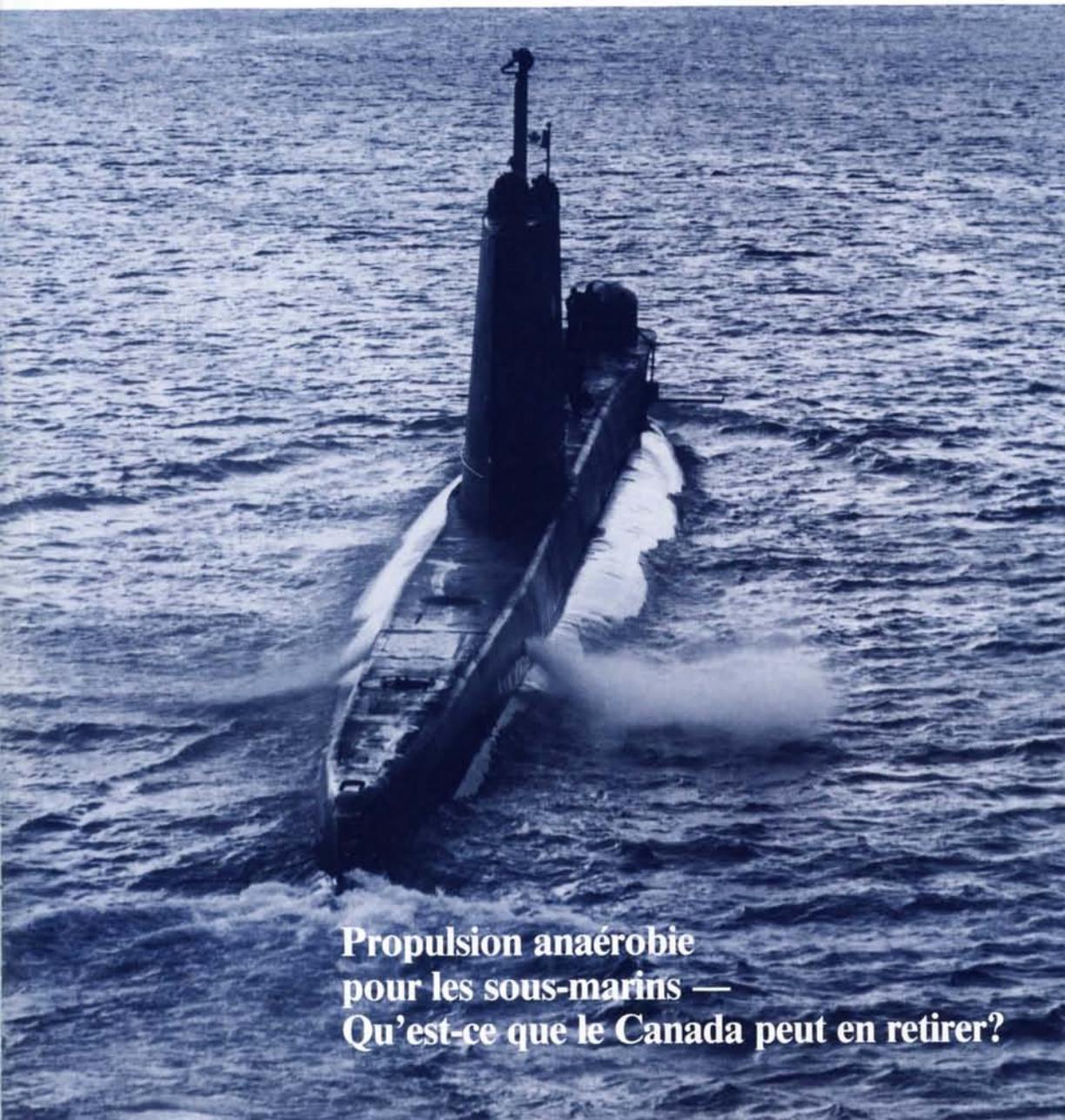


# Revue du Génie maritime

Octobre 1991



**Propulsion anaérobie  
pour les sous-marins —  
Qu'est-ce que le Canada peut en retirer?**



Essai des systèmes de combat :  
Cette cible-roquette, développée au  
Canada, aura un rôle à jouer quand  
viendra le temps de défier les systèmes  
de guerre anti-aérienne et de surface  
des programmes TRUMP et FCP.

. . . page 24



# Revue du Génie maritime



Directeur général  
Génie maritime  
et maintenance  
*Commodore M.T. Saker*

Rédacteur en chef  
*Capt(M) David Riis, DMGE*

Rédacteurs au service technique  
*Cdr Roger Cyr (Systèmes de combat)*  
*Lcdr Doug Thoreson (Systèmes de combat)*  
*Cdr Dave McCracken (Mécanique navale)*  
*Lcdr Bob Jones (Mécanique navale)*  
*Lcdr Darcy Byrtus (Architecture navale)*  
*Lcdr Cliff Johnston (Architecture navale)*

Directeur de la production  
*Lcdr(R) Brian McCullough*  
**(819) 997-9355**

Graphiques  
*Ivor Pontiroli, DSEG 7-2*

Traitement de textes  
par DMAS/CTM 4M  
*Mme. Terry Brown, Superviseur*

Services de traduction :  
Bureau de la traduction, Secrétariat d'État  
*M. Louis Martineau, Directeur*

## PHOTO COUVERTURE

Le NCSM *Onondaga* sortant du port  
d'Halifax pour des exercices en 1979.  
*(Photo des FC)*

Octobre 1991

## DÉPARTEMENTS

Notes de la rédaction .....	2
Lettres .....	4
Chronique du commodore .....	5

## ARTICLES

Propulsion anaérobie pour les sous-marins : un point de vue canadien <i>par le lcdr K.A. Heemskerk</i> .....	6
Les moteurs diesels à atmosphère synthétique dans les véhicules sous-marins <i>par G.T. Reader et J.G. Hawley</i> .....	15
Danger — logiciel en vue! <i>par le cdr Roger Cyr</i> .....	21
Systèmes de guerre anti-aérienne et de surface des programmes TRUMP et FCP au défi! <i>par le lcdr Richard Houle</i> .....	24
RÉTROSPECTIVE : incident technique — une leçon .....	27
BULLETIN D'INFORMATION .....	28

La Revue du Génie maritime (ISSN 0713-0058) est une publication autorisée et non-officielle des ingénieurs maritimes des Forces canadiennes. Elle est publiée quatre fois l'an par le Directeur général du Génie maritime et de la maintenance. Les opinions exprimées sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les politiques officielles. Le courrier doit être adressé au **Rédacteur en chef, La Revue du Génie maritime, DMGE, Quartier général de la Défense nationale, Édifice MGen George R. Pearkes, Ottawa, Ontario, Canada K1A 0K2**. Le rédacteur en chef se réserve le droit de rejeter ou d'éditer tout matériel soumis. Nous ferons tout en notre possible pour vous retourner les photos et les présentations graphiques en bon état. Cependant, la Revue ne peut assumer aucune responsabilité à cet égard. À moins d'avis du contraire, les articles de cette revue peuvent être reproduits tout en tenant compte des mérites de l'auteur et de la Revue.



# Notes de la rédaction

## Surveillance de la condition de l'équipement — Quand est-ce "assez"?

Dans le discours-programme qu'il a prononcé en juin lors de la cinquième Conférence annuelle sur la surveillance de la condition de l'équipement naval, le commodore M.T. Saker (DGGMM) a livré un message percutant aux délégués : quantifiez les bénéfices des divers programmes de surveillance de condition de l'équipement, sinon vous courez le risque de les voir abolir.

Il s'agissait là d'un message difficile à encaisser, mais les temps sont durs pour la marine sur le plan financier. Pratiquement toutes les facettes du soutien au génie maritime, y compris la surveillance de la condition de l'équipement (SCÉ), sont examinées à la loupe du fait que les ingénieurs et les planificateurs s'efforcent de maintenir un niveau de disponibilité des navires acceptable au moindre coût. La formule est simple. S'il n'est pas possible de prouver qu'une mesure de SCÉ n'apporte pas de bénéfices quantifiables en termes de fiabilité accrue de l'équipement ou de réduction des coûts de maintenance, la mesure n'a alors probablement pas sa raison d'être.

La SCÉ est un élément vital de l'ensemble du système de maintenance de la marine. Il s'agit d'une idée qui est à première vue pleine de bon sens et qui fonctionne en pratique. Par exemple, un



### *Conférence sur la SCÉ*

examen récent des données recueillies dans le cadre du Programme d'analyse de l'état du lubrifiant et du fluide de refroidissement (l'OCCAP) a fait la preuve que le programme permettait de prévoir les défaillances. Mais il nous faut déterminer dans quelle mesure la SCÉ est nécessaire — combien de journées d'utilisation des

navires, d'heures de travail des membres de l'équipage, d'heures de soutien à terre et de dollars en équipement/en traitement sont "assez"?

La rationalisation des programmes de SCÉ de l'équipement de la marine est en cours. Par exemple, certaines machines

ont été exclues du Programme d'analyse spectrométrique du lubrifiant (qui sera bientôt fusionné avec l'OCCAP), et une réunion visant à déterminer quelles pièces d'équipement devraient faire partie ou non du Programme d'analyse des vibrations est prévue pour l'automne. Il incombe à chacun de nous de s'assurer que les techniques de SCÉ sont utilisées judicieusement. Faites connaître vos vues, assurez-vous que tous profitent de votre expérience.

\* \* \* \* \*

Nous débutons le présent numéro de la *Revue* avec non pas un, mais bien deux articles sur la propulsion anaérobie pour les sous-marins. Le premier article, qui est un document de fond rédigé par le lcdr Karel Heemskerck, traite des divers options techniques possibles dans une optique canadienne. Par contraste, le deuxième article porte sur une seule technologie : le moteur diesel à atmosphère synthétique. Il est à souligner que les auteurs de l'article, le professeur Graham Reader et le lcdr de la Royal Navy Gary Hawley, participent à des recherches concertées sur le moteur diesel à atmosphère synthétique au Royal Navy Engineering College (Manadon) et à l'Université de Calgary. Les points de vue différents desquels les deux articles sur les sous-marins ont été rédigés en font des lectures très intéressantes.

Nous avons aussi le plaisir de vous présenter un autre "désastre d'antan" — l'histoire d'un incident technique duquel il y a une leçon à tirer. Au cours des derniers mois, nous avons eu plusieurs

demandes pour de tels articles, et nous profitons de l'occasion pour inviter nos lecteurs à nous envoyer le récit d'incidents qu'ils ont eux-même vécus. Nous n'avons pas pour but de mettre dans l'embarras qui que ce soit, et nous omettrons donc tout nom de personne ou de navire. Si vous avez eu connaissance d'un incident technique duquel il y a une leçon à tirer, nous vous prions de le partager avec nous. Qui sait? Votre récit permettra peut-être d'éviter que des machines soient endommagées ou même que des personnes soient blessées.

Ensuite, nous présentons la revue qu'a fait le lcdr Richard Houle des exigences liées aux essais des systèmes de combat anti-aérien et de surface, ainsi qu'un article d'un de nos collaborateurs réguliers, le cdr Roger Cyr, sur ce qui selon lui sera nécessaire au soutien du logiciel de la marine dans les années à venir. Mettez-vous donc à l'aise et détendez-vous. Nos articles sauront sûrement vous intéresser.

Pour terminer, la *Revue* offre ses meilleurs souhaits à trois officiers supérieurs de la marine qui ont pris leur retraite au cours de l'été : le **vice-amiral Chuck Thomas** (vice-chef de l'état-major de la Défense — qui a initialement reçu son instruction et a servi en tant qu'ingénieur naval), le **commodore Jim Green** (chef d'état-major — Matériel du Commandement maritime) et le **commodore Ed Murray** (commandant du Royal Military College of Canada).

Durant leur carrière qui a commencé au milieu des années 50, ces officiers se sont distingués par leur loyauté et leur détermination de tous les instants. Le fait qu'ils ont pris leur retraite avec tant de mérite alors qu'ils occupaient des postes d'autorité et d'influence constitue un témoignage approprié de la profondeur de leur dévouement à la marine du Canada. Bravo Zulu, et meilleurs vœux pour une retraite des plus agréables.

Capitaine(M) David W. Riis  
Directeur — Génie maritime et électrique



Vam C.M. Thomas



Cmdre J.E Green



Cmdre E.R.A. Murray

## La protection de l'environnement, un thème populaire

Au St. Lawrence College, et plus précisément au campus de Cornwall, on est toujours très heureux de recevoir des exemplaires de la *Revue du Génie maritime*. La *Revue* suscite généralement beaucoup d'intérêt et fournit des exemples concrets de ce qui se fait dans le domaine de la mécanique navale, ce qui nous utile pour les travaux que nous devons présenter dans le cadre du Programme de formation des techniciens de marine.

Le numéro de janvier 1991 illustre bien notre propos : il traitait de façon intéressante et en détail de la protection de l'environnement. Pourriez-vous nous faire parvenir huit autres exemplaires lors de la prochaine livraison? — **Brian E. Keefe**, coordinateur, *Mécanique navale*, St. Lawrence College, Cornwall (Ontario).

Merci pour votre lettre et l'exemplaire de la *Revue du Génie maritime*. Je suis heureux que l'article sur la pollution par les ordures ait pu vous sembler profitable. Votre revue m'a beaucoup impressionné et je me demande si vous ne pourriez pas nous inscrire sur votre liste d'adresses. — **Roger Kohn**, rédacteur en chef de *Nouvelles de l'OMI, Organisation maritime internationale*, Londres (Angleterre).

Merci mille fois de nous avoir fait parvenir à titre gracieux des exemplaires du numéro de janvier 1991 de la *Revue du Génie maritime*. Je trouve cette publication très intéressante et des plus instructives.

J'aimerais envoyer des exemplaires de ce numéro de la *Revue* à un certain nombre de gens de Pêches et Océans, qui, j'en suis sûr, apprécieraient son contenu ainsi que les efforts déployés par la Marine pour assurer une meilleure protection de l'environnement. Pourriez-vous me dire comment faire pour en obtenir 30 exemplaires (s'il vous en reste encore suffisamment, bien sûr). — **R.J. Paterson**, Direction de l'océanographie et des contaminants, Pêches et Océans, Ottawa (Ontario).

Merci beaucoup de m'avoir fait parvenir des exemplaires du numéro de la *Revue du Génie maritime* qui contenait l'article consacré à ma modeste contribution à bord du *Protecteur*. Je suis très

heureux d'avoir pu, par mes faibles moyens, attirer l'attention sur le problème auquel nous sommes confrontés. Me voir à l'action a aussi constitué une distraction pour l'équipage du navire. Je suis tout à fait convaincu que ce problème est l'affaire de tous et que la solution réside dans l'initiative individuelle.

Les hauts gradés du QG FMAR (P) ont beaucoup ri de ce qui semble être ici une condition préalable pour occuper le poste de chef d'état-major (Disponibilité opérationnelle) et j'ai reçu de nombreux commentaires humoristiques à ce sujet. J'en suis très heureux car cela prouve que la *Revue* est lue. J'en ai prêté un exemplaire à mon père, officier de marine à la retraite, mais il hésite entre la fierté et l'horreur. J'imagine que c'est à cause du conflit des générations.

Merci encore de votre sollicitude. Et bonne chance pour les numéros à venir. — **Capt (M) J.K. Steele**, Chef d'état-major (Disponibilité opérationnelle), Quartier général des Forces maritimes (Pacifique), Bureau de la Poste navale Victoria (Colombie-Britannique).

## Nos erreurs mises à nu

Je doute que je sois le premier à vous faire part de ses commentaires sur la vignette qui accompagnait la photo de la salle des machines du *Fundy*, à la page 25 du numéro d'avril, mais les voici quand même.

En 1938, il aurait été en fait *très inhabituel* pour qui que ce soit de prendre poste en grand uniforme dans la salle des machines ou ailleurs à bord du navire en mer, et le chef des machines sur la photo n'est certainement pas sur son trente-six. Il porte en fait sa *tenu de travail*. Pour ceux qui faisaient partie de la première classe, la tenue consistait en un veston droit et un pantalon en serge; lorsque le blanc était porté, c'était alors un veston droit et un pantalon en coutil blanc. Une autre tenue de travail pour les membres de la première classe consistait en une vareuse bleue d'une pièce. Il y avait même une chemise de travail qui était de la même coupe et de la même qualité que la chemise du grand uniforme, mais qui arborait des rayures ou des carreaux bleus et blancs de façon à ce que la saleté soit moins apparente. Le grand uniforme de

la première classe comportait un veston croisé et était fait d'un tissu de meilleure qualité, habituellement de la gabardine fine.

Il serait aussi peut-être intéressant de noter qu'à l'époque, les chefs des machines et les mécaniciens, qui étaient des premiers maîtres et étaient équipés et payés en conséquence, étaient habillés exactement de la même façon. Il y a donc de bonnes chances que le marin sur la photo ne soit pas le chef des machines.

Aussi, n'est-ce pas "Finished with engine" (plutôt qu'engines) qui devrait être inscrit sur le transmetteur d'ordres? La photo ne permettait pas de voir ce qui est vraiment inscrit, mais étant donné que le *Fundy* n'avait qu'une seule machine, cela semblerait logique.

