

# Feuille de route Scientifique et Technologique

14/04/2022





## Table des matières

- Contexte et objectifs..... 3
- Programmes de recherche ..... 4
  - Programme Caractérisation de sites ..... 6
  - Programme Dimensionnement et suivi en service..... 7
  - Programme Optimisation des parcs, opérations et maintenance..... 9

## Contexte et objectifs

France Energies Marines (FEM) est l'Institut de la Transition Énergétique (ITE) mis en place pour promouvoir et accompagner le déploiement des Énergies Marines Renouvelables (EMR). Sur ce secteur émergent pour lequel l'Europe mène largement la compétition internationale, notre action doit, en premier lieu, contribuer à assurer la bonne implémentation de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie qui prévoit un déploiement massif des technologies EMR. Sont ainsi d'ores et déjà prescrits, pour les éoliennes en mer, le calendrier et les volumes décrits ci-dessous :

### Objectif d'augmentation des capacités installées d'éoliennes en mer et mesures pour les atteindre

|                             | 2016 | PPE 2016<br>objectifs 2018 | 2023 | 2028    |
|-----------------------------|------|----------------------------|------|---------|
| Objectif éolien en mer (GW) |      | 0,5                        | 2,4  | 5,2-6,2 |

**Mesure :** lancer les appels d'offres ci-dessous pour les éoliennes en mer, avec des prix plafond supérieurs de 10 à 20 €/MWh aux prix cibles.

| Date d'attribution de l'AO | 2019                              | 2020   | 2021   | 2022                                      | 2023                   | >2024   |
|----------------------------|-----------------------------------|--|--|---|------------------------|---|
| Eolien flottant<br>750MW   |                                   |  | 250 MW<br>Bretagne<br>Sud<br>(120 €/MWh)         | 2 x 250 MW<br>Méditerranée<br>(110 €/MWh) |                        | 1 000 MW par an, posé et/ou flottant, selon les prix et le gisement, avec des tarifs cibles convergeant vers les prix de marché sur le posé |
| Eolien posé<br>2,5 à 3 GW  | 600 MW<br>Dunkerque<br>(45 €/MWh) | 1 000 MW<br>Manche Est<br>Mer du Nord<br>(60 €/MWh)* | 500 – 1 000 MW<br>Sud-Atlantique**<br>(60 €/MWh) |   | 1 000 MW<br>(50 €/MWh) |   |

\* Pour ce projet, la date de 2020 est la date de lancement de la procédure de mise en concurrence.

\*\* Dans ce cadre, un projet éolien en mer au large d'Oléron pourrait être attribué.

