



Depuis 1982

Automne 2020

# Revue du Génie maritime

La Tribune du Génie maritime au Canada



## Focus

L'innovation se porte bien dans le milieu  
du soutien technique de la MRC



Nouvelles  
de l'AHTMC à  
l'intérieur!

Canada

# **Bravo zulu au Capitaine de vaisseau Routledge!**

*Une première pour la Branche technique navale de la MRC*



Le Capitaine de vaisseau Seana Routledge est devenue en juillet dernier la première femme officier technique de la marine à être promue à ce grade. Elle occupe actuellement le poste de gestionnaire de projet adjoint pour le Projet des navires de combat de surface canadiens à Ottawa et est membre du Conseil du génie maritime de la Branche. Surveillez son profil dans notre numéro d'hiver en décembre.



(Établie 1982)  
Automne 2020



**Directeur général**  
**Gestion du programme**  
**d'équipement maritime**  
Cmdre Lou Carosielli, CD

**Rédacteur en chef**  
Capv Sébastien Richard, CD  
Chef d'état-major du GPEM  
  
**MDR conseiller éditorial**  
PM 1 Gerald Doutre  
Chef d'unité de la DGGPEM  
  
PM 1 Monika Quillan  
DSPN 3-3-4, DGGPEM  
  
**Gestionnaire du projet**  
Ltv Youngjun Hwang  
  
**Directeur de la production**  
**et renseignements**  
Brian McCullough  
RGM.Soumissions@gmail.com

**Coréacteur**  
Tom Douglas  
  
**Conception graphique**  
**et production**  
d2k Graphisme & Web  
[www.d2k.ca](http://www.d2k.ca)  
Tel. (819) 771-5710

**Revue du Génie maritime**  
sur Canada.ca :  
<https://www.canada.ca/fr/ministere-defense-nationale/organisation/rapports-publications/revue-genie-maritime.html>

**Tous les numéros de la Revue**  
**sont disponibles en ligne sur**  
**le site Internet de l'Association**  
**de l'histoire technique de**  
**la Marine canadienne –**  
[www.cntha.ca](http://www.cntha.ca)

# Revue du Génie maritime

## Chronique du commodore

L'innovation est le moteur de nombreux aspects de notre entreprise  
de la gestion du matériel naval

par le *Commodore Lou Carosielli, CD* ..... 2

## Tribune

L'initiative « Marine numérique » de la Marine royale canadienne ..... 3

## Chronique spéciale

« GE sur mesure » – Concevoir une solution de guerre électronique modulaire pour la MRC  
par le *Capc Graham Hill, avec Stephan D'Aoust et Brad O'Quinn* ..... 5

Rendement du GPS des navires dans l'Arctique

par le *Ltv Kevin Hunt* ..... 12

Navigation sous-marine basée sur la gravité pour les missions des AUV sur de longues distances  
par le *Ltv Parth Pasnani et Dr Mae L. Seto* ..... 18

L'appui du Centre d'essais techniques (Mer) à l'innovation de la MRC dans le  
domaine des systèmes sans pilote – Activités du détachement d'Halifax :

*Chroniques par Siegfried Richardson-Prager, Dr Mae Seto, et Corey Venturini*

Partie 1 : Centre d'excellence sur les systèmes sans pilote du CETM ..... 22

Partie 2 : Modèle de développement avancé d'un système de contrôle  
maritime multidomaine (MMDCS) pour les systèmes sans pilote ..... 23

Partie 3 : Le CETM fait l'acquisition de systèmes sans pilote pour son projet  
de systèmes de contrôle maritime multidomaine (MMDCS) ..... 26

## Hot Spot of Invention

*Critique de livre de Brian McCullough* ..... 28

## Bulletins d'information

 ..... 29

## Nouvelles de l'AHTMC

Développement du SICM pour les frégates canadiennes de patrouille – Un projet d'affiche pour  
l'innovation de la MRC

par le *Capf (à la retraite) Peter MacGillivray, M.Sc., ing.* ..... 31



Pour sortir des sentiers battus, il faut parfois prendre des voies inexplorées.  
Reportez-vous à la page 5 pour savoir ce que le NCSM *Glace Bay*  
transportait à l'intérieur du conteneur maritime sur sa plage arrière.  
(Photo de la Marine royale canadienne)

La *Revue du Génie maritime* (ISSN 0713-0058) est une publication officieuse des Forces canadiennes, publiée par le Directeur général – Gestion du programme d'équipement maritime. Les opinions exprimées sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les politiques officielles. Le courrier et les demandes d'abonnement gratuit peuvent être adressés au Rédacteur en chef, La *Revue du Génie maritime*, DGGPEM, QGDN, 101, prom. Colonel By, Ottawa (Ontario) Canada, K1A 0K2. À moins d'avis contraire, les articles de cette revue peuvent être reproduits à condition d'en mentionner la source. Un exemplaire de l'article reproduit serait apprécié.



## CHRONIQUE DU COMMODORE

# L'innovation est le moteur de nombreux aspects de notre entreprise de la gestion du matériel naval

Par le commodore Lou Carosielli, CD

**A**yant pris mes fonctions de directeur général – Gestion du programme d'équipement maritime (DGGPEM) le 9 juillet, c'est avec beaucoup d'humilité que je suis les traces de mes prédécesseurs au DGGPEM. Les sept années que je viens de passer au Bureau de projet des navires de combat de surface canadiens – d'abord comme chef d'état-major, puis comme chef de projet adjoint, et enfin comme chef de projet – ont été extrêmement enrichissantes, tant sur le plan professionnel que personnel, et je suis très heureux qu'on me confie maintenant mes nouvelles responsabilités et fonctions de DGGPEM et d'ingénieur en chef de la Marine royale du Canada (MRC). En fait, c'est l'un de mes objectifs depuis que j'ai mis les pieds pour la première fois dans l'édifice Louis-Saint-Laurent après mon affectation initiale dans la région de la capitale nationale et la GPEM en 2002.

Comme il s'agit de ma première Chronique du commodore pour la *Revue*, j'aimerais prendre un moment pour rendre hommage au **Capv Sébastien Richard** pour son rendement exceptionnel à titre de DGGPEM par intérim au cours des sept mois précédent mon arrivée. Chargé de répondre aux besoins techniques de la MRC dans un environnement où les ressources sont très limitées, à la fois en termes de personnel et de financement, Séb a gardé une main ferme sur la barre alors qu'il s'occupait d'une myriade de questions et de priorités concurrentes, au moment même où le monde s'efforçait de s'adapter à une pandémie virale en évolution rapide. Son dévouement indéfectible et sa connaissance approfondie de l'entreprise de la GPEM lui ont permis de faire fonctionner les choses aussi harmonieusement qu'on aurait pu l'espérer, ce qui a très bien servi la Direction générale du sous-ministre adjoint (Matériels) et la MRC.

Qui aurait pu imaginer que nous commencerions une nouvelle décennie en faisant face à une pandémie mondiale? Certainement pas moi. Jusqu'à maintenant, l'année a été très intéressante, c'est le moins qu'on puisse dire, et l'entreprise de la gestion du matériel naval a très bien réagi aux difficultés liées à la COVID-19 en trouvant des façons sécuritaires et novatrices de continuer à fournir un soutien technique et essentiel à la flotte en service et



Photo du Cpl Jeff Smith

Le sous-ministre adjoint (Matériels) Troy Crosby (à gauche) participe à la nomination du Cmdre Lou Carosielli à titre de DGGPEM, au mois de juillet dernier.

aux grands projets d'immobilisations. Alors même que nous observions le retour doux-amer du NCSM *Fredericton* le 28 juillet, et que nous nous arrêtons pour nous souvenir de la vie des militaires qui ont péri le 29 avril, d'autres navires prenaient déjà de la vitesse pour continuer à respecter les engagements opérationnels de la MRC – le NCSM *Toronto* naviguait pour remplacer *Freddie* dans le cadre de l'opération Reassurance, le NCSM *Regina* et le NCSM *Winnipeg* se préparaient à rejoindre le RIMPAC 2020 au large d'Hawaï (17 au 31 août), et l'équipage du NCSM *Harry DeWolf* travaillait dur pour préparer la captivante et excitante livraison de notre premier navire de patrouille extracôtier et de l'Arctique le 31 juillet.

Qu'il s'agisse de développer et de mettre en place une nouvelle capacité technique pour la flotte ou de gérer nos ressources pour demeurer agile et répondre aux besoins actuels et prévus, c'est l'*Innovation* avec un « i » majuscule qui est la force motrice derrière presque tous les aspects de notre entreprise. À la fin de 2019, une nouvelle section de la gestion de la technologie du matériel naval a été créée à la GPEM pour coordonner l'introduction, l'adoption et la validation des futures possibilités et pratiques technologiques. L'équipe est à la recherche de façons novatrices de soutenir la flotte actuelle grâce aux technologies émergentes et à la gestion de l'intégration des systèmes humains, et elle est l'autorité technique pour tout ce qui a trait à l'*« Internet des objets »*, à la réalité augmentée, à l'informatique en nuage, aux interfaces

homme-machine, et la fabrication additive (impression 3D). L'équipe travaille en étroite collaboration avec les intervenants de la MRC pour s'assurer que nous réalisons l'initiative de la Marine numérique de la MRC, et nous pouvons nous attendre à en entendre davantage de leur part à mesure que notre entreprise progresse.

Cela fait quelques années que je n'ai pas joint les rangs de la GPEM, mais je crois que je vais bientôt trouver le rythme, surtout en travaillant avec une équipe aussi exceptionnelle. Personne ne peut dire pendant combien de temps nous devrons composer avec les répercussions de la COVID-19. Il est donc impératif que nous proposions

toutes nos meilleures idées pour améliorer nos opérations commerciales et soutenir pleinement les flottes actuelles et futures. Dans notre domaine normalement complexe de changement technologique rapide qui est devenu encore plus compliqué par une pandémie insidieuse, nous devons saisir toutes les occasions d'étudier les nouvelles technologies innovantes afin de tester les limites de ce que nous pouvons effectivement mettre en œuvre avec les ressources fiscales et humaines dont nous disposons.

Prenez soin de vous.



## TRIBUNE

### L'initiative « Marine numérique » de la Marine royale canadienne

(Avec des fichiers provenant des nouvelles de la Marine royale canadienne)

**L**a MRC a fait des progrès importants pour renforcer sa position d'avant-garde en matière d'innovation stratégique avec le déploiement de l'initiative Marine numérique en février dernier. L'initiative vise à doter tous les membres de l'équipe navale des outils et des capacités numériques dont ils ont besoin pour s'assurer que la MRC demeure une force pertinente et compétente, et répondre ainsi aux objectifs clés de la politique de défense du Canada, *Protection, Sécurité, Engagement*, et du *Plan stratégique 2017-2022* de la Marine royale canadienne.

Cette vaste initiative est conçue pour guider tous les secteurs de l'entreprise navale, depuis les fonctions de gestion des activités et des RH jusqu'aux opérations de première ligne et à la maintenance, vers une position plus mature sur le plan numérique qui simplifie les processus et soutient une culture inclusive acceptant l'incertitude et l'apprentissage par l'expérimentation.

Sous la direction du Directeur – Marine numérique, le capv et ingénieur naval Jacques Olivier, le Bureau de la Marine numérique gère tous les aspects programmatiques du *Plan d'action sur la Marine numérique*. Cet effort définit et décrit les initiatives numériques qui seront entreprises par la MRC au cours des deux prochaines années pour réaliser les ambitions et la vision énoncées dans *Marine numérique : Une stratégie pour adapter l'équipe de marine du Canada à l'ère numérique*. Les fonctions de base

comprennent l'harmonisation des programmes, l'amélioration des processus, les communications, l'entraînement, et la mesure du rendement. L'objectif est d'établir des mécanismes pour veiller à ce que la MRC ait une capacité continue à la fine pointe lui permettant de repérer les technologies numériques nouvelles et émergentes qui pourraient avoir le plus d'impact sur la Marine dans l'avenir.

Voici quelques-unes des technologies numériques modernes de pointe envisagées pour que la MRC maintienne une longueur d'avance sur le plan du numérique :

- l'informatique en nuage sécurisée et les technologies mobiles visant à garder les marins mieux connectés pendant leur déploiement et lorsqu'ils travaillent depuis leur domicile pendant la pandémie de COVID-19;
- les techniques d'informatique cognitive comme l'intelligence artificielle qui favorisent des améliorations dans l'analyse des données et les véhicules autonomes;
- l'automatisation des processus robotiques pour faciliter les processus administratifs répétitifs basés sur des règles;
- les technologies de réalité virtuelle et augmentée susceptibles d'améliorer la prestation de l'instruction et la façon dont la maintenance est effectuée à bord des navires;

(Suite à la page suivante...)



Photo de la MRC

L'initiative Marine numérique vise à doter tous les membres de l'équipe navale des outils et des capacités numériques dont ils ont besoin pour s'assurer que la MRC demeure une force pertinente et compétente.

- les techniques de fabrication additive comme l'impression 3D qui peuvent aider à améliorer la disponibilité de l'équipement;
- les technologies numériques jumelées pour optimiser l'exploitation et la maintenance de nos plateformes.

En juin 2019, la MRC a organisé une table ronde avec l'industrie et le milieu universitaire à Ottawa afin de discuter de l'ébauche de stratégie pour l'initiative Marine numérique et d'obtenir des commentaires à ce sujet. La participation à l'événement a dépassé les attentes, avec près de 100 participants, dont 65 représentants de près de 45 entreprises.

L'événement comprenait cinq séances en petits groupes où les participants ont eu l'occasion de discuter de la façon dont la MRC envisageait de tirer parti des technologies numériques dans les domaines du personnel, de la durabilité du matériel, de l'instruction individuelle et de l'éducation, de la préparation et de l'instruction collective, de la gestion des affaires et des communications. Les commentaires et les recommandations des participants se sont révélés très utiles pour façonner le document d'orientation sur la *Marine numérique*.

Pour commencer à exposer les membres de l'équipe navale aux méthodologies de conception innovatrices qui seront mises de l'avant lors de la mise en œuvre de l'initiative Marine numérique, un atelier sur les cas

d'utilisation du numérique a été tenu à Toronto en août 2019 avec une équipe de membres civils et militaires de l'Installation de maintenance de la Flotte (IMF) Cape Scott, de l'IMF Cape Breton, du Directeur – Personnel et instruction de la Marine, et de l'état-major de la Marine d'Ottawa. L'atelier a aidé très efficacement les participants à mieux comprendre le monde de la conception innovatrice du point de vue de l'expérience utilisateur.

Par exemple, une application mobile appelée l'appli MRC est en cours de développement dans le cadre de l'initiative Marine numérique afin de fournir aux marins un accès plus pratique à l'information et aux services administratifs auxquels ils ne pourraient normalement accéder qu'à partir du travail. Des groupes d'utilisateurs ont été mobilisés pour fournir des commentaires et des suggestions sur l'appli avant sa diffusion officielle.



#### **L'Initiative Marine numérique et le plan d'action qui l'accompagne sont disponibles en ligne à l'adresse suivante :**

[http://www.navy-marine.forces.gc.ca/fr/  
innovation/marine-numerique.page](http://www.navy-marine.forces.gc.ca/fr/innovation/marine-numerique.page)

## CHRONIQUE SPÉCIALE

# « GE sur mesure » – Concevoir une solution de guerre électronique modulaire pour la MRC

Par le Capc Graham Hill (CGEFC)  
avec la collaboration du Stephan D'Aoust (CNRC) et Brad O'Quinn (uOttawa)

**E**n tant qu'ingénieurs navals, nous avons la chance d'avoir accès à une multitude de postes et d'affectations. Même en excluant les postes hors secteur, je dirais que la variété des travaux d'ingénierie qui nous sont offerts dépasse largement les offres du secteur privé. Chaque affectation nous permet de contribuer à l'ensemble, qu'il s'agisse de débuter la phase d'analyse des options pour une nouvelle génératrice diesel ou de travailler en collaboration avec un entrepreneur principal pour déployer un nouveau micrologiciel sur une radio définie par logiciel. Ce qui est rare, c'est la possibilité de concevoir non seulement un élément, mais une solution complète en moins d'un an. C'est ce que j'ai récemment réussi à faire dans mon poste actuel au Centre de guerre électronique des Forces canadiennes (CGEFC) à Ottawa.

