une base de données rassemblant règlementations et normes en vigueur, lignes directrices et manuels de bonnes pratiques (Legars 2006). Des logiciels spécifiques sont également disponibles ou en cours de développement ; ils sont dédiés à l'optimisation de la conception ou des modifications du navire, ou destinés à simuler et évaluer des performances en cours d'exploitation.

### 10.1 Logiciels pour l'éco-conception

Le secteur naval français a initié deux principaux projets, SSD et Convenav (tableau 3). Ces deux outils d'éco-conception devraient permettre, dès la conception mais aussi durant l'exploitation, la maintenance, la modernisation et la déconstruction, d'évaluer et réduire les impacts environnementaux de navires civils et militaires.

- Prévu pour une durée de 1,5 an, le projet SSD fournira un assemblage de modules d'analyse du cycle de vie élémentaires, applicables à une arborescence de navire figée.
- Convenav se déroulera sur une période de 3 ans (2008-2010). Il donnera une évaluation des impacts environnementaux du navire *a priori* (stade de la conception) et en cours d'utilisation pour différents types de navires (bâtiments de grande et petite tailles, civils et militaires). La position géographique du bateau pourra être prise en compte (les impacts environnementaux sont différents en Antarctique et en Océanie, par exemple) et des indicateurs de pollution marine, déterminés par l'IFREMER, intégreront divers paramètres (mode de navigation, les espèces vivantes en présence...).

En Italie, la société Registro Italiano Navale (RINa) a élaboré un système destiné à comparer et discriminer, parmi plusieurs configurations envisageables, la meilleure solution (désignée « GREEN PLUS ») pour améliorer la performance environnementale et réduire les risques de pollution des navires. Cet outil peut permettre d'optimiser le choix de solutions de conception,

d'équipements ou de technologies, ou de procédures opérationnelles<sup>265</sup> ; la formation d'équipage est également possible.

## 10.2 Optimisation de fonctions

Des outils numériques ont été identifiés pour traiter des thèmes des émissions atmosphériques, de l'hydrodynamique navale et des nuisances sonores et vibratoires.

### 10.2.1 Emissions atmosphériques

En France, le projet Eonav (tableau 3) vise à développer un système d'aide à la décision – destiné aux équipages et aux armateurs – pour réduire la consommation d'énergie et les émissions atmosphériques des navires civils et militaires en exploitation.

Chargé par le gouvernement français de réaliser un logiciel d'évaluation des émissions atmosphériques (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> et SO<sub>x</sub>) des navires civils, le consultant MLTC a confié à Tecnicas, filiale du Bureau Veritas, le développement technique de l'outil (§ 7.4). Celui-ci, validé par l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), est destiné à améliorer le profil d'exploitation des navires de la marine marchande (Le Gonidec & Lejuste 2009)<sup>266</sup>.

### 10.2.2 Hydrodynamique navale

Han (2008a,b) a consacré une thèse à l'optimisation numérique de la configuration de la coque du navire avec le gouvernail et l'hélice. Il résout les équations de modèles d'écoulements turbulents par l'approche RANS<sup>267</sup>. Il propose des éléments pour créer un outil pratique destiné aux industriels et à l'enseignement.

C'est aussi la méthode RANS qui est implémentée dans le code de calcul de formes de coques utilisé par FORCE Technology (Danemark). Une illustration des champs de pression sur la coque et l'hélice est donnée par Simonsen (2008).

Le projet français Optnav (tableau 3) vise également à la réalisation d'un outil de simulation et d'optimisation numérique de forme de navires.

### 10.2.3 Bruit et vibrations

Des outils numériques utilisés en discrétion acoustique, disponibles dans le commerce (par exemple NASTRAN, PRIMODAL, RAYON) ou développés pour des besoins spécifiques, sont présentés par Marin-Curtoud (2008).

Le spécialiste danois Ødegaard & Danneskiold-Samsøe (ØDS) a conçu un logiciel, Odeon, d'aide à l'isolation sonore des salles de machines<sup>268</sup>. La réduction du bruit et des vibrations, par des

---

<sup>265</sup> GREEN PLUS adds value, *The Naval Architect*, January 2009, 43.

<sup>266</sup> Voir aussi : How to evaluate emissions, *The Naval Architect*, January 2009, 39.

<sup>267</sup> Reynolds-average Navier-Stokes.

<sup>268</sup> Software predicts engineroom noise levels, *Marine Propulsion*, August/September 2007, 41.

matériaux isolants, peut être simulée à 1dB près seulement. Les solutions les plus pratiques et économiques pour améliorer l'installation peuvent être identifiées aisément. Par ailleurs, Pellicier & Planeau (2008) ont développé un logiciel de calcul, ICAR (Integral Computation of Acoustic Radiation), pour modéliser le comportement acoustique des locaux techniques des navires.

Un système de contrôle actif des bruits et vibrations a été mis au point par Wesselink (2009). Les ondes sonores indésirables, captées par des microphones, sont analysées en temps réel par un algorithme rapide qui asservit un générateur de contre-bruit.

## Références

Han, K., 2008a, *Numerical optimization of hull/propeller/rudder configurations*, thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, June 13, 2008.

Han, K., 2008b, *Numerical optimization of hull/propeller/rudder configurations*, Rolls-Royce & Chalmers University of Technology, June 25, 2008.

Le Gonidec, Y., & Lejuste, F., 2009, Efficacité environnementale du transport maritime – Elaboration d'un outil d'estimation de l'indice de rejet de gaz polluants pour des navires types, in : *La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions*, 29 septembre 2009, Ecole nationale supérieure des techniques avancées, Paris, France.

Legars, A., 2006, *A cost benefits approach: the Shipping Federation's database of environmental programs as a 'Toolbox' for greener shipping*.

Marin-Curtoud, P., 2008, Outils numériques utilisés en discrétion acoustique, in : Audoly, C., Sessarego, J.-P., & Lasaygues, P. (dir.), 2008, *Journées « Acoustique et applications navales »*, recueil de résumés d'interventions, Société française d'acoustique & Centre national de la recherche scientifique, 24-25 novembre 2008, Marseille, France.

Pellicier, A., & Planeau, V., 2008, Calcul du champ acoustique à l'intérieur des locaux de navires à l'aide de la FMM, in : Audoly, C., Sessarego, J.-P., & Lasaygues, P. (dir.), 2008, *Journées « Acoustique et applications navales »*, recueil de résumés d'interventions, Société française d'acoustique & Centre national de la recherche scientifique, 24-25 novembre 2008, Marseille, France.

