



SYNERGIE RAPPORT FINAL

Veuillez vérifier les informations pré-remplies (et les rectifier le cas échéant), compléter en français (ou en anglais si demandé spécifiquement : [EN]), et renvoyer ce document au plus tard le 30/06/2025 à l'adresse suivante : claire.salomon@fondationbiodiversite.fr

I. Informations générales

Titre du projet : [Concilier Energies Marines Renouvelables et Biodiversité - courant continu](#)

[EN] Title of project : [Accommodate marine renewable energies and biodiversity – direct current](#)

Acronyme : [CEMARB_DC](#)

Porteur.euse principal.e : [Céline Artero, Julie Lucas, Thomas Trancart](#)

E-mail de la personne qui a rédigé le rapport : celine.artero@mnhn.fr

Date de début du projet : [05/04/2024](#)

Date d'achèvement du projet : [30/09/2025](#)

Résumé du projet (maximum de 300 mots)

La FRB se réserve le droit de modifier le texte pour le publier sur ses plates-formes

Dans le contexte de changement climatique, les énergies renouvelables telles que les énergies éoliennes, sont une alternative aux énergies fossiles. En Europe, les parcs éoliens marins se développent rapidement, notamment en France où 21 parcs en phase d'exploitation ou prévus sont répartis dans les 11 million de km² d'eau côtière. Le transport de l'énergie des éoliennes vers la mer se fait par des câbles sous-marins qui amplifient localement les champs électro-magnétiques (CEM). Cela peut impacter les espèces sensibles aux CEM qui les utilisent pour s'orienter et chercher leurs proies. Le projet CEMARB vise à évaluer et quantifier les effets des CEM amplifiés des câbles sous-marins transportant l'électricité sur les élasombranches, sensibles aux CEM, et particulièrement la petite roussette (*Scyliorhinus canicula*).

Des œufs de petites roussettes ont été exposés en milieu contrôlé à des CEM en courant continu d'intensités différentes (contrôle, 50, 100 et 500 µT), représentant une distance de 10, 5 et 0m du câble sous-marin. Les effets potentiels des CEM amplifiés ont été évalué sur la survie, la croissance, et le métabolisme des petites roussettes du stade embryonnaire jusqu'au stade juvénile (6 mois). Pendant la phase embryonnaire, la survie et la croissance des œufs ont été suivies par photo chaque semaine. A éclosion des œufs, la survie a été notée de façon quotidienne et la croissance a été mesurée par photo tous les mois. Le métabolisme a été évalué lorsque les juvéniles étaient âgés de 2 à 3 mois. Aucun effet de l'exposition à des CEM en courant continu n'a été observé sur la survie, la croissance ou le métabolisme des petites roussettes dans les conditions de notre étude. Il serait intéressant de poursuivre notre étude jusqu'à la maturité sexuelle des individus pour étudier les impacts potentiels des CEM sur le long terme sur les capacités de reproduction des individus.

Mots clefs (5) : parc éolien marin, CEM amplifiés, espèces électro-magnéto sensibles, survie, croissance, métabolisme

Contexte et objectifs (environ 1 500 caractères espaces inclus)

Ceci sera utilisé dans la fiche résultat du projet. La FRB se réserve le droit de modifier le texte pour publication sur ses plateformes. Vous serez consulté avant la publication. Ces éléments étant destinés au grand public, merci de veillez à rédiger ce texte dans une optique de vulgarisation.

Dans le contexte de changement climatique, les énergies renouvelables telles que les énergies éoliennes, sont une alternative aux énergies fossiles. En Europe, les parcs éoliens marins se développent rapidement, notamment en France où 21 parcs en phase d'exploitation ou prévus sont répartis dans les 11 million de km² d'eau côtière. Le transport de l'énergie des éoliennes vers la mer se fait par des câbles sous-marins qui amplifient localement les champs électro-magnétiques (CEM). Cela peut impacter les espèces sensibles aux CEM qui les utilise pour s'orienter et chercher leurs proies. Le projet CEMARB vise à évaluer et quantifier les effets des CEM amplifiés des câbles sous-marins transportant l'électricité sur les élasmobranches, sensibles aux CEM, et particulièrement la petite roussette (*Scyliorhinus canicula*).

Des œufs de petites roussettes ont été exposés en milieu contrôlé à des CEM en courant continu d'intensité différentes (contrôle, 50, 100 et 500 µT), représentant une distance de 10, 5 et 0m du câble sous-marin. Les objectifs étaient d'évaluer et quantifier les effets potentiels des CEM amplifiés sur la survie, la croissance, et le métabolisme des petites roussettes du stade embryonnaire jusqu'au stade juvénile (6 mois).

II. Equipe du projet

Liste des participants au projet (le cas échéant)

	Prénom NOM	Affiliation	Pays
1	Thomas TRANCART	MNHN	France
2	Julie LUCAS	MNHN/UBS	France
3	Céline ARTERO	MNHN	France
4	Damien Einsargueix	Ecocean	France
5	Laure Lailheugue	Ecocean	France
6	Antony Fortin	Ecocean	France
7	Anaïs Gudefin	Ecocean	France
8	Gilles Lecaillon	Ecocean	France
9	Lisa Garnier	RTE	France
10	Hélène Claudel	RTE	France

III. Rapport d'activité

Décrivez les principales étapes de l'avancement du projet, ses principaux résultats et leur importance pour ce domaine de recherche particulier. Environ 8 à 10 pages

III.1 Description des travaux menés et des résultats scientifiques obtenus à l'attention d'un public scientifique.

En juin 2024 des œufs de petites roussettes (*Scyliorhinus canicula*) ont été réceptionnés dans les locaux d'Ecocéan, à Marseille pour débiter l'exposition aux CEM. Quatre conditions ont été choisies : la condition contrôle sans CEM et trois conditions de CEM amplifiés de 50, 100 et 500 μ T.

L'ensemble des protocoles expérimentaux ont été évalués et approuvés par le Comité d'Ethique en Expérimentation Animale Laurent Vinay (CEEA-071) ainsi que par le vétérinaire référent. Le principe des 3R (Remplacer, Réduire, Raffiner) est également appliqué, les conditions d'élevage des juvéniles de petites roussettes sont notamment améliorées en leur fournissant une alimentation variée, à l'aide de mise en place d'un substrat sableux et de caches dans les bassins.

Deux cents œufs ont été répartis dans 8 bassins de 130 L (deux bassins par condition, 25 individus par bassin) alimentés en eau de mer thermorégulée à 16 ± 1 °C et à une salinité de 34-35. Les individus sont maintenus dans des conditions de cycle lumière:obscurité de 13:11 automatisé. Sur chaque œuf, une étiquette avec un code unique a été attaché à son arrivée, permettant un suivi individuel jusqu'à éclosion. Le choix a été fait de ne pas marquer les juvéniles à leur naissance car à ce stade les individus sont fragiles et aucun marquage adéquat n'a été trouvé (Manire et Gruber, 1991). Ainsi, au stade juvénile, le suivi individuel n'était plus possible. Après la phase embryonnaire où les individus se nourrissent de leur réserve vitelline, les petites roussettes sont nourries à la pince quotidiennement avec de la chair de diverses espèces de poisson à raison de 9% de la biomasse de chaque bassin.

Mise en place des champs et protocole d'exposition

Deux bobines carrées de 120 cm x 120 cm écartées de 60 cm sont disposées horizontalement autour des six bassins de condition de CEM amplifiés. Ces CEM correspondent aux situations existantes sur le site des parcs éoliens en mer: 500 μ T (sur le câble), 100 μ T (à 5 m du câble), 50 μ T (à 10 m du câble) et une condition contrôle (pas de champ généré autour de ces bassins). Un courant continu circule dans ces bobines, générant un champ magnétique relativement uniforme, unidirectionnel, au centre du dispositif.