### Aperçu du CGEFC

Le CGEFC est en quelque sorte une entité inconnue au sein du MDN et des FAC, une grande partie de notre mission comportant des travaux d'analyse classifiés. En tant que seul officier du génie des systèmes de combat naval (GSCN) de l'unité, et à titre de responsable du service de collecte et de certification (C&C), je me suis demandé ce que l'unité avait accompli auparavant et en quoi elle était différente du Centre de guerre électronique navale (CGEN) dont j'avais entendu vaguement parler alors que je terminais mon programme de formation de la phase VI.

Le CGEFC est le centre d'excellence au sein du MDN et des FAC pour la guerre électronique (GE) et le renseignement électronique non fondé sur les communications (ELINT). Nous sommes à Shirley's Bay, dans l'ouest d'Ottawa. Notre quartier général est relié au Groupe des opérations d'information des Forces canadiennes (GOIFC) basé à la Station des Forces canadiennes Leitrim. Nous sommes véritablement une unité interarmées avec plus de 17 métiers militaires différents qui travaillent à l'atteinte d'un objectif commun : appuyer les opérations des FAC. Nos activités vont de la prestation de renseignements et d'ordres de bataille de GE à nos partenaires du « Groupe des cinq » et aux frégates déployées de la MRC à la prestation de services opérationnels, d'essai et d'évaluation (EEO) pour tous les éléments des FAC. Nous participons à des opérations de GE au besoin.



Illustrations courtoisie des auteurs.

Figure 1. Le mât de GE dans sa position étendue et déployée.

J'ai un certain soutien de la part de l'entreprise et je dispose d'une petite équipe dotée de capacités de pointe qui est chargée d'examiner nos besoins futurs, de trouver des solutions novatrices et de les mettre en œuvre à l'aide d'une expertise externe.

Les concepts d'ingénierie modulaire des navires ont fait l'objet de longues discussions, mais peu de mesures ont été prises au sein de la Marine royale canadienne (MRC) à ce jour. En fin de compte, une carrière comptant de nombreux contacts en ingénierie, une expérience en tant que gestionnaire de projet au sein de la DGGPEM et chef de service à bord d'un navire, ainsi que de très nombreux rappels sur l'importance de l'assurance du matériel naval au fil des ans allaient se révéler essentiels dans cette réussite technique.

## GE sur mesure – Conception

Lorsque je suis arrivé au CGEFC en juillet 2018, mon poste n'avait pas été doté depuis plus de six mois, mais j'ai eu la chance d'hériter d'une équipe militaire d'expérience, dont la plupart des membres avaient travaillé dans le domaine de la GE plus longtemps que le cycle d'affectation traditionnel. Le chef de service par intérim avait également pris la sage décision de réduire les activités au cours de ces six mois pour se concentrer sur une mise à jour des capacités. Bon nombre de nos capteurs pour les mesures de soutien électronique (MSE) et l'équipement de test prenaient de l'âge et avec la publication de la politique de défense du Canada de 2017 (Protection, Sécurité, Engagement), la GE a soudainement dû regagner une partie de son statut datant de la guerre froide face à l'évolution du paysage géopolitique mondial.

Grâce à certains efforts d'approvisionnement de mon prédécesseur, j'ai hérité de matériel de pointe, y compris un système de récepteur numérique ELINT/ESM ES-5080 de L3Harris, un support pour antenne rigide et deux nouveaux (toujours dans leur emballage!) véhicules pour équipement spécial / conteneurs maritimes militarisés prêtés par le 21<sup>e</sup> Régiment de guerre électronique à Kingston. Bien que l'intention de ces mises à niveau des capacités était de renforcer nos services de soutien EEO, certains d'entre nous au CGEFC avons commencé à envisager une avenue vers les opérations sur le terrain. Collaborer avec la Marine semblait être la bonne voie à suivre. Depuis des années, les navires de défense côtière déplacent avec succès des véhicules pour équipement spécial (VES) pour obtenir des installations supplémentaires et de meilleures charges sous-marines, et de nouvelles plateformes comme le navire de patrouille extracôtier et de l'Arctique et le navire de soutien interarmées ont été conçues de façon à permettre l'arrimage de charges modulaires sur le pont d'envol. Du point de vue tactique à celui stratégique, l'idée de concevoir un ensemble de soutien de GE, ou « GE sur mesure » (Figure 1 et voir l'image couverture) pour les plateformes navales était tout à fait logique.

Le CGEFC a en fait des liens de longue date avec la MRC. Bien qu'il s'agisse d'une unité du Groupe de gestion de l'information dont la chaîne de commandement est actuellement dominée par les officiers du génie électronique des signaux et des communications (CELE), la nomenclature de notre organisation est entièrement basée sur la marine, le commandant de l'unité a été pendant longtemps un officier de guerre navale, et le métier dominant au niveau du rang est celui d'opérateur de détecteur électronique naval. En outre, le CGEFC n'avait jamais mené

d'exercice avec la MRC, mais la situation était sur le point de changer, car les nouveaux équipements ayant attiré mon attention semblaient être destinés à une utilisation en mer.

## Travail de développement initial

Après avoir obtenu le feu vert de la chaîne de commandement en novembre 2018, j'ai rapidement préparé une proposition pour la MRC afin de miser sur le processus d'évaluation maritime (MarEval). La MarEval se concentrerait principalement sur la capacité de survie du VES et de son équipement de GE connexe dans le domaine maritime; tout autre objectif tel qu'un premier essai pour le nouveau système de GE ES-5080 aurait une importance secondaire.

Les premières réunions avec la division des non-combattants (NC) de la DGGPEM et avec la direction des besoins de la Marine (DBM) se sont révélées extrêmement fructueuses. Notre solution a effectivement été envisagée comme non intrusive pour le navire, ce qui signifie qu'aucune modification technique ne serait requise. De plus, comme nous finançons nous-même le projet, mis à part utiliser les navires de la Marine pour nous transporter, a également facilité le processus. En discutant avec du personnel des Forces maritimes de l'Atlantique (FMAR(A)) chargés de l'évaluation maritime, nous en sommes venus à la conclusion que la meilleure solution serait d'embarquer à bord du navire de défense côtière NCSM *Glace Bay* (MM-701) pendant l'exercice maritime multinational conjoint Cutlass Fury 19 au large des côtes de la Nouvelle-Écosse et de Terre-Neuve en septembre 2019.

Je dois admettre qu'en dépit de mes hypothèses initiales selon lesquelles peu ou pas d'analyses techniques seraient nécessaires pour mettre au point la solution de GE sur mesure, la LCdr Cynthia Caborn de la division des NC m'a mis sur la bonne voie afin qu'une analyse technique plus approfondie de notre proposition soit entreprise. Le fait d'avoir de l'équipement en mer et de s'assurer de sa capacité de survie est une tâche très difficile. La planification de la sécurité de mon équipe est devenue une priorité pendant la période des fêtes 2018-2019.

En janvier 2019, je me suis donc rendu au bureau de l'architecture navale au sein de la Direction des plateformes navales (DSPN) 2 à la GPEM. Bien qu'on m'ait informé que le contrat de services professionnels pour la modélisation de la structure des navires était actuellement en cours, la conversation m'a rappelé que j'avais récemment renouvelé un protocole d'entente sur la fabrication entre le CGEFC et le Conseil national de recherches du Canada (CNRC). Et, par pur hasard, j'ai découvert que le CNRC avait une expertise

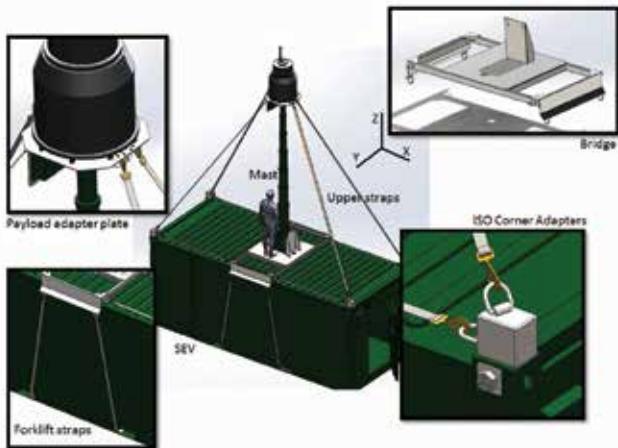


Figure 2. Conception finale.

en modélisation structurelle et en conception de la rigueur d'ingénierie recherchée. Même si je ne le savais pas à ce moment-là, ils avaient été les auteurs principaux d'une étude de 2003 commandée par Recherche et développement pour la défense Canada qui examinait les forces de l'état de la mer sur un NDC en mer. Il s'agissait même de la plateforme que la MRC nous avait donnée pour déployer la « GE sur mesure ».

Les exigences fournies au CNRC étaient simples et peu nombreuses, notamment :

- L'installation doit pouvoir résister à l'état de la mer 4 lorsqu'elle est déployée (mât étendu);
- L'installation doit pouvoir résister à l'état de la mer 6 lorsqu'elle est arrimée (mât imbriqué);
- Le conteneur maritime ne doit pas être modifié de quelque façon que ce soit, et le système de soutien doit être amovible;
- Le système complet doit être livré d'ici le 16 août 2019.

Comme nous appartenons tous deux au gouvernement, je n'étais pas aussi préoccupé que je le serais normalement lorsque je fais appel à un entrepreneur du secteur privé. Il est difficile de décrire tout ce que le CGEFC et mon équipe doivent au personnel professionnel et compétent du CNRC avec lequel nous avons collaboré dans le cadre de cette tâche d'ingénierie. Sans l'équipe d'experts de **Stephan D'Aoust** et son ingénieur adjoint, **Brad O'Quinn** de l'Université d'Ottawa, cette MarEval et la démonstration d'équipement modulaire n'auraient jamais pu s'effectuer en mer. La prochaine section, rédigée par Stephan et Brad, illustre à quel point leur contribution technique était détaillée.

## Résumé des travaux de conception\*

\*Tiré de la publication du Conseil national de recherches, « Methodology for Designing an MCDV Antenna Support System » par Stephan D'Aoust et Brad O'Quinn, 14 avril 2020. Le document complet est disponible en ligne à : <https://tinyurl.com/y3nxuav7>

Après avoir visité le CGEFC et pris des mesures exactes de ses composantes à l'aide d'un scanner Handyscan 700 3D de Creaform, nous avons proposé une conception comprenant trois éléments principaux : une passerelle qui peut être installée sur le VES pour soutenir le mât, quatre adaptateurs d'angle ISO pour permettre l'ancrage des courroies et une plaque d'adaptation de la charge utile qui permet d'installer l'antenne et le module de distribution des radiofréquences (RFD) sur le mât et qui offre des points pour fixer les haubans (Figure 2). Nous étions d'avis que ce concept limiterait au mieux les degrés de liberté du système et pourrait être facilement fabriqué. Avec ce concept, nous avons procédé à une analyse des forces maximales et des couples auxquels les composants seraient soumis en mer, puis nous avons choisi les matériaux appropriés. Les principaux outils logiciels utilisés pour l'analyse étaient Solidworks (pour la modélisation 3D et les dessins) et ANSYS (pour l'analyse des éléments finis des contraintes internes, ainsi que pour calculer les fréquences naturelles).

Les conditions de conception imposées au système de support d'antenne ont été dérivées des conditions dans lesquelles l'antenne serait déployée ou imbriquée (selon l'état de la mer) et des approximations de l'angle de roulis maximal dans ces conditions. Ces conditions ont pris en compte les pires scénarios pour les états imbriqués et déployés – jusqu'à l'état de la mer 4 (SS4) déployé, et l'état de la mer 6 (SS6) imbriqué, avec un roulis maximal de 25° et 40° respectivement. L'angle de roulis était le principal mouvement pris en compte dans ces calculs, car l'accélération autour de l'axe de roulis (produit de l'angle de roulis maximal) est plus grande que celle de l'axe de tangage. Un tableau de l'état de la mer fourni par le MDN (Figure 3) indique la période de vagues aux divers états, ainsi que la vitesse du vent.

Nous avons ensuite calculé les forces primaires qui agiraient sur la conception – celles dues à l'accélération inertielle du mouvement de bascule, et celles dues à la traînée du vent.

(Suite à la page suivante...)

En outre, les hypothèses clés suivantes (de nature prudente pour calculer le pire scénario) ont été formulées :

1. On suppose un mouvement harmonique simple, qui modélise le comportement du navire de manière à avoir un mouvement périodique lorsque la force de rétablissement est directement proportionnelle au déplacement, et agit dans la direction opposée à celle du déplacement;
2. Les rafales de vent sont considérées comme perpendiculaires au mât, même pendant les situations de roulis extrêmes;
3. Le centre de gravité du navire a été abaissé jusqu'à la ligne de flottaison;
4. Le support rigide supplémentaire sur la base n'a pas été pris en compte dans l'analyse, mais il aurait renforcé davantage le mât;
5. Pour tous les calculs des sangles, on suppose que chaque ensemble de sangles (horizontale, supérieure et chariot élévateur à fourche) agit de façon indépendante pendant le fonctionnement, alors qu'en réalité, ils permettraient tous d'équilibrer les forces.

Le couple de traînée total pour l'antenne et le mât dans les deux états de la mer a été calculé et se trouve dans le tableau suivant :

**Tableau 1 : Couples de traînée créés autour de la base du mât**

Composant	État de la mer 4	État de la mer 6
<b>Antenne</b>	<b>162,57 lbf*ft</b>	<b>226,33 lbf*ft</b>
<b>Mât</b>	<b>124,22 lbf*ft</b>	<b>36,77 lbf*ft</b>
<b>Couple total de traînée =</b>	<b>286,79 lbf*ft</b>	<b>263,10 lbf*ft</b>

Le couple est simplement la force multipliée par le bras du levier, lequel varie entre SS4 et SS6 lorsque le mât est abaissé. Bien que seul le couple *total* autour de la base est pertinent (qui comprend à la fois les forces de traînée et d'inertie), il est intéressant de noter que lorsque le mât est imbriqué, il perd 80 % de sa hauteur, ce qui réduit considérablement le bras de levier connexe, mais aussi le profil du vent. Le tableau 1 montre que les couples de traînée totaux sont comparables dans tous les états de la mer, malgré le fait que la vitesse du vent ait plus que doublée. Bien que les couples associés à l'antenne soient supérieurs à SS6, le couple total du système est supérieur à SS4 parce que la force de traînée est influencée par la section transversale. Lorsque le mât est imbriqué, cette zone diminue considérablement, de sorte que l'incidence de la vitesse du vent est considérablement réduite.

#### STANAG 4194

#### TABLE D-1 – NATO SEA STATE NUMERAL TABLE FOR THE OPEN OCEAN NORTH ATLANTIC

Sea State Number	Significant Wave Height (m)		Sustained Wind Speed (knots) *		Percentage Probability of Sea State	Modal Wave Period (sec)	
	Range	Mean	Range	Mean		Range **	Most Probable ***
0 - 1	0 - 0.1	0.05	0 - 6	3	0.70	-	-
2	0.1 - 0.5	0.3	7 - 10	8.5	6.80	3.3 - 12.8	7.5
3	0.5 - 1.25	0.88	11 - 16	13.5	23.70	5.0 - 14.8	7.5
4	1.25 - 2.5	1.88	17 - 21	19	27.80	6.1 - 15.2	8.8
5	2.5 - 4	3.25	22 - 27	24.5	20.64	8.3 - 15.5	9.7
6	4 - 6	5	28 - 47	37.5	13.15	9.8 - 16.2	12.4
7	6 - 9	7.5	48 - 55	51.5	6.05	11.8 - 18.5	15.0
8	9 - 14	11.5	56 - 63	59.5	1.11	14.2 - 18.6	16.4
> 8	> 14	>14	>63	>63	0.05	18.0 - 23.7	20.0

\* Ambient wind sustained at 19.5 m above surface to generate full-developed seas. To convert to another altitude,  $H_2$ , apply  $V_2 = V_1(H_2/19.5)^{1/7}$

\*\* Minimum is 5 percentile and maximum is 95 percentile for periods given wave height range.

\*\*\* Based on periods associated with central frequencies included in Hindcast Climatology.

REVISED MARCH 1964

Figure 3. Tableau de l'état de la mer montrant les périodes de vagues et la vitesse du vent.