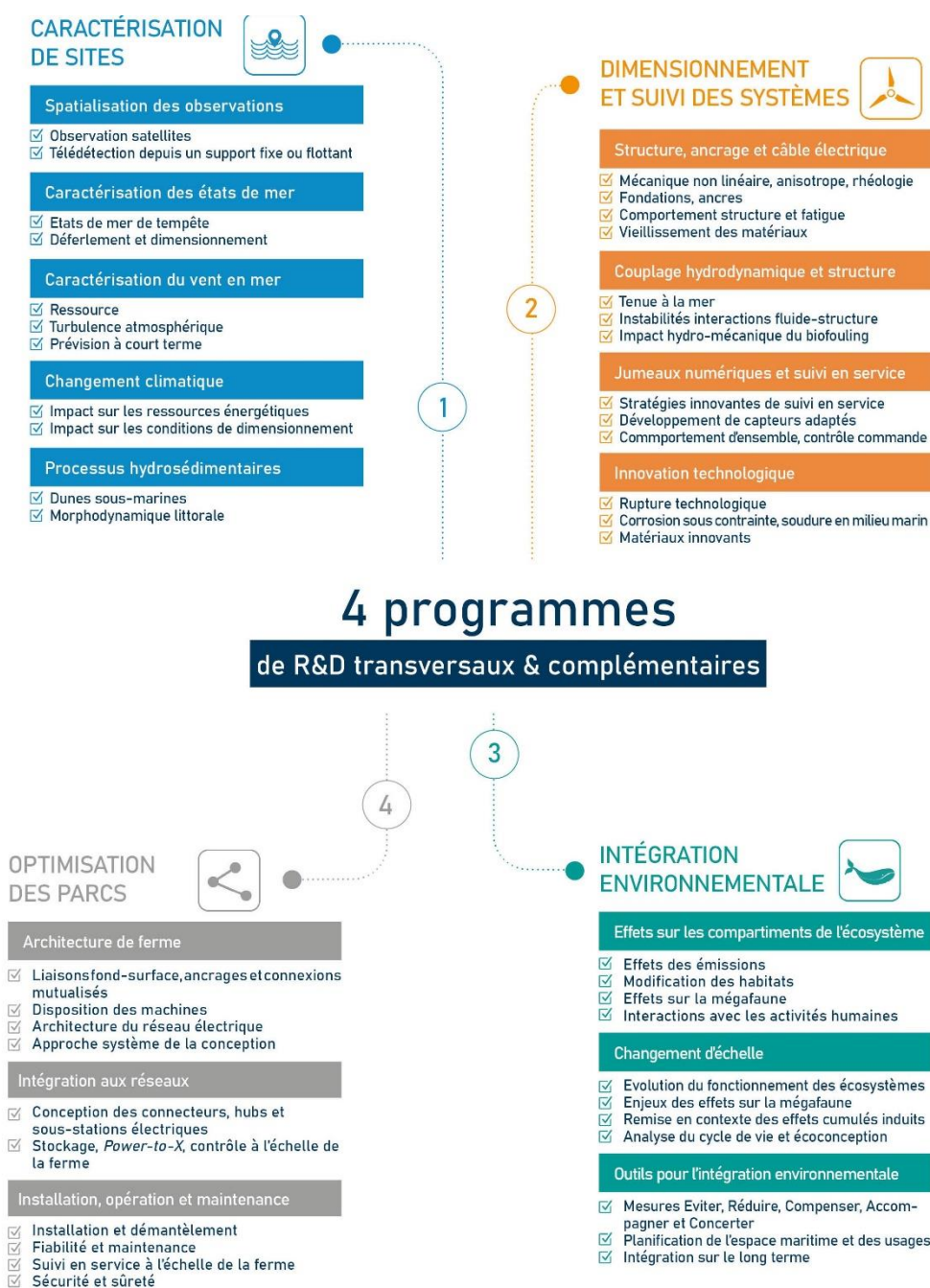
Tableau extrait de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie et présentant les projections visées en matière de déploiement des technologies éoliennes en mer. La loi « Climat et Résilience » du 20/07/2021 précise désormais qu'il s'agira d'**au moins 1 GW par an à partir de 2024**.

Les résultats des programmes de R&D de l'ITE sont aussi destinés à stimuler l'industrie française qui porte des ambitions à l'international. La croissance mondiale du secteur EMR est forte et si la France est en retard sur l'éolien posé, elle se positionne comme un leader du secteur éolien flottant, grâce en particulier aux 4 fermes pilotes en projet sur les façades atlantique et méditerranéenne.

Cette vision est en parfaite cohérence avec 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, avec le volet énergie Stratégie Nationale de Recherche (SNRE), à travers son défi "Énergie propre, sûre et efficace", et plus récemment avec l'identification d'un axe prioritaire « éolien flottant » au sein de la Stratégie d'Accélération « Technologies Avancées pour les Systèmes Énergétiques ». Appliquant les recommandations de la SNRE pour intensifier le développement des EMR, FEM poursuit des recherches interdisciplinaires, en lien étroit avec les territoires et le tissu industriel, associant la société civile et contribuant à assier une masse critique de compétences de pointe françaises jouissant d'une visibilité à l'internationale.