Reyes Carrillo, T., 2007, *L'éco-conception dans les PME : les mécanismes du cheval de Troie méthodologique et du choix de trajectoires comme vecteurs d'intégration de l'environnement en conception*, thèse de doctorat, Université du Sud Toulon-Var, Toulon, France, 14 décembre 2007.

Simonsen, C. D., 2008, Application of the numerical towing tank, *DMI NEWS* 2008.

Wesselink, J. M., 2009, *Rapid prototyping system for broadband multichannel active noise and vibration control*, thesis of doctor, University of Twente, Enschede, The Netherlands, November 26, 2009.



# Partie 3

## *Epilogue*

« Ici, tout fonctionne à l'électricité. »

Jacques Tardi



## Conclusion et perspectives

### 11.1 Bilan général de l'étude

L'origine de l'économie de production remonte à l'époque néolithique, avec l'apparition de l'agriculture et de l'élevage. Si les effets des activités humaines sur le milieu étaient alors mineurs, ce n'est plus le cas depuis la révolution industrielle au XIX<sup>e</sup> siècle : l'influence de l'homme sur l'équilibre local ou globale de la planète conduit à une modification des écosystèmes. Toutefois, au-delà des seules perturbations écologiques, des bouleversements majeurs – sociétaux, économiques, géostratégiques – sont prévisibles, face auxquels les sociétés doivent se prémunir. Les diverses approches pour penser un développement économique plus respectueux de la nature remontent aux années 1960-1970 et s'appuient sur des courants de pensée qui datent du début du XX<sup>e</sup> siècle. Actuellement, le cadre des problématiques environnementales repose sur le concept de développement durable (1987). Né du constat de l'altération des écosystèmes, de la limite physique à la croissance constante des sociétés de consommation et de l'émergence de problèmes éthiques, ce concept est destiné à assurer un équilibre entre les activités humaines présentes et l'utilisation raisonnée des ressources naturelles en vue de leur préservation pour les générations futures.

Ainsi, l'activité industrielle est-elle désormais encadrée par une législation environnementale qui responsabilise les entreprises. Dans le domaine de la défense, si les performances opérationnelles des systèmes d'armement restent essentielles pour assurer le succès des missions, leurs qualités environnementales ne peuvent plus être ignorées ; en effet, la tendance marquée à la disparition de dérogations accordées pour des matériels d'armement conduit progressivement les ministères de la défense à intégrer les exigences du cadre légal dès la phase de définition des systèmes.

Dans ce contexte, l'éco-conception – qui vise à minimiser les impacts environnementaux négatifs des produits tout au long de leur cycle de vie – apparaît comme une démarche d'ingénierie pertinente, à la fois pour l'industrie civile et militaire.

En France, le ministère de la défense a récemment réitéré son implication en faveur de l'environnement pour prendre en compte – voire anticiper – la réglementation et montrer l'exemplarité de l'action de l'Etat. Dans le domaine naval, la marine nationale, dont les missions sont de nature opérationnelle et de service public, a engagé au cours des années 1980 une démarche volontariste de respect du milieu marin, qui se concrétise en particulier par l'adaptation et l'évolution de ses bâtiments conformément aux exigences légales, connues ou prévisibles. Ces

réalisations sont menées conjointement avec la direction générale de l'armement. Chargée d'équiper les armées et de préparer les systèmes de défense du futur, celle-ci mène en effet diverses actions, notamment la promotion et la mise en œuvre de l'éco-conception au sein de ses équipes.

C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude bibliographique, destinée à dresser un panorama de l'éco-conception navale civile et militaire, en France et à l'étranger.

L'état des pratiques relevées à partir de près de 700 documents et publications (revues spécialisées, actes de conférences, thèses, articles de presse, brochures...) montre que les industriels et organismes, incités principalement par la législation, prennent conscience de la nécessité de réduire les impacts environnementaux négatifs des navires en service ou en développement. Les informations recueillies concernent essentiellement le secteur civil, alors que la communication relative à des projets ou réalisations militaires semble plus discrète. Il apparaît toutefois que la mise en œuvre de l'éco-conception sur l'ensemble du cycle de vie du navire soit encore peu pratiquée.

Les efforts pour limiter les nuisances des navires sont surtout consacrés à la réduction de la consommation énergétique (pour limiter en particulier la dépendance aux ressources fossiles et diminuer les coûts de fonctionnement) et des émissions et rejets polluants dans l'atmosphère et en mer. Pour cela, les options choisies portent principalement sur la conception du navire, son profil opérationnel (routage, allure) et sa maintenance.

De nombreuses technologies innovantes font l'objet de recherches et développements, en France et à l'étranger. Ces travaux s'inscrivent généralement dans le cadre de projets thématiques associant industriels, centres de recherche et organismes de formation. Quelques navires utilisent déjà, ou bien testent ou valident, des innovations technologiques pour des applications spécifiques. En revanche, des réflexions sur les navires du futur sont menées, mais il ne semble pas encore exister de navire prototype ou démonstrateur permettant d'expérimenter, sur une même plateforme, un ensemble de technologies innovantes pour les diverses fonctions du navire.

