

## Feuille de route Scientifique et Technique

### Contexte

---

France Energies Marines (FEM) est l'institut national de référence mis en place pour promouvoir et accompagner le développement des technologies des Energies Marines renouvelables (EMR) en France. Regroupant la majorité des acteurs industriels, académiques et publics impliqués dans le développement des EMR, FEM a défini sa feuille de route avec ses membres dans l'objectif de réaliser l'optimisation souhaitable entre le besoin industriel court et moyen-terme, le savoir-faire académique dans les métiers liés aux EMR et la mise en valeur des écosystèmes régionaux.

Sur ce secteur émergent pour lequel l'Europe mène largement la compétition internationale, notre action se conçoit également en lien étroit avec les volets EMR et éolien offshore de la feuille de route stratégique de développement de technologies de l'énergie (« SET-Plan »), pilier de la politique européenne d'innovation technologique en matière d'énergie et de climat.

En y incluant le savoir-faire, le potentiel et la stratégie nationaux, la feuille de route de France Energies Marine établit en premier lieu les enjeux industriels et économiques des EMR avant de définir dans les quatre programmes scientifiques et techniques dominants de ce marché, les sujets de recherche principaux qui constitueront les axes à prioriser à court terme pour définir des programmes de R&D collaboratifs.

Les investissements d'avenir soutiennent cette démarche dans le cadre du programme des Instituts de Transition Énergétique (ITE). Au travers d'un appel à projet annuel, établi avec France Energies Marines, l'Etat contribue aux moyens nécessaires pour mettre en place cette stratégie.

L'objectif pour les acteurs nationaux est double et vise principalement à :

- exploiter le potentiel naturel pour introduire dans le mix énergétique, parmi les objectifs d'énergie renouvelable, une part d'énergie marine. Ceci se fera en maximisant les atouts des EMR (meilleure connaissance des ressources, du milieu et prise en compte des impacts), en relevant les défis technologiques (optimisation de la fiabilité, durabilité, rendement et intégration aux réseaux) et économiques (diminution du coût moyen de l'énergie produite par effets d'échelle) ;
- développer une industrie des EMR forte à l'export, d'une part grâce au potentiel existant (leaders offshore, naval, énergies décarbonées, scientifiques) et aux initiatives politiques (e.g., appels d'offre originaux et massifs en éolien posé, primauté mondiale de la France sur les fermes pilotes en éolien offshore flottant), d'autre part en regard des marchés mondiaux avec ses différents segments (profitant de l'Outre-Mer et des îles de la métropole comme vitrine pour les milieux insulaires) en s'attachant à ce que des normes établies sur la base d'efforts communs s'imposent au niveau international.

De ces objectifs, plusieurs enjeux ont été identifiés pour le développement de la filière au niveau national et européen. Après analyse de ces enjeux et de l'écosystème actuel, France Energies Marines a choisi de se concentrer sur ceux les plus adaptés à sa mission et dans l'intérêt global de l'écosystème. Ces enjeux, utilisés pour justifier l'importance des thèmes de recherche, sont rappelés ci-dessous :

**E1 : Performance/Compétitivité de la chaîne de valeur** : les gains de performances seront atteints par les innovations technologiques, et par les effets d'échelle, en favorisant le déploiement effectif des technologies en fermes pilotes pour l'ensemble des technologies EMR. Les efforts entrepris doivent permettre aux EMR d'atteindre un niveau de compétitivité comparable aux autres énergies décarbonées.

**E2 : Développement des standards** : support à la mise au point des standards de conception des technologies EMR, notamment pour l'éolien flottant pour lequel les règlements de conception ne sont pas encore fixés par les sociétés de classification. Standardiser les procédures d'opération de maintenance en mer, les navires.

**E3 : Intégration des systèmes** : s'assurer que le développement des infrastructures de réseaux à l'échelle européenne intègre des projets EMR de grande envergure. Dégager des bénéfices par la baisse du coût des technologies EMR, augmenter leur part face à d'autres énergies renouvelables tels que l'éolien terrestre ou le solaire dans les décisions prises sur le mix énergétique. Investiguer les options de stockage.

**E4 : Aspects non technologiques** : parvenir à un business model durable grâce aux améliorations technologiques et aux mesures de soutien au marché pour permettre un retour sur investissement comparable à d'autres types d'investissements. Garantir la disponibilité des financements afin de satisfaire la demande du marché et soutenir l'émergence des technologies EMR. Lever les incertitudes sur les impacts environnementaux potentiels des EMR afin d'accélérer leur acceptabilité.