Paramètres suivis

Survie

La survie des embryons puis des juvéniles a été suivie quotidiennement tout le long de l'expérience et jusqu'au 30 août 2025. Les taux de mortalité des stades embryonnaire puis juvénile ont été calculé par condition selon l'équation 1.

$$S = \frac{\text{effectif final}}{\text{effectif initial}} * 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Croissance

Les paramètres de croissance mesurés diffèrent selon le stade de vie. La taille (longueur totale, LT, cm) et la surface du sac vitellin (cm^2) ont été mesurés de façon hebdomadaire pour les embryons. La surface du sac vitellin permet un suivi de la consommation des ressources nutritives des embryons avec l'hypothèse que la diminution de la surface du sac vitellin est proportionnelle à la croissance de l'individu. Pour les juvéniles, ayant consommés toute leur réserve vitelline, la taille (cm), le poids (g) sont notés le jour de l'éclosion puis mensuellement jusqu'à la fin de l'expérimentation. La taille des individus et la surface vitelline ont été mesurées sur photos à l'aide du logiciel tps afin de limiter les manipulations des petites roussettes (Figure 1).

Parfois l'œuf peut s'opacifier, ou les individus être entortillés dans les œufs, ainsi pour le stade embryonnaire, après avoir noté la taille de l'individu (± 0.01 cm) et la surface du sac vitellin (± 0.01 cm²), un score de confiance entre 1 et 5 a été attribué à la mesure par l'observateur selon la qualité de la photo et la visibilité du bout du museau, de la queue, la position de l'individu dans l'œuf ainsi que l'opacité de l'œuf. Un score de 1 indiquait une estimation peu fiable là où un score de 5 reflétait une mesure solide et fiable. Par la suite, seuls les scores supérieurs à 3 ont été gardés dans les analyses statistiques afin d'assurer la fiabilité des données.

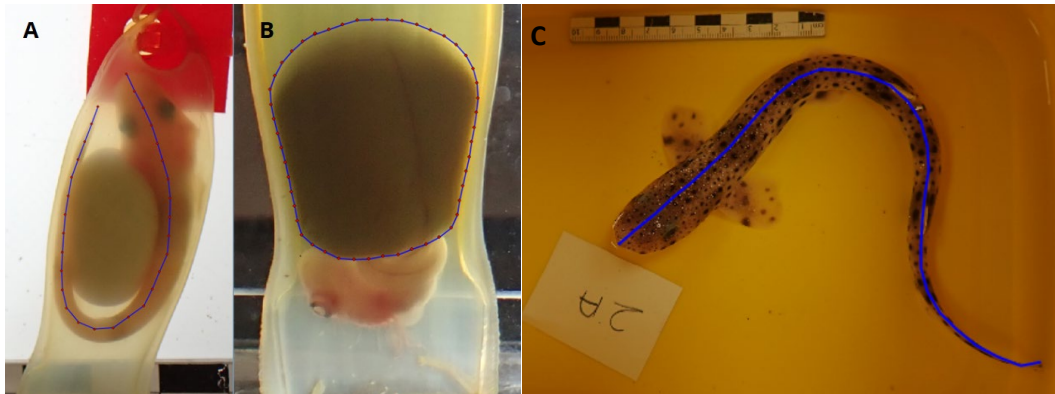


Figure 1. Exemples de photos et mesures réalisées (A : taille ; B : surface du sac vitellin) sur un embryon et un juvénile (C) de petite roussette.

En plus des photos, les juvéniles ont été pesés (± 0.1 g) individuellement. L'indice de condition de Fulton (K) est calculé à partir des mesures de la taille (LT) et du poids (P ; Eq. 2) :

$$K = \frac{P}{LT^3} * 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Cet indice renseigne sur la condition biologique d'un individu, ainsi plus il est élevé, meilleur est l'état de santé global de l'individu (Jin et al., 2015).

Métabolisme aérobie

A partir de l'alimentation et de l'oxygène qu'elle respire, la petite roussette va produire de l'énergie *via* le métabolisme aérobie. Cette énergie disponible lui servira à réaliser l'ensemble de ses activités (locomotion, digestion, recherche de nourriture... ; Lucas et al. 2014a ; Figure 2).

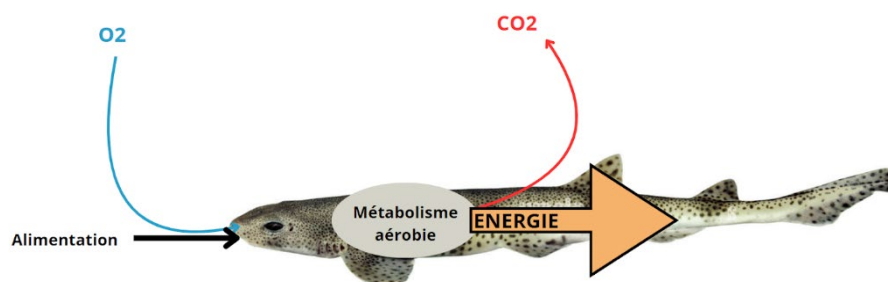


Figure 2. Schéma simplifié du métabolisme aérobie de *S. canicula*

Ce potentiel énergétique est appelé la capacité métabolique aérobie, aussi appelée AMS (Aerobic Metabolic Scope). En fonction des activités réalisées, la consommation d'oxygène et donc, le métabolisme des individus, va fluctuer au cours du temps. Le taux métabolique maximal (AMR, Active Metabolic Rate) est atteint lorsque le poisson maintient une activité soutenue de manière prolongée alors que le taux métabolique standard (SMR; Standard Metabolic Rate), nécessaire pour le maintien des fonctions vitales, correspond au taux métabolique au repos, à jeun, hors maturité sexuelle. La différence entre l'AMR et la SMR permet d'estimer l'AMS (Brett 1964 ; Lucas et al. 2014a).

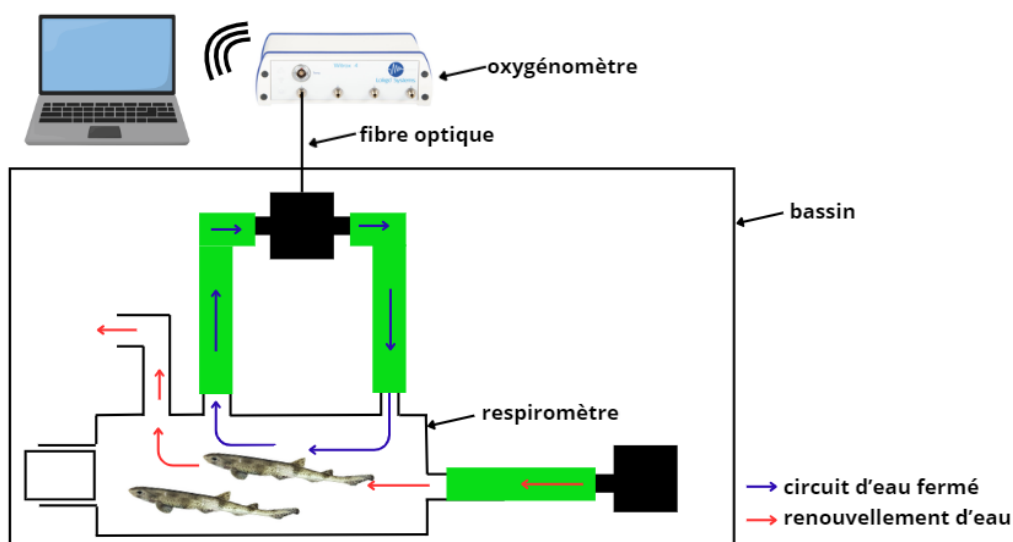


Figure 3. Schéma du respiromètre à flux intermittent (circuit d'eau fermé en bleu, circuit d'eau ouvert en rouge).

