



# idRabio

& LITTORAL

ETAT DE REFERENCE DU PARC EOLIEN EN MER  
DES ILES D'YEU & DE NOIRMOUTIER :  
ANNEES 2022 & 2023

*SUIVI DE LA MODIFICATION DU CHAMP ELECTRO-MAGNETIQUE  
ET DE LA TEMPERATURE EMISE PAR LES CABLES – FICHE SE9*

## RAPPORT DE SYNTHESE



DEMANDEUR

OCTOBRE 2023



<b>Titre du document</b>	<b>ETAT DE REFERENCE DU PARC EOLIEN EN MER DES ILES D'YEU &amp; DE NOIRMOUTIER : ANNEES 2022 &amp; 2023</b>  SUIVI DE LA MODIFICATION DU CHAMP ELECTRO-MAGNETIQUE ET DE LA TEMPERATURE EMISE PAR LES CABLES – <b>FICHE SE9</b>  RAPPORT DE SYNTHESE
Etat	Version 1
Numéro de projet	B 191001
Client / Interlocuteur	EMYN / Sibylle CAZACU
Ref / Marché	NOY_LEM-DFE001_Contrat_Idrabio
<b>Dressé par</b>	<b>IDRA BIO &amp; LITTORAL / MAPPEM GEOPHYSICS / ECOLE CENTRALE DE NANTES – FONDATION OPEN-C</b>
Auteur(s)	Evans TREBAUL, Julien GERBER (IDRA BIO & LITTORAL). Jean François D'Eu (Mappem) Marine REYNAUD & Yves PERIGNON (Fondation Open-C / Ecole Centrale de Nantes)
Contrôlé par	Julien GERBER
Date	06/10/2023

# SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>CONTEXTE &amp; OBJECTIFS.....</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>METHODOLOGIE GENERALE .....</b>	<b>6</b>
2.1.	STRATEGIE D’ECHANTILLONNAGE.....	6
2.2.	CAMPAGNES EN MER .....	13
<b>3.</b>	<b>CHAMPS ELECTROMAGNETIQUE (SE9 / 2023) – PASSEM (MAPPEM).....</b>	<b>14</b>
3.1.	GENERALITES.....	14
3.2.	ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES .....	15
3.2.1.	<i>Équipement utilisé</i> .....	15
3.2.1.1.	Système PASSEM .....	15
3.2.1.2.	Positionnement et données de navigation .....	17
3.2.1.3.	Sonde CTD.....	18
3.2.2.	<i>Paramètres d’acquisition</i> .....	18
3.2.3.	<i>Mise en place du matériel</i> .....	18
3.2.4.	<i>Remarques générales sur la campagne</i> .....	20
3.2.5.	<i>Lignes enregistrées</i> .....	20
3.2.6.	<i>Sondages CTD</i> .....	22
3.2.7.	<i>Traitement des données</i> .....	22
3.3.	RESULTATS.....	24
3.3.1.	<i>Exemples de données acquises</i> .....	24
3.3.2.	<i>Etude des données électriques</i> .....	31
3.3.3.	<i>Etude des données magnétiques</i> .....	32
3.4.	CONCLUSION.....	33
<b>4.</b>	<b>CHAMPS ELECTROMAGNETIQUE (SE9 / 2023) – STATEM (MAPPEM).....</b>	<b>35</b>
4.1.	GENERALITES.....	35
4.2.	ACQUISITION & TRAITEMENT DES DONNEES.....	36
4.2.1.	<i>Équipement utilisé</i> .....	36
4.2.2.	<i>Positions enregistrées</i> .....	38
4.2.3.	<i>Remarques générales sur la campagne</i> .....	38
4.3.	RESULTATS.....	39
4.3.1.	<i>Données électriques</i> .....	39
4.3.2.	<i>Données magnétiques</i> .....	41
4.4.	CONCLUSION.....	43
<b>5.</b>	<b>SUIVI DE LA MODIFICATION DE LA TEMPERATURE EMISE PAR LES CABLES (SE9 - 2023) – FONDATION OPEN-C</b>	<b>44</b>
5.1.	GENERALITES.....	44
5.2.	ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES .....	44
5.2.1.	<i>Protocole et moyens mis en œuvre</i> .....	44
5.3.	RESULTATS.....	45
5.3.1.	<i>Résultats des 6 capteurs de mesures de température et de pression</i> .....	45
5.3.2.	<i>Station N31</i> .....	48
5.3.3.	<i>Station IS03</i> .....	49
5.4.	CONCLUSION.....	50
<b>6.</b>	<b>SYNTHESE.....</b>	<b>51</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCES .....</b>	<b>52</b>