C'est tout pour l'instant. Sans rancune, et continuez votre bon travail. — **David Perkins**, Dartmouth, Nouvelle-Écosse



(Note de la rédaction : Difficile à contenir! Au moins, nous avons raison au sujet du transmetteur d'ordres!) 📌

# Chronique du commodore

Par le commodore J.E. Green

Bien que je n'aie pas l'habitude de regarder par ma fenêtre qui donne sur le port d'Halifax, du moins pas dans la mesure où l'on pourrait le remarquer, je dois avouer que j'ai passé pas mal de temps à observer le *St. Croix* au début avril, lorsque celui-ci était remorqué hors de l'Arsenal en direction de la cour à ferraille. Je me remémorais le jour (il y a de cela un nombre d'années indéterminé) où j'avais reçu mon certificat de chauffeur de quart à bord du *St. Croix*, et j'ai mentionné à l'autre officier présent qu'il était probablement approprié que j'allais bientôt moi aussi cesser d'être au service de Sa Majesté. Cet instant de réminiscence n'a pas tardé à être supplanté par le problème du moment. Néanmoins, j'ai passé récemment plus de temps à méditer sur les années qui se sont écoulées et à comparer le passé au présent.

Le présent est, comme vous le savez très bien, rempli d'incertitude. Le pays, le ministère et la marine font face à de très sérieux problèmes d'ordre financier et à des défis tout aussi sérieux. Le présent est en fait difficile, et il serait facile de se décourager et de se laisser abattre. Je peux toutefois vous garantir que le passé n'était pas moins déconcertant. Par exemple, le désarmement du NCSM *Bonaventure* fut à tout le moins traumatisant. Le surcroît d'activité du début des années 1970 (les AOR et les DDH-280) a rapidement fait place à des temps tout aussi incertains. Les expressions à la mode de la décennie incluaient "le gel des immobilisations", "le vieillissement du matériel" et "quelle genre de marine nous faut-il?" Non seulement il n'y avait pas de navires à l'horizon, il n'y avait même pas de nouveaux navires en projet.

Mais quelle est la situation à présent? Bien qu'il y ait beaucoup d'incertitude entourant les navires qui pourraient ou non être en projet, les navires à l'horizon (et sur le point de s'y pointer) sont probablement les plus perfectionnés que notre marine ait jamais eus. L'acceptation du *Halifax* sera vraisemblablement chose faite lorsque vous lirez la présente chronique. L'*Algonquin* devrait reprendre du service peu après. Toute une nouvelle série de défis et d'occasions de vous dépasser vous seront offerts par les programmes FCP et TRUMP. Ceux d'entre vous dont la quantité de travail qui reste à faire dans le cadre de ces programmes inquiètent devraient s'entretenir avec le DGGMM actuel. Le commodore Saker vous dira



que les problèmes des DDH-280 semblaient insurmontables à l'époque, et qu'ils ont fait fonctionner le groupe propulseur du navire à l'aide de commandes manuelles pendant huit mois après l'acceptation.

En résumé, nous avons vécu des périodes difficiles par le passé, et nous continuerons à faire face à des périodes difficiles dans l'avenir. Il semble que tel soit notre destin. Si je ne pouvais vous laisser qu'une seule pensée, ce serait la suivante : les ingénieurs maritimes forment un groupe professionnel et hautement consciencieux. Ne l'oubliez jamais.

Au cours des sept dernières années, j'ai eu le grand honneur de remplir les fonctions d'administrateur du programme des FCP, contribuant ainsi au renouveau de notre marine, puis de servir à titre de CEM Mat, où j'ai fait de mon mieux pour

préparer le Commandement maritime à l'arrivée des nouvelles frégates. Il ne fait pas de doute que les défis auxquels il faut faire face immédiatement sont considérables et qu'ils sont rendus encore plus difficiles par les réalités d'ordre financier. Je ne peux vous suggérer de solutions magiques à ces problèmes. Je préférerais plutôt tirer une dernière leçon des efforts que la marine a déployés en préparation et à l'appui de l'opération Friction — faites du mieux que vous pouvez dans le temps et avec les ressources qui vous sont allouées. La réussite viendra. Bon succès!



*Le commodore Green, qui occupait le poste de chef d'état-major (Matériel), a pris sa retraite en juillet.*

# Propulsion anaérobie pour les sous-marins : un point de vue canadien\*

Par le Lcdr K.A. Heemskerck, M.Sc.,  
C.Eng., M.I.Mar.E.

\*Version abrégée d'un document présenté par R.G. Weaver et K.A. Heemskerck lors du congrès MARITECH 90 de l'Institut canadien technique maritime, tenu les 30 et 31 mai 1990 à Victoria (Colombie-Britannique).

## Résumé

Le coût et la complexité des sous-marins nucléaires et les craintes du public en général pour tout ce qui est nucléaire sont bien documentés. Cela ne change cependant rien au fait que les sous-marins nucléaires possèdent un énorme avantage militaire sur les modèles classiques puisqu'ils n'ont pas à refaire surface régulièrement pour recharger leurs accumulateurs. Mais cet avantage ne prévaudra peut-être pas longtemps. Il existe de nouvelles technologies, que l'on perfectionne sans cesse, qui permettent aux sous-marins classiques de rester submergés pendant la presque totalité de leurs missions. Le présent

article étudie et compare les différentes options à partir d'un point de vue canadien, évalue la viabilité de chacun des systèmes et trace les grandes lignes de ce que les Canadiens pourraient faire dans le domaine.

## Introduction

Le Canada possède le plus long littoral de tous les pays du monde et vu que notre prospérité économique dépend en grande partie de nos lignes de communications océaniques, nous sommes un candidat logique pour l'acquisition de sous-marins nucléaires. Et les trois océans qui bordent le Canada étant le plus souvent recouverts de glace, bon nombre de stratèges croient que les sous-marins nucléaires sont une nécessité.

La décision prise en 1989 par le gouvernement canadien d'abandonner le programme d'acquisition des sous-marins nucléaires, bien que décevante, a ravivé l'intérêt des Canadiens pour d'autres formes de propulsion anaérobie (AIP). Bien qu'aucune technologie courante ne

puisse égaler les performances de la propulsion nucléaire du point de vue vitesse, navigation sous la glace ou mobilité, la propulsion anaérobie peut améliorer les capacités tactiques d'un sous-marin classique et ajouter à ses capacités opérationnelles sous la glace sans dépenses excessives.

Théoriquement, la propulsion anaérobie peut dès aujourd'hui répondre à toutes les exigences opérationnelles d'un sous-marin et remplacer la propulsion diesel-électrique traditionnelle dans les sous-marins de nouvelle génération. Mais jusqu'à maintenant, les études n'ont porté que sur les systèmes hybrides, qui incorporent la propulsion anaérobie à un moteur diesel-électrique classique où la source de propulsion anaérobie ne sert qu'à maintenir la charge des accumulateurs pendant que le sous-marin se déplace à basse vitesse. Le système pourrait être intégré dans un tout nouveau concept ou installé en rattrapage sur les sous-marins en service. La *figure 1* illustre une installation conceptuelle.

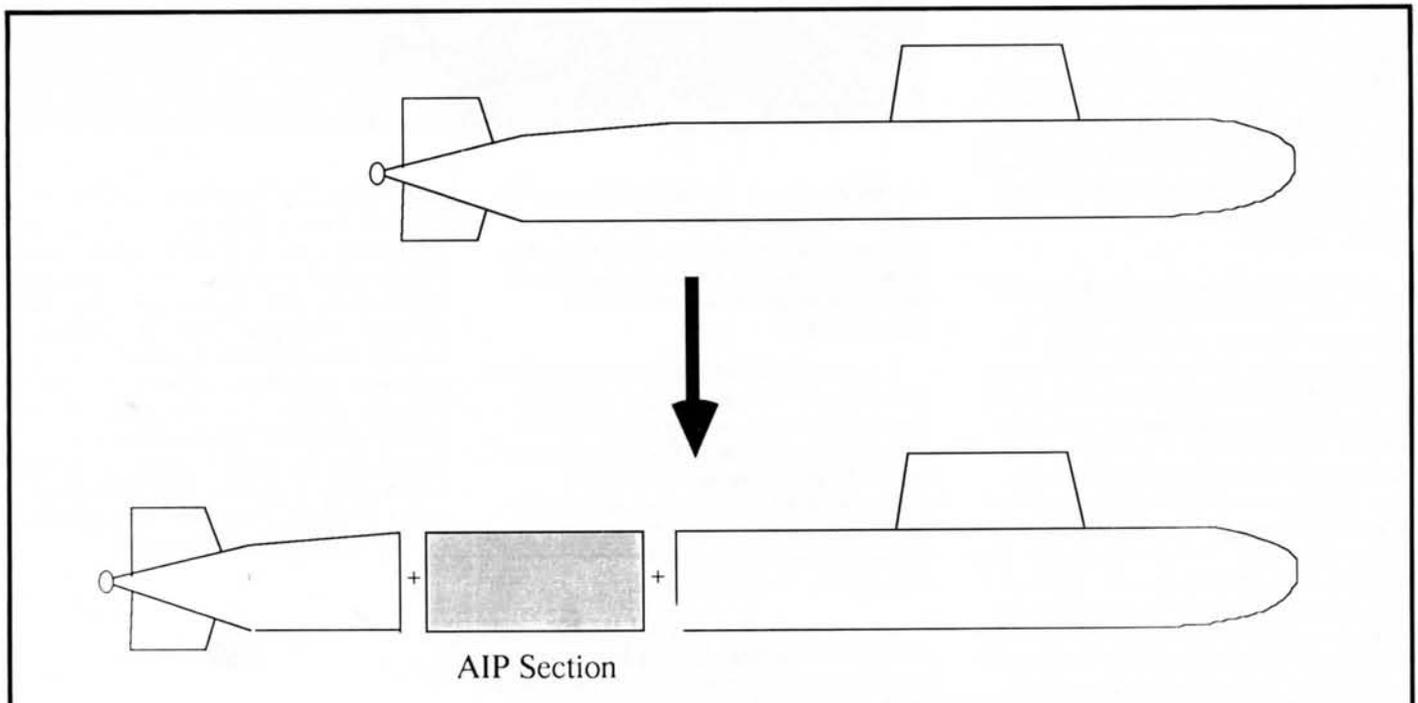


Figure 1. Le sous-marin hybride.

Pour que le bâtiment soit efficace, il faudrait produire au moins de 300 à 400 kilowatts, avec une réserve d'énergie de 100 mégawatts/heure. Il y aurait alors assez de puissance pour propulser un sous-marin de 2 000 tonnes à une vitesse de 6 à 8 noeuds et lui permettre de demeurer submergé pendant environ dix jours tout en maintenant cette vitesse. Le sous-marin serait équipé de tous ses accumulateurs ordinaires qui commenceraient à se décharger lorsque la production d'énergie électrique est au-dessus du niveau des 300 à 400 kW.

Il existe un certain nombre d'options anaérobies possibles. Nous toucherons dans le présent article aux moteurs Stirling (qui équipent des sous-marins de la Marine royale suédoise), aux piles à combustible (mises à l'essai par la marine allemande), aux diesel à cycle fermé (étudiés par l'Italie), aux piles métalliques (en cours de développement au Canada), et aux petits systèmes nucléaires (qui font aussi l'objet de recherches au Canada). D'autres solutions, comme les accumulateurs de très longue durée, sont en dehors de la portée de la présente étude.

### **Développement des systèmes de propulsion anaérobie; le pour et le contre**

#### *Moteurs Stirling*

La Marine royale suédoise a choisi le moteur Stirling comme principale source de propulsion anaérobie et elle a décidé de le développer sur une grande échelle en collaboration avec le chantier naval Kockums qui a installé un ensemble de propulsion anaérobie Stirling sur un sous-marin classique de la classe Näcken en 1988. Le système suédois a été construit à partir d'un moteur à quatre cylindres, le V4-275R. La Marine et le constructeur se disent entièrement satisfaits des résultats après plus d'une année d'expériences opérationnelles. Ils ont même décidé que leurs prochains sous-marins (de la classe A-19) seraient conçus en incorporant cette même technologie. Kockums va aussi mettre à la disposition de la société française Comex deux moteurs V4-275R pour son programme de submersible autonome de 500 tonnes, le *Saga I*.

La marine suédoise a choisi la technologie Stirling pour plusieurs raisons techniques (aussi bien que commerciales). Parmi celles-ci, on compte : un fonctionnement silencieux (comparativement aux moteurs à combustion interne), la possibilité d'utiliser le carburant diesel, et le niveau de développement des technologies Stirling et de l'oxygène liquide relativement aux autres systèmes anaérobies.

Mais les moteurs Stirling ont aussi des désavantages — plus particulièrement, des problèmes de résistance des matériaux et de combustion à cause des pressions et températures élevées continuellement en présence. L'utilisation d'un carburant à faible teneur en soufre aide toutefois à réduire certains de ces problèmes. De plus, les moteurs Stirling disponibles à ce jour ont une puissance plutôt limitée. Par exemple, le moteur V4-275R de Stirling a une puissance nominale de 75 kW; on devra monter plusieurs unités en parallèle pour obtenir la puissance désirée. Kockums a récemment annoncé qu'elle prenait la relève du développement d'un moteur de 600 kW mis au point à l'origine par la société allemande MAN.

#### *Moteurs diesel à cycle fermé*

Les efforts de développement du moteur diesel à cycle fermé (CCD) pour sous-marins se font sur plusieurs fronts et toutes les marines qui possèdent des sous-marins en font présentement l'étude. Le présent article se s'attachera qu'aux moteurs Cosworth britanniques et Maritalia italiens.

Par le passé, le plus grave problème qui affligeait les moteurs à cycle fermé était la corrosion rapide provoquée par l'accumulation des produits de la combustion dans les gaz d'échappement recyclés, et la fluctuation des contre-pressions causée par les changements de profondeur de plongée. Le système Cosworth ARGO a pu surmonter les deux problèmes en faisant passer les gaz d'échappement à travers un épurateur à l'eau de mer qui dissout la plupart des gaz condensables, puis en refoulant les résidus à l'extérieur du sous-marin à l'aide d'un système compensateur de pression. On remplace l'azote perdue par de l'argon. Bien que nous ne possédions pas tous les détails, nous croyons que Maritalia a résolu le problème en emmagasinant sous pression de grandes quantités de gaz comprimés dans la coque toroïdale pour refouler les gaz d'échappement à l'intérieur de la coque.

La firme Cosworth s'est associée avec les chantiers de Rotterdam (RDM, Pays-bas) et Thyssen Nordseewerke (TNSW, Allemagne) pour le développement du système ARGO. RDM a mis le système à l'essai sur un moteur diesel Mercedes-Benz OM422A de 150 kW, tandis que TNSW a installé un moteur OM421A de 120 kW sur la maquette d'une section de sous-marin. Les premiers résultats indiquent que le système à cycle fermé fonctionne de la façon prévue et que la transition entre le cycle fermé et le cycle ouvert s'effectue conformément aux prévisions. Lors des prochains essais, on travaillera à améliorer l'efficacité du système.

Maritalia a installé des moteurs à cycle fermé sur des mini-sous-marins opération-

nels où les gaz sont emmagasinés dans une coque toroïdale révolutionnaire (une série de réservoirs sous pression en forme de tore). Le développement et l'amélioration de ces coques se poursuivent. Le système Maritalia a été conçu au milieu des années 70 pour deux mini-sous-marins expérimentaux (de 120 et 80 tonnes). Le premier, équipé d'un moteur Perkins converti et d'un moteur Fiat/IVECO 8361, a réussi à se déplacer à pleine puissance par 350 mètres de fond. On a aussi mis à l'essai en cycle fermé des moteurs Lombardini, GM, Mercedes-Benz et VM diesel, accumulant plus de 23 000 heures d'opération. On est présentement en train de dessiner un sous-marin de 48 mètres pouvant plonger à une profondeur de 400 mètres, équipé d'une réserve de carburant et d'oxygène d'une capacité de 100 MW/h, dont l'autonomie, théoriquement, serait de 4 000 milles marins à une vitesse de huit noeuds. Les machines comprennent deux génératrices diesel de 12 cylindres d'une puissance de 300 kW et un moteur électrique de 600 kW.

Le gros avantage des moteurs à cycle fermé est leur capacité à démarrer selon un mode de fonctionnement atmosphérique, ou à se transformer en système atmosphérique quand c'est nécessaire, ce qui permet de conserver l'oxygène emmagasiné. Les rapports puissance/poids et puissance/volume sont assez bons et la technologie diesel est très au point, éprouvée, fiable et facilement disponible.

Ce type de moteurs présente cependant des problèmes bien particuliers. Bien que celui de la recirculation des acides de combustion (qui auparavant limitait la durée des chemises et des soupapes à environ 500 heures) ait été réglé par l'utilisation d'épurateurs à l'eau de mer, on doit encore trouver le moyen d'éliminer la poussière de sel corrosive. Et le niveau de bruit inhérent aux moteurs diesel est un autre désavantage pour les sous-marins militaires.

#### *Piles à combustible*

Un groupe industriel allemand composé de Ingenieurkontor Lübeck (IKL), Howaldtswerke-Deutsche Werft (HDW) et Ferrostaal a mis au point un système de propulsion hybride à pile à combustible Siemens. Le combustible en question est l'hydrogène et il est emmagasiné dans un hydrure de fer-titane mis au point avec la collaboration de Daimler-Benz.

