APPLICATIONS MARINES ET SOUS-MARINES DES PILES À COMBUSTIBLE

Sommaire

1. ***Généralités***
2. ***Applications marines de surface***
3. ***Applications sous- marines***
   3.1 - Applications militaires habitées
   3.2 - Applications civiles et militaires inhabitées

1. Généralités

Si les premières applications de la pile à combustible furent spatiales, dès le début des années soixante du siècle dernier, les ingénieurs travaillant dans les milieux marins et sous-marins ont rapidement compris le profit qu'ils pouvaient tirer des qualités de cette technologie dans leur environnement particulier.
Des études et démonstrations se multiplient depuis le début des années 2000. Elles sont de deux types :
- Soit des unités de puissance auxiliaire (Auxiliary Power Unit, APU) qui fournissent l'électricité nécessaire à bord, hors moyens de propulsion ; une application que l'on retrouve essentiellement pour les bateaux de surface. Sont alors concernées des PAC de puissance de quelques centaines de W à quelques centaines de kW,
- Soit elles fournissent tout ou partie de la puissance motrice au bâtiment. Une application qui a beaucoup d'intérêt, tant pour des unités de surface, qu'elles soient dédiées au tourisme ou qu'elles soient dédiées aux gros navires, en particulier pour les manœuvres portuaires non polluantes, que pour les sous-marins dont la propulsion, pour des raisons de discrétion, est électrique (jusque-là, à partir de batteries rechargées en navigation de surface par une motorisation diésel quand ce n'est pas de l'électricité nucléaire produite par un réacteur embarqué). Les puissances correspondantes de ces PAC sont alors de quelques kW à plusieurs centaines de kW, voire quelques MW pour des projets en cours pour la propulsion propre de gros navires de surface, comme les navires de croisière.

2. Applications marines de surface

Les projets d'applications militaires pour les bâtiments de surface sont nombreux, mais aucune réalisation n'est encore apparue ; par contre, plusieurs démonstrations d'applications civiles sur des bateaux de toutes tailles ont été réalisées depuis le début des années 2000, que ce soit pour la propulsion ou pour la fourniture d'énergie par des auxiliaires (APU, Auxiliary Power Unit).
Quelques exemples sont donnés ci-après:

- la réalisation la plus ancienne est le voilier *Branec III* de Roger Langevin, qui a participé à la *Course du Rhum* (novembre 2002), avec un APU de 300 W à pile à combustible (de type PEM), fourni par une jeune société du Havre, *Alca Torda Applications.* Cette pile était alimentée par un réservoir d'hydrogène sous 200 bars et a parfaitement fonctionné tout au long de la course.

- un taxi marin (*Duffy Water Taxi*) (cf. Fig. 1) pour 18 passagers, conçu par la société *Duffy Electric Boat Company*, a été inauguré en octobre 2003 dans la baie de San Francisco ; il était propulsé par un ensemble constitué d'une pile à combustible de 6 kW (type PEM) hybridée avec une batterie, fourni par *Anuvu Inc*. L'hydrogène était fourni par un système de stockage sur borohydrure (fourni par *Millenium Cell* aujourd'hui disparu). La société *Duffy Electric Boat* existe toujours mais n'a pas reproduit ce prototype apparemment aujourd'hui abandonné.

Figure 1 - Le Duffy Water Taxi (2003)

- En 2003, un projet de bateau de type loisirs-familial, soutenu par l'Office Fédéral Suisse de l'énergie, a abouti à la mise en service, en octobre 2003, de l'*Hydroxy3000* (cf. Fig. 2) pouvant transporter 7 passagers sur le lac de Neuchâtel. Il était équipé d'une pile PEM de 3 kW alimentée en hydrogène (1 kg) stocké sous 200 bars. Vidéo: https://www.youtube.com/watch?v=qg3oWIOg6Lg

Figure 2 - Le prototype « Hydroxy3000 » (2003)

- En 2005, trois concurrents de la Minitransat (dont le vainqueur) étaient équipés d'un APU (auxiliaire) à pile à combustible alimentée en méthanol, commercialisée par la société allemande *Smart Fuel Cell*.(SFC Energy AG - Piles EFOY Comfort) Ces générateurs sont maintenant disponibles sur catalogue[1]. Leur puissance est dans la gamme 60 - 100 W et le prix de vente en France (en 2017) est voisin de 4 400 € pour un générateur de 72 W. Ce coût peut paraitre élevé mais d'après les marins, les avantages (bruit, odeurs) justifient ce type d'achat.

[1] https://www.efoy-comfort.com/sites/default/files/Flyer_EFOY_Marine_FR_210813_online_0.pdf

- Fin 2007, le motoriste finlandais *Wärtsila* a équipé d'une pile à combustible SOFC de 20 kW alimentée au méthanol, un navire de la compagnie suédoise *Wallenius Marine*. Cette pile était utilisée en générateur de secours lors des escales, en particulier.

- En septembre 2007, l'Université de Birmingham (G.B.) a conçu et réalisé une « pénichette » baptisée « *Ross Barlow* » (cf. Fig. 3) destinée à des transports dans les nombreux canaux de la ville. Elle était équipée d'une pile à combustible de 10 kW alimentée en hydrogène (2,5 kg) stocké sur hydrures, et d'une batterie au plomb. En 2017, il était toujours en service.

Figure 3 - Le Ross Barlow (2007)

- Dans le cadre du projet européen ZEMSHIPS, un bateau de 100 places (25m de long) à pile à combustible (deux modules de 50 kW, de chez Proton Motor) a été lancé en août 2008, sur la rivière Alster qui traverse Hambourg. Il est baptisé « *Alsterwasser Zemship* » (cf. Fig. 4). L'hydrogène (50 kg) était stocké sous 350 bars (réservoirs Dynetek). Des batteries au plomb étaient montées en tampon. Ce bateau naviguait encore en 2018.

Figure 4 - *Alsterwasser Zemship* (2008)

- Le 24 avril 2008, *Icelandic Hydrogen* a procédé, dans le port de Reykjavik, au lancement d'un bateau (cf. Fig. 5) équipé d'une pile à combustible de 10 kW en APU. Cette démonstration s'est effectuée dans le cadre du projet européen SMART-H2.

Figure 5 - Icelandic Hydrogen (2008)

- En décembre 2009, les chantiers norvégiens Eidesvik ont présenté le « *Viking Lady* » (cf. Fig. 6), navire équipé d'une pile à combustible allemande MTU de type MCFC et d'une puissance de 320 kW. La pile était directement alimentée en gaz naturel. Ce projet, démarré en 2003, s'est développé dans le cadre du projet européen *FellowSHIP* (financé par la Norvège et Eureka). La pile était utilisée comme source d'appoint (APU). Cette installation a fonctionné de manière satisfaisante durant 18 500 heures.