# Programmes de recherche

La prise en compte de ces enjeux issus de la PPE 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'offres de parcs commerciaux, de fermes pilotes ou de briques technologiques bénéficiant du soutien de l'ADEME. Soumise à l'ANR, la feuille de route Scientifique et Technologique de France Energies Marines se décline ainsi en quatre programmes de recherche complémentaires et transversaux :



Si ce document traduit la volonté pragmatique de l'État et des membres de FEM de faire émerger rapidement la technologie éolienne en mer, avec un focus sur sa branche flottante qui détient le plus fort potentiel de déploiement et concentre le plus fort besoin d'innovations, il est patent qu'une grande partie des résultats obtenus sur cette technologie seront transférables vers les autres secteurs EMR. Cette mutualisation est clairement identifiée et anticipée sur les 4 programmes de R&D décrits dans ce document et garantit que l'action de FEM contribue à l'émergence de l'ensemble des technologies EMR.

Les activités de R&D s'intègrent aussi dans une stratégie de développement de FEM qui s'appuie sur le déploiement d'infrastructures en mer, de nature expérimentale ou à but d'acquisition de données et de connaissances spécifiques aux besoins des EMR, telles que proposées dans le projet FOWRCE\_SEA. Ces activités de R&D ont aussi vocation à être implémentées, (pour celles qui s'appuient sur des expérimentations en mer,) sur les sites pilotes et d'essais, afin de consolider de manière la plus pragmatique et la plus pertinente le développement de la filière EMR.

La Feuille de Route S&T de FEM présentée dans ce document constitue une évolution du document initial produit en 2016. Cette révision permet une adaptation de notre programme de R&D au plus proche des besoins de la filière pour la période 2021-2026. Elle est le résultat d'une collaboration étroite entre FEM et ses membres, structurée par des groupes de travail contribuant à une rédaction conjointe. Selon les process de l'ITE, la Feuille de Route S&T est également expertisée par les huit personnalités internationales du Conseil Scientifique & Technologique et doit être validée par le Conseil d'Administration. Pour la mise en œuvre, FEM s'appuiera en priorité sur les compétences de ses équipes et de ses membres, tout en s'autorisant à collaborer avec des équipes disposant d'expertises complémentaires.

De même, bien que structurée selon les quatre programmes de recherche déjà cités, la présentation de la Feuille de Route S&T met en avant plusieurs thématiques qui trouveront leur réponse grâce à la mise en commun des ressources issues de différents programmes, cette transversalité étant encouragée par la taille de FEM et sa dédicace exclusive aux sujets en lien avec les EMR.

## Programme Caractérisation de sites

La dynamique du secteur EMR français se concentre fortement, en matière de R&D et d'innovation, sur l'éolien en mer flottant comme technologie de rupture, et sur l'éolien posé pour en optimiser l'adaptation au marché français. L'ITE prend part à cet effort depuis 2016, et en particulier, par essence, au travers du programme Caractérisation de Sites.

Pour soutenir la croissance du secteur, les activités de R&D de ce programme se concentreront sur :