## **11.2 Essai de prospective technologique pour les navires militaires**

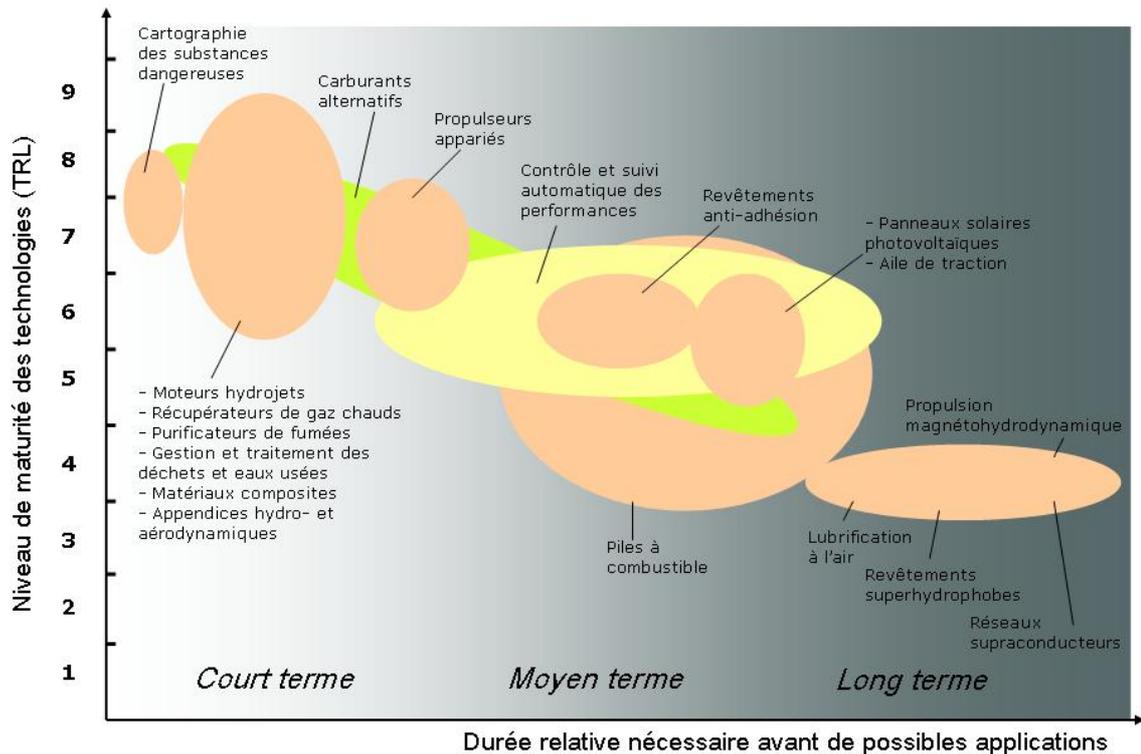
Une performance environnementale accrue des bâtiments militaires reposera sur l'amélioration de fonctions multiples telles que la forme du navire, l'architecture du système propulsif, la gestion et la maîtrise des déchets, le suivi en temps réel de l'allure et des consommations et rejets du navire. Plusieurs pistes peuvent être proposées à partir de solutions techniques existantes ou de technologies de rupture.

- Le rendement des moteurs diesel sera amélioré par la conception des organes du moteur (chambre de combustion, éléments et systèmes mécaniques, réduction des frictions...) et du système d'injection (injecteurs à débit variable, contrôle et gestion électronique du système d'injection...), par le captage et le filtrage des émissions (récupération de l'énergie des gaz chauds, purification des gaz et fumées par réduction catalytique sélective...), ou

encore par l'utilisation de combustibles alternatifs (alco-carburants ou carburants produits par des bactéries, par exemple).

- Les moteurs diesel pourront être supplantés par une motorisation hybride (par exemple diesel-hydrogène), puis par des moteurs électriques. Des piles à combustibles haute puissance pourraient alors produire le courant électrique ; toutefois, l'approvisionnement en hydrogène, par le recours à des installations de distribution portuaire ou la production à bord des navires, ainsi que son stockage à bord, qui occupe un volume important, parfois incompatible avec la place disponible, restent (avec les risques d'explosion) des difficultés à surmonter. L'usage de gaz naturel sera probablement évité à bord des bâtiments militaires, en raison des risques possibles d'explosions – risques accrus en cas de tirs ennemis. Les énergies renouvelables (solaire, éolienne, de la houle...) fourniront un complément d'énergie, limité toutefois à des applications telles que, par exemple, l'alimentation de lampes à basse consommation ou l'apport d'une énergie d'appoint lors d'escale.
- La maîtrise des traînées hydrodynamiques, par la recherche de formes de carène optimales, l'ajout d'appendices, l'emploi de systèmes propulsifs appariés, la réduction des interactions entre l'hélice et la carène, sont autant d'éléments d'optimisation de l'hydrodynamique du navire destinés à réduire la résistance à l'avancement, auxquels contribueront également la création de micro-bulles d'air sous la coque ou sa lubrification à l'air pour améliorer la glisse. Des revêtements nanostructurés particuliers, grâce à leur caractère superhydrophobe, diminueront simultanément la résistance de l'eau sur la carène et l'accrochage de bio-salissures marines – évitant ainsi le recours à des traitements antisalissures particulièrement polluants. Des alliages légers, mais surtout des matériaux composites, contribueront à l'allègement des éléments et structures des œuvres vives et mortes ; bien qu'ils ne soient pas encore recyclables, les composites thermodurcissables sont indispensables car ils sont plus rigides que les thermoplastiques. Des formes évolutives intégrées aux superstructures amélioreront le profil aérodynamique du navire.
- Après collecte et tri sélectif, divers systèmes assureront la gestion, le traitement et la valorisation des déchets à bord du bâtiment (compactage, incinération des déchets recyclables tels que plastiques, papiers, cartons ; broyage des filtres à huile usagés, des pots de peintures inutilisés ; destruction par arc plasma des combustibles ; etc.).
- Le traitement des eaux usées, avant leur rejet ou pour une réutilisation à bord, reste essentiel pour préserver le milieu naturel. Des dispositifs – dont les performances sont en cours de validation ou déjà conformes aux normes de l'Organisation maritime internationale – sont proposés par les fabricants. La filtration par membrane tangentielle permet de séparer efficacement les huiles des eaux de cales. Des systèmes basés sur des procédés biologiques et physico-chimiques sont disponibles pour traiter les eaux grises – leur réutilisation pour un usage sanitaire et technique optimisera les ressources en eau – et les eaux noires – pour lesquelles l'absence totale, post-traitements, de déchets contenant des perturbateurs endocriniens ou des agents bactériologiques demeure une préoccupation. Les eaux de ballast et les sédiments, susceptibles d'introduire dans l'écosystème où est effectuée l'opération de délestage des espèces exotiques menaçant la biodiversité locale, sont traités par des méthodes mécanique, physique ou chimique ; l'évolution du concept de navire sans ballast, solution *a priori* plus adaptée à des navires de la marine marchande (cargos, par exemple), sera également intéressante à suivre.

