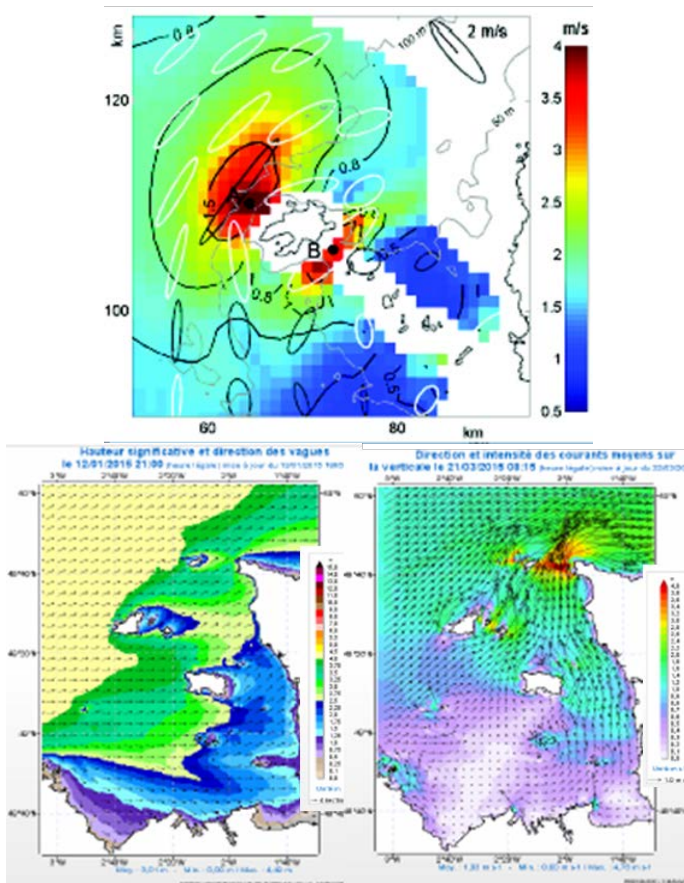


# HYD2M

## HYDroynamique du Raz Blanchard : Mesure et Modélisation

Sentchev & Thiébaud (2015)



Source : previmer

### PROGRAMME 1.1 :

Caractérisation de sites

### OBJECTIFS :

- Etude de l'impact de l'état de mer et des tempêtes sur la ressource par mesures radar et *insitu* et modélisation numérique.
- Applications : surveillance du site, prévision et estimation du productible.

### BUDGET :

- Total : 1 753 k€  
(FEM : 299 k€)
- IA : 749 k€  
(FEM : 149 k€)

### DUREE :

36 mois



### Responsable scientifique et technique :

Prénom, Nom : Anne Claire Bennis  
 Appartenance : Université de Caen (Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière)  
 Adresse : Laboratoire M2C, UMR 6143 CNRS, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen  
 Téléphone : 02 31 56 57 18  
 Mél : anne-claire.bennis@unicaen.fr

### Coordinateur FEM :

Prénom, Nom : Jean-François Filipot  
 Téléphone : 02 98 49 97 15  
 Mél : jean.francois.filipot@france-energies-marines.org

### Sommaire

Responsable scientifique et technique.....	2
Résumé du projet.....	3
Evolutions éventuelles de la proposition détaillée par rapport à la pré-proposition.....	3
1 Contexte, positionnement de la proposition détaillée.....	4
1.1 Contexte du projet.....	4
1.2 Objectifs du projet, verrous scientifiques et techniques.....	5
1.3 Etat de l'art.....	6
1.4 Caractère innovant du projet.....	9
1.5 Principaux résultats attendus.....	10
1.6 Positionnement du projet.....	10
2. Programme scientifique et technique.....	11
2.1 Méthodologie, qualité de la construction du projet et de la coordination.....	11
2.2 Lots et tâches du projet.....	12
2.2.1 Lot 1 : Pilotage du projet.....	12
2.2.2 Lot 2 : Bilan des connaissances et réflexion sur les méthodes et moyens à mettre œuvre)....	13
2.2.3 Lot 3 : Mesures radar.....	14
2.2.4 Lot 4 : Mesures in-situ.....	15
2.2.5 Lot 5 : Modélisation numérique.....	17
2.2.6 Lot 6 : Estimation du productible.....	18
2.3 Planning du projet.....	19
2.4 Description et qualité du partenariat.....	19
2.5 Justifications des dépenses par partenaires.....	24
2.5.1 FEM.....	24
2.5.2 Université de Caen.....	24
2.5.3 CNRS.....	24
2.5.4 SHOM.....	25
2.5.5 DCNS-OpenHydro.....	25

2.5.6 Université du Littoral.....	25
3. Impact global de la proposition et stratégie de valorisation de protection et d'exploitation des résultats	25
3.1 Protection et exploitation des résultats.....	25
3.2 Valorisation des résultats .....	25
3.3 Impact global du projet .....	26
4. Bibliographie .....	27

### Résumé du projet

Savoir affiner l'estimation et la prévision du productible constitue l'un des points clés de la recherche sur les EMR afin de pouvoir garantir la rentabilité des fermes et la qualité du service en électricité aux usagers. Actuellement, les industriels ont des erreurs de 10% sur le calcul des courants qui entraînent des erreurs de 30% sur le productible. Les calculs hydrodynamiques actuels ne tiennent pas compte des interactions entre l'état de mer et les courants de marée à cause du peu de données disponibles et faute de modèles numériques adéquats. Le Raz-Blanchard ayant une profondeur moyenne de 40m, les interactions vagues-courant peuvent modifier de manière significative le productible. Afin d'étudier l'influence de l'état de mer sur la ressource, nous déploierons 3 types de système radar en association avec des campagnes de mesures in-situ pour acquérir un jeu de données unique qui permettra de valider et d'améliorer les modèles numériques afin de constituer une base de données novatrice pour ce site. Les activités de modélisation numérique serviront à reconstruire le profil vertical du courant et, in fine, obtenir les champs de courant tridimensionnels nécessaires au calcul du productible. Nous devons améliorer la modélisation de la turbulence dans un contexte couplé houle-courant, la modélisation de la tension de surface (i.e. influence de l'atmosphère sur l'océan) et la modélisation de la tension de fond (i.e. impact du fond de la mer sur les courants) afin de minimiser les erreurs sur le calcul des courants. Des efforts porteront aussi sur l'amélioration du paramétrage de la dissipation d'énergie liée au déferlement en présence de forts courants. Des scénarios hydrodynamiques seront élaborés à partir des sorties de modèles qui serviront de base pour l'estimation du productible. Une nouvelle méthodologie pour la conversion de l'énergie hydraulique en énergie électrique sera développée. Cette méthodologie sera indépendante du type de machine et aura pour objectif d'estimer le productible avec au maximum 10% d'erreur. Les résultats d'HYD2M contribueront à la minimisation du LCOE de la filière hydrolienne et trouveront également des applications dans tous les domaines où la connaissance de l'hydrodynamique est importante (surveillance de la navigation, transport sédimentaire...).

Ce projet, d'une durée de 36 mois, s'inscrit dans l'axe « Caractérisation de site » de FEM et répond notamment aux objectifs prioritaires définis dans la feuille de route de FEM : « disposer de données préliminaires validées sur les sites EMR » et « disposer de modèles numériques validés par des mesures ». Il participera à la création d'une plateforme instrumentée pour l'étude des interactions houle-courant en condition extrême.

### Evolutions éventuelles de la proposition détaillée par rapport à la pré-proposition

Suite aux recommandations émises nous avons fait les modifications suivantes :

- Baisse du budget IA : suppression levés bathymétriques, réduction de la durée des CDD et diminution des frais de missions, réalisation en propre à l'Ifremer d'hommes-mois initialement inscrits au budget de FEM,
- Fusion des lots 3 et 4 en un unique lot 3,
- Fusion des lots 5 et 6 en un unique lot 4.

HYD2M compte maintenant 6 lots :

- Lot 1 : Pilotage du projet (Pilote FEM)
- Lot 2 : Réflexions sur les méthodes et stratégies à mettre en œuvre (Pilote CNRS)
- Lot 3 : Mesures radar (Pilotes U. LITTORAL & Ifremer)

- Lot 4 : Mesures *in-situ* (Pilotes U. CAEN & DCNS)
- Lot 5 : Modélisation numérique (Pilotes CNRS & SHOM)
- Lot 6 : Estimation du productible (Pilote EDF)

Un nouveau partenaire s'est joint au consortium

- Ifremer (représentant du LOPS)

Pour le projet nous avons 35% de RF et 65% de RI.

Partenaire	Demande d'IA	Personnel	Prestations	Autre Fct	Invest.
FEM	149 450	255 200	31 500	12 200	-
IFREMER	-	76 090	-	-	-
EDF	-	69 336	-	-	-
DNCS-OpenHydro	-	39 634	22 500	2 500	-
U. CAEN	237 307	266 411	106 030	28 400	-
U. LITTORAL	55 900	78 566	-	14 700	2 000
CNRS	252 824	451 028	-	49 100	1 000
SHOM	53 456	158 656	-	6 400	-
U. SHEFFIELD	-	26 967	-	-	-
U. HAWAÏ	-	30 996	-	-	-
U. PLYMOUTH	-	23 890	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>748 937</b>	<b>1 476 774</b>	<b>160 030</b>	<b>113 300</b>	<b>3 000</b>

## 1 Contexte, positionnement de la proposition détaillée

### 1.1 Contexte du projet

Dans le cadre du projet Normandie-Hydro, un consortium formé de EDF EN, DCNS et OpenHydro se donne pour objectif d'ici à 2020 d'installer et de raccorder au réseau 7 hydroliennes OpenHydro. Ce projet de ferme pilote est un préalable à la construction, entre 2020 et 2030 de fermes industrielles de plusieurs centaines de machines, pour des capacités de production de 200 MW et plus. Pour ces projets, la bonne estimation du productible hydrolien est indispensable pour fiabiliser le projet et dérisquer les investissements. Actuellement, les incertitudes sur le productible sont trop importantes (il faut rappeler qu'une incertitude de 10 % sur la vitesse estimée d'un courant de marée équivaut à une incertitude de 30 % sur le productible d'une machine), et les aléas (houle, turbulence sous-marine) ne sont pas pris en compte dans les modèles. D'autre part, sur les sites hydroliens, très énergétiques, la variabilité spatiale du courant peut être très importante. Si des données ADCP sont disponibles sur la zone mais pas au niveau des hydroliennes, l'estimation du courant de marée devra passer par la mise en œuvre de modèles numériques. Le modèle devra être calibré et validé avec des mesures sur site. Une fois le modèle réalisé et le courant simulé sur tout le site, une analyse harmonique de la marée permettra d'extrapoler la valeur du courant sur une période indéfinie. Des erreurs importantes sont dues à l'extrapolation spatiale du courant en utilisant des modèles numériques ne permettant pas de représenter la totalité des phénomènes complexes rencontrés. Ainsi, l'étude précise de la ressource hydrolienne sur des durées de 20 ans est une nouveauté pour la communauté scientifique depuis quelques années, et pour autant une nécessité capitale pour les projets industriels. Sous-estimer la ressource ou, à l'inverse, surestimer la ressource, sont tous deux pénalisants pour un projet en développement et empêche de pallier les incertitudes par des coefficients de sécurité à l'instar de ce qui peut se faire dans le cadre des cas de charges pour les conditions de fatigue ou de forçages extrêmes. Il apparaît dès lors indispensable de mieux estimer la ressource hydrolienne ou a minima de mieux connaître les fourchettes d'incertitudes associées à la mesure, à la variabilité temporelle, à la variabilité spatiale, et aux

processus complexes en interaction. Les industriels cherchent donc actuellement activement des solutions pragmatiques permettant une bonne spatialisation de l'information, par modélisation numérique, mais aussi par des mesures (radars), ainsi que la préconisation de campagnes de mesures ponctuelles multi-capteurs optimisées pour répondre au besoin tout en limitant les risques de pertes d'appareil ou de surcoût liés aux opérations marines. Dans ce contexte, l'utilisation de différents moyens de mesures et de modélisation doit permettre *in fine* de statuer sur les outils et moyens adaptés ou non pour fiabiliser les business plan des projets en cours et à venir et de proposer des protocoles de mesures et d'études

## 1.2 Objectifs du projet, verrous scientifiques et techniques

Actuellement, l'erreur sur l'estimation du courant sur les sites hydroliens avoisine 10 %. Une erreur de 10 % sur le courant entraîne par propagation statistique une erreur d'environ 30 % sur le productible. L'objectif d'HYD2M est précisément de minimiser cette erreur afin de dérisquer les projets industriels hydroliens.

Il est pressenti qu'une part significative de ces incertitudes sur le productible provient des interactions vagues-courant qui ne sont pas prises en compte dans les simulations. Le Raz-Blanchard étant relativement peu profond (environ 40m d'eau) et au regard des longueurs d'ondes des vagues qui s'y propagent (de quelques mètres à des centaines de mètres), il est attendu que l'état de mer modifie de manière significative l'estimation du courant et donc du productible. Les quelques mesures disponibles de courantologie et mises à notre disposition ne suffisent pas à décrire précisément les processus physiques et les interactions vagues-courant. En effet, des mesures eulériennes par courantomètres ne sont pas adaptées pour représenter une dynamique tridimensionnelle avec des interactions d'échelles spatiales et temporelles comme celles du Raz-Blanchard. De plus, les mesures d'état de mer sont, à notre connaissance, inexistantes. **Pour lever ce verrou, HYD2M mettra en place un système de mesures radars** afin de cartographier l'état de mer et les courants de surface, en temps réel et ce au moins jusqu'à la fin du projet (soit pour au moins 30 mois). Ce système à moindre coût sera **couplé à la modélisation numérique** pour reconstituer les profils verticaux de courant. Cette plate-forme innovante associant observations et modélisation contribuera donc à **fiabiliser les systèmes de prévision de la ressource hydrolienne** et plus généralement de l'environnement physique qui est un paramètre clé pour le **dimensionnement des structures immergées**.