Ces taux métaboliques ont été estimés une fois au stade juvénile (*i.e.* âge 2-3 mois) en utilisant la méthode de respirométrie statique à flux intermittent (Steffensen, 1989). Pour cela, les individus ont été placés pendant 24h par deux dans un respiromètre cylindrique permettant de mesurer leur consommation d'oxygène (MO_2 , Figure 3). La concentration en oxygène y est mesurée en continu toutes les 5 secondes à l'aide d'une fibre optique placée dans le circuit d'eau fermé et connectée à un oxymètre (Witrox 4, LoligoSystems).

Avant de les placer dans le respiromètre, les petites roussettes sont soumises à un stress jusqu'à épuisement afin d'augmenter leur métabolisme et atteindre l'AMR (Lucas et al., 2020). Les mesures sont ensuite immédiatement commencées afin de pouvoir calculer l'AMR et se poursuivent pendant 24h en alternant de phases de 15 minutes de mesures de consommation d'oxygène et de 45 minutes de renouvellement d'eau. Ce temps est suffisant pour couvrir une période de repos permettant d'estimer la SMR (Chabot et al. 2016 ; Steffensen et al. 1994). Les mesures de métabolisme aérobie ont été effectuées du 27 janvier au 12 février 2025 avec 7 réplicats en condition contrôle, 11 en condition 50 μT , 8 en condition 100 μT et 7 en condition 500 μT .

L'équation 3 permet ensuite de convertir les concentrations d'oxygène mesurées en pourcentage de saturation :

$$MO_2 = \Delta[O_2] \cdot \Delta t^{-1} \cdot V \cdot M^{-1} \quad (\text{Eq. 3})$$

où $\Delta[O_2]$ ($\text{mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$) est la variation de la concentration en oxygène pendant la période de mesure, Δt la durée des mesures (h), V (L) le volume du respiromètre moins le volume des roussettes et M (kg) est la masse totale des 2 petites roussettes introduites dans le respiromètre.

Trois respiromètres ont été utilisés en simultané.

Analyses statistiques

Survie

L'effet des CEM amplifiés sur la survie des petites roussettes par rapport à la condition contrôle a été testé avec une analyse de survie de Cox (modèle de régression de Cox).

Croissance et métabolisme aérobie

Si ces conditions de normalité et homoscedasticité sont respectées, une ANOVA (ANALYSIS OF VARIANCE) à un facteur est réalisée afin de tester l'effet des traitements sur la longueur totale, le poids, l'indice de condition de Fulton K ainsi que sur l'AMR, SMR et AMS. Pour les variables longueur totale et poids, cette analyse est effectuée pour chaque pas de temps. Si l'une de ces conditions d'application n'est

pas respectée, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis est effectué. Si une différence significative est détectée, un test post-hoc de Tukey HSD est effectué après l'ANOVA et un test de Wilcoxon avec correction de Bonferroni après le Kruskal-Wallis afin de déterminer quels traitements diffèrent significativement du contrôle.

RESULTATS

L'expérimentation étudiant les effets des CEM en courant continu sur la survie, croissance et le métabolisme des petites roussettes s'est déroulée du 19 juin 2024 au 12 août 2025.

Sur les 200 œufs introduits dans l'étude, 83 n'étaient pas fécondés ce qui a réduit le nombre d'échantillons total de l'étude à 117 individus ; 26 en condition contrôle et respectivement 36, 28 et 27 individus dans les conditions en 50 μ T, 100 μ T et 500 μ T.

Survie

La phase embryonnaire a duré 21 semaines au bout de laquelle 75 éclosions ont eu lieu, représentant un taux de survie global pour cette phase de 64,1 %. Le taux de survie en condition contrôle a été de $61,5 \pm 9,7$ % et les taux de survie dans les conditions avec CEM amplifiés étaient de $72,2 \pm 20,3$ % en condition 50 μ T, $64,3 \pm 13,3$ % en condition 100 μ T et $55,6 \pm 12,9$ % en condition 500 μ T (Figure 4).

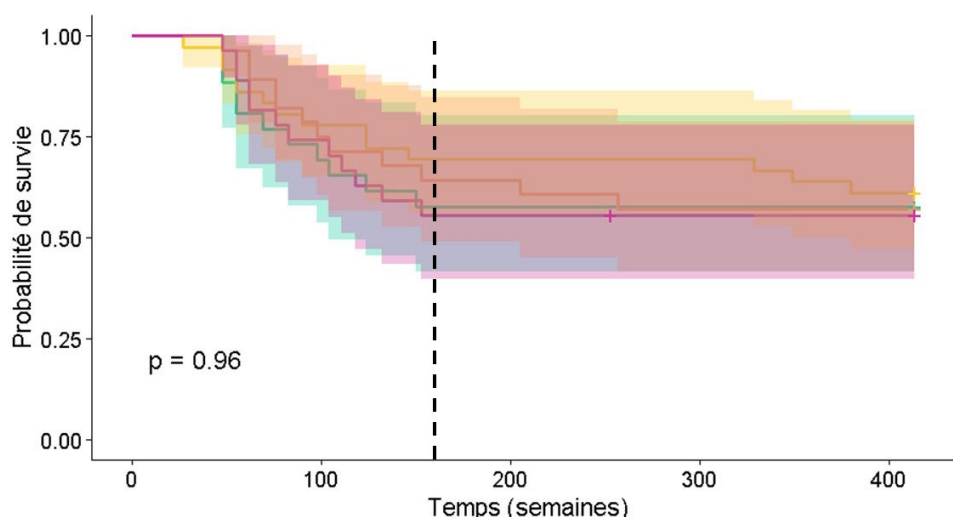


Figure 4. Courbe de Kaplan-Meier illustrant la probabilité de survie des petites roussettes *S. canicula* élevés sous quatre conditions de CEM amplifiés : contrôle (vert), 50 μ T (jaune), 100 μ T (orange), 500 μ T (rose) élevées en courant continu. La ligne pointillée représente la limite entre les phases embryonnaire (du 19 juin au 19 novembre 2025) et juvénile (du 19 novembre 2024 au 12 août 2025). Les régions ombrées indiquent les intervalles de confiance à 95%.

Pendant la phase juvénile, le taux de survie a été plus élevé avec 67 individus restants dans l'expérimentation à la date du 12 août 2025, représentant un taux de survie global pendant cette phase de 93,1 %. Ce taux de survie n'a pas été impacté par l'exposition aux CEM puisque les taux de survie en condition de CEM amplifiés ne sont pas significativement différents de la survie en condition contrôle : 100 ± 0 % de survie en condition contrôle, $92,0 \pm 8,8$ % en condition 50 μ T, $83,3 \pm 7,9$ % en condition 100 μ T et 100 ± 0 % en condition 500 μ T (Figure 4). Il est à noter que le taux de survie était plus faible en condition 100 μ T sans que cela soit significativement différent par rapport à la condition contrôle (modèle de régression de Cox).

Sur la totalité de l'expérimentation où les petites roussettes ont été soumises à des CEM en courant continu, il a été observé un taux de survie de $61,5 \pm 9,7$ % pour les individus en condition contrôle, $66,7 \pm 13,3$ % pour ceux en condition 50 μ T, $53,6 \pm 5,9$ % pour ceux en condition 100 μ T et $55,6 \pm 12,8$ % en condition 500 μ T.