Le système de propulsion à piles à combustible hybride et ses systèmes accessoires ont été installés sur un sous-marin *UI* de type 205 en 1987. Il a fallu allonger le *UI* de 3,8 mètres pour les besoins du système hybride qui contient 16 piles produisant 25 kW chacune. Les essais en mer

(Suite à la page 11)

# Moteurs Stirling

Le Stirling est un moteur à combustion externe qui fonctionne suivant un cycle thermodynamique fermé à régénération. Inventé en 1816 par le Révérend Robert Stirling, il est aujourd'hui développé par General Electric, Kockums (Suède), MAN/MWM (Allemagne) et d'autres pour utilisation spatiale, automobile, sous-marine et médicale, ou avec l'énergie solaire.

La figure A illustre le cycle Stirling : pendant la compression (1-2), le gaz est comprimé dans le cylindre froid; à volume constant, il se déplace du côté froid vers le cylindre chaud (2-3); il passe ensuite par le régénérateur qui lui transmet la chaleur emmagasinée, faisant augmenter la pression. Dans le cylindre chaud (3-4), le gaz se réchauffe et se détend, ce qui produit le travail; encore à volume constant, le gaz dilaté se déplace ensuite vers le cylindre froid (4-1), passe à travers le régénérateur qui emmagasine la chaleur qui reste.

Le cycle de Stirling s'approche du cycle parfait de Carnot puisque presque toute la chaleur "d'échappement" peut en être extraite et réutilisée. Pour maximiser l'efficacité, il faut que la température de fonctionnement du gaz (environ 2 000 °C) et la pression (30 bars) soient très élevées; il faut donc que les matériaux employés soient très avancés.

La chambre de combustion d'un moteur Stirling se trouve dans un récipient haute pression sous 20 à 30 bars. L'échappement peut alors être directement rejeté à la mer lorsque le sous-marin est submergé par 200 à 300 mètres de fond. À une plus grande profondeur, il faut produire une pression d'échappement plus grande pour vaincre la pression de la mer, mais une telle pression n'est que marginale par rapport à la puissance du moteur et n'exige que peu de puissance. Notez que la

combustion du carburant diesel et de l'oxygène produit un échappement composé à 45 pour cent de vapeur d'eau qui peut être facilement condensée. Le reste se compose surtout de gaz solubles dans l'eau.

Le moteur Stirling brûle du carburant diesel ordinaire emmagasiné dans des réservoirs classiques, tandis que l'oxydant d'oxygène liquide doit être stocké dans des cylindres isolés installés dans la coque intérieure. La capacité de stockage de l'oxygène liquide est le seul facteur qui limite la durée d'immersion d'un sous-marin à moteur Stirling.

Comme pour les autres options, le système Stirling au complet, y compris les réservoirs d'oxygène liquide, les réservoirs de compensation et les machines auxiliaires, peut être installé dans une section de coque autonome. Le sous-marin conserverait toutes ses capacités originales.

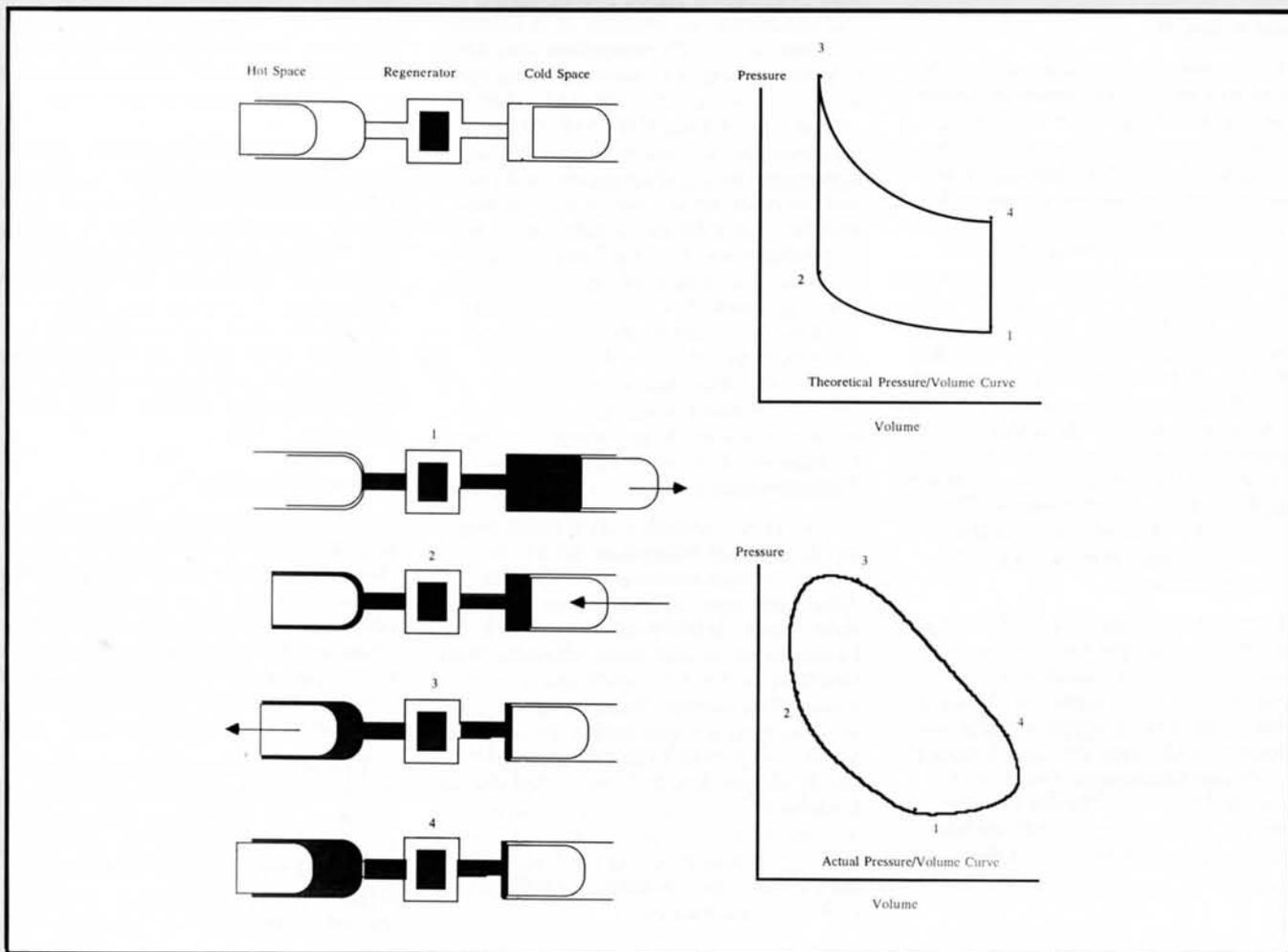


Figure A. Fonctionnement du moteur Stirling.

# Moteur diesel à cycle fermé

## Cosworth

Le système Cosworth ARGO peut faire d'un moteur diesel un système anaérobie en créant une atmosphère simulée par alimentation d'une quantité prééglée d'oxygène pur dans un gaz inerte continuellement recyclé (figure A). Le moteur "pense" qu'il aspire de l'air.

Le fluide qui accomplit le travail est l'argon, auquel on ajoute de l'oxygène. Le bioxyde de carbone de l'échappement et la vapeur d'eau sont continuellement éliminés dans un épurateur à l'eau de mer. Le turbocompresseur fonctionne à environ 2 à 3 bars, et l'épurateur fonctionne aussi à des pressions supérieures à la pression atmosphérique, ce qui facilite l'absorption du bioxyde de carbone.

Le système ARGO de Cosworth comprend un moteur diesel turbocompressé non modifié entraînant une génératrice de 120 kW. Les accessoires connexes nécessitent moins de dix kilowatts de puissance, en partie à cause de l'efficacité du système hydraulique de circulation de l'eau qui permet de réduire la pression d'un volume donné d'eau de mer à la pression de l'épurateur puis d'augmenter la pression d'un volume égal d'eau en provenance de l'épurateur à la pression extérieure. Le système est ainsi pleinement opérationnel, peu importe la profondeur.

## Maritalia

Chez Maritalia, on prétend que tout moteur diesel peut être modifié en moteur à cycle fermé. Bien que l'on

possède peu de renseignements sur le système, on croit qu'il fonctionne essentiellement de la même façon que l'ARGO. La différence la plus importante réside dans la façon unique et élégante d'entreposer l'oxygène (l'air?) et l'échappement sous forme de gaz à environ 350 bars de pression dans la coque à double épaisseur de forme toroïdale du sous-marin (figure B). Les concepteurs prétendent que cette coque, en acier ordinaire, permettra à un sous-marin de plonger à des profondeurs équivalentes à celles atteintes par les bâtiments à coque en titane.

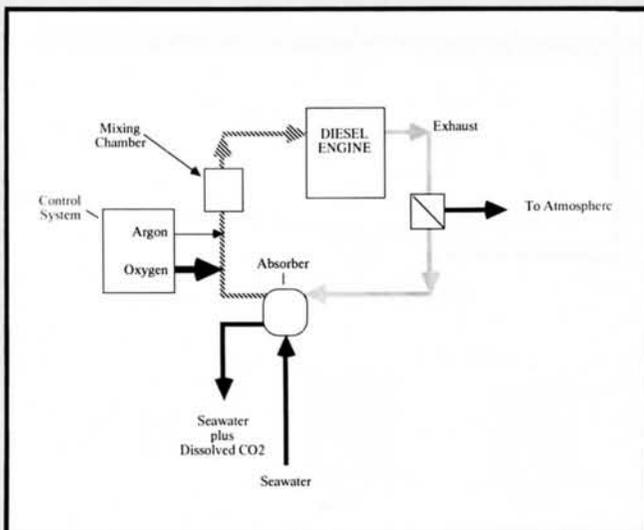


Figure A. Schéma du système à cycle fermé diesel ARGO.

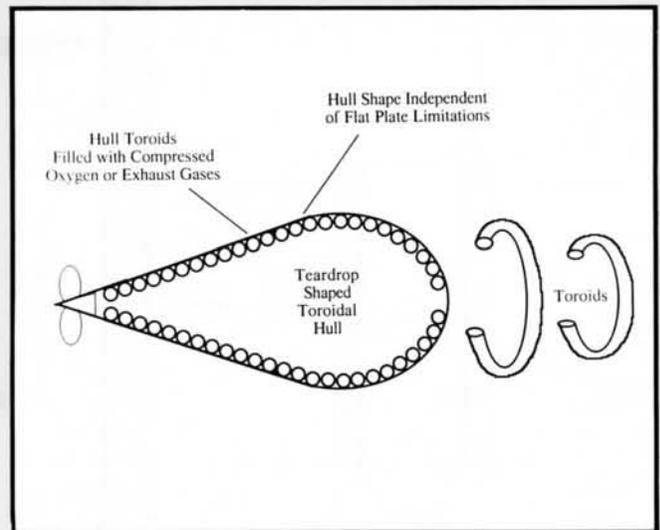


Figure B. Le principe de la coque toroïdale.

# Piles à combustible

La pile à combustible est un dispositif électrochimique qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique suivant un processus qui est essentiellement contraire à celui de l'électrolyse. Les réactifs sont emmagasinés à l'extérieur de la pile et ils sont continuellement alimentés à l'intérieur. La pile se compose d'un électrolyte et des deux électrodes non consommables, habituellement des plaques poreuses, qui permettent aux réactifs de réagir avec l'électrolyte. Les électrodes jouent

aussi le rôle de catalyseur en facilitant l'ionisation.

Le principe de la pile à combustible a été démontré pour la première fois en 1839, mais elles n'ont pas subi de développement majeur avant 1960. Des piles à combustible ont depuis été mises au point à des fins commerciales et spatiales, dont une centrale de 4,5 MW au Japon et plusieurs centrales de 40 kW en Amérique du Nord. Le Japon et certains pays européens ont fortement investi dans son développement, surtout à des fins non maritimes.

Les réactifs nécessaires sont un oxydant, habituellement l'oxygène, et un combustible. Théoriquement, on peut utiliser un bon nombre de combustibles mais l'hydrogène est idéal puisqu'il réagit à n'importe quelle température et qu'il est le plus efficace. Des problèmes d'ordre pratique ont empêché jusqu'ici l'utilisation de combustibles complexes comme le carburant diesel, mais la tolérance des nouveaux types de piles à certains gaz comme le monoxyde et le bioxyde de carbone peuvent changer les données.

On peut démontrer le fonctionnement d'une pile à combustible en prenant comme exemple les réactions de l'hydrogène et de l'oxygène d'une pile alcaline (figure A). Des ions hydroxydes (OH-) se forment sur la cathode; ils migrent ensuite vers l'anode où ils réagissent avec l'hydrogène pour former de l'eau et libérer les électrons libres. Ces électrons traversent la charge de l'anode vers la cathode pour engendrer une autre réaction et produire des ions hydroxydes.

Les piles sont classifiées selon le type d'électrolyte qu'elle renferment, les trois électrolytes les plus au point étant l'acide phosphorique, l'alcalin et les polymères solides. De ceux-ci, les deux derniers sont les mieux adaptés à l'utilisation sous-marine puisqu'ils ont le meilleur rapport puissance/poids et

puissance/volume et qu'ils sont les plus efficaces. L'électrolyte à polymère solide est tolérant aux différences de pression des différents réactifs et, à la différence des piles alcalines, il n'est pas sujet à "l'empoisonnement" au bioxyde de carbone.

D'autres piles, comme celles du type à oxydes métalliques ou à carbonates fondus, ne sont pas considérées comme étant aussi bien adaptées à l'usage sous-marin parce qu'elles fonctionnent à températures élevées (680 °C et 454 °C respectivement) et elles exigent une période d'allumage importante. Cela est malheureux parce que la pile à carbonates fondus peut fonctionner directement au carburant liquide complexe.

La pile à combustible produit du courant continu. On peut augmenter

la tension et l'intensité en montant un groupe de piles en parallèle ou en série respectivement. On peut augmenter la puissance produite en augmentant le nombre de piles.

Dans un sous-marin, l'oxygène serait vraisemblablement transporté (extérieurement) sous forme liquide. L'hydrogène pourrait aussi être transporté à l'extérieur de la coque, comme un hydrure métallique. Bien que très lourd, l'hydrure est très sécuritaire. (On a même dit que cela équivalait à transporter de l'oxygène sous forme de rouille.) La figure B illustre le système de propulsion sous-marin à pile à combustible (d'après le modèle allemand) et la figure C en illustre l'installation.

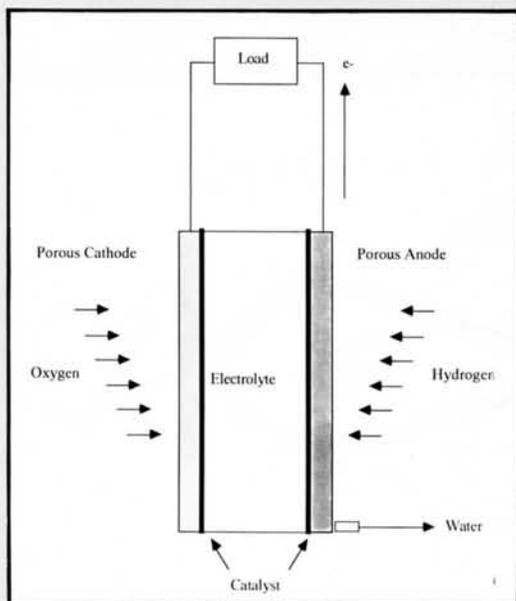


Figure A. Pile alcaline simple.

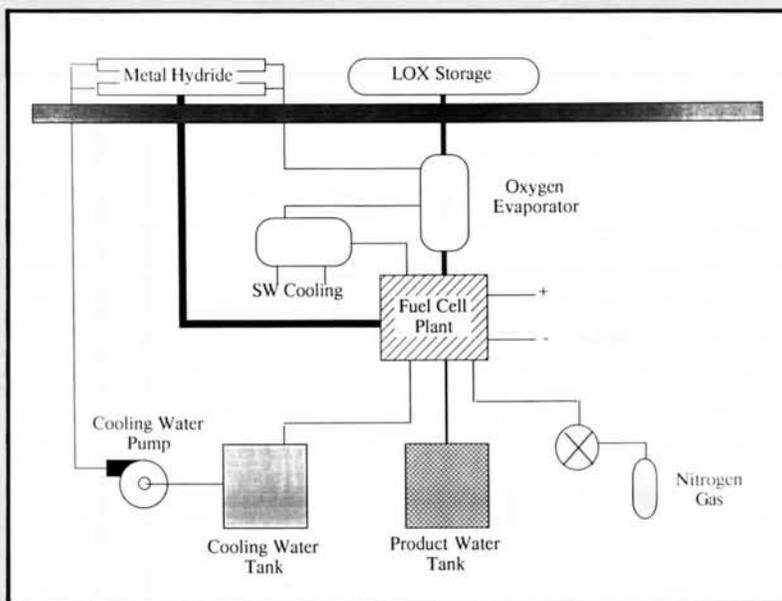


Figure B. Schéma de l'installation de la pile à combustible sous-marine allemande.