Bien que la technique de mesure des courants par radar soit parfaitement maîtrisée dans un environnement avec des conditions hydrodynamiques dites "normales", **la mise en œuvre des radars Haute-Fréquence sur le Raz Blanchard constitue un verrou scientifique et technique**, du fait des vitesses de courants extrêmes, des états de mer et des aléas météorologiques qui compliquent l'analyse des signaux radar.

HYD2M verra aussi le **déploiement d'instruments** de mesures de vagues et de courants dans un **environnement particulièrement hostile**. Nous proposerons des **méthodes innovantes** pour lever ces verrous techniques.

Les comparaisons avec les données in-situ existantes ont montré la sous-représentativité des effets de l'état de mer dans les modèles (ex : MARS, TELEMAC) et en particulier ses effets sur la turbulence. Nous proposons donc d'améliorer les modèles sur ces points clés. Des **techniques innovantes d'assimilation** des données radar seront implémentées, elles devront être capables de gérer un jeu de données très hétérogènes.

Une nouvelle méthodologie, qui se voudra la plus générale possible, sera développée pour le **calcul du productible** dont la **précision sera améliorée** puisque directement, dépendante de celle des modèles numériques estimant les courants sur les sites hydroliens. Nous visons une **erreur de 10% sur l'estimation du productible**.

### Les finalités du projet sont :

- mettre en place, calibrer et valider les systèmes radar pour la mesure des courants et de l'état de mer ;
- produire une **base de données** hydrodynamiques sur plusieurs années ;
- acquérir des données in situ permettant de **valider les modèles** et d'améliorer la **compréhension des processus physiques** affectant le productible (ex : interactions vagues-courant, turbulence, interactions en couche limite de fond).
- **simuler numériquement** de façon précise l'**hydrodynamique tridimensionnelle** (3D) du Raz-Blanchard en utilisant des techniques d'assimilation de données, en ajoutant de nouveaux paramètres/modèles mathématiques pour représenter la tension de fond, la tension de vent, la

turbulence et en utilisant une plate-forme couplée associant un modèle de circulation 3D et un modèle d'état de mer ;

- estimer le productible en tenant compte de la part de l'aléa (état de mer et tempêtes) avec moins de 10% d'erreur.

### 1.3 Etat de l'art

Le Raz Blanchard (« Raz » est un mot normand signifiant courant ; « Blanchard » viendrait de la couleur blanche donnée par l'écume lorsque la mer est forte) est un passage où sévissent les courants de marée les plus forts d'Europe. Il se situe entre la côte française à l'ouest de la pointe du Cotentin et l'île anglo-normande d'Aurigny. Il est compris entre au nord une limite située entre 2 et 5 milles au-dessus d'une ligne joignant les phares de Mannez et de la Hague, au sud par une ligne joignant le banc de la Schôle et le Cap de Flamanville, à l'ouest par une ligne joignant le phare de Mannez et le banc de la Schôle et à l'est par une ligne allant du Cap de Flamanville à la bouée Basse-Bréfort.

En Manche, les courants de marée sont les courants dominants (Retière, 1979 ; Reynaud et al., 2003). Ils sont générés par l'onde de marée originaire de l'océan Atlantique qui est amplifiée lors de sa rencontre avec le plateau continental. Une première réflexion de cette onde a lieu sur les côtes du Cotentin : il se forme alors une onde stationnaire créant une zone de marnage maximum (15,5 m pour la Baie du Mont-Saint-Michel). Les courants de marée sont alternatifs et une dissymétrie est également notable entre le flot et le jusant (Orbi, 1986, Orbi et Salomon, 1988). Ils atteignent des valeurs extrêmes dans le Raz Blanchard (supérieures à 10 nœuds ou 4 m/s, Guillou, 2007), avec un maximum remarqué à la bouée de la Foraine, située à environ 1 mille nautique au sud-ouest du phare de la Hague. De plus, l'onde stationnaire engendrée par le rivage ouest du Cotentin cause des courants hydrauliques, qui en se combinant au courant de marée, génèrent des tourbillons.

Des états de mers variés sont observés dans le Raz-Blanchard (mer du vent, houle, mer croisée) impactant la colonne d'eau sur une distance d'environ une longueur d'onde. Pour ce site, les vagues se propagent avec une période entre 1s et 15s et une longueur d'onde entre 1.5m et 260m. Pour des périodes supérieures à 5s (> 50% des cas), nous obtenons des longueurs d'ondes supérieures à 40m et donc une influence de l'état de mer sur toute la colonne d'eau, avec un impact maximum près de la surface. En règle générale, le rôle de la houle devient prépondérant sur les courants de marée et a un rôle non négligeable dès que les « petits fonds » sont atteints. Lors des tempêtes hivernales (par ex. février 2014), il n'est pas rare d'observer des vents de 100 km/h ou beaucoup plus (150 km/h tous les 5 ans) générant une mer croisée avec des périodes allant de 5s à 13s, des hauteurs maximums de vagues de 5m et des déferlements locaux sources de turbulence (moutonnement). Le Bouteiller (1972) et Le Bouteiller et Portugal (1973), au cours de leurs travaux, ont distingué trois types d'état de mer pour le Raz-Blanchard :

- Les houles longues du large (période de 10-13 s, hauteur maximale 1 m) qui sont plus ou moins atténuées par les hauts-fonds,
- Les houles moyennes du nord-ouest ou sud-ouest (période de 6-8 s, hauteur maximale 3 m)
- Les houles courtes (ou « mer de vent », période de 4-5 s, hauteur maximale 1m, parfois 4-5 m chaque année) à agitation irrégulière et nées des vents.

Cet environnement hydrodynamique extrême nécessite donc d'être surveillé sur le long terme afin de pouvoir prédire précisément la ressource, d'aider à la surveillance des hydroliennes et à la planification des opérations en mer. La mesure radar est tout à fait adaptée à ce type d'environnement puisque non-intrusive, supprimant ainsi tous les problèmes liés à la sécurité des biens et des personnes. La mesure radar HF/VHF est basée sur l'interaction de l'onde électromagnétique émise par le radar et la surface de la mer selon le mécanisme de diffraction cohérente de Bragg (Barrick, 1972). L'écho radar renvoie alors deux raies spectrales disposées de manière symétrique de part et d'autre de la fréquence d'émission du radar. La présence des courants modifie la position de ces raies avec l'apparition d'un décalage doppler (Barrick, 1972) permettant de déduire la vitesse des vagues diffractantes. Ces deux raies de Bragg caractéristiques du spectre du 1<sup>er</sup> ordre sont utilisées pour déterminer les courants de surface tandis que l'énergie associée aux hautes fréquences, traduisant le spectre du 2<sup>nd</sup> ordre, est utilisée pour déterminer les caractéristiques physiques de l'état de mer (hauteur significative, période dominante...) (Broche, 1988).

L'étude du décalage Doppler du spectre du 1<sup>er</sup> ordre permet la détermination de la vitesse de phase des ondes hydrodynamiques diffractantes. Toute caractéristique physique du milieu susceptible de modifier cette vitesse de phase est donc a priori sensible. Sauf cas particuliers, l'influence dominante est celle de la projection du courant dans la direction de propagation des ondes diffractantes. Elle peut ainsi être mesurée avec une précision de l'ordre de quelques centimètres par seconde avec une résolution temporelle de l'ordre de la dizaine de minutes (Stewart et Joy., 1974 ; Barrick et al., 1977). Cependant, l'ensemble de l'état de mer induit une correction, qui n'est pas toujours négligeable, via les interactions non-linéaires entre les ondes hydrodynamiques (Barrick et Weber, 1977 ; Broche et al, 1983, Ardhuin et al, 2009). L'influence d'un cisaillement de courant dans la couche de surface a été étudiée par (Stewart et Joy, 1974, Kirby et Chen, 1989), qui ont montré que la vitesse de phase des ondes hydrodynamiques est affectée par une moyenne du courant dans la couche de surface pondérée exponentiellement avec une longueur de décroissance de l'ordre d'un douzième de la longueur d'onde des ondes diffractantes.

L'étude du niveau des pics de premier ordre, elle, fournit des indications sur la répartition angulaire des vagues diffractantes, qui peuvent être exploitées pour la détermination de la direction du vent (Broche, 1998). Le signal réfracté de premier ordre est cependant, lui aussi, susceptible d'être réfracté par d'autres composantes de l'état de mer, pour produire des contributions d'ordres supérieurs. Les seules contributions de diffraction multiple mesurables sont les contributions de second ordre permettant en principe d'accéder à l'ensemble du spectre de l'état de mer. Il est donc, en théorie, possible de l'exploiter pour en tirer une information plus riche (Hasselmann 1971, Wyatt et al, 2003), mais des problèmes d'ordre technique viennent compliquer les choses : i) pollution du signal du 2<sup>nd</sup> ordre par le signal du 1<sup>er</sup> ordre ; ii) difficulté à inverser le spectre du 2<sup>nd</sup> ordre. Pour chaque cellule spatiale de mesure, les positions des sites émetteur et récepteur fixent la direction de l'onde incidente et la direction d'observation. Pour remonter à des paramètres géophysiques vectoriels (courant de surface, direction du vent, spectre directionnel des vagues), il est nécessaire de combiner des observations réalisées simultanément dans différentes géométries, donc au moyen de plusieurs sites instrumentés (deux à minima pour le courant vectoriel, notamment).

Les méthodes d'assimilation de données permettent d'introduire les données radar dans les modèles numériques afin d'en améliorer la précision. Ces méthodes sont très utilisées en météorologie pour l'estimation des conditions initiales dans les modèles, avec l'emploi notamment des approches variationnelles 3D-Var et 4D-Var. EDF travaille actuellement sur l'implantation de méthodes variationnelles pour des applications de courantologie et d'hydraulique fluviale (Goery, 2015).

La zone du Raz-Blanchard a fait l'objet de nombreuses études concernant la dispersion marine du fait de l'implantation de l'usine de retraitement de combustibles nucléaires AREVA-NC en 1963. Elles ont débuté en 1962 avec la mise en œuvre d'un modèle réduit de la Manche sur une plaque tournante à Grenoble et des lâchés de grande ampleur de traceurs colorés (Ausset et Farges, 1968). Ces études ont été complétées depuis 2002 par des activités de modélisation numérique en 2 et 3 dimensions pour la dispersion marine, validées par les très nombreuses mesures de radiotraceurs (Bailly du Bois, 2006, 2014a), de courant et de niveau d'eau. Un travail spécifique a concerné l'acquisition et le traitement des données bathymétriques pour améliorer la précision des modèles (Bailly du Bois, 2011). Le niveau de précision atteint par les modèles est en moyenne de 15 % pour les vitesses de courants et moins de 15 minutes pour le phasage temporel (Bailly du Bois et al., 2012). Cependant, ces travaux utilisent une tension de vent exagérément élevée pour atteindre les 15% d'erreur montrant la nécessité de prendre en compte les effets de l'état de mer dans les simulations. Ces travaux, focalisés sur la dispersion en solution, n'étaient pas dédiés à la caractérisation des courants dans la perspective du déploiement d'hydroliennes. Ils représentent néanmoins une base de travail précieuse pour HYD2M. Ils ont mis en évidence des structures turbulentes de plusieurs dizaines de mètres qui peuvent avoir un impact significatif sur le fonctionnement et le dimensionnement des structures tournantes immergées, elles n'ont jusqu'ici pas été reproduites par les simulations (Bailly du Bois et al., 2014b).

Ces dernières années de nombreux travaux ont montré l'importance du modèle mathématique utilisé pour modéliser les interactions houle-courant en trois-dimensions (3D) et notamment son impact sur le profil vertical (Ardhuin et al, 2008a ; Bennis et Ardhuin, 2011). Historiquement, des modèles bi-dimensionnels (2D) basés sur des tensions de radiations, visant à représenter les variations de pression dans la colonne d'eau induites par l'état de mer, ont été développés (e.g. Longuet-Higgins et Stewart, 1962). Smith (2006)

modifie l'expression des tensions de radiation pour y introduire l'effet des courants sur la houle par la force de vortex. A cause de la modélisation délicate du flux vertical de quantité de mouvement, des efforts sont encore à faire pour obtenir des tensions de radiation valides pour un écoulement 3D. Devant ce problème, une approche différente, toujours basée sur la force de vortex, visant à séparer l'écoulement en une composante moyenne et une composante due aux vagues (i.e. dérive de Stokes) a été développée (McWilliams et al., 2004 et Arduin et al., 2008b). A ce jour, les principaux modèles numériques couplés houle-courant utilisent cette nouvelle approche (e.g. Bennis et al, 2011, 2014, 2015 ; Kumar et al. 2012). Des études récentes ont montré que la modélisation de la turbulence utilisée dans ces modèles était à revoir en raison des difficultés à simuler les structures turbulentes générées par l'état de mer. L'approche de Arduin et al. (2008) basée sur la théorie GLM (Generalized Lagrangian Mean) de Andrews et McIntyre (1978) est tout à fait compatible avec les modèles de turbulence innovantes de Guerts et Holm (2006, 2003), LANS-alpha et Leray-alpha. Ils utilisent le principe de régularisation des équations de Navier-Stokes de Leray (1934). Ces modèles atypiques n'ajoutent pas de diffusion artificielle dans le terme visqueux mais agissent sur les termes non-linéaires des équations du mouvement et donc prennent en compte les effets des petites échelles via de la dispersion non-linéaire (Bennis et al., 2008, 2009). Ces modèles ont été implémentés dans le modèle de circulation océanique grande échelle POP (Smith et al., 2010), pour, entre autres, simuler la turbulence de méso-échelle (Hecht et al., 2008a, 2008b et Petersen, 2008). La version modifiée de POP (POP-alpha) est capable de reproduire les instabilités du Courant Circumpolaire Arctique visibles sur une simulation POP utilisant une résolution spatiale deux fois plus élevée. Les auteurs ont constaté que ces modèles étaient particulièrement bien adaptés aux simulations régionales à haute résolution spatiale (supérieure à  $0.1^\circ=10\text{km}$ ). A notre connaissance, aucune simulation de ce type n'a encore été réalisée. Le déferlement en surface est également connu pour influencer les courants (e.g. Babanin, 2011) en modifiant leurs formes près de la surface par injection, notamment, de turbulence dans la colonne d'eau. Ces dernières années, les travaux de Filipot et al. (2010) et Filipot et Arduin (2012) et Banner & Morrison (2010) ont permis de développer des paramétrages basés sur la physique et les statistiques du déferlement. Ces travaux demandent néanmoins à être adaptés aux conditions de déferlement induits par des gradients de courants adverses en s'appuyant sur des mesures des statistiques du déferlement (e.g. Leckler et al. 2013) et du taux de dissipation (Zippel & Thomson, 2015).