## Liste des figures

Figure 1. Localisation des 15 stations étudiées pour la qualité de l'eau (dont 2 pour prélèvements).....	8
Figure 2. Localisation des 7 stations pour la qualité des sédiments (dont 3 pour analyses des kystes phytoplanctoniques).....	9
Figure 3. Localisation des 7 stations étudiées sur les substrats meubles.....	10
Figure 4. Localisation des 18 stations étudiées sur les substrats rocheux.....	11
Figure 5. Localisation des profils au sonar PASSEM, et des 2 stations PASSEM.....	12
Figure 6. Pont du Reborn (Cetlic marine).....	13
Figure 7. Maya One (Archipel pro).....	13
Figure 8. Plan de position prévisionnel de la campagne de mesure.....	14
Figure 9. Système PASSEM.....	15
Figure 10. Exemple de configuration possible du système PASSEM avec un câble de 4 m de distance entre les électrodes. Les quatre dipôles de mesure passive sont indiqués en jaune et vert.....	15
Figure 11. Orientation du magnétomètre.....	16
Figure 12. (a) Système PASSEM. Le câble de traction (en bleu) est enroulé sur le treuil électrique au premier plan. (b) Déploiement du système à l'aide de la poulie.....	17
Figure 13. Interface d'acquisition permettant le contrôle en temps réel des données enregistrées.....	17
Figure 14. Sonde CTD utilisée pendant le survey.....	18
Figure 15. (a) Photographie du treuil. (b) Photographie du treuil et de la poulie avec le système à la mer. (c) Photographie du poste d'acquisition.....	19
Figure 16. Schéma de la disposition du pont du navire.....	20
Figure 17. Lignes enregistrées.....	21
Figure 18. Données électriques pour la ligne 2023-02-02T14-34-42Z. De haut en bas : dipôles électriques de 1 à 4 (les valeurs ne sont pas corrigées des longueurs des dipôles).....	25
Figure 19. Spectrogramme des données électrique pour la ligne 2023-02-02T14-34-42Z pour chacun des dipôles.....	26
Figure 20. Données magnétiques pour la ligne 2023-02-02T14-34-42Z. De haut en bas : champ magnétique Bx, By, Bz. Dernière figure : champ magnétique total (rouge), bathymétrie (noir) et profondeur du poisson (vert).....	27
Figure 21. Données électriques pour la ligne 2023-02-02T11-34-00Z. De haut en bas : dipôles électriques de 1 à 4 (les valeurs ne sont pas corrigées des longueurs des dipôles).....	28
Figure 22. Spectrogramme des données électriques pour la ligne 2023-02-02T11-34-00Z pour chacun des dipôles.....	29
Figure 23. Données magnétiques pour la ligne 2023-02-02T11-34-00Z. De haut en bas : champ magnétique Bx, By, Bz. Dernière figure : champ magnétique total (rouge), bathymétrie (noir) et profondeur du poisson (vert).....	30