Croissance

En phase embryonnaire, le suivi de la croissance pouvait se faire au niveau individuel grâce au marquage individuel des œufs, marquage absent en phase juvénile. Pour cette raison les analyses de croissance ont été réalisées séparément pour les deux stades de vie.

Phase embryonnaire

Au total 2188 embryons ont été mesurés sur photo.

L'évolution des stades embryonnaires a été constante avec toutefois une durée des stades 1 et 4 un peu plus longue que les autres stades, toutes conditions d'expérimentation confondues (Figure 5). Le nombre d'individu au stade 2 était plus faible que pour les autres stades. La distinction entre les stades 1 et 2 était délicate, ainsi la sous représentativité du nombre d'individu de ce stade est certainement dû à une erreur d'attribution du stade.

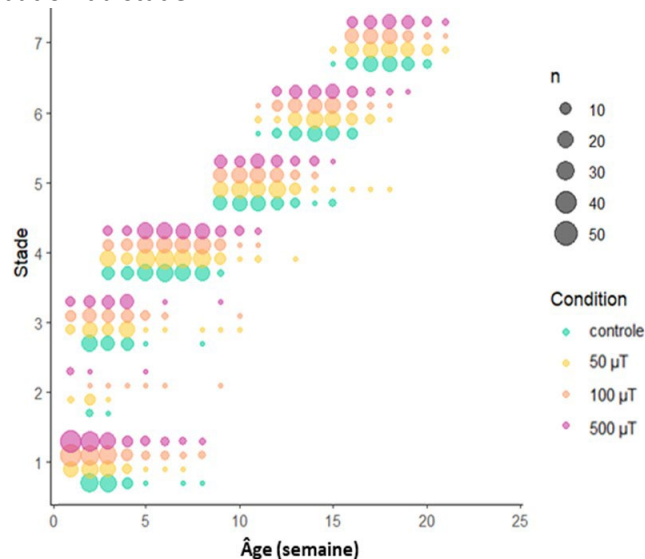


Figure 5. Répartition des stades de développement des embryons selon le nombre d'individus par condition de CEM (en μT) au cours des semaines d'expérimentation en courant continu.

La croissance des embryons au cours des semaines a suivi une courbe de type sigmoïde (Figure 6A). Après retrait des scores de confiances de 1 et 2, 1289 embryons ont été inclus dans le modèle. Entre la semaine 17 et 21, correspondant au plateau du modèle, les individus exposés à des CEM en courant continu mesuraient en moyenne $8,26 \pm 0,92$ cm.

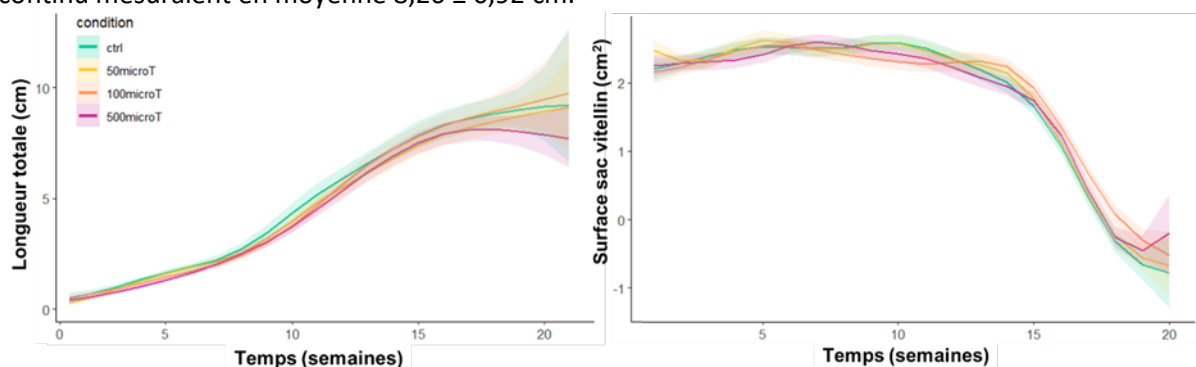


Figure 6. Modélisation de (A) la longueur totale des embryons (en cm) et (B) de la surface du sac vitellin (cm^2) au cours des semaines d'expérimentation selon l'intensité de CEM (μT) pour le courant continu, intervalle de confiance à 95%.

En courant continu, les embryons étaient, selon les prédictions du modèle, significativement plus petits en condition 500 μT par rapport au contrôle entre les semaines 2 et 6 ainsi qu'entre les semaines 9 et 12 (Figure 7 rose). Cette différence n'est plus observée dans les semaines qui suivent.

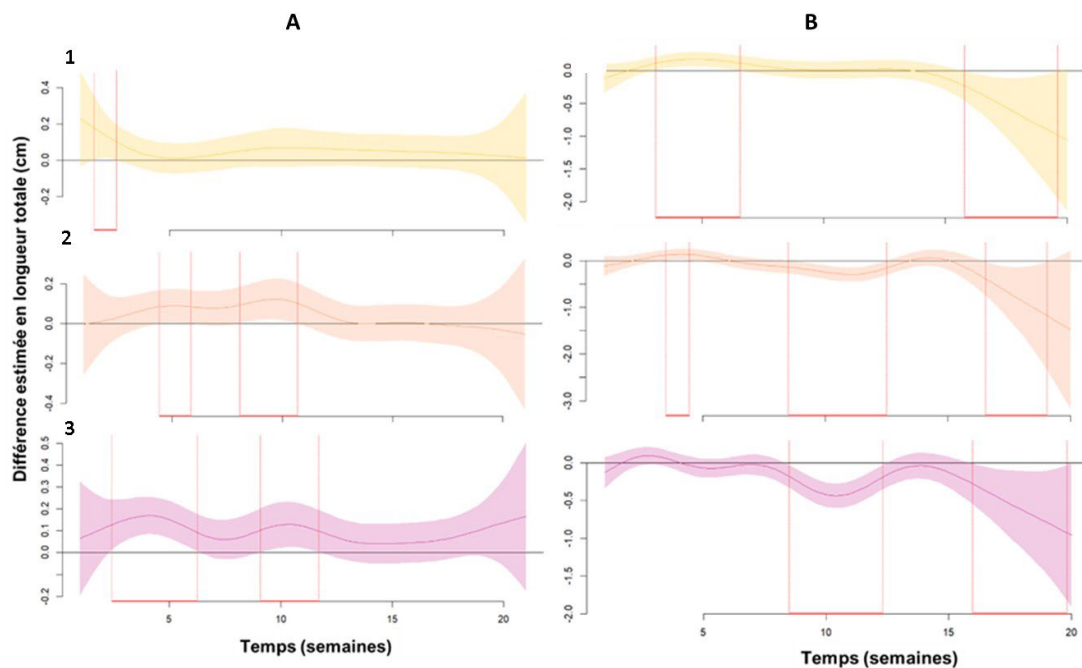


Figure 7. Graphiques des différences de prédictions de (A) la longueur totale d'embryons (cm) et (B) de la surface du sac vitellin (cm²) au cours des semaines d'exposition à des CEM amplifiés en courant continu entre la condition contrôle et les conditions 50 µT (graphiques du haut : 1), 100 µT (graphiques du milieu : 2) 500 µT (graphiques du bas : 3), intervalle de confiance à 95 %. Les différences significatives sont indiquées par les portions en rouge.

Les analyses de consommation du sac vitellin ont été réalisées à partir des photos ayant un score de confiance supérieure à 2, totalisant 1710 mesures. En courant continu, il a été observé avec un plateau à $2,18 \pm 0,70$ cm² en moyenne sur les 10 premières semaines avant de diminuer (Figure 6B).