La dissipation des courants par frottement sur le fond est la principale source de dissipation d'énergie dans l'océan côtier et donc influence également la forme du profil vertical en modifiant sa forme près du fond. Elle est généralement représentée sous forme d'une tension quadratique par rapport à la vitesse du courant. S'il est maintenant bien connu que le frottement est dépendant de la nature du sédiment, de la présence de structures comme des dunes ou des rides, de la présence d'algues ou de coquillages, il reste très difficile de déterminer la tension à partir de ces paramètres. De ce fait, il est plus performant de chercher le paramètre optimal à appliquer. En utilisant des techniques d'assimilation de données, on peut estimer la structure spatiale la plus représentative. C'est ce qui a été fait à l'échelle régionale ( $\sim 1000\text{km}$ ) dans un modèle barotrope (Boutet, 2015).

L'estimation du productible sera basée sur la conversion de l'énergie hydraulique en énergie mécanique puis en énergie électrique. Cette conversion peut, potentiellement, être faite par des machines asynchrones ou synchrones. Cependant, pour les hydroliennes, il est possible de définir la structure la mieux adaptée en fonction des contraintes imposées par le milieu et les conditions d'utilisation. Pour fonctionner en génératrices, les machines asynchrones nécessitent l'apport d'une puissance réactive pour pouvoir produire de la puissance active. Elles ont un facteur de puissance et un rendement relativement faibles par rapport aux machines synchrones. Par ailleurs, pour une puissance nominale donnée, les machines asynchrones ont généralement une densité de puissance plus faible que les machines synchrones, elles sont plus volumineuses et plus lourdes. Il est également souvent nécessaire d'adapter la vitesse de la turbine qui est relativement faible, en introduisant un multiplicateur. Cela permet d'utiliser des machines standards. De plus, pour assurer le réglage des puissances actives et réactives, il est nécessaire que les générateurs asynchrones soient connectés à un convertisseur de l'électronique de puissance, ce qui augmente les coûts. Les alternateurs (générateurs synchrones) sont utilisés comme convertisseurs de l'énergie mécanique en énergie électriques dans les centrales électriques (puissance  $> \text{MW}$ ). Les machines à aimants permanents permettent un gain de masse au prix d'un surcoût important dû au prix des aimants. Globalement, le coût des machines synchrones



est plus élevé que celui des machines asynchrones avec multiplicateur, mais à couple et masse égaux elles possèdent un meilleur rendement qui permet, à terme, un amortissement du surinvestissement. Les entraînements incluant des alternateurs peuvent être directs ou avec multiplicateurs de vitesse. L'entraînement direct nécessite souvent le dimensionnement de machine spécifique. L'utilisation d'une excitation bobinée permet une certaine souplesse en offrant la possibilité de contrôle du flux inducteur. Dans la littérature, différentes études montrent que la plupart des pannes sont liées surtout au système électrique et à la boîte de vitesse, suivies par les capteurs et les lames de la turbine. Les composants des machines qui ont le plus besoin de maintenance sont les bagues collectrices et les balais de charbon. L'utilisation des technologies sans balais peuvent donc améliorer la fiabilité du système. Une étude effectuée sur cinq types de générateurs montre que le générateur à induction à double alimentation avec boîte de vitesses à trois niveaux est la solution la plus économique, mais en considérant le coût d'investissement et en négligeant le coût d'exploitation. Si on considère ce dernier, les machines synchrones à aimants permanents représentent la meilleure solution en termes de rapport qualité-prix. Le coût peut être baissé avec la réduction des coûts de maintenance (avec l'utilisation des machines synchrones à aimants permanents) et avec des structures modulaires. Au niveau du rendement énergétique, les générateurs synchrones à aimants permanents sont les mieux placés pour les hydroliennes.

#### **1.4 Caractère innovant du projet**

Ce projet permettra le déploiement et la calibration d'un système de mesures radar (actuellement inexistant en Normandie) afin de produire une base de données hydrodynamiques en temps réel et sur plusieurs années, qui servira directement aux industriels pour le déploiement, la prévision de la ressource et la surveillance de leurs machines. Un portail web permettra d'accéder aux données radar en temps réel une fois le projet terminé.

HYD2M verra le déploiement de 3 types de radars (HF, VHF, bande-X) permettant de mesurer l'état de mer et les courants avec des résolutions radiales allant de 300m à 1500m, avec, en parallèle le déploiement de courantomètres fixes (4) et tractés (1), de bouées dérivantes et d'un lidar de vent. Toutes ces données acquises de manière simultanée constitueront un jeu de données uniques et complémentaires pour ce site.

Ces données couplées à la modélisation numérique permettront de mettre d'une part en évidence les couplages des différents forçages hydrodynamiques, vent, houle, frottement en surface et sur le fond, profil de courant avec une signature forte et d'autre part d'estimer le productible en tenant en compte de l'aléa, ce qui n'a encore jamais été fait.

Les conditions hydrodynamiques extrêmes constituent à la fois l'intérêt applicatif et le principal défi de ce projet. Elles nécessiteront, en particulier, les innovations scientifiques suivantes :

- a. Amélioration des logiciels de traitement de données radar pour des situations hydrodynamiques fortes** : des développements algorithmiques seront effectués pour adapter les logiciels existants ;
- b. Implémentation de modèles de turbulence originaux capable de résoudre la turbulence de petites échelles, avec en particulier, celle venant de l'état de mer** : Les modèles de turbulence LANS- $\alpha$  et Leray- $\alpha$  seront implémentés dans la plateforme de modélisation couplée houle-courant
- c. Implémentation d'une nouvelle paramétrisation pour la tension de surface et de fond dans les modèles côtiers** : Les paramétrisations existantes seront adaptées aux conditions de courants extrêmes car elles sont, en général, plus pertinentes pour des conditions moyennes que pour des conditions extrêmes ;
- d. Utilisation des méthodes d'assimilation de données sur un modèle industriel, en utilisant des mesures fortement hétérogènes** : implémentation et validation de méthodes variationnelles dans les modèles côtiers ;
- e. Optimisation du paramétrage de la dissipation d'énergie par déferlement** : Prise en compte de la modification de la dissipation d'énergie par les gradients de courant ;
- f. Estimation du productible à l'échelle d'une ou plusieurs machines** : développement d'une nouvelle méthodologie, qui sera la plus générique possible, pour l'estimation du productible.

### 1.5 Principaux résultats attendus

Ces avancées scientifiques pourront être utilisées pour tout environnement hydrodynamique similaire (e.g. Fromveur, EMEC...) et constitueront un socle de connaissances solides pour le développement de la filière hydrolienne en France et à l'étranger.

L'installation et la mise en œuvre des fermes pilotes d'hydroliennes nécessitent une connaissance de la ressource et des processus qui pourraient la modifier. HYD2M jouera un rôle clé sur ce point en proposant :

- i) Une surveillance en continu du Raz Blanchard par radar HF, ce qui facilitera l'implantation, la calibration, la surveillance et la maintenance des machines ;
- ii) Une plateforme numérique 3D couplée houle-courant optimisée pour le site d'étude, permettant d'accéder aux champs hydrodynamiques à haute résolution spatiale ;
- iii) Mise en place d'une plateforme instrumentée, unique en Europe, pour l'étude des interactions houle-courant en conditions extrêmes, dont le développement ira au-delà de ce projet ;
- iv) Une connaissance accrue des incertitudes sur l'estimation du productible (aux échelles de la machine, de quelques machines, d'un parc industriel de plusieurs dizaines de machines), liés aux incertitudes de modèles et aux aléas (houle, vent, turbulence sous-marine) ;
- v) La mise au point d'une méthode de détermination du productible hydrolien permettant de spécifier les campagnes de mesures minimales et optimales pour un bon recalage automatique des modèles via les méthodes d'assimilation de données.

Les données et connaissances acquises à l'issue du projet seront les suivantes :

- Une base de données hydrodynamique en temps réel (radar HF/VHF/Bande-X) ;
- Une base de données courantologiques acquises *in-situ* sur plusieurs mois et pour différentes conditions énergétiques sur la verticale et le long de radiales horizontales ;
- Une base de données pour le productible pour différents scénarios hydrodynamiques ;
- Des mesures des caractéristiques de l'état de mer par AWAC (2) et bouées dérivantes ;
- Des mesures du vent à 10 mètres et le long de profils verticaux jusqu'à 300 mètres ;
- De nouveaux algorithmes de traitements de données radar acquises en conditions extrêmes ;
- Une amélioration de la qualité des modèles numériques ;
- Un nouveau paramétrage de la tension sur le fond ;
- Un nouveau paramétrage de la tension de surface ;
- Un nouveau paramétrage de la dissipation d'énergie par déferlement ;
- Une amélioration de la représentation des processus turbulents dans les modèles côtiers ;
- Une amélioration des techniques d'assimilation de données usuelles pour la prise en compte des données radar dans les modèles côtiers ;
- Une nouvelle plateforme de simulation du productible pour les hydroliennes ;
- La diffusion des avancées numériques à la communauté ;
- Un portail internet permettant d'accéder facilement aux données radar ;
- Des rapports bibliographiques/techniques/scientifiques ;
- Des participations à des conférences nationales et internationales ;
- Des publications dans des revues scientifiques avec comités de lecture.

### 1.6 Positionnement du projet

Ce travail sera complémentaire aux projets collaboratifs FEM THYMOTE, PHYSIC et STHYF soumis à cet appel à projets. THYMOTE vise à étudier la turbulence hydrolienne. La partie sur la turbulence de HYD2M sera complémentaire à THYMOTE puisque s'appuyant sur des méthodes très différentes. HYD2M fournira des données radar au projet THYMOTE pour valider les modèles numériques et THYMOTE fournira à HYD2M des sorties de modèle pour comparaison. PHYSIC se concentre sur le transport sédimentaire des sédiments grossiers, un processus contrôlé par l'hydrodynamique. PHYSIC bénéficiera donc des avancées d'HYD2M sur la caractérisation de l'hydrodynamique du Raz-Blanchard. Ces mêmes avancées contribueront également au projet STHYF qui traite de la stabilité des câbles soumis aux forçages hydrodynamiques des sites hydroliens. La volonté des acteurs bas-normands a fait émerger le projet CPER Manche 2021 (2017-2021), qui voulant mettre l'accent sur les énergies marines renouvelables, a soutenu l'achat des radars HF

nécessaires à HYD2M. De plus, HYD2M vient en complément : i) de l'AMI Pile&Tide (2014-2018, PI. Géocéan, CNRS-M2C est impliqué), où le transport sédimentaire dans le Raz-Blanchard est étudié par modélisation numérique et mesures *in situ* ; ii) de la proposition SWOT du CNRS-M2C (2016-2020), où, notamment, des modèles numériques seront comparés pour estimer l'impact des outils de modélisations sur les simulations de l'hydrodynamique du Raz-Blanchard ; iii) des projets ADEME Normandie Hydro et NEPTHYD, pour la mise en place de fermes pilotes d'hydroliennes ; iv) des projets collaboratifs, déposés par U. Sheffield et Ifremer-LOPS, visant à structurer la communauté radar, et respectivement intitulés ROSOME et RenHFOR. L'assistance à la valorisation des données des sites radar HF, mis en place grâce à HYD2M, est un des objectifs explicites de RenHFOR. Les résultats des projets européens ETI PerAWAT (2009-2014) visant à estimer le productible à partir des sorties de Telemac2d et MERIFIC (2012-2015) visant à mesurer par radar HF l'état de mer et les courants en mer d'Iroise et en Cornouailles, dont certains membres sont partenaires de ce projet, constitueront une bonne base de départ. Les projets ANR FINOGG (déposé) et SWOT OWAI-1K, visant tous les deux à étudier les interactions océan-vagues-atmosphère, par modélisation numérique et observations *in-situ*, dans le Golfe de Gascogne et en mer d'Iroise seront également complémentaires à HYD2M, d'autant plus que certains des membres de ces projets sont partenaires de HYD2M.

## 2. Programme scientifique et technique

### 2.1 Méthodologie, qualité de la construction du projet et de la coordination

Ce projet est découpé en 6 lots : i) lot 1 : coordination du projet, porté par FEM, durée 36 mois ; ii) lot 2 : réflexions sur les méthodes et actions à mener, porté par CNRS, durée 6 mois ; iii) lot 3 : mesures radar, porté par Ifremer et U. LITTORAL, durée 30 mois ; iv) lot 4 : mesures in-situ, porté par U. CAEN et DCNS-OpenHydro, durée 24 mois ; v) lot 5 : modélisation numérique, porté par SHOM et CNRS, durée 24 mois ; vi) lot 6 : estimation du productible, porté par EDF et U. CAEN, durée 12 mois.