Figure 6 - Le « Viking Lady » (2009)

- En décembre 2009, a été présenté le bateau de croisière (100 places) à pile à combustible (60 kW) baptisé *Nemo H2* (cf. Fig. 7) destiné à la navigation dans les canaux d'Amsterdam. Il embarque 24 kg d'hydrogène à 350 bars. Ce projet avait démarré en janvier 2007 avec le consortium *Fuel Cell Boat BV,* qui réunit des compagnies hollandaises (Alewijnse, Integral, Linde Gas, Marine Service North et la shipping company Lovers). L'hydrogène est produit par électrolyse avec un courant fourni par des éoliennes. Ce bateau est toujours en service à ce jour : le contrat en cours pourrait se terminer en décembre 2021

Figure 7 - Le bateau de croisières « NemoH2 » (2009)

- En juin 2010, la société finlandaise *Wärtsilä* a équipé le navire de transport de voitures *Undine* (cf. Fig. 8) de la compagnie suédoise *Wallenius*, de son système à pile SOFC WFC20 (pile conçue par *Topsoe Fuel Cell*), d'une puissance de 20 kW (APU). La pile est directement alimentée en méthanol (reformage anodique). Ce projet a été réalisé dans le cadre du projet européen METHAPU (FP6). Ce bateau, ainsi équipé, a appareillé en mai 2010. Les prochaines étapes annoncées sont l'équipement de navires avec des piles de 50 et 250 kW.

Figure 8 - Le cargo « Undine » (2010)

- En mars 2011, le voilier "Zéro CO2" (cf. Fig. 9) , développé dans le cadre d'un partenariat CEA - Université UJF - Floralis et le chantier naval Fora Marine, a été autorisé à naviguer. Il est équipé d'une source hybride batterie Li + pile à combustible de 25 kW (développée par le CEA). Il a été conçu pour recueillir des données environnementales en Méditerranée. Il a déjà effectué plusieurs missions avec succès et était toujours en service en 2017.

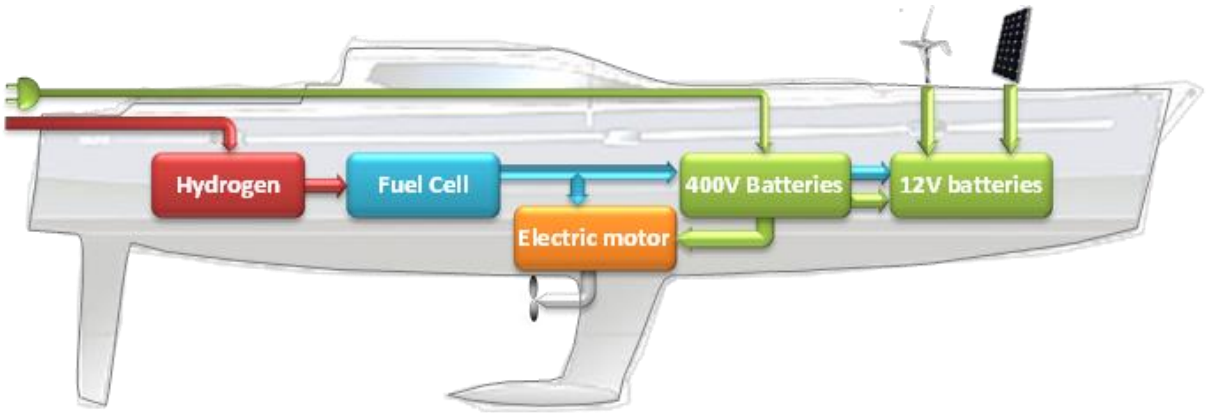

Figure 9 - Le voilier Zéro CO2 (2011)

- A Nantes, Navibus est un service public de transport en commun par navettes fluviales qui permet la traversée de la Loire et de son affluent l'Erdre. En 2016, ce service avait transporté 636.000 passagers environ, dont 66.000 pour la traversée de l'Erdre, le reste sur la Loire. Le nombre moyen de rotations par jour est de 95 traversées, sept jours sur sept, indique la *Semitan* (Société d'économie mixte des transports en commun de l'agglomération nantaise). Un prototype à pile à combustible (projet **NavHybus**) a été développé à partir de 2010: c'est un bateau prototype de navette fluviale. Conçu pour 25 passagers et 10 vélos, il est alimenté par une pile à combustible à hydrogène de 5 kW. Le «**Jules-Verne 2**», tel est son nom, a été mis en service le 23 avril 2018, comme passeur de l'Erdre, effectuant la liaison entre Port-Boyer et les facultés.

Figure 10 - le NavHybus "Jules Vernes 2" à Nantes

- Début 2014, la DCNS (centre d'Indret, près de Nantes) et la Mission Hydrogène des Pays de la Loire ont annoncé le lancement du projet **FILHyPyNE** (pour Filière Hydrogène pour la Pêche polyvaleNtE) qui a pour objet l'alimentation propre d'un prototype de bateau de pêche de 12m. Il ne semble pas que ce projet ait fait l'objet d'une réalisation.

- En novembre 2014, l'administration américaine MARAD a annoncé qu'elle testait à bord du *Kennedy* (cf. Fig. 11) une pile à combustible destinée aux systèmes électriques à bord.

Figure 11 - Tests de piles à bord du *Kennedy* (2014)

- En juin 2015, un consortium d'entreprises japonaises a décidé de se lancer dans un projet de navire à pile à combustible à hydrogène. Les tâches sont ainsi réparties : *Yamaha Motor* s'occuperait de la coque, *Flat Field* fournirait des pièces pour les piles à combustible, *Iwatani* se consacrerait au support technique concernant l'hydrogène. *Toda* devrait être l'entreprise gérant le projet dans sa globalité avec le soutien du ministère de l'environnement. Un financement NEDO est prévu. L'un des principaux enjeux était de réduire le coût du navire afin de pouvoir le commercialiser pour les Jeux Olympiques 2020. Les caractéristiques du navire sont: 10T - 12,5 m de long. - Vitesse 37 km/h

- En octobre 2015 a été livré par *Sunfire* à *ThyssenKrupp Marine Systems* un module SOFC de 50 kW (cf. Fig. 12) dans le cadre du projet allemand **SchiBZ** (*Ship-Integrated Fuel Cell Project*). Il devait être testé en mer d'ici la fin 2016 à bord du bateau *MS Forester*. Aucune autre information n'a été fournie depuis.