Les couples inertIELS autour de la base ont été calculés et présentés dans le tableau 2 :

**Tableau 2 : Couples inertIELS créés autour de la base du mât**

Composant	État de la mer 4	État de la mer 6
Antenne	1 833,94 lbf*ft	480,83 lbf*ft
Mât	1 016,17 lbf*ft	252,02 lbf*ft
Couple inertiel total =	2 850,12 lbf*ft	732,85 lbf*ft

Les forces inertIELLES résultent de l'accélération (ou de la décélération) de la masse de l'antenne et du mât, qui dans ce cas-ci découle de l'accélération angulaire du navire qui tourne autour de son axe. On peut clairement voir que la composante inertIELLE des couples est beaucoup plus importante que le couple des forces de traînée, même si les forces de traînée doivent toujours être prises en compte, car elles ne sont pas négligeables. Il convient également de noter que, comme il a été mentionné précédemment, les conditions de l'état de la mer 4 produisent un couple beaucoup plus grand autour de la base – presque exclusivement parce que le mât est déployé dans ces conditions, ce qui donne un bras de levier beaucoup plus long sur lequel les forces peuvent agir. Il est également intéressant de noter que la périodicité de SS6 (délai plus grand entre les vagues) réduit les accélérations inertIELLES malgré un angle de roulis de 15° supérieur.

Le couple total du système correspond simplement aux couples de traînée et d'inertie combinés, comme le montre le tableau 3 :

**Tableau 3 : Couple total à la base du mât**

Composant	État de la mer 4	État de la mer 6
Antenne	1 997 lbf*ft	707 lbf*ft
Mât	1 140 lbf*ft	289 lbf*ft
Couple total =	T <sub>T-SS4</sub> = 3 137 lbf*ft	T <sub>T-SS6</sub> = 996 lbf*ft

Une fois ces valeurs de couple établies, nous avons déterminé la tension maximale sur les sangles de support fixées à la plaque d'antenne, car elles réduiront les contraintes sur le mât et sa base, et les dirigeront vers les

angles ISO. Les angles ISO auraient au moins, selon un ordre de grandeur, plus de force que tout autre élément du système. En utilisant la géométrie connue du système (longueur unitaire des sangles lorsqu'elles sont déployées), les forces résultantes dans les sangles du système ont été calculées dans le tableau 4 :

**Tableau 4 : Forces dans les sangles du système**

Composant	État de la mer 4	État de la mer 6
Sangles de support supérieures (haubans)	541 lbf	416 lbf
Sangles de support de chariot élévateur	394 lbf	320 lbf
Sangles de support horizontales	160 lbf	197 lbf

D'après les constatations, on peut voir que les courroies de support supérieures (haubans) subiront les charges de traction les plus importantes, à 541 lbf environ. Cette charge se produit pendant SS4, ce qui était prévu, car le mât allongé génère beaucoup plus de couple que ce que les deux sangles seules (dans le scénario de conception) peuvent supporter. On a ensuite appliqué une prétension à cette valeur, ainsi qu'un facteur de sécurité approprié, pour déterminer la résistance requise des sangles. Étant donné qu'il a été démontré que la tension de sangle la plus élevée était de 541 lb, les sangles Kinedyne Rhino ont été choisies, car elles ont une charge d'utilisation de 3 335 lb, ce qui donne un facteur de sécurité six fois plus élevé. Ces courroies sont peu coûteuses et durables, et les numéros de pièces personnalisés de Kinedyne permettent de les commander aux longueurs requises avec des configurations finales adaptées à la géométrie de conception.

Enfin, la méthode des éléments finis a été utilisée pour analyser le modèle afin de confirmer quels matériaux et quels modèles devraient être choisis pour la passerelle (acier) et le support de charge utile (aluminium), en fonction des charges exercées en raison des diverses forces et couples (provenant de la masse du système et de la traction locale des sangles). La méthode des éléments finis a également été utilisée pour déterminer les contraintes des matériaux et effectuer une analyse modale, confirmant que la géométrie du système proposé et les choix des matériaux absorbent et dissipent correctement toutes les forces dans SS4 et SS6. À titre de

vérification finale, le fabricant d'équipement d'origine du mât a confirmé que le mât fonctionnerait comme prévu compte tenu de nos vecteurs et charges prévus.

L'analyse des contraintes sur la passerelle a montré que la contrainte maximale est inférieure à 2 kilolivres par pouce carré (ksi), bien en deçà de notre limite d'élasticité conventionnelle de l'acier qui est de 44 ksi. Ce résultat supposait que les haubans étaient en place, mais la passerelle a été conçue pour résister au pire scénario où de multiples défaillances se produisent. De même, la contrainte maximale de la plateforme de charge utile était inférieure à 4 ksi, bien en deçà des 35 ksi attribués à l'aluminium 6061-T6. Compte tenu de la nature quelque peu insensible à la masse de cette exigence, la conception a été surdimensionnée pour tenir compte des cas extrêmes avec le moins d'inconvénients.

Avec tous les calculs et modèles ci-dessus, la conception a été certifiée et remise à la division de la fabrication du CNRC aux fins de production.

## Essais d'acceptation

Pour ceux d'entre vous qui souhaitent examiner plus à fond les calculs, le document complet de Stephan et Brad vaut la peine d'être lu.

Une fois les étapes de la proposition, de l'ingénierie de conception et de la fabrication de la solution de montage de notre mât rigide terminées, l'équipe du CGEFC a élaboré une maquette pour notre prochaine mission ici même sur le campus de Shirley's Bay. Même si cela dépassait la portée de l'entente, le CNRC a participé et même procédé à certaines modifications structurelles finales sur place. La conception finale répondait exactement à nos exigences initiales. La braie du mât et la plateforme n'ont pas modifié le VES de quelque façon que ce soit (ce qui aurait annulé la certification en matière de levage). L'ensemble était facile à assembler et à installer une fois monté sur le VES. En ce qui concerne la résistance aux moments en mer, tous les modèles indiquaient que la conception dépassait nos exigences opérationnelles. Cela nous a permis de poursuivre l'exercice avec confiance envers la solution modulaire produite par le CNRC.

Il n'a pas encore été question des préparatifs nécessaires pour intégrer le VES au navire. Les VES sont transportés à bord des NDC depuis des années, mais la mise en place des services d'hébergement à bord du *Glace Bay* n'a pas été facile. Il a fallu des mois de coordination avec le Capc Steve Morrell,

officier technique du Cinquième groupe des opérations maritimes (MOG 5), et son personnel. Mon équipe pouvait aussi compter sur le Sergent Brent Parks, spécialiste des VES, qui avait reçu une formation polyvalente sur une myriade de plateformes de l'armée en tant que technicien en électro-optique. Chaque équipe a apporté un soutien inestimable; elle a fourni des renseignements sur les connexions électriques, la conversion de l'alimentation du navire aux besoins en alimentation du VES, la fixation de la nacelle au pont de dragage du NDC, l'imperméabilisation et la prévention de la corrosion. De plus, le MOG 5 a fait plus que ce qu'il fallait pour s'assurer que l'équipement de levage lourd et le personnel étaient disponibles pour aider au levage final tout au long du mois de septembre.

## Résultats du déploiement

Notre participation à l'exercice Cutlass Fury 19 à bord du NCSM *Glace Bay*, du 9 au 18 septembre, a été un franc succès, même si mon équipe et moi avons gardé notre souffle pendant les 24 premières heures, alors que nous relevions et abaissions le mât de GE dans des conditions près de SS4. Nous avons atteint notre principal objectif, qui était de pouvoir faire fonctionner notre « GE sur mesure » dans le domaine maritime, l'équipement était conforme à toutes les spécifications et ce fut une expérience fantastique de retourner dans un environnement opérationnel. L'intérieur du VES a prouvé que l'environnement de travail était parfait et lors de l'inspection au retour au CGEFC, nous avons trouvé peu d'indications d'infiltration d'eau ou de corrosion. Les discussions que nous avons eues avec l'Unité de plongée de la Flotte (Atlantique) avant notre déploiement nous ont permis d'en apprendre davantage sur l'importance d'un nettoyage complet après le déploiement. Deux jours avant le début prévu de l'opération Cutlass Fury, la tempête post-tropicale Dorian s'approchait de Halifax. Plus d'une douzaine de navires ont pris la mer pour laisser la tempête passer dans des eaux plus abritées. Cet événement météorologique nous a donné une occasion imprévue de voir le comportement des câbles et des sangles dans des vents de plus de 160 km/h. Heureusement, tout a bien résisté.

L'équipage du *Glace Bay* a fait preuve d'une très grande hospitalité car ceux d'entre nous qui n'étions jamais montés à bord d'un navire par le passé avons découvert si nous avions le pied marin. Nous nous sommes fait un point d'honneur d'offrir des visites guidées du VES à quiconque s'y intéressait et l'équipage a fait la même chose en nous faisant visiter le navire. Je n'avais jamais moi-même navigué sur un NDC par le passé et j'en suis ressorti très impressionné par le

professionnalisme et le courage de l'équipage, y compris en découvrant le type de missions qui leur avaient été assignées dans les mois précédent notre embarquement.

## Conclusion

Suite au succès de cette MarEval, la charge utile modulaire de GE du CGEFC est prête à être utilisée sur plusieurs classes de navires. Les solutions modulaires présentent pour la MRC un ensemble de technologies rentables et configurables qui ne feront qu'augmenter la valeur stratégique au fur et à mesure que les délais pour les nouvelles classes de navires s'allongeront. Les systèmes des navires actuels de la classe Halifax exigent de plus en plus d'investissements au plan national pour maintenir un niveau de préparation élevé.

## Remerciements

De nombreuses équipes et personnes qui n'ont pas encore été mentionnées ont participé à cette initiative. Le Capc Mark Bartek (DSPN 2) et le Capc Tony Carter (BP NSI) m'ont donné un cours intensif sur l'architecture navale et l'analyse de conception, et m'ont vraiment mis sur la bonne voie pour faire participer le CNRC. Le Capt Richard Gardiner et le Lt Sean MacKinney, qui ont dirigé le service C et C jusqu'à mon arrivée, ont été les forces motrices derrière l'acquisition de toutes les nouvelles technologies regroupées dans le démonstrateur MarEval « GE sur mesure ». Je ne peux donc pas m'attribuer tout le mérite de cette idée, ni des mois d'efforts qu'ils ont consacrés au sein du groupe GI pour convaincre les hauts gradés de l'importance de la GE pour les FC à l'avenir. Le Lcol Charles Kerber, ancien commandant du CGEFC, a également apporté un soutien extraordinaire, notamment en engageant des fonds pour la conception, et il a grandement appuyé l'expansion des capacités de première ligne du CGEFC.



*Le Capc Graham Hill est actuellement chef de sous-section de la navigation et GP MCH-FELEX au DGGPEM. Il était l'officier chargé de la collection et de la certification au CGEFC lorsque l'ébauche de cet article a été rédigée et il était l'un des deux ingénieurs navals employés au sein du GGIFC. Le poste d'officier de C et C est étroitement lié à celui d'officier responsable du Centre de guerre électronique navale (également un ingénieur du GSNC), qui est également situé sur le campus de*



Photo d'équipe : De gauche à droite : Capc Graham Hill, PM 2 John Taylor (NCSM *Trinity*), Sgt Shaun Bradley (CGEFC), Mat 1 Felicia Amyot (CGEFC), Alb. Jennifer Ringor (NCSM *Trinity*), Mat 2 Bryce Williams (CGEFC), Capt Viktor Vazhalo (CGEFC) et Sgt Brent Parks (CGEFC)

*Shirley's Bay, à proximité du complexe Carling du QGDN. Son intention initiale était de présenter les renseignements ci-dessus au séminaire technique naval des FMAR(A) de 2020 qui a été annulé en raison de la pandémie de COVID-19.*



Stephan D'Aoust est ingénieur mécanique auprès du Conseil national de recherches depuis près de 20 ans. Au cours de cette période, une grande partie de son travail a été au service du MDN, où il a conçu de l'équipement basé sur des véhicules et travaillé à l'intégration des systèmes.



Brad O'Quinn est titulaire d'un baccalauréat en génie mécanique de l'Université d'Ottawa et a fait un stage de travail coopératif au CNRC pendant ce projet.

**CHRONIQUE SPÉCIALE****Rendement du GPS des navires dans l'Arctique**

Par le Ltv Kevin Hunt



NCSM Montréal, Opération Nanook 2017

Photo par Mat 1 Dan Bard

**L**es idées fausses courantes concernant le rendement du système de positionnement mondial (GPS) à latitude élevée comprennent les lacunes de couverture dans les régions polaires et la précision du positionnement qui est indépendante de la latitude. En réalité, le GPS offre une couverture mondiale, mais la précision du positionnement varie selon les changements de latitude, particulièrement aux latitudes élevées. Par conséquent, le rendement du GPS risque d'être dégradé dans l'Arctique. Si le Canada veut être un chef de file dans les opérations dans l'Arctique, nous devons comprendre non seulement comment naviguer en toute sécurité dans l'Arctique, mais aussi comment les systèmes de nos navires fonctionnent à latitude élevée.

Cet article traite des défis de la navigation par satellite à latitude élevée et de la façon dont le rendement des GPS est perturbé dans l'Arctique. Bien que les données présentées mettent en évidence les changements dans la précision du positionnement avec les changements de latitude, le changement total dans la précision du positionnement horizontal à latitude élevée est négligeable. L'impact sur la sécurité de la navigation et la performance des systèmes de combat est négligeable. Pour l'ensemble de cet article, la latitude basse est définie comme  $0^{\circ}\text{N} \leq x < 60^{\circ}\text{N}$  et la latitude élevée est définie comme  $60^{\circ}\text{N} \leq x \leq 90^{\circ}\text{N}$ .

### Le système de positionnement mondial

Le système mondial de navigation par satellite (GNSS) est le terme utilisé pour désigner les systèmes de navigation par satellite, où le positionnement tridimensionnel est estimé par la multilatération à pseudo-distance. Le système NAVSTAR (GPS) américain, le système GLONASS russe,

le système Galileo européen et le système BeiDou chinois sont tous des exemples de GNSS, chacun fournissant un nombre illimité d'utilisateurs avec des données de positionnement géospatial toutes saisons.

Chaque satellite GPS émet continuellement un signal de synchronisation précis dans le cadre de son message de données de navigation sur deux fréquences ( $\text{L1} = 1575,42\text{ MHz}$  et  $\text{L2} = 1227,60\text{ MHz}$ ). Sont également incluses les données sur les éphémérides propres aux satellites et les données sur l'almanach propres à la constellation. Un récepteur suit le temps de retour (TOA) de chaque signal et, en fonction du temps d'émission du signal à partir du satellite, calcule la durée de trajet (DDT). La portée instantanée de chaque satellite est appelée pseudo-distance, puisque la DDT est perturbée par un certain nombre de facteurs environnementaux, d'erreurs et de biais qui entraînent une erreur de positionnement. Le récepteur utilise les mesures de pseudo-distance et les données de l'almanach pour estimer sa position par rapport à la constellation, qui est transmise à l'utilisateur dans le système de coordonnées géodésiques (latitude, longitude et altitude).

La précision du positionnement du GPS est influencée à la fois par la géométrie instantanée du satellite par rapport au récepteur et par les erreurs de télémétrie cumulatives connues collectivement sous le nom d'« erreur sur la mesure de la distance récepteur-satellite » (UERE).

Premièrement, étant donné que les mesures de pseudo-distance prises à partir de satellites situés à des endroits semblables amplifient la synchronisation, une variété de relèvements et d'élévations de satellites est préférable pour la diversité géométrique. Un minimum

de quatre satellites est requis pour le positionnement tridimensionnel, les satellites à haute altitude permettent de résoudre l'ambiguïté liée à l'altitude. Les récepteurs modernes ont suffisamment de canaux pour surveiller tous les satellites à la vue, ce qui donne une précision de positionnement égale ou supérieure à celle des quatre meilleurs satellites. Les mesures supplémentaires de pseudo-distance fournissent une redondance et permettent la détection et l'exclusion des défaillances, où le récepteur identifie les erreurs de synchronisation et ne tient pas compte des signaux hors tolérance. La géométrie relative du satellite est quantifiée par la dilution de la précision (DOP), où la DOP géométrique (GDOP), la DOP de position (PDOP), la DOP verticale (VDOP), la DOP de temps (TDOP) et la DOP horizontale (HDOP) sont des représentations sans unité de la façon dont l'estimation de position est diluée sur des coordonnées particulières. Si la ligne de visée entre le récepteur et chaque satellite forme un tétraèdre dans le ciel, comme le montre la figure 1, un plus grand tétraèdre avec une diversité géométrique conduit à une DOP plus petite et plus favorable pour une meilleure précision de positionnement tridimensionnel.