- Le navire tout électrique – concept pour lequel l'électricité est l'unique fournisseur de puissance pour l'ensemble des fonctions du bord – offre de multiples avantages : flexibilité et évolutivité architecturale, autonomie et manœuvrabilité du navire, redondance des réseaux électriques, réduction des émissions polluantes et sonores... Le courant électrique pourra être produit à partir de moteurs hybrides ou de piles à combustible de forte puissance. Les propriétés des matériaux supraconducteurs à haute température critique seront exploitées pour les moteurs et les réseaux électriques associés. Le stockage stationnaire de l'électricité sera assuré par un ensemble de moyens, en particulier des accumulateurs électrochimiques. Les supercondensateurs et les bobines supraconductrices seront capables de délivrer l'énergie impulsionnelle nécessaire au fonctionnement des systèmes d'arme. Au mouillage, pour éviter que les navires continuent à produire leur électricité, source de pollution et de bruit, les interfaces du réseau électrique du bord devront être compatibles avec celles des infrastructures portuaires. A plus longue échéance, avec des avancées significatives dans le développement de matériaux supraconducteurs à haute température critique, des navires à propulsion magnétohydrodynamique pourront se déplacer à vitesse élevée avec un bruit réduit.
- Des réseaux de capteurs associés à des systèmes d'acquisition de données automatisés fourniront un suivi en temps réel des paramètres du bord (équipements, coque) et de l'état de la mer. Les performances du navire seront optimisées par une gestion intelligente des énergies disponibles, des émissions et rejets polluants, des fluides, des réseaux d'éclairage, etc. Des diagnostics proposeront une description de l'endommagement des zones critiques de la structure du navire et de l'état d'usure de ses équipements, et une maintenance préventive pourra être planifiée.
- La constitution, dès la conception et la fabrication du navire, de la cartographie des substances dangereuses et nocives (nature, localisation, quantité) présentes à bord améliorera les conditions de déconstruction, de démantèlement et de valorisation du bâtiment.



**Figure 9.** Perspective d'utilisation possible de quelques technologies, selon une estimation de leur degré de maturité (TRL) actuel.

*Figure 9.* Perspective of possible use of some technologies, according to their current technology readiness level (TRL).

Toute prédiction est, par définition, difficile à établir. La figure 9 tente cependant de représenter, dans une échelle temporelle relative, l'évolution de la disponibilité d'une sélection de technologies à partir de leur niveau de maturité (TRL) estimé actuellement (la définition des TRL est donnée en annexe A). Le rythme de cette évolution connaîtra vraisemblablement des phases de forte accélération, lorsque des verrous technologiques seront levés et permettront des « ruptures technologiques » (des progrès décisifs dans le développement et la mise en œuvre de piles à combustible ou de matériaux supraconducteurs à haute température critique en sont deux exemples). Une veille scientifique et technique permettra d'identifier les technologies émergentes, suivre l'évolution de leur degré de maturité et connaître la disponibilité de nouveaux matériels et équipements.

Ces éléments de réflexion sont compatibles avec l'évolution de la réglementation environnementale, la réduction des coûts de possession des équipements, et garantissent aux équipages les performances opérationnelles nécessaires à l'accomplissement de leurs missions.



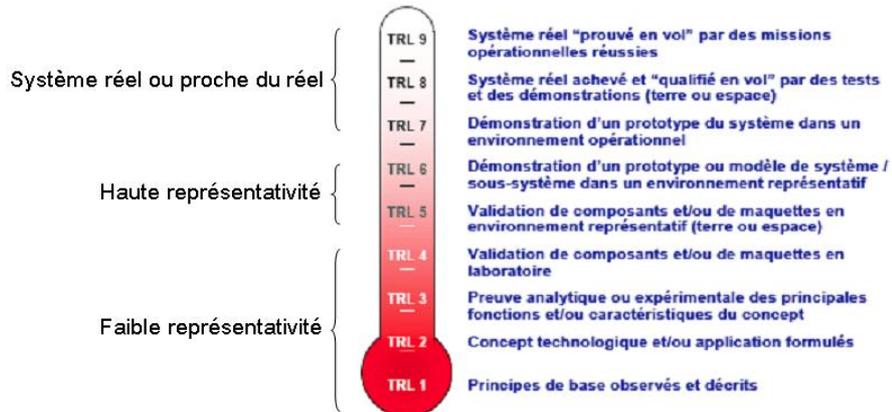
## Annexe A

### Définition des niveaux de maturité d'une technologie (technology readiness level, TRL)

Conçu par la NASA pour gérer le risque technologique de ses programmes, le concept de niveau de maturité d'une technologie (*technology readiness level*, TRL) permet d'évaluer l'état de développement ou de disponibilité d'une technologie. Constituée initialement de sept niveaux, l'échelle d'évaluation des TRL a été étendue à neuf niveaux depuis 1995 (Mankins 1995 ; DGA 2009).

Après quelques adaptations spécifiques au domaine de la défense, cette échelle d'évaluation est officiellement utilisée notamment par le Département de la défense américain (DoD) et le ministère de la défense britannique depuis 2001, et par le Defence Science and Technology Organisation (DSTO) australien depuis 2003. Des organismes de défense semblent l'utiliser couramment comme Defence Research and Development Canada (DRDC), TNO (Netherlands Organisation for applied Scientific Research), Försvarets Materiel Verks (FMV), NATO Undersea Research Centre (NURC).

La figure A1 donne une représentation schématique de l'échelle des TRL. Les TRL 1 à 4 représentent des technologies à l'état de concept ou encore au stade de laboratoire. Les technologies testées et validées dans un environnement représentatif du milieu dans lequel elles seront mises en œuvre sont caractérisées par les TRL 5 et 6. Les démonstrateurs qualifiés dans un environnement opérationnel, ou les systèmes réels utilisés lors de missions réussies, font l'objet des TRL 7 à 9.



**Figure A1.** Définition des niveaux de maturité d'une technologie (TRL).

*Figure A1. Definition of the technology readiness levels (TRL).*

## Références

DGA, 2009, *Plan stratégique de recherche et technologie de défense et de sécurité*, éditions 2009, Direction générale de l'armement.

Mankins, J. C., 1995, *Technology readiness levels, a white paper*, National Aeronautics and Space Administration (NASA), April 6, 1995.

## Annexe B

### Niveaux de maturité (TRL) de quelques technologies

Le tableau B.1 rassemble l'état de maturité (TRL) estimé par Buckingham (2009) pour quelques technologies.

**Tableau B1.** Etat de maturité (TRL) atteint par quelques technologies.

*Table B1. Readiness level (TRL) of some technologies* (Buckingham 2009).

Technologie	TRL	Technologie	TRL
Micro-bulles d'air	5	Turbines à gaz et à vapeur combinées	4
Lubrification à l'air	4	Système hybride turbines à gaz, à vapeur et pile à combustible	4
Revêtements anti-adhésion	6		
Revêtements superhydrophobes	4	Récupérateur d'énergie thermique	7
		Moteur Stirling	5
Bulbe d'étrave	9	Boîte de vitesse magnétique	5
Défecteur de vortex (pour l'hélice)	6		
Jupe arrière ( <i>duck tail</i> )	7	Aile de traction	7
Propulseurs contra-rotatifs	7	Rotor Flettner	5
Appariement propulseurs/gouvernail	7	Boîte de vitesse magnétique	5
Moteur diesel	9	Gaz naturel	7
Turbine à gaz simple cycle	9		
Turbine à vapeur	9	Moteur à induction avancé	9
Moteur hydrojet	7	Moteur à aimants permanents	9
Pile à combustible (PEMFC)	7	Compresseur frigorifique	5
Pile à combustible (MCFC)	6	Réseau de distribution supraconducteur	4
Pile à combustible haute température	4		

#### Référence

Buckingham, J., 2009, *European Defence Agency. Overall platform energy efficiency study, Volume one: technology report*, BMT Defence Services, Reference 36513/R4486, Issue 01, April 2009.