- **La réduction des incertitudes qui pèsent sur le productible éolien et les conditions de design** (vent et turbulence en conditions moyennes et extrêmes) et impactent le coût actualisé de l'énergie, LCOE (*Levelised Cost Of Energy*) de ce secteur. L'ITE s'efforcera de combler le manque d'observations par la constitution d'observatoires portant des campagnes de mesures *in situ* dédiés. Ces efforts seront complétés par l'intensification des actions de FEM dans l'exploitation originale d'images satellitaires. Ces observations, *in situ* et satellitaires, devront en outre permettre d'affiner la compréhension des processus d'interactions air-mer. En effet, ceux-ci sont à ce jour mal représentés dans les modèles numériques produisant les climatologies utilisées par les ingénieries pour estimer d'une part la ressource, d'autre part les conditions de design, le tout dans un contexte de changement climatique.
- **La réduction des incertitudes sur les paramètres d'états de mer pour le design des systèmes EMR**, en consolidant les connaissances et expertises accumulées grâce aux projets [DiMe](#), [DIMPACK](#) et [CARAVELE](#) sur l'observation et la modélisation des états de mer de tempêtes et en particulier des déferlantes. En s'appuyant sur son observatoire du phare de La Jument en Bretagne et celui qui sera déployé sur l'éolienne flottante Zefyros en Norvège, FEM poursuivra la constitution de bases de données dédiées à la documentation de ces événements. Le développement de modèles de vagues spécifiques à la simulation des conditions de tempête sera aussi étendu dans le cadre des efforts de recherche visant à constituer une chaîne de modélisation couplée Océan, Vagues, Atmosphère (projet [CASSIOWPE](#)).
- **Le développement d'outils de prévision court terme du vent et des vagues** pour réduire les OPEX (coûts d'exploitation ou d'opération) des projets EMR. FEM cherchera à implémenter des moyens structurants de caractérisation des conditions de vent et vagues à court terme (de quelques minutes à quelques jours) pour fiabiliser les opérations de maintenance et élargir les fenêtres d'accès sécurisé, un savoir-faire applicable et adaptable également aux autres technologies.
- **La caractérisation des interactions entre la morphodynamique côtière et littorale et les activités EMR**. L'ITE étendra et précisera ses efforts de caractérisation de la morphodynamique lancés par les projets PHYSIC et DUNES à la caractérisation de la zone littorale, dans un contexte de changement climatique. Les opérations d'atterrissage, souvent au centre des questions d'acceptabilité lors des phases de consultations en amont des déploiements des fermes éoliennes en mer, concentrent en effet les interrogations sur d'éventuelles altérations du trait de côte.

L'ensemble des axes et sous-axes de R&D qui structurent le programme de R&D « Caractérisation de Sites » est listé ci-dessous et décrit en détail dans la suite du document.

### Spatialisation des observations

- SO1 : Observations satellites.
- SO2 : Télédétection depuis un support fixe ou flottant.

### Caractérisation des états de mer

- CE1 : Etats de mer de tempête.
- CE2 : Déferlement et design des EMR.

### Caractérisation du vent en mer

- CV1 : Ressource du vent en mer.
- CV2 : Turbulence atmosphérique en mer.
- CV3 : Prévision court terme du vent en mer.

### Changement climatique

- CC1 : Impact sur les ressources énergétiques.
- CC2 : Impact sur les conditions de design.

### Processus hydrosédimentaires

- PH1 : Dunes hydrauliques.
- PH2 : Morphodynamique littorale (dont zone atterrage).

## Programme Dimensionnement et suivi en service

Ce programme s'adresse de manière transverse à l'ensemble des systèmes EMRs (éolien posé, éolien flottant, hydrolien, houlomoteur, énergie thermique des mers et les auxiliaires) mais se focalise en premier lieu sur l'éolien flottant qui constitue la plus forte opportunité de la filière française en raison de la nature profonde de ses côtes, de la diversité de ses territoires marins et ultra-marins, de son expertise navale historique et de son retard dans le développement de l'éolien posé en mer.

FEM a vocation à développer des outils, des méthodologies, des briques technologiques et moyens d'essais innovants en faisant évoluer les standards en vigueur afin de permettre à la filière française de devenir compétitive et robuste. La stratégie de ce programme est de prioriser les thématiques visant à optimiser le rapport performance/coût et à fiabiliser leurs composants sur des durées de 20-25 ans en milieu marin.

FEM a construit sa feuille de route de façon complémentaire aux développements des acteurs de la filière française autour de composants et de problématiques R&D spécifiques aux EMRs.