La surface des sacs vitellins des individus exposés à des CEM de 500 µT étaient, d'après les prédictions du modèle, significativement plus grande qu'en condition contrôle (Figure 7B rose).

Phase juvénile

Quelle que soit la condition, la longueur totale des individus à la naissance était égale à $10,4 \pm 0,7$ cm puis augmentait continuellement au cours du temps (Figure 8). Au bout de 5 mois de suivi, les individus mesuraient $19,6 \pm 1,6$ cm, représentant une croissance d'1,8 cm par mois.

Aucune différence significative n'a été observé lors de l'exposition en courant continu, même si les individus en condition contrôle étaient plus grands que ceux des autres conditions tout au long de ce suivi (Figure 8).

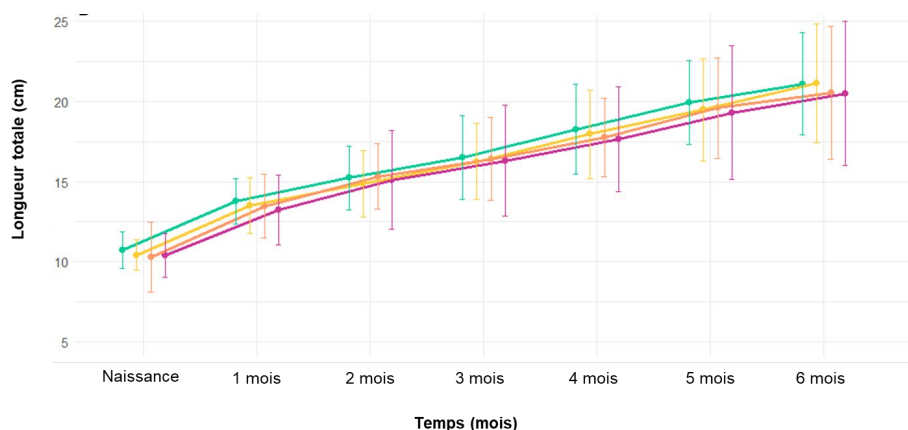


Figure 8. Évolution de la longueur totale des petites roussettes *S. canicula* juvéniles au cours de l'exposition aux conditions contrôle (vert), 50 µT (jaune), 100 µT (orange), 500 µT (rose) en courant continu.

L'indice de condition de Fulton, combinant les mesures de longueurs totales et de poids, diminuait après la naissance (Figure 9). Il s'est ensuite stabilisé pendant 4 mois avant de diminuer à nouveau à 5 mois, lors du changement alimentaire sur de la nourriture vivante (Figure 9).

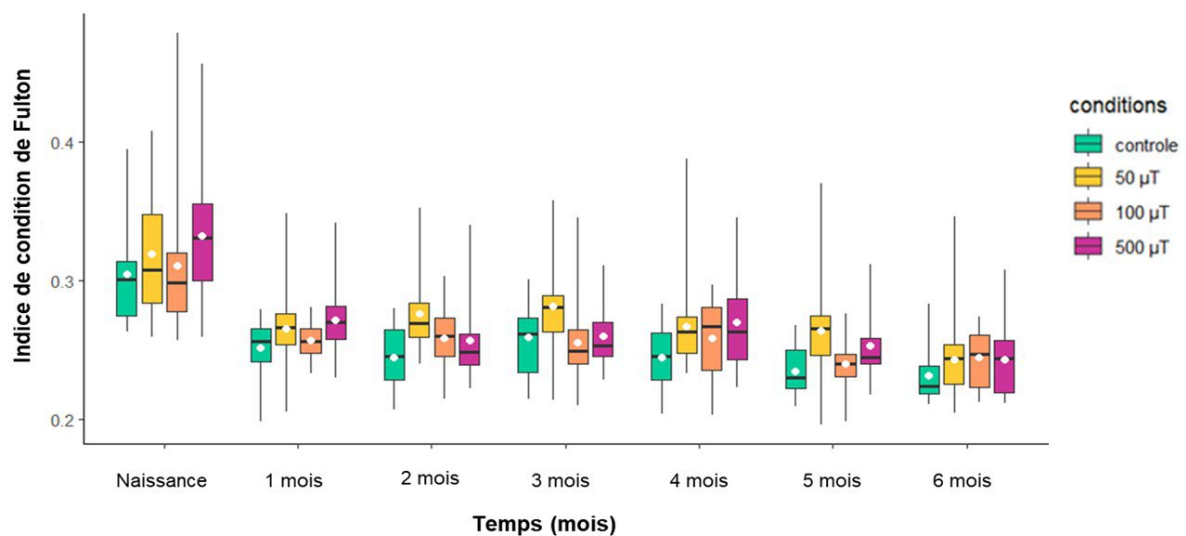


Figure 9. Boxplots (Ligne Médiane : Médiane, Boîte : Quartiles, Moustaches : Étendue des Données, Points : Outliers) de l'indice de condition de Fulton des juvéniles de *S. canicula* en fonction du temps, exposés à des champs électromagnétiques (contrôle, 50 µT, 100 µT, 500 µT) en courant continu.

Métabolisme aérobie

Le métabolisme a été évalué uniquement pendant la phase juvénile, fin janvier. Les valeurs moyennes globales pour l'AMR, la SMR et l'AMS étaient de $156,4 \pm 26,9$, $94,9 \pm 19,2$ et $61,5 \pm 21,5$ $\text{mgO}_2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectivement. Aucune différence significative du métabolisme aérobie n'a été mise en évidence entre les conditions modifiées et la condition contrôle (Figure 10).

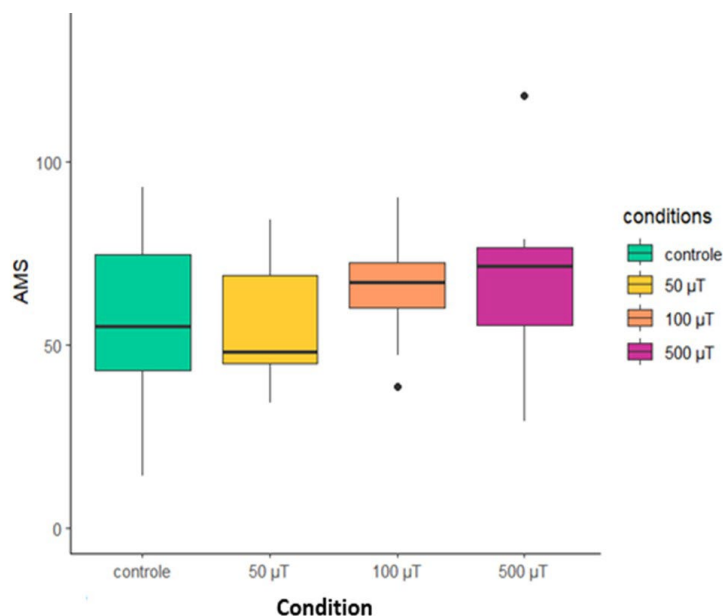


Figure 10. Boxplot (Ligne Médiane : Médiane, Boîte : Quartiles, Moustaches : Étendue des Données, Points : Outliers) du taux métabolique aérobie de juvéniles de *S. canicula* exposés aux conditions contrôle (N = 14), 50 µT (N = 22), 100 µT (N = 16), 500 µT (N = 14) en courant continu.