## Annexe C

# Organisations et syndicats professionnels français et étrangers de l'industrie navale

## Australie

### Maritime Australia Limited

PO Box 4095

Geelong Victoria 3220

Australia

(tél.) +(61)-(3)-5282 0500

(fax) +(61)-(3)-5282 4455

<http://www.maritimeaustralia.com.au/>

Exposition biennale PACIFIC (<http://www.pacific2010.com.au/>)

## Danemark

### FAD, Forsvars- & Aerospaceindustrien i Danmark

DI

Sundkrogsvej 20

2100, Denmark

(Contact :) Ena Bjerregaard

(tél.) +45 3377 3785 ou (portable) +45 4064 8927

[eb@di.dk](mailto:eb@di.dk)

<http://www.fad.di.dk>

### Danske Maritime/Danish Maritime

---

Danish Maritime

Amaliegade 33 B, 4<sup>th</sup> floor

DK-1256 Copenhagen K

Denmark

(tél.) +45 33 13 24 16

(fax) +45 33 11 10 96

[mail@danishmaritime.org](mailto:mail@danishmaritime.org)

<http://www.danskemaritime.dk/uk/>

---

Danish Maritime

79, Rue du Cornet

B-1040 Bruxelles

Belgium

(tél.) +32 (02) 230 6934

(fax) +32 (02) 230 7139

[mail@danishmaritime.org](mailto:mail@danishmaritime.org)

<http://www.danskemaritime.dk/uk/>

---

### **Danmarks Rederiforening**

Danmarks Rederiforening  
Amaliegade 33 DK-1256 København K  
(tél.) +45 33 11 40 88  
(fax) +45 33 11 62 10  
[info@shipowners.dk](mailto:info@shipowners.dk)  
<http://www.shipowners.dk>

## **Europe**

### **European Boating Industry**

Rue d'Idalie 9-13  
B-1050 Bruxelles  
Belgium  
(Contact :) Ena Bjerregaard  
(tél.) +32/(0)2 741 24 46  
(fax) +32/(0)2 734 79 10  
[office@europeanboatingindustry.eu](mailto:office@europeanboatingindustry.eu)  
<http://www.europeanboatingindustry.eu>

## **France**

### **Fédération des industries nautiques (FIN)**

Port de Javel Haut  
75015 Paris  
France  
(tél.) +33 (0)1 44 37 04 00  
(fax) +33 (0)1 45 77 21 88  
[info@fin.fr](mailto:info@fin.fr)  
<http://www.fin.fr>

### **Groupement des industries de construction et activités navales (GICAN)**

19-21, rue du colonel Pierre Avia  
75015 Paris  
France  
(Siège :) 47, rue de Monceau  
75008 Paris  
(tél.) +33 (0)1 47 36 80 80  
(fax) +33 (0)1 40 93 57 72  
[contact@gican.asso.fr](mailto:contact@gican.asso.fr)  
<http://www.gican.asso.fr/>

### **Cluster Maritime Français (CMF)**

47, rue de Monceau  
75008 Paris  
France  
(tél.) +33 (0)1 42 25 00 48  
[contact@cluster-maritime.fr](mailto:contact@cluster-maritime.fr)  
<http://www.cluster-maritime.fr/>

## Italie

### **Federazione del Mare (Fédération de la Mer)**

Piazza SS. Apostoli 66

00187 Roma

(tél.) +39 06 674 81 402

(fax) +39 06 697 83 728

[segretariato@federazionedelmare.it](mailto:segretariato@federazionedelmare.it)

<http://www.federazionedelmare.it>

[http://www.federazionedelmare.it/Home/scheda\\_federazione.pdf](http://www.federazionedelmare.it/Home/scheda_federazione.pdf)

### **Union nationale des chantiers navals et des industries nautiques**

UCINA - UNIONE NAZIONALE CANTIERI INDUSTRIE NAUTICHE ED AFFINI

Piazzale Kennedy 1

16129 Genova

(tél.) +39 010 5769 811

(fax) +39 010 5531 104

[www.ucina.net](http://www.ucina.net)

### **Assonave**

Via Tevere, 1/a - 00198 Roma

(tél.) +39 06 84 240 400 - +39 06 84 514 229

[assonave@assonave.it](mailto:assonave@assonave.it)

<http://www.assonave.it>

### **RINAVI**

Via F. Romani, 9 - 16122 Geneva

(tél.) +39 010 83381

(fax) +39 010 8338225

## Norvège

### **The Norwegian Defence and Security Industries Association (FSi)**

Adresse du site : Sørkedalsvn 10 A, NO-0368 Oslo

Adresse postale : P. O. Box 5250, Majorstuen, NO-0303 Oslo

(tél.) +47 23 08 82 37

(fax) +47 23 08 80 18

[fsi@nho.no](mailto:fsi@nho.no)

[http://www.fsi.no/fsi\\_english/home/](http://www.fsi.no/fsi_english/home/)



## Annexe D

### Liste de conférences

#### ***Les nouvelles énergies pour la défense***

Séminaire organisé par le centre des hautes études de l'armement (CHEAr) de la délégation générale pour l'armement (DGA) le 14 novembre 2006 à l'école nationale supérieure des techniques avancées (ENSTA), Paris, France.

<http://www.chear.defense.gouv.fr/>

#### ***Guerre et environnement***

Colloque organisé par le WWF France et la sénatrice Marie Blandin le 6 mars 2008 à Paris, France.

<http://www.wwf.fr/s-informer/actualites/colloque-guerre-et-environnement>

#### ***Nouvelles matières premières***

Organisé par FEDEREC, Fédération des entreprises du recyclage les 25 et 26 juin 2008 au palais des congrès de Strasbourg, France.

<http://www.nouvelles-matieres-premieres.com/>

#### ***Les Mardis de la Mer et des Français***

Cycle de 11 soirées-débats organisé, dans le cadre du Centre d'Études de la Mer (CETMER), par la faculté des lettres de l'institut catholique de Paris et l'Institut Français de la Mer (IFM). Une soirée sur le thème « Les navires du futur » s'est tenue le 16 décembre 2008 à l'institut catholique de Paris, France.