Enfin, dans sa démarche de recherche appliquée, FEM s'efforce d'aborder ces différentes thématiques de façon progressive et pragmatique :

- Compréhension fine de la physique par des essais sur bancs, en bassin et en laboratoire ;
- Développement de modèles analytiques, numériques permettant la simulation de ces phénomènes ;
- Validation de ces modèles par mesures en mer à échelle réduite, prototype ou échelle 1 en fonction du niveau de TRL visé et des contraintes;
- Intégration de bureaux de certification pour amélioration des normes.

FEM a donc identifié quatre axes majeurs d'investigations technologiques :

- **Structure et matériaux** avec une focalisation sur les lignes d'**ancrage**, les **câbles électriques** d'export et les **fondations**. En particulier, ces premiers composants constituant la liaison fond surface, ils sont identifiés comme sensibles en raison de leurs faibles dimensions vis-à-vis des flotteurs dont ils subissent la dynamique, qui s'ajoute aux sollicitations fluides. Leur faibles dimensions et poids les rendent également sensibles aux variations environnantes telle que la biocolonisation. Il existe donc un fort enjeu sur la description du comportement complexe de ses composants, ce qui amène de nouveaux matériaux dont le comportement et le vieillissement en milieu marin sont encore mal connus. Enfin certains composants comme les câbles électriques subissant des contraintes électro-thermo-mécanique couplées, commencent à être étudiés suivant une approche couplée mais les conclusions ne sont pas encore disponibles ni partagées et aucun organisme de certification de les intègre par manque de recul et de maturité. avec une approche couplée . Ainsi les modes de dégradation et l'estimation de durée de vie d'un câble d'export sont encore mal maîtrisés, empêchant toute optimisation de dimensionnement de ce composant clé ;
- Les **interactions Hydrodynamique-structure** représentent également un enjeu clé pour tout système flottant. De nombreux outils existent aujourd'hui mais des limitations sont clairement identifiées sur la représentativité des non-linéarités ainsi que leur quantification à partir de mesure en mer. Il en est de même pour les dispositifs flottant de mesures qui sortent des hypothèses standards car ce sont de petits corps à grands mouvements. Enfin, le biofouling est identifié comme un élément susceptible d'impacter le comportement des liaisons fond/surfaces et potentiellement d'influencer l'apparition d'instabilités fluides/structures pour lesquelles de nombreux points relèvent encore de la recherche. Cette thématique permet donc d'optimiser la conception des systèmes flottants mais aussi d'améliorer leur suivi en nourrissant le troisième axe ;

- L'axe **Digital twin et suivi en service** vise à améliorer la représentativité des modèles numériques des systèmes déployés en cours d'exploitation à travers une méthodologie hybride mesures en mer/calculs numériques. L'objectif est de dépasser le simple niveau d'alerte en proposant des diagnostics de santé du système pour optimiser la maintenance.
- Enfin, FEM ayant pour vocation de soutenir et faciliter **l'innovation technologique**, le dernier axe se focalise sur cet aspect à l'échelle des briques technologiques et non de systèmes entiers.

L'ensemble de ces thématiques sont abordées de façon pluridisciplinaire avec les trois autres programmes, ce qui constitue l'ADN de FEM.

La majorité de ces thématiques nécessitent de disposer de moyens d'immersion prolongée sur des sites représentatifs afin d'atteindre des degrés de maturité (TRL) assurant un retour concret pour l'industrie. Les demandes d'autorisations étant lourdes et parfois incertaines, il est nécessaire pour FEM de disposer de sites d'essais (propriétaire ou partenariat) sur plusieurs façades maritimes à l'image du site MISTRAL.

Les quatre axes prioritaires mentionnés se décomposent comme suit :

#### **Structure, Ancrage et Câble électrique**

- SAC1 : Mécanique non-linéaire, anisotrope, rhéologie.
- SAC2 : Fondation / Ancre. (P4 : AF1)
- SAC3 : Comportement Structure / Fatigue.
- SAC4 : Vieillessement matériaux.