IMPORTANCE DES RESULTATS POUR CE DOMAINE DE RECHERCHE

Dans le cadre de l'implantation de parcs éoliens en mer, trois valeurs de CEM amplifiés en courant continu (50, 100 et 500 μ T) et une condition contrôle ont été testées sur la survie, la croissance et le métabolisme aérobie d'une espèce présente sur toutes les côtes françaises, la petites roussettes *S. canicula*. Cette espèce modèle d'élasmobranche possède des ampoules de Lorenzini qui détectent les variations de champs électromagnétiques dans son environnement : elle est électro-magnéto sensible. Aussi cette espèce benthique accroche ses œufs aux substrats et les jeunes stades sont peu mobiles. Les zones de ponte pouvant coïncider avec la position de câbles sous-marins, un développement en présence de CEM artificiels amplifiés est une éventualité à ne pas négliger. Ainsi cette étude a permis de déterminer les impacts potentiels des CEM émis par les câbles sous-marins lors du transport de l'électricité entre les éoliennes en mer et la terre sur le développement de cette espèce benthique, dans le cas où la ponte aurait lieu à proximité d'un câble. Il s'agit à notre connaissance de la première étude impliquant une exposition sur une aussi longue période.

Survie

La survie des petites roussettes a été contrastée entre les deux phases de développement avec une survie des embryons faible (64 %) et celle des juvéniles élevée (93 %).

Le taux de survie observé en phase embryonnaire lors de l'expérimentation était inférieur à celui rapporté pour les conditions contrôle dans les études de Coulon et al (2024) ou Musa et al (2019) visant à étudier l'impact du réchauffement climatique sur les petites roussettes avec respectivement 82 % et 100 % de survie. Cependant, des durs de la station de Roscoff ayant fourni le matériel biologique, les œufs provenaient d'une spermathèque vieillissante impliquant généralement un taux de viabilité près de 60 %, correspondant au taux de survie observé dans cette étude. Aussi, la survie des conditions en CEM amplifiés n'était pas significativement différente de la survie en condition contrôle, et ce pour toutes les expérimentations. Cela suggère que les CEM amplifiés n'ont pas eu d'impact sur la survie des petites roussettes pendant cette phase de leur cycle de vie.

Sans différence significative, il est à noter que les petites roussettes juvéniles exposées à des CEM de 100 μ T, en courant continu, présentaient les taux de survie les plus bas toute condition confondue (83 %). Une étude de Li et al. (2015) sur l'impact de CEM en courant alternatif de 0, 30, 100, 150 et 200 μ T sur des juvéniles de tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus* ; Linnaeus 1758) a démontré un impact négatif des conditions intermédiaires (150 μ T) sur la croissance de l'espèce (longueur moyenne du corps, le poids corporel et la hauteur des individus). Cette différence était expliquée par une réduction significative de l'activité des enzymes digestives telles que la peptase et la protéase. À terme, une croissance diminuée pourrait aboutir à un taux de survie plus faible. Comme pour le tilapia, une inhibition de l'activité des enzymes digestives, pourrait expliquer le taux de survie plus faible en condition de CEM intermédiaire dans notre étude, mais cela n'a pas été étudié.

Croissance

Les résultats suggèrent une croissance réduite des embryons pour les plus fortes intensités de champs magnétiques dans les premières semaines de développement. Les CEM de plus fortes intensités (100 et 500 μ T) ont présenté un effet significatif avec des embryons de petites roussettes plus petits qu'en condition contrôle. Cette différence n'est cependant pas retrouvée dans la suite du développement, ce qui ne suggère pas d'effets délétères des CEM

amplifiés sur la taille des embryons à éclosion. Cette absence d'effet de CEM à long terme est soutenue par des études antérieures réalisées sur des espèces de poissons osseux, (Fey et al, 2019a ; Guillebon et al, 2025). D'autres études, étudiant les effets de CEM de faibles intensités en courant alternatif et continu, ont montré une accélération de la croissance d'embryons de poissons (Lee & Yang, 2014 ; Formicki & Winnicki, 1998). Il est possible que les effets soient espèces spécifiques car à contrario de la littérature sur les poissons osseux, les effets constatés ne perdurent pas pour la petite roussette et donc a priori sur poisson cartilagineux. Il paraît donc important de mener des recherches similaires sur d'autres espèces d'élastrmobranches pour pouvoir généraliser ces premiers résultats. Ainsi, la présence de câbles sous-marins ne présenterait pas de risque pour la croissance des embryons de petites roussettes indépendamment de la proximité de la ponte avec ces derniers.

Les effets d'une exposition des embryons de petites roussettes ont montré des effets différents sur la consommation du sac vitellin selon le courant utilisé. Un ralentissement de la consommation du sac vitellin a été observé, essentiellement pour les individus exposés à des CEM de 500 μ T. Ce résultat ne concorde pas avec les études menées sur les poissons osseux avec une absorption plus rapide de leur sac vitellin au cours du développement embryonnaire (Fey et al, 2019a; Fey et al, 2019b). Pour les poissons osseux, l'exposition aux CEM en courant continu induirait une absorption accélérée du sac vitellin. Ces observations seraient liées à une demande énergétique plus importante des embryons, avec un métabolisme accéléré du poisson en phase embryonnaire *via* une augmentation de la respiration ou du rythme cardiaque (Perkowski and Formicki, 1997; Formicki and Winnicki, 1998).

Les prédateurs des œufs de roussettes émettent des champs bio-électriques ressemblant à des CEM artificiels en courant continu (Sisneros et al, 1998). Les élastrmobranches sont en capacité de détecter ces champs dès la phase embryonnaire (Sisneros et al, 1998 ; Freitas et al, 2006). Ainsi, pour éviter la prédation dans leur œuf, les embryons cessent tout mouvement et diminuent leur métabolisme cardiovasculaire lorsqu'ils détectent ces CEM. Ce comportement, appelé « freezing » (Freitas et al, 2006 ; Kempster et al, 2013) pourrait entraîner la diminution de la consommation du sac en réponse à la présence de champs bio-électriques (ou assimilés) de prédateurs. Plus le prédateur est proche plus l'intensité du courant électrique augmente. Dans notre étude, la diminution de la consommation du sac vitellin dans la condition 500 μ T pourrait être la conséquence d'une simulation de la présence d'un prédateur très proche de l'embryon (Kempster et al., 2013).

La présence de câbles sous-marins transportant des courants continus semble pouvoir perturber la consommation de vitellus des petites roussettes. Les effets sur la taille de ces perturbations ne sont qu'intermittents, il serait donc intéressant d'étudier d'autres effets à long terme. Par exemple, il serait intéressant d'étudier le comportement des individus et notamment leur capacité à se nourrir.

La taille et la masse à la naissance des individus sont similaires à celles retrouvées dans la littérature : une moyenne de $10,09 \pm 2,13$ cm et $3,75 \pm 1,12$ g (Coulon et al, 2024) et 10,05 cm et 3,07 g (Ellis et Shackley, 1997). Coulon et al. (2024) ainsi que Ellis et Shackley (1997) notent une croissance d'environ 0,55 cm ou 1 g par mois. Ces résultats ne correspondent pas à la croissance que nous observons, celle-ci étant de 1,8 cm par mois en courant continu. Toutefois, Collenot (1969) a montré une croissance de 15 cm des juvéniles sur un an, soit 1,25 cm par mois, ce qui se rapproche de nos observations. Cela pourrait s'expliquer par le fait que nos observations sont réalisées sur des individus nourris avec des quantités adaptées à la

biomasse, par du poisson gras supplémenté en vitamines, ce qui n'était pas le cas de l'élevage de Coulon et al. (2024) ainsi que celui de Ellis et Shackley (1997). Les individus ont également été alimentés à la pince individuellement, permettant une prise alimentaire quotidienne assurée pour tous les individus, ce qui n'est pas le cas en milieu naturel.

