

COmmunication avec Relais Intermédiaires Navals Autonomes

Contexte de la thèse :

Le contexte de la thèse est celui de la communication en milieu marin et/ou sous-marin de volumes importants de données (plusieurs dizaines de gigabits) sur une portée importante (10 à 100+ km) dans le cas où une liaison directe est impossible, parce que la portée du moyen de communication est trop faible, ou bien parce que le débit que lon peut obtenir à cette portée est trop faible en regard du volume de données à transmettre.

L'environnement marin est le cas typique où ce problème se produit. Un domaine d'application envisageable en particulier est celui de la guerre des mines, où la transmission dun volume important de données sonar à très haute résolution est idéalement désirable en flux continu et avec une latence minimale. Le but visé est de mettre en parallèle l'analyse des données par les opérateurs, avec la mission du véhicule porteur de sonar, sans attendre le retour du moyen sonar à terre. La difficulté est que les liaisons acoustiques communément utilisées sous leau nont quun débit très limité (typiquement 10 kbit/s à 1 km, 5 kbit/s à 10 km, 100 bit/s à 1000 km) avec des encombrements et des puissances très importants à mesure que la portée doit augmenter. Les solutions à plus haut débit (supérieures au mégabit/s et jusqu'à plusieurs gigabits/s) fondées sur des solutions optiques sont de courte portée (1 à 2 m en eau turbide, quelques dizaines de mètres en eaux très claires). Une solution de substitution serait de remplacer la communication directe par des relais de communication mobiles (« data muling »), munis de moyens de communication à courte portée, donc furtifs et économes en énergie. Dans ce contexte les solutions optiques de débit nettement supérieur, deviennent envisageables. A la différence des stratégies de data muling actuelles, qui relient des senseurs fixes à des récepteurs également fixes à laide de relais mobiles, on envisage ici le cas où tous les agents sont mobiles. Idéalement, ces relais disposeraient d'un grand rayon d'action, avec des moyens de navigation simples pour minimiser les coûts de mise en oeuvre et de multiplication des relais. Ces relais feraient une trajectoire en va-et-vient pour se passer les données de proche en proche. Chaque relais serait mis à poste sur une trajectoire fermée garantissant un passage sur un point de rendez-vous avec le relais suivant. Il est relativement aisé de montrer sur un plan théorique que, sous certaines conditions, cette approche est compétitive pour minimiser le débit moyen, par rapport à des scénarios communication acoustique directe ou relais flottant acoustique/radio .

Objectif :

L'objectif de la thèse est d'investiguer la faisabilité d'une telle solution, avec une analyse sur les volets suivants :

1) l'intérêt et la faisabilité sur le plan technico-opérationnel avec le dimensionnement des caractéristiques principales des relais ainsi que le choix des types de drones utilisés : sous-marins, aériens;

2) la définition des trajectoires et le guidage des relais sur la trajectoire de mise à poste pour garantir un rendez-vous en temps et en heure avec le relais suivant, et

3) l'implication de l'approche sur la topologie du réseau, l'intégrité des données, la latence, le débit ainsi que la réalisation du rendez-vous au niveau des couches 2 à 5 du modèle OSI. L'objectif final serait une preuve de concept physique réalisée avec les moyens robotiques de l'ENSTA Bretagne.

L'approche scientifique utilisée pourra faire appel à des techniques de calcul par intervalle garantissant la tenue des objectifs de précision de positionnement spatiotemporel afin de garantir la réussite de la mission. L'ISEN Yncréa Ouest apporte quant à elle son expertise en communication sous-marine.

Hypothèses :

La solution des relais mobiles est séduisante sur le plan théorique mais présente des contraintes fortes qui doivent être toutes assimilées afin que la solution devienne viable.

Tout d'abord, il convient d'identifier quels types de drones seraient plus à même de répondre au mieux à la solution.