<http://www.icp.fr/>

#### ***Séminaire études amont DCNS***

Organisé par la Délégation générale pour l'armement (DGA) le 22 janvier 2009 à l'Hôtel Mercure Paris Suffren Tour Eiffel, Paris, France.

#### ***Défense et environnement : une nouvelle manière de penser***

Série de conférences organisées par 3B Conseils, dont les trois premières se sont déroulées les 10 juillet 2007, 30 mai 2008 et 2 juillet 2009 à Paris, France.

<http://www.3bconseils.com>

***La réglementation des pollutions marines à l'horizon 2012. Les solutions***

Colloque organisé par l'association technique maritime et aéronautique (ATMA) et le Bureau Veritas le 29 septembre 2009 à l'école nationale supérieure des techniques avancées (ENSTA), Paris, France.

<http://www.atma.asso.fr>

***Journées Ecotechnologies 2009. Technologies pour la protection des ressources continentales et marines***

Colloque PRECODD (programme de recherche écotechnologies et développement durable) organisé par l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), l'agence nationale de la recherche (ANR) et le pôle de compétitivité mer Bretagne les 1 et 2 octobre 2009 au Palais Grand Large, Saint-Malo, France.

<http://www.precodd.fr>

***9 Rencontres technologiques matériaux, innovation, éco-conception (MIEC)***

Colloque organisé le Centre d'animation régional en matériaux avancés (CARMA) le 6 octobre 2009 à l'institut des sciences de l'ingénieur de Toulon-Var (ISITV) à La Valette du Var, France, et les 7 et 8 octobre 2009 à l'institut de promotion et de formation aux métiers de la mer (IPFM) à La Seyne sur Mer, France.

<http://www.materiatech-carma.net/miec/rencontres.php>

***Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS)***

Série de conférences organisées par l'American Society Naval Engineers (ASNE) du 23 au 26 janvier 2006 et les 21 et 22 août 2003 à Arlington, Virginie, USA.

<http://www2.navalengineers.org>

***Green Shipping Summit 2009***

Conférence organisée par IBC Asia du 24 au 26 février 2009 au Hilton Singapore, Singapour.

<http://www.abc-asia.com/greenshipping>

***Marine Science & Technology for Green Shipping***

Conférence organisée par le Department of Naval Architecture & Marine Engineering des universités de Glasgow & Strathclyde les 17 et 18 juin 2009 au Corinthia, Merchant City, Glasgow, Grande-Bretagne.

<http://www.seeglasgow.com>

***Green Shipping World***

Conférence organisée par GreenPower conferences les 2 et 3 octobre 2006 à Copenhague, Danemark.

<http://www.greenpowerconferences.com>

***The Sustainable Marine Transportation Conference 2009***

Conférence organisée par la Royal Norwegian Embassy, Innovation Norway et Norwegian business association, Singapour, le 19 mars 2009 au St Regis Singapore, Singapour.

<http://www.innovationnorway.no/SMTC2009>

### ***Zero Emission Ships (Zemships) Conference***

La première conférence a été organisée par hySOLUTION le 23 octobre 2008 à Hambourg, Allemagne ; la prochaine aura lieu le 20 avril 2010, toujours à Hambourg.

<http://www.zemships.eu>

### ***International Conference on Ship Efficiency***

Les deux premières conférences ont été organisées par Schiffbautechnische Gesellschaft e.V. (STG) les 8 et 9 octobre 2007 et les 28 et 29 septembre 2009 à Hambourg, Allemagne ; la prochaine se déroulera les 26 et 27 septembre 2011, toujours à Hambourg.

<http://www.ship-efficiency.org>

### ***Green Ship of the Future***

Conférences présentant le projet danois dont les dernières se sont déroulées le 25 mars 2010 à Singapour, et les 2 et 6 novembre 2009 respectivement à Hanoi et à HoChi Minh.

<http://www.greenship.org>

### ***2<sup>nd</sup> Annual Conference Green Ship Technology Asia-Pacific***

Conférence organisée par la Lloyd's List les 16 et 17 octobre 2007 au Grand Copthorne Waterfront Hotel, Singapour.

<http://www.lloydslistevents.com>

### ***Annual Conference Green Ship Technology***

Séries de conférences organisées par la Lloyd's List, dont les trois dernières se sont déroulées les 16 et 17 mars 2010 au Radisson Blu Scandinavia Hotel, Copenhague, Danemark, les 24 et 25 mars 2009 au Royal Meridien Hotel, Hambourg, Allemagne, et les 11 et 12 mars 2008 au Hilton Rotterdam, Pays-Bas.

<http://www.lloydslistevents.com>

### ***Carbon Emissions and GHGs in Shipping – Managing the challenges ahead***

Conférence organisée par la Lloyd's Maritime Academy les 9 et 10 novembre 2009 à Bonhill house, Londres, Grande-Bretagne, et du 12-13 November 2008, Londres, Grande-Bretagne.

<http://www.lloydsmaritimeacademy.com>

### ***Managing Carbon Emissions and GHGs in Shipping – Meeting the challenges to reduce shipping's carbon footprint***

Conférence organisée par Informa Maritime Events les 18 et 19 mai 2010 au Radisson Blu Portman Hotel, Londres, Grande-Bretagne.

<http://www.informamaritimeevents.com>

### ***Reducing Emissions to Air from Shipping***

Conférence organisée par la Lloyd's Maritime Academy du 22 au 24 avril 2009 au Hatton, Londres, Grande-Bretagne.

<http://www.lloydsmaritimeacademy.com>

***Management of Ship's Waste – Meeting the challenges and understanding the risks***

Conférence organisée par la la Lloyd's Maritime Academy les 28 et 29 septembre 2009 au Hatton, Londres, Grande-Bretagne.

<http://www.lloydsmaritimeacademy.com>

***A Practical Guide to Fuel Management, Ship Performance and Energy Efficiency***

Conférence organisée par la Lloyd's Maritime Academy les 26 et 27 janvier 2010 à Prospero House, Londres, Grande-Bretagne.

<http://www.lloydsmaritimeacademy.com>

***Annual Ballast Water Management Conference***

Séries de conférences organisées par Informa Maritime Events, dont la dernière a eu lieu les 9 et 10 décembre 2009, IMO, Londres, Grande-Bretagne.

<http://www.informamaritimeevents.com>

***Ship Recycling Conference***

Séries de conférences organisées par la Lloyd's List dont les deux dernières se sont déroulées les 13-14 mai 2008 et les 17-18 février 2009 à Londres, Grande-Bretagne.