Les études sur la croissance des juvéniles de *S. canicula* restent très fragmentaires, rendant difficile toute comparaison avec la littérature existante. Lors de l'expérimentation en CEM en courant continu, l'indice de condition de Fulton était d'environ $0,26 \pm 0,03$ pendant les quatre premiers mois d'expérimentation puis de $0,24 \pm 0,03$ après avoir changé l'alimentation des petites roussettes par une alimentation avec des proies vivantes, plus naturelle et représentative des conditions de vie en milieu naturel. Ces valeurs correspondent à une bonne condition des individus tout au long des expérimentations sans influence des CEM modifiés sur la santé apparente des petites roussettes.

De plus, comme nous avons l'impossibilité de faire un suivi individuel des juvéniles, il est observé une grande variabilité interindividuelle toutes conditions confondues pouvant s'expliquer par l'âge des individus (± 3 semaines d'intervalle). Cette grande variabilité pourrait masquer des effets significatifs des conditions que l'on ne voit pas sur la croissance. Micarelli et al. (2020) ont proposé une méthode d'identification des petites roussettes à l'aide de points noirs sur la partie dorsale, derrière les branchies. Ces points sont présents depuis la naissance et ne disparaissent pas avec le temps, contrairement aux tâches cryptiques des individus qui peuvent évoluer. Cette méthode d'identification visuelle pourrait permettre de garder le suivi individuel des petites roussettes après éclosion et permettrait de connaître l'âge exact, ce qui diminuerait les variabilités présentées dans cette étude. Toutefois, cette méthode d'identification engendrerait un stress à cause des manipulations supplémentaires pour photographier correctement les individus.

Métabolisme aérobie

Nos résultats sur l'AMR, la SMR et l'AMS suggèrent que les juvéniles de *S. canicula* exposés à différentes valeurs de CEM en courant continu, n'ont pas de capacité réduite à supporter des activités demandeuses en oxygène comme la locomotion, la digestion ou la croissance par rapport à la condition contrôle. Cependant, aucune comparaison ne peut être menée avec d'autres études car aucune donnée n'est disponible sur l'impact des CEM sur le métabolisme aérobie des petites roussettes.

CONCLUSION

Les résultats de ce projet fournissent une compréhension plus précise de la réaction des élaémobranches aux CEM en fonction de leur intensité. Ils améliorent la connaissance des impacts des EMR sur les espèces marines et offrent ainsi des informations essentielles aux gestionnaires et décideurs. Ces données sont cruciales pour relever les défis liés au développement des EMR tout en préservant la biodiversité marine.

L'ensemble de nos résultats suggère que l'exposition à des CEM en courant continu peuvent engendrer des diminutions de croissance momentanée mais n'ont pas d'impact durable sur la survie, la croissance et le métabolisme des petites roussettes jusqu'à leur 6 mois. L'expérience serait à prolonger pour étudier les impacts potentiels plus tardifs sur la croissance et la reproduction. En portant une attention particulière pour la condition intermédiaire de $100 \mu T$, il serait également intéressant d'évaluer l'état de santé des individus par des suivis au niveau

sub-individuel qui est un niveau d'organisation plus sensible (e.g. réactions métaboliques, expression de gène, hormones de stress). Il serait également intéressant de comprendre si les CEM perturbent le fonctionnement des ampoules de Lorenzini et donc l'orientation et la recherche alimentaire des individus.

III.2 Description des travaux menés et des résultats scientifiques obtenus à l'attention du grand public

III.2.1 Introduction (environ 300 caractères, espaces inclus)

Ceci pourra être utilisé dans la fiche résultat du projet. La FRB se réserve le droit de modifier le texte pour publication sur ses plateformes. Vous serez consulté avant la publication. Ces éléments étant destinés au grand public, veillez à rédiger ce texte dans une optique de vulgarisation.

Les parcs éoliens marins se développent rapidement et leurs impacts potentiels sur la faune marine restent peu connus. Le projet CEMARB vise à évaluer l'effet de l'amplification locale des champs électro-magnétiques lors du transport de l'électricité vers la terre sur la petite roussette.

III.2.2 Méthode et approches utilisées pour le projet (environ 700 caractères, espaces inclus)

Ceci pourra être utilisé dans la fiche résultat du projet. La FRB se réserve le droit de modifier le texte pour publication sur ses plateformes. Vous serez consulté avant la publication. Ces éléments étant destinés au grand public, veillez à rédiger ce texte dans une optique de vulgarisation.

Des œufs de petites roussettes ont été exposés en milieu contrôlé à des champs électro-magnétiques en courant continu d'intensité différentes 50, 100 et 500 μ T représentant respectivement une distance de 10, 5 et 0m du câble sous-marin. Les objectifs étaient d'évaluer et quantifier les effets potentiels de ces champs magnétiques amplifiés sur la survie, la croissance, le développement et le métabolisme des petites roussettes du stade embryonnaire jusqu'au stade juvénile (6 mois).

III.3 Accès aux données

Décrivez les données et/ou les bases de données créées ou ajoutées au cours du projet, ainsi que les éléments de votre plan de gestion des données :

(a) les types de données collectées et utilisées

Les données récoltées lors du projet correspondent à la présence d'individus vivants dans les bassins expérimentaux au cours du temps, ainsi que la taille et le poids des individus de petites roussettes suivis mensuellement. Des données de consommation d'oxygène ont également été récoltées à l'âge de 2 à 3 mois des individus exposés à des champs électro-magnétiques amplifiés.

(b) les normes utilisées pour documenter les données (si applicable)

(c) la politique d'accès et de réutilisation, de stockage et de gestion à court et à long terme

Les données ont été stockées sur des disques durs afin de pouvoir traiter les données.

(d) les personnes à contacter après la fin du projet.

Après la fin du projet, il est possible de contacter Julie Lucas (Université de Bretagne Sud) : julie.lucas@univ-ubs.fr et Céline Artero (MNHN, station marine de Dinard) : celine.artero@mnhn.fr

III.4 Résultats et valorisations scientifiques du projet

- Liste de TOUTES les publications (articles, livres, chapitres de livres...) publiées, soumises ou prévues (avec les dates de soumission prévues).
 - LUCAS J, ARTERO C, PORTEFIN E, VERA M, EINSARGUEIX D, LAIHLEUGUE L, LECAILLON G, GARNIER L, TRANCART T. Impact of amplified electro-magnetic fields generated by electricity transportation of windfarms on the survival, growth and metabolism of small spotted catshark (*Scyliorhinus canicula*). *En préparation pour 2026*.
 - ARTERO C, LUCAS J, PORTEFIN E, VERA M, EINSARGUEIX D, LAIHLEUGUE L, FORTIN A, LECAILLON G, GARNIER L, TRANCART T. Impact of amplified electro-magnetic fields generated by electricity transportation of windfarms on the behaviour of small spotted catshark (*Scyliorhinus canicula*). *En préparation pour 2027*.
- Liste des communications orales et des posters présentés lors de conférences, passées ou prévues (veuillez indiquer les dates de ces conférences).
 - Céline Artero, Julie Lucas, Émilie Portefin, Meije Vera, Lisa Garnier, Hélène Claudel, François Deschamps, Damien Einsargueix, Laure Lailheugue, Anaïs Gudefin, Gilles Le Caillon, Nils Teichert, Alexandre Carpentier, Thomas Trancart. Accommodate marine renewable energies and biodiversity: Impacts of submarine power cable electro-magnetic field modifications on electro-magneto sensible aquatic species. 8th Conference on wind energy and wildlife impacts, September 8-12, 2025, Montpellier, France.
 - Lucas J., Einsargueix D., Lailheugue L., Fortin A., Portefin E., Husset MC., Artero C., Carpentier A., Claudel H., Garnier L., Trancart T. Impact of electromagnetic fields from offshore windfarm submarine electric cables on the development, biology and behavior of *Scyliorhinus canicula*. RT metabolica, octobre 2024, la Rochelle, France.
 - Lucas J., Einsargueix D., Lailheugue L., Fortin A., Portefin E., Husset MC., Artero C., Carpentier A., Claudel H., Garnier L., Trancart T. Impact of electromagnetic fields from offshore windfarm submarine electric cables on the development, biology and behavior of *Scyliorhinus canicula*. Society of Experimental Biology congress, juillet 2024, Prague, République Tchèque.
- Autres résultats (bases de données, logiciels, code R, sites web, etc.).
 -
- Liste des propositions de subventions soumises ou prévues (avec les dates prévues pour la soumission).