**E5 : Enjeux sociétaux** : s'assurer que la hausse des connaissances et les bénéfices économiques associés au développement des EMR sont reconnus et pris en compte par les décideurs. Augmenter

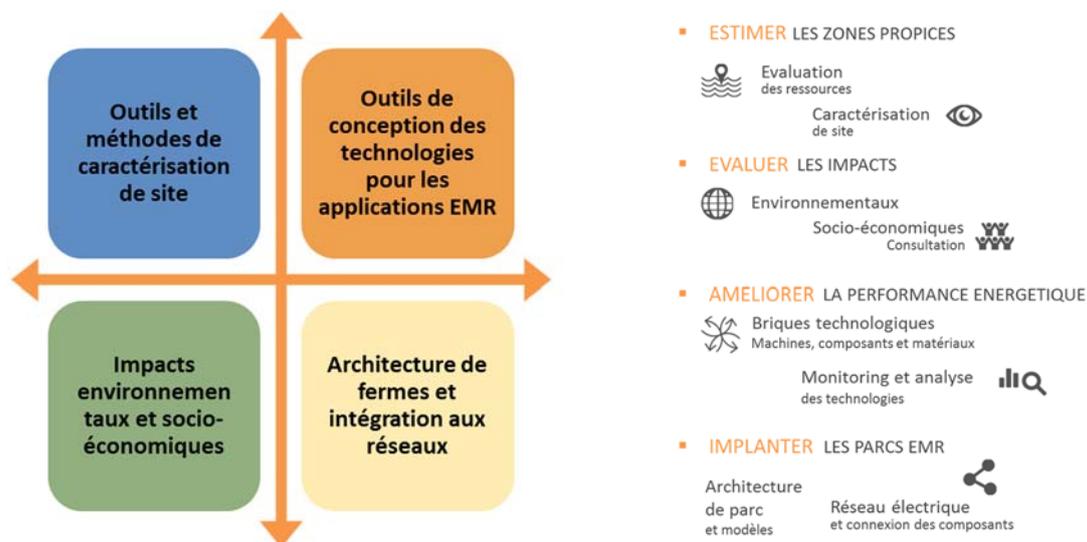
la connaissance du grand public sur les EMR et améliorer la communication concernant les impacts potentiels (ou l'absence d'impacts) sur l'environnement afin de réduire les délais de concertation.

**E6 : Connaissance et maîtrise du milieu marin :** le développement des EMR n'est possible qu'en assurant une maîtrise complète des phénomènes marins et une connaissance précise des fonds. Avec des contraintes spécifiques et complexes, souvent très liées entre état de la mer, vent et courant, le développement demande de maîtriser les sciences de la mer et leur mutualisation au service des EMR.

D'autres enjeux d'importance tels que l'optimisation des flux logistiques, le développement des infrastructures de réseaux, les mesures de soutien au marché sont identifiés dans la feuille de route stratégique de développement de technologies de l'énergie (SET-Plan). Ils relèvent davantage d'une stratégie politique de soutien au développement de la filière et les activités de R&D pouvant être menées dans ces domaines sont déjà couvertes par d'autres programmes. FEM suivra de près les évolutions afin de s'assurer de la complémentarité des actions concernant ces enjeux avec son programme de R&D.

## Programmes de recherche

La prise en compte des six enjeux précédents et leur déclinaison autour des objectifs des acteurs nationaux a conduit à définir des programmes de recherche transverses couvrant de la recherche amont à la recherche pré-compétitive. Ils viennent en complémentarité d'autres volets de la programmation nationale, notamment des appels d'offre de parcs commerciaux, de fermes pilotes ou de briques technologiques bénéficiant du soutien de l'Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME). Soumise à l'Agence Nationale de la Recherche, la feuille de route scientifique et technique de France Energies Marines se décline ainsi en quatre programmes de recherche complémentaires :



L'objectif est de disposer de moyens de mesures, de méthodes de caractérisation et de simulation permettant de fournir une description précise de l'environnement physique (ressources vent, houle, courant, température) et des fonds marins des sites propices à l'installation des parcs EMR.

L'enjeu principal est d'acquérir une meilleure connaissance et maîtrise du milieu marin afin de sélectionner au mieux les zones d'implantation des parcs, de permettre une optimisation de la performance globale des machines par une meilleure prise en compte des ressources et des interactions avec le fond, mais également d'apporter des informations fiables pour une meilleure prise en compte des impacts environnementaux.

## Météocéan

### *Spatialisation des observations*

**Objectifs technologiques (E6)**: développer ou améliorer des systèmes de mesures et des techniques de traitement de données donnant accès à des séries et des statistiques détaillées des vents, vagues, courants et température à haute résolution pour fournir des informations permettant de valider la capacité des modèles numériques à représenter la variabilité spatiale des ressources à l'échelle d'un site EMR.