Le lot 2 est un préalable au déroulement du projet afin de structurer le travail à venir. Les lots 3, 4, 5 et 6 s'articulent entre eux comme illustré ci-dessous.

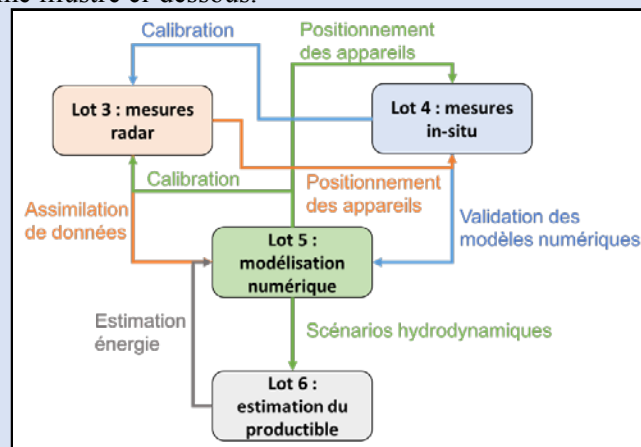


Figure 1 : Structuration du projet

A l'heure actuelle, nous avons déjà effectué une reconnaissance de site pour l'implantation des systèmes radar afin de pouvoir faire les demandes d'autorisation dans les délais impartis. La figure 2 montre une des situations envisagées avec 3 sites (Le Cap, Jobourg et Flamanville).

Pour les mesures in-situ, nous avons prévu de faire une demande pour utiliser le «Côte de la Manche» ou autre navire avec des caractéristiques et une expérience similaires (e.g. «Thalia»). En effet, les bâtis pour les ADCP pesant chacun entre 600 kg et 1000 kg, nous avons besoin d'un espace et d'un système de mise à l'eau adapté sur le pont du navire. De plus, les missions dans le cadre du projet Pile&Tide ont montré que des navires plus petits comme le «Celtic Warrior» ou le «Ceres» ne sont pas adaptés à ce type d'environnement hydrodynamique.

Les levés bathymétriques disponibles au SHOM et au CNAM-Intechmer seront utilisées pour les simulations et pour le positionnement des appareils de mesure, avec une attention particulière à la nature des fonds. Les configurations des modèles numériques pour le Raz-Blanchard sont en la possession, dès à présent, de tous les partenaires impliqués dans le lot 5.



Figure 2 : Exemple de couverture radar

## 2.2 Lots et tâches du projet

### 2.2.1 Lot 1 : Pilotage du projet

#### Objectifs du lot :

L'objectif général de ce lot est d'assurer la gestion et la coordination générale du projet ainsi que le pilotage scientifique et technique. La réalisation de ces objectifs est assurée par un binôme comprenant J.-F. Filipot de FEM comme coordinateur du projet et A.-C. Bennis de CNRS-M2C comme responsable scientifique et technique, tous deux garants de la bonne conduite du projet, de l'atteinte des objectifs et du respect des engagements contractuels.

#### Les objectifs du lot sont en particulier :

- de piloter l'ensemble des interactions avec l'ANR et de veiller au respect des engagements contractuels tant en termes de délai et de qualité ;
- d'assurer l'organisation générale du projet, son pilotage et son suivi et de coordonner l'ensemble des activités et des partenaires ;
- de veiller à l'atteinte de l'ensemble des objectifs du projet dans le respect des délais et des budgets alloués ;
- d'assurer le suivi et la gestion des risques et opportunités du projet ;
- de veiller à la bonne atteinte des objectifs scientifiques et techniques du projet et d'assurer la validation des livrables et leur qualité ;
- de coordonner les travaux et échanges des différents partenaires sur l'ensemble des lots du projet ;
- de coordonner et de contribuer aux actions de communication et de diffusion autour des résultats et impacts du projet.

#### Programme détaillé des travaux du lot :

##### Tâche 1.1 : pilotage scientifique et technique du projet (FEM, CNRS)

L'objectif de cette tâche est d'assurer le pilotage et la coordination des questions scientifiques et techniques du projet afin de s'assurer de l'atteinte des objectifs et de faciliter les échanges entre les partenaires. Le responsable scientifique et technique assurera ainsi la coordination entre les différents lots et partenaires, validera la qualité et l'homogénéité des livrables scientifiques et techniques. Il aura également pour rôle de piloter l'orientation scientifique et technique du projet tout au long de sa réalisation. Il préparera enfin, en liaison avec les responsables de lots, les rapports d'activités et le rapport final du projet pour leurs parties scientifique et technique.

Le responsable scientifique et technique contribuera également à la définition des actions de communication et de valorisation du projet en s'appuyant sur son expertise et sa connaissance du positionnement du projet dans le contexte national et international.

#### Tâche 1.2 : pilotage et coordination administrative et financière du projet (FEM)

Cette tâche permettra d'assurer le suivi de la performance générale du projet et de l'ensemble des interactions avec l'ANR selon les modalités de l'appel à projet et les précisions qui seront apportées dans les conditions particulières de la convention attributive d'aide. Le coordinateur assurera ainsi l'organisation générale du projet avec en premier lieu l'établissement de l'accord de consortium et des accords de reversements avec les établissements publics concernés ainsi que la mise en place des outils nécessaires à son pilotage et à la bonne communication entre les partenaires. FEM s'appuiera notamment sur l'outil Project netboard qui permet à l'ensemble des partenaires d'accéder aux informations du projet et de contribuer à son suivi (renseignement des taux d'avancement, du statut des livrables, etc.). Par l'intervention de son responsable de la qualité et des opérations, FEM fera appliquer également une procédure commune permettant d'assurer la qualité des livrables produits (relecture et approbation des livrables, calendrier de production, vérification des jalons). Le coordinateur assurera également le suivi financier et calendaire du projet afin d'assurer le respect des objectifs et de mettre en œuvre les actions préventives ou correctives nécessaires à la tenue des engagements. Des réunions régulières de pilotage et de suivi du projet seront organisées par le coordinateur qui en assurera l'animation et la synthèse. Enfin, le coordinateur définira avec le responsable scientifique et technique et les partenaires les actions de communication et de diffusion à mettre en œuvre afin d'assurer la valorisation du projet et de ses retombées. Le coordinateur organisera une réunion de lancement et de clôture et des réunions plénières semestrielles. Des groupes de travail seront planifiés au sein des lots en fonction des besoins.

#### Livrables du lot :

L1.1 : Mise en place de la plateforme de management de projet dédiée au projet ;

L1.2 : Accord de consortium ;

L1.3a à L1.3c : Accords de reversement (3);

L1.4a à L1.4n : Rapports intermédiaires et de suivi du projet (selon conventionnement ANR) ;

L1.5a à L1.5f : Rapport de réunions de pilotage et d'avancement du projet (6) ;

L1.6 : Rapport de fin de Projet ;

#### **2.2.2 Lot 2 : Bilan des connaissances et réflexion sur les méthodes et moyens à mettre œuvre** (Pilotes CNRS ; Tous les partenaires sont impliqués dans ce lot)

#### Objectifs du lot :

- Etablissement d'une stratégie d'ensemble sur les méthodes innovantes à mettre en œuvre pour les mesures, la modélisation et l'estimation du productible ;
- Choix des sites pour l'installation du système radar.

#### Programme détaillé des travaux du lot :

Les réflexions et état l'art porteront sur :

- i) Mesures radar** : le positionnement des systèmes et l'articulation entre les différents systèmes, les algorithmes de traitement de la mesure radar pour les courants et l'état de mer, les limitations dues à la présence de courants extrêmes ;
- ii) Mesures *in-situ*** : le choix de la zone déploiement, la mise en place et la tenue des systèmes dans des conditions hydrodynamiques extrêmes, l'accès au site limité du fait de l'état de la mer particulièrement difficile ;
- iii) Modélisation numérique** : l'assimilation de données dans les modèles, les paramétrisations pour les tensions de surface et de fond, la modélisation de la turbulence et la prise en compte de l'effet des courants sur le déferlement ;
- iv) Calcul du productible** : les scénarios hydrodynamiques à mettre en œuvre, la conversion de l'énergie hydraulique en énergie électrique.

Livrables du lot :

- L2.1. Rapports bibliographiques
- L2.2. Rapport sur les méthodes à mettre œuvre
- L2.3. Plan des installations radars
- L2.4. Plan et protocole de mesures pour les campagnes *in-situ*

Catégorie homogène du lot : RF

Risques et solutions de repli : Le principal risque est de devoir éliminer des sites intéressants pour l'installation des radars car protégés par le conservatoire du littoral par exemple. Dans ce cas, nous devons nous implanter sur un autre site et nous adapter à ses conditions.

**2.2.3 Lot 3 : Mesures radar** (Pilotes U. LITTORAL et Ifremer ; Partenaires : U. LITTORAL, CNRS, Ifremer, DCNS-OpenHydro, U. HAWAÏ, U. SHEFFIELD, U. PLYMOUTH, FEM)

Objectifs du lot :

- Constitution des séries temporelles de vitesse des courants superficiels et des caractéristiques physiques de l'état de mer ;
- Cartes vectorielles à haute résolution spatio-temporelle des courants et des caractéristiques de l'état de mer obtenue par mesures radar dans une zone proche côtière du Raz-Blanchard.
- Validation des mesures radar et estimation d'erreur de la mesure.

Programme détaillé des travaux du lot :Tâche 3.1 : mise en place et calibration du système radar (Actimar, Ifremer)

Des interventions physiques sur les systèmes radars HF seront réalisées par la société Actimar qui possède une forte expertise, acquise au cours de ces 12 dernières années, dans la mise en œuvre et la maintenance de radars océanographiques côtiers. Les interventions viseront notamment à évaluer l'impact de configurations d'antennes spécifiques sur la résolution azimutale des mesures de courant et de vagues. Cela implique des modifications de câblage et des mesures de calibration. Les interventions seront réalisées sur un ou plusieurs des sites radars HF installés à proximité du Raz-Blanchard. En complément des interventions physiques sur site, des interventions à distance sur les systèmes radars HF seront effectuées. Elles viseront notamment à évaluer l'impact des configurations d'acquisition sur la résolution distance et doppler des mesures radar et par suite sur les mesures de courants et d'état de mer. Il s'agit d'interventions pouvant être réalisées à distance via internet vers les systèmes radars installés au Raz-Blanchard : Arrêt/démarrage des radars, modification des bandes de fréquence (et donc de la résolution spatiale), modification des temps d'intégration, extraction et formatage de données non-standards. Ces interventions seront réalisées en coordination avec les équipes réalisant les mesures *in-situ* (ADCP-AWAC, ADV, bouées dérivantes...).

Tâche 3.2 : analyse des mesures radar (Ifremer, U. LITTORAL)

- i) Les vitesses des courants dans le Raz-Blanchard sont comparables avec la vitesse de propagation de vagues de Bragg, utilisée par les algorithmes de traitement du signal radar. Ceci peut rendre difficile l'interprétation des mesures de vitesse des courants. Le choix des fréquences appropriées, le développement algorithmique et l'adaptation de la technique de traitement de mesures à ces conditions extrêmes sont nécessaires pour pouvoir lever ce verrou ;
- ii) Compte tenu des dimensions limitées et de la complexité de la zone d'intérêt, ainsi que des phénomènes dynamiques que l'on vise à étudier, la haute résolution azimutale de la courantographie radar s'impose. Seule la méthode de traitement de données par direction d'arrivée ("Direction Finding" ou DF) avec, par exemple, l'algorithme MUSIC ("Multiple Signal Characterization", Schmidt, 1986) est capable de fournir la résolution requise. Cette méthode, mise au point et validée dans le cas des radars Iroise (e.g., Sentchev et al., 2013) sera adaptée pour la campagne de mesures radar dans le Raz-Blanchard ;
- iii) L'état de la mer et les aléas météorologiques vont certainement causer la discontinuité des séries temporelles de vitesse (fusion des pics de Bragg dans le spectre et difficulté d'estimation de vitesse). Ils rendent la courantographie radar peu efficace à certaines périodes ou à certains endroits de la zone d'observation et ceci de façon récurrente. Des problèmes de fonctionnement du réseau radar haute

fréquence peuvent davantage diminuer la quantité de données exploitables. Pour remédier à ces difficultés, une technique d'analyse des séries discontinues de vitesse de courant sera appliquée à l'ensemble de données des deux stations radar. Elle permettra la génération des cartes de courants (champs vectoriels) dans toute la zone de façon à atténuer l'impact de dysfonctionnements du réseau ou la faiblesse de l'algorithme d'estimation de vitesse. Cette technique a déjà été appliquée aux données radar dans le Pas-de-Calais (campagne ERMANO, Yaremchuk, Sentchev, 2011) et en mer d'Iroise ;

- iv) Tester l'impact de la correction du décalage doppler dû au courant dans les spectres doppler sur les résultats des méthodes d'estimation de l'état de mer, notamment les algorithmes de Wyatt et de Hisaki ;

Livrables du lot :

- L3.1. Base de données courantographiques en surface et sur la verticale ;
- L3.2. Base de données des caractéristiques de l'état de mer ;
- L3.3. Cartographie des ressources hydrocinétiques (par radar HF, VHF et bande X), estimation du potentiel énergétique et sa variabilité à différentes échelles spatiales et temporelles ;
- L3.4. Nouvelles méthodes pour le traitement de données radar acquises en environnement extrême ;
- L3.5. Présentations à des conférences nationales et internationales ;
- L3.6. Publications dans des revues nationales et internationales à comité de lecture.