Deuxièmement, les erreurs de télémétrie et les biais dégradent également la précision de la mesure. Mise à part les erreurs liées aux horloges de satellite et aux éphémérides, que le département de la Défense des États-Unis s'efforce constamment de minimiser, la source d'erreur la plus importante est l'erreur ionosphérique. Les autres sources d'erreur comprennent l'erreur troposphérique, l'erreur multi-canal, les erreurs liées au récepteur, à l'utilisateur, aux conditions météorologiques et à la scintillation ionosphérique. L'estimation de la position d'un récepteur est affinée en tenant compte du plus grand nombre possible de ces erreurs au moyen de modèles et d'algorithmes de correction des erreurs.

Dans l'ensemble, l'inexactitude du positionnement GPS peut être définie comme suit :

$$\text{Positioning Error} = (\text{DOP}) \cdot (\text{UEREs})$$

La combinaison du mouvement des satellites et de la variation des erreurs de télémétrie donnent lieu à des fluctuations continues des erreurs de positionnement qui sont toujours présentes dans le positionnement du GPS. À latitude élevée, le changement de perspective de la constellation du GPS, ainsi que des UERE plus importantes, pourraient accroître davantage l'erreur de positionnement du GPS. Par conséquent, ces facteurs méritent d'être examinés pour assurer la sécurité de la navigation dans l'Arctique.

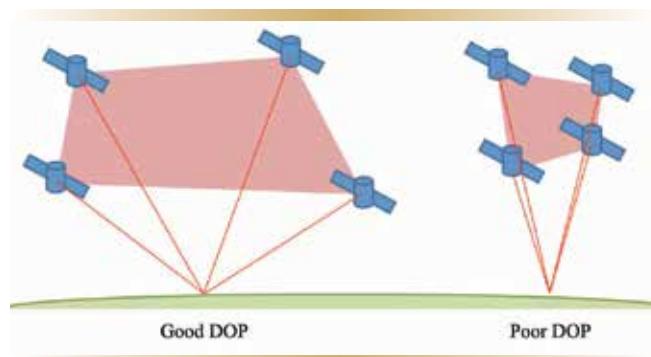


Figure 1. Un volume tétraédrique plus important provenant de divers relèvements et élévations de satellites améliore la précision du positionnement tridimensionnel.

## Précision du positionnement GPS dans l'Arctique

Le positionnement du GNSS à latitude élevée est remis en question par trois facteurs, à savoir la géométrie non idéale des satellites, l'augmentation des UERE et la réduction de la redondance des satellites. Chacun de ces facteurs sera examiné afin d'analyser comment la précision de positionnement des navires est perturbée dans l'Arctique.

Premièrement, la constellation GPS a été conçue de manière à ce que quatre satellites demeurent visibles dans la plupart des régions de la Terre, même si un certain nombre de satellites tombent en panne. Une inclinaison orbitale de 55° concentre la couverture sur les régions tempérées, où les utilisateurs directement sous les trajectoires orbitales des satellites reçoivent une couverture optimale d'une diffusion homogène et des satellites au zénith. Par conséquent, aucun satellite GPS ne passe au zénith au nord du 55°N de latitude. Malgré cette limitation, la haute altitude orbitale des satellites assure leur visibilité continue, même au pôle Nord. Toutefois, pour un récepteur situé au nord du 55°N, les satellites GPS apparaissent plus bas à l'horizon à mesure que la latitude augmente, ce qui donne une géométrie non idéale.

Au pôle Nord, le satellite GPS le plus élevé n'apparaît qu'à environ 45° au-dessus de l'horizon. Bien que les satellites demeurent visibles, l'équation de l'erreur de positionnement indique que cette géométrie relative modifiée devrait avoir une incidence sur l'erreur de positionnement du GPS pour les récepteurs à latitude élevée. Le résultat de la façon dont les changements de latitude perturbent la DOP est illustré à la figure 2. Ces données ont été recueillies à partir d'un logiciel de simulation GPS, pris le long de la longitude du 94°W

choisie au hasard à des intervalles de 10 minutes, et la moyenne a été établie sur une période de 24 heures, en supposant que tous les satellites GPS sont fonctionnels et qu'il y a une limite d'élévation de 10°.

Les changements de la DOP à latitude élevée sont dus à un manque de satellites au zénith, et apparaissent plus bas à l'horizon à mesure que la latitude augmente. Ce changement de la géométrie relative des satellites nuit à la précision de l'altitude, comme en témoigne l'augmentation de la VDOP, et donc de la PDOP et de la GDOP. Cette perte de précision d'altitude est la principale préoccupation des utilisateurs du GPS à latitude élevée. Toutefois, le positionnement du navire est strictement lié à la HDOP, qui quantifie l'erreur de positionnement bidimensionnel sur l'eau.

Comme les navires ne se préoccupent pas des estimations d'altitude, il n'est pas nécessaire d'avoir un satellite au zénith pour affiner la DOP sur l'axe z. La géométrie des satellites apparaissant plus bas à l'horizon à mesure que la latitude augmente au-delà du 55°N est en fait favorable au positionnement bidimensionnel, et donc au positionnement des navires dans l'Arctique. La cohérence relative des HDOP à toutes les latitudes signifie que, en ce qui concerne la géométrie non idéale des satellites à latitude élevée, les navires ne seront pas désavantagés dans l'Arctique.

Le deuxième facteur qui remet en question le positionnement du GNSS aux latitudes élevées est l'augmentation des UERE, principalement le retard et la scintillation ionosphériques. Les angles d'élévation inférieurs des satellites causent des bruits et une réfraction ionosphérique plus élevée qui augmentent l'erreur de positionnement. Les processus différentiels ne peuvent pas annuler l'erreur ionosphérique puisque l'ionosphère perturbe tous les signaux satellites. La scintillation est le résultat d'irrégularités ionosphériques accrues et parfois imprévisibles, qui se produisent principalement dans la région polaire. On sait que la scintillation nuit à toutes les communications par satellite, dégrade la qualité du signal et empêche le verrouillage. Ainsi, la scintillation menace davantage la continuité de la couverture GPS que l'intégrité du positionnement. Malheureusement, les récepteurs ne peuvent pas compenser les interférences variables et les erreurs erratiques qui découlent de la scintillation, ce qui peut même mener à des pannes intermittentes du GPS où la DOP est si élevée qu'une estimation de position est inutilisable.

Enfin, les récepteurs à latitude élevée ne bénéficient pas des avantages des satellites à vue redondants. Bien qu'il y ait toujours quatre satellites visibles, il y a parfois moins de satellites visibles par rapport à la basse latitude, et

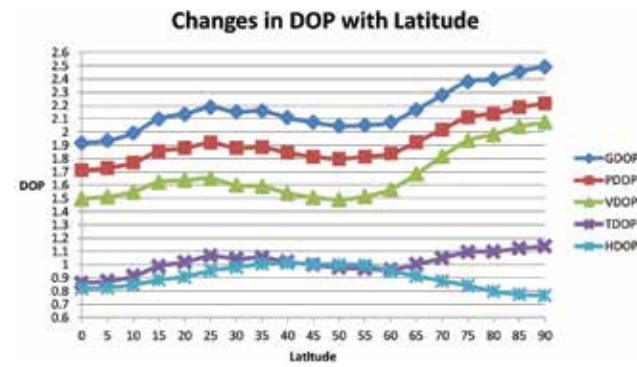


Figure 2. Changements dans GDOP, PDOP, VDOP, TDOP et HDOP en raison de changements de latitude.

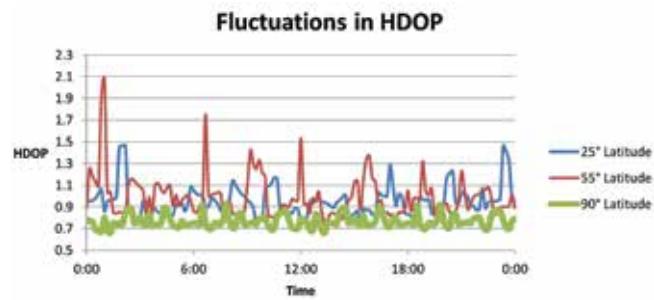


Figure 3. Fluctuations de la HDOP à différentes latitudes.

donc moins de capacité pour un récepteur de ne pas tenir compte de certains signaux satellites avec des erreurs de synchronisation connues. De plus, les récepteurs dans l'Arctique sont plus vulnérables aux lacunes de couverture en cas de panne d'un certain nombre de satellites GPS individuels – bien que la panne serait de courte durée jusqu'à ce que d'autres satellites apparaissent à l'horizon.

En fin de compte, le changement de la géométrie relative des satellites à latitude élevée est légèrement favorable au positionnement horizontal. Toutefois, un retard ionosphérique accru et une scintillation imprévisible peuvent entraîner des valeurs HDOP élevées à latitude élevée, ce qui entraîne une diminution de la précision du positionnement, voire des pannes du GPS. Les récepteurs à fréquence unique non augmentés sont considérés comme chanceux de pouvoir estimer continuellement leur position à moins de 10 mètres de leur position réelle à basse latitude. En raison de l'augmentation des UERE aux latitudes élevées, les récepteurs à fréquence unique ont connu des erreurs de positionnement horizontal de 15 mètres dans l'Arctique, et des erreurs de positionnement vertical allant jusqu'à 75 mètres.

## Effet de la latitude élevée sur les navires de la MRC

Les récepteurs à double fréquence équipés à bord des navires et sous-marins de la MRC, qui déchiffrent également le code de précision et de sécurité sur la fréquence L1, améliorent la précision du positionnement et offrent également une résistance au brouillage du GPS. Les récepteurs à double fréquence calculent la différence entre le TOA des fréquences L1 et L2, affinant ainsi la mesure de pseudo-distance du satellite en éliminant les retards ionosphériques de premier ordre. Cette utilisation d'une seconde fréquence compense l'erreur ionosphérique standard qui se produit à basse latitude, ainsi que l'augmentation de l'erreur ionosphérique qui se produit à latitude élevée à partir d'angles d'élévation inférieurs des satellites.

À basse latitude, les récepteurs GPS à deux fréquences sont capables d'une précision de positionnement horizontal inférieure à un mètre, selon des sources non classifiées. Néanmoins, les navires sont régulièrement soumis à des HDOP instables qui ont une incidence limitée sur la sécurité de la navigation. La figure 3 illustre les fluctuations de la HDOP d'un récepteur à trois latitudes différentes ( $25^{\circ}\text{N}$ ,  $55^{\circ}\text{N}$  et  $90^{\circ}\text{N}$ ) sur la même période de 24 heures et dans les mêmes conditions que la figure 2.

Les données présentées à la figure 3 montrent non seulement une diminution de la HDOP moyen à latitude élevée, mais aussi une diminution de la variation de la HDOP à latitude élevée. Par conséquent, les navires qui naviguent à latitude élevée connaîtront moins de fluctuations dans la HDOP que ceux qui naviguent à basse latitude.

Comme la HDOP est relativement peu touchée par les changements de latitude, et comme les récepteurs à double fréquence éliminent le délai ionosphérique accru à latitude élevée, les navires de la MRC connaîtront des différences négligeables dans la précision de positionnement du GPS entre les latitudes basse et élevée. Toutefois, des interruptions intermittentes de la HDOP et du GPS peuvent encore se produire en raison des effets de la scintillation. Si la scintillation nuisait à la précision du positionnement du GPS, tous les utilisateurs finaux du GPS à bord seraient soumis à la même dégradation du positionnement; toutefois, l'impact sur la sécurité de la navigation et le rendement des systèmes de combat est négligeable. Voici quelques exemples.

Utilisé par les personnes de quart à la passerelle pour la planification des itinéraires et la navigation sécuritaire, le système embarqué intégré de navigation et d'affichage des

données (SHINNADS) reçoit continuellement la position du GPS. Si les effets des hautes latitudes augmentent la HDOP au-delà d'un seuil établi, l'opérateur du SHINNADS est immédiatement alerté. Les valeurs élevées de la HDOP indiquent une réduction de la précision du positionnement horizontal, ainsi qu'une vitesse calculée par GPS qui est extrapolée à partir des mesures de position séquentielles. En cas de doute sur la position du GPS, l'estimation de la position peut être vérifiée par triangulation ou télémétrie radar. Cependant, la navigation traditionnelle par cartes est encore plus compliquée dans l'Arctique en raison d'un manque d'infrastructure, d'une mauvaise cartographie, de conditions météorologiques difficiles et de l'absence de définition du paysage. Dans des conditions de panne du GPS, le SHINNADS signale que la connectivité du GPS est perdue et l'opérateur doit modifier la source de la position pour assurer une navigation sécuritaire. Toutefois, lorsque la connectivité GPS est rétablie, des sauts en position du SHINNADS peuvent se produire en raison du changement de la source de positionnement.

Le système d'identification automatique (SIA) diffuse et reçoit continuellement des renseignements sur les navires et les voyages à des fins de connaissance de la situation. Dans des conditions GPS dégradées, non seulement le SIA diffusera sa propre position inexacte, mais il recevra également la position inexacte des autres navires puisque le système est à la merci des récepteurs GPS des autres navires. Heureusement, toute inexactitude de position dans le positionnement GPS du navire et des autres navires en raison des UERE est faible par rapport aux distances de sécurité normalement maintenues entre les navires.

Grâce à leur processus de filtrage Kalman, les deux systèmes de navigation à inertie des bâtiments (SINS) maintiennent des estimations de position indépendantes. Toutefois, les systèmes de navigation à inertie ne sont pas conçus pour être des systèmes de positionnement absolu. Les estimations de la position du SINS sont affinées à partir d'entrées externes, y compris la vitesse et la position du GPS pour les réinitialisations et pour étalonner les dérives du gyroscope. Par conséquent, toutes les données de positionnement du GPS dégradées sont soumises au SINS. Dans le cas peu probable où la connectivité du GPS serait interrompue ou complètement perdue, le SINS peut fournir une estimation ininterrompue de la position du navire basée sur des calculs. Cependant, le positionnement du SINS n'est pas aussi précis que celui du GPS en raison de son étalonnage et de l'accumulation inhérente d'erreurs au fil du temps; sans aucune entrée GPS, la précision du SINS se dégradera encore

plus avec le temps. Il est à noter que le SINS lui-même est sujet à une erreur accrue à latitude élevée puisque l'erreur du système approche de l'infini à mesure que le navire s'approche du pôle. Afin d'assurer le fonctionnement continu à latitude élevée, le SINS est entré dans un autre système de coordonnées entre 85° N et 90° N de latitude.

En ce qui concerne les systèmes d'armes, le système avancé de contrôle des armes Harpoon reçoit un flux de données GPS direct pour la programmation de l'information de vol du missile Block II, avec un flux secondaire provenant du système de gestion de combat. Toute augmentation des erreurs de télémétrie et de synchronisation à latitude élevée, ainsi que le risque accru de pannes du GPS, pourraient avoir une incidence négative sur les performances des missiles de croisière (y compris le Harpoon Block II) s'ils naviguent par des points de cheminement GPS préétablis. Si la vitesse du GPS est remplacée par la vitesse du journal de bord dans le cadre de la solution de conduite de tir, toute inexactitude dans la position et la vitesse en raison de la latitude élevée ne serait qu'un facteur mineur dans la précision de tir du canon principal.

Enfin, l'horloge du GPS aide à maintenir la synchronisation des systèmes du navire. Bien que le serveur d'horloge de bord suive le passage de chaque seconde, le GPS précise l'heure qu'il est. Si la connectivité au GPS est perdue, le serveur d'horloge est référencé pour le passage du temps et le rendement des systèmes embarqués et des communications sera alors basé sur la qualité de la synchronisation de tous les systèmes. Lorsque la connectivité GPS est rétablie, des transitoires et des sauts de temps peuvent se produire si le réseau du navire et le temps GPS ont un delta important.

## **Amélioration de la précision du positionnement GPS dans l'Arctique**

Même si les effets de la latitude élevée sur le GPS ne compromettent pas la sécurité de la navigation des navires de la MRC dans l'Arctique, il y a tout de même lieu d'améliorer la précision du positionnement du GPS à latitude élevée. La recherche scientifique, les levés, le forage et les opérations d'UAV ne sont que quelques exemples des applications qui reposent sur un positionnement GPS de haute précision et d'exactitude élevée dans l'Arctique. Les navires équipés de récepteurs à fréquence unique seront également désavantagés par les effets des angles d'élévation inférieurs des satellites, et seront donc sujets à des erreurs de positionnement plus importantes à latitude élevée. Par conséquent, des méthodes visant à améliorer la précision de la navigation par satellite à latitude élevée font l'objet

de recherches puisque la dégradation de la précision du positionnement concerne non seulement la sécurité de la navigation, mais aussi la sécurité nationale.