**Verrous scientifiques** : caractérisation fine du vent et des vagues à partir notamment des données satellitaires pour obtenir un niveau de détail suffisant. Déploiement de moyens innovants et de méthodes de traitement de données pour accéder à la variabilité temporelle des données. Algorithmes de traitement de données pour accéder à la variabilité verticale du vent et du courant.

**Livrables attendus** : algorithmes et méthodologies de simulation pour l'obtention de cartographies 3D de prédiction de vague, vent, courant, températures sur de larges distances.

### *Mesure et modélisations des évènements extrêmes*

**Objectifs technologiques (E6, E1)** : fournir des informations fiables sur les conditions météoro-océanographiques nécessaires au dimensionnement aux extrêmes des structures EMR, la planification des opérations de maintenance ou le passage en mode de survie des machines.

**Verrous scientifiques** : conception de systèmes de mesures *in situ* résistant aux conditions extrêmes intégrant leur cage de déploiement ou leur ligne/système d'ancrage. Applicabilité et validité des mesures par télédétection terrestre et spatiale pour les EMR. Prise en compte de l'information spatiale et multivariée dans l'extrapolation des extrêmes.

**Livrables attendus** : systèmes de mesures capables de capturer les évènements extrêmes. Algorithmes et méthodes numériques de prévision météoro-océanographiques pour conditions extrêmes intégrant les couplages.

### *Caractérisation de la dynamique haute fréquence des ressources*

**Objectifs technologiques (E6)** : fournir les données d'entrée intégrant la dynamique haute fréquence des ressources EMR (vent, vagues, courant, température) associée à la cinématique des vagues et à la turbulence pour le dimensionnement des systèmes.

**Verrous scientifiques** : intégration de la dynamique haute fréquence inhérente à la cinématique des vagues, à la turbulence méso-échelle et aux courants de marée dans les modèles. Développement de modèles permettant de simuler les ressources sur des domaines/périodes temporelles suffisamment grands.

**Livrables attendus** : modèles numériques capturant la physique nécessaire à la simulation de l'évolution à haute fréquence des ressources. Moyens de mesures de la variabilité haute fréquence des états de mer, du vent, du courant et de la température à incertitude minimale.

### *Amélioration des couplages vent-vagues-courant*

**Objectifs technologiques (E6)** : fournir une estimation plus fine des ressources, des chargements hydrodynamiques plus fiables pour le dimensionnement des systèmes EMR et des données environnementales plus précises pour toutes les autres applications concernées (opérations en mer, intégration sur le réseau, etc.).

**Verrous scientifiques** : caractérisation de l'effet de la rugosité associée aux états de mer sur la couche limite atmosphérique. Paramétrage de l'effet du vent sur le courant. Paramétrage fin de la dissipation des états de mer dans les zones à forts gradients de courant. Caractérisation des circulations moyennes induites par les vagues.

**Livrables attendus** : modèles numériques de couplage vent/vagues/courant validés. Evolution des standards de simulation.

### *Géologie/géophysique marines*

#### *Caractérisation du fond à haute résolution*

**Objectifs technologiques (E6)** : développer des moyens pour caractériser la bathymétrie à une résolution de l'ordre de 1 à 2 m, pour des profondeurs respectivement jusqu'à 100m et entre 100 et 200m pour les sites à fonds meubles. Développer les moyens pour caractériser la bathymétrie à une résolution sub-métrique sur site à fonds rocheux à des coûts raisonnables. Développer les moyens pour caractériser les très petits fonds notamment en zone turbide.

**Verrous scientifiques** : maîtrise des flux sédimentaires et de la turbidité. Positionnement 3D précis des instruments embarqués, notamment dans les zones très énergétiques. Maîtrise du profil de célérité. Pénétration des ondes optiques dans les eaux turbides.

**Livrables attendus** : algorithmes de recalage de la navigation et des cartes bathymétriques. Méthodes de mesures ou d'indication de la variabilité spatiale du profil de célérité. Modèles de dynamique sédimentaire. Systèmes de mesures en zone turbide.

#### *Caractérisation des fonds par la géophysique*

**Objectifs technologiques (E6, E1)** : caractériser par des méthodes géophysiques la nature, les hétérogénéités et la structure du sous-sol sur des profondeurs de l'ordre de celles atteintes lors des opérations géotechniques. Permettre l'identification de la variabilité latérale et verticale des données géophysiques, en particulier sur les fonds rocheux.

**Verrous scientifiques** : outils générant une pénétration des ondes en préservant une résolution verticale suffisante dans les fonds durs. Corrélation des données géophysiques et géotechniques. Carottage de fonds sédimentaires non argileux.

**Livrables attendus** : méthodes de mesure nature/structure du sous-sol sur profondeurs importantes, fonds durs ainsi que sédiments grossiers. Systèmes de géophysique 3D adaptés aux petits fonds, forts courants, houle. Systèmes de mesure géophysique à haute résolution.