#### **Couplage Hydro-Structure**

- CHS1 : Tenue à la mer (non-linéaire, 2nd ordre).
- CHS2 : Instabilités FSI (VIV, VIM, GALLOP...).
- CHS3 : Impact hydromécaniques du biofouling.

#### **Digital Twin / Suivi en Service**

- DTS1 : Stratégie monitoring innovante / Digital Twin.
- DTS2 : Développement de capteurs adaptés.
- DTS3 : Optimisation comportement d'ensemble / contrôle commande (EOF).

#### **Innovation Technologique**

- INT1 : Rupture technologique.
- INT2 : Corrosion sous-contrainte / Soudure en milieu marin.
- INT3 : Matériaux innovants.



## Programme Optimisation des parcs, opérations et maintenance

Ce programme vise à développer les méthodologies et outils qui permettront d'optimiser : la mise en place des parcs EMR commerciaux et leur intégration au réseau électrique d'un point de vue technico-économique, ainsi que la phase d'exploitation (Opérations & Maintenance). Trois volets sont ainsi privilégiés dans cette approche :

- l'architecture des fermes, avec notamment l'optimisation de la disposition des machines, du réseau de câbles électriques inter-array et d'export, des liaisons fond-surface, et d'une approche système intégrée de la conception de la ferme ;
- L'intégration aux réseaux, visant le développement d'outils et de méthodologies qui permettront d'optimiser l'intégration au réseau électrique, en mer tout comme à terre, avec notamment un volet portant sur les alternatives à l'électricité pour véhiculer l'énergie produite ;
- les problématiques d'installation, d'Opérations & Maintenance, et de démantèlement des parcs EMR.

Ce programme qui s'adresse de manière transverse à l'ensemble des applications EMR, est en lien étroit avec les trois autres programmes de recherche de l'ITE sur de nombreux aspects, étudiés initialement à une échelle réduite et étendu à l'ensemble de la ferme dite commerciale dans ce programme. Il se décompose selon les trois axes susmentionnés :

### Architecture de ferme

- AF1 : Optimisation des liaisons fond-surface, ancrages et connexions mutualisés.
- AF2 : Optimisation de la disposition des machines – layout AEP.
- AF3 : Conception de l'architecture du réseau électrique – IAC & export câble.
- AF4 : Approche système de la conception de la ferme (conception intégrée, méthodes d'optimisation innovantes, autres disciplines).

### Intégration aux réseaux

- IR1 : Conception des connecteurs, hubs et sous-stations électriques.
- IR2 : Stockage, Power-to-X, contrôle à l'échelle de la ferme.

### Installation et Opération & Maintenance

- EX1 : Installation et démantèlement.
- EX2 : Fiabilité et Maintenance.
- EX3 : Suivi en service (monitoring) à l'échelle de la ferme.
- EX4 : Sécurité & sûreté.

## Programme intégration environnementale

Le programme de R&D de France Energies Marines « Intégration environnementale des EMR » concerne la recherche scientifique menée sur les effets des énergies marines renouvelables sur les écosystèmes marins et les activités humaines. Les enjeux étudiés sont ceux soulevés par la filière, les experts et les associations citoyennes. Dans une démarche pragmatique et rigoureuse, ce programme contribue au développement des EMR en veillant à une intégration vertueuse dans l'environnement, gage d'acceptabilité.

A l'instar des autres programmes, l'activité se concentre principalement sur l'accompagnement du développement de l'éolien en mer, posé et flottant. Si les parcs éoliens, leurs composants et les activités humaines associées, qui génèrent des effets sur les écosystèmes marins, représentent l'essentiel des projets de R&D en cours dans le programme, les résultats, protocoles ou recommandations pourront être, pour partie, transposables aux autres EMR.