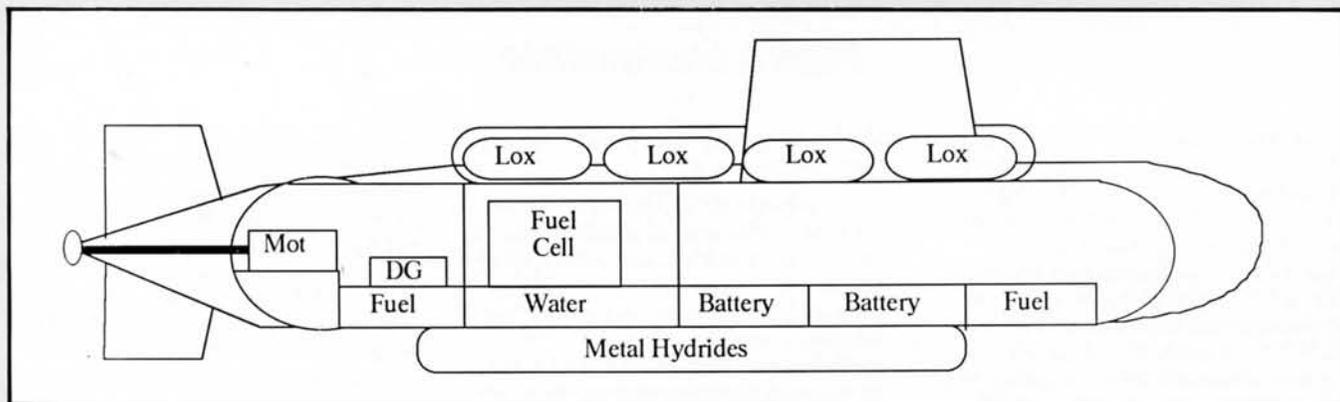


Figure C. Sous-marin équipé d'un système à pile à combustible hybride.

ont été couronnés de succès, confirmant que les sous-marins équipés de piles à combustibles peuvent avoir une autonomie plusieurs fois supérieure à celle des bâtiments classiques.

Un système anaérobie à piles à combustible hybride sera bientôt installé sur un sous-marin de type 212, la dernière génération des sous-marins allemands. Les piles alcalines de l'U1 seront remplacées par des piles à polymère solide, ce qui permettra de profiter des avantages de ces dernières du point de vue sécurité et de ses capacités à fonctionner à l'air libre.

La firme Ballard Technologies de Vancouver a aussi mis au point une pile avancée à polymère solide et l'a mise sur le marché pour applications terrestres. Ces piles présentent des possibilités certaines pour les systèmes anaérobies de sous-marins. Ballard est aussi en train de mettre au point un régénérateur de carburant pratique au méthane qui pourrait extraire l'hydrogène du combustible liquide.

Puisque la pile à combustible ne fonctionne pas suivant un cycle thermodynamique, les limites du cycle de Carnot ne s'appliquent pas et il est possible d'atteindre une efficacité totale de plus de 60 pour cent (en incluant toutes les charges parasites). Et, autre avantage, une efficacité aussi élevée permet aussi de réduire au minimum la traînée infrarouge. Le fonctionnement se fait pratiquement sans bruit et les sous-produits de la réaction sont de l'eau douce (que l'on peut facilement rendre potable), et de la chaleur à basse température (utilisée pour extraire l'hydrogène de l'hydrure métallique).

Le principal désavantage des piles à combustible est la densité énergétique très basse du combustible. Le combustible utilisé doit aussi être pur pour empêcher la contamination des électrodes et de l'électrolyte. Même les piles à polymère solide sont empoisonnées par le monoxyde de carbone. Ses autres désavantages sont les coûts élevés et le poids des hydrures métalliques.

#### Piles métalliques

Des petites piles à aluminium-air ont été produites pour certaines applications, comme énergie d'appoint pour les télécommunications, pour l'éclairage de secours, pour un véhicule électrique expérimental, etc. Maintenant, la firme Alupower Inc., une filiale de la société Alcan International, va bientôt mettre sur le marché des piles à aluminium pour les applications sous-marines. On en est encore aux premiers stades de développement cependant et rien au-dessus d'un kilowatt n'a encore été mis en service jusqu'ici.

La plupart des avantages des piles à combustible s'appliquent aux piles à aluminium. De plus, pour ces dernières, on n'a pas les problèmes d'entreposage de l'oxygène liquide ni besoin d'avoir de l'hydrogène à bord comme combustible. Cependant, de l'opinion d'un grand nombre de sous-marinières, le fait d'avoir à transporter du peroxyde d'hydrogène comme oxydant peut être un désavantage irrémédiable. Considérant toutefois que l'énergie nucléaire est utilisée de façon sécuritaire dans les sous-marins, il serait surprenant que la technologie moderne ne puisse faire de même pour l'emmagasinement sécuritaire du peroxyde d'hydrogène.

#### Propulsion anaérobie nucléaire

La chaleur d'un réacteur nucléaire de faible puissance peut être utilisée pour produire de la vapeur qui entraînerait un turboalternateur pour recharger les accumulateurs d'un sous-marin. Ce sous-marin pourrait avoir un temps de plongée identique à celui des sous-marins nucléaires (encore qu'à basses vitesses seulement) pour un coût bien inférieur.

Une firme canadienne, Energy Conversion Systems (ECS), est en train de mettre au point une source d'énergie maritime autonome de 100 kW. À long terme, elle envisage de construire toute une famille de générateurs allant de 100 à 1 700 kW.

ECS déclare que sa source d'énergie prototype pourrait équiper un sous-marin d'ici la fin de la décennie.

On sait que d'autres pays, comme la Grande-Bretagne et la France, considèrent aussi que les petits générateurs nucléaires peuvent être une source de propulsion anaérobie efficace.

L'attrait d'un temps de plongée pratiquement illimité classe les sous-marins à petit réacteur nucléaire très au-dessus des autres candidats non-nucléaires dans la course à la propulsion anaérobie. Ce système possède cependant d'importants désavantages non techniques que nous aborderons plus tard dans cet article.

#### Comparaisons entre les différentes options de propulsion anaérobie

##### Efficacité

La pile à combustible et la pile à aluminium, échappant aux limitations du principe de Carnot, viennent bien en avant des autres. Notez d'après la figure 2 que les piles à combustible sont au maximum de leur efficacité lorsqu'elles ne sont pas à pleine charge, contrairement aux moteurs à cycle thermodynamique. Le manque d'efficacité de l'option nucléaire n'est pas en cause, évidemment.

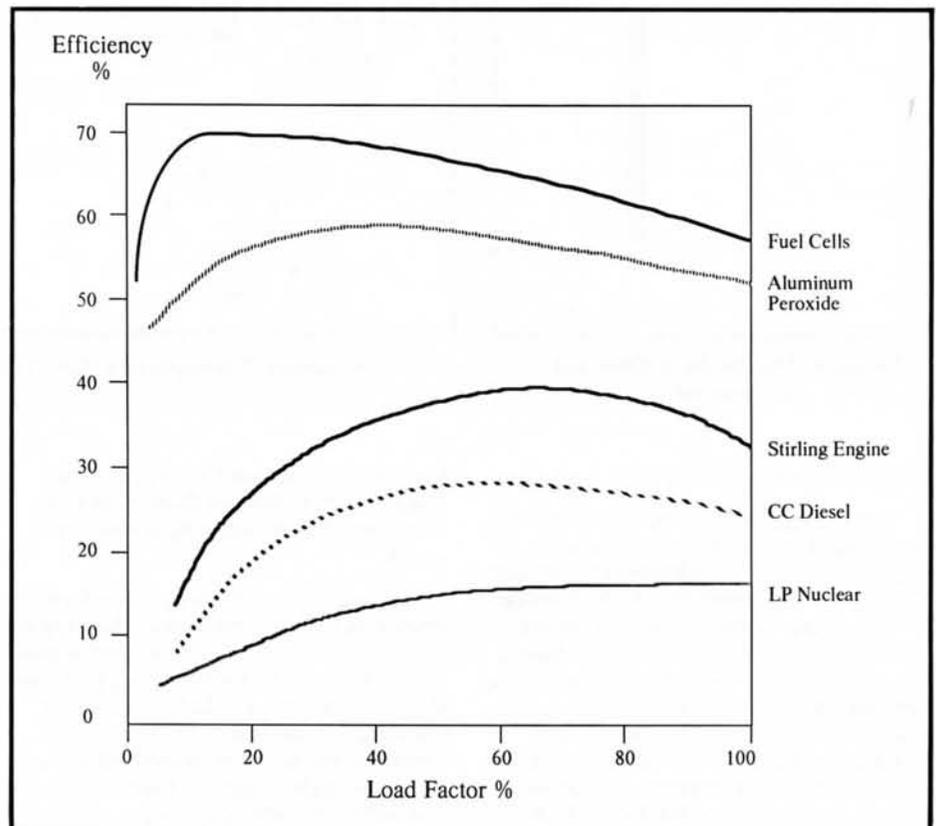


Figure 2. Efficacité en fonction de la charge pour les différentes options de propulsion anaérobie.

# Piles métalliques

Certains métaux placés dans une solution oxydante peuvent faire office d'anode perdue et produire une tension d'une intensité significative. Une pile électrique se différencie d'une pile à combustible en ce sens que c'est l'anode qui est consommée.

L'aluminium en particulier peut servir à produire de l'électricité de puissance utile, suivant un procédé qui est en fait l'inverse du procédé de raffinage Hall. On a découvert des nouveaux alliages, sur lesquels Alcan International détient la propriété, qui peuvent pénétrer la couche d'oxyde (habituellement protectrice) de l'aluminium.

La figure A montre la configuration schématique possible d'une pile électrique. Dans ce cas-ci, l'électrolyte est constitué d'eau oxygénée dans une solution aqueuse saline. Il se produit des réactions parasites, qui engendrent

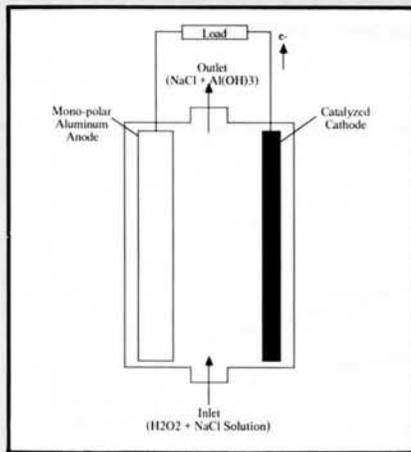


Figure A. Pile simple à peroxyde d'aluminium

une certaine quantité d'hydrogène et d'oxygène. L'oxydant de peroxyde d'hydrogène réagit et il doit être continuellement remplacé. L'hydroxyde d'aluminium produit doit être continuellement purgé de la pile.

Pour pouvoir produire un système utilisable dans un sous-marin, il faudrait grouper plusieurs piles en série ou en parallèle. Il faudrait aussi prévoir des systèmes connexes, comme par exemple un système de distribution et de recirculation de l'électrolyte (pour l'alimenter en peroxyde et le purger d'hydroxyde d'aluminium), un électrofiltre (pour séparer et vidanger

l'hydroxyde d'aluminium pour fin d'entreposage) et un échangeur de chaleur (pour éliminer la chaleur résiduelle) (figure B).

L'hydrogène et l'oxygène créés par des réactions complémentaires dans la pile pourraient être utilisés pour alimenter une pile à combustible auxiliaire. De plus, une certaine quantité des déchets d'hydroxyde d'aluminium pourraient être mis à contribution en absorbant le bioxyde de carbone par l'entremise du circuit de contrôle de l'air du bâtiment. Le peroxyde et l'hydroxyde produits seraient stockés à l'extérieur de la coque intérieure.

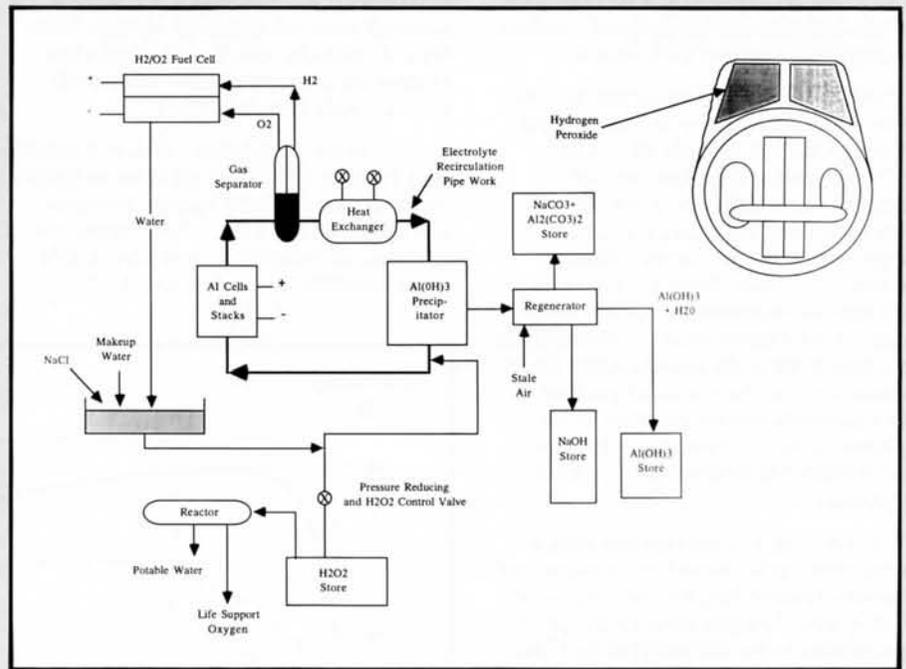


Figure B. Source d'énergie au peroxyde d'aluminium

## Exigences en matière de masse et d'espace

Les moteurs Stirling et les moteurs diesel à cycle fermé font bonne figure en dépit de leur efficacité limitée en fonction du principe de Carnot (figure 3). En effet, un sous-marin propulsé par l'un de ces systèmes aurait environ 1,8 fois l'autonomie d'un bâtiment à pile à combustible de tonnage égal, principalement parce qu'il n'a pas à déplacer l'importante masse d'hydrure métallique. Si on arrive à mettre au point un régénérateur à combustible liquide, ces chiffres pourraient changer considérablement en faveur de la pile à combustible. Notez que les comparaisons ont été faites en additionnant les performances de la source d'énergie, des auxi-

liaires et du combustible/oxydant pour une durée d'immersion donnée, et non seulement d'après celles de la machine même.

D'après ces graphiques, la pile à aluminium s'en tire admirablement bien. On ne devrait peut-être pas s'en surprendre puisqu'elle est aussi efficace que la pile à combustible, mais n'a pas besoin d'hydrure métallique. Cependant, les courbes de puissance ne représentent que des estimations très préliminaires et elles doivent être considérées en tant que telles.

À toutes fins pratiques, la courbe de la masse et du volume par rapport à la durée d'immersion pour la propulsion anaérobie

nucléaire est une ligne horizontale tendant vers l'infini. Pour le stockage de l'énergie au-dessus de 400 MW/h, elle est sans égal.

## Coûts

Les chiffres sont plutôt imprécis à ce stade de développement, mais on estime que l'on pourra bénéficier des options non nucléaires de la propulsion anaérobie pour 15 à 20 pour cent de plus que le coût d'un sous-marin classique. Les coûts des piles à combustible, des accumulateurs et des moteurs Stirling devraient être à peu près semblables, tandis que les moteurs diesel à cycle fermé devraient être un peu plus économiques. On ne connaît pas encore le coût des piles à aluminium mais il devrait

s'approcher de celui des autres options conventionnelles. Comme on pouvait s'y attendre, l'option nucléaire est la plus coûteuse, particulièrement au niveau des infrastructures qui sont singulièrement plus complexes que les autres.

### Sécurité

Les comparaisons se résument à un choix entre les différentes combinaisons suivantes : oxygène liquide ou oxygène sous forme gazeuse à 350 bars de pression, hydrogène, peroxyde d'hydrogène et alcool méthylique ou énergie nucléaire. Sans exceptions, quelle que soit l'option, il faudra y apporter tout le soin et toute l'attention possibles; néanmoins, aucune de ces technologies n'est considérée comme excessivement dangereuse. Ironiquement, l'option nucléaire est peut être la plus sécuritaire, vu les contraintes de sécurité rigoureuses exigées pour l'émission des permis.

### Estimation de la viabilité

Plusieurs options de propulsion anaérobie semblent être parfaitement réalisables à court ou moyen terme.

### Moteurs Stirling

Les succès obtenus par les Suédois sont de bon augure pour la propulsion des sous-marins par les moteurs Stirling et tout indique que la Suède a l'intention d'en faire la production localement et cherchera à en vendre la technologie à l'étranger. On ne prévoit pas d'obstacle insurmontables à l'horizon.

### Moteurs diesel à cycle fermé

Jusqu'ici, les moteurs diesel à cycle fermé n'ont équipé que de petits sous-marins, mais il n'y a aucune raison théorique pour qu'on ne les installe pas sur des sous-marins pleine grandeur. Mais si l'on a l'intention de les utiliser à des fins militaires, leur niveau de bruit s'avérera un problème important. En dépit des assurances des constructeurs, il faut se rendre à l'évidence que les moteurs à pistons à combustion interne ne peuvent être aussi silencieux que les autres. La logique veut que si l'on choisit un système de propulsion anaérobie, il faut qu'il soit silencieux.

### Piles à combustible

Grâce aux travaux effectués par les Allemands, la propulsion anaérobie à piles à combustible peut aussi être considérée comme une option viable. De toutes les piles, on croit que ce sont les piles à polymère solide qui offrent jusqu'à présent les meilleures promesses d'avenir; quoi qu'il en soit, il s'agit d'une industrie en pleine expansion et il faut s'attendre à d'importantes améliorations au cours des prochaines années.