Pour résumer les contraintes de haut niveau à tenir pour la solution sont:

- Une performance très supérieure (au moins deux à trois fois) à une solution autre que celle des relais mobiles (par exemple : une bouée réalisant un « pont » entre transmission acoustique moyen débit locale, et liaison radio)
- Une fiabilité suffisante : le rendez-vous entre les relais doit être assuré de manière fiable
- Une disponibilité importante (par exemple une tenue à la mer de 24h minimum)
- Un coût idéalement faible (un ordre de grandeur envisageable serait de 20-30 k€ par unité)

Ces contraintes de haut niveau se déclinent en contraintes de bas niveau, parmi lesquelles l'on peut citer, de manière non exclusive :

- La diminution du coût des capteurs de navigation ou élimination des capteurs les plus onéreux : Pour les drones sous-marins, on peut envisager l'utilisation de techniques de type « localisation et cartographie simultanée » (zones inconnues) ou bien de « corrélation de terrain » (zones connues) pour une localisation référencée terrain ;
- La bonne tenue à la mer
- Une grande endurance énergétique
- La garantie de pouvoir récupérer les agents et de ne pas les perdre

Les types de drones envisageables sont soit sous-marins, soit aériens, soit des navires de surface, avec un choix de technologies à effectuer : quelle est la meilleure architecture pouvant répondre à notre besoin ? L'on attend ici au moins une réponse de type « avant-projet » permettant de raisonner sur les grandes classes de solutions et de dimensions, sans partir sur une réalisation détaillée.

La réduction de la quantité de capteurs embarqués pour réaliser la navigation est un point important. Par exemple, un dispositif de navigation autonome sous-marin fondé sur une centrale inertielle couplée à un loch Doppler présente un coût de l'ordre de 140 k€, lequel présente à lui seul le poste budgétaire le plus important dans un véhicule autonome sous-marin. Si est possible de se passer d'un tel dispositif et de naviguer à l'estime ou bien à l'aide d'amers, alors la solution des relais mobiles devient d'autant plus viable. La question est donc de savoir si est possible de garantir un rendez-vous, à une date et à un instant donné prédéfinis à deux agents mobiles, avec un minimum de senseurs de navigation.

Ce problème est crucial à la fois pour la réalisation du scénario de relais mobile, mais également pour d'autres applications, comme la récupération automatisée d'un drone par un autre. Or aujourd'hui ce point n'est pas encore résolu de manière satisfaisante dans le cas où au moins l'un des deux agents navigue sous l'eau. Or le but final est bien de réaliser une liaison dont l'une extrémité au moins est sous-marine.

La dernière question concerne l'impact de la solution proposée sur la communication, d'un point de vue réseau (latence, gestion de l'intégrité des données, etc) et comparaison par rapport à une solution conventionnelle tel un réseau de noeuds acoustiques.

Approches méthodologique et technique envisagées :

L'approche méthodologique envisagée est de commencer par une étude architecturale permettant de sélectionner une solution de système de communication par relais mobiles adaptée au problème. Cette étude architecturale fera intervenir une phase de recherche bibliographique ainsi que de recherche opérationnelle, couplée à une simulation d'une ou plusieurs architectures proposées, à comparer avec des architectures plus classiques (communication directe, ou bien passerelle fond-surface utilisant une bouée). Le but de cette étude est de faire ressortir un compromis coût/performance/robustesse pour la solution.

Dans un second temps, et avec l'architecture sélectionnée, ou une approximation (un sous-ensemble) réaliste de cette architecture on pourra s'intéresser à la résolution du problème du guidage des véhicules afin de réaliser un rendez-vous entre deux agents, dont l'un est sous-marin, à une date et à un endroit donné. Cette approche pourra faire intervenir les approches de calcul ensembliste faisant une partie de la renommée de l'équipe Robex et dont Luc Jaulin est un expert mondial reconnu ; notamment des tubes ensemblistes et des contracteurs. Cette approche compléterait une thèse CIFRE actuellement en cours à l'ENSTA Bretagne et financée par la société Kopadia (www.kopadia.com), concernant la navigation d'un véhicule sous-marin par suivi d'isobathes. A la différence de cette thèse, serait intégrée dans le travail proposé ici, la contrainte temporelle au travers du problème du rendez-vous.