<http://www.lloydslistevents.com>

***Ship Design and Operation for Environmental Sustainability***

Conférence organisée par la Royal Institution of Naval Architects (RINA) les 10 et 11 mars 2010, Londres, Grande-Bretagne.

<http://www.rina.org.uk>

***Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)***

Conférence biannuelle organisée par la Royal Institution of Naval Architects (RINA) ; les deux dernières se sont déroulées du 20 au 22 avril 2009 à Baltimore, MD, USA, et du 21 au 23 mai 2007 à Arlington, Virginie, USA.

<http://www.ieeexplore.ieee.org>

***Internal Combustion Engines : performance, fuel economy and emissions***

Conférence organisée par l'Institution of Mechanical Engineers les 8 et 9 décembre 2009 one birdcage walk, Londres, Grande-Bretagne.

<http://www.imeche.org>

***Air Emissions from Shipping – Status and way ahead***

Conférence organisée par la Danish Society for Naval Architecture, Marine Engineering et la Danish Maritime Society les 27 et 28 octobre 2008 à Copenhague, Danemark.

<http://www.imeche.org>

***Warship 2006 – Future Surface Warships***

Organisée par la Royal Institution of Naval Architects (RINA) les 20 et 21 juin 2006 à Londres, Grande-Bretagne.

<http://www.rina.org.uk>

***International Symposium on Ship Design & Construction 2009 – The environmentally friendly ship***

Organisée par la Royal Institution of Naval Architects (RINA) les 1<sup>er</sup> et 2 septembre 2009 à Tokyo, Japon  
<http://www.rina.org.uk>

***International Symposium Towards Clean Diesel Engines (TCDE)***

Conférences organisées par l'IVG University of Duisburg-Essen et dont les trois dernières conférences ont eu lieu les 2 et 3 juin 2005 à Lund, Suède, du 20 au 22 juin 2007 à Ischia, Italie et les 4 et 5 juin 2009 au AGIT Technology Center, Aachen, Allemagne.

<http://www.ivg.uni-due.de/TCDE/>

***Haagen-Smit Symposium. Ships, trains, and the future of goods transport***

Organisé par le California Air Resources Board du 18 au 21 Avril 2005 à Aptos, Californie, USA.

***25<sup>th</sup> CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology for Ship Propulsion Power Generation Rail Traction***

Conseil international des machines à combustion organisé par l'Austrian National CIMAC Committee du 21 au 24 Mai 2007 à Vienne, Autriche.

<http://www.cimac.com>

***10<sup>th</sup> Naval Platform Technology Seminar (NPTS 2005)***

Organisé par la Republic of Singapore Navy (RSN) les 17 et 18 mai 2005 à Singapour.

<http://www.mindef.gov.sg/navy>

***7<sup>th</sup> International Naval Engineering Conference (INEC 2004), Marine Technology in Transition***

Organisée par l'Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEST) du 16 au 18 mars 2004, Pays-Bas.

<http://www.imarest.org/>

***18<sup>th</sup> KIMO International Annual Conference***

Organisé par la Kommunenes Internasjonale Miljøorganisasjon (KIMO) le 4 octobre 2008 à l'PECCO Centre, Tønder, Danemark.

<http://www.kimobaltic.eu/>

***Blue Conference***

Organisée par le Danish Maritime Development Center of Europe, Copenhague les 3 et 4 décembre 2008 à Frederikshavn, Danemark.

<http://www.maritimecenter.dk/>

***Meriliikenne ja Ympäristö***

Organisé par le Merenkulkualan koulutus- ja tutkimuskeskus on Turun yliopiston les 8 et 9 décembre 2005 à Hanasaari, Espoo, Finlande.

<http://mkk.utu.fi/>

***The Motor Ship Marine Propulsion Conference***

Organisé par The Motorship les 10-11 avril 2002 à Copenhague, Danemark.

<http://www.motorship.com>

***Journal of Commerce Transpacific Maritime Conference***

Organisé par le Journal of Commerce Conferences le 6 mars 2006 à Long Beach, Californie, USA.

<http://www.joc.com/conferences/>

***European Cruise Industry Conference***

Conférence annuelle organisée en février depuis 2007 par Ashcroft & Associates à Bruxelles, Belgique.

<http://www.ashcroftandassociates.com/>

***European Aerosol Conference (EAC)***

Conférence annuelle organisée début septembre par l'European Aerosol Assembly (EAA) et l'Association for Aerosol Research.

***11<sup>th</sup> ETH-Conference on combustion generated nanoparticles***

Organisée par l'Eidgenössisches Technische Hochschule (ETH) Zürich du 12 au 15 août 2007 à l'ETH-Zentrum, Zurich, Suisse.

[http://www.lav.ethz.ch/nanoparticle\\_conf/](http://www.lav.ethz.ch/nanoparticle_conf/)

***7<sup>th</sup> International Aerosol Conference 2006***

Organisée par l'American Association for Aerosol Research (AAAR) du 10 au 15 Septembre 2006 à Saint Paul, Minnesota, USA.

<http://www.aaar.org/meetings/iac2006/index.htm>

***SAE World Congress 2007***

Conférence annuelle organisée en avril par SAE International au Cobo Center, Detroit, Michigan, USA.

<http://www.sae.org/congress/>

***Ship Noise and Vibration Conference***

Organisée par Lloyd's List les 17 et 18 septembre 2007 à Londres, Grande-Bretagne.

<http://www.lloydslistevents.com>

# Contents

<b>List of figures</b>	11
<b>List of tables</b>	13
<b>Acronyms and abbreviations</b>	15
<b>Foreword</b>	17
<b>Part 1. <i>Context, initiatives, projects</i></b>	19
<b>1 Introduction</b>	21
1.1 Increased consumption and sustainable development	21
1.2 Environmental regulation context	23
1.2.1 European Union	24
1.2.2 International Maritime Organization	25
1.3 Eco-design, a design dedicated to environment	28
1.3.1 Definitions and principles	28
1.3.2 Eco-design tools	29
1.3.3 An active research field	30
References	31
<b>2 Defence and environment</b>	37
2.1 French defence, armament systems and environment	37
2.1.1 The commitment of the ministry of defence	37
2.1.2 The Navy and the environmental protection	38
2.1.3 Environmental feature within armament programmes	38
2.2 Defence in Europe and in North Atlantic	40
2.2.1 European Defence Agency	40
2.2.2 North Atlantic Treaty Organization	40
2.3 Environmental impact of a warship	41
2.3.1 Pollutant signature of a ship	41
2.3.2 Environmental-friendly ship and military specificities	42
References	43