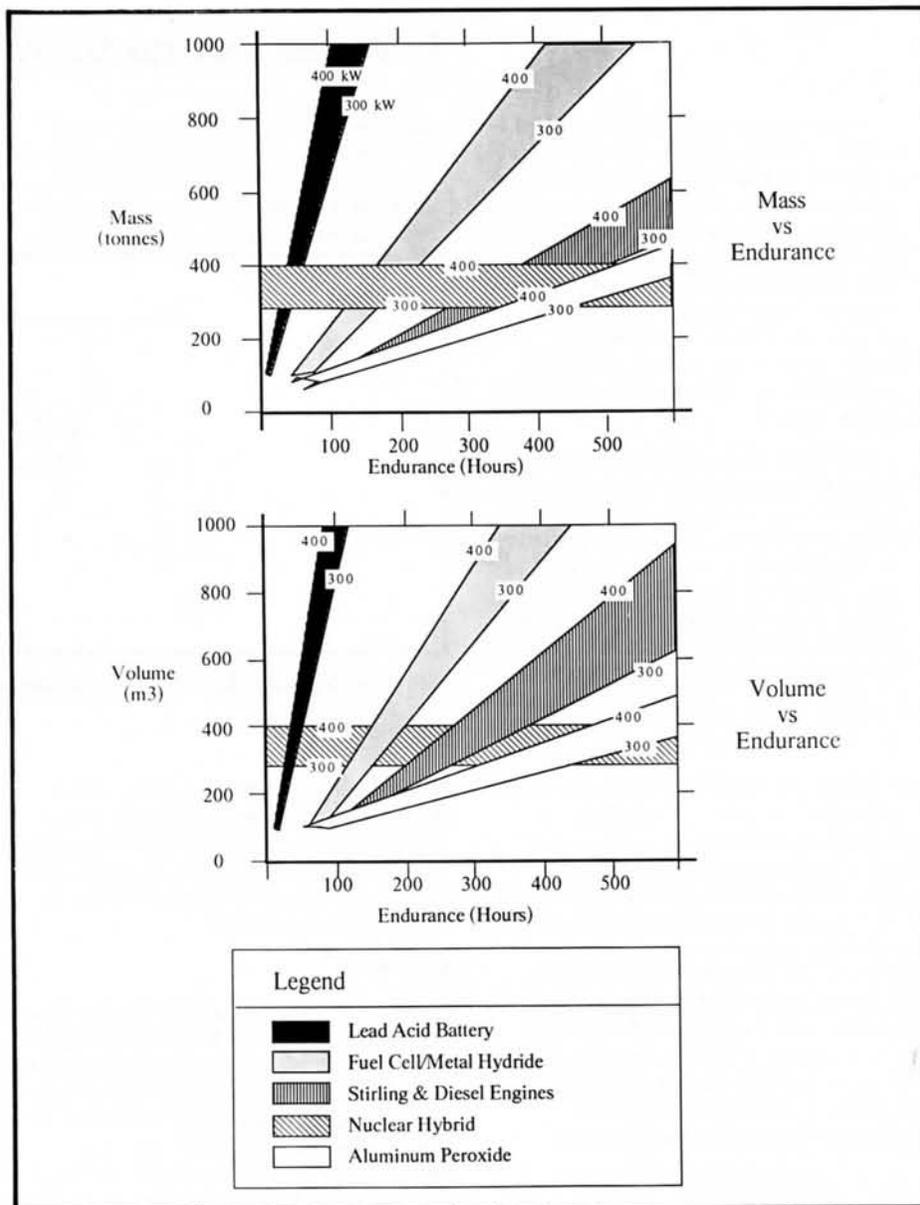


Figure 3. Masse et volume par rapport à la durée d'immersion entre 300 et 400 kW.

### Piles à aluminium

Les piles à aluminium offrent, en théorie, tellement d'avantages que leur développement devrait se faire rapidement. Les principes fondamentaux du système sont valables et il existe un nombre de combinaisons possibles dans le choix de l'électrolyte/oxydant. Il est vrai que la mise au point de piles de grandes dimensions n'en est encore qu'aux premières étapes, mais il y a quand même lieu d'être optimiste.

### Propulsion anaérobie nucléaire

L'énergie nucléaire est la forme la plus pure de propulsion anaérobie sous-marine parce qu'elle n'a pas besoin d'atmosphère emmagasinée ou synthétique. Un générateur nucléaire permettrait de faire la recharge des accumulateurs silencieusement, et de jouir d'une autonomie virtuel-

lement illimitée à un prix beaucoup moins élevé que celui d'un sous-marin nucléaire. Malheureusement, les réticences du public envers tout ce qui est nucléaire rendraient la promotion d'un tel projet très difficile. Les coûts additionnels inévitables qu'une telle option suppose par rapport aux autres moyens de propulsion anaérobie (en terme de développement, d'infrastructures et de coûts d'acquisition initiaux) ajouteraient aux difficultés.

### Quelle voie le Canada doit-il choisir?

Toute décision prise au sujet de la propulsion anaérobie pour les sous-marins canadiens doit tenir compte de notre géographie. Un sous-marin européen peut naviguer aux piles à combustible aussitôt qu'il quitte le port tandis qu'un sous-marin canadien voudra garder ses réactifs de propulsion anaérobie en réserve pen-

## Petit réacteur nucléaire

Dans tous les modèles de petits réacteurs nucléaires qui existent, on essaie d'éviter la complexité des moteurs nucléaires. C'est pour cette raison que l'on tente de les intégrer à la circulation naturelle du circuit primaire, à utiliser d'importants coefficients de température négatifs et des commandes simplifiées, afin de tirer profit de l'effet tampon des accumulateurs du sous-marin sur les transitions de charge du réacteur.

La figure A donne un exemple de source d'énergie maritime autonome. Ce réacteur à basse température et basse pression refroidi à l'eau est conçu en tenant compte de la simplicité plutôt que l'efficacité. Il est alimenté par un alliage d'uranium-zircon-hydrure, enrichi à 19,7 pour cent d' $U_{235}$ . Le cœur du réacteur est littéralement immergé

dans le réservoir de liquide de refroidissement de réserve, pour plus de protection "passive" contre les dangers classiques de perte de liquide de refroidissement.

Cette caractéristique en est une parmi d'autres qui portent le concepteur à croire que ce système est exceptionnellement sécuritaire.

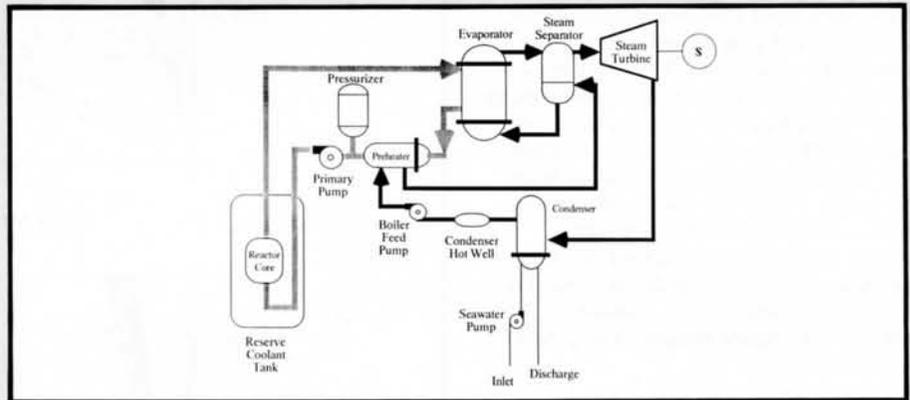


Figure A. Schéma du circuit d'une source d'énergie maritime autonome.

dant le long trajet qui la plupart du temps le séparera de sa zone d'opération. Le sous-marin européen pourra donc être équipé d'un évaporateur d'oxygène liquide, tandis que le bâtiment canadien devra avoir un système de réfrigération cryogénique, ou une source d'oxygène liquide près de la zone d'opération, on peut être un autre type de propulsion anaérobie. Il ne faut pas en déduire que l'oxygène liquide n'est pas recommandable pour les sous-marins canadiens cependant, mais il faut comprendre les facteurs dont il faut tenir compte.

La marine canadienne suivra avec attention les derniers développements de tous les systèmes de propulsion anaérobie et gardera toutes ses options ouvertes. En termes d'implication au niveau de la R-D cependant, on peut en éliminer quelques-unes. Par exemple, la technologie Stirling fait déjà l'objet d'intenses recherches en Suède, et il en est de même pour le moteur diesel à cycle fermé dans d'autres pays. Ni l'un ni l'autre n'exigent l'attention des Canadiens.

Si le grand public se laissait convaincre d'accepter le concept du sous-marin à réacteur nucléaire, les efforts de développement canadiens pourraient alors se concentrer sur cette technologie puisque c'est vraiment la seule qui peut produire une vraie propulsion anaérobie sous la glace arctique. Faute de pouvoir poursuivre cette option, et pour se donner une option de rechange, les Canadiens pourraient diriger leurs efforts de R-D vers la technologie de la pile à combustible à polymère solide ou la pile à aluminium. De fait, des contrats de R-D ont déjà été accordés à

Ballard et Alupower en ce sens. Si l'on retient l'objectif à long terme de se procurer des sous-marins à propulsion entièrement anaérobie plutôt qu'hybride, on ne devrait pas ignorer le concept italien de l'emmagasinage torique.

### Conclusion

Étant donné l'état actuel de la technologie de détection des sous-marins équipés d'un schnorchel, et les promesses que font miroiter les sources de propulsion anaérobie décrites dans le présent article, on ne court pas de risque en prédisant que la propulsion anaérobie n'est pas seulement ici pour rester mais qu'elle deviendra l'une des caractéristiques fondamentales des sous-marins classiques. Un grand nombre de systèmes de propulsion anaérobie sont présentement en cours de développement, et un nombre encore plus important de nations s'y intéressent.

À l'heure actuelle, il n'existe pas de "meilleure" source de propulsion anaérobie classique. La source la plus appropriée pour un sous-marin ou un client en particulier dépend de plusieurs facteurs, comme le profil opérationnel, la vitesse, le temps de plongée, les échanciers (étant donné les différents stades de développement et les temps de livraison), la volonté de prendre des risques avec une nouvelle technologie, la proximité des zones de patrouilles et, bien sur, la disponibilité des fonds.

Pour la marine canadienne, c'est l'option de la propulsion anaérobie à réacteur nucléaire qui semble le choix logique, mais elle peut nous être refusée. Parmi les

autres systèmes, ce sont le moteur Stirling, les piles à combustible à polymère solide et à aluminium qui sont les plus prometteurs, les deux autres étant des candidats logiques aux efforts de R-D canadiens. La marine suit avec attention les derniers développements dans tous les domaines de propulsion anaérobie et elle veut garder toutes les avenues ouvertes en attendant que l'on prenne une décision quant au nombre de sous-marins classiques que le budget nous permettra (on non) d'acquérir. 🚢

### Références

- (1) R.G. Weaver et K.A. Heemskerk, *Air-independent Propulsion for Submarines*, congrès "MARITECH 90" de l'Institut canadien technique maritime, les 30 et 31 mai 1990, Victoria (Colombie-Britannique).



Lcdr Heemskerk était ingénieur en développement des systèmes sous-marins à la DMGE 3.

# Les moteurs diesels à atmosphère synthétique dans les véhicules sous-marins

Par G.T. Reader, de l'Université de Calgary, et J.G. Hawley de la Royal Navy

La venue de la propulsion nucléaire sous-marine durant les années 1950 a signifié le début d'une nouvelle ère pour les sous-marins militaires, tant du point de vue de la conception que du rôle. Jusqu'alors, le sous-marin était surtout un bâtiment de surface, bien que l'on ait cherché à en améliorer les performances depuis le milieu des années 1940. L'*USS Albacore* est l'exception la plus notable à cette règle puisqu'il a été spécialement conçu pour naviguer sous l'eau, mais il semble que cette réussite technique ait été ignorée pendant de nombreuses années. Les premiers sous-marins nucléaires connaissaient les mêmes limites hydrodynamiques que les sous-marins classiques mais on ne tarda pas à les améliorer. Le sous-marin nucléaire d'aujourd'hui est un pur-sang, une bête absolument magnifique qui demeure à bien des points de vue sans rival et dont la supériorité est indiscutable. Depuis une dizaine d'années, un débat fait néanmoins rage sur les avantages des sous-marins classiques par rapport aux sous-marins nucléaires, ou à propos de nouveaux types de sous-marins classiques, de sous-marins classiques hybrides, etc. Pourquoi donc?

Il existe plusieurs raisons qui font que les sous-marins classiques dominent encore le marché militaire, du moins en terme du nombre, et que les sous-marins commerciaux sont exclusivement non nucléaires, mais la principale est d'ordre économique. Ils sont plus coûteux à construire et les frais associés aux infrastructures nécessaires à leur fonctionnement ainsi qu'à la formation et à la stabilité du personnel sont aussi extrêmement élevés. Il y a aussi la dimension politique, toujours omniprésente dans le processus de décision lorsque l'énergie nucléaire et les systèmes d'armes sont en cause. Dans une société de plus en plus préoccupée des questions environnementales, le nucléaire n'est pas très populaire!

Le sous-marin nucléaire constitue un tour de force technologique qui exige un équipage motivé et bien entraîné, fait mis en évidence tant par les mésaventures des Soviétiques que par les succès des équipages de l'OTAN. (Ajoutez à cela les exigences habituelles en matière de leadership et de discipline, et le sous-marinier nucléaire bien entraîné devient une commodité recherchée, comme l'a appris à ses dépens la Marine américaine.)

Dans les eaux côtières et dans les mers peu profondes, les gros sous-marins nucléaires ne jouissent pas de l'écrasante supériorité qu'ils ont dans l'océan. Dans ces circonstances, les sous-marins classiques peuvent habituellement bien s'en tirer, du moins pendant quelques heures. Et comme les capteurs des sous-marins classiques modernes (comme par exemple, ceux de la classe *Upholder*) sont aussi efficaces que ceux de leur contrepartie nucléaire, il arrive que, dans certaines situations, leur rendement soit plus qu'acceptable.

Le talon d'Achille du sous-marin classique est cependant son manque d'autonomie sous l'eau. Les coefficients d'indiscrétion actuels sont tout simplement trop élevés pour que les sous-marins classiques puissent défier les sous-marins nucléaires pendant bien longtemps. Pour améliorer la situation, les marines militaires de plusieurs pays européens se sont tournées vers le concept du sous-marin hybride, à bord duquel une centrale anaérobie auxiliaire peut recharger les batteries pendant que le sous-marin est en plongée à sa profondeur de mission normale.

On a beaucoup écrit sur ce concept, et les protagonistes de la propulsion nucléaire ont bruyamment exprimé leur opposition (surtout en Grande-Bretagne, au Canada et aux États-Unis). Entre temps, les Suédois, les Allemands et les Italiens ont continué de développer des systèmes hybrides. Les autorités suédoises ont donné le feu vert à l'installation de moteurs Stirling; le système à pile à combustible allemand ayant répondu à toutes les attentes, on a décidé de l'installer dans le nouveau sous-marin de classe S212; et

on a installé des moteurs diesel à atmosphère synthétique dans des sous-marins commerciaux et militaires. Dernièrement, les États-Unis ont évalué la performance de ces véhicules de design italien, et les Hollandais et les Allemands sont en train de mettre au point un moteur diesel Cosworth (britannique), ainsi que d'autres modèles à atmosphère synthétique, destiné à toute une gamme d'applications. Le Japon a récemment refait son entrée en scène et repris le développement des diesels sous-marins. Les Australiens ont pris une option sur les moteurs Stirling suédois. Dans ce contexte, certains pays ont adopté l'attitude de Néron qui, comme chacun sait, jouait de la harpe pendant que Rome brûlait.

En termes de capacité de stockage de l'énergie et de puissance volumique, le réacteur nucléaire est sans rival. Si les travaux d'avant-garde du groupe canadien Conservation & Protection (visant à mettre au point de petits réacteurs nucléaires peut-être coûteux) réussissent, peut-être le concept du sous-marin nucléaire d'un déplacement de 2 000 tonnes ou moins à bon marché sera-t-il réexaminé. On prévoit que la technologie sera au point vers la fin des années 1990, mais il se peut que cela prenne assez de temps avant que l'on parvienne à l'intégrer dans un sous-marin. Il faudrait peut-être, alors, jeter une fois de plus un coup d'oeil du côté des systèmes anaérobies non nucléaires. Il ne serait pas particulièrement difficile ou coûteux d'installer en rattrapage un moteur Stirling, un diesel à atmosphère synthétique, ou une pile à combustible sur un sous-marin de classe *Oberon*. On n'a qu'à se rappeler que, vers la fin des années 1950, la Royal Navy avait l'intention d'installer un moteur diesel à recyclage de l'échappement de 150 kW dans un sous-marin de classe "O" et que les Soviétiques à la même époque avaient équipé un bâtiment de classe Québec d'un système similaire.

Il y a un autre facteur que l'on néglige souvent de mentionner en ce qui concerne la propulsion sous-marine anaérobie, à

savoir que, par submersibles, on n'entend pas toujours sous-marin de patrouille avec équipage. En fait, on ne mentionne presque jamais qu'il faudra aussi trouver de meilleurs systèmes de propulsion pour les torpilles. Pourtant, en ce qui a trait à la technologie sous-marine, on assiste à un débordement d'intérêt pour toutes sortes de submersibles. Le système italien qui a été examiné par les Américains est idéal, par exemple, pour équiper les bâtiments de transport de nageurs de combat (comme les SEALs). D'autres véhicules sans pilotes, comme celui de DARPA, sont destinés à l'espionnage sous-marin. En fait, on aurait avantage à équiper de moteurs anaérobies une foule d'applications autres que les sous-marins avec équipage, et le débat du nucléaire par rapport au non nucléaire ne devrait pas nous détourner de tels développements.