Une phase d'expérimentation peut ensuite être envisagée, utilisant par exemple les AUV de type Folaga mis à disposition par la société Kopadia à l'ENSTA Bretagne, ou bien le voilier autonome VAIMOS (<https://en.wikipedia.org/wiki/Vaimos>) développé par IENSTA Bretagne. Si la communication entre robots est optique (afin d'avoir un débit suffisant), l'acquisition d'un produit sur étagère (<https://www.hydromea.com/underwater-wirelesscommunication/>) de prix unitaire 5k€ est envisagé afin d'accélérer la phase d'intégration expérimentale. Mais la communication pourrait également être acoustique, si seule la phase de rendez-vous est à démontrer.

La valorisation de ce travail se fera au travers de communications en conférences internationales (MTS/IEEE Oceans, IEEE ICRA), les journées de séminaire et d'expérimentation Sub-meeting organisées par l'ENSTA Bretagne, ainsi qu'au moins une communication en revue à comité de lecture.

Environnement scientifique :

Sur le plan international, le transport de données à grande distance dans le milieu sous-marin a une application importante dans le milieu civil (observatoires marins, prospection et exploitation de champs pétroliers, etc) ainsi que militaire. La notion de data muling sous-marin a été introduite en 2005 par Vasilescu et al. [1] mais avec des noeuds fixes et un agent mobile réalisant un parcours du type voyageur de commerce pour récolter les données puis les ramener à leur destination. Les travaux ultérieurs sont principalement le fait d'équipes américaines (MIT, Woods Hole) ou chinoises, mais non européennes, et restent dans le cadre de la recherche de laboratoire avec un niveau de maturité technique relativement bas (beaucoup de simulations). Le besoin est donc d'une part de rattraper le retard sur les initiatives universitaires non françaises concernant le transport de données et de s'intéresser au plus près à des concepts d'opération précis en introduisant la notion de rendez vous de deux agents mobiles. D'où l'initiative de ce projet regroupant trois acteurs forts du domaine: Thales, IENSTA et IISEN Yncréa Ouest.

L'entreprise Thales DMS France se positionne comme le leader mondial des systèmes sonar militaires, équipant une cinquantaine de marines de par le monde. Elle est l'une des trois entreprises (avec Naval Group et ECA) à représenter le savoir-faire français en matière de systèmes autonomes de drones militaires marins. Thales est actuellement maître d'oeuvre sur le projet franco-britannique

de système de lutte anti-mines MMCM, avec une expérience acquise sur de nombreux plans d'étude amonts (PEA DT-SACAM, ESPADON, EVOL GDM). Thales a également développé sur fonds propres le

démonstrateur de drone sous-marin de troisième génération AUSS dévoilé à Euronaval 2016 (A. Arnold, co-encadrant proposé de la thèse, a fait partie de l'équipe ayant réalisé ce projet en tant que responsable fonctionnel senseurs et navigation).

IENSTA Bretagne est une école d'ingénieurs du ressort du Ministère de la Défense, avec une filière robotique et hydrographie permettant de certifier des ingénieurs hydrographes catégorie A selon l'Organisation Hydrographique Internationale (l'une des seules formations au monde), qui dispose donc un savoir-faire unique dans ce domaine en France et avec une réputation internationale. En particulier l'équipe de robotique de cette école est

reconnue pour ses contributions en automatique ainsi qu'en cartographie et localisation simultanée à l'aide de méthodes ensemblistes (dont Luc Jaulin est l'un des pionniers et experts mondiaux) permettant de borner de manière garantie les incertitudes sur les paramètres aléatoires en jeu. Ces techniques ont déjà permis la démonstration de systèmes de drones navigant en formation ou bien avec un nombre

réduit de senseurs. LISEN Yncréa Ouest, dont Pierre-Jean Bouvet dépend, est une école d'ingénieurs de type EESPIG (Établissement d'Enseignement Supérieur Privé d'Intérêt Général) reconnue dans le domaine de l'électronique, du numérique et des télécommunications, apportant la compétence en acoustique et en communications sous-marines dont ce projet est nécessaire.