La solution la plus pratique pour accroître la précision du positionnement à latitude élevée est d'augmenter les fréquences de transmission par satellite. Comme le montre le rendement accru des récepteurs à double fréquence, les fréquences multiples réduisent l'effet de l'erreur ionosphérique sur la précision du positionnement, améliorant ainsi l'estimation de position sans avoir besoin de matériel utilisateur supplémentaire.

Les satellites GPS en orbite polaire assureront une couverture aérienne à latitude élevée, ce qui améliorera la VDOP. Grâce à son inclinaison orbitale supérieure de 64,8° pour couvrir le nord de la Russie, GLONASS offre une plus grande précision de positionnement dans l'Arctique que le GPS. Cependant, les satellites GPS en orbites alternatives ne sont pas rentables, car la plupart des utilisateurs se trouvent à des latitudes plus basses, et leur déplacement réduirait également l'uniformité de la constellation GPS. Un certain nombre d'initiatives, y compris le GPS à haute intégrité, examinent l'aspect pratique de l'utilisation de satellites non GPS dans des orbites à forte inclinaison pour augmenter la couverture GPS, et ainsi réduire les temps d'acquisition et la DOP, particulièrement à latitude élevée.

Le GPS différentiel (DGPS) augmente la précision du positionnement au moyen de signaux de correction d'erreurs; toutefois, la couverture du DGPS est limitée par son réseau d'infrastructures terrestres qui, au moment de la rédaction du présent document, ne s'étend pas dans l'Arctique. Bien que l'extension de l'infrastructure du DGPS dans l'Arctique favoriserait un positionnement précis pour les navires militaires et commerciaux, la nature éloignée de l'Arctique rend les solutions différencielles spatiales plus pratiques. Les systèmes de renforcement satellitaire (SBAS) fournissent un positionnement GNSS accru avec d'autres satellites; toutefois, le système de renforcement à couverture étendue (WAAS) propre à l'Amérique du Nord ne s'étend pas entièrement dans l'Arctique, ce qui entraîne un écart de couverture polaire. Les services de renforcement sur orbites à forte inclinaison favoriseraient une navigation de haute intégrité à latitude élevée non seulement pour les utilisateurs maritimes, mais aussi pour les ressources aériennes. Toutefois, ces solutions spatiales sont encore assujetties à des erreurs ionosphériques et à la scintillation. À mesure que l'Arctique devient plus accessible, les balises saisonnières DGPS à terre et les

UAV à grande endurance pourraient fournir des solutions à court terme pour accroître la couverture de positionnement grâce à la diffusion de corrections d'erreurs dans des régions précises, et ne seraient pas assujettis aux mêmes erreurs que les solutions spatiales.

En ce qui concerne les récepteurs, des recherches continues sur l'atmosphère et la modélisation de la propagation des signaux à latitude élevée pourraient aider les récepteurs à mieux identifier et compenser les erreurs de synchronisation, réduisant ainsi au minimum les erreurs de positionnement. S'ils ne sont pas équipés de récepteurs à double fréquence, les navires civils sont désavantagés à latitude élevée, puisqu'ils sont assujettis au bruit plus élevé des angles d'élévation inférieurs du satellite. Les récepteurs compatibles avec de multiples systèmes GNSS permettent d'améliorer l'intégrité du positionnement non seulement à latitude élevée, mais partout dans le monde. L'utilisation de GNSS complémentaire avec des satellites dans différentes orbites permet de réduire la DOP dans le monde entier et d'optimiser ainsi la précision du positionnement. Cependant, à l'instar des solutions différentielles, tous les signaux émis par les systèmes spatiaux complémentaires sont perturbés par les erreurs ionosphériques et à la scintillation. De plus, chaque service de GNSS et de renforcement fonctionne à des fréquences uniques, suscitant de nouvelles préoccupations en matière de logistique et de sécurité nationale, en particulier pour les ressources militaires.

À bord des navires, il existe peu de stratégies pour améliorer la précision du positionnement GPS. Il est préférable que les antennes GPS soient montées de façon à ce qu'elles aient une vue dégagée du ciel sur tous les caps, et que les réflexions multicanaux et les interférences électromagnétiques soient minimisées. Il faut également éviter la formation de glace sur l'antenne. Il est également recommandé de fixer les antennes GPS le plus près possible du centre de gravité du navire afin d'éviter la perte de verrouillage du signal causée par les accélérations d'antenne dans tout état mesurable de la mer. Enfin, il faut faire preuve de prudence lorsqu'on utilise des GPS portatifs dans l'Arctique, car le froid peut nuire à leur performance.

## Conclusion

Même si la constellation GPS n'est pas optimisée pour la couverture polaire, son rendement à latitude élevée demeure adéquat pour le positionnement horizontal. Dans le cas des récepteurs à double fréquence, les angles d'élévation inférieurs du satellite à latitude élevée ne compromettront pas la sécurité de la navigation. La combinaison de la capacité à

deux fréquences et des SINS redondants signifie que les navires de la MRC sont idéalement équipés pour la navigation à latitude élevée. Toutefois, le risque élevé de panne du GPS à latitude élevée obligera à se fier davantage à d'autres équipements de navigation et à d'autres pratiques de navigation dans l'Arctique, y compris le SINS.

La recherche universitaire se poursuit sur le rendement du GNSS à latitude élevée afin de bien comprendre les effets et d'élaborer des méthodes pour réduire au minimum les erreurs de positionnement. Pour tirer parti de l'analyse du rendement des systèmes de combat à latitude élevée, d'autres recherches peuvent être axées sur les défis des communications externes et de la guerre sous-marine dans l'Arctique.

## Remerciements

L'auteur tient à remercier les experts en la matière de l'Installation de maintenance de la flotte Cape Scott qui ont apporté leur expertise et leur opinion au présent article.



*Le Lt Kevin Hunt est officier adjoint du génie des systèmes de combat à l'Installation de maintenance de la flotte Cape Scott à Halifax, et avant cela, il était ingénieur des systèmes de combat à bord du NCSM Windsor (SSK-877). Il détient deux maîtrises en sciences spatiales et en aéronautique, et effectue des recherches sur la couverture GPS à latitude élevée pour le guidage et la navigation des UAV.*

## Références

- Ministère finlandais des Transports et des Communications. (9 janvier 2020). Challenges in Arctic navigation and geospatial data. Extrait de [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161989/LVM\\_2020\\_1.pdf](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161989/LVM_2020_1.pdf)
- Jensen, A.B.O. (octobre 2010). Challenges for positioning and navigation in the Arctic. Extrait de <https://mycoordinates.org/challenges-for-positioning-and-navigation-in-the-arctic/>
- Conseil national de recherches du Canada. (2011). National Security Implications of Climate Change for US Naval Forces. Washington, DC: The National Academic Press. doi: 10.17226/12914

**CHRONIQUE SPÉCIALE****Navigation sous-marine basée sur la gravité pour les missions des AUV sur de longues distances**

Par le Ltv Parth Pasnani et Dr Mae L. Seto  
Illustrations courtoisie des auteurs.

**L**'édition du printemps 2019 de la *Revue du Génie maritime* (RGM 89) présentait un aperçu des véhicules sous-marins autonomes (AUV) et de leur pertinence pour le contexte militaire. Pour que ces véhicules robotisés soient utilisés de manière efficace, leur localisation et leur navigation sous l'eau doivent atteindre une précision respectant les seuils de tolérance acceptables, ce qui représente un défi étant donné les limites physiques de l'environnement dans lequel ils sont déployés. Comme les signaux GPS s'atténuent rapidement avec la profondeur de l'eau, d'autres méthodes doivent être utilisées.

Cet article présente brièvement les trois principales méthodes de navigation des AUV actuellement utilisées — inertielles, par base et géophysique (c.-à-d. basée sur le terrain) — et, bien qu'elles aient chacune leurs propres forces, elles présentent des lacunes qui limitent leur utilisation au-delà des opérations sur de courtes distances. Cependant, les recherches récentes sur la navigation sous-marine *basée sur la gravité* que j'ai présentées dans le cadre de ma thèse de maîtrise plus tôt cette année offrent des résultats prometteurs en ce qui concerne la fiabilité de la localisation de position et de la navigation sur une longue distance des AUV, ces facteurs étant importants pour tirer pleinement parti des capacités uniques d'un AUV.

**Navigation inertielle**

Un système de navigation inertuelle (INS) embarqué améliore l'estimation de la position simple d'un AUV (basée sur le cap enregistré au compas et la vitesse enregistrée par diagraphie acoustique Doppler) en intégrant les données des capteurs de mouvement des accéléromètres et des gyroscopes. Cependant, même les estimations de position du système INS subiront une dérive [1] en raison des petites erreurs de mesure qui s'accumulent avec le temps. Les meilleurs systèmes de navigation inertuelle présentent une dérive d'environ 0,1 pour cent de la distance parcourue, tandis que les unités à bas prix présentent une dérive de 2 à 5 pour cent de la distance parcourue. Pour de meilleurs résultats, un INS doit être utilisé de concert avec d'autres



Figure 1. Les AUVs travaillant sous la glace ou à des grandes profondeurs comptent sur un système de navigation inertuelle, mais n'ont pas accès aux informations d'un système GPS afin de corriger les petites erreurs de dérive du système INS.

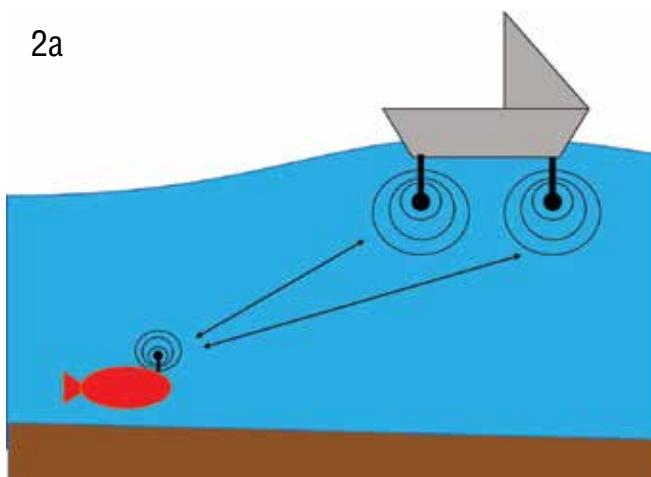
paramètres de navigation comme le GPS lorsque l'AUV est à la surface, mais cela peut être problématique si l'AUV est utilisé sous la glace ou à une grande profondeur (figure 1).

**Navigation par base (balises acoustiques)**

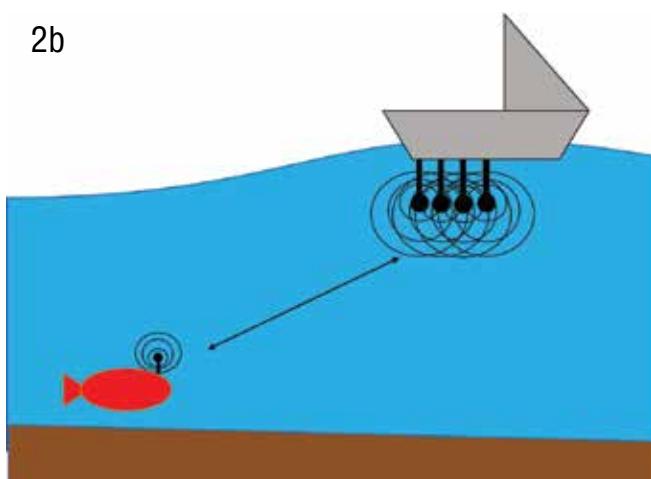
Les systèmes de navigation par base utilisent des balises sous-marines espacées avec émetteurs-récepteurs acoustiques et modems pour effectuer des mesures de durée de trajet (ToF) vers un AUV, en utilisant une vitesse acoustique présumée dans l'eau. La localisation de la position est semblable à celle du GPS en ce sens qu'elle utilise la trilateration — les mesures de durée de trajet entre le véhicule sous-marin et les balises acoustiques déterminent la distance de l'AUV par rapport à chaque balise, et donnent ainsi sa position par rapport à toutes les balises.

Il existe trois méthodes de navigation par base : La *base courte* (SBL – figure 2a) place les émetteurs-récepteurs à l'avant et à l'arrière sur la coque d'un navire pour trianguler et localiser l'AUV par rapport au navire, qui à son tour connaît sa position selon le GPS ou par d'autres moyens. Avec une *base ultra-courte* (USBL – figure 2b),

2a



2b



2c

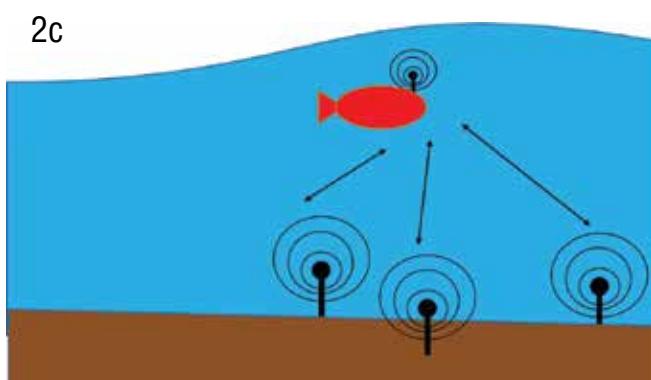


Figure 2. Les méthodes par base pour la localisation et la navigation des AUV exigent que le véhicule demeure dans la portée de communication des émetteurs-récepteurs : a) base courte (SBL); b) base ultra-courte (USBL) et c) base longue (LBL).

l'emplacement de l'AUV est déterminé par la durée de trajet et la différence de phase sur un réseau d'émetteurs-récepteurs le long de la coque du navire. L'inconvénient de ces deux méthodes réside dans le fait que l'AUV doit demeurer à portée de communication du navire, ce qui limite évidemment les missions qu'il peut accomplir. Avec la méthode SBL, la précision de la position dépend de la longueur de la ligne de base (ou du navire). Les bases SBL et USBL conviennent mieux aux applications où les AUV opèrent dans une petite zone comme un barrage ou un lac. En revanche, la *base longue* (LBL – figure 2c) utilise des balises flottantes très espacées sur une grande superficie pour déterminer de façon acoustique les distances par rapport au AUV et ainsi déterminer son emplacement. Comparativement aux balises amarrées, l'installation de balises directement sur le fond marin augmenterait la précision du relevé de position en éliminant toute dérive causée par les courants sous-marins.

Les méthodes de navigation par base demeurent un moyen fiable d'obtenir une localisation précise, mais leurs principaux inconvénients sont le coût et le temps requis pour assurer le soutien de l'AUV avec un navire ou des bouées, et l'autonomie limitée de l'AUV. Par conséquent, elles ne constituent pas une solution pour la navigation à longue distance des AUV.

### Navigation basée sur le terrain

Les systèmes de navigation géophysique ou basée sur le terrain (TBN) utilisent des capteurs sonars, optiques, magnétiques et basés sur la gravité pour effectuer la localisation au moyen des caractéristiques environnementales. Tous les systèmes TBN posent cependant un défi qui consiste à identifier et à classifier les caractéristiques de l'environnement, puis à être en mesure de les acquérir de nouveau plus tard. Plus la qualité et le nombre de caractéristiques dans l'environnement sont élevés, plus le système TBN est performant. Les recherches récentes ont porté plus particulièrement sur les méthodes de détection géophysique en raison de leur potentiel de permettre la navigation et la localisation à grande distance sous l'eau, surtout lorsqu'elles sont utilisées conjointement avec un système de navigation inertiel.

Les systèmes **sonars** sont capables d'identifier et de classer acoustiquement les caractéristiques environnementales en tant que points de repère de navigation, et de cartographier ainsi la structure du fond marin. Les sonars d'imagerie, comme le balayage latéral, insonifient le fond marin et mesurent l'intensité des retours acoustiques pour constituer une image

du fond marin. Les sonars de télémétrie utilisent des réseaux de transducteurs qui transmettent les ondes acoustiques, puis traitent les retours par une mise en faisceaux afin d'obtenir les distances permettant de produire des cartes bathymétriques qui pourraient être utilisées pour la navigation basée sur les caractéristiques. Toutefois, en raison des fréquences élevées qu'ils utilisent, ils ne sont habituellement pas utilisés pour la navigation à grande distance.