Figure 24. Spectre en fréquence pour le dipôle 3 de la ligne 2023-02-02T14-06-15Z. La fréquence 50 Hz est marquée en rouge.....	31
Figure 25. Spectre en fréquence des données électriques de la ligne 2023-02-02T14-06-15Z (dipôle 4), zoomé autour de la fréquence 50 Hz.....	32
Figure 26. Spectre en fréquence pour le champ magnétique total mesuré pour la ligne 2023-02-02T10-22-48Z.....	33
Figure 27. Spectre en fréquence pour le champ magnétique total mesuré pour la ligne 2023-02-02T14-06-15Z.....	33
Figure 28. Zone d'étude.....	35
Figure 29. Un instrument STATEM configuré avec des dipôles électriques de 5 m.....	36
Figure 30. Description technique d'un instrument STATEM dans une configuration avec des dipôles électriques longs (5 m).....	37
Figure 31. Déclenchement du début de l'acquisition d'une station STATEM par MAPPEM Geophysics.....	38
Figure 32. Pose et montage des poids sur une station STATEM par les plongeurs d'IDRA Bio et Littoral.....	39
Figure 33. Relève du STATEM par les plongeurs d'IDRA Bio et Littoral.....	39
Figure 34. Exemple de variation du champ électrique au cours d'une heure de données acquises par les deux stations STATEM. Les deux voies X et Y sont représentées.....	40
Figure 35. Spectres en fréquence des données des deux stations STATEM pour les voies électriques X et Y, calculés sur 24h de données.....	41
Figure 36. Spectre en fréquence des données des deux stations STATEM pour le champ magnétique total, calculé sur 24h.....	41
Figure 37. Valeurs Kp au mois de Juin 2023. Le cadre rouge représente la fenêtre d'acquisition des stations STATEM.....	42
Figure 38. Norme du champ magnétique enregistrée par les deux stations STATEM.....	43
Figure 39. Comparaison des spectres entre 24h de données pendant la tempête géomagnétique (15/06-16/06 de midi à midi, courbe verte) avec deux autres jours de données.....	43
Figure 40. Schéma représentant la stratégie d'échantillonnage.....	44
Figure 41. Photographies et mesure des capteurs de température Nautical MS5803-30BA (crédit : Alpha Mach).....	45
Figure 42. Température et pression mesurées par les six capteurs aux stations N31 et IS03.....	46
Figure 43. Courbes de températures mesurées et moyenne corrigée obtenues à la station N31.....	48
Figure 44. Boxplot des températures mesurées et de la moyenne corrigée à la station N31.....	48
Figure 45. Courbes de températures mesurées et moyenne corrigée obtenues à la station IS03.....	49
Figure 46. Boxplot des températures mesurées et de la moyenne corrigée à la station IS03.....	49