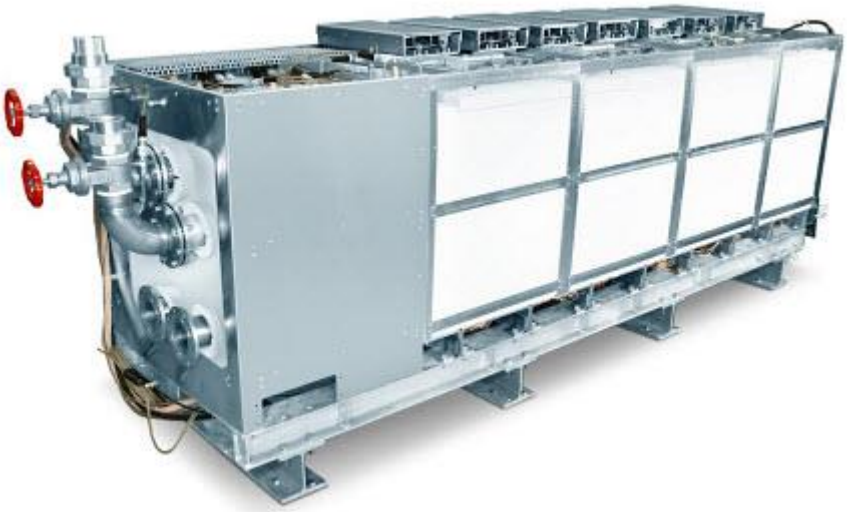

Figure 12 - Le module SOFC 50 kWe du projet SchiBZ.

- En février 2016, *CMR Prototech* a annoncé le projet d'équiper, d'une pile à combustible de 200 kW et de batteries Li-ion (100 kWh), un car ferry norvégien, baptisé “MF Ole Bull” (cf. Fig. 13) sur la rivière Osterøy. La consommation d'hydrogène serait de 150 kg/jour. Un générateur à pile à combustible remplacera un des deux moteurs diesel en place.

Figure 13 - Le car ferry"MF Ole Bull"

- En septembre 2016 s'est achevé le projet **e4ships** qui avait été lancé en 2013 dans le cadre du programme allemand NOW. Il a eu pour objet d'étudier l'introduction de la pile à combustible à bord d'un navire.

- En octobre 2016, la compagnie américano-norvégienne *Royal Caribbean Cruises Ltd*., (RCL) connue pour ses célèbres bateaux de croisière, a annoncé que ses nouveaux navires qui seront livrés à partir de 2022 seraient équipés de systèmes d'énergie à LNG pour la propulsion et piles à combustible pour les services de bord, afin de réduire ses émissions de gaz à effet de serre. En attendant, RCL a dû tester ce système, dès 2017, sur l'un de ses navires de la classe OASIS.

- En décembre 2016, la société *Fiskerstrand Holding AS* a annoncé qu'elle avait été admise parmi les 5 projets norvégiens **Pilot-E** et qu'elle pourrait être subventionnée pour le développement d'un ferry à pile à combustible (cf. Fig. 14). Ce projet s'intitule **HYBRIDShips** (pour "hydrogen and Battery Technology for Innovative Powertrains in ships.").

Figure 14 - Projet de ferry norvégien HYBRIDShips (2017)

- En décembre 2016, il a été annoncé que le catamaran **PlanetSolar** qui avait effectué un premier tour de monde entre 2010 et 2012, alimenté avec des cellules solaires, est reparti faire un 2ième tour du monde pendant 5 ans (2017-2021) avec de l'hydrogène (obtenu par électrolyse de l'eau de mer). il a été rebaptisé **Race for Water** (cf. Fig. 15). Plus précisément il est équipé d'un système, construit par

Swiss Hydrogen, de production, stockage et conversion d'hydrogène comportant: 25 réservoirs de stockage sous 300 bars, deux piles à combustible de 30 kW chacune, deux électrolyseurs de 5 kW, 500 m² de panneaux photovoltaïques, et 4 batteries Li-ion (754 kWh). Tout compris, le bateau peut stocker une énergie de 2 800 kWh qui lui assurent 6 jours d'autonomie énergétique. En novembre 2018, il poursuivait son périple comme prévu.

Figure 15 - Le catamaran Race for Water, à Paris (2015)

- En 2017, est testée à Lyon une petite navette fluviale à hydrogène à foils, baptisée ***SeaBubbles*** (cf. Fig. 16) dont le concepteur est Alain Thébault.

Figure 16 – Le SeaBubbles (2017 - *Version 2020)*

En juin 2020, Alain Thébault annonce en avoir vendu 5 exemplaires. Les clients sont les villes de Lyon, Cassis, Paris (Issy-les-Moulineaux), Nantes et Genève. Dans un article, Le Figaro précise que la région Auvergne-Rhône-Alpes a versé un acompte de 5 000 euros à la start-up et compte bien continuer à accompagner son développement. Etabli d'abord en Suisse, le créateur des SeaBubbles s'est installé à Lyon et veut produire ses bateaux volants dans la région. Pouvant transporter 4 personnes et un pilote, les SeaBubbles coûtent 250 000 euros. A Lyon, le bateau pourra se ravitailler

à une station installée sur le port Édouard Herriot En décembre 2020, l'activité a été rachetée par *Mediapps Innovation,* un fonds lyonnais. Un problème subsiste car le SeaBubbles doit se déplacer à 40 km/h pour se placer sur ses foils, alors que la réglementation sur les fleuves impose une vitesse max. de 12km/h ! (voir suite en sept. 2022, plus bas)

- En avril 2017 a été officiellement lancé "**Energy Observer**" (cf. Fig. 17). C'est un catamaran (d'un ancien voilier) équipé d'un «mix d'énergies renouvelables» qui lui permet une totale autonomie: 130m² de panneaux solaires, deux éoliennes à axe vertical et une voile de kite qui permet de diminuer la dépense énergétique des moteurs. Les énergies solaire et éolienne captées seront stockées grâce à de l'hydrogène produit par électrolyse d'eau de mer dessalée par osmose inverse. L'hydrogène (62 kg max.) est stocké à 350 bars et alimente une pile à combustible de 22 kW. Ses sources d'énergie ont été développées avec l'aide du CEA/LITEN. Mis à l'eau en avril 2017 à Saint-Malo, il a fait le tour de la Méditerranée et est revenu à St Malo en octobre 2018, pour subir une série d'améliorations. Il poursuit actuellement sa mission prévue de s'achever en 2024. En juillet 2021 il avait déjà effectué 40 000 miles nautiques.

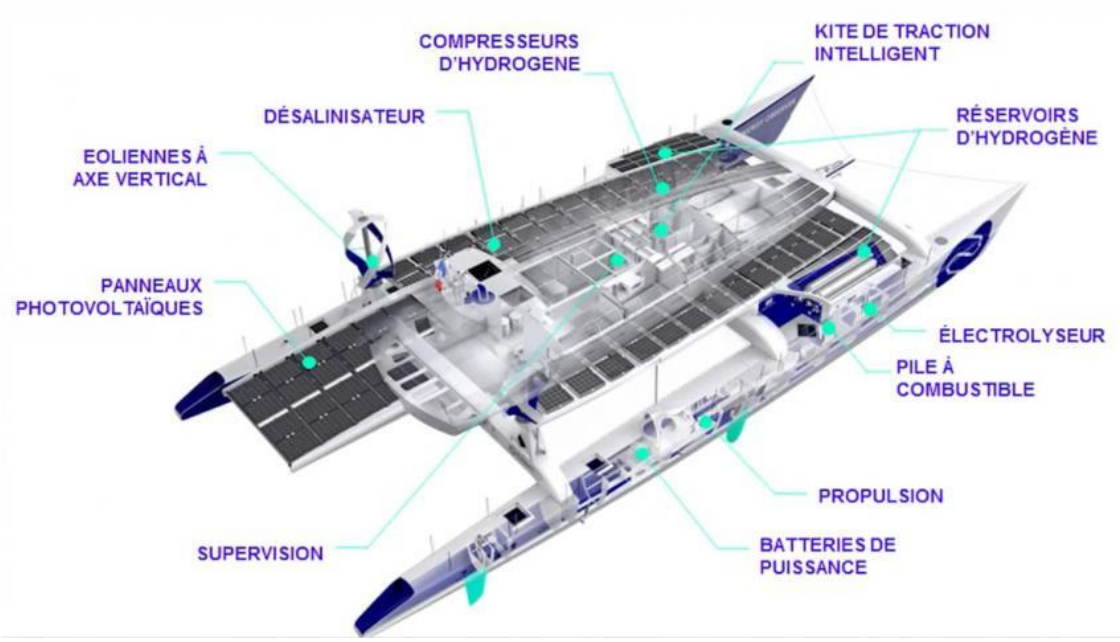

Figure 17 – Energy Observer (2017)

- En avril 2017, les compagnies *PowerCell Sweden AB* et *Nimbus Boats Sweden AB* ont signé une lettre d'intention de partenariat pour l'équipement électrique avec des piles à combustible MS-20, d'un bateau de type **Nimbus 305 Coupe**. La puissance installée sera de 50 kW.

- En juillet 2017, la **Norwegian Public Roads Administration** déclare s'intéresser au ferry à hydrogène.

- En août 2017, le **MS Innogy** navigue depuis cette date près d'Essen, outre-Rhin, dans les eaux du lac Baldeneysee. Il s'agit d'un bateau (cf. Fig. 18) équipé d'une pile à combustible de type HT PEM de 35 kW alimentée en méthanol en prolongateur d'autonomie d'une batterie de 100 kWh. Ce système a été développé par la société Danoise *SerEnergy*, dans le cadre d'un partenariat avec *Innogy*, une entreprise énergétique allemande spécialisée dans les énergies renouvelables

Figure 18 - Le MS Innogy (2017)

- En octobre 2017, une navette maritime "Bus de mer" [2] à pile à combustible a été mise en service à La Rochelle pour relier le Vieux-Port aux Minimes (cf. Fig. 19). Elle est le fruit d'une collaboration entre l'Ademe, UTBM, Michelin (qui a fourni la pile de 10 kW), Proxiway et HP Systems. Elle embarque 7kg d'hydrogène sous 350 bars.

Figure 19 - Le "Bus de Mer" à La Rochelle (2017)

- En novembre 2017, la société *ABB* a livré une pile de FCvelocity de 100 kW, fabriquée par Ballard et destinée à équiper un bateau de la *Royal Caribbean International*.

- En novembre 2017, la compagnie *CMB Technologies* a mis à l'eau, en Belgique, le démonstrateur **Hydroville** (cf. Fig 20) équipé de deux moteurs thermiques alimentés en diésel et hydrogène. Dans une première phase il transporte des passagers de Kruibeke à Antwerp, en Belgique.

[2] https://www.flickr.com/photos/agglolr/sets/72157688400870574

Figure 20 – Le démonstrateur Hydroville (2017)

- En avril 2018, *Yanmar Co., Ltd*. avec *le National Maritime Research Institute* (NMRI) et le *Japan Ship Technology Research Association (JSTRA)* ont participé à des tests de sûreté sur un bateau baptisé **Shimpo** (cf. Fig. 21) à pile à combustible à hydrogène de 60 kW pour le compte du ministère japonais MLIT (*the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism*) et dans le cadre d'un projet de 3 ans débuté en 2015. Cette pile, marinisée, est le fruit d'une collaboration entre *Yanmar*, *Toyota* et *Ballard* et a été hybridée avec une batterie Li-ion.

Figure 21 – Plateforme d'essai Shimpo de Yanmar (2018)

- En juin 2018, *Ferguson Marine Engineering Limited,* à Glasgow, a annoncé le lancement, au 1er juillet 2018, du projet européen **HySeas III** qui a pour objectif la construction et le lancement d'un ferry à hydrogène.

- En juin 2018, la compagnie maritime *Red and White Fleet* (croisières dans la baie de San Francisco), en partenariat avec *Golden Gate Zero Emission Marine*, annonce avoir décidé d'acheter un bateau à pile à combustible baptisé **'Water-Go-Round'**, au printemps 2020.

- En juin 2018, les compagnies *ABB* et *Ballard Power Systems* ont signé un Memorandum of Understanding (MoU) pour le développement d'une nouvelle génération de piles pour les applications marines dans la gamme des 3 MW.

- En décembre 2018, la société norvégienne *Havila Kystruten* a fait part du projet **Havyard** (cf. Fig. 22) subventionné à hauteur de 9,7 M€ dans le cadre du programme national **Pilot-E**. Il sera équipé d'un système hybride batteries – piles à combustible et devrait être opérationnel en 2022.

Figure 22 – Le projet Havyard (2018)

- En janvier 2019, la *Japan Fisheries Research and Education Agency (FRA)* a annoncé qu'elle s'associait à *Toyota Motor Corp* pour développer un générateur à pile à combustible à hydrogène pour des bateaux de pêche (cf. Fig. 23). Premiers tests prévus en 2022.

Figure 23 – Projet de bateaux de pêche de la *Japan Fisheries Research and Education Agency* *(2019)*

- En janvier 2019, la société norvégienne *Norled AS* a annoncé avoir signé un accord avec la *Norwegian Public Roads Administration* pour la construction d'un ferry à pile à combustible qui pourrait être opérationnel en 2021. Il pourra transporter 300 passagers et 80 voitures. Il sera équipé de deux piles Ballard de 200 kW alimentées à partir d'un réservoir d'hydrogène liquide.
- En juillet 2021, ce ferry est livré (cf. Fig. 24).

Figure 24 – Le ferry de Norled AS (2021)

- En janvier 2019, la société *Korea Marine Equipment Research Institute* (KOMERI) a signé un accord avec des partenaires locaux pour développer des équipements de propulsion de navires avec une pile à combustible de type SOFC ; ce type de technologie présente l'avantage –en comparaison avec la technologie PEM- de pouvoir alimenter la pile aussi bien en combustible hydrocarbure qu'en hydrogène.

- En mai 2019, l'ADEME a publié la liste des 11 projets retenus dans le cadre de l'Appel à propositions de juin 2018 (Ecosystèmes et mobilité hydrogène) ; parmi ceux là figure le projet de navettes maritimes pour la rade de Toulon présenté par le consortium **Hynovar**.

- En novembre 2019, La compagnie française *HELION Hydrogen Power* annonce qu'elle s'apprête à travailler avec la compagnie française *Crew* et *Orion Naval Solutions* pour le développement d'une barge fluviale propulsée par une pile à combustible (Projet **HyBarge**).

- En mars 2020, est présenté en Allemagne le pousseur de barges fluviales baptisé **Elektra** (cf Fig. 25) en cours de construction et développé par la société allemande BEHALA. Il est équipé de 3 piles à combustible Ballard de 100 kW.

Figure 25 – le pousseur fluvial Elektra (2020)

- En juin 2020, **MSC Croisières** annonce que son prochain navire *MSC Europa*, construit par les Chantiers de l'Atlantique et livré en avril 2022, embarquera une pîle à combustible de type SOFC (technologie CEA Liten) de 50 kW, alimentée en GNL (cf. Fig. 26).

- En juin 2020, **Bloom Energy** et **Samsung Heavy Industries** annoncent avoir signé un accord pour le développement de navires à pile à combustible.

- En septembre 2020, Les chantiers **Fincantieri** annoncent le futur lancement du prototype expérimental **Zeus** qui serait livré en 2021. D'une longueur de 25m, Zeus sera une plateforme expérimentale destinée aux tests d'une pile à combustible de 130 kW fournie par *Proton Motor Power Systems.*

- On annonce, en avril 2021, que sera livrée une barge fluviale à hydrogène qui naviguera sur la Seine, dans le cadre du projet européen FCH-JU **Flagships** (11 partenaires européens) (cf. Fig. 27). Il sera opéré par la *Compagnie Fluviale de Transports* (CFT). Un deuxième exemplaire sera mis en oeuvre en Norvège.

Figure 26 – le futur bateau de croisière MSC Europa (2022) embarquera une pile SOFC du CEA

-

Figure 27 – La barge fluviale du projet européen Flagships (2021)

- En 2021 est mis à l'eau au Japon le ferry **HydroBingo**. Il transporte 80 passagers La propulsion est assurée par un moteur Diésel alimenté en hydrogène ou en Diésel (cf. Fig. 28). Il est le fruit d'une collaboration belgo-japonaise (CMB et Tsuneishi).

Figure 28 - Le ferry HydroBingo (2021)

- En août 2021 est mis à l'eau le prototype **Sea Change** (cf. Fig. 29) construit par les chantiers *All American Marine* et sera utilisé dans la *California Bay Area.* Il peut transporter 75 passagers. Il est propulsé à partir d'une pile à combustible *Cummins* de 360 kW couplée à un stockage électrique Li-ion (100 kwh) et alimentée en hydrogène à partir d'une réserve de 246 kg.

Figure 29 – Le prototype américain Sea Change (2021)

- En octobre 2021, *l'International Maritime Organization* (IMO) impose une réglementation dédiée aux bateaux alimentés par une pile à combustible qui prendra effet en mai 2022 avec l'accord du *Maritime Safety Committee*.

- En octobre 2021, le *Royal Caribbean Cruises Group*, qui possède une flotte de navires de croisière luxueux, annonce pour 2023 un paquebot qui utilisera uniquement la pile à combustible pour la navigation dans les ports.

- En décembre 2021, un bateau transporteur (affrété par *Kawasaki Heavy Industries*) d'hydrogène liquide a quitté le Japon pour charger sa première cargaison en Australie (cf. Fig 30)

Figure 30 – Le transporteur d'hydrogène liquide entre l'Australie et le Japon (2021)

- En avril 2022, **Emirates Team New Zealand** fait état de tests du *Foiling Chase Zero* (cf. Fig. 31) alimenté en hydrogène stocké à 350 bars (32 kg embarqués). Il a une autonomie de 180 km et atteint une vitesse de 50 nœuds.

Figure 31 – Le prototype *Foiling Chase Zero* (2022)

- En juillet 2022, le catamaran **Energy Observer,** lancé en 2017, poursuit son voyage autour du monde. Il a déjà parcouru 50 000 miles nautiques et fait 72 escales dans 40 pays.

- En août 2022, le **SWIM Consortium** a lancé à Rotterdam un taxi marin (cf. Fig. 32) à pile à combustible (module Y50 hollandais) baptisé MSTX 22 et pouvant transporter 12 passagers à 13 nœuds. Il transporte 14 kg d'hydrogène pour une journée de travail.

Figure 32 – Le taxi à pile à combustible MSTX 22 (2022)

- En septembre 2022, a été présentée à Cannes la dernière version de la **SeaBubble** (cf. Fig. 33), alimentée par un système hybride composé d'une pile à combustible à hydrogène et d'une batterie. Elle emporte environ 10kg d'hydrogène à 350 bars ; le SeaBubble atteint la vitesse de 18 nœuds (avec des foils) avec 12 passagers.

Figure 33 – Le SeaBubble à foils (2022)

3. Applications sous-marines

Les premiers projets eurent une vocation militaire, mais quelques décennies plus tard des projets civils ont vu, à leur tour, le jour.

3.1 – Applications militaires habitées

Les sous-marins militaires doivent satisfaire deux contraintes essentielles :
- grande autonomie en immersion[3]
- discrétion (sonore et thermique)

[3] En immersion, un sous-marin traditionnel fonctionne et se déplace grâce aux batteries. Ces batteries sont rechargées à partir des moteurs diésel ce qui oblige le sous-marin à faire souvent surface, ce qui limite sa discrétion.

Du fait de leur incapacité à embarquer une énergie suffisante sur batteries, les sous-marins conventionnels, qui utilisent les moteurs diesel et parfois les turbines à gaz en navigation de surface ou sub-surface, ont une autonomie en immersion très faible. Une solution intermédiaire qui consiste à utiliser un moteur thermique en immersion a déjà été testée, mais elle présente de nombreux inconvénients :

- elle impose l'embarquement du comburant oxygène, qui est d'autant plus encombrant que le rendement du convertisseur thermique est faible,
- elle impose un rejet à l'extérieur de la coque d'une partie des gaz d'échappement, ce qui est à la fois une source de faiblesse mécanique de la coque, une source sonore et une source de chaleur qui nuisent à la discrétion,
- elle est beaucoup plus bruyante si on ajoute le bruit propre du moteur thermique.

Le remplacement de l'alimentation par batteries par une pile à combustible évite l'obligation de refaire surface. De plus, le rendement très supérieur de la pile à combustible, en particulier à charge partielle, conduit à une augmentation spectaculaire des performances en immersion de ces sous-marins (autonomie, discrétion acoustique, signature thermique). Cet avantage est dû à la forte densité énergétique du combustible hydrogène et du comburant oxygène embarqués, comparée à celle d'un ensemble de batteries. De plus, l'utilisation de moteurs électriques synchrones à aimant permanent, particulièrement silencieux, améliore la discrétion du sous-marin.

- **Projets HDW**

C'est à la fin des années 70 que le Ministère de la Défense de l'Allemagne, a lancé les premières études sur cette nouvelle technologie. Dès la fin des années 80, se déroulèrent les premiers tests en mer à bord d'un sous-marin de la Classe 205. Les partenaires étaient les chantiers navals de HDW (*Howaldswerke Deutsche Werft*) à Kiel et le concepteur de piles à combustible était Siemens. Pour des contraintes de volume et de masse (donc de flottabilité), il avait été choisi de stocker l'hydrogène dans trois cylindres remplis d'hydrures métalliques FeTi (d'une capacité massique inférieure à 2%) positionnés à l'extérieur de la coque étanche. Quant à l'oxygène, il était stocké sous forme cryogénique dans deux cylindres, eux aussi placés entre la coque et la superstructure. Pour des raisons de disponibilité de technologie, les premiers tests ont été effectués avec une pile à combustible de type AFC (Alkaline Fuel Cell) d'une puissance de 100 kW.
Dans une deuxième phase, la mise en œuvre d'une pile à combustible de type PEMFC (cf. Fig. 34), toujours conçue par Siemens, a été réalisée à bord d'un sous-marin de la Classe 212 (cf. Fig. 30), à un niveau de puissance de l'ordre de 300 kW (9 modules de 30 kW, dont un en secours) et complétée par une batterie au plomb. Un réservoir de 160 T d'hydrure FeTi stocke 20 000 Nm^3 d'hydrogène. L'eau produite était utilisée par le réseau sanitaire.

Figure 34 - Le module PEMFC 300 kW de Siemens

Le premier prototype opérationnel (baptisé U-31 *Wittenberg*, Class 212A, de 1700 T pour 56m de long et un équipage de 27 marins) a terminé ses essais en mars 2004 en atteignant une autonomie de 3000 km en plongée, à faible vitesse : il inclut une propulsion diesel (moteur de 3,12 MW) pour la navigation en surface et un ensemble pile à combustible-batterie, pour son fonctionnement en plongée. Il est entré en service actif dans la Marine allemande, à la mi-2004. En 2005, les allemands

ont mis en service un deuxième exemplaire, le U32 *Edenkoben*. Le sous-marin U-32 a alors battu le record du monde de plongée en restant 2 semaines en immersion (cf. Fig. 35).

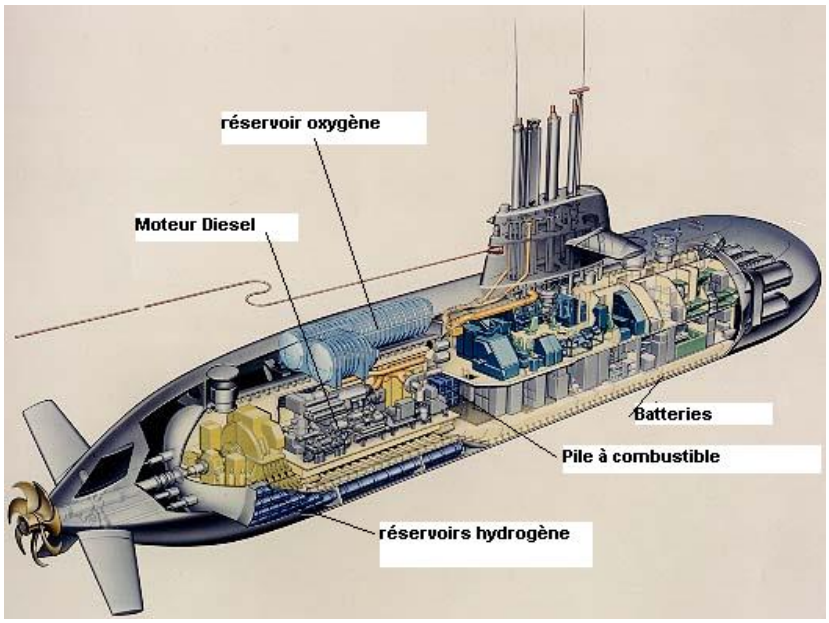

Figure 35- Le sous-marin U-212 de HDW (schéma HDW)

Figure 36 - Le sous marin U 32 (*Edenkoben)* mis en service en Allemagne, le 19 octobre 2005

- En septembre 2006**,** le consortium ARGE (HDW) a reçu commande, de la marine allemande, de 2 nouveaux sous marins à pile à combustible de la classe 212A. ARGE est constitué des compagnies

Howaldtswerke-Deutsche Werft et Nordseewerke, qui font partie du groupe ThyssenKrupp Marine Systems.

- En juin 2006, la marine allemande a mis en service le U33.

- En juin 2007 la marine allemande a mis en service le U34 dans la base d'Eckernförde. Le sous-marin est de même type que le U32. Il peut atteindre une vitesse de 37 km/h. Il coûte environ 450 millions d'euros. Le U34 est le quatrième de cette classe dans la marine allemande. En mars 2015, le U35 a été mis en service ; il a battu un nouveau record pour ce type de sous-marin: 18 jours consécutifs en immersion totale**.** Il a été suivi du U36 (cf. Fig. 38) en octobre 2016.
Les principales caractéristiques techniques de l'U36 sont les suivantes:

Longueur totale approx. 57 m
Hauteur totale approx. 11.5 m
Diamètre max: approx. 7 m
Déplacement: approx. 1 500 t
Equipage: 28 marins

Systèmes de propulsion: Diesel + pile à combustible HDW (9 stacks PEM de 34 kWe unitaire).

- En octobre 2016, la Marine allemande a annoncé qu'elle avait pris la décision de commander deux autres exemplaires de l'U212A.

Siemens poursuit l'amélioration de ses générateurs à pile à combustible et a développé une nouvelle version d'une puissance de 120 kW (SINAVY^{CIS}) destinée à des sous-marins plus lourds de type 214.

Figure 37 - Le lancement du *Salvatore Todaro* italien mis en service en 2006

Plusieurs autres pays, qui ne possèdent pas de sous-marin nucléaire et, ni ne souhaitent ni ne peuvent en acquérir, ont déjà passé commande de ce type de sous-marin:

- La *Grèce* en a commandé 4 exemplaires en février 2000, et fait la rénovation d'anciens sous-marins de la Classe 209, en mars 2004,
- L'*Italie* en a commandé deux mis en service en 2006 (*Salvatore Todaro*) (cf. Fig. 37), et 2007 (*Scire*) et en a commandé deux autres : l'un a été mis en service en juillet 2016 (*Pietro Venuti*) et l'autre (*Romeo Romei*) en mai 2017. Ils ont été construits dans les chantiers Fincantieri. Deux autres sont envisagés.
- Le *Portugal* en a commandé deux en avril 2005 pour une livraison en 2010, plus un troisième en option,
- La *Corée du Sud* a passé commande d'une rénovation (avec pile à combustible) de plusieurs sous-marins existants. Elle a reçu livraison du premier en décembre 2007.
- La *Turquie* a passé commande de 6 exemplaires
- *Israël* a commandé 6 exemplaires de l'U 212, déjà livrés.
- La *Pologne* avait annoncé en décembre 2013 qu'elle louerait 2 exemplaires de l'U212-A

Figure 33 - Le lancement de l'U36 (mai 2013)

- En septembre 2019, *Thyssenkrupp Marine Systems* (TKMS) a dévoilé la 4ième génération de sa pile à combustible (FC4G) destinée aux applications sous-marines, après 15 années d'expérience et 70 000h de fonctionnement. Elle est toujours alimentée en hydrogène à partir d'un stockage sur hydrures. Après 38 systèmes déjà en service chez 7 clients, *Thyssenkrupp* fait savoir que 10 autres systèmes sont en cours de négociation.

- **Autres projets**

- Les chantiers espagnols *Navantia S.A.* (Carthagène) ont annoncé, en août 2006, le développement d'un sous-marin, de la classe S-80 (2 500 T), destiné à la marine espagnole, qui sera équipé d'une pile à combustible de type PEM de 300 kW fournie par l'américain *UTC Aerospace*[4]. La pile sera alimentée par de l'hydrogène produit à bord par reformage d'éthanol et par de l'oxygène stocké dans un réservoir fourni par *Air Liquide*, qui l'a présenté au printemps 2009 dans sa revue *Cryoscope*, n°43. L'autonomie en plongée sera de 2 semaines avec une vitesse max. (en plongée) de 19 nœuds. Dans une première phase, il est prévu d'en construire 4 exemplaires. La première livraison était prévue en 2017 mais en juillet 2017 le constructeur a annoncé des problèmes techniques dus à une masse excessive. Pour résoudre ce problème le sous-marin a été rallongé de 7 mètres amenant une augmentation de masse de 75 T. Le lancement est actuellement prévu en septembre 2022.

- L'Inde, via la *Defence Research Development Organisation* (DRDO), annonce en 2008 le développement d'un sous-marin à pile à combustible. Les travaux de recherche et développement sont menés au Laboratoire Naval de Recherche sur les Matériaux (NMRL) à Mumbai pour développer une pile à combustible. En octobre 2019, le DRDO a annoncé que le prototype à terre a été testé avec succès.

- La marine russe s'intéresse aux sous-marins à pile à combustible depuis le début des années 2000 et a chargé, en mai 2010, le chantier naval de Saint-Pétersbourg d'en construire 2 exemplaires (Classe Lada) dans le cadre du Projet 677, avec une prolongation possible de 6 autres. Une version exportable a aussi été conçue (Projet 1650 Amur Class). Le projet semble toujours en cours mais aucune construction n'a encore été annoncée en 2019.

- En octobre 2014, la Marine Nationale a annoncé qu'elle étudiait et mettait au point un système baptisé AIP (Air Independant Propulsion) sur son site DCNS d'Indret à Nantes, sur la base d'une pile à combustible de seconde génération (FC-2G) alimentée avec de l'hydrogène produit à bord du sous-marin par reformage de gazole; elle est proposée sous forme de module autonome

[4] http://utcaerospacesystems.com/cap/products/Pages/fuel-cell-power-module.aspx

logeable dans un tronçon de coque. L'oxygène est stocké sous forme cryogénique et mélangé à de l'azote avant son introduction dans la pile pour diminuer son agressivité chimique. La pile a déjà subi de nombreux tests (cf. Fig. 39). Elle permettrait une immersion d'un UUV [5] pendant 3 semaines.

Figure 39 - Test du démonstrateur AIP DCNS (mai 2016 - document DCNS)

En octobre 2019, *Naval Group* (ex-DCNS) annonce qu'il a testé avec succès pendant 18 jours la 3ième génération d'AIP sur le site d'Indret (cf. Fig. 40 et 41). Il est prêt à être commercialisé.

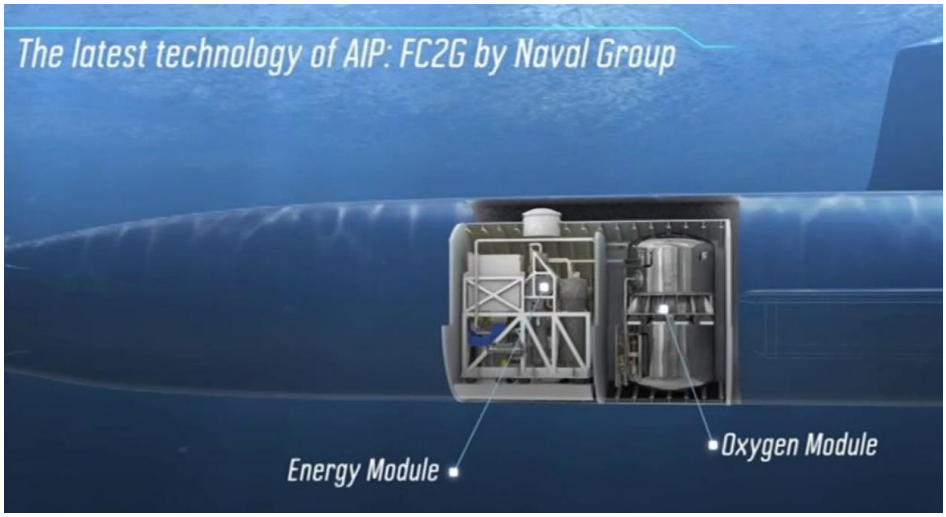

Figure 40 – Test réussi de l'AIP 3ième génération à Indret (2019)

[5] UUV: Unmanned Underwater Vehicle

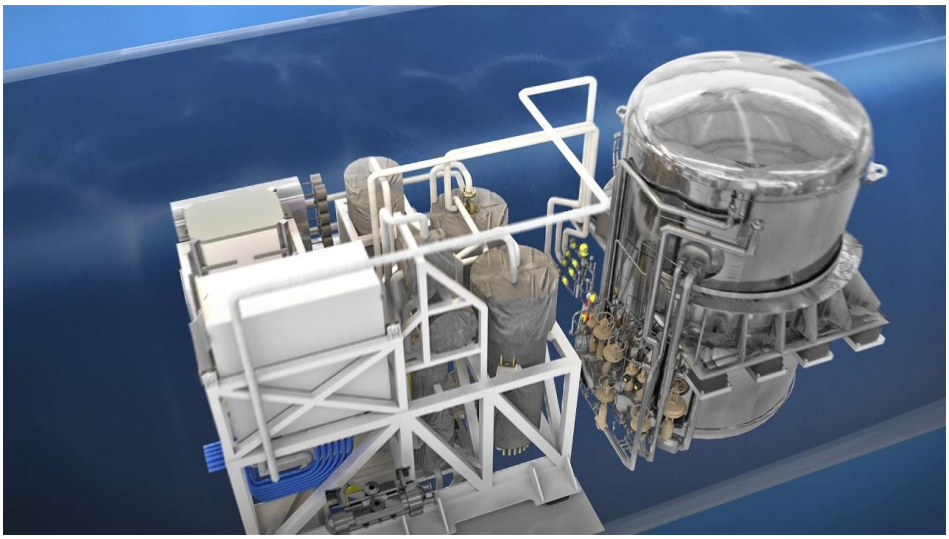

Figure 41 – l'AIP 3ième génération de Naval Group (2019)

- En novembre 2020, l'US Navy passe commande d'électrolyseurs PEM équipés de cellules Raytheon Technologies, auprès de *Nel-ASA*. Ils sont destinés à équiper des sous-marins nucléaires.

3.2 – Applications civiles et militaires inhabitées

- La *Japan Agency for Marine Earth Science and Technology* (JAMSTEC), qui a conçu de nombreux engins sous-marins autonomes d'observation et d'exploration AUV (Autonomous Unmanned Vehicles), a étudié, depuis 1997, une version à pile à combustible de type PEMFC constitué de deux modules de 4 kW à plaques bipolaires métalliques.
Lancé en décembre 2000 et baptisé *Urashima*[6] *600* (cf. Fig. 42), il a réussi, en février 2005, un parcours de 317 km en immersion, sous 800m d'eau, en 56 heures. Il peut atteindre une profondeur de 1 800m. L'hydrogène est stocké dans un alliage Mn-Co-Misch metal.

Figure 42 - Le sous-marin Urashima 600

[6] https://www.researchgate.net/publication/4129901_Fuel_cell_system_of_AUV_Urashima

- En mai 2006, le JAMSTEC avait annoncé le développement de « Urashima 2 » dont l'autonomie aurait été 10 fois supérieure (3000 km) et la masse 3 fois plus élevée (30 tonnes). L'hydrogène aurait été stocké dans des hydrures et l'oxygène sera stocké sous pression. Faute d'informations nouvelles, on peut penser que ce projet a été retardé ou abandonné.

- En octobre 2009, AREVA a expérimenté sa technologie de pile à combustible (de type PEM) pour propulser un drone sous-marin autonome baptisé l'**Idefx** (cf. Fig. 43), exploité par l'Ifremer. Conçu pour la surveillance sous-marine en zone côtière, l'autonomie de ce robot sous-marin est généralement d'une centaine de km. Il a été doté d'une pile à combustible développée par la société Hélion (ancienne filiale du groupe Areva), qui lui a permis de parcourir une distance de près de 300 km en Méditerranée. Ce projet a été mené dans le cadre d'un financement ANR/PAN'H.

Figure 43 - Le drone Idefx (2009)

- En juillet 2012, la société américaine *FuelCell Energy* a reçu un premier contrat de 3,8 M$ contrat de l'US Navy pour développer une source d'énergie hybride à pile à combustible de type SOFC (fournie par *Versa Power Systems*) pour un sous-marin inhabité capable de missions de 70 jours: *Large Displacement Unmanned Underwater Vehicle (LDUUV)*

- En juin 2014, le ministère japonais de la Défense (MOD) a annoncé le développement d'un sous-marin inhabité (UUV) équipé d'une pile à combustible pour des missions de plusieurs dizaines d'heures.

- Le Japon (MOD) et l'US Navy ont décidé, en octobre 2014, de collaborer sur une recherche commune d'un sous-marin inhabité (UUV) à pile à combustible capable d'une immersion continue de un mois et destiné à la surveillance côtière. Aucune information n'a été publiée depuis cette date.

- En avril 2018, la société *Protonex* (filiale de *Ballard*) annonce une collaboration avec *Cellula Robotics* pour le développement d'un AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) inhabité à pile à combustible de grande autonomie dans le cadre du programme canadien *ADSA* (Domain Situational Awareness). Le module **IMOTUS** (Fig. 44) embarquera une source d'énergie à pile à combustible de plusieurs centaines de kWh.

- En novembre 2018, la compagnie *Cellula Robotics Ltd.* a annoncé le démarrage de la phase 3 d'un contrat public canadien (DND, DRDC, ADSA) qui doit aboutir au développement et à la réalisation d'un UUV à pile à combustible qui aura une autonomie de 2 000 km en immersion de plusieurs mois (Fig. 45)

Figure 44 – La plateforme IMOTUS (2018)

Figure 45 – Le projet d'UUV de Cellula Robotics (2018)