Un inconvénient des sonars est leur transmission active du son et de l'énergie dans l'environnement. Les AUV naviguant en collaboration pourraient interférer les uns avec les autres, perturber le milieu marin avoisinant, et augmenter de façon générale le niveau de bruit acoustique ambiant. Les chercheurs ont donc concentré leur attention sur d'autres méthodes de localisation et de navigation basées sur le terrain.

Les systèmes de navigation *optiques*, ou basés sur la vision, utilisent des caméras stéréo pour estimer la distance des caractéristiques par la mesure de la parallaxe ou l'appariement stéréo, et n'injectent pas beaucoup d'énergie dans l'environnement. Bien que ces systèmes soient largement utilisés avec des robots terrestres et aériens, leur portée sous l'eau est limitée en raison d'un éclairage et d'une diffusion de la lumière inadéquats. Néanmoins, ils conviennent bien dans les situations où l'AUV est très près de sa cible, comme cela a été démontré à l'aide d'un algorithme spécial de localisation et de cartographie simultanées (SLAM) en association avec l'information de navigation inertuelle embarquée lors d'un levé en eau profonde du *RMS Titanic*[2].

Les instruments de détection de champ *magnétique* peuvent également être utilisés par les AUV pour la localisation à courte distance, mais ils sont moins appropriés pour la navigation à longue distance en raison du mouvement constant des pôles magnétiques de la Terre. Étant donné que les cartes magnétiques mondiales ne reflètent pas nécessairement l'état réel actuel d'une zone particulière, des recherches récentes se sont concentrées sur l'exploitation des perturbations magnétiques locales à proximité du fond marin pour la navigation et la cartographie[3]. L'un des désavantages de la navigation basée sur le champ magnétique est sa susceptibilité aux interférences causées par les propres émissions électromagnétiques des AUV.

La localisation par *gravité* semble toutefois plus prometteuse pour la navigation à longue distance, surtout lorsqu'elle est utilisée pour soutenir un système de navigation inertuelle embarqué.

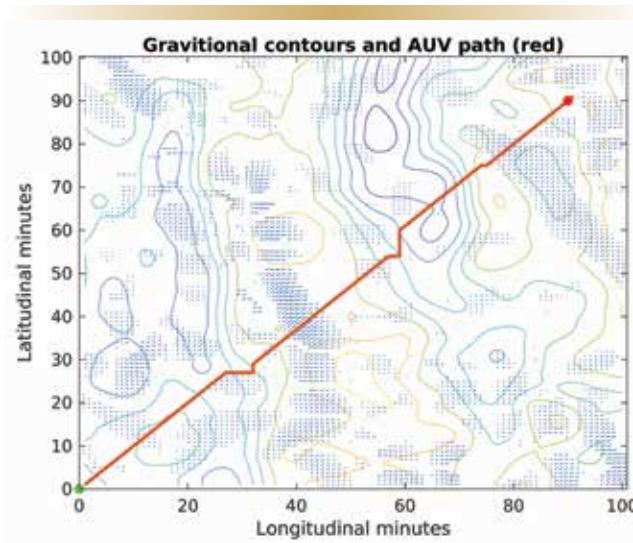


Figure 3. La recherche indique qu'il est préférable qu'un AUV suive une route riche en informations avec des points de mesure de gravité intermédiaires distincts (ligne rouge), plutôt que d'essayer d'atteindre son objectif en ligne droite.

Carte des gradients de gravité reproduite avec la permission du Scripps Institution of Oceanography

## Navigation basée sur la gravité

Contrairement au champ magnétique de la Terre, le champ de gravité de notre planète est stable et persistant. La Scripps Institution of Oceanography de La Jolla, en Californie, une division de l'université de Californie à San Diego, compile des cartes de gravité mondiales accessibles au public avec une résolution spatiale d'un mille marin carré. Motivées par les relevés de structures tectoniques et la recherche sur le changement climatique, ces cartes peuvent être utilisées pour évaluer les algorithmes de localisation basés sur la gravité[5], qui à leur tour ont inspiré mon propre projet de maîtrise sur la localisation à l'aide de capteurs basés sur la gravité, comme les gravimètres, avec des techniques de navigation modernes. Dans le cadre de ma thèse, j'ai démontré, au moyen de simulations, que la navigation sous-marine à grande distance au moyen de mesures basées sur la gravité (comme aide à la navigation inertuelle) était effectivement faisable[7].

Comme mentionné précédemment, la navigation inertuelle est à la fine pointe de la technologie et peut être précise avec une erreur de dérive de 0,1 pour cent pour la distance parcourue. Après un mille marin (1,8 km) de déplacement, l'erreur n'est que de 1,8 mètre, ce qui est acceptable, mais l'erreur de dérive continuera d'augmenter à mesure que l'AUV poursuivra sa mission. Cependant, si l'AUV pouvait obtenir un relevé de

position basé sur la gravité tous les 1,8 km, l'erreur de localisation pourrait être considérablement réduite. Les mesures du gravimètre sont des points de mesure comportant leur propre erreur ( $\sim 5$  mgal), donc même si l'AUV se déplace sans erreur de dérive de l'INS, il pourrait ne pas trouver le point de mesure de gravité particulier ciblé s'il se trouve dans une zone de valeurs gravitationnelles similaires. Pour utiliser les mesures du gravimètre pour la localisation et la navigation, l'AUV pourrait donc devoir effectuer une recherche à l'aide d'un gradiomètre qui mesure la vitesse du changement dans le vecteur d'accélération de la gravité de manière à pouvoir identifier plus facilement un repère de gravité et ainsi s'orienter.

L'un des objectifs de ma thèse était de déterminer s'il y avait unavantage à ce qu'un AUV suive une route riche en informations au moyen de points intermédiaires distincts de mesure de gravité, plutôt que d'essayer d'atteindre son objectif en ligne droite (figure 3). Bien que les AUV puissent devoir ainsi manœuvrer à un coût plus élevé en carburant et en temps, il a été démontré qu'il était utile d'amener les AUV à maintenir une position connue avec plus de précision tout au long de leur itinéraire. Cette conclusion a été appuyée par un modèle de recherche connexe qui a mesuré l'augmentation des points d'information obtenus par rapport à la distance parcourue, l'objectif étant de voir où se situait le point de basculement en termes d'optimisation de l'information de localisation et de réduction des déplacements. Si une carte gravimétrique pour une zone particulière était disponible, une mesure fondée sur des travaux antérieurs [7] pourrait être appliquée afin de planifier une route riche en information qui pourrait réduire l'erreur de localisation pour une mission théorique de 100 nm (185 km) d'au moins 25 pour cent par rapport au scénario rectiligne.

## Conclusion

L'un des grands avantages de la navigation basée sur la gravité est qu'elle n'exige pas que l'AUV transmette de l'énergie dans l'environnement, ce qui la rend moins détectable et donc moins vulnérable aux interférences ou aux brouillages extérieurs. L'AUV détecte simplement une quantité de terrain physique par des moyens passifs. La navigation inertielle assistée par la navigation basée sur la gravité ralentit suffisamment la croissance de l'erreur de localisation et de navigation pour en faire une méthode qui mérite d'être envisagée pour des opérations prolongées, et pour d'autres efforts de recherche débouchant sur une mise en œuvre réelle qui démontrerait son potentiel.

## Bibliographie

- L. Paull, S. Saeedi, M. Seto and H. Li, "AUV Navigation and Localization: A Review," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pp. 131-149, 2014.
- R. M. Eustice, H. Singh, J. J. Leonard and M. R. Walter, "Visually Mapping the RMS Titanic: Conservative covariance estimates for SLAM information filters," *The International Journal of Robotics Research*, pp. 1223-1242, 2006.
- J. Quintas, F. C. Teixeira and A. Pascoal, "An integrated system for geophysical navigation of autonomous underwater vehicles," *IFAC PapersOnLine*, pp. 293-298, 2018.
- D. T. Sandwell, R. D. Müller, W. H. F. Smith, E. Garcia and R. Francis, "New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure," *Science*, pp. 65-67, 2014.
- L. Wu, J. Ma and J. Tian, "A self-adaptive unscented Kalman filtering for underwater gravity aided navigation," *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, pp. 142-145, 2010.
- P. Pasnani, "Long Range Underwater Navigation using Gravity-Based Measurements," *M.ASc. Thesis*, 2020.
- P. Pasnani and M. Seto, "Terrain-Based Localization and Mapping for Autonomous Underwater Vehicles using Particle Filters with Marine Gravity Anomalies," in *Proc. 11th IFAC Conf. Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles*, Opatija, Croatia, 2018.



*Le ltv Pasnani est officier de génie en systèmes de combat à bord du NCSM Windsor (SSK-877). Il a défendu avec succès sa thèse de maîtrise en sciences appliquées en génie électrique et informatique à l'Université Dalhousie en avril 2020.*

*Dr Mae Seto est professeure agrégée à la Faculté de génie de l'Université Dalhousie et titulaire de la chaire Irving en génie maritime et systèmes autonomes. Elle était la directrice de thèse du ltv Pasnani.*

## CHRONIQUE SPÉCIALE

L'appui du Centre d'essais techniques (Mer) à l'innovation de la MRC dans le domaine des systèmes sans pilote

### Partie 1 : Centre d'excellence sur les systèmes sans pilote du CETM

Par Siegfried Richardson-Prager et Dr Mae L. Seto

**L**e centre d'excellence sur les systèmes sans pilote (CESSP) du Centre d'essais techniques (Mer) (CETM) est en voie de développement depuis trois ans et aura pour mandat de créer et de maintenir une expertise opérationnelle et technique en systèmes sans pilote utilisés dans tous les environnements navals et maritimes. Le CESSP consolidera son expertise dans les systèmes sans pilote afin d'aborder avec compétence le développement conceptuel et technique, l'évaluation et le soutien matériel, et de fournir des services connexes uniques à la MRC.

Le CESSP comprend une capacité récemment mise sur pied aux installations du détachement du CETM à Halifax, composée d'une équipe de six technologues et ingénieurs qui fourniront le soutien technique et opérationnel spécialisé pour tous les véhicules sans pilote acquis par la MRC et ayant la désignation générique UXV. Ces installations abritent actuellement les véhicules aériens sans pilote (UAV), les véhicules de surface sans pilote (USV) et les véhicules sous-marins sans pilote (UUV) du CETM acquis dans le cadre du projet de systèmes de contrôle maritime multidomaine (MMDCS) (voir les articles suivants). De plus, le CETM acquiert de l'expertise dans le domaine des véhicules téléguidés (ROV), dont les opérateurs et les pilotes formés par les fabricants d'équipement d'origine (FEO) ont suivi une formation supplémentaire en vue d'obtenir leur certification de Transports Canada à titre d'opérateurs de pointe, et ont également reçu une formation sur les pratiques, la sécurité et les opérations maritimes.

Chaque opérateur/pilote est appuyé par deux autres personnes qui ont reçu une formation similaire afin d'assurer une réponse rapide aux missions du CETM. L'équipe du CETM de Halifax est appuyée par des concepteurs, des développeurs et des testeurs de logiciel et d'ingénierie du CETM de Montréal et du CETM d'Ottawa. Tout au long de cette évolution, l'équipe du CETM a établi d'excellentes relations avec l'Unité de plongée de la Flotte (Atlantique) et d'autres autorités locales du secteur riverain ici à Halifax afin d'exploiter et d'évaluer les nouvelles capacités en matière d'UXV. Le CETM d'Ottawa assure le soutien de plusieurs initiatives reliées aux UXV, y compris la Prestation de services de systèmes d'aéronef sans pilote des Forces armées canadiennes (PSSP FAC), le projet Renseignement, surveillance, acquisition d'objectifs et reconnaissance (ISTAR), le système d'aéronef sans pilote Puma, le projet NOMAD, et les évaluations des ROV et des UUV pour le

projet de grands navires de guerre de surface (MSC), et le Directeur – Besoins de la marine (DBM). De plus, toute l'équipe travaille en étroite collaboration avec les FEO d'UXV et des entrepreneurs de soutien pour la fourniture du soutien technique et relatif à l'équipement et à l'évaluation.

Les membres de l'équipe CESSP du CETM aident également le DBM 2 avec l'Accord de normalisation de l'OTAN (STANAG) 4817, Équipe de soutien à la garde (système de contrôle multidomaine) afin de définir et de développer une interface STANAG de l'OTAN pour les systèmes sans pilote dans tous les environnements navals. Une interface commune entre les trois domaines facilite l'interopérabilité, simplifie l'entraînement des opérateurs et assure la pérennité dans un contexte de développement rapide de systèmes sans pilote et de leur charge utile de capteurs. Cela signifie également qu'il est possible de créer un système de contrôle véritablement universel avec une interface ouverte commune que tous les UXV conformes peuvent utiliser dans les futurs systèmes de contrôle maritime multidomaine (MMDCS).

Le CESSP du CETM est actuellement chargé de : diriger le projet mineur d'acquisition de biens d'équipement pour le modèle de développement avancé du MMDCS, soutenir les essais et évaluations de performance des UUV et des ROV par le DSCN 7 avec l'UPF(A), soutenir le DBM 2 pour les tâches liées aux UAV, formuler des commentaires sur les exigences relatives à l'approvisionnement du système de chasse aux mines à distance du Canada, et soutenir le bureau des grands navires de combat (MSC 6) pour le projet NOMAD au moyen d'un USV.

Dans le cadre des innovations et des futurs programmes d'immobilisations, il y aura de nouvelles activités de développement, d'exploitation, d'essai et d'évaluation qui nécessiteront le soutien du CETM. Cela permettra d'accroître l'expertise de l'équipe CESSP du CETM et de fournir un centre d'excellence pertinent pour les systèmes sans pilote dans la MRC.



*Le capf (retraité) Siegfried Richardson-Prager est gestionnaire de projet pour plusieurs tâches dans le cadre du CESSP. Dr Mae L. Seto est une ingénierie principale au sein du projet MMDCS. Les deux auteurs travaillent au Centre d'essais techniques (Mer) du MDN à Halifax, en Nouvelle-Écosse.*

## CHRONIQUE SPÉCIALE

L'appui du Centre d'essais techniques (Mer) à l'innovation de la MRC dans le domaine des systèmes sans pilote

### Partie 2 : Modèle de développement avancé d'un système de contrôle maritime multidomaine (MMDCS) pour les systèmes sans pilote

Par Dr Mae L. Seto et Capf (à la retraite) Siegfried Richardson-Prager

**L**e système de contrôle maritime multidomaine (MMDCS) est un projet mineur d'acquisition de biens d'équipement du DBM 2 confié au Centre d'essais techniques (Mer). Le but est d'élaborer un modèle de développement avancé (ADM) autonome d'une véritable station de contrôle multidomaine afin d'intégrer le déploiement de véhicules sans pilote (UXV) à partir d'une plate-forme navale, qu'ils soient conçus pour des missions sous-marines (UUV), de surface (USV) ou aériennes au-dessus de l'eau (UAV) (figure 1).

Par le passé, une station de contrôle qui intégrait des véhicules terrestres et aériens était désignée par le terme de station de contrôle multidomaine ou universelle, même si elle ne pouvait intégrer que des véhicules terrestres et aériens particuliers. Les véhicules maritimes sous-marins et de surface ont des exigences opérationnelles et de communication uniques et n'ont pas été pris en compte lors de la définition des interfaces pour les systèmes de contrôle multidomaine d'UXV précédents. Le projet de modèle ADM d'un système de contrôle maritime multidomaine cherche à combler cette lacune.

#### Objectif – Élaborer une norme d'interface commune

Le MMDCS est conçu pour avoir une interface ouverte commune qui permettra d'accueillir et d'intégrer tous les UXV candidats en demandant aux fabricants d'équipement d'origine (FEO) de partager leurs interfaces UXV au moyen d'un document de contrôle d'interface. Le système de contrôle multidomaine du STANAG 4817 de l'OTAN fonctionne selon une norme commune à cette fin précise. Le DBM 2 et le CETM contribuent à ce groupe de travail de l'OTAN qui s'appuie sur les contributions et les leçons apprises de JAUS (Architecture commune pour les systèmes sans pilote)<sup>1</sup>, de la norme STANAG 4586 de l'OTAN (norme pour les systèmes de contrôle des UAV)<sup>2</sup> et de JANUS (communications sous-marines)<sup>3</sup>, entre autres, pour en arriver à un véritable système de contrôle

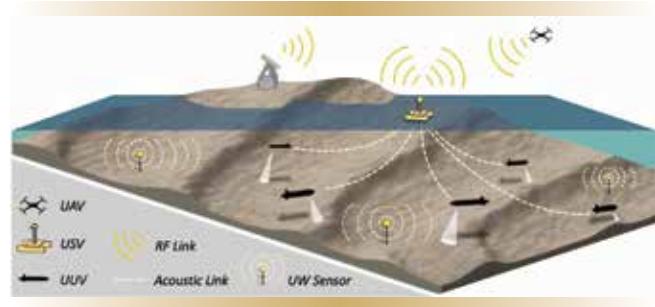


Figure 1. Le système de contrôle maritime multidomaine permettra l'exploitation intégrée de plusieurs systèmes sans pilote dans de multiples domaines.

multidomaine. Ces normes ont toujours été motivées par l'interopérabilité.