Catégorie homogène du lot : RI

Risques et solutions de repli :

L'intensité exceptionnelle des courants dans le cœur du Raz-Blanchard fait clairement peser une incertitude sur la faisabilité des mesures par radar HF sur cette zone : il est très probable que les chaînes de traitement fournies par les constructeurs des instruments actuellement sur le marché seront hors de leur gamme de fonctionnement nominal, et que des algorithmes spécifiques devront être développés. La mise au point des algorithmes de recherche des raies de Bragg dans les spectres Doppler, si elle demandera des innovations, ne devrait cependant pas se heurter à des difficultés insolubles. Une piste envisageable, dans le cas où des problèmes de robustesse se poseraient, serait d'utiliser les résultats des modèles numériques (Lot 5) pour fournir à ces algorithmes des solutions ébauchées afin d'améliorer leurs propriétés de convergence.

**2.2.4 Lot 4 : Mesures *in-situ*** - (Pilotes U. CAEN et DCNS-OpenHydro ; Partenaires : U. CAEN, CNRS, U. LITTORAL, DCNS-OpenHydro, Ifremer)

Objectifs du lot :

- Déploiements d'appareils et acquisition de données courantologiques, de houle et météorologiques ;
- Mise en évidence des processus impactant directement le profil vertical des courants ;
- Extension de la courantographie de surface par la prise en compte de la dimension verticale (mesures ADCP) afin d'aboutir à la description tridimensionnelle de la dynamique dans la zone étudiée ;
- Cartographie et caractérisation des ressources hydroliennes dans le Raz-Blanchard, évaluation du potentiel énergétique et de sa variabilité à différentes échelles spatiales et temporelles ;

Programme détaillé des travaux du lot :

Tâche 4.1 : Préparation (U.CAEN et DCNS-OpenHydro)

Le paramétrage des instruments sera défini pour l'acquisition simultanée des mesures de courant et des caractéristiques de l'état de mer par ADCP/AWAC/ADV. Quatre courantomètres seront déployés de part et d'autre des sites d'intérêt de manière à quantifier les variations spatiales des champs de courant et de houle. Les sites de mouillage seront choisis en fonction des objectifs du projet et des informations obtenues à partir des données bathymétriques disponibles (fond plat non mobile). La stratégie de déploiement s'adaptera en fonction des données acquises, pour apprécier en particulier les variations des courants à petite échelle (de 1000 m à 10 m).

#### Tâche 4.2 : Campagnes à la mer (U. CAEN et DCNS-OpenHydro)

Il est prévu 3 campagnes de mesure de 2 mois chacune avec le déploiement simultané de 4 courantomètres, dont 2 permettant de mesurer en plus des courants les caractéristiques physiques de l'état de mer. L'ADCP sans module houle sera couplé à un ADV. La mise à l'eau et le relevage des instruments nécessite au minimum la programmation de 4 jours de moyens à la mer en début et fin de période de mouillage si l'état de la mer le permet. En association avec ces déploiements, des radiales effectués par un navire depuis la surface permettront de cartographier la variabilité spatiale des courants à petite échelle. Ces radiales, associées au déploiement des bouées dérivantes instrumentées pour l'état de mer, nécessiteront deux jours supplémentaires par campagne. La mise en place des instruments sur le fond sera contrôlée par imagerie optique en direct pour s'assurer du bon déploiement, de la stabilité du mouillage et de la récupération ultérieure.

Le positionnement des instruments sera contrôlé par mesure acoustique, il n'y aura pas de bouée de surface, la récupération se fera par largage acoustique de la bouée fixée sur la structure. Il faudra programmer comme campagnes à la mer 6 x 6 jours en 2017 – 2018.

#### Tâche 4.3 : Mesures météorologiques (U. CAEN)

En complément des données météorologiques issues des modèles acquises en continu (modèle européen ECMWF, et français Aladin, Arome), et des observations de stations locales (sémaphore de La Hague et site Areva-NC), des mesures spécifiques seront acquises à l'aide d'un LIDAR météorologique. Des mesures des trois composantes de la direction du vent seront acquises localement entre 40 et 300 mètres d'altitude, sur 12 niveaux simultanément à partir d'une station de mesure localisée au plus près du Raz-Blanchard (station SNSM de Goury). Ces mesures sont essentielles pour caractériser le forçage atmosphérique sur la surface de l'eau. Les mesures ADCP dans l'eau permettant en complément de caractériser les courants induits par ce forçage atmosphérique.

#### Tâche 4.4 : Exploitation des mesures (U. CAEN et U. LITTORAL)

- Mesures de courants : le défi consiste à mettre en forme et exploiter de gros volumes de données. Ces tâches seront automatisées dans la mesure du possible, en prévoyant dès le départ une représentation multidimensionnelle des résultats pour exploiter simultanément les résultats de tous les courantomètres (temps, espace en x, y et z). Nous nous appuyerons sur des routines déjà développées en lien avec les appareils utilisés (programmation Matlab®).
- Mesures météorologiques par LIDAR : Les volumes de données concernés sont également importants, les résultats seront mis en forme en fonction du temps en y associant les données du sémaphore (vent à 10 m) situé à moins d'un 1 km.
- Mesure de houle : Les données issues des courantomètres disposant d'un module houle seront traitées spécifiquement, et comparées à celles obtenues par les bouées dérivantes qui ont été spécialement conçues pour mesurer les spectres directionnels des vagues par courants forts.

#### Livrables du lot :

- L4.1. Rapport de campagnes, données brutes de tous les appareils de mesure
- L4.2. Base de données acquises *in-situ* mise à la disposition, à minima, de tous les partenaires du projet
- L4.3. Présentations à des conférences nationales et internationales
- L4.4. Publications dans des revues nationales et internationales à comité de lecture

#### Catégorie homogène du lot : RI

#### Risques et solutions de repli :

- La réalisation des campagnes à la mer est tributaire des aléas météorologiques et donc le temps-bateau demandé devra en tenir compte.
- Mesures de courants : Le principal risque est associé à l'impossibilité de relever des instruments du fait de leur déplacement au fond ou du blocage du système de relève. L'assurance du matériel est incluse dans le projet. Une récupération à l'aide de plongeurs sera envisagée en s'appuyant sur le système de repérage acoustique. Le deuxième risque est celui associé à tout instrument électronique immergé : la panne ou le non-enregistrement des données. La redondance des appareils (4 simultanés) pallie en partie ce risque.



- Mesures météorologiques par LIDAR : Le système a été testé et éprouvé, il est simple à mettre en œuvre et les données sont récupérées en temps réel.

### **2.2.5 Lot 5 : Modélisation numérique** (Pilotes SHOM et CNRS ; Partenaires : CNRS, SHOM, EDF, FEM, U. CAEN)

#### Objectifs du lot :

L'objectif du lot consiste à reconstruire les profils verticaux de courant. En effet, les mesures radar concernent uniquement les premiers mètres sous la surface. Il est donc incontournable d'étendre les informations observées près de la surface sur l'ensemble de la colonne d'eau. Pour cela, nous proposons d'améliorer les modèles numériques sur les points clés pour la représentation de la dynamique tridimensionnelle (déferlement, tension de vent, tension de surface, turbulence océanique) et d'y inclure par assimilation de données les mesures radar.

#### Programme détaillé des travaux du lot :

##### Tâches 5.1 : paramétrage de la dissipation d'énergie en présence de forts gradients de courants (FEM)

Des développements récents des modèles spectraux à phases moyennées permettent de prendre en compte la plupart des processus affectant les vagues se propageant en eaux côtières. Cependant, la représentation des effets du courant sur les vagues reste largement perfectible. En particulier, le paramétrage de la dissipation d'énergie par déferlement nécessite d'être adaptée aux conditions avec forts gradients de courants. Cette tâche consistera à modéliser les états de mer dans le Raz Blanchard avec le modèle d'état de mer WW3, puis à comparer les performances des différents termes sources pour la dissipation par déferlement, sur la base des observations radar et *in-situ*. Nous adapterons ensuite le paramétrage pour mieux résoudre les effets des gradients de courant sur la dissipation des vagues.

##### Tâche 5.2 : paramétrage du frottement sur le fond dans un modèle de marée tridimensionnel (SHOM)

La dissipation sur le fond est une des principales inconnues pour la modélisation des ondes de marée. Une paramétrisation sous forme de tension quadratique par rapport à la vitesse de l'écoulement donne des résultats acceptables. La tension de fond constitue un axe de progrès important. La thèse de Martial Boutet (Boutet, 2015) a permis de mettre au point une méthode d'optimisation de ce paramètre sur des configurations d'emprise régionale purement barotrope. Nous proposons d'étendre cette méthode au cas tridimensionnel et avec une emprise réduite. Il est attendu une meilleure représentation des variations spatiales du frottement, par exemple en liaison avec la nature des sédiments marins. Le frottement sur le fond est également incontournable pour la reconstruction des profils verticaux en raison de la turbulence générée dans la couche limite de fond.

##### Tâche 5.3 : modélisation de la turbulence dans un contexte couplé houle-courant (CNRS)

La modélisation de la turbulence est également un des points clés pour la reconstruction du profil vertical. Actuellement la plupart des modèles côtiers utilisent des méthodes RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) car peu coûteuses, mais manquant de précisions puisque basées sur un écoulement moyen. Quelques modèles utilisent des méthodes LES (Large Eddy Simulation) classiques sur l'horizontale en complément de la RANS sur la verticale. Cela améliore un peu la précision des résultats mais ce n'est pas suffisant à cause du problème épineux de la modélisation du tenseur sous-maille. Nous proposons ici de mettre en œuvre des méthodes LES innovantes qui modélisent la turbulence avec de la dispersion non-linéaire et non avec de la diffusion comme cela est fait traditionnellement. Le problème délicat de la modélisation du tenseur sous-maille est alors évité.

##### Tâche 5.4 : paramétrage de la friction de vent dans un modèle tridimensionnel (U. CAEN)

En l'absence de couplage entre un modèle d'état de mer et un modèle de circulation régionale, l'effet de l'état de mer est représenté à minima par la tension de surface dans le modèle de circulation. Le modèle de l'IRSN reproduit correctement les courants de marée mais avec une tension de surface exagérément élevée par rapport à la réalité, montrant l'impact de l'état de mer sur la représentation du courant de marée. Un traitement coordonné de l'ensemble des mesures météorologiques, radar, ADCP et bouées sera réalisé afin

d'en extraire les informations pertinentes concernant les interactions météorologiques/houle/courants. Une paramétrisation pour la tension de surface sera alors proposée pour reproduire et extrapoler les processus physiques identifiés lors de l'analyse des mesures. La variabilité spatiale (horizontale et verticale) et temporelle des courants dans le raz Blanchard sera ensuite quantifiée.

#### Tâche 5.5 : Assimilation des données radar dans les modèles numériques (EDF)

L'assimilation de données radar a pour but d'initialiser les modèles numériques avec des mesures de courants et d'état de mer afin d'optimiser leurs résultats. Dans un premier temps, une analyse de sensibilité sera menée pour identifier les variables d'entrée qui ont une forte influence sur les sorties d'un modèle. Ensuite, nous développerons une méthode permettant l'intégration des mesures pertinentes au modèle basée sur l'approche variationnelle. Les résultats seront alors comparés avec ceux donnés par une approche stochastique de type filtre de Kalman d'ensemble. L'approche variationnelle nécessite le calcul du modèle adjoint lors de la minimisation de la fonction coût. Le développement du modèle adjoint peut s'avérer long et fastidieux. Si celui-ci n'est pas disponible, le gradient de la fonction objectif sera estimé par différence finie.

Catégorie homogène du lot : RF

#### Livrables du lot :

- L5.1. Configuration à haute résolution des modèles de circulation et d'état de mer pour la simulation de l'hydrodynamique du Raz Blanchard ;
- L5.2. Cartes tridimensionnelles, à haute résolution, des courants calculés en tenant compte de l'état de mer ;
- L5.3. Nouvelles méthodes et paramétrisations et codes sources associés ;
- L5.4. Rapports scientifiques relatant des nouveaux développements ;
- L5.5. Publication dans des revues nationales et internationales à comité de lecture ;
- L5.5. Participation à des conférences nationales et internationales ;

#### Risques et solutions de repli :

- Impossibilité d'utiliser le modèle adjoint pour les méthodes variationnelles. Repli : utiliser les méthodes par différenciation automatiques et/ou se concentrer sur les filtres de Kalman d'ensemble.
- Difficulté à intégrer simultanément les mesures hétérogènes que sont les mesures radar, ADCP, bouées, sur emprises spatiales et temporelles très différentes. Repli : utilisation partielles de mesures.
- Difficulté à valider les résultats obtenus. Les mesures ne peuvent pas être simultanément utilisées pour le calibrage et la validation. Le choix des mesures pour l'un ou l'autre des objectifs devra être discuté et l'utilisation des données acquises dans le cadre des projets THYMOTE et PHYSIC sera envisagée. La phase de validation sera potentiellement longue.

### **2.2.6 Lot 6 : Estimation du productible (Pilote EDF ; Partenaires : CNRS, EDF, U. CAEN)**

#### Objectifs du lot :

- Développer des outils de simulation du productible à l'échelle d'une et plusieurs hydroliennes ;
- Estimation du productible hydrolien, avec une erreur maximum de 10%, pour différents scénarios hydrodynamiques tenant compte de l'aléa (état de mer, tempête) ;

#### Programme détaillé des travaux du lot :

#### Tâche 6.1 : Mise en place des scénarios hydrodynamiques (CNRS)

Nous établirons différents scénarios hydrodynamiques, sur la base des sorties de modèles numériques, et à l'aide d'une analyse statistique des données existantes, afin de représenter les conditions hydrodynamiques les plus classiques mais aussi les plus atypiques dans le but d'optimiser la production d'énergie. Un focus particulier sera porté sur les biais résiduels obtenus sur les modèles après recalage automatique par assimilation de données sur l'ensemble du domaine, ainsi que l'incertitude sur le résultat obtenu.