IV. Principales conclusions (publiables)

Principales conclusions (environ 1000 caractères, espaces inclus) à l'attention du grand public

Mettez en évidence les résultats à l'aide d'illustrations (graphique, carte, image, etc.) et faites-nous connaître sa signification. Ceci sera utilisé dans la fiche résultat du projet. La FRB se réserve le droit de modifier le texte pour publication sur ses plateformes. Vous serez consulté avant la publication. Ces éléments étant destinés au grand public, veillez à rédiger ce texte dans une optique de vulgarisation.

L'ensemble des résultats du projet CEMARB_DC suggère que l'exposition à des CEM en courant continu peuvent engendrer des ralentissements de croissance momentanés mais n'ont pas d'impact durable sur la survie, la croissance, le développement et le métabolisme des petites roussettes (*Scyliorhinus canicula*) jusqu'à leur 6 mois et en conditions contrôlées. L'expérience serait à prolonger pour étudier les impacts potentiels plus tardifs sur la croissance, la reproduction ainsi que sur le comportement de recherche alimentaire et l'orientation.

Ces résultats fournissent des données cruciales pour relever les défis liés au développement des énergies marines renouvelables tout en préservant la biodiversité marine et offrent ainsi des informations essentielles aux gestionnaires et décideurs. Les expériences menées ont permis d'améliorer la compréhension des réactions des éla-smobran-ches face aux champs électro-magnétiques amplifiés.

V. Impacts des résultats

Impact pour la science, la société et la décision publique et privée (environ 1500 caractères, espaces inclus) à l'attention du grand public

Ceci sera utilisé dans la fiche résultat du projet. La FRB se réserve le droit de modifier le texte pour publication sur ses plateformes. Vous serez consulté avant la publication. Ces éléments étant destinés au grand public, veillez à rédiger ce texte dans une optique de vulgarisation.

Les conclusions du projet CEMARB_DC viennent compléter le nouveau champs de recherche portant sur les impacts potentiels des parcs éoliens en mer notamment pendant la phase d'exploitation sur la biodiversité marine. La petite roussette, espèce modèle d'éla-smobran-ches est électro-magnéto sensible, son utilisation dans l'étude menée s'explique par son mode de vie benthique et le caractère fixé des œufs tout au long de l'incubation et la faible mobilité des juvéniles à la naissance. Les zones de ponte peuvent coïncider avec la position de câbles sous-marins transportant l'électricité des éoliennes à la terre, modifiant localement le champ magnétique terrestre. Ainsi un développement de l'espèce en présence de champs électro-magnétiques artificiels amplifiés est une éventualité à ne pas négliger. Les suivis effectués sur la survie, la croissance, le développement et le métabolisme des petites roussettes sont encourageants et suggèrent des impacts négligeables des champs électro-magnétiques amplifiés sur la survie, la croissance et le métabolisme de cette espèce jusqu'à l'âge de 6 mois. Cependant, il est important de continuer les recherches pour évaluer les impacts potentiels à long terme, notamment sur la capacité de reproduction ou le comportement de recherche alimentaire des individus ainsi que sur d'autres espèces, les impacts pouvant être espèces spécifiques.

VI. Activités de sensibilisation et de diffusion auprès des porteurs d'enjeux (le cas échéant)

La FRB encourage fortement la diffusion des résultats auprès de divers acteurs non académiques, y compris les décideurs politiques. Les résultats des projets de recherche peuvent être diffusés et valorisés de différentes manières et par différents canaux : publications, conférences scientifiques, posters ou synthèses scientifiques (cf. section III), mais aussi via des sites internet, des synthèses pour les décideurs politiques, des articles dans divers médias, des conférences impliquant des acteurs non académiques, des systèmes d'aide à la décision, des bases de données, etc.

- Veuillez décrire les activités de diffusion et de transfert de connaissances qui ont été menées à l'attention des décideurs politiques, des gestionnaires, des acteurs socio-économiques (ou de toute autre partie prenante) en rapport avec le projet.

Le projet a été mené en collaboration avec l'entreprise RTE, gestionnaire du réseau de transport d'électricité français. Les résultats ont été régulièrement partagés avec ce groupe pour que le cas échéant, RTE puisse adapter les installations électriques des parcs éoliens marins.

- Faites-nous part de tout article de presse, interview, projet éducatif, etc. en rapport avec la recherche menée dans le cadre du projet.

Le projet n'étant pas tout à fait finalisé, nous avons peu communiqué sur les résultats pour l'instant.

- Existe-t-il des outils de gestion ou de prise de décision qui ont été développés à la suite du projet (par exemple, conception/mise en œuvre d'indicateurs de biodiversité) ?

Les résultats de l'étude montrent un impact négligeable des champs électro-magnétiques sur la survie, la croissance, le développement et le métabolisme des petites roussettes. Ainsi, il n'a pas été nécessaire de mettre en place des outils de gestion.

- Existe-t-il des activités planifiées (ou qui pourraient être planifiées) pour étendre l'utilisation ou l'application des résultats ?

Il n'est pas envisagé d'étendre l'utilisation des résultats du projet. Toutefois, il est prévu de continuer le projet pour étudier les effets potentiels des champs électro-magnétiques sur le comportement de recherche alimentaires des petites roussettes afin de vérifier qu'en milieu naturel, les modifications des champs électro-magnétiques ne perturbent pas leurs cellules sensorielles leur permettant de rechercher leurs proies et par conséquent, se nourrir, grandir et survivre.

VII Prochaines étapes

Des actions sont-elles prévues à la suite du projet ? Avez-vous soumis des propositions résultant des travaux menés dans le cadre de ce projet pour des travaux ultérieurs ? Si oui, avez-vous obtenu gain de cause ? En cas de recrutement de post-doctorant, quel est son statut actuel ?

Les post-doctorantes recrutées pour réaliser ce projet sont toujours en activité. Julie Lucas est actuellement maître de conférence contractuelle à l'université de Bretagne Sud et Céline Artero est chargée de recherche contractuelle au MNHN.

Les expérimentations de CEMABR_DC sont prolongées afin d'étudier le comportement de recherche alimentaire des petites roussettes dans un environnement de champs électro-magnétiques amplifiés.

VIII Commentaires sur la réalisation du projet

Veuillez commenter les aspects pratiques, les difficultés rencontrées, les questions particulières liées à la gestion des données, etc.

La réalisation d'une expérimentation en milieu contrôlé dans une ferme aquacole a permis de simuler les CEM amplifiés trouvés aux alentours des câbles sous-marins transportant l'électricité produite par les parcs éoliens marins. Un suivi quotidien précis des petites roussettes a pu être mené, permettant l'acquisition de données inédites. Le projet s'est globalement bien déroulé. Les champs électro-magnétiques ont été arrêtés pendant 3 jours pendant les expérimentations pour réparer les installations électriques mises en place autour de certains bassins. Cela n'a pas impacté les suivis, ni les résultats de l'étude.