

# SEM-REV : un moyen d'essais en mer multi-fonctions pour les énergies marines renouvelables

Christian BERHAULT, Izan LE CROM, Gérard LE BIHAN

*Ecole Centrale de Nantes / LHEEA, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes, France, christian.berhault@ec-nantes.fr*

**RÉSUMÉ.** – Dans le cadre du CPER 2007-2013 de la Région Pays de la Loire, L'Ecole Centrale de Nantes a mis en place le site d'essais en mer, SEM-REV, dans l'objectif de compléter ses moyens et ses compétences sur le développement et la validation des EMRs. Le site d'essais est géré par le LHEEA, Laboratoire CNRS, dont un des objectifs principaux, depuis plus de 20 ans, est centré sur les EMR : houlomoteur, éolien, hydrolien, technologies hybrides. Le site d'essais est en phase finale de construction mais est déjà opérationnel pour les projets de R&D depuis 2010 et pour les démonstrateurs non raccordés depuis 2013. Il est opéré par une équipe spécifique du LHEEA. La présentation aborde les raisons qui ont conduit à sa mise en place, les étapes administratives et techniques de la construction, la description du site d'essais, les objectifs et le mode de fonctionnement, les perspectives. Un focus particulier est mis sur le modèle de fonctionnement mis en place avec le support de l'ANR pour accompagner les projets de R&D collaboratifs.

Mots-clés : Emr, Site d'essais, Construction, Exploitation

## SEM-REV: A sea test site for Marine Energy Converter

**ABSTRACT.** – Thanks to a main funding of Region des Pays de la Loire, the sea test site SEM-REV has been developed by Ecole Centrale de Nantes since 2007 to test both Wave Energy Converters and Floating Wind Turbine in real sea conditions. The sea test site is equipped with a set of oceanographic sensors and with an electric cable of 8MW, connected to the French grid. The project is located close to Le Croisic, Western coast of France. SEM-REV is one of the main test facilities operated by Ecole Centrale de Nantes to support MRE technologies development. After presenting the initial motivations of the SEM-REV development, the paper describes, in parts 1 and 2, the complete administrative and technical processes that were followed to reach SEM-REV commissioning in 2014. The third part is focused on the exploitation process, including technical and contractual specifications imposed to the MRE developers for installation, tests and decommissioning phases. Some words are given also on the R&D projects using the SEM-REV in-situ monitoring system: prediction of environmental conditions, bio-fouling, acoustic impact. Even if operational phase is not started, expected extensions of the tests site are listed.

Key-words: MRE, site test site, construction, exploitation

### I. POURQUOI UN SITE D'ESSAIS EN MER ?

La formation et la recherche dans le domaine de l'ingénierie marine et navale est un axe important de développement à L'Ecole Centrale de Nantes (ECN) depuis sa création. Naturellement les chercheurs en hydrodynamique navale, qui s'étaient spécialisés dans le domaine de tenue à la mer et dans celui de la propagation et de l'absorption de la houle en mer et en bassin, se sont orientés très tôt vers la récupération de l'énergie des vagues. Dès les années 1980, les bases théoriques des concepts étaient étudiées à l'ECN [Guével, 1986].

Le passage de la théorie « papier » à la conception d'un système produisant de l'électricité a demandé encore 10 ans et a nécessité de faire appel à un ensemble plus large de compétences (structure, matériaux, électrotechnique, contrôle commande) et a conduit également au développement d'outils numériques et de moyens expérimentaux spécifiques (bassin d'essais).

Le projet de houlomoteur Searev [Clément, 2007] a servi d'exercice d'application pour développer une expertise reconnue sur la récupération de l'énergie des vagues [Babarit, 2011], expertise qui s'est étendue aux autres ressources marines (hydrolien, éolien offshore fixe et flottant).

Les tests sur maquette à échelle réduite et dans des conditions « idéales » sont vite apparus comme insuffisants, en particulier pour valider les performances en production. Disposer d'un site d'essais en mer s'est donc imposé, dès les années 2000, comme incontournable. L'ECN avait déjà l'expérience de la mise en place de grands moyens d'essais avec, en particulier, les bassins d'essais de houle, qui sont aujourd'hui les plus utilisés dans le cadre du programme européen Marinet [Healy, 2013]. De plus il y avait cohérence à disposer, au sein d'un même organisme, de la chaîne complète des moyens et des compétences permettant d'accompagner les développeurs de technologie, de la première idée à la validation « in-situ ». Etendre l'utilisation du site d'essais aux tests de différentes technologies, à l'amélioration des connaissances de l'environnement et à l'étude de l'impact environnemental des EMRs est, par contre, apparu plus récemment.

En conséquence, SEM-REV étant un moyen d'essais d'un organisme public d'enseignement et de recherche, il est apparu indispensable de l'intégrer dans un programme de R&D couvrant les différents domaines de l'exploitation des EMR. Ce programme a été construit en s'appuyant sur la démarche Recherche Formation Innovation EMR menée

par la Région Pays de la Loire (2013 à 2014) avec le support des industriels et des académiques pour identification des verrous technologiques et non technologiques prioritaires. Ce programme R&D, supporté par les Investissements d'Avenir, via l'ANR, s'étend sur une durée de 6 ans et s'articule autour de 4 axes majeures, chacun intégrant des projets collaboratifs entre partenaires académiques et industriels :

- Axe 1 : Paramètres de l'environnement marin, pour la ressource, le dimensionnement et l'impact environnemental des EMR
- Axe 2 : Technologies de production EMRs et de stockage (Éoliennes flottantes, Houlomoteurs, Technologies hybrides)
- Axe 3 : Conversion, Transport et Stockage d'énergie
- Axe 4 : Surveillance, Sécurité, Maintenance et Opérations en mer, Formation

De par ailleurs le positionnement du site d'essais SEM-REV comparativement aux autres infrastructures européennes a permis d'identifier et de renforcer ses atouts, dont le plus important est son intégration naturelle dans un cadre R&D, l'ECN, déjà fortement présent en Europe dans le domaine des EMRs.

## II. LA CONSTRUCTION DU SITE D'ESSAIS : UN CHALLENGE !

Concevoir et construire un site d'essais en mer constituaient en eux-mêmes des projets de R&D vis-à-vis de quasiment tous les obstacles rencontrés :

- Obtenir une concession d'utilisation du Domaine Public Maritime (DPM) de longue durée (20 ans) pour tester des systèmes flottants ancrés (aspects technique et juridique encore mal précisés)
- Obtenir les différentes autorisations pour, d'une part, réaliser les travaux d'installation des équipements et de raccordement sur le réseau et, d'autre part, pour opérer/exploiter le site d'essais en mer et à terre (convention d'exploitation et contrat de rachat standards non adaptés).

L'ingénierie financière du projet était le challenge majeur. Il a été relevé par l'intégration du projet dans un CPER (Contrat Plan Etat Région). Le financement principal a été apporté par la Région des Pays de la Loire et a été complété par le Département de Loire Atlantique, du fond FEDER (Fond Européen de Développement Régional) et les contributions du CNRS et de l'ECN. La dernière brique que constitue le système de raccordement sous-marin est financée directement par le Programme des Investissements d'Avenir (PIA), via l'ANR, qui de par ailleurs co-financera également les coûts de fonctionnement sur site d'essais affectés aux projets de R&D. Le budget final des investissements atteindra environ 19 M€.

La construction du site d'essais s'est déroulée en 3 grandes étapes :

- Les études préliminaires (2008-2010):
  - Choix du site en mer sur des critères physiques (localisation, dimensions, profondeur d'eau, nature du sol), vis-à-vis des autres usagers (pêche en particulier) et de l'impact environnemental. SEM-REV étant destiné initialement au test de houlomoteurs flottants ancrés, ces choix ont été guidés par la ressource en énergie des vagues, la nature du sol, un benthos peu riche, une emprise la plus faible possible sur le DPM. Le site étant très ouvert aux vents et aux houles d'ouest de l'Atlantique et les flotteurs de houlomoteurs et d'éoliennes étant de dimensions voisines, l'extension aux tests d'éolienne flottante est apparue rapidement pertinente.
  - Choix du point de raccordement à terre : localisation et caractéristiques du poste de livraison, passage du câble d'export (atterrage, passage de l'estran, présence d'une route côtière, zone protégée et zone Natura 2000)
  - Choix de l'installation du câble d'export en mer : route, profondeur d'ensouillage, impact environnemental, navire et matériel d'installation vis-à-vis des conditions océano-météo.
- L'obtention des autorisations (2010-2011 - Tableau 1)
  - Loi sur l'eau : concertation préalable avec les différents usagers (pêche, collectivités locales concernées, associations), études d'impact environnemental



Figure 1 : Centres de R&D européens intégrant un site d'essais en mer pour les EMR.

— Concession d'utilisation du DPM : conditions d'utilisation, balisage et signalisation, sécurité maritime avec avis recommandations préalables de la Préfecture Maritime

— Enquête publique et obtention des premières autorisations pour les tests de houlomoteurs purgées de tout recours (2011)

— Autorisations pour la construction de la sous-station à terre et le raccordement (prêt à usage sur un bien foncier, permis de construire, autorisations de voirie, travaux de forage).

• La construction du site d'essais (2012)

— L'aménagement de la zone de tests (Figure 2), avec mise en place du marquage de la zone, interdite à la navigation, et de son équipement en instrumentations (houle, courant, bouée météo), dès 2009

— La construction de la base à terre pour accueillir l'équipe opérationnelle et les utilisateurs (2012). La base est située dans un parc du conservatoire du littoral géré par la Mairie du Croisic, et l'ECN dispose d'une concession pour l'utilisation des locaux réhabilités dans le cadre du projet

— La construction du poste de livraison à terre (bâtimens, équipements électriques, raccordement au réseau ERDF). Une concertation a été menée avec les riverains vis-à-vis de l'impact paysager et vis-à-vis du bruit généré en période de production (fonctionnement des transformateurs et ventilation)

— L'installation du câble d'export (Figure 3) : forage dévié sous la route et l'estran, pose sur le sol puis ensouillage du câble jusqu'au centre du site (23km). Deux obstacles ont été rencontrés : l'ensouillage dans les zones de sédiments

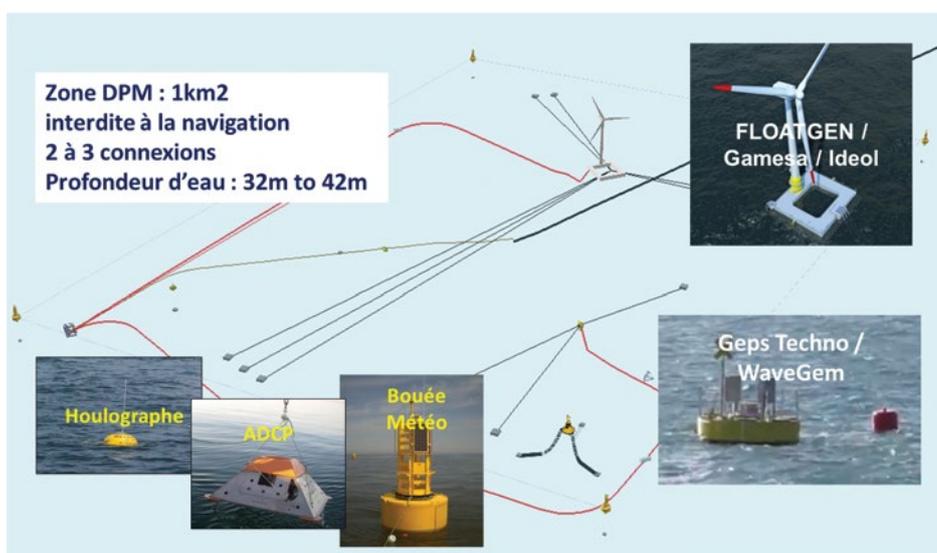


Figure 2 : SEM-REV – Implantation de la zone mer (DPM).

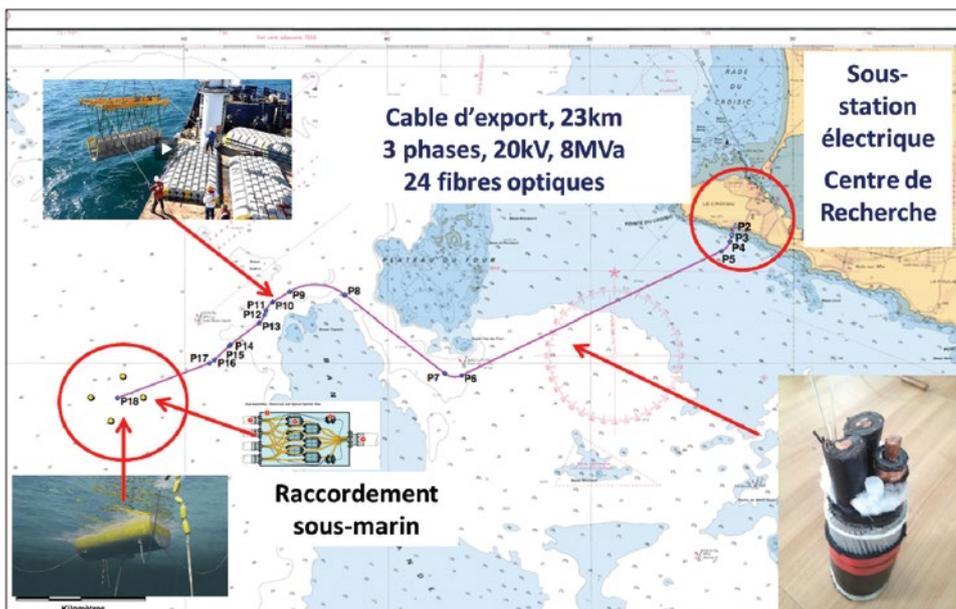


Figure 3 : Configuration du câble d'export.

très peu consolidés, du fait de la raideur mécanique du câble, le passage d'un plateau rocheux limitant la profondeur d'ensouillage qui a conduit à ajouter des matelas en béton pour la protection du câble. Ces conséquences ont impacté le planning (2 mois de retard) et le coût du projet, proche de 19 M€.

L'acquisition des équipements et les travaux ont nécessité la mise en place de marchés publics, l'ECN s'étant adjoint une assistance à maîtrise d'ouvrage (SELA). Une maîtrise d'œuvre (Artélia) a assuré le suivi des 2 lots du marché : les équipements électriques (dont le câble) et les travaux d'installation (terrestre et maritime). L'ensemble a été réceptionné début 2013 avant fin de garantie de parfait achèvement début 2014.

Il reste que le site d'essais tel que réceptionné en 2013, n'était pas directement utilisable pour tester un système de production raccordé au réseau. Trois phases supplémentaires sont en cours de réalisation :

- Contractualiser le raccordement sur le réseau ERDF et le rachat de l'électricité produite : convention d'exploitation avec ERDF, déclaration d'exploiter (DGEC), CODOA (Contrat Ouvrant Droit à l'Obligation D'Achat (DREAL) pour l'injection, contrat de sous-tirage. L'ECN se fait assister pour l'exploitation (Groupe Valorem) pour tous ces aspects qui ne sont pas de sa compétence.
- Mettre en place le système de raccordement sous-marin (boîte de jonction, câble ombilical, connecteur) permettant de tester de 3 à 4 démonstrateurs simultanément via le câble d'export (Figure 4). Les enjeux concernent les choix « électriques » (caractéristiques des câbles, fonctions de la boîte de jonction), le raccordement des fibres optiques, la disposition sur le site vis-à-vis des ancrages et des câbles dynamiques des démonstrateurs ainsi que des équipements de mesure déjà présents ou prévus. L'objectif est d'être prêt à raccorder un démonstrateur en 2015.
- Reprendre le processus de demande d'autorisations pour tester des éoliennes flottantes suite aux demandes de plusieurs démonstrateurs. Le premier démonstrateur raccordé sera en effet une éolienne flottante (projet européen

Floatgen). Le dossier initial a été complété pour intégrer l'impact avifaune, l'impact paysager (Figure 5), les risques d'interférence radio-électriques et les contraintes de signalisation maritime et aérienne. La procédure complète a été initiée en septembre 2012, intégrant concertation et enquête publique, pour aboutir aux arrêtés préfectoraux donnant les autorisations début 2014.

Accessoirement une liaison en fibre optique est prévue d'être installée début 2015 entre le poste de livraison et la base terrestre qui est équipée pour recevoir/émettre/traiter les informations. La base terrestre sera ensuite raccordée à un réseau haut débit pour faciliter l'exploitation « hot-line » des tests à distance (pour les partenaires des projets européens par exemple).

Pour conclure cette partie, si l'on excepte les études préliminaires, il aura fallu plus de 5 ans pour être prêt à accueillir le premier démonstrateur raccordé. Ceci étant, tous les projets rencontrent des difficultés techniques, financières, donc de planning. Le « just in time » devrait donc être atteint.

Remarque : les caractéristiques du site d'essais sont données dans [Berhault, 2012] entre autres. Il n'est pas apparu utile de les re-décrire dans cette présentation (Figure 2 et 3).

### III. L'OPÉRATION DU SITE D'ESSAIS : QUE DE QUESTIONS !

L'accueil d'un démonstrateur sur un site d'essais en mer n'est pas trivial. Il s'effectue sur la base d'un cahier des charges qui doit traiter d'aspects techniques, réglementaires, juridiques et financiers. Un rapprochement entre les sites d'essais européens, en particulier avec l'EMEC, et avec un organisme de certification de réputation internationale, est en cours pour établir des standards de tests. Une démarche de mutualisation a également été initiée par France Energies Marines mais les difficultés rencontrées dans la mise en place des autres sites d'essais français a malheureusement réduit son efficacité.

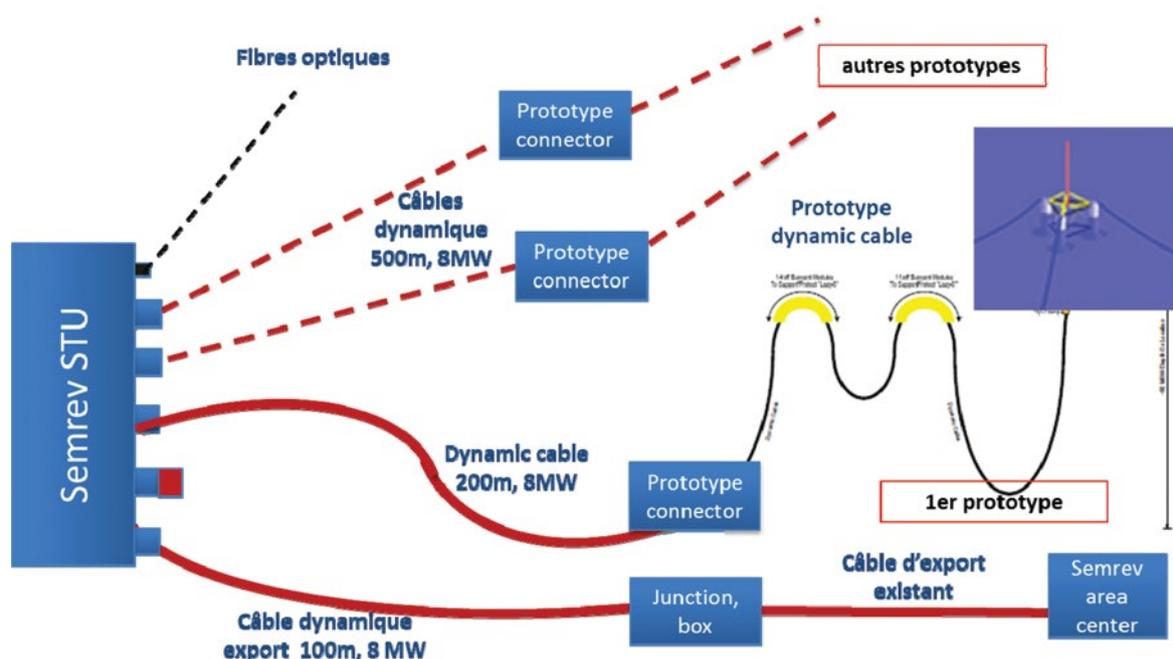


Figure 4 : Architecture du système de raccordement sous-marin (Installation prévue sur le site d'essais mi-2015).

Un canevas de cahier de charges a donc été défini par l'ECN avec les grands chapitres suivants :

- Description détaillée des conditions d'environnement du site : conditions océano-météo, nature du sol, profondeur d'eau, marnage, emprise possible (flotteur et ancrage), état environnemental. Spécifications des contraintes « démonstrateur » qui en découlent (situation, emprise de l'ancrage, architecture de raccordement)
- Description détaillée des équipements électriques existants et contraintes « démonstrateur » qui en découlent : qualité du signal produit, répercussion des contraintes ERDF, équipements nécessaires à bord. Cette partie traite également de la communication : transmission des informations mer / terre et terre / mer, définition et traitement des alarmes, redondance si perte du câble et donc des fibres optiques.
- Description du démonstrateur : architecture, ancrage, raccordement, système de production (Power Take Off) et équipements électriques de transformation et de protection.
- Définition des contraintes de sécurité maritime : analyse de risque, plan de prévention, processus de surveillance et d'intervention, assurance, interaction entre démonstrateurs, procédures d'intervention sur site (installation, maintenance, démantèlement).
- Définition des contraintes de suivi environnemental : répercussion des conditions imposées dans les annexes des arrêtés préfectoraux et dans la concession d'utilisation du DPM.
- Conditions contractuelles : planification des tests, estimation des coûts, provision pour démantèlement, disponibilité. Le « statut » de moyen d'essais d'un organisme public de recherche impose (règles européennes) qu'un démonstrateur soit testé dans le cadre d'un projet collaboratif dont l'ECN est partenaire et porteur de la partie du projet concernant l'utilisation de SEM-REV. Le coût des tests intègre la participation aux frais communs de fonctionnement du site d'essais et les opérations spécifiques au projet.

Le processus de préparation des tests est décliné en plusieurs étapes :

- Signature d'un accord de confidentialité, préalable au montage du projet, permettant l'échange des informations entre l'ECN et le démonstrateur (caractéristiques détaillées du site d'essais et cahier des charges, caractéristiques du démonstrateur)

- Etude de faisabilité de l'implantation du démonstrateur sur SEM-REV : ressource, environnement, adaptation, raccordement électrique, planning, budget et financement, accord de consortium. Cette période peut durer quelques mois. Elle débouche sur le montage du projet, une réservation d'un emplacement, un planning et un cadre budgétaire. Le projet peut être mené dans le cadre européen (Horizon2020) ou nationale (AMI ADEME, ANR, FUI, ...)
- Signature du contrat de projet et finalisation des annexes techniques au contrat, incluant le cahier des charges adapté au projet). Il faut intégrer en effet les évolutions du démonstrateur pour son adaptation au site, qui ne seront pas finalisées à la signature du contrat
- Soumission d'un dossier de présentation du démonstrateur et du programme d'essais à remettre aux autorités administratives (Préfecture Département et Préfecture Maritime) au minimum 3 mois avant le début des opérations d'installation. L'objectif des autorités est de vérifier que les conditions associées aux Autorisations et la réglementation en vigueur sont bien respectées. Le dossier doit également présenter les opérations d'installation et de démantèlement sur site, la stratégie de surveillance et de maintenance, les plans de prévention.

La mise en place du planning des tests est un point difficile pour plusieurs raisons. Le démonstrateur peut prévoir des périodes d'arrêt, voire de retrait, en cours de tests. Il faut traiter des pannes de plus ou moins longues durées. Les périodes de maintenance du site (en particulier celles imposées par ERDF) et les périodes d'installation ou de retrait d'un démonstrateur pendant qu'un autre démonstrateur est en test sont à intégrer.

La mise en place du cahier des charges et du processus d'accueil a nécessité environ 9 mois de travail, mené en réalisant l'exercice avec l'un des démonstrateurs.

#### IV. LES PERSPECTIVES DE SEM-REV

Alors que le site d'essais n'est pas encore opérationnel on voit poindre quelques difficultés pour l'avenir, qu'il va falloir traiter vis-à-vis des demandes :

- Prolongation significatives des essais après la période de test pré-définie (modification du démonstrateur ou modification



Figure 5 : Eolienne flottante - Impact visuel. (depuis la pointe du Croisic à 19.3 km du site d'essais).

de composants). Le concept de site d'essais, d'une part, et les conditions liées à la concession du DPM, d'autre part, impose une durée de test limitée à 2 ans pour une configuration de technologie donnée. La prolongation de tests au-delà de cette limite nécessitera une autorisation spécifique

- Extension des possibilités du site d'essais vis-à-vis des autorisations acquises ou vis-à-vis des capacités de production des démonstrateurs. Le câble sous-marin d'export est de 8MVA alors que le réseau ERDF terrestre est de 3.MVA. Son extension à 8MVA, pour l'éolien ou pour les solutions hybrides nécessitera un investissement supplémentaire d'environ 2.5M€
- Possibilité de tester des démonstrateurs sans raccordement sur le réseau (puissance produite par le démonstrateur trop faible – typiquement 100kW à 250kW, limitation dans les équipements internes du démonstrateur), et donc avec dissipation ou stockage d'énergie
- Extension de la surface de la concession du DPM pour aborder les mini-fermes de systèmes ancrés (3 à 4 éoliennes flottantes par exemple) et la problématique des opérations marines en milieu très encombré (excursions dynamiques des flotteurs dans la houle, présence des lignes d'ancrage et des câbles d'export entre le fond et la surface).

Accessoirement, satisfaire ces besoins pourrait amener, à terme, à une saturation du site d'essais.

Il est bon de rappeler que les objectifs du site SEM-REV, outre les tests de démonstrateurs, sont d'alimenter les chercheurs et les industriels en informations et en connaissances sur l'environnement marin, en particulier dans le cadre de l'Axe 1 du programme de R&D :

- Ressources énergétiques et connaissance de l'environnement pour la conception des systèmes
- Impact environnemental des EMRs (bruit, emprise) et impact de l'environnement sur les EMRs (vieillesse des matériaux, bio-salissures, corrosion)

C'est sur ces thématiques que SEM-REV est un outil complémentaire des compétences et des moyens du LHEEA dans sa mission de support technique et scientifique aux développements des EMRs. Des actions de R&D sont déjà en cours sur ces thématiques et l'idée d'implanter un Observatoire de l'environnement marin sur SEM-REV se concrétise progressivement (projet SEAMON pour Sea Monitoring) avec des projets de partenariat intégrant des développeurs de technologies de mesure, des développeurs de parcs, des instituts de recherche (Ifremer, IFPEN).

Concernant les démonstrateurs, plusieurs projets sont attendus sur le site, qu'ils soient éoliens ou houlomoteurs, voire de technologie hybride. On peut citer le projet d'éolienne flottante Floatgen, porté par Gamesa et Ideol (projet européen) et le projet de houlomoteur WaveGem porté par une PME, Geps Techno (projet AMI ADEME). Plusieurs projets ont également été soumis au programme Horizon2020. Si le site n'est pas adapté pour tester des technologies hydroliennes en production, par contre il sera utilisé pour des tests de procédures d'installation et de maintenance pour toutes les technologies. Des partenariats ont été initiés avec les acteurs de la sécurité et du droit maritimes (ENSM, Ecole Navale, DIRNAMO, CROSS, SNSM) pour aborder les risques maritimes et les plans de prévention et de formation.

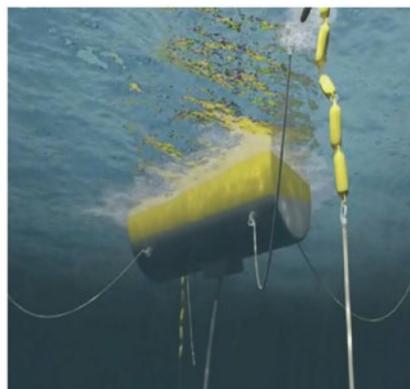
Une pré-planification de l'utilisation du site d'essais a d'ores et déjà été établie et le site d'essais devrait trouver sa vitesse de croisière en 2017.

En conclusion la mise en place d'un site d'essais en mer est un projet de recherche en lui-même, tant sur les aspects techniques qu'administratifs, dont le retour d'expérience (REX) est déjà très utile pour les futurs champs d'EMR français à vocation de production industrielle, y compris l'éolien posé. Par contre, dès lors que le site d'essais existe, il peut être utilisé le plus largement possible sur tous les aspects concernant l'exploitation des EMRs, y compris la formation. C'est pour atteindre ces objectifs que le programme de R&D « SEM-REV » a été élaboré et mis en place.

## V. REMERCIEMENTS

Les remerciements vont à tous les personnes de l'Ecole Centrale, outre les auteurs, qui se sont investis pour mener à bien ce projet : A.Clément, B.Alessandrini, P. Rousselot, H.Lugez, A.Bertholon et bien sûr les Directeurs de l'ECN (ancien et actuel), acteurs clés de la réussite.

Ils vont également aux financeurs du projet qui ont su croire dans l'intérêt de disposer d'un site d'essais alors qu'il n'était qu'une idée de chercheurs en 2006 (Région Pays de la Loire, Département Loire Atlantique, CNRS, l'Etat, représentant également l'Europe, l'ANR) et aux partenaires industriels et académiques de l'ECN qui l'accompagne dans les différents projets de R&D sur SEM-REV.



**Figure 6 :** Exemple de projets du programme de R&D SEM-REV. a) BIOCOLMAR – Bio-salissures sur les lignes d'ancrage et sur les structures. b) EMODI – Vieillesse des câbles sous-marins haute tension.

## VI. REFERENCES

- BABARIT A., HALS J., KURNIAWAN A., MOAN T., KROKSTAD J. (2011) — Power absorption measures and comparisons of selected wave energy converters. *30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*
- BERHAULT C., LE CROM I. (2012) — SEM-REV : Site d'Essais en Mer pour l'optimisation et la qualification de systèmes de production d'énergie renouvelable marine. *Revue du Conservatoire du Littoral*
- BERHAULT C. (2014) — EMRS flottants - Verrous et actions de R&D. *Colloque Nationale Génie Civil et Génie Côtier, Dunkerque*
- CLEMENT A.H., MOUSLIM H., DURAND M., BABARIT A. (2007) — Dossier technique SEAREV G21. *Laboratoire de Mécanique des Fluides CNRS UMR6598, Ecole Centrale De Nantes, France*
- GUEVEL P. (1986) — La récupération de l'énergie des vagues. *Sciences et techniques de l'armement*. **60**
- HEALY M., ALCORN A., LEWIS T. (2013) — MARINET – The research infrastructure network gaining international support and accelerating the development of marine renewable energy. *OMAE 2013-11368, Nantes*
- LE CROM I., BERHAULT C. (2014) — From Lab to reals sea conditions - How to support MRE development. *Atlantic Power Cluster - Final Conference, Santander*
- LE CROM I., BERHAULT C., LE BIHAN G. (2014) — SEM-REV feedback from the marine renewable energy test site. *Thetis, Cherbourg*