#### *Caractérisation de la dynamique sédimentaire*

**Objectifs technologiques (E6, E4)** : prédire les transferts sédimentaires sur les zones d'implantation des dispositifs EMR et à proximité (mobilité du substrat sédimentaire, morphodynamique des structures sédimentaires, flux sédimentaires, dynamique sédimentaire en périphérie).

**Verrous scientifiques** : meilleure compréhension de l'évolution temporelle et de la mobilité des formes sédimentaires en lien avec les conditions hydrodynamiques. Amélioration de la mesure des flux sédimentaires, en suspension et charriés. Optimisation des modèles hydro-sédimentaires grande échelle.

Livrables attendus : outils de modélisation intégrant les lois de transport et la morphodynamique des structures. Outils de simulation à échelle régionale. Méthodologies d'observation et mesure des flux sédimentaires.

#### *Prévention des risques sismiques/stabilité des pentes, activités humaines*

Objectifs technologiques (E6, E1) : caractériser, détecter et prévoir l'évolution de la morphodynamique et de la stabilité des pentes à différentes échelles temporelles et spatiales. Etre capables de détecter tout objet issu de l'activité humaine et pouvant interagir avec les applications EMR sur le fond et enfouis.

Verrous scientifiques : adaptation des précurseurs sismiques pour mieux anticiper les zones de rupture. Modélisation de l'évolution morphodynamique à différentes échelles spatiales et temporelles. Méthodes de surveillance de la morpho-dynamique répliquables. Méthodes de détection et caractérisation des objets anthropiques (magnétiques, enfouis...) à des résolutions spatiales suffisantes.

Livrables attendus : algorithmes d'identification de structures morphologiques. Modèles de l'évolution morphodynamique. Outils et méthodes d'observation répétables et monitoring en continu de la morphologie.

#### *Outils de conception des technologies pour les applications EMR*

L'objectif est de disposer de méthodes de caractérisation et de simulation permettant d'optimiser le dimensionnement, le fonctionnement et la maintenance des structures et de leurs composants par une meilleure maîtrise des comportements en milieu marin.

Les principaux enjeux concernent l'optimisation de la performance globale des systèmes, l'amélioration de leur compétitivité ainsi que le développement de standards de conception. Ainsi, les outils de conception développés apporteront aux acteurs de la filière les moyens d'optimiser les technologies pour mieux se positionner sur le marché en toute connaissance de leur comportement et en conformité aux futurs standards.

#### *Réponse des structures/composants en environnement marin*

##### *Couplages fluide/structure*

Objectifs technologiques (E1, E2) : développer des outils et méthodes numériques de dimensionnement des flotteurs tenant compte des couplages forts. Développer des modèles aérodynamiques adaptés aux dimensions des éoliennes intégrant les interactions avec le mouvement des pales. Développer des outils de dimensionnement des hydroliennes tenant compte des forts taux de turbulence liés aux courants et impactant les structures. Intégrer les systèmes « Power Take Off » (PTO) dans les modèles de dimensionnement des systèmes houlomoteurs.

Verrous scientifiques : outils et méthodes hydrodynamiques représentant finement le champ incident et son interaction avec les perturbations de l'écoulement environnant un flotteur. Modèles aérodynamiques tenant compte de l'interaction fluide entre le champ incident et les mouvements des pales et de l'interaction des volumes voisins. Méthodologies expérimentales et numériques tenant compte des similitudes de Reynolds entre l'air et l'eau. Outils de dimensionnement d'hydroliennes intégrant les sollicitations fluides d'amplitudes variables et de contenu fréquentiel large. Intégration couplée de systèmes PTO dans les modèles de dimensionnement des systèmes houlomoteurs.

Livrables attendus : algorithmes, modèles, méthodes numériques, méthodologies de caractérisation et de simulation. Evolution des standards de conception.

### *Impact du bio-fouling sur les composants/structures*

**Objectifs technologiques (E1, E4) :** mieux caractériser l'impact de la bio-colonisation sur le dimensionnement. Quantifier l'intérêt à l'état initial et dans le temps, de solutions anti-fouling sur le dimensionnement.

**Verrous scientifiques :** définition des paramètres de mesures et contrôle du bio-fouling fonction des sites. Méthodes numériques intégrant la dissymétrie et l'hétérogénéité de la bio-colonisation. Qualification de l'impact dynamique de laminaires en mouvement sur la ligne/câble. Nouveaux systèmes anti-fouling.

**Livrables attendus :** stratégies de monitoring adaptées. Modèles numériques d'évolution des espèces. Méthodes numériques permettant d'intégrer précisément les caractéristiques identifiées en fonction des impacts attendus.