[1] M. Dunbabin, P. Corke, I. Vasilescu, and D. Rus. Data muling over underwater wireless sensor networks using an autonomous underwater vehicle. In Proc. 2006 IEEE

Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pages 2091-2098, May 2006.

Contexte scientifique :

Le but du projet proposé est de consolider le partenariat de THALES avec l'ENSTA Bretagne et LISEN Yncréa Ouest au sein du laboratoire commun WAVES et plus précisément au travers de la chaire d'enseignement et de recherche TRANSNUM. Le laboratoire commun « WAVES » regroupe l'ENSTA Bretagne, l'ISEN Yncréa Ouest ainsi que la plupart des Bretagne, LISEN Yncréa Ouest ainsi que la plupart des acteurs académiques de la Bretagne ouest (ENIB, IMT-A, UBO, UBS, Lab-Sticc) dans un partenariat avec THALES. Ce laboratoire porte sur l'amélioration des performances des réseaux de capteurs, distribués et autonomes avec pour objectif de faire croître la compétence régionale bretonne sur le sujet. Le but est de croiser le savoir-faire industriel et opérationnel que possède THALES avec les innovations scientifiques des laboratoires.

Pour cela, la chaire d'enseignement et de recherche TRANSNUM (Transformation Numérique pour

l'observation, la surveillance et la sécurité du milieu marin), lancée en 2019 et regroupant spécifiquement l'ENSTA Bretagne et LISEN Yncréa Ouest avec Thales, a pour but de concrétiser une partie des axes de recherche du laboratoire WAVES, avec un thème de recherche centré sur la robotique marine. C'est dans ce cadre précis que s'insère le projet de thèse proposé. Le cofinancement provient du budget propre de la chaire. La chaire se caractérise en outre par le détachement à plein

temps d'un ingénieur détaché sur le poste (A. ARNOLD), qui serait co-encadrant du doctorant et garant de la bonne coopération entre l'ENSTA Bretagne et LISEN.

Cette chaire poursuit d'autres coopérations déjà faites dans le passé entre les deux écoles: les travaux de thèse CIFRE sur la détection de changements au sonar de Florian Nicolas, aujourd'hui ingénieur à Thales (B. Zerr, I. Quidu de l'ENSTA, A. Arnold de Thales respectivement en directeur et co-encadrants, soutenance en 2018); ainsi que la thèse de Charles Coquet sur le contrôle d'un essaim de drones (B. Zerr de l'ENSTA, P.-J. Bouvet de LISEN et A. Arnold de Thales respectivement en directeur et co-encadrants, soutenance prévue en mai 2020).

Un autre partenariat entrant dans le cadre de la chaire

est en cours depuis 2019 entre la TPE « Kopadia » spécialisée dans les drones autonomes, l'ENSTA et

Thales. Kopadia finance la thèse CIFRE de Julien Damers, sur le thème du positionnement de drones

légers de classe « man portable » en utilisant uniquement la bathymétrie et d'autres éléments tels que

les cartes de courant, de température. Dans ce projet, par le biais de la chaire, THALES est garant financier de la bonne réalisation de la thèse CIFRE en cas de

défaillance de Kopadia, et consultant technique sur les concepts opérationnels d'emploi.

Le but du projet proposé ici est de créer une complémentarité avec la thèse de Julien Damers, tout en gardant les deux projets autonomes. La présente proposition donne en effet un cas d'utilisation concret à des approches comme celles développées par Julien Damers, ainsi qu'une possibilité éventuelle de réaliser une expérience pratique à l'aide des drones que Kopadia met à la disposition de IENSTA Bretagne.

Luc JAULIN
Directeur de thèse