### Tâche 6.2 : Estimation du productible (UNICAEN, EDF)

Nous proposons de concevoir et de développer une méthodologie pour la simulation du productible spécifique aux hydroliennes qui permettra de simuler la conversion de l'énergie des courants en énergie mécanique puis en énergie électrique. Cette méthodologie sera générique dans la mesure où le type de la génératrice ou d'alternateur sera une donnée d'entrée au même titre que la vitesse des courants. Cette méthodologie sera compatible avec tous les modèles numériques utilisés dans HYD2M. Cela permettra de modéliser et de simuler la production de l'énergie électrique en temps réel avec une erreur maximum de 10% pour les scénarios hydrodynamiques définis précédemment. Nos efforts porteront d'abord sur la simulation du productible pour une hydrolienne et ensuite pour un ensemble d'hydroliennes à l'échelle d'un parc, par exemple. Nous porterons une attention particulière aux biais de calcul, avec, notamment, ceux liés aux changements d'échelles : passage d'une ferme pilote à une ferme industrielle.

Catégorie homogène du lot : RF

#### Livrables du lot :

- L6.1. Description des scénarios hydrodynamiques ;
- L6.2. Nouvelles méthodes pour la simulation du productible à l'échelle d'une hydrolienne mais aussi à l'échelle d'un parc hydrolien ;
- L6.3. Publication dans des revues nationales et internationales à comité de lecture ;
- L6.4. Participation à des conférences nationales et internationales ;

Risques et solutions de repli : Le principal risque réside dans l'estimation du productible avec une erreur maximum de 10%. Comme l'erreur dépend également de la précision des modèles numériques, il se pourrait que pour certains scénarios hydrodynamiques, on soit plutôt à une erreur maximum de 15-20%, ce qui serait déjà mieux que les estimations actuelles qui atteignent jusqu'à 30% d'erreur.

### 2.3 Planning du projet

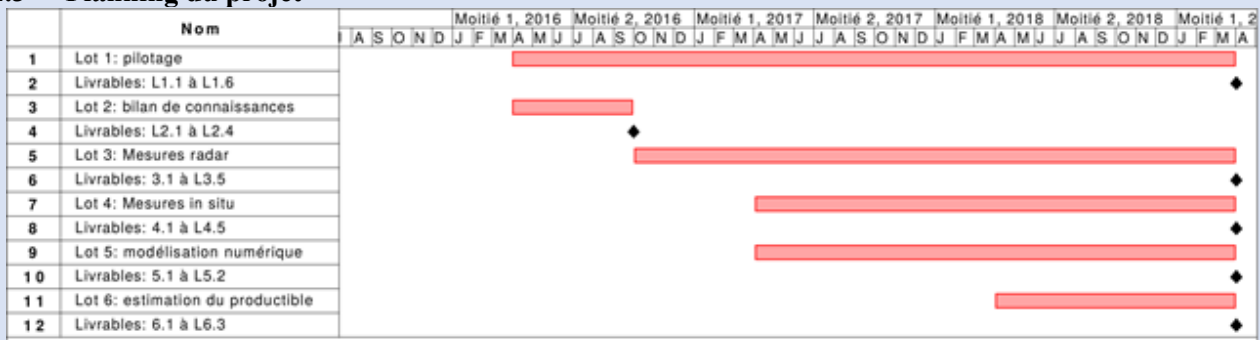


Figure 3 : Planning du projet (les durées de chacun des lots sont représentées par un trait rouge, tandis que les losanges noirs informent sur la date de remise des livrables)

### 2.4 Description et qualité du partenariat

- FEM est l'institut public-privé (futur ITE) de référence en France exclusivement consacré au développement de projets de R&D sur les énergies marines renouvelables, avec deux missions principales : i) aider les acteurs français à se positionner sur cette filière européenne, principalement, en coordonnant et positionnant des projets de R&D ; ii) permettre aux collectivités régionales littorales de mettre en œuvre les actions qui aideront le déploiement de ces filières en France. Sur la base du volet dédié aux énergies océaniques et des sujets adressés au chapitre éolien offshore du SetPlan européen, la feuille de route stratégique de FEM définit les champs d'activités principaux de l'institut ainsi que les objectifs et les enjeux techniques et technologiques prioritaires pour réussir le développement de cette filière. Ainsi conçu, le programme de recherche de FEM s'articule sur les principales thématiques suivantes : i) Caractérisation de sites ; ii) Recherche technologique : machines, composants, matériaux ; iii) Services de réseau et interconnexion des fermes ; iv) Architecture de ferme et outils de modélisation ; v) Concertation et cadre

d'évaluation des impacts environnementaux et socio-économiques. Des activités transverses de représentation de la filière française à l'international, de soutien aux initiatives de formation et de contribution à l'expertise sur les EMR lui sont également confiées. FEM fédère aujourd'hui 32 membres : grands groupes industriels des secteurs de l'énergie et du domaine naval, PME, Universités et Grandes Ecoles, organismes de recherche et collectivités territoriales dont 6 régions littorales.

- **U. HAWAÏ** représente le Radio Oceanography Laboratory fondé en 1988 par Pierre Flament, partenaire du projet. Ce groupe a 15 ans d'expérience sur le déploiement de radars Haute Fréquence, avec 21 sites installés sous son contrôle au total, dont 11 sont toujours opérationnels. Le groupe a également une expertise considérable dans la conception, la construction et l'entretien de l'électronique des radars HF, ayant spécifié et acheté les 6 premiers WERA il y a 15 ans, puis ayant construit ses propres radars, dont 22 ont été assemblés, et 30 additionnels sont en cours de conception et construction. Pierre Flament propose d'une part de contribuer à l'expérience de son groupe pour optimiser le choix des sites et de l'installation des réseaux d'antennes en réponse aux contraintes spécifiques imposées par les structures de courants très spéciales dans la zone étudiée, et d'autre part, de participer au développement d'algorithmes, à l'analyse et à l'interprétation des données.

- **U. SHEFFIELD** représente son département de mathématiques (SoMaS) et en particulier un de ces membres L. Wyatt. L. Wyatt est une experte reconnue pour ces travaux en traitement et analyse de la mesure radar HF qui ont débutés en 1981. Elle est directrice technique de « Seaview Sensing Ltd » qui diffuse les logiciels développés dans son département pour le traitement des données radar HF et en particulier pour les états de mer. Elle a dirigé de 2011-2014 le réseau australien d'observation côtier par radar HF.

- **U. PLYMOUTH** représente son département de sciences marines et d'ingénierie et en particulier un de ces membres D. Conley. D. Conley est un expert reconnu pour ces travaux, qui ont commencé en 1993, sur les états de mer (mesures et modélisation) et la dynamique estuarienne et côtière. Il fera bénéficier à HYD2M de ses compétences sur la mesure des états de mer par radar HF.

- **U. LITTORAL** représente le Laboratoire d'Océanographie et de Géosciences (LOG). Les thématiques abordées par le LOG concernent l'océanologie et les géosciences, principalement dans les domaines littoraux et côtiers. La Manche orientale constitue le chantier d'étude privilégié de son activité. Toutefois le LOG participe à l'étude d'autres systèmes tels que la Guyane, l'Atlantique Nord, La Méditerranée, le Vietnam, l'Océan Austral... Le LOG regroupe des chercheurs de plusieurs disciplines, répartis en deux thématiques, océanologie et géosciences, et en six équipes. Les activités se répartissent entre observation, expérimentation, et modélisation. Le groupe impliqué dans HYD2M fait partie de l'équipe « Télédétection et hydrodynamique » et travaille sur les mesures par radar HF depuis plus de 10 ans. En parallèle, des membres de ce groupe ont développé le système « Koursk » permettant de cartographier les courants en surface et en profondeur. Ce système sera utilisé pour HYD2M.

- **DCNS-OpenHydro** est un leader mondial du naval de défense et un innovateur dans l'énergie, qui a l'ambition de jouer un rôle moteur en France dans le développement de nouvelles filières industrielles créatrices d'emploi et de valeur ajoutée dans le secteur des Energies Marines Renouvelables (EMR). Le groupe conduit depuis 2007 un développement de ses activités vers les EMR. Pour le domaine spécifique de l'hydrolien, la croissance externe de DCNS a été privilégiée en s'associant à OpenHydro, leader technologique et commercial de ce marché. Ainsi, DCNS-OpenHydro bénéficie au travers de sa filiale mais également par sa participation directe aux projets en cours, d'un bilan significatif dans ce domaine.

- **EDF R&D** représente le Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement (LNHE) qui travaille dans le domaine de l'hydraulique fluviale et maritime pour les besoins du groupe EDF avec, notamment, le développement, depuis plus de 25 ans, de la plateforme de simulation Telemac. Dans le domaine de l'hydrolien, le LNHE modélise les écoulements maritimes avec Telemac et calcule le productible hydrolien pour les gisements en France et en Europe depuis plus de 10 ans. Les calculs du LNHE ont été à l'origine du choix du site de Paimpol-Bréhat pour le premier site pilote français. Actuellement, le LNHE travaille en appui à EDF EN pour le projet Normandie Hydro, et à vocation à dimensionner les outils post-2020 pour le développement des fermes industrielles. Pour l'ensemble de ces problématiques, les méthodes d'estimation d'incertitudes et d'assimilation de données constituent aujourd'hui un moyen déterminant pour

l'amélioration de la qualité des modèles, en vue de dégager des marges de fonctionnement et de dimensionnement d'une part, et de dérisquer les nouveaux projets d'autre part.

- Le **CNRS** représente ici le laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C). M2C mène des recherches pluridisciplinaires intégrant notamment la mécanique, les géosciences, l'océanographie et la biologie. Ces recherches couplent la mesure *in-situ* avec des approches expérimentales et de modélisations numériques. Le groupe de recherche participant à HYD2M est spécialisé, en autres, en océanographie côtière et constitue l'axe 5 du prochain quinquennal intitulé « Hydrodynamique, Sédiments, Structures : processus et interactions » dont certains membres de HYD2M font partie. L'expertise de ce groupe de recherche en matière d'énergies marines a été sanctionné, ces 3 dernières années, par 4 projets nationaux et internationaux : l'Interreg Ofelia (24 mois, financement européen), l'AMI Pile&Tide (50 mois, financement ADEME), « Interactions Physique-Biologie en environnement extrême » (12 mois, financement Université de Caen), Manche 2021 (4 ans, financement état-région). Ce groupe travaille sur la modélisation de la turbulence et des interactions houle-courant en collaboration avec l'Ifremer, mais aussi à l'acquisition de mesures *in-situ*, avec comme site privilégié, la manche occidentale. Des campagnes de mesures dans le Raz-Blanchard ont été menées dans le cadre de l'AMI Pile&Tide.

- **U. CAEN** représente ici Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg (LUSAC). Le LUSAC est un laboratoire pluridisciplinaire dont les activités s'organisent autour de 3 pôles principaux : dynamique sédimentaire, océanographie physique, suivi environnemental-biologique. L'équipe est implantée à Cherbourg depuis de nombreuses années et, à ce titre, à de nombreuses expériences de travaux menés en conditions de forte hydrodynamique de la masse d'eau. Plus particulièrement, depuis environ 5 ans avec l'intérêt porté au Raz-Blanchard, l'équipe réalise de 1 à 2 missions par an dans ce site particulier. Elle y a déjà participé à des missions de prélèvements de sédiments, des mesures de la dynamique de la masse d'eau, des mesures de la matière en suspension dans la masse d'eau, de la bathymétrie multifaisceaux. Le mouillage de capteurs et d'instruments de mesure sur le fond est une des spécialités du groupe formé par la collaboration entre LUSAC et l'IRSN. De plus, des outils de modélisation et de simulation spécifique pour le productible sont en cours de développement dans le cadre de deux thèses de doctorat.

- L'**IFREMER** représente le Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS). Ce Laboratoire est le produit du regroupement, au 1er janvier 2016, du Laboratoire de Physique des Océans (l'ancienne UMR 6523), du laboratoire d'Océanographie Spatiale et d'une partie de l'unité Dynamique des Ecosystèmes Côtiers de l'IFREMER. Il conduit et participe à des programmes de recherche sur l'océan afin d'en comprendre les mouvements et les bilans énergétiques, et leur influence sur l'atmosphère, le monde vivant et les systèmes côtiers. Le Laboratoire, en collaboration avec l'Université de Hawaï, participe depuis 2007 à la valorisation des données recueillies par le système de radars HF mis en place en mer d'Iroise par le SHOM. Il a développé une expertise sur la mise en place de sites, sur la physique de la mesure ainsi que sur les algorithmes de traitement permettant le passage des données brutes vers les données de courant de surface. Les bouées dérivantes envisagées pour HYD2M ont été conçues au LOPS pour permettre la mesure des spectres directionnels de vagues dans les zones de fort courant.

- Le **SHOM** est l'opérateur public pour l'information géographique maritime et littorale de référence. Son département recherche développe des modèles de circulation océanique à des fins de prévisions océanographiques opérationnelles ainsi que des modèles de marée pour assurer la sécurité de la navigation ainsi que pour contribuer aux politiques publiques maritimes. Son intérêt pour les mesures de courant par télédétection est ancien et il a mis en place et exploite un système de radars HF en mer d'Iroise depuis 2006. La région du Raz Blanchard est identifiée comme une zone d'intérêt particulier et le SHOM y a réalisé des mesures de courant ponctuelles récemment. En complément de ces aspects observationnels et de la modélisation numérique, il a développé ces dernières années une expertise sur les méthodes d'estimation de paramètres appliquées au frottement des courants de marée sur le fond.