### *Affouillement/Stabilisation des structures*

**Objectifs technologiques (E1, E2, E6) :** maîtriser l'évolution de la tenue de fondations et des ancrages mais aussi la tenue et l'évolution de stabilité de câble statique de puissance en site hydrolien.

**Verrous scientifiques :** modèles de dimensionnement des fondations ou ancrages intégrant les sollicitations cycliques liées aux machines et aux sollicitations fluides sur le substrat, ainsi que l'évolution du substrat à l'interface de la fondation/ancrage. Modèles de stabilité de câble tenant compte de la forte turbulence et du chaos bathymétrique en site hydrolien.

**Livrables attendus :** modèles numériques intégrant le couplage mécanique/fluide/ géotechnique sur la tenue mécanique des fondations/ancres. Modèles numérique de stabilité des câbles statiques tenant compte de la dégradation du substrat.

### *Suivi en service et durée de vie en environnement marin*

#### *Comportement des structures/composants en fatigue*

**Objectifs technologiques (E1, E2) :** développer et qualifier des modèles de simulation du comportement en fatigue des matériaux ou composants (câbles, flotteurs, assemblages collés, composites, béton) qui subissent des sollicitations multi-physiques (électrique, thermique et mécanique). Identifier et définir les paramètres clés de surveillance d'un parc.

**Verrous scientifiques :** identification du comportement mécanique des nouveaux matériaux (composites et béton haute performance). Identification de modes originaux de fatigue (couplage électrique/thermique/mécanique des câbles). Modèles numériques de prédiction de durée de vie. Identification de gammes d'intensités et d'occurrences associées aux impacts de déferlements locaux sur la structure des flotteurs.

**Livrables attendus :** modèles numériques tenant compte des fréquences d'excitations caractéristiques de la physique multiple du site sur le comportement de la structure ou des assemblages. Evolution des standards de conception.

#### *Vieillessement des matériaux/composants/structures*

**Objectifs technologiques (E1, E2) :** qualifier l'impact de choc sur la structure. Apporter une meilleure compréhension du vieillissement des matériaux en mer. Qualifier des processus de « recharge structurelle » suite à des avaries. Identifier les paramètres clés de surveillance d'un parc.

**Verrous scientifiques :** couplage de la diffusion d'eau de mer/tenue mécanique dans les matériaux composites et le béton haute performance. Erosion en milieu marin et effets d'interactions de plusieurs matériaux à proximité. Cavitation en bout de pales des hydroliennes. Impacts/chocs galets

en milieu hydrolien, abrasion due au transport sédimentaire. Vieillessement spécifique dans la « splash zone » des flotteurs.

Livrables attendus : mesures in-situ, modèle numérique et monitoring sur les fermes pilotes. Nouvelles approche expérimentale (méthode de vieillissement accéléré, caractérisation mécanique, chocs, cavitation). Modèles numériques locaux et globaux. Méthodes de recharge structurelle.

#### *Stratégies de monitoring innovantes*

Objectifs technologiques (E1, E2) : développer une stratégie de monitoring pertinente, basée sur la caractérisation des sollicitations des ressources couplée à la réponse de la structure aux sollicitations identifiées.

Verrous scientifiques : optimisation des moyens de mesures (autonomie, reconnaissance de sollicitation, identification d'évènements redondants...) et adaptés au besoin (application, matériau, installation). Caractérisation des impacts associés à une anomalie enregistrée par des méthodes spécifiques. Qualification du comportement des capteurs en milieu marin.

Livrables attendus : stratégie de monitoring couplée entre les sollicitations externes et la réponse de la structure. Outil numérique et méthodologie. Moyens de mesure optimisés.

#### *Concepts innovants*

Objectifs technologiques (E1) : développer de nouveaux concepts de composants ou systèmes.

Verrous scientifiques : utilisation de modèles validés afin de gagner en temps de développement et en fiabilité de conception.

Livrables attendus : évaluation de preuves de concept.



### *Impacts environnementaux et socio-économiques*

Ce programme poursuit un double objectif :

- identifier les réels enjeux écologiques et socio-économiques posés par les phases d'installation, de fonctionnement, de maintenance et de démantèlement des projets EMR.
- développer des outils et méthodologies permettant de mesurer, qualifier, analyser, prédire les impacts environnementaux et socio-économiques des EMR qui auront été identifiés.

Les principaux enjeux concernent les aspects non technologiques et les enjeux sociétaux. Les outils et méthodes développés permettront également de réduire les délais d'instruction des dossiers et d'apporter des éléments de réponse dans les débats. Il s'agit d'une part de proposer des solutions acceptables pour préserver au mieux l'environnement, d'autre part de ne pas nuire aux activités économiques présentes dans les secteurs concernés par l'implantation de futurs parcs. Ils permettront également, dès les phases d'identification des zones propices, d'anticiper sur les mesures à mettre en place.