#### Produit livrable – Exigences relatives à un MMDCS de plateforme navale

Le projet de MMDCS est une occasion pour la MRC d'en apprendre davantage sur l'ingénierie et les exigences d'un tel système de contrôle. Le produit livrable du projet est un rapport qui détaille les exigences liées à un MMDCS de la Marine royale canadienne, fondées sur une construction technique complète et une vérification dans l'eau d'un modèle de développement avancé, une collaboration avec les FEO et une expérience de l'utilisation des UXV. Le rapport définira et évaluera les exigences liées au MMDCS en ce qui concerne :

- les capacités et spécifications;
- le document de contrôle de l'interface;
- les exigences d'interface pour l'entrée et la sortie des données de la salle des opérations;
- les aides à la gestion de la charge de travail;
- les besoins supplémentaires en matière de capteurs, de réseaux et de bande passante;

*(Suite à la page suivante...)*

- les aides à la décision pour le pilotage, la coordination et la gestion de l'information.

## Avantages de l'interface commune MMDCS

### Empreinte réduite

L'un des avantages d'un système de contrôle multidomaine avec une interface commune est la réduction des systèmes cloisonnés. Il y a cloisonnement lorsqu'un système, avec son interface et ses protocoles de communication exclusifs, est incapable d'interagir librement avec d'autres systèmes ou contrôleurs. Dans le contexte d'une plateforme navale, cela augmente l'empreinte physique et le nombre d'opérateurs requis pour déployer des UXV à partir d'un navire.

### Formation simplifiée

Un autre avantage d'un MMDCS réside dans le fait que les opérateurs s'entraîneraient à utiliser une interface homme-machine (IHM) et un planificateur de mission essentiellement communs dans les trois domaines. Ils n'auraient pas besoin de s'entraîner pour une nouvelle IHM ou un nouveau planificateur de mission chaque fois qu'un nouveau UXV est acheté pour un environnement quelconque. Le MMDCS fait abstraction des particularités des classes de véhicules qui varient d'un fournisseur à l'autre, ainsi que des particularités qui varient selon les classes de véhicules (c.-à-d. les environnements).

### Protection contre l'obsolescence technique et fonctionnelle des UXV

Ces avantages, combinés à un système de contrôle multidomaine flexible et interopérable, permettraient d'assurer une pérennité face à l'évolution rapide des UXV et de leur charge utile de capteurs. Bien que les UXV intègrent de multiples technologies diverses (p. ex., capteurs, robotique, tolérance aux défaillances, intelligence artificielle, communications, etc.), ces technologies ne se développent pas toutes au même rythme, et elles ne sont pas nécessairement synchronisées les unes avec les autres. Un UXV pourrait faire l'objet d'un certain nombre de mises à niveau des capteurs avant d'être remplacé par un véhicule tout droit sorti d'usine et doté d'une nouvelle suite de capteurs intégrée.

Le fait d'avoir une interface MMDCS ouverte commune signifie que les applications techniques exceptionnelles (NRE) éventuellement nécessaires pour intégrer un nouveau véhicule ou une nouvelle charge utile de capteurs sont réduites au minimum. Par exemple, si la Marine introduisait une caméra d'imagerie thermique améliorée à bord des navires, son contrôle, en tant que charge utile de capteurs à bord d'un USV, pourrait facilement être mis en

œuvre par l'entremise du MMDCS parce qu'une interface ouverte de caméra aurait déjà été définie.

Tout cela est possible parce que le MMDCS fonctionne sur une interface commune, plutôt que de s'intégrer directement à l'un ou l'autre des mécanismes internes exclusifs du véhicule ou à sa charge utile de capteurs. Cependant, un nœud logiciel MMDCS ponctuel (interface avec le véhicule), qui doit être créé pour interagir avec l'interface de programmation des applications des FEO, fait partie des applications techniques exceptionnelles requises.

### Interopérabilité

Les groupes alliés travaillant à une interface commune peuvent interopérer plus facilement leurs UXV, comme cela a été démontré lors du volet de coopération technique « Hell Bay »<sup>4</sup> de l'exercice Unmanned Warrior 2016 en Écosse. [L'auteure Mae Seto était la scientifique principale du Canada pour ce volet. – le rédacteur en chef]

Au cours des cinq dernières années, un assez grand nombre de FEO d'UXV dans tous les domaines ont compris les avantages d'ouvrir leurs interfaces, à tout le moins de façon limitée. Les FEO ont souvent une interface de programmation d'applications à laquelle un utilisateur final ou un développeur tiers peut accéder, et qui est davantage conçue pour servir une communauté d'utilisateurs d'UXV qui devient mieux éduquée en matière de personnalisation des solutions de charge utile pour des applications d'UXV particulières. Étant donné que la concentration des efforts entourant les UXV est passée des solutions centrées sur la plateforme à des solutions centrées sur les capacités, le MMDCS vise la mise à profit de la tendance privilégiant les interfaces de véhicule ouvertes pour créer un contrôleur qui ne se limite pas à un FEO ou à un type de UXV particulier, ou le cas échéant, au domaine.

### Élaboration, intégration et vérification avec des UXV multidomaine

Le développement du prototype de MMDCS se déroule en trois phases. La phase I comprend la conception et le développement en laboratoire, avec des essais à l'aide de simulateurs de véhicules et d'outils de vérification interne. La phase II est un essai à terre de l'intégration initiale de l'inventaire actuel d'UXV de la MRC au MMDCS. La phase III est une vérification et des essais à bord d'un navire occasionnel du système prototype en utilisant tous les UXV en même temps. Les phases II et III seront principalement effectuées dans les atterrages d'Halifax et les eaux environnantes.



Figure 2. Concept futuriste du MMDCS

Pour répondre aux exigences du projet, le CETM a fait l'acquisition de trois UXV de pointe pour les opérations d'essai dans les trois domaines (voir l'article suivant) et travaille avec les FEO pour intégrer ces véhicules au MMDCS. À l'été 2020, ce projet mineur d'acquisition de biens d'équipement d'une durée de quatre ans en est à mi-chemin, et se poursuivra avec le processus de conception technique et de construction. Durant l'été 2021, les essais d'acceptation au port (HAT) de la phase II et les essais d'acceptation en mer (EAS) de la phase III seront effectués, suivis d'une période de garantie d'un an pour exploiter la nouvelle capacité.

## Plus qu'une station de contrôle

La plateforme embarquée MMDCS aura deux consoles pour un coordinateur et un gestionnaire de l'information (figure 2). Le coordonnateur reçoit de l'information pour éliminer les conflits eau/air, approuver les recommandations de mission du MMDCS, surveiller les états et les missions des UXV, et maintenir l'image maîtresse de connaissance de la situation des UXV. Le gestionnaire de l'information gère, extrait et interprète les données de la charge utile de capteurs qui peuvent être transmises à d'autres personnes à bord du navire pour une analyse plus poussée. Les deux consoles sont côté à côté et interchangeables dans leurs rôles. Un plus grand nombre de consoles de ce type pourraient être distribuées sur d'autres plateformes, ou sur terre, selon la portée des missions des UXV.

Les UXV déployés à partir de plateformes navales nécessitent un pilotage, une coordination et une gestion de l'information, et il est difficile de gérer les trois fonctions lorsque plusieurs véhicules sont déployés, ce qui peut entraîner une surcharge de l'opérateur. Le système MMDCS démontrera qu'il n'est pas seulement une station de contrôle universelle améliorée, car il comprendra des outils sophistiqués d'assistance à l'opérateur permettant

d'atténuer cette situation. L'un de ces outils interprétera les données de la charge utile de capteur qui sont transmises aux consoles afin qu'un opérateur qui n'est pas un spécialiste sur une charge utile de capteur particulière puisse interpréter les résultats et déterminer leur importance pour la mission des UXV et leur impact sur les opérations du navire. L'opérateur peut ensuite décider si cette information doit être transmise à d'autres pour que des mesures supplémentaires soient prises. De plus, des renseignements provenant de capteurs propres à l'environnement comme les stations météorologiques, la surveillance dépendante automatique en mode diffusion (ADS-B), le système d'identification automatique maritime (SIA), le système de positionnement mondial (GPS) et d'autres intrants seront diffusés au MMDCS pour aider les opérateurs à planifier une mission pouvant impliquer un ou plusieurs UXV dans de multiples domaines.

Le projet de modèle ADM d'un système de contrôle maritime multidomaine représente un grand pas en avant pour combler une lacune importante dans l'intégration et le contrôle des opérations navales relatives aux UXV. Bien qu'il soit qualifié de mineur, ce projet de biens d'équipement est déjà très prometteur pour ce qui est d'étudier la possibilité de fournir une nouvelle technologie novatrice à la flotte.



*Dr Mae Seto est une ingénierie principale du projet MMDCS. Le capf (à la retraite) Siegfried Richardson-Prager est le gestionnaire de projet du système de contrôle maritime multidomaine.*

## Références

1. Serano, D., « Introduction to JAUS for Unmanned Systems Interoperability – Joint Architecture for Unmanned Systems », STO-EN-SCI-271-02, mai 2015.
2. STANAG 4586 – Standard Interfaces of UCS for NATO UAV Interoperability, STO-EN-SCI-271-03, mai 2015.
3. Borden, J., « JANUS : a digital underwater signaling standard for network node discovery and interoperability », Proceedings of SPIE 11015, Open Architecture / Open Business Model Net-Centric Systems and Defence Transformation 2019, Baltimore, MD, mai 2019.
4. Contributions du Canada à l'exercice Unmanned Warrior 2016, (<https://www.canada.ca/fr/recherche-developpement-defense/nouvelles/articles/unmanned-warrior-exercice-international-de-detection-de-mines-immerees-par-des-dispositifs-autonomes.html>), consulté pour la dernière fois le 16 mai 2020.

## CHRONIQUE SPÉCIALE

L'appui du Centre d'essais techniques (Mer) à l'innovation de la MRC dans le domaine des systèmes sans pilote

### Partie 3 : Le CETM fait l'acquisition de systèmes sans pilote pour son projet de systèmes de contrôle maritime multidomaine (MMDCS)

Par Corey Venturini et Dr Mae L. Seto

**A**u minimum, le MMDCS est une station de contrôle universelle pour les véhicules sans pilote (UXV) utilisés dans les domaines sous-marins, de surface et au-dessus de l'eau pertinents pour les plateformes navales. L'architecture ouverte et l'interopérabilité du MMDCS avec les UXV disponibles dans le commerce sont des caractéristiques importantes. Les FEO des trois premiers véhicules sans pilote sélectionnés pour la mise en œuvre et la mise à l'essai du MMDCS, à l'état de modèle de développement avancé, ont dû partager leur documentation de contrôle d'interface pour faciliter l'intégration des véhicules au MMDCS. De plus, les véhicules sans pilote sélectionnés devaient avoir des architectures ouvertes pour pouvoir prendre en charge les capacités développées par l'utilisateur.

Le système aérien sans pilote **UAS SkyRanger<sup>MC</sup> R70** (figure 1) de FLIR Systems à Waterloo (Ontario) est un quadricoptère multifonction. Pour atteindre les objectifs du MMDCS, il est facile pour l'utilisateur d'intégrer les charges utiles matérielles et logicielles. Le SkyRanger R70 utilisé par le CETM était équipé d'une charge utile comprenant deux caméras principales : le HDZoom 30 et l'EO\IR (électro-optique/infrarouge) MK II. Les deux caméras présentent une clarté remarquable à de grandes distances,

avec un zoom optique 30x et un zoom numérique 60x. Le logiciel de contrôle de mission de FLIR appliquée à l'alimentation vidéo permet à l'opérateur de suivre automatiquement les objets mobiles. Ce système aérien sans pilote est entièrement autonome, mais peut être commandé à distance, et a la capacité unique de transmettre les données de mission à un second SkyRanger en vol. L'UAS SkyRanger de FLIR est utilisé par plus de 20 forces militaires dans 30 pays du monde.

L'**Iver3** de L3Harris-OceanServer à Fall River, MA est un véhicule sous-marin sans pilote (UUV) léger et portatif en forme de torpille. En ce qui concerne les objectifs du MMDCS, les UUV ont des limites de communication et de navigation qui n'ont pas été prises en compte dans les stations de contrôle universelles antérieures conçues pour les UXV de surface et au-dessus de l'eau. La charge utile de



Toutes les photos sont reproduites avec la permission du CETM

Figure 1. Un UAV SkyRanger R70 atterrit avec succès au cours d'une séance d'instruction du CETM aux installations de FLIR à Waterloo (Ontario).



Figure 2. L'UUV IVER3 du CETM a été déployé dans un bassin de Bedford glacé (Halifax, Nouvelle-Écosse).



Figure 3. L'USV C-CAT3 lors d'un déploiement dans le bassin de Bedford.

capteurs est composée d'un sonar à balayage latéral Klein 3500 et d'un sonar bathymétrique interférométrique (figure 2). L'Iver3 utilise un modem acoustique pour les communications sous-marines, et une solution de navigation construite autour du système de navigation inertiel iXblue Phins à la fine pointe de la technologie. Sous l'eau, l'Iver3 est entièrement autonome. Le CETM a déployé ce véhicule à plusieurs reprises dans le bassin de Bedford et autour du port d'Halifax pour obtenir des images d'épaves submergées et de cibles de lutte contre les mines, entre autres objets. En plus de son rôle au sein du MMDCS, il a été utilisé dans des essais comparatifs avec les UUV REMUS 100 exploités par l'Unité de plongée de la Flotte (Atlantique) – voir la RGM 89, numéro du printemps 2019. Les UUV Iver3 ont été utilisés pour des missions scientifiques, industrielles et de défense dans le monde entier. Quatre de ces véhicules faisaient notamment partie des essais de collaboration multivéhicule lors de l'exercice Unmanned Warrior 2016 de la Royal Navy (RN).

Le véhicule de surface sans pilote **C-CAT3** de L3Harris-ASV à Portchester, au Royaume-Uni, est une coque de catamaran robotisée (figure 3). Ses capteurs mouillés comprennent un altimètre et un sonar bathymétrique. Les capteurs au-dessus de l'eau sont deux caméras de longueurs d'onde visibles – l'une fixe et l'autre capable de faire un zoom panoramique/basculant. Le rôle de l'USV consiste à relayer les signaux/données de contrôle entre le MMDCS et un UUV

submersé. Les caméras transmettent la vidéo au MMDCS pour une meilleure connaissance de la situation. Étant donné que le dispositif utilise également un modem acoustique sous-marin pour communiquer avec un UUV déployé, et une radio RF pour communiquer avec le MMDCS, le MMDCS peut communiquer en temps quasi réel avec l'UUV submerge. L'USV peut être commandé à distance par Wi-Fi, cellulaire 4G ou radio UHF. Comme les deux autres véhicules sans pilote, l'USV peut être contrôlé de façon autonome. L'USV C-CAT3 est doté d'un contrôleur et d'une interface semblables à ceux du C-Worker 5 (même FEO) qui a participé aux essais de collaboration multivéhicule avec les quatre UUV Iver3 durant l'exercice Unmanned Warrior 2016.

Le tableau 1 résume les caractéristiques de fonctionnement des UXV individuels. L'endurance et l'autonomie de chaque type de véhicule (comparativement aux véhicules nominaux sur une seule charge de batterie) dépendent du cycle de service des capteurs de charge utile, ou de la portée radio dans le cas de l'UAS SkyRanger. L'endurance des USV et des UUV peut diminuer de plus de 30 pour cent lorsque toutes les charges utiles de capteurs fonctionnent à un cycle de service élevé. Ces véhicules sont entretenus et exploités par le Centre d'excellence sur les systèmes sans pilote du CETM à Halifax.

Dorénavant, même si ces véhicules ont été spécifiquement sélectionnés pour le projet MMDCS, ils sont suffisamment polyvalents et adaptables pour être utilisés pour d'autres activités d'évaluation en appui de la MRC et du DGGPEM.