<b>3 In-service ships to future ships: some initiatives and projects</b>	<b>47</b>
3.1 French competitiveness clusters, French and European professional associations, Grenelle de la mer	48
3.1.1 French competitiveness clusters' projects	48
3.1.2 GICAN (Groupement des industries de construction et activités navales)	48
3.1.3 European confederation of nautical industries	48
3.1.4 The French Grenelle de la mer	49
3.2 Some foreign industrial initiatives	49
3.3 In-service ships environmental achievements	58
3.4 From existing green ships...	59
3.5 ... to the projects of future ships	60
References	66
<b>Part 2. Shipboard functions, innovative technologies</b>	<b>73</b>
<b>4 An essential management of the energy consumption</b>	<b>75</b>
References	79
<b>5 Motorization, propulsion, power, hydrodynamics</b>	<b>81</b>
5.1 Advanced diesel engines	81
5.2 Heat recovery plants	84
5.3 Isoengines	85
5.4 Waterjets	85
5.5 Pod propulsion systems	85
5.6 Integrated power systems	86
5.6.1 Stationary storage of electrical energy: a general statement	86
5.6.2 European POSE <sup>2</sup> IDON programme	89
5.6.3 United States Next Generation Integrated Power System programme	89
5.6.4 The approach of the British Royal Navy	90
5.7 Hydrodynamics and propulsion system	90
5.7.1 Improvement of ship hydrodynamics	90
5.7.2 Hydrodynamics and propellers: a few topics	92
5.7.3 Lubricants and bearings for shaft parts	94
5.8 The all electric ship	94
5.8.1 A brief historical overview	94
5.8.2 On the interest of the concept	95
5.8.3 Examples of recent all electric warships	97
5.8.4 Magnetohydrodynamic-propelled ships?	97
References	98
<b>6 Energy and resources</b>	<b>107</b>
6.1 Biofuels	107
6.1.1 Definitions	107

6.1.2 Initiatives and projects	108
6.2 Natural gas	109
6.3 Hydrogen and fuel cells	110
6.4 Sun	114
6.5 Wind	115
6.6 Swell	117
References	117
<b>7 Management and waste processing</b>	<b>123</b>
7.1 Bilge water	123
7.2 Grey and black waters	126
7.3 Solid wastes	128
7.4 Air emissions	129
References	134
<b>8 Antifouling systems, ballast waters and sediments</b>	<b>139</b>
8.1 Antifouling paints	139
8.1.1 Introduction	139
8.1.2 Antifouling with biocides	141
8.1.3 Foul release coatings (or low surface energy)	143
8.1.4 Biomimetics perspectives	144
8.2 Ballast waters and sediments	144
References	160
<b>9 Noise and vibrations</b>	<b>165</b>
9.1 Introduction	165
9.2 Examples of theoretical and applied achievements	165
References	167
<b>10 Softwares</b>	<b>169</b>
10.1 Eco-design softwares	169
10.2 Shipboard functions optimization	170
10.2.1 Air emissions	170
10.2.2 Naval hydrodynamics	170
10.2.3 Noise and vibrations	170
References	171
<b>Part 3. Epilogue</b>	<b>173</b>
<b>11 Conclusions and perspectives</b>	<b>175</b>
11.1 General findings	175
11.2 Suggested technological prospects applying to warships	176

<b>Appendix A – Definition of the technology readiness levels (TRL)</b>	181
<b>Appendix B – Technology readiness level of some technologies</b>	183
<b>Appendix C – French and foreign professional associations in naval shipbuilding</b>	185
<b>Appendix D – List of conferences</b>	189

Conception et impression réalisées par le CEDOCAR

Octobre 2011





# ECO-CONCEPTION NAVALE

## Pratiques actuelles et futures dans les activités de construction navale civile et militaire, en France et à l'étranger

L'exigence de conformité des biens et des services aux réglementations environnementales internationale, européenne et nationale, destinées à réduire les effets des activités humaines sur le milieu, n'épargne plus les matériels d'armement pour lesquels les dérogations parfois accordées tendent à disparaître progressivement. Dans ce contexte, l'éco-conception – dont l'objectif est de réduire l'impact environnemental des produits tout au long de leur cycle de vie – apparaît comme une démarche d'ingénierie pertinente pour l'industrie civile et militaire. En France, la marine nationale est engagée dans une démarche volontariste de respect du milieu marin, et la direction générale de l'armement mène diverses actions, notamment la mise en oeuvre de l'écoconception dans le cadre du management des programmes d'armement. Basée sur l'analyse de plusieurs centaines de documents issus de publications scientifiques, de la presse spécialisée, de brochures d'industriels, cette étude propose un panorama des pratiques de l'éco-conception navale, civile et militaire, en France et à l'étranger. Les principales mesures contraignantes applicables au secteur naval sont d'abord rappelées ; des projets de navires du futur et des technologies en cours d'étude sont ensuite présentés ; des éléments de réflexion – compatibles avec les exigences opérationnelles des marins – sont enfin proposés par les auteurs pour la conception des futurs bâtiments militaires.

**Stéphane FAUVAUD**  
**Patricia FORGENEUF**  
**Frédéric LE JONCOUR**

## ECO-DESIGN IN SHIPBUILDING

### Current and future practices in civilian and military shipbuilding activities, in France and abroad

Considering that armament systems are no longer granted specific exemptions, they are actually more and more required to comply with international, European and national environmental regulations aiming at minimizing environmental damage due to human activities. Thus, in this context, civilian and military industry is getting more and more involved in eco-design, which appears to be a relevant engineering approach intended to reduce the environmental impact of any product throughout its life-cycle. In France, both the Navy and DGA (Direction générale de l'armement) are committed to a proactive approach; while the Navy is mainly concerned with the protection of marine environment, DGA is more specifically involved in the management of armament programmes, thus carrying out various actions, including the implementation of eco-design. Relying on the analysis of hundreds of publications such as scientific papers, trade press and industry brochures, this study offers an overview of both naval, civilian and military eco-design in France as well as abroad. The main constraints applying to naval shipbuilding are first restated and then followed by a presentation of new concepts of future ships and of technologies currently under development; authors eventually suggest some options and alternatives regarding future naval ships, in accordance with the Navy's operational requirements.



**DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ARMEMENT**

DGA - DS / CEDOCAR

9, boulevard Liédot

16021 ANGOULEME CEDEX

Tél.: 05 45 37 19 19

<http://www.defense.gouv.fr/dga/liens/le-cedocar>