#### *Impacts environnementaux*

##### *Modification des habitats*

Objectifs technologiques (E4, E5) : évaluer et prédire la modification des paramètres physico-chimiques constitutifs des habitats suite à l'installation et au fonctionnement d'un parc EMR. Identifier les enjeux spécifiques à chaque habitat et technologie pour mieux cibler les études d'impact et suivis à mettre en place. Evaluer et prédire l'effet récif des projets EMR et ses implications sur leur acceptabilité et les écosystèmes. Pour des impacts négatifs résiduels identifiés, évaluer et développer des solutions d'évitement et de réduction des impacts.

Verrous scientifiques : identification des couplages physique-biologique dans les modifications induites par les projets EMR sur les habitats. Instrumentation adaptée au suivi des paramètres physico-chimiques et biologiques. Modélisation de l'effet récif à échelle locale et globale. Evaluation des impacts cumulés.

Livrables attendus : modèles prédictifs de la modification des paramètres physico-chimiques constitutifs des habitats et du couplage avec la composante biologique liée à l'installation et au fonctionnement d'un parc EMR. Modèle de prédiction de l'effet récif.

#### *Impact de l'éolien sur l'avifaune : enjeu grande échelle*

Objectifs technologiques (E4, E5) : Evaluer et prédire l'impact des projets éoliens sur les populations d'oiseaux marins. Etudier à grande échelle les risques de collision, l'effet barrière, les pertes d'habitats.

Verrous scientifiques : travail à très grande échelle. Instrumentations adaptées pour analyser le comportement des espèces en contact avec les parcs. Outils de modélisation biologique.

Livrables attendus : modèles d'impacts cumulés à l'échelle d'un et de plusieurs parcs pour les populations migratrices d'oiseaux.

#### *Impacts acoustiques*

Objectifs technologiques (E4, E5) : améliorer la connaissance et réduire les impacts acoustiques de l'installation et de l'opération des parcs EMR en étudiant l'impact de la pression acoustique sur le comportement des espèces.

Verrous scientifiques : instrumentation et méthodologie adaptées aux conditions hydrodynamiques des sites EMR (acoustique-comportement). Sensibilité des espèces (mammifères marins, poissons et invertébrés). Multiplication des mesures acoustiques d'émission de bruit des projets EMR.

Livrables attendus : Instrumentation/méthodologie couplée : acoustique/comportement. Modèles d'évaluation des impacts acoustiques.

#### *Risques de collision sous-marine*

Objectifs technologiques (E4, E5) : Identifier si il y a un enjeu de risque de collision pour les organismes marins à l'échelle des parcs commerciaux hydroliens et éoliens flottants (câbles).

Verrous scientifiques : instrumentation et méthodologie adaptées aux conditions hydrodynamiques des sites EMR. Sensibilité des espèces.

Livrables attendus : stratégie de monitoring (instrumentation/méthodologie pour évaluation comportementale) adaptée aux conditions hydrodynamiques. Modèles de risques.

#### *Impacts électromagnétiques*

Objectifs technologiques (E4, E5) : comprendre les impacts des champs électromagnétiques (CEM) sur les espèces marines, en particulier liés aux câbles non-ensouillés dans les environnements rocheux des parcs hydroliens ou aux câbles en pleine eau des parcs flottants.

Verrous scientifiques : instrumentation et méthodologie adaptées aux conditions hydrodynamiques des sites. Sensibilité des espèces benthiques et largement mobiles aux CEM.

Livrables attendus : stratégie de monitoring (instrumentation/méthodologie) pour évaluation des CEM produits et réponses biologiques associées. Modèles pour effets cumulés si impact. Détermination de seuils d'émission

### *Impact écosystémique*

Objectifs technologiques (E5) : Améliorer la connaissance des impacts des projets EMR à l'échelle des écosystèmes en rassemblant les connaissances acquises sur les différents compartiments et en étudiant les effets (effet récif, effet réserve, modification des habitats).

Verrous scientifiques : vue d'ensemble des impacts sur les écosystèmes. Etude à l'échelle de l'écosystème des impacts positifs et négatifs pouvant avoir des effets antagonistes sur les compartiments alors que d'autres se surimposent.

Livrables attendus : modèles des impacts des EMR intégrant les interactions à l'échelle écosystémique.

### *Remise en contexte des impacts liés aux EMR*

Objectifs technologiques (E5) : remettre en perspective les impacts liés aux EMR dans un contexte large de cumuls d'activités anthropiques et de changements globaux auxquels sont soumis les écosystèmes marins.

Verrous scientifiques : estimation de l'échelle pertinente. Nécessité de connaître assez finement les impacts des projets EMR. Disponibilités de données sur autres activités et changements globaux.