Dans un article comme celui-ci, il n'est pas possible de traiter de toutes ces applications, ni de tous les nouveaux systèmes de propulsion. Nous nous concentrerons plutôt sur les systèmes à moteur diesel. Mais ce qui a le plus attiré l'attention par le passé (et que l'on semble vouloir continuellement réinventer), c'est le moteur diesel à cycle fermé. Nous préférons cependant utiliser l'expression *diesel à atmosphère synthétique* (DAS) puisque la plupart des soi-disant moteurs à cycle fermé sont en fait des moteurs qui recyclent l'échappement, et qu'entre le moteur à cycle ouvert et le moteur à cycle fermé, il existe aussi des systèmes à cycle semi-fermé. Pour éviter la confusion entre les différents types et variantes, nous croyons que l'appellation générique *moteur DAS* est la plus précise et nous expliquerons pourquoi un peu plus loin. Le cœur du système DAS est le moteur diesel, un mode de propulsion dont la technologie est bien connue et avec lequel toutes les marines modernes sont familières. Les systèmes DAS sont équipés de moteurs de série et c'est sans doute ce qui les rend aussi attrayants.

#### Qu'est-ce que le moteur diesel à atmosphère synthétique?

Fondamentalement, un système DAS, c'est un moteur diesel qui agit comme source de propulsion principale sans avoir accès à l'atmosphère normale. Il existe plusieurs variantes mais dans tous les cas, le principe est le même : on enrichit les gaz d'échappement avec de l'oxygène que l'on retourne vers l'admission (voir figure 1). C'est le gaz d'échappement recyclé qui, en fait, sert de diluant et de modérateur, rôle habituellement tenu par

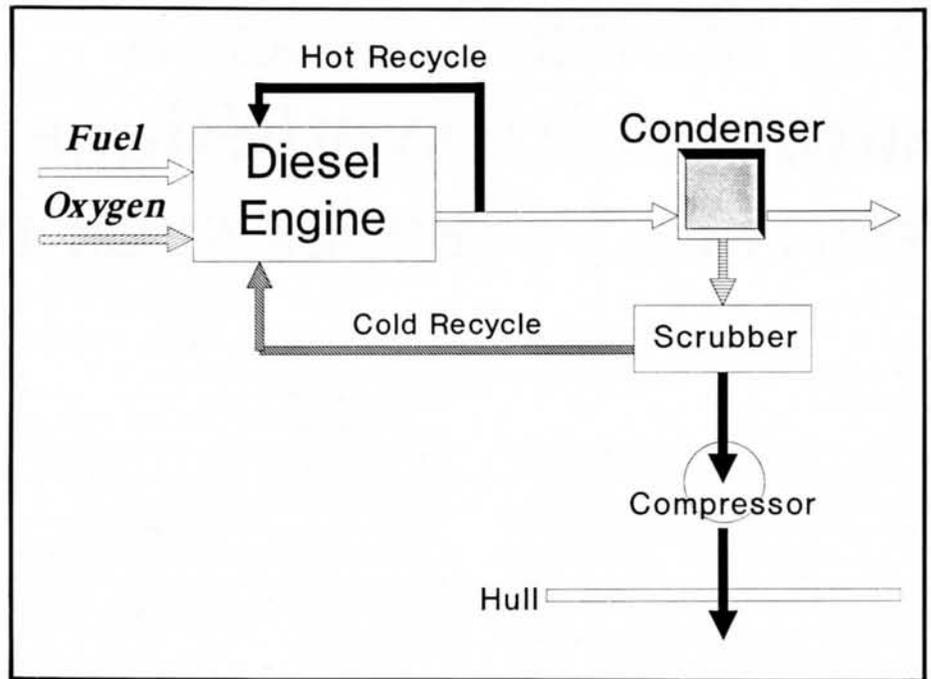


Figure 1 – Concept DAS

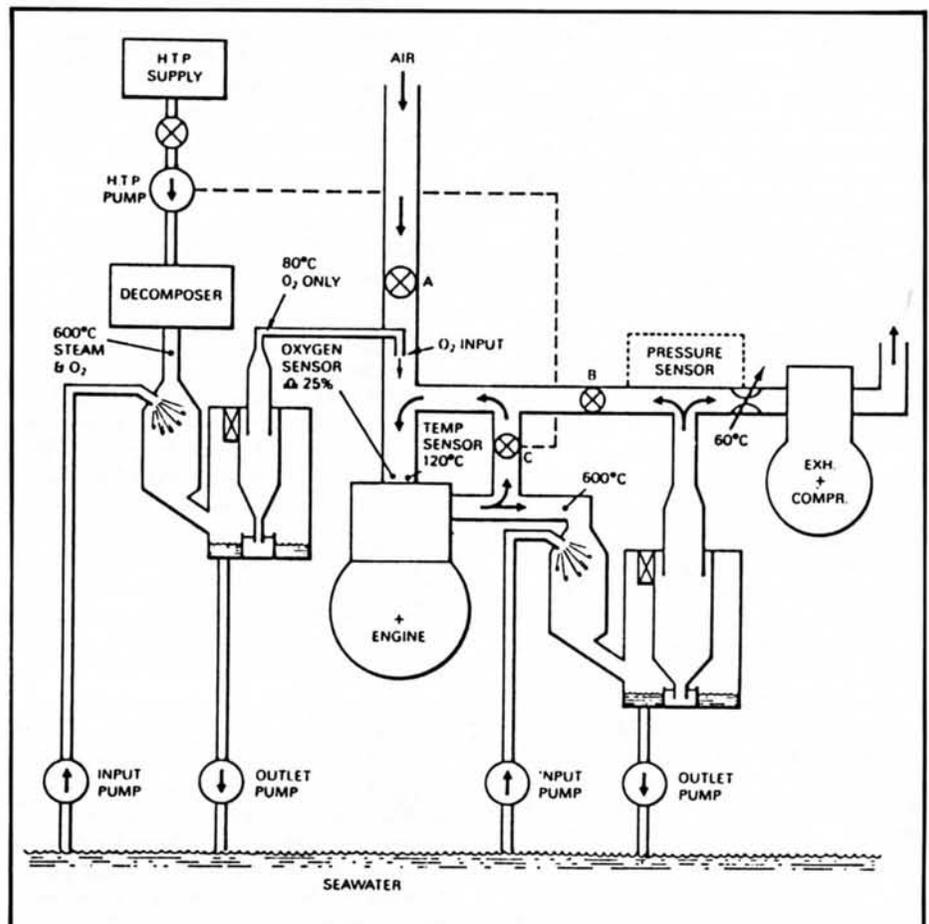


Figure 2. Moteur diesel du MDN(M) à recyclage des gaz d'échappement.



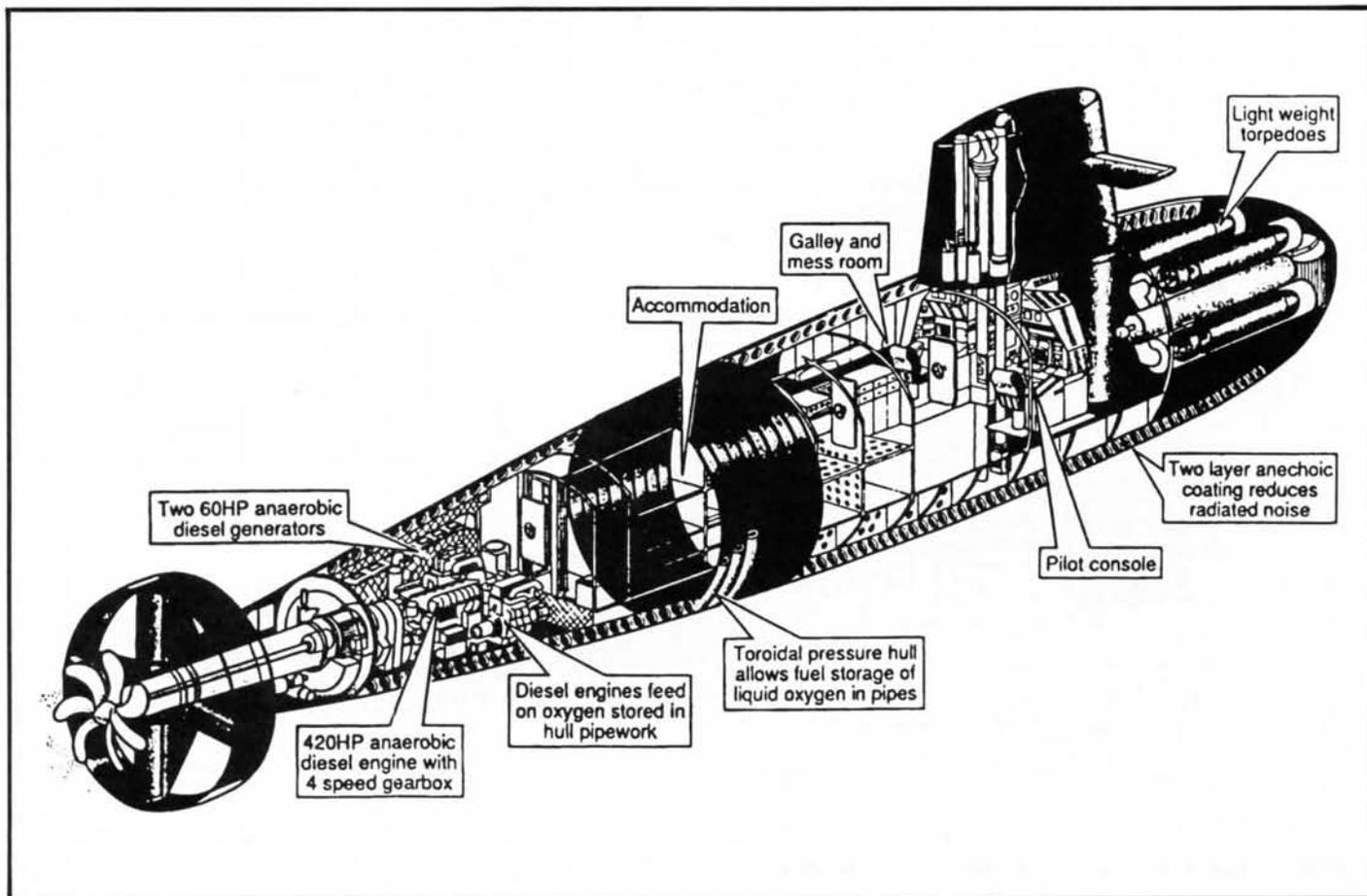


Figure 4. Stockage toroïdal des gaz de Maritalia.

les systèmes à atmosphère contrôlée. On retrouve, par exemple, de la monoéthanolamine (MEA) et de la diéthanolamine (DEA) à bord des sous-marins nucléaires. cependant, ces produits sont très toxiques, et les épurateurs qui en font usage prennent beaucoup d'espace et consomment beaucoup d'énergie, presque autant sinon plus que les compresseurs volumétriques des systèmes conventionnels au  $\text{CO}_2$  ou que les systèmes à cycle de Kreislauf. Et bien peu d'OMT font l'éloge de la facilité de fonctionnement et d'entretien de tels systèmes à MEA. Néanmoins, les Japonais prétendent avoir mis au point un moteur DAS à système au MEA qui fonctionne.

Il existe une autre solution : se servir de l'eau comme absorbant de  $\text{CO}_2$ . Il est bien évident que dans ce cas, on a accès à une réserve illimitée d'absorbant, mais il y a quand même un prix à payer puisque l'efficacité de l'eau de mer en tant qu'absorbant est plutôt pauvre par rapport aux hydroxydes et aux amines. La

quantité d'eau de mer qu'il faut pour éliminer tout le  $\text{CO}_2$  est énorme. Pour venir à bout d'un tel problème, tout en conservant les avantages que procure la disponibilité d'une réserve d'absorbant illimitée qu'il n'est même pas nécessaire de stocker à bord, on a conçu des systèmes d'épuration à l'eau de mer qui peuvent éliminer une partie du  $\text{CO}_2$ . Le reste est recirculé et mélangé à de l'argon — d'où on a tiré le nom de moteur diesel ARGO. L'emploi d'un argon d'une valeur gamma plus élevée améliore les caractéristiques thermodynamiques de l'éventuelle atmosphère synthétique, ce qui permet d'obtenir une consommation spécifique (BSFC) supérieure à celle des systèmes exclusivement au  $\text{CO}_2$ . On obtient en bout de ligne un système tout à fait adéquat pour les missions prolongées.

L'épurateur à l'eau de mer développé à l'origine par Newcastle-Cosworth puis plus tard par Cosworth-Thyssen pour un moteur DAS de 150 kW a un encombrement de moins de  $10 \text{ m}^3$  et une masse de 250 kilogrammes. Habituellement, un tel système peut atteindre une BSFC de

0,24 kg/kWh, avec une consommation spécifique d'oxygène de 0,84 kg/kWh et une consommation spécifique d'argon de 0,038 kg/kWh. Si l'on installait un tel système sur une section ajoutée de 7 mètres de longueur d'un sous-marin de classe *Upholder*, on pourrait prolonger l'autonomie en plongée de sept à dix jours. (Il s'agit d'un rendement à peu près égal à ce que revendiquent les Suédois pour leur sous-marin de classe *Näcken* équipé d'un moteur Stirling.) La section ajoutée contiendrait les générateurs DAS (au nombre de deux, pour plus de sûreté et pour rassurer l'équipage), la réserve d'oxygène, les caisses de ballast et les systèmes de survie additionnels requis pour les missions en plongée prolongées. L'oxygène serait alors stocké sous forme liquide (LOX) à basse température ou sous forme gazeuse (GOX) à haute pression.

Cette dernière technique a été adoptée par la firme italienne Maritalia qui a mis au point un concept innovateur appelé le



Figure 5. *Seahorse* : sous-marin de poche expérimental.

stockage toroïdal des gaz (*gaseous storage toroidal*) selon lequel l'oxygène gazeux est stocké dans des tuyaux haute pression en forme de tore soudés ensemble pour former la coque intérieure. Le ministère américain de la défense a évalué un sous-marin de poche à coque toroïdal (voir figure 4).

#### Applications

Jusqu'à présent, le système DAS a été installé sur deux types de sous-marins de poche. Le premier à été le *Seahorse* de Bruker Meerestechnik, un prototype de quatre membres d'équipage ayant une profondeur nominale de service de 300 mètres (voir figure 5). Il a été mis au point par MAN partir d'un moteur MAN de type D2566 ME d'une puissance de 100 kW à 1500 tr/min. Celui-ci peut fonctionner tant en cycle fermé qu'en cycle ouvert et il peut entraîner le système de propulsion hydraulique ou recharger les batteries. L'oxygène est stocké sous forme liquide et les gaz sont recyclés à l'aide d'un épurateur à l'hydroxyde. C'est l'argon qui sert de gaz modérateur, ce qui

fait donc du système MAN une variante des diesels à l'azote et des diesels à l'argon. Malheureusement, MAN appelle aussi son système le "diesel à l'argon". Des essais en mer et en bassin ont été faits avec le *Seahorse*, mais les résultats n'ont pas encore été publiés.

Le petit sous-marin à coque toroïdale de Maritalia, de même que d'autres sous-marins de leur fabrication également équipés de systèmes DAS, ont été soumis à des essais extensifs. Maritalia — autrefois *Sub-Sea Oil Services* — s'est récemment associé à Fincantieri, le principal chantier naval italien, pour la conception et la construction d'un bâtiment de classe O qui pourrait naviguer en plongée sur 8 000 mille marins à une vitesse de cinq noeuds, à une profondeur de service de 400 mètres. On croit que le système Maritalia est équipé d'épurateurs à l'eau de mer et que les gaz d'échappement de surplus peuvent être stockés à bord pour que le sous-marin puisse naviguer sous l'eau sans laisser de traînée.

En Grande-Bretagne, la firme Cosworth Deep Sea Systems Ltd. est en train de mettre au point tout un éventail de systèmes DAS pour une gamme d'applications, y compris des groupes propulseurs hybrides pour les sous-marins avec équipage, des blocs d'alimentation pour l'approvisionnement des équipements sous-marins, et du système d'alimentation principal de véhicules téléguidés, de sous-marins autonomes et de robots. En collaboration avec la compagnie allemande Thyssen Nordseewerke, Cosworth développe depuis deux ans un moteur DAS de 120 kW monté sur un module destiné à être ajouté à un sous-marin. Le moteur est un Mercedes-Benz OM421A et le système a été testé à des profondeurs simulées de 500 mètres. Cosworth a aussi passé un contrat de développement avec Rotterdamse Droogdok Mij (RDM) pour la construction d'un système un peu plus puissant (150 kw) à partir lui d'un moteur Mercedes-Benz OM422A.

On croit chez Cosworth que, dans deux ou trois ans, le système du diesel à l'argon sera suffisamment développé pour atteindre la barre des mégawatts et qu'il pourra

fonctionner à 6 000 mètres de profondeur. Tous leurs systèmes font appel à des épurateurs d'eau de mer qui ont subi avec succès plusieurs milliers d'heures de test sur banc d'essai. Il est évident que Cosworth a entièrement confiance en son système puisqu'ils viennent de construire une nouvelle usine de groupes propulseurs à Kettering. Leur plus récent projet est un moteur DAS de 400 kW qui doit être pourvu des techniques de suppression du bruit les plus perfectionnées pour le rendre plus acceptable du point de vue militaire.