*Corey Venturini est un ingénieur intermédiaire et pilote principal du SkyRanger R70. Dr Mae L. Seto est une ingénierie principale au sein du projet MMDCS. Les deux auteurs travaillent au Centre d'essais techniques (Mer) du MDN à Halifax, en Nouvelle-Écosse.*

Tableau 1 : Résumé des caractéristiques de fonctionnement des UXV

Domaine	Type d'UXV	Vitesse maximale (kt)	Altitude/profondeur nominale (m)	Endurance (min)	Autonomie à la vitesse de croisière (m)
Au-dessus de l'eau	UAS quadricoptère	27	4 572 (altitude)	40	8 000 (portée radio)
surface	USV catamaran	8	niveau de la mer	360 – 480	6 500 (à 3,5 kt)
sous-marin	UUV en forme de torpille	4	100 (profondeur)	480 - 840	37 000 (à 2,5 kt)

**CRITIQUE DE LIVRE****Hot Spot of Invention — Charles Stark Draper, MIT, and the Development of Inertial Guidance and Navigation**

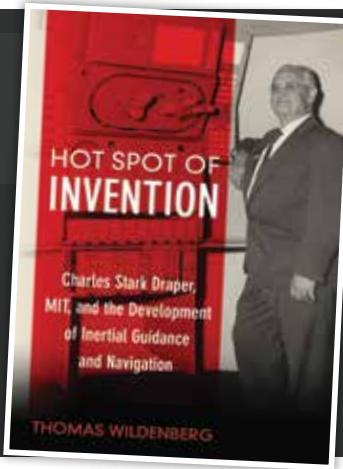
Critique de Brian McCullough

Auteur : Thomas Wildenberg

Éditeur : U.S. Naval Institute Press

ISBN : 9781682474693

Couverture rigide, 320 pages, 32 illustrations

<https://www.usni.org/press/books/hot-spot-invention>

**D**ans son poème épique de 1902, *Sea-Fever*, le poète lauréat britannique et marin marchand John Masefield écrivait ces paroles immortelles : [traduction] *Tout ce que je demande, c'est un grand vaisseau et une étoile pour le guider.*

Je peux facilement m'identifier à ce sentiment, ayant moi-même guidé des vaisseaux de la Marine royale canadienne en me servant des étoiles et d'un sextant durant mon service en mer dans les années 1970. Je tire une profonde satisfaction dans l'art de déterminer la position d'un navire sur un océan dépourvu de tout repère sans l'aide de satellites artificiels ou d'appareils électroniques complexes. Mais qu'en est-il lorsqu'il n'y a pas d'étoiles visibles « pour le guider » ?

À l'époque où je faisais mes débuts en matière d'observation d'étoiles à bord du NCSM *Qu'Appelle* en route vers la Jamaïque en janvier 1974, l'Institution des ingénieurs du Royaume-Uni s'apprêtait à décerner au brillant scientifique et ingénieur américain Charles Draper la médaille d'or Kelvin pour « le développement de systèmes de guidage pour les navires, les aéronefs, les fusées, les missiles et les vaisseaux spatiaux ».

La plupart des gens qui le connaissaient l'appelaient « Doc », mais Charles Stark Draper (1901-1987) était aussi souvent désigné comme le « père de la navigation inertiel ». Son leadership dynamique et son style d'enseignement inspirant au laboratoire d'instrumentation du MIT à Cambridge, au Massachusetts, ont conduit au développement d'un gyroscope flottant qui, pourrait-on dire, équivaut à placer une étoile-guide de navigation à l'intérieur d'une boîte. En effet, Doc Draper et son équipe avaient exploité la capacité d'un gyroscope en rotation à maintenir la direction de son axe de rotation, peu importe l'orientation du cadre extérieur qui le maintient.

Comme nous l'apprend la fascinante biographie personnelle et technique de Thomas Wildenberg au sujet de Draper publiée par la Naval Institute Press en novembre 2019, le développement d'un prototype en 1953 montrant la faisabilité d'un système de navigation inertuelle sous-marine, ainsi que le système de guidage, de navigation et de contrôle par écran et clavier de l'ordinateur de guidage Apollo qui ont emmené les astronautes sur la Lune figurent parmi les nombreuses réalisations du Doc Draper. L'une de ses premières réussites en matière de conception a été un viseur de canon gyrostabilisé pour les canons antiaériens de la marine américaine pendant la Seconde Guerre mondiale.

Wildenberg est un historien et un universitaire indépendant qui s'intéresse tout particulièrement à l'aéronautique navale et à l'innovation technologique dans le domaine militaire. Il fait un travail remarquable pour montrer comment l'extraordinaire talent de Charles Stark Draper à appliquer la science à l'ingénierie a été soutenu par le MIT, au point que le laboratoire, qui portera un jour le nom de Draper, est devenu un centre d'innovation – un centre névralgique pour l'invention – qui a attiré des projets de recherche de haut niveau du gouvernement. *Créez le bon type d'environnement d'incubation, et ils viendront.*

Le livre, qui présente le récit détaillé des histoires entrecroisées de Draper et du laboratoire d'instrumentation du MIT, est assorti d'un glossaire fort utile, d'un index et de nombreuses notes de fin de chapitre et de citations de documents sources.



# BULLETIN D'INFORMATION

## Le gouvernement du Canada reçoit le premier nouveau navire de patrouille extracôtier et de l'Arctique

Avec des fichiers provenant des nouvelles de la Défense nationale et des Forces armées canadiennes

**L**a Marine royale canadienne (MRC) a souligné le jalon le plus important de son programme de construction navale par la livraison, le 31 juillet, du premier de six nouveaux navires de patrouille extracôtiers et de l'Arctique (NPEA). Le Navire canadien de Sa Majesté NCSM *Harry DeWolf* a été nommé en l'honneur du **vice-amiral Harry DeWolf**, héros de guerre de la Marine royale canadienne pendant la Seconde Guerre mondiale. Il est le premier navire construit pour la MRC dans le cadre de la Stratégie nationale de construction navale.

« Bravo Zulu et merci à tous les membres de l'équipe de construction navale gouvernement-industrie, en particulier Irving Shipbuilding Inc., le constructeur, dont la collaboration au projet a fait du Canada un pays plus fort », a déclaré le vice-amiral Art McDonald, commandant de la MRC.

Conçue spécialement pour l'exécution de patrouilles dans les eaux extracôtieres et les régions les plus au nord du Canada, cette nouvelle classe de navires sera au cœur de la présence accrue des Forces armées canadiennes (FAC) dans l'Arctique. Le navire fera l'objet d'une cérémonie officielle de mise en service à l'été 2021, cérémonie qui sera suivie par son déploiement dans l'Arctique.

La construction des trois prochains navires est en cours, et celle des cinquième et sixième navires devrait être entamée en 2021 et 2022, respectivement. La MRC a annoncé que le sixième navire de la classe portera le nom du **lt Robert Hampton Gray**, lauréat de la Croix de Victoria et pilote de la Réserve de volontaires de la Marine royale du Canada, mort au combat en dirigeant un escadrille de Corsair contre les bâtiments de guerre de l'ennemi dans les eaux territoriales du Japon le 9 août 1945. [Pour en savoir plus : <https://parallax-film.com/episode/last-battle-of-hampton-gray/>]



Photo courtoisie de la société Irving Shipbuilding Inc. (Groupe CNW/Irving Shipbuilding Inc.)

M. Kevin McCoy, président, Irving Shipbuilding Inc. (à gauche), et le vice-amiral Art McDonald, commandant de la Marine royale canadienne (à droite), lors de la cérémonie officielle de livraison du NCSM *Harry DeWolf*, au chantier naval de la base des Forces armées canadienne d'Halifax, le 31 juillet 2020.



Photo du MDN

Lt Robert Hampton Gray, V.C., D.S.C., MiD(2)



NCSM *Harry DeWolf*  
Photo du MDN par Mona Ghiz

## PRIX

### Collège militaire royal du Canada Sabre des OMST Carruthers

#### Aspm Cael Halvorsen

Réussite scolaire et rendement exemplaire  
(avec le Capv Jim Carruthers, MRC (à la retraite))



Photo : CMRC



Photo de Brian McCullough

### Prix Spirit des OMST Plaque d'argent du Cam Ian Mack

#### Ltv Emma Reed

Pour avoir fait preuve de l'esprit qui favorise  
l'excellence en génie maritime  
(avec le Cam Chris Earl)





# NOUVELLES

L'Association de l'histoire technique de la Marine canadienne

## Nouvelles de l'AHTMC

Établie en 1997

### Président de l'AHTMC

Pat Barnhouse

### Directeur exécutif de l'AHTMC

Tony Thatcher

### Liaison à la Direction — Histoire et patrimoine

Michael Whitby

### Liaison à la Revue du Génie maritime

Brian McCullough

### Webmestre

Peter MacGillivray

### Webmestre émérite

Don Wilson

*Nouvelles de l'AHTMC* est le bulletin non officiel de l'Association de l'histoire technique de la marine canadienne. Prière d'addresser toute correspondance à l'attention de M. Michael Whitby, chef de l'équipe navale, à la Direction histoire et patrimoine, QGDN, 101, Ch. Colonel By, Ottawa, ON K1A 0K2 Tél. : (613) 998-7045 Téléc. : (613) 990-8579

Les vues exprimées dans ce bulletin sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement le point de vue officiel ou les politiques du MDN.

[www.cntha.ca](http://www.cntha.ca)

## Développement du SICM pour les frégates canadiennes de patrouille – Un projet d'affiche pour l'innovation de la MRC

Par le Capf (à la retraite) Peter MacGillivray, M.Sc., ing.

**N**ous connaissons tous aujourd'hui des systèmes de commande informatisés sophistiqués, mais pas plus tard qu'en 1995, il était courant de trouver des commandes directes et des jauges dans les systèmes de commande des navires de guerre. Jusqu'à la fin du 20<sup>e</sup> siècle, les technologies du système de commande des machines (SCM) des navires opérationnels de la MRC comprenaient les technologies d'après la Seconde Guerre mondiale pour les destroyers d'escorte de la classe *Restigouche* (figure 1), les technologies hybrides numériques discrètes pour les destroyers de classe Tribal DDH-280 (figure 2) et le système intégré de commandes des machines (SICM – figure 3) pour les frégates canadiennes de patrouille (FCP) de la classe *Halifax*.

Grâce aux efforts de pionniers canadiens novateurs, la MRC a été le chef de file mondial en matière de réalisation de ce qui est si courant aujourd'hui, soit la technologie de commande de plateforme intégrée par ordinateur. À la fin des années 1970, la révolution informatique commençait à façonner le monde moderne, et grâce à une prévoyance, une énergie et une détermination étonnantes, le personnel de la DGGMM/DMGE 7 (section de commande des machines) a mené un programme de développement de dix ans qui a permis au Canada de devenir le leader mondial en matière de SICM dans les FCP, avec le soutien de l'Institut de médecine environnementale pour la défense (IMED), ainsi que ses principaux entrepreneurs.

Six des actes du colloque intitulé International Ship Control Systems Symposia (SCSS) de 1978 à 1993 (5<sup>e</sup> au 10<sup>e</sup> colloque du SCSS) font état des efforts novateurs déployés par le personnel de la MRC, tant militaire que civil, en collaboration avec l'industrie canadienne, pour mettre au point le premier SICM informatisé au monde. Les documents techniques canadiens

(Suite à la page suivante)



Photos du MDN/des FCP

Figure 1. Les manettes des gaz et autres commandes et jauges des machines sur la console de la salle des machines d'un destroyer d'escorte de la classe *Restigouche*.



Figure 2. Console de commande des machines à bord d'un destroyer de classe Tribal DDH-280.



Figure 3. Console du système intégré de commande des machines conçue pour les frégates de la classe *Halifax*.

présentés à ces conférences brossent un tableau saisissant de ces développements typiquement canadiens, entièrement guidés par la Marine.

Au 5<sup>e</sup> colloque du SCSS en 1978, le document principal de la United States Navy remettait en question la faisabilité avec les ordinateurs de l'automatisation elle-même, sans parler des commandes informatiques. D'autres documents nationaux portaient sur la mise en œuvre rudimentaire de l'électronique numérique pour la surveillance secondaire seulement. Le Canada a fait valoir que l'utilisation de la technologie du SICM était porteuse de promesses d'amélioration de la fiabilité, de la capacité des opérateurs, ainsi que d'économies au chapitre de l'approvisionnement et des coûts tout au long de la durée de vie des systèmes. Le scepticisme était tangible, et les critiques qui n'osaient pas endosser le projet étaient nombreux.

Au cours de cette même conférence, le Canada a présenté des documents décrivant les exigences détaillées d'un système embarqué intégré de commande des machines (SHINMACS) et le plan de la MRC pour mettre au point un tel système de « salles de commande à écrans cathodiques » (c.-à-d. sur un écran d'ordinateur). Lors des colloques du SCSS qui se sont succédé, des documents techniques ont décrit les développements que la MRC cherchait à réaliser pour atteindre ces objectifs. Enfin, lors du 10<sup>e</sup> colloque du SCSS à Ottawa en 1993, la Marine a présenté des résultats exceptionnels pour le SICM dans les FCP – nous avions réussi! Aucune autre marine au monde n'avait encore tenté de mettre en place un SICM entièrement intégré.

Il convient également de noter que les technologies des systèmes maritimes devenaient de plus en plus sophistiquées avec l'introduction de moteurs à turbine à gaz, d'unités de commandes électroniques, et ainsi de suite. De plus, il y avait un besoin émergent de réduire le risque d'erreur humaine lors de l'utilisation d'équipement très complexe. Le principal avantage de l'interface homme-machine (IHM) du SHINMACS était de décharger le personnel de quart de l'obligation de surveiller une pléthora de jauge et de cadrans afin de conserver une image mentale du comportement des machines.

L'élaboration du SICM pour les FCP a été mise au défi par la nécessité de répondre aux « exigences du marché ». La spécification de 1977 était fondée en grande partie sur le système de commande des machines DDH-280 qui utilisait des composants numériques discrets comme les portes logiques NON-OU et NON-ET, etc., et le personnel devait prévoir quels composants « disponibles sur le marché » pourraient être disponibles à temps pour la première livraison de FCP en 1990. Il convient de noter que le premier microprocesseur à puce militarisé (Intel 80186) n'a pas été certifié avant 1982 – la même année où les propositions de FCP étaient évaluées.

L'évolution du SHINMACS était motivée par la conviction qu'en exécutant des travaux de recherche et développement stratégiques pour tirer parti de la croissance explosive de la technologie informatique, le SICM pouvait être mis en œuvre dans les FCP avec des composants à la fine pointe de la technologie. Les principaux projets de R-D sur une période de plusieurs années visant à développer le SHINMACS pour répondre aux exigences des FCP comprenaient :

- l'élaboration d'une simulation sophistiquée qui pourrait être utilisée pour élaborer les exigences ergonomiques proposées plus tôt par IMED afin d'appuyer le développement des IHM du SHINMACS;
- la mise au point d'une console fictive connue sous le nom de console de commande des machines standard pour exécuter la simulation, livrée en décembre 1983;
- la mise en œuvre d'un modèle expérimental qui a démontré l'architecture distribuée pour prouver la validité du concept (juin 1985).

Le contrat pour la réalisation d'un modèle expérimental a été attribué à CAE, qui devait utiliser l'ordinateur AN/UYK-502 standard de la MRC. Lorsque l'ordinateur AN/UYK-502 s'est avéré incapable de répondre aux exigences du SHINMACS, il a été remplacé à la volée par le processeur Intel 80186. Au fur et à mesure que le modèle expérimental avançait, divers composants approchant la certification militaire (mémoire, écrans, dispositifs d'E/S) ont été mis en œuvre. Au moment de la livraison, le constructeur du navire avait choisi le SICM de CAE comme système pour les FCP. CAE a été le pionnier de l'utilisation navale des « commandes à écrans » du SICM et a révolutionné l'industrie.

Le reste, comme on dit, appartient à l'histoire, mais il vaut la peine de se rappeler que c'est la vision et la détermination des ingénieurs de la MRC qui ont joué un rôle déterminant pour amener le Canada à être un chef de file mondial dans le domaine de la technologie de commande de plateforme intégrée par ordinateur.

*Le Cap MacGillivray a été gestionnaire de projet du SICM de 1982 à 1984, et chef de section DMGE 7 de la section des systèmes de commande des machines au DGGMM de 1990 à 1993.*