Livrables attendus : modèle d'estimation des impacts liés aux EMR dans contexte très large bande.

### *Impacts socio-économiques*

#### *Compensation écologique*

Objectifs technologiques (E5) : disposer de propositions de compensation en milieu marin pertinentes lorsque les mesures d'évitement et de réduction sont estimées insuffisantes.

Verrous scientifiques : mesures de compensation récentes en milieu terrestre et difficilement transposables au milieu marin. Optimisation de la relation compensation/acceptabilité.

Livrables attendus : proposition et modélisation de mise en place de solutions de compensation écologique.

#### *Approche globale des interactions des projets EMR avec l'activité de pêche*

Objectifs technologiques (E5) : estimer et réduire l'impact des projets EMR sur l'activité de pêche avec une approche globale à deux entrées écologiques et socio-économiques.

Verrous scientifiques : combinaison des aspects écologiques et économique dans un même modèle d'estimation d'impact.

Livrables attendus : modèles écologiques, modèles économiques, modèles spatiaux-temporels et estimer comment les parcs pourraient éventuellement constituer des zones de conservation halieutiques telles que prévues par la loi sur la biodiversité.

#### *Acceptabilité*

Objectifs technologiques (E5) : étudier et améliorer l'acceptabilité des projets EMR par une meilleure connaissance des impacts environnementaux induits par les EMR combinés à d'autres impacts (paysager, prix de l'immobilier, emploi et formation, co-activités, tourisme...)

Verrous scientifiques : méthodologie générique basée sur une bonne estimation des enjeux utilisable pour tous les projets et de l'échelle du site à l'échelle nationale.

Livrables attendus : méthodologie permettant d'appréhender l'acceptabilité des projets et propositions de mesures permettant de l'augmenter.

## *Planification des usages*

**Objectifs technologiques (E5) :** améliorer la planification spatiale des usages en mer en optimisant l'intégration des projets EMR très en amont. Mettre en place des méthodes et outils permettant d'évaluer l'intégration des infrastructures EMR avec les usages présents et futurs.

**Verrous scientifiques :** approches permettant d'intégrer des données hétérogènes multi-niveaux et d'en proposer des modes de représentation adaptés.

**Livrables attendus :** modèles de simulation des interactions spatio-temporelles entre usages existants et infrastructures EMR. Approches prospectives pour évaluer l'intégration des technologies EMR durant les différentes phases des projets.

## **Architecture de fermes et intégration aux réseaux**

Ce programme vise à développer les outils et méthodologies qui permettent d'optimiser le déploiement de parcs EMR et leur intégration au réseau électrique d'un point de vue technico-économique.

Les principaux enjeux concernent l'optimisation de la performance globale des parcs, le développement de standards de conception et l'intégration aux réseaux. Ainsi, les outils et méthodes développés apporteront aux acteurs de la filière les moyens d'optimiser, selon les critères les plus pertinents, les coûts globaux : les éléments à prendre en compte comprennent les risques de défaillance, l'apport des solutions de mutualisation, la maintenance des systèmes sur l'ensemble de la chaîne, depuis les machines jusqu'au raccordement au réseau électrique terrestre.

### *Architecture de fermes*

#### *Disposition optimisées des machines au sein d'un parc*

**Objectifs technologiques (E1, E2) :** développer les outils d'optimisation de l'emplacement des machines au sein d'un parc, tenant compte des interactions entre machines qui impactent la production.

**Verrous scientifiques :** modèles numériques et solveurs associés intégrant la turbulence induite par le sillage et des effets de blocage dans des volumes représentatifs d'un parc.

**Livrables attendus :** outils et méthodes numériques validés représentatifs des effets de sillage et blocage. Evolution des standards de conception.

#### *Disposition optimisées des liaisons fond-surface*

**Objectifs technologiques (E1, E2) :** développer des outils et méthodologies spécifiques de gestion des interactions des liaisons fond-surface dans le cadre de parc EMR (flottant) et développer des outils et méthodologies spécifiques de conception des chemins de câbles, notamment dans les zones à fort courant et fonds rocheux.

**Verrous scientifiques :** modélisation des risques de collision entre lignes d'ancrages et câbles dans la colonne d'eau. Modélisation des efforts hydrodynamiques sur câbles et lignes d'ancrage en condition extrême. Solutions de monitoring adaptées.

**Livrables attendus :** outils et méthodologies de dimensionnement des chemins de câbles et liaisons fond-surface. Evolution des standards de conception et préconisation d'installation des lignes d'ancrage et des câbles. Solution technologique de maintien des câbles. Outils de monitoring/surveillance des câbles et lignes d'ancrage.