Les travaux menés dans le programme poursuivent plusieurs objectifs :

- identifier les enjeux écologiques et socio-économiques à prendre en compte dans les phases d'installation, de fonctionnement, de maintenance et de démantèlement des projets d'EMR ;
- développer des outils et méthodologies permettant de mesurer, qualifier, analyser et prédire les effets des EMR sur les écosystèmes marins et les activités humaines en ce qui concerne les enjeux identifiés ;
- mutualiser les efforts de R&D et d'acquisition de connaissances à des échelles plus larges que celle d'un parc EMR ;

- contribuer à la normalisation et à la production de recommandations pour l'évaluation et le suivi des effets des EMR sur les systèmes marins, mais également concrétiser la séquence éviter-réduire-compenser (ERC) ;
- valoriser la connaissance vers la filière et les citoyens.

Depuis sa première version, la feuille de route du programme a évolué et deux changements peuvent être précisés. Tout d'abord la dénomination "Intégration environnementale" a progressivement remplacé la formule "Impact environnemental". L'intégration environnementale semble en effet mieux correspondre aux objectifs poursuivis dans le programme et témoigne de la volonté d'une filière qui développe une énergie décarbonée d'évaluer au mieux les effets générés par les projets EMR, d'en rendre compte à l'action publique et à la société, puis de limiter ces effets au maximum. La seconde évolution majeure de la feuille de route du programme correspond à la disparition de la dichotomie entre les effets environnementaux et socio-économiques. L'approche écosystémique holistique développée dans un premier temps dans le projet TROPHIK, et poursuivie actuellement dans les projets APPEAL et WINDSERV, a replacé l'humain dans l'écosystème et c'est l'ensemble qui peut être désormais considéré et nommé également socio-écosystème. Dans cette même optique, le projet LIF-OWI s'intéressant à l'analyse de cycle de vie (ACV) des projets éoliens propose d'associer à la démarche classique le développement d'une ACV sociale et d'indicateurs relatifs à l'écologie marine.

Ce programme se décompose ainsi en trois axes, le premier traitant des effets des EMR sur les compartiments des socio-écosystèmes marins, aussi bien dans leurs dimensions naturelles qu'humaines, le deuxième considérant un changement d'échelle vers une prise en compte plus macro des effets et le dernier proposant des outils pour l'intégration des EMR dans ces écosystèmes. La frontière entre ces axes n'est pas hermétique, c'est en effet une meilleure connaissance globale des effets des projets EMR sur les écosystèmes qui apportera des éléments pour améliorer leur intégration.

Concernant l'intégration environnementale et socio-économique des EMR, la mission de FEM s'étend également à des actions ne relevant pas de problématiques R&D mais tout aussi essentielles et qui ne sont pas détaillées dans ce document : constitution d'un comité de pilotage d'expertise sur les enjeux environnementaux des EMR, synthèses méthodologiques, rapports de recommandations, enseignement, participation à la concertation et aux débats publics...

Les trois axes du programme rassemblent 11 sous-axes listés ci-dessous et décrits par la suite :

#### **Effets sur les compartiments de l'écosystème**

- ESE1 : Effets des émissions (bruit, CEM, nutriments, polluants...).
- ESE2 : Modification des habitats.
- ESE3 : Effets sur la mégafaune (avifaune, mammifères marins et grands poissons).
- ESE4 : Interactions avec les activités humaines.

#### **Changement d'échelle socio-écosystémique, spatiale et temporelle pour la prise en compte des effets**

- CEE1 : Evolution du fonctionnement des écosystèmes.
- CEE2 : Enjeux macro des effets sur la mégafaune.
- CEE3 : Remise en contexte des effets cumulés induits par les EMR.
- CEE4 : Analyse du cycle de vie et Ecoconception.

#### **Outils pour l'intégration environnementale**

- OI1 : Mesures Eviter, Réduire, Compenser, Accompagner et Concerter.
- OI2 : Planification de l'espace maritime et des usages.
- OI3 : Intégration à long terme des EMR.