## Liste des tableaux

Tableau 1. Synthèse de l'effort d'échantillonnage pour l'état de référence.....	6
Tableau 2 : Calendrier des campagnes d'intervention entre 2022 et 2023 .....	13
Tableau 3. Configuration du dispositif de mesure. ....	18
Tableau 4. Détail des lignes enregistrées. ....	22
Tableau 5. Détail sur les sondages CTD réalisés (degrés décimaux). ....	22
Tableau 6. Stations déployées. ....	38
Tableau 7. Taux de recouvrement et quantité de données acquises.....	46
Tableau 8. Statistiques des températures et moyenne corrigée obtenues à la station N31 .....	48
Tableau 9. Statistiques des températures et moyenne corrigée obtenues à la station IS03.....	49

# 1. CONTEXTE & OBJECTIFS

Dans le cadre du projet de parc éolien en mer au large des îles d'Yeu et de Noirmoutier, la société EMYN prépare la phase de construction du parc.

L'état de référence environnemental est décliné en 17 mesures composant le programme de suivi environnemental du parc, dont l'objectif est de s'inscrire dans la continuité de l'étude d'impact. Il permettra de connaître l'effet réel du parc sur son environnement et de mesurer l'efficacité des mesures pour éviter, réduire et compenser les impacts.

Dans ce contexte, le bureau d'études IDRA Bio & Littoral a en charge 5 mesures principales, associées à des fiches de protocoles concertées et validées :

- **Suivi de la modification du champ électromagnétique et de la température des câbles : fiche SE9, objet du présent document.**
- **Suivi de la qualité de l'eau et des sédiments : fiche AP1**
- **Suivi des populations benthiques :**
  - o **De substrats meubles : fiche SE6-A**
  - o **De substrats rocheux : fiche SE6-B**
- **Evaluation de l'effet récif : fiche SE10.** De manière volontaire, la fiche SE10 « Evaluation de l'effet récif » n'est pas éditée à ce stade de la chronologie du projet, ce suivi étant mis en place à partir de la phase d'exploitation. Elle n'est donc pas détaillée dans les rapports actuels.

Après un rappel de la stratégie d'échantillonnage générale menée sur l'ensemble des mesures, le présent document est le rapport de synthèse des résultats acquis dans le cadre de la mesure SE9 uniquement. Pour les autres mesures, il convient de se référer à un autre document. Ce suivi a été réalisé avec le partenariat de [MAPPEM Geophysics](#), et de [l'Ecole Centrale de Nantes](#) dont le service spécialisé a été transféré récemment à la [fondation OPEN-C](#).

## 2. METHODOLOGIE GENERALE

Des rappels généraux sont détaillés ci-après afin de synthétiser les principales mesures suivies par l'équipe d'IDRA Bio & Littoral.

### 2.1. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE

La stratégie d'échantillonnage globale est résumée au Tableau 1. **Elle inclut des prospections sur l'Aire d'étude immédiate (AEI) et en zone témoin à proximité de l'AEI.**

Fiche protocole	Compartiment étudié	Paramètres / protocoles	Méthode d'investigation	Nombre de vérités terrain
AP1	Eau	T °, turbidité, salinité, oxygène	Mesure in situ avec sonde multiparamètres	<b>15 stations</b>
		Analyses physico-chimiques	Prélèvements avec une bouteille NISKIN	<b>2 stations</b>
AP1	Sédiments	Analyses physico-chimiques	Benne Van Veen	<b>7 stations</b>
		Granulométrie tamis		<b>3 stations</b>
		Analyse des kystes phytoplanctoniques		
SE6-A	Substrats meubles	Benthos par prélèvements	Benne Van Veen	<b>7 stations</b>
SE6-B	Substrats rocheux	Benthos par protocole ECBRS + ZNIEFF	Plongée sous-marine	<b>18 stations</b>
SE9	Champs électro-magnétique	PASSEM STATEM et T° (capteurs)	Sonar et plongée sous-marine	<b>Profils + 2 stations</b>

Tableau 1. Synthèse de l'effort d'échantillonnage pour l'état de référence

Les fiches protocole ne sont pas rappelées dans ce document : les cartes de localisation des stations de suivi sont néanmoins rappelées ci-après.

- **Qualité de l'eau** : 15 stations (2022) (Figure 1), incluant :
  - 3 stations étudiées pour la qualité des sédiments : N01, N04 et N05 ;
  - 12 autres stations réparties sur les substrats rocheux, choisies parmi celles du suivi des habitats rocheux, afin de couvrir l'ensemble de l'AEI. Cela inclut les 4 stations témoins du suivi des substrats rocheux.

Sur ces 15 stations, 2 d'entre elles font l'objet de prélèvements d'eau en plus des mesures *in situ* : le choix est porté sur la station N01 au sud-ouest, en raison de sa composition granulométrique en sables moyens, et sur la station IS07 au nord-est du parc.

- **Substrats meubles** : 7 stations dont 5 dans l'AEI et 2 stations témoins (Figure 2 et Figure 3) :
  - Analyses de physico-chimie (2022), de granulométrie (2022 et 2023), et des peuplements benthiques (2022 et 2023) ;
  - Analyse des kystes phytoplanctoniques sur 3 stations parmi les 7 stations (2022).
- **Substrats rocheux** (Figure 4) : relevés ZNIEFF et ECBRS sur 18 stations, dont 4 en zone témoin (2022 et 2023).
- **Champ électromagnétique et de la température des câbles** (Figure 5) : profils PASSEM, et 2 stations STATEM sur l'AEI (IS03 et N31).