Rôles de l'ensemble des personnels affectés au projet : (les personnes clés pour l'encadrement du projet sont en gras et les personnes à recruter sont italiques)

Partenaire	Fonction chez le partenaire	Discipline	Nb h/.m	Rôle dans le projet
<b>Y. Méar (U. CAEN)</b>	Maître de Conférences	Océanographie	5.05	Expertise en instrumentation <i>in-situ</i> et analyse de données (Lot 4)
E. Poizot (U. CAEN)	Ingénieur d'étude	Océanographie	6	Expertise en instrumentation <i>in-situ</i> (Lot 4)
C. Marion (U. CAEN)	Maître de Conférences	Océanographie	9	Expertise en instrumentation <i>in-situ</i> et analyse de données (Lot 4)
<b>H. Gualous (U. CAEN)</b>	Professeur des Universités	Energétique	7	Expertise en énergie électrique (Lot 6)
<b>J.F. Filipot (FEM)</b>	Responsable R&D	Océanographie	12	Coordinateur FEM, expertise en modélisation de l'état de mer (Lot 5).
<b>A.-C. Bennis (CNRS)</b>	Maître de Conférences	Océanographie	15.5	Responsable scientifique, expertise en modélisation numérique côtière et mathématiques appliquées (Lots 1, 3, 5, 6)
D. Mouazé (CNRS)	Maître de Conférences	Océanographie	2.6	Expertise en instrumentation <i>in-situ</i> et analyse de données (Lot 4)
N. Abcha (CNRS)	Maître de Conférences	Océanographie	3.6	Expertise en instrumentation <i>in-situ</i> et analyse de données (Lot 4)
S. Lesourd (CNRS)	Maître de Conférences	Océanographie	1.6	Expertise en instrumentation <i>in-situ</i> et analyse de données (Lot 4)
A.Ezersky (CNRS)	Professeur des Universités	Mécanique des fluides	2.2	Expertise en analyse de données (Lot 4)
L. Perez (CNRS)	Ingénieur d'étude	Mesures physiques	0.2	Expertise en électronique (Lot 3)
L. Benoit (CNRS)	Assistant ingénieur	Mesures physiques	11.5	Expertise en instrumentation et mesures de terrain (Lot 3 et 4)
S. Haquin (CNRS)	Technicien	Mesures physiques	2.2	Expertise en instrumentation <i>in-situ</i> et conception mécanique (Lot 4)
<b>A.Sentchev (U. Littoral)</b>	Maître de Conférences	Océanographie	5.25	Expertise en instrumentation <i>in-situ</i> et analyse de données (Lot 4) + mesures radar (Lot 3)
E. Lécyer (U. Littoral)	Technicien	Mesures physiques	0.2	Expertise en instrumentation <i>in-situ</i> et mesures à la mer
<b>C. Lathuilière (SHOM)</b>	Ingénieur-chercheur	Océanographie	9.2	Expertise en modélisation côtière (Lot5)
F. Leckler (SHOM)	Ingénieur-chercheur	Océanographie	2.1	Expertise en modélisation de l'état de mer (Lot5)

Partenaire	Fonction chez le partenaire	Discipline	Nb h/.m	Rôle dans le projet
F. Dumas (SHOM)	Ingénieur-chercheur	Océanographie	3.1	Expertise en assimilation de données et modélisation de la turbulence (Lot5)
R. Baraille (SHOM)	Ingénieur-chercheur	Méthodes numériques	3.1	Assimilation de données et estimation de paramètres (Lot 5)
S. Desmare (SHOM)	Ingénieur d'étude	Océanographie	1.1	Expertise en courantologie (Lot 4)
<b>C. Bodel (EDF)</b>	Ingénieur de recherche	Management	0.1	Pilotage pour EDF (Lots 5 et 6)
C. Goeury (EDF)	Ingénieur de recherche	Océanographie	4	Expertise en assimilation de données (Lot5)
J. Laverne (EDF)	Ingénieur chercheur	Hydraulique fluviale et maritime	3	Expertise en modélisation numérique (Lot 5), suivi et pilotage
<b>L. Marié (Ifremer)</b>	Chercheur	Océanographie	9.75	Expertise en mesures radar et analyse de données (Lot 3)
F. Ardhuin (CNRS)	Directeur de recherche	Océanographie	0.1	Expertise en mesures de l'état de mer par bouées dérivantes (Lot4)
<b>T. Marzin (DCNS)</b>	Ingénieur d'étude	Océanographie	1.8	Pilotage et mesures (Lot 3/Lot 4)
C. Delafosse (DCNS)	Ingénieur d'étude	Océanographie	0.2	Analyse de données (Lot 3/Lot 4)
<b>J-B. Richard (OpenHydro)</b>	Ingénieur d'étude	Océanographie	0.3	Mise à disposition de matériel et analyse de données (Lot 4)
<b>P. Flament (U. Hawaï)</b>	Professeur des Universités	Océanographie	6	Expertise en mesures radar et analyse de données (Lot 3)
<b>L. Wyatt (U. Sheffield)</b>	Professeur des Universités	Océanographie	1.5	Expertise en mesures radar et analyse de données (Lot 3)
<b>D. Conley (U. Plymouth)</b>	Professeur des Universités	Océanographie	1.5	Expertise en mesures radar et analyse de données (Lot 3)
<i>Stagiaire XXX (CNRS)</i>	<i>Stagiaire de master 2</i>	<i>Océanographie</i>	<i>5</i>	<i>Mesures in-situ de courant, analyse de données (Lot 4)</i>
<i>Stagiaire XXX (CNRS)</i>	<i>Stagiaire de master 2</i>	<i>Océanographie</i>	<i>5</i>	<i>Mesures in-situ de l'état de mer, analyse de données (Lot 4)</i>
<i>Stagiaire XXX (FEM)</i>	<i>Stagiaire de master 2</i>	<i>Océanographie</i>	<i>6</i>	<i>Modélisation in-situ de l'état de mer (Lot 5)</i>
<i>Stagiaire XXX (U.LITTORAL)</i>	<i>Stagiaire de master 2</i>	<i>Océanographie</i>	<i>6</i>	<i>Mesures in-situ de courant, analyse de données (Lot 3)</i>
<i>Post-doc XXX (U.LITTORAL)</i>	<i>Post-doctorant</i>	<i>Océanographie</i>	<i>9</i>	<i>Mesures radar et in-situ de courant, analyse de données (Lots 3 et 4)</i>

Partenaire	Fonction chez le partenaire	Discipline	Nb h/.m	Rôle dans le projet
<i>Post-doc XXX (SHOM)</i>	<i>Post-doctorant</i>	<i>Océanographie</i>	<i>12</i>	<i>Modélisation de la tension de fond (Lot 5)</i>
<i>Post-doc XXX (U. CAEN)</i>	<i>Post-doctorant</i>	<i>Océanographie</i>	<i>15</i>	<i>Mesures in-situ, analyse de données, modélisation (Lots 4 et 5)</i>
<i>Post-doc XXX (U. CAEN)</i>	<i>Post-doctorant</i>	<i>Energétique</i>	<i>10</i>	<i>Estimation du productible (Lot 6)</i>
<i>Post-doc XXX (CNRS)</i>	<i>Post-doctorant</i>	<i>Océanographie</i>	<i>18</i>	<i>Modélisation de la turbulence (Lot 5)</i>
<i>Post-doc XXX (FEM)</i>	<i>Post-doctorant</i>	<i>Océanographie</i>	<i>18</i>	<i>Mesures radar des courants, analyse de données radar (Lot 3)</i>
<i>Ingénieur XXX (CNRS)</i>	<i>Ingénieur</i>	<i>Océanographie</i>	<i>32</i>	<i>Gestion des systèmes radar, mesure de l'état de mer par radar, analyse de données radar (Lot 3)</i>

## 2.5 Justifications des dépenses par partenaires

### 2.5.1 FEM

Adresse de réalisation des travaux : 15 rue Johannes Kepler, 29200 Brest

- Personnel temporaire : 71 000 euros (18 mois post-doc (lot 3) + 6 mois stage M2 (lot 5))
- Personnel permanent : 105 000 euros (coordination projet + encadrement scientifique)
- Prestation de service : 31 500 euros (Actimar, installation/calibration radar HF)
- Frais de missions : 8 600 euros (Réunions de travail + conférences scientifiques)
- Fonctionnement : 3 600 euros (achat logiciel management de projets)
- Frais généraux de structure : 79 200 euros

### 2.5.2 Université de Caen

Adresse de réalisation des travaux : LUSAC, UNICAEN, Site universitaire de Cherbourg-Octeville

- Personnel temporaire : 93 750 euros (10 mois post-doc (lot 6) + 15 mois post-doc (lots 4 et 5))
- Prestation de service : 106 030 euros (IRSN, campagnes de mesure/modélisation numérique)
- Frais de missions : 13 400 euros (Réunions de travail + conférences scientifiques + terrain)
- Fonctionnement : 15 000 euros (consommables et assurances)
- Frais généraux de structure : 9 127 euros

### 2.5.3 CNRS

Adresse de réalisation des travaux : M2C, CNRS/UNICAEN/UR, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen

- Personnel temporaire : 193 000 euros (32 mois d'IR (lot 3) + 18 mois post-doc (lots 5) + 2 stages de M2 (lots 4))
- Frais de missions : 45 600 euros (Réunions de travail + conférences scientifiques + terrain + 4 mois à l'Université de Sheffield)
- Fonctionnement : 4 500 euros (consommables)
- Frais généraux de structure : 9 724 euros



#### **2.5.4 SHOM**

Adresse de réalisation des travaux : HOM/REC, 13 rue du Chatelier, 29200 Brest

- Personnel temporaire : 45 000 euros (12 mois post-doc (lots 5))
- Frais de missions : 6 400 euros (Réunions de travail + conférences scientifiques)
- Frais généraux de structure : 2 056 euros

#### **2.5.5 DCNS-OpenHydro**

Adresse de réalisation des travaux : DCNS, MRE Business Unit, 415 rue Julien de la Gravière, 29200 Brest

- Prestation de service : 22 500 euros (prestation Actimar pour utilisation radar en bande X)

#### **2.5.6 Université du Littoral**

Adresse de réalisation des travaux : LOG, CNRS/ULCO/UL, 28 avenue Foch, 62930 Wimereux

- Personnel temporaire : 37 050 euros (9 mois de post-doc (lot 3 et 4) + 6 mois stage M2 (lots 4))
- Frais de missions : 12 700 euros (Réunions de travail + conférences scientifiques + terrain)
- Fonctionnement : 4 000 euros (consommables)
- Frais généraux de structure : 2 150 euros

### **3. Impact global de la proposition et stratégie de valorisation de protection et d'exploitation des résultats**

#### **3.1 Protection et exploitation des résultats**

Dans le cadre du projet, les résultats communs générés par plusieurs Partenaires dont FEM seront détenus en copropriété entre FEM et les autres partenaires du consortium au prorata de leurs contributions au projet. Les partenaires conviennent de la signature préalable à toute exploitation d'un résultat commun, d'un règlement de copropriété entre les partenaires copropriétaires incluant FEM et confiant un mandat de gestion des droits de propriétés intellectuels issus desdits résultats communs à FEM. Les résultats propres générés par un partenaire demeurent la propriété de ce partenaire.

En matière d'utilisation des résultats pour des besoins de R&D, chaque partenaire à un projet collaboratif concerné, peut utiliser sans contrepartie financière les résultats issus dudit projet pour ses besoins de R&D.

En ce qui concerne l'exploitation des résultats, l'accord de consortium définira les modalités d'exploitation des résultats entre les parties, et le cas échéant les conditions d'accès et d'exploitation des connaissances propres antérieures nécessaires à l'exploitation desdits résultats. Dans les six mois suivant la fin du projet au cours duquel un résultat commun a été obtenu, les partenaires audit projet bénéficient d'un droit prioritaire d'exploitation du résultat commun en contrepartie de conditions financières égales aux coûts financés par FEM majorés de 5%.

Les tiers au projet, et ce quel que soit par ailleurs leur statut vis-à-vis de FEM, pourront éventuellement recevoir une autorisation d'exploitation via une licence, sous réserve d'une autorisation préalable du conseil d'administration de FEM et des parties au projet concerné. Cependant ceci ne peut être interprété comme obligeant une partie à accorder une autorisation.

#### **3.2 Valorisation des résultats**

HYD2M permettra de mettre en œuvre une activité radar en Normandie dont les principes techniques et scientifiques seront intégrés aux formations d'enseignements locales : i) formation de techniciens à Intechmer, ii) formation d'ingénieurs à l'Université de Caen. De plus, le porteur CNRS-M2C envisage de demander la création du site d'étude Raz-Blanchard dans le cadre du SNO Dynalit afin de rendre accessible à la communauté les données acquises dans HYD2M.

Les scénarios hydrodynamiques pourront être transmis au consortium des 2 projets AMI fermes pilotes hydroliennes pour l'estimation du productible en fonction des caractéristiques de leurs machines qui restent, à ce jour, confidentielles.

En outre, les résultats d'HYD2M seront valorisés sous la forme de :

- Rapports techniques ;
- Bases de données issues des simulations numériques, des campagnes *in-situ* et des mesures radar pour la surveillance du site, la prédiction de la ressource et l'estimation du productible ;
- Publications sous forme d'articles dans des revues scientifiques de rang A ou d'actes de conférence. Ces publications seront jointes aux rapports du projet sous forme d'annexes ;
- Participations à des conférences nationales et internationales dans lesquelles les partenaires interviendront sur les thèmes traités par le projet ;
- Codes de calcul permettant l'assimilation de données radar ;
- Codes de traitement des mesures *in-situ* acquises par les instruments déployés ;
- Codes sources des nouveaux développements algorithmiques et numériques.
- Un portail dédié au projet sera hébergé sur le site internet de FEM. Cet outil sera destiné aux acteurs du projet mais permettra également de diffuser des publications et des informations vulgarisées avec l'accord des partenaires.