### *Ancrages et connexions mutualisés*

**Objectifs technologiques (E1, E2)** : développer des outils d'optimisation technique et économique des systèmes d'ancrages et connexions mutualisés, tenant compte des phases d'installation et de maintenance. Intégration des couplages entre le milieu, le fond et les sollicitations mécaniques sur la structure d'ancrage sélectionnée, ainsi que l'aspect multidirectionnel des sollicitations.

**Verrous scientifiques** : outils de modélisation intégrant les couplages fluides-structures sur les lignes et systèmes d'ancrages ou de connexion, les couplages entre la géotechnique des fonds marins et la tenue mécanique des ancrages/connexions et des interactions entre machines.

**Livrables attendus** : outils et méthodes numériques de dimensionnement des systèmes d'ancrages et de connexion mutualisés. Evolution des standards de conception et spécifications des systèmes d'ancrages et connexion mutualisés. Technologies optimisées.

### *Intégration aux réseaux*

#### *Optimisation de la conception de connecteurs, hubs, sous-stations électriques*

**Objectifs technologiques (E2, E3)** : développer des méthodologies de tests des connecteurs notamment sous-marins sur la base de spécifications représentatives de leur utilisation. Etudier des nouveaux concepts de sous-stations immergées tenant compte des contraintes fortes liées à l'environnement, à la maintenance et à l'éloignement des côtes tout en respectant des coûts objectifs de construction et d'installation.

**Verrous scientifiques** : fiabilité et durabilité des connecteurs EMR et manque de spécifications techniques (contraintes électrique, thermiques, mécaniques et maintenance en milieu sous-marin très contraint). Nouvelles conceptions de sous-stations électriques immergées intégrant les contraintes d'étanchéité, de sélection de matériaux, de tenue et vieillissement, d'installation et d'éloignement des côtes (couplage à l'architecture du réseau).

**Livrables attendus** : méthodologies de qualification des connecteurs *Dry* et *Wet Mate*. Préconisations pour l'optimisation des connecteurs. Nouveaux concepts de sous-stations électriques immergés.

#### *Impacts sur le réseau de l'évolution des tailles des machines et des fermes et de leur éloignement*

**Objectifs technologiques (E2, E3)** : développer les outils et méthodologies de dimensionnement des réseaux électriques tenant compte de la taille des machines, de la gestion de l'énergie au sein d'un parc, et des solutions optimisées pour le transport de l'électricité. Evaluer les solutions alternatives au passage en courant continu pour des éloignements supérieurs à 50 km et les comparer à des réseaux en courant continu haute tension.

**Verrous scientifiques** : solutions alternatives aux systèmes de compensation de l'énergie réactive pour la transmission électrique par courant alternatif pour les distances supérieures à 50 km en comparaison à un transport en courant continu haute tension. Solutions technologiques permettant le passage à 66 kV.

**Livrables attendus** : Outils et méthodologies de dimensionnement des réseaux électriques et composants associés. Evolution des standards de conception. Câbles optimisés.

#### *Outils d'optimisation de l'architecture du réseau électrique*

**Objectifs technologiques (E2, E3)** : modéliser la chaîne électrique pour optimiser l'ensemble du réseau en intégrant un nombre de variables suffisants ainsi que des algorithmes mathématiques pertinents pour des optimisations multi-critères. Coupler ces modèles à des outils d'optimisation de l'architecture globale du parc. Développer des méthodes de diagnostics des réseaux/localisation de défauts à intégrer dans un outil complet de monitoring.

Verrous scientifiques : modèles intégrant de la chaîne électrique complète, incluant les taux de défaillance et les coûts des composants. Couplage à des modèles d'optimisation des ancrages et connexions mutualisés, aux courbes de production des machines intégrant le sillage, aux outils de gestion des liaisons fond-surface... Stratégies de monitoring du réseau électrique et capteurs associés.

Livrables attendus : outils de modélisation multi-critères intégrant installation, production, maintenance en particulier pour les fermes hydroliennes et éoliennes flottantes.

*Stockage, lissage de la production et participation aux services rendus au réseau*

Objectifs technologiques (E2, E3) : développer un outil d'évaluation technico-économique des solutions de stockage de l'énergie en mer fonction des sites et applications. Développer des méthodologies de conception et hybridation de solution de stockage. Optimiser la conception de technologies (Station de transfert d'énergie par pompage d'eau de mer et stockage d'air comprimé sous-marin). Etudier d'un point de vue technico-économique le développement d'une filière hydrogène.

Verrous scientifiques : méthodologies d'hybridation de technologies de stockage adaptées aux conditions de site et aux machines de production. Optimisation de technologies sous-marines de stockage.

Livrables attendus : outil d'évaluation technico-économique. Méthodologies de conception et d'hybridation de systèmes de stockage. Optimisation de solutions de stockage sous-marin.