En 1980, le constructeur maritime japonais Hitachi annonçait que l'on entreprenait la production d'un système DAS de 16 kW(e) sur lequel il travaillait depuis une dizaine d'années. D'après la description qu'il en faisait, le système semblait avoir atteint un niveau de développement très avancé. Rien de plus, cependant, n'a été publié sur le sujet, jusqu'en 1989, quand on apprit que Mitsui Shipbuilding — une association japonaise dédiée au développement de la machinerie maritime — avait entrepris des travaux sur un prototype DAS grande autonomie de 235 kW équipé d'un circuit d'épuration MEA. Il s'agirait là d'un niveau de puissance assez élevé pour répondre aux exigences d'un sous-marin de patrouille de 2 500 tonnes avec équipage.

Le Royal Naval Engineering College (Manadon) étudie les systèmes DAS depuis 1985 et il a récemment entrepris un programme de recherche, subventionné par l'OTAN, en collaboration avec le Département de génie mécanique de l'Université de Calgary. Ses objectifs sont de développer un meilleur modèle analytique du système DAS et de recueillir des données fondamentales sur le système afin de pouvoir optimiser la conception du moteur et de l'épurateur. Les applications envisagées par le groupe de recherche comprennent les sous-marins de la classe Upholder, les véhicules sous-marins autonomes longue autonomie et les embarcations pour plongeurs de combat.

On voit donc que, partout dans le monde, l'intérêt pour les systèmes DAS et la recherche dans le domaine sont à la hausse.

## Conclusion

Les systèmes DAS possèdent les avantages suivants :

- a. Ils fonctionnent à partir de moteurs de série.
- b. On peut les faire fonctionner en cycle fermé et en cycle ouvert.
- c. La technologie n'a plus de secrets pour les militaires.
- d. Ils réagissent bien aux fluctuations de la demande en énergie.

Les principaux désavantages des systèmes à moteurs diesel à atmosphère synthétique sont le bruit et le taux d'usure élevé des pièces du moteur. Il faudra évidemment davantage de recherches et d'études pour optimiser le concept et l'adapter à des sous-marins militaires. En plus des données de rendement de base, il faut plus de renseignements sur le système d'épuration et sur le contrôle du mélange atmosphérique synthétique. Les universités peuvent être appelées à jouer un rôle important dans le développement du système DAS.

Il y a tout de même déjà plusieurs systèmes DAS en opération. Je dirais même qu'ils sont assez développés pour que toute marine militaire qui a besoin d'effectuer des patrouilles sous-marines prolongées et qui ne peut se payer l'option nucléaire, devrait y songer.

## Remerciements

Les auteurs désirent remercier Cosworth Deep Sea Systems Limited pour leur gracieuse collaboration. Les recherches de l'Université de Calgary sur les groupes propulseurs sous-marins sont subventionnés par le CRSNG du Canada et celles du RNEC par le Ministère de la défense. Les projets de recherche conjoints sont aussi subventionnés par l'OTAN.



Monsieur Graham Reader est le chef du Département de génie mécanique de l'Université de Calgary. Au moment de sa retraite en 1988, il était commandeur de la Royal Navy et occupait le poste de recteur adjoint à la recherche du RNEC.



Le lieutenant-commander Gary Hawley de la Royal Navy est premier professeur en énergie thermique au RNEC et chargé de recherche sur les groupes propulseurs sous-marins.

# Danger — logiciel en vue!

## *Une vision personnelle de ce qu'il faudra faire pour prendre en charge le logiciel de la marine.*

Par le Commander Roger Cyr

### Introduction

Le logiciel est devenu l'élément le plus important et le plus discuté de tous les systèmes navals d'aujourd'hui. Il s'agit de la partie la plus fragile et la plus potentiellement dangereuse d'un système (particulièrement dans un contexte où l'on se fie de plus en plus sur l'automatisation complète des systèmes); on considère qu'elle est la cause principale du manque de fiabilité des systèmes. Le logiciel est aussi l'élément qui cause les plus graves inquiétudes quant à la facilité de maintenance — comment en assurer la mise à jour et à qui confier cette tâche.

Dans le milieu informatique, on entend continuellement dire que les problèmes de logiciel ne sont pas techniques, mais administratifs. C'est-à-dire que la façon dont la marine gère le processus d'acquisition et de maintenance des logiciels cause des problèmes. La difficulté ne provient peut-être pas uniquement des gens qui gèrent le processus. Il faut aussi tenir compte des ingénieurs de systèmes, des programmeurs, des gestionnaires de configuration, des responsables de la validation et de la vérification et de ceux qui sont peut-être les plus importants dans ce processus, c'est-à-dire ceux dont les exigences ont déclenché l'opération d'acquisition ou de maintenance.

On peut attribuer une partie du problème à deux mythes populaires à l'égard des impératifs de soutien du logiciel. Le premier mythe veut que le logiciel soit une entité indépendante du matériel ou du système où il est inséré. Le logiciel n'est qu'un élément d'un système global et si

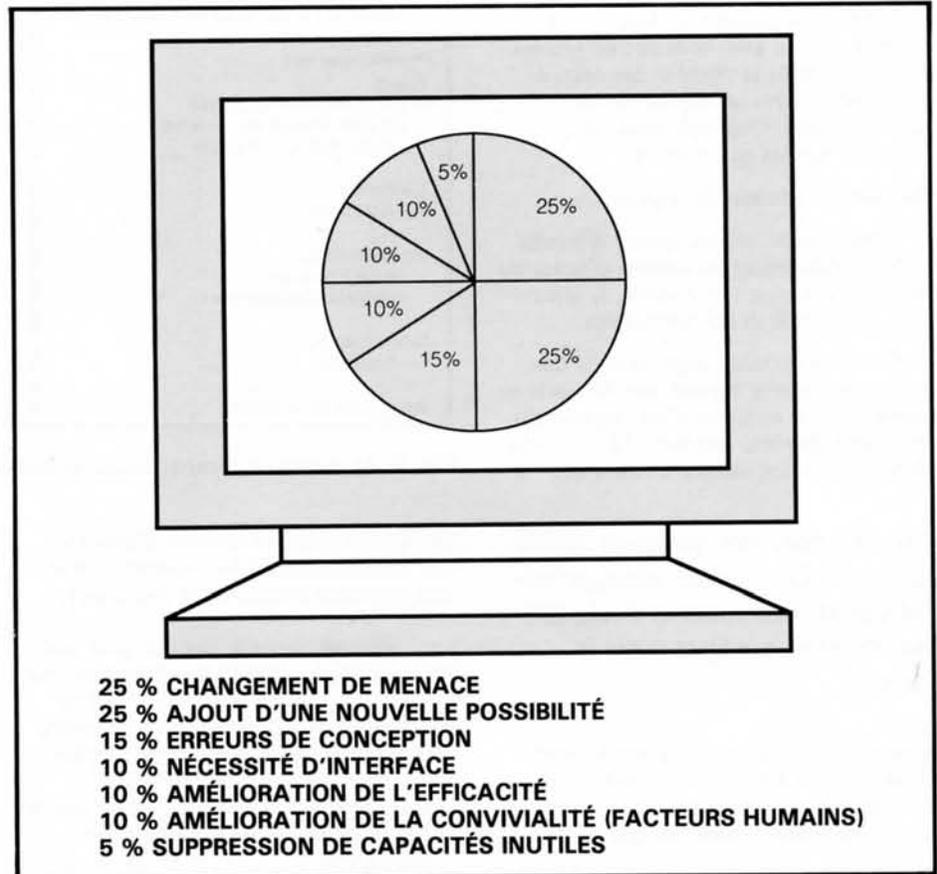


Fig. 1. Statistiques de la marine américaine sur la répartition des raisons à l'origine des modifications logicielles.

on le traite isolément, on crée de graves problèmes d'interface. La structure de la répartition du travail dans certains grands projets révèle souvent des centres de coût entièrement séparés pour le matériel et le logiciel. Par conséquent, les deux centres ont tendance à négliger les impératifs de communications à l'intérieur du système global.

Le second mythe, c'est qu'il faut avoir une expérience en programmation pour devenir un créateur ou un gestionnaire de logiciel. Rien ne pourrait être plus faux. Il faut posséder une connaissance élémentaire de la *structure* — et non une longue expérience pratique en programmation.

Sur le plan de la gestion de logiciels, la marine aura bientôt l'occasion de mettre ses capacités à l'épreuve grâce à la Frégate canadienne de patrouille et au destroyer de classe Tribal modernisé — environ 2,5 millions d'instructions en code source. Cinquante pour cent de ces instructions seront prises en charge par l'industrie privée grâce à des contrats établis par les gestionnaires des matériels pour le cycle de vie des systèmes, mais le reste, soit 1,25 millions d'instructions, devront être traitées à l'interne.

Le présent document traite spécifiquement de la philosophie de base que devra adopter, à mon avis, le centre de soutien informatique de la flotte et des compétences nécessaires au soutien de cet énorme stock de logiciels navals au cours des années qui viennent.

#### Éléments de soutien du logiciel

À mon point de vue, quatre éléments de base contribuent au soutien efficace du logiciel à l'interne : le *système*, la *structure*, le *contrôle* et les *compétences*.

*L'élément système* signifie qu'il faut reconnaître que le logiciel doit être pris en charge dans le contexte d'un système global. Barry Boehm, une autorité reconnue en matière de logiciels, a affirmé que "le

*"Il faut plus que quelques opérations au clavier pour changer un logiciel de nos jours et il n'existe pas de mot magique pour le faire."*

facteur le plus important quant à l'amélioration de la fiabilité d'un logiciel est d'intégrer le processus logiciel au processus global d'élaboration du système".

*L'élément structure* signifie qu'il faut reconnaître que la complexité des logiciels d'aujourd'hui rend leur remplacement difficile et onéreux. Il ne suffit pas d'appuyer sur quelques touches au clavier et il n'existe aucun mot magique. Les modifications aux logiciels sont faites pour une variété de raisons (*fig. 1*), mais pour chaque changement proposé, il faut évaluer la nécessité et calculer le rapport coûts/rendement. Viser la perfection, en soi, ne constitue pas une justification suffisante pour changer une partie de logiciel.

ACTIVITÉ DE SOUTIEN	POURCENTAGE DE L'EFFORT TOTAL	COMPÉTENCES REQUISES
Gestion (c'est-à-dire gestion des activités <i>totales</i> de soutien)	6	Gestionnaire des logiciels
Analyse des besoins	5	Utilisateurs du système
Conception de produit	11	Ingénieur système
Programmation (y compris la conception détaillée, la rédaction de programmes, l'essai des unités et l'intégration de celles-ci)	41	Analyste programmeur et anal. prog. de pointe
Planification des essais (c'est-à-dire préparation du plan d'essai du système et des données d'essai)	6	Utilisateurs du système
Validation et vérification	14	Utilisateurs du système
Documentation (mise à jour des manuels d'utilisateurs)	11	Utilisateurs du système
Gestion de la configuration	3	Analyste programmeur
Assurance de la qualité	3	Analyste programmeur

Fig. 2. Activités et compétences de soutien des logiciels à l'interne.

Dès qu'on prend la décision d'apporter une modification, il faut mettre en place une approche structurée et disciplinée.

*L'élément contrôle* signifie qu'il faut reconnaître la nécessité de soumettre tout logiciel à un contrôle de configuration rigoureux à titre d'élément d'un système global soumis à un contrôle de configuration total. Toute modification d'un système doit être scrupuleusement contrôlée et gérée par du personnel qualifié.

*L'élément compétence* signifie qu'il faut reconnaître la nécessité de constituer une infrastructure de personnes possédant les compétences requises pour exécuter efficacement toute une gamme d'activités de soutien du logiciel (opérations normalement liées au développement du logiciel). Les neuf activités de base du soutien interne du logiciel (comme on les définit dans le document de l'OTAN sur la maintenance des logiciels<sup>1</sup>) sont décrites à la *figure 2*.

#### Compétences du personnel

Du point de vue de la production, le logiciel est semblable au matériel car il faut différentes compétences pour exécuter différentes fonctions (activités) de développement du produit. En faisant appel aux types et niveaux appropriés de compétences, on s'assure que la production est efficace et rentable. Il ressort de la *fig. 2* que chaque activité de soutien du logiciel ne représente qu'une partie de l'effort global et qu'elle requiert des compétences de l'une ou l'autre des cinq catégories de compétences fonctionnelles suivantes :

- a. utilisateur de système
- b. ingénieur système
- c. analyste programmeur

COMPÉTENCES	POURCENTAGE DE L'EFFORT TOTAL	PERSONNEL REQUIS
Utilisateur de système	36	Officier de combat et MR opérateur
Ingénieur de système	11	Ingénieur des systèmes de combat (ISC)
Analyste programmeur et Analyste programmeur de pointe (voir la note)	47	CS 02 et CS 03, entrepreneur, MR opérateur, MR technicien, officier de combat, ISC
Gestionnaire de logiciel	6	CS 04, ISC, officier de combat

**NOTE :**

Idéalement, toutes les tâches des programmeurs et des programmeurs de pointe devraient être exécutées par du personnel civil CS. Si aucun employé civil ne peut remplir ces fonctions, le personnel de l'entrepreneur devrait satisfaire à ces exigences, faute de quoi, on doit faire appel à un mélange des groupes professionnels militaires énumérés ci-dessus.

Fig. 3. Exigences à l'égard du personnel assurant le soutien des logiciels à l'interne.

- d. analyste programmeur de pointe
- e. gestionnaire de logiciel

L'utilisateur de système représente les compétences reliées à l'exploitation ou à l'utilisation finale d'un système. Dans le cas des systèmes de combat naval, on acquiert ces compétences grâce à la formation d'officier de combat et, pour les militaires du rang, grâce à la formation d'opérateur. Aucune compétence spécifique en logiciel n'est requise. Les utilisateurs de systèmes de combat participent à 36 pour cent des activités reliées au soutien du logiciel à l'interne (fig. 3).

L'ingénieur système représente les compétences reliées à la construction d'un système. Ces compétences, y compris celles reliées au logiciel, sont acquises grâce à la formation en génie des systèmes de combat (ISC). Les ingénieurs de systèmes de combat participent à 11 pour cent des activités reliées au soutien du logiciel à l'interne.

L'analyste programmeur et l'analyste programmeur de pointe représentent les compétences nécessaires à la programmation, à l'essai des unités et à l'intégration des modules. Idéalement, les fonctions qui requièrent la compétence d'un program-

meur (47 pour cent) devraient être exécutées par les entrepreneurs qui fournissent les logiciels — c'est l'approche la plus rentable. À défaut de confier ces tâches aux entrepreneurs, on peut les confier aux informaticiens de la fonction publique (CS 02 et CS 03) ou, en dernier recours, à une équipe d'officiers de combat naval, d'ingénieurs de systèmes de combat, de MR opérateurs et de MR techniciens.

Le gestionnaire de logiciel représente les compétences nécessaires à la gestion globale des activités de soutien du logiciel. On acquiert des compétences en gestion de logiciel en suivant le cours de gestionnaire de logiciel. Les gestionnaires participent à six pour cent des activités reliées au soutien du logiciel effectué à l'interne. Ces tâches devraient être effectuées soit par un CS 04 civil, soit par un ingénieur de systèmes de combat, soit par un officier de combat.

**Résumé**

Même si la marine a plus de vingt ans d'expérience en matière d'élaboration et de maintenance de logiciels, la gestion et la maintenance des logiciels continue d'être difficile. Les pièges sont nombreux et nos systèmes navals sont grandement touchés. Maintenant, étant donné la nécessité de gérer les 2,5 millions d'instructions en code source pour la Frégate canadienne de patrouille et le Projet de révision et de modernisation de la classe

Tribal, la marine fait face à ce qui pourrait bien être son plus grand défi technique de tous les temps. Il s'agit d'une entreprise énorme à envisager, mais la bonne nouvelle c'est que cette entreprise est réalisable — à condition de mettre en place les bons instruments pour le faire.

D'abord, il faut conserver une vue d'ensemble du système global et modifier le logiciel uniquement lorsque cela est absolument nécessaire. Les avantages des modifications doivent très nettement dépasser les coûts. Et lorsque nous apportons un changement, qu'il s'agisse de perfectionnement ou de toute autre forme de mise à jour, nous devons exercer une gestion très serrée de la configuration. Ceci signifie qu'il faut constituer dès le début une infrastructure de personnel qui apportera au processus d'élaboration et de soutien des logiciels de la marine la philosophie, les compétences et l'expérience appropriées. Si nous nous contentons de viser moins haut, on peut prévoir à coup sûr que le logiciel restera toujours l'élément instable des systèmes navals.



**Référence**

1. NATO Software Maintenance Concept, Working Paper AC/317(WG/2)WP/24, 22 janvier 1988.



Le Commander Cyr est le chef de section, DSCN 8, pour la technologie informatique navale. En août, il a été muté à la direction internationale des armements au QGDN.

# Systemes de guerre anti-aérienne et de surface des programmes TRUMP et FCP au défi!

par le Lcdr Richard Houle

Lorsque les navires des programmes TRUMP et FCP seront livrés, la Marine canadienne devra s'engager dans le programme d'essais le plus ambitieux de son histoire. Parmi les essais les plus complexes, on devra compter ceux des systèmes anti-aérienne et de surface, c'est à dire : trois nouveaux systèmes de missiles, deux canons de calibre moyen et un système de défense rapprochée (CIWS). Conjointement, on devra faire l'essai et l'intégration de différents radars, capteurs et leurres électroniques.

Pour que les démonstrations soient vraiment représentatives, il faut que les essais soient le plus réaliste possible. Contraintes budgétaires, échéanciers et exigences en matière de sécurité seront certainement des facteurs importants à ce point de vue, mais il faudra aussi tenir compte du rendement et de la disponibilité des cibles et des polygones de tir.

Pour simuler adéquatement la menace des armes modernes, les cibles aériennes doivent pouvoir atteindre des vitesses supersoniques, avoir de très petits profils radar, des trajectoires rasantes ou en piquée et être très maniables. Les cibles de surface, pour leur part, doivent pouvoir simuler des destroyers et des vedettes de patrouille rapides.

Parmi les cibles aériennes présentement en service, on compte les cibles remorquées comme le *Radop* et le *Milkcan* qui est équipé d'indicateurs acoustiques de distance des coups. Ces cibles sont peu coûteuses, mais elles sont lentes et requièrent un avion. Pour les essais des canons de 57 mm et de défense rapprochée des frégates contre les attaques en vol rasant, nous allons louer les cibles commerciales TLX-1 de Hayes. Il s'agit d'une cible qui peut maintenir constamment une basse altitude parce qu'elle est équipée d'un altimètre.

Les cibles-roquettes ROBOT mises au point au Canada auront aussi leur place lors des essais. La cible ROBOT-9 à plusieurs étages présentement disponible est peu coûteuse et modifiable, mais son utilité est restreinte par sa trajectoire balistique et sa



Figure 1. La cible ROBOT-X.

portée limitée. Les travaux de développement de la nouvelle cible ROBOT-X (figure 1) ne sont pas terminés, mais elle devrait être disponible pour les essais du missile *Seasparrow* à lancement vertical qui équipera les frégates. Le ROBOT-X est à la fois peu coûteux et récupérable, et il est très prometteur car il peut être programmé pour diverses trajectoires. Mais, n'étant capable que d'une vitesse maximale de 0,85 Mach, il a le désavantage d'être relativement lent. Bien qu'il en soit

au stade de l'évaluation, il pourrait quand même faire l'objet de développements futurs.

Pour ses essais du *Standard Missile*, le bureau de projet du programme TRUMP compte utiliser un certain nombre de cibles BQM-74 et AQM-37 fabriquées aux États-Unis. La BQM-74 est une cible subsonique programmable conçue pour simuler le vol d'un missile de croisière. Elle peut voler à basse altitude, résister à des



Figure 2. Le projectile PRAP.

accélérations de 5,3 g et son autonomie est plus grande que celle du ROBOT-X. L'AQM-37 est un drone supersonique largué d'un aéronef. Il peut simuler une cible en piquée.

Pour simuler les cibles supersoniques, le projectile PRAP (*Passive Radar Augmented Projectile* — figure 2) sera utilisé. Il offre les avantages d'être peu coûteux, d'avoir un profil radar réglable et de pouvoir être tiré d'une pièce d'artillerie ordinaire, comme le canon de 3''50. Son efficacité est cependant limitée à cause de sa trajectoire balistique.

Pour le tir de surface, nous allons encore nous servir des cibles remorquées habituelles comme le *Larne* et les cibles de plastiques à haute vitesse. Mais il y a aussi le *Barracuda* (figure 3), une cible de surface télécommandée qui a été mise au point au Canada et qui est capable de vitesses égales à celles des vedettes de patrouille rapides. À l'aide d'une gamme

de réflecteurs radar, on peut modifier son profil radar pour représenter une cible de la taille d'un destroyer.

Nous escomptons aussi pouvoir utiliser le CF-18 comme cible supersonique pour les essais de détection, d'acquisition et de poursuite — mais pas pour les essais de tir!

Traditionnellement, nous avons fait usage des cibles à grand rendement et des polygones de tir de la U.S. Navy. Mais à cause des restrictions budgétaires du ministère de la Défense des États-Unis, les cibles et les polygones américains ne sont plus aussi accessibles — et ce, à un moment où nos besoins en systèmes de missile avancés de même que le nombre de nos plates-formes de tir augmentent. Même si les essais des frégates seront effectués le plus souvent au large d'Halifax (à l'aide des cibles mentionnées ci-dessus), nous devons aussi utiliser certains polygones américains. Les essais des missiles *Harpoon*, par exemple, seront effectués au large de Porto-Rico avec l'aide des installations américaines.

Il faudra plusieurs types de cibles et d'installations pour arriver à évaluer à fond les capacités des systèmes de guerre anti-aérienne et de surface des frégates et des navires du programme TRUMP. Ce qui peut sembler un procédé assez simple (bien qu'arriver à détruire une cible mobile à partir d'une plate-forme mobile ne soit jamais facile) se complique considérablement lorsqu'il s'agit aussi d'évaluer le plus précisément possible le rendement de systèmes très perfectionnés avec des moyens limités. Pour mener à bien ces essais, nous devons profiter au maximum du temps d'utilisation du polygone. Et une des meilleures façons d'y arriver, c'est d'étirer les essais grâce à la simulation par ordinateur.

En même temps que différentes cibles seront utilisées pour faire l'évaluation des systèmes selon des paramètres de taille, de vitesse, d'altitude et de manoeuvrabilité des cibles, nous nous efforcerons de recueillir le plus de données possibles pour pouvoir établir des coordonnées de validation des modèles de logiciels (voir *RGM*, juillet 1990, p. 13). La simulation par ordinateur nous permettra alors d'extrapoler comment les systèmes devraient se comporter face à une menace réelle. On pourra aussi se servir de simulations pour évaluer certains facteurs comme l'environnement tactique (par ex. le brouillage intense), la capacité d'une cible à représenter une menace, le rendement d'un système d'arme contre des menaces multiples, et l'intégration d'armes de destruction avec la guerre électronique, pour n'en mentionner que quelques-uns.

D'autres activités sont en voie de réalisation afin d'aider la Marine à mettre sur pied un programme d'essais satisfaisant pour les systèmes de guerre anti-aérienne et de surface des frégates et des navires du programme TRUMP. Le Commandement maritime vient de prendre livraison d'un récepteur de télémètre portatif et toute une gamme de projets touchant la mise au point de nouvelles cibles en sont à différents stades de développement ou d'acquisition. De plus, on est en train de perfectionner un système de contrôle des performances qui devrait améliorer le processus de rassemblement et d'analyse des données.

Le niveau de rendement du matériel a son importance, mais le personnel des différentes entreprises et des agences gouvernementales qui sera appelé à appuyer nos efforts au cours de ces essais est aussi très

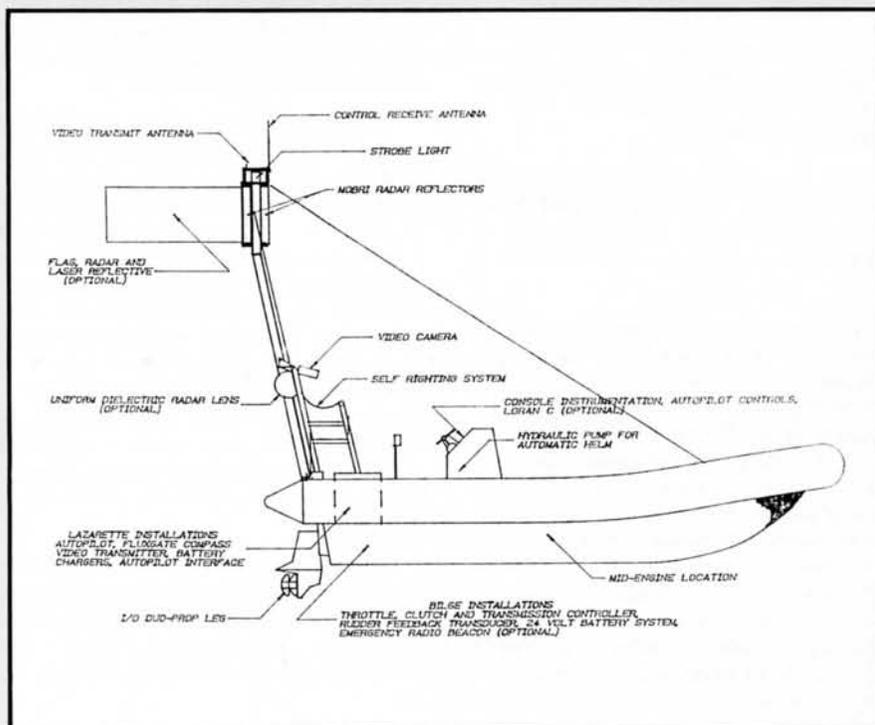


Figure 3. Le bateau-cible *Barracuda*.

important. Navires, armes, cibles, polygones, ordinateurs, coordonnateurs des essais, mesures de sécurité — toutes ces composantes auront un rôle crucial à jouer dans l'évaluation des performances des systèmes de guerre anti-aérienne et de surface des frégates et des navires du programme TRUMP. 🚢



Le lieutenant-commander Houle est le coordonnateur DSCN 2 des essais pour les systèmes de guerre anti-aérienne et de surface.

# Rétrospective

## Incident technique — Défaillance du diesel n° 1

### Les circonstances

Un navire de la classe DDH 257 venait tout juste de terminer une courte période de travail. Il restait passablement d'ouvrage à faire sur le pont supérieur (écaillage et peinture), ainsi que quelques petits travaux techniques.

Durant le quart du matin, on avait fait démarrer l'alternateur du diesel n° 1 pour la première fois après la révision complète de routine des 6 400 heures de fonctionnement. Le chauffeur de quart prêtait une attention particulière à son travail, étant donné qu'il s'agissait de la première fois où le navire allait être mis en marche depuis la révision. Il fallait le mettre en charge pour les essais précédant l'accepta-

tion. La lecture des appareils d'indication de la température et de la pression n'indiquaient rien d'anormal. Après environ une heure, les lumières ont faibli et le diesel a ralenti. La machine a commencé à laisser échapper de la fumée, puis elle a complètement figé avant qu'elle ne puisse être arrêtée. Il s'était écoulé environ une minute entre le moment où la machine s'est mise à ralentir et celui où elle a figé. Le chef des machines et l'ingénieur-mécanicien ont été avisés, et l'on s'est mis à chercher la cause de l'incident.

### Domages aux machines

Après que la machine fut ouverte, on a découvert qu'une autre révision complète serait nécessaire. La panne avait été cau-

sée par l'ingestion d'une matière étrangère, laquelle s'est plus tard révélée être du revêtement antidérapant (enlevé de la plage avant) qui avait été aspiré par les admissions d'air jusque dans la machine, avait été moulu par la soufflante et s'était déposé dans les cylindres. En moins d'une heure, la machine remise à neuf avait "enregistré" 6 400 heures de plus.

### Leçon à tirer

Il faut toujours inspecter les admissions d'air et l'espace qui les entoure avant de faire partir les machines.



# Bulletin d'information

## Certificats de mérite

Le sous-ministre adjoint (Matériel), M. R.D. Gillespie, a pris le temps, le 22 mai dernier, de présenter le certificat de mérite du SMA (Mat) à quatre membres de la DGGMM. Les récipiendaires, que l'on voit à l'avant-plan, sont : **Jaidev Mahajan** (DMGE 6), **Mme Deborah Lidster** (BP ASARN), **Jack Trudeau** (DMGE 2) et **Andrew Graham** (DSCN 2). À l'arrière-plan, M. Gillespie est flanqué à sa droite du chef — Génie et maintenance, le mgén W.R. Oldford, et à sa gauche du commodore M.T. Saker (DGGMM).  
(Photo BFC Ottawa par le cpl Bournival)



## SHINPADS : la prochaine génération

Le DSCN a lancé un appel d'offres pour la mise au point d'une interface indépendante du réseau entre le bus de données SHINPADS et tout ordinateur multiprocesseur VME standard. Grâce à un logiciel spécial en langage Ada, l'interface permettra l'intégration transparente des ordinateurs VME standard au réseau canadien SHINPADS.

La mise au point du noeud SHINPADS de la prochaine génération (tel est le nom de l'interface) constitue la première des trois étapes de développement du Projet de la prochaine génération de technologie de commandement et de contrôle. Les prochaines étapes porteront sur la mise au point d'une base de données réparties exploitée en temps réel et d'un système multitâche Ada.

## Examen d'une conception de la USN en rapport au traitement de l'effluent du système d'emménagement du carburant des navires TRUMP

En juin, des représentants du génie maritime canadien ont visité le service de protection environnementale du David Taylor Research Center à Annapolis, au Maryland. Au cours des dix dernières années, les laboratoires du centre David Taylor ont, conjointement avec la Johns Hopkins University, obtenu un succès considérable dans la conception de plaques parallèles permettant la séparation des eaux mazoutées.

Les ingénieurs canadiens (**Steve Dauphinee**, de l'UGN (A), **John Pirquet**, de l'UGN (P) et le lt (M) **Mike LeGoff**, alors du DMGE) ont passé quatre journées à examiner dans l'optique de la conception la question de l'utilisation de plaques parallèles afin de traiter le grand volume d'effluent déplacé par le ravitaillement en carburant des réservoirs à compensation d'eau des navires TRUMP.

La visite résultait directement de la réunion de l'OTAN de 1990 sur la réduction de la pollution créée par les navires. Au cours de cette réunion, la USN a offert de partager avec ses alliés de l'OTAN une bonne partie des fruits de ses vingt années de recherche et de développement dans le domaine de la protection de l'environnement.

## Présence navale au Québec

Le Conseil du Trésor a approuvé la phase de conception d'un projet visant la construction, à Pointe-à-Carcy, dans la ville de Québec, d'un important complexe de la Réserve navale.

Le projet, dont le coût s'élèvera à environ 36 millions de dollars, est l'activité vedette de la troisième phase du projet de la Présence navale au Québec (PNAQ III). Le complexe abritera la nouvelle École navale des Forces canadiennes Québec, le quartier général de la Réserve navale et la Division de la Réserve navale NCSM *Montcalm*.

Le coût de la phase de la conception du projet est estimé à quatre millions de dollars, et les appels d'offre seront lancés au cours de l'été. La mise en adjudication des travaux de construction est prévue pour l'été 1992.

## La conférence sur la surveillance de la condition de l'équipement est couronnée de succès.

Au dire de tous, la cinquième Conférence annuelle sur la surveillance de la condition de l'équipement (SCÉ), qui s'est tenue à Hull (Québec) en juin dernier, fut un succès extraordinaire. La participation a été bonne à la conférence de deux jours, qui comptait des exposés, une réunion d'affaires et une exposition continue de matériel de SCÉ.

L'exposition, qui s'ajoutait pour la première fois à la conférence, a permis aux délégués de voir une partie du matériel et des techniques de SCÉ utilisés ou en train d'être mis au point dans la marine. Des membres des équipes de projet du CETM, avec à leur tête le chef de la section de SCÉ du CETM, **M. Fumio Motomura**, ont démontré leur maîtrise du domaine dans leurs présentations sur

l'analyse des vibrations, la thermographie, la compilation de données, l'analyse de l'état du lubrifiant et du fluide de refroidissement, etc. L'exposition a aussi permis de montrer les derniers développements en SCÉ dans l'industrie canadienne et dans la USN.

La séance d'exposés comprenait des présentations de représentants de la Equipment Condition Assessment Cell de la USN (NAVSSSES, Philadelphie), du Centre d'essais techniques (Mer), du Directeur — Techniques de soutien aérospatial et du Directeur général — Génie maritime et maintenance.

Dans son discours-programme, le **commodore M.T. Saker** a souligné le besoin de générer des économies dans les opérations de soutien à la flotte sans causer de diminution inacceptable de la disponibilité des navires. Il a exhorté les délégués à tenir compte de la rentabilité de la SCÉ dans leurs délibérations. "Le MDN traverse une période financière difficile, a-t-il dit, et par conséquent toute chose, y compris la SCÉ, doit être mise en question".

Le thème de l'économie a été repris lors de la réunion d'affaires tenue la deuxième journée. Sous la direction du président de la conférence, le **commander Bob Gebbie** (DSGM 6), des participants du CETM, du QGDN, des UGN, des URN et d'autres unités ont traité de toute une gamme de "points d'exécution" relatifs à la SCÉ dans la marine canadienne.

Le **commander Gebbie** a ensuite déclaré à la *Revue* que l'objectif consistait à donner aux navires les outils dont ils ont besoin pour procéder à la SCÉ en tant qu'activité de maintenance de premier échelon. "Il s'agit là de notre plus grande priorité", a-t-il dit. Mais il n'a pas tardé à faire remarquer que les programmes et les techniques doivent faire la preuve de leur valeur au regard de la prévention des défaillances coûteuses des machines. "Dans quelle mesure la SCÉ permet-elle d'éviter des dépenses . . . voilà la question", a-t-il déclaré.



Le président de la conférence, le cdr Bob Gebbie, et le Directeur — Génie maritime (soutien), M. Bob Spittall, prêtent une grande attention aux explications de M. Fumio Motomura, du CETM. (Photo par le Icdr Steve Mozes)



**Opération Friction**  
*A paraître dans notre prochain numéro*