### 3.3 Impact global du projet

Le secteur hydrolien est en développement sous l'impulsion d'initiatives telles que l'Appel à Manifestation d'Intérêt fermes pilote hydrolienne lancé par l'ADEME. L'exploitation des fermes soutenues par cet AMI permettra de valider les choix technologiques et le modèle économique en prévision du déploiement des fermes à l'échelle industrielle.

Les choix technologiques et les modèles technico-économiques seront éprouvés à travers les projets soutenus par l'AMI fermes pilote hydroliennes : NEPTHYD (porté par ALSTOM et ENGIE) et NORMANDIE HYDRO (porté par DCNS et EDF). Pour sécuriser la rentabilité économique de ces fermes, une meilleure connaissance de la ressource hydrolienne en temps réel et de sa sensibilité aux aléas (états de mer, tempêtes) est nécessaire. Cette question cruciale est au cœur du projet HYD2M. HYD2M fournira la base d'un système de surveillance de la ressource en temps couplant observations et modélisations. Les informations produites permettront d'optimiser :

- la prévision du productible ;
- l'intégration de la puissance fournie par les fermes sur le réseau ;
- l'optimisation de la durée de vie des machines en identifiant les fenêtres météorologiques critiques ;
- la planification des opérations marines.

HYD2M sera donc en lien direct avec l'activité industrielle du consortium.

Une connaissance détaillée de la ressource et de ses aléas permettra de la sécuriser et aidera à maximiser la rentabilité des fermes hydroliennes et donc à minimiser le LCOE (Levelized Cost of Energy) de la filière hydrolienne. La diminution du LCOE est une condition *sine qua none* pour accroître la compétitivité de cette filière et lui garantir un développement à l'échelle industrielle l'inscrivant dans le mix énergétique français. HYD2M contribue donc au développement de projets pré-industriels qui pourront alimenter plusieurs milliers de foyers en électricité et générer plusieurs centaines d'emplois. Ces projets ont vocation à initier le développement de fermes industrielles qui stimuleront encore davantage la création d'emplois. Ils constituent la base d'une filière industrielle française d'excellence qui pourra adresser également les marchés européens et internationaux dont le potentiel est estimé à 10 GW (dont 3 en France).

Le système de surveillance, qui sera développé à travers HYD2M, pourra également être valorisé pour d'autres applications et, en particulier, pour la sécurité maritime du Raz-Blanchard connu pour être un passage particulièrement dangereux. Les données météo-océaniques produites par les systèmes d'observations et de modélisations d'HYD2M pourraient être exploitées par des services opérationnels dédiés

à la sécurité maritime tel que le Centre Régional Opérationnel de Surveillance et de Sauvetage de Jobourg. La plateforme d'océanographie côtière opérationnelle développée dans le cadre du CPER MerSure (2015-2020) pourrait faciliter l'utilisation des résultats de HYD2M dans le cadre de l'action de l'état en mer.

HYD2M contribuera à améliorer la connaissance de l'état initial de l'hydrodynamique du Raz Blanchard. L'hydrodynamique est le moteur du transport sédimentaire et interagit étroitement avec la biologie. Les résultats d'HYD2M trouveront ainsi leurs applications dans la définition de l'état initial hydrodynamique, hydro-sédimentaire et biologique du Raz-Blanchard, une étape indispensable en préparation des futures études d'impact qui précéderont le développement des fermes.

Les connaissances génériques acquises concernant la modélisation de la turbulence dans un cadre couplé houle-courant, la paramétrisation des forçages du vent sur la mer et de l'eau sur le fond pourront être appliquées à tous les modèles côtiers. Il en résultera une meilleure représentation de l'hydrodynamique, du transport sédimentaire et de la dispersion des polluants dissous sur les façades maritimes françaises.

#### **4. Bibliographie**

- [1] Ardhuin, F., A. D. Jenkins, and K. Belibassakis, 2008a: Commentary on 'the three-dimensional current and surface wave equations' by George Mellor. *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 1340-1349.
- [2] Ardhuin, F., N. Rascle, and K. A. Belibassakis, 2008b: Explicit wave-averaged primitive equations using a generalized Lagrangian mean. *Ocean Modelling*, 20, 35-60.
- [3] Ardhuin, F., L. Marié, N. Rascle, P. Forget and A. Roland, 2009: Observation and Estimation of Lagrangian, Stokes, and Eulerian Currents Induced by Wind and Waves at the Sea Surface. *J. Phys. Oceanogr.*, 39, 2820-2838.
- [4] Ausset R. et Farges L., 1968: Utilisation de la rhodamine B dans l'étude des caractéristiques hydrologiques d'un site marin de rejets d'effluents radioactifs. *Rev. Intern. Oceanogr. Med.*, IX:167-188.
- [5] Babanin, A., 2011: *Breaking and Dissipation of Ocean Surface Waves*, p. 485. Cambridge University Press.
- [6] Bailly du Bois P., 2006: Qualification du modèle de dispersion dans le champ proche de l'émissaire de rejet en mer de l'établissement AREVA-NC La Hague, mise à jour DISPRO V.2., 26 p
- [7] Bailly du Bois P., 2011: Automatic calculation of bathymetry for coastal hydrodynamic models. *Computers & Geosciences*, 37, 1303-1310.
- [8] Bailly du Bois P., Dumas F., Solier L., Voiseux C., 2012: *In-situ* database toolbox for short-term dispersion model validation in macro-tidal seas, application for 2D-model. *Continental Shelf Research*, 26, 63-82.
- [9] Bailly du Bois P., Morillon M., L. S., 2014a: Mesure et modélisation de la dispersion verticale dans le raz Blanchard (projet DISVER). IRSN/Prp-Env/SERIS, 2014-21, 56 p.
- [10] Bailly du Bois P., Pouderoux B., Dumas F., 2014b: System for high-frequency simultaneous water sampling at several depths during sailing. *Ocean Engineering*, 91, 281-289.
- [11] Barrick, D.E., 1972: Remote Sensing of Sea State by Radar, Chapter 12 of *Remote Sensing of the Troposphere*. V.E. Derr, Editor, NOAA/Environmental Research Laboratories, 12.1-12.6.
- [12] Barrick, D.E., M.W. Evans, and B.L. Weber, 1977: Ocean Surface Currents Mapped by Radar. *Science*, 198, 138-144.
- [13] Barrick, D.E., and B.L. Weber., 1977: On the Nonlinear Theory for Gravity Waves on the Ocean's Surface, Part II: Interpretation and Applications. *J. Phys. Oceanogr.*, 7, 11-21.
- [14] Bennis A.-C., F. Dumas, F. Ardhuin, B. Blanke, 2015: Turbulence modeling and wave-current interactions. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, 9, 111-117.
- [15] Bennis, A.-C., F. Dumas, F. Ardhuin, and B. Blanke, 2014: Mixing parameterization: impacts on rip currents and wave set-up. *Ocean Engineering*, 42, 213-227.
- [16] Bennis, A.-C., F. Ardhuin, and F. Dumas, 2011: On the coupling of wave and three-dimensional circulation models: Choice of theoretical framework, practical implementation and adiabatic tests. *Ocean Modelling*, 40, 260-272.

- [17] Bennis, A.-C. and F. Ardhuin, 2011: Comments on 'The Depth-Dependent current and Wave Interaction Equations: A Revision'. *Journal of Physical Oceanography*, 41, 2008-2012.
- [18] Bennis, A.-C., Roger Lewandowski, Edriss S. Titi, 2009: Simulations de l'écoulement turbulent marin avec un modèle de déconvolution. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série I*, 347, 445-450.
- [19] Bennis, A.-C., 2008: Etude de quelques modèles de turbulence pour l'océanographie. Thèse de doctorat, Univ. Rennes 1, 1-303.
- [20] Boutet, M., 2015: Estimation du frottement sur le fond pour la modélisation de la marée barotrope. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 1-175.
- [21] Broche P., J. C. De Maistre and P. Forget, 1983: Mesure par radar décimétrique cohérent des courants superficiels engendrés par le vent. *Oceanologica Acta*, 6, 43-53.
- [22] Broche, P., "Contrôle de vitesse pour crêtes des vagues." *Met. Mar.*, 181, 10-15 (1998).
- [23] Filipot J.-F., Ardhuin F., Babanin A.V., 2010: A unified deep-to-shallow water wave-breaking probability parameterization. *Journal of Geophysical Research-oceans*, 115(C04022).
- [24] Filipot, J. F., & Cheung, K. F., 2012b: Spectral wave modeling in fringing reef environments. *Coastal Engineering*, 67, 67-79.
- [25] B.J. Geurts, D.D. Holm, 2003: Regularization modeling for large-eddy simulation. *Phys. Fluids*, 15, L13-L16.
- [26] Geurts B.J. and D. D. Holm, 2006: Leray and LANS-alpha modeling of turbulent mixing. *Journal of Turbulence*, 10, 10-52.
- [27] Goeury, et al., 2015: Uncertainties quantification on a real case with Telemac-2D. *Proceedings of XXIIIth Telemac User Conference*.
- [28] Guillou, N., 2007: Rôles de l'hétérogénéité des sédiments de fond et des interactions houle-courant sur l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire en zone subtidale. Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, 1-474.
- [29] Hasselmann, K., 1971: Determination of Ocean-Wave Spectra from Doppler Radio Return from the Sea Surface. *Nature*, 229, 16-17.
- [30] Hecht M.W., D. D. Holm, M. R. Petersen, and B. A. Wingate, 2008: Implementation of the LANS-alpha turbulence model in a primitive equation ocean model. *Journal of Computational Physics*, 227, 5691-5716.
- [31] Kirby, J. T. and T.-M. Chen, 1989: Surface waves on vertically sheared flows: approximate dispersion relations. *Journal of Geophysical Research*, 94C, 1013-1027.
- [32] Kumar, N., G. Voulgaris, J. C. Warner, and M. Olabarrieta, 2012: Implementation of the vortex force formalism in the coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system for inner shelf and surf zone applications. *Ocean Modelling*, 47, 65-95.
- [33] Leckler, F., 2013: Observation et modélisation du déferlement des vagues. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.
- [34] Le Bouteiller, G., 1972: Côte ouest du Cotentin, étude des évolutions du littoral, phase1. *Rapport Sogreah*, 1-57.
- [35] Le Bouteiller, G., Portugal, 1973: Côte ouest du Cotentin, étude des évolutions du littoral, phase2. *Rapport Sogreah*, 1-57
- [36] Longuet-Higgins, M. S., and R. W. Stewart, 1964: Radiation stresses in water waves: A physical discussion, with applications, *Deep Sea Res.*, 11, 529-563.
- [37] Martin V., C.-T. Pham, S. Saviot, 2015: Tidal Basin Modelling : The Alderney Race, the Pentland Firth, and the Paimpol-Bréhat sites modelled in Telemac software
- [38] McWilliams, J. C., J. M. Restrepo, and E. M. Lane, 2004: An asymptotic theory for the interaction of waves and currents in coastal waters. *J. Fluid Mech.*, 511, 135-178.
- [39] Petersen M.R., M.W. Hecht, B.A. Wingate, 2008: Efficient form of the LANS-a turbulence model in a primitive-equation ocean model, *J. Comp. Phys.*, 227, 5717-5735.
- [40] Orbi, A., 1986: Circulation de marée dans le golfe normand-breton. Thèse de l'Université de Brest, 1-230.

- [41] Retière, C., 1979: Contribution à la connaissance des peuplements benthiques du golfe Normano-Breton. Thèse d'Etat, Université de Rennes I, 1-431.
- [42] Reynaud, J.-Y., Tessier, B., Auffret, J.-P., Berné, S., De Batist, M., Marsset, T., Walker, P., 2003: The offshore Quaternary sediment bodies of the English Channel and its Western approaches. *Journal of Quaternary Science*, 18, 361-371.
- [43] Schmidt, R. O., 1986: Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Trans. Antennas Propag.* AP-34, 276–280
- [44] Sentchev, A., Forget, P., Barbin, Y., & Yaremchuk, M., 2013: Surface circulation in the Iroise Sea (W. Brittany) from high resolution HF radar mapping. *Journal of Marine Systems*, 109, S153-S168.
- [45] Smith, J., 2006: Wave-current interactions in finite depth, *J. Phys. Oceanogr.*, 36, 1403–1419.
- [46] Smith et al., 2010: The Parallel Ocean Program (POP) : reference manual, 1-140.
- [47] Stewart, R.H. and J.W. Joy, 1974: HF Radio Measurements of Ocean Surface Currents. *Deep Sea Res.*, 21, 1039-1049.
- [48] Wyatt, L. R., 2000: Limits to the inversion of HF radar backscatter for ocean wave measurement. *J. Atm. Ocean. Technol.*, 17, 1651-1665.
- [49] Wyatt, L. R., J. J. Green, K.-W. Gurgel, J.-C. Nieto Borge, K. Reichert, K. Hessner, H. Günther, W. Rosenthal, O. Saetra and M. Reistad, 2003: Validation and intercomparisons of wave measurements and models during the EuroROSE experiments." *Coastal Engin.*, 48, 1-28.
- [50] Yaremchuk, M., Sentchev, A., 2011: A combined eof/variational approach for mapping radar-derived sea surface currents. *Continental Shelf Research*, 31, 758-768.
- [51] Zippel, S., & Thomson, J., 2015: Wave breaking and turbulence at a tidal inlet. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 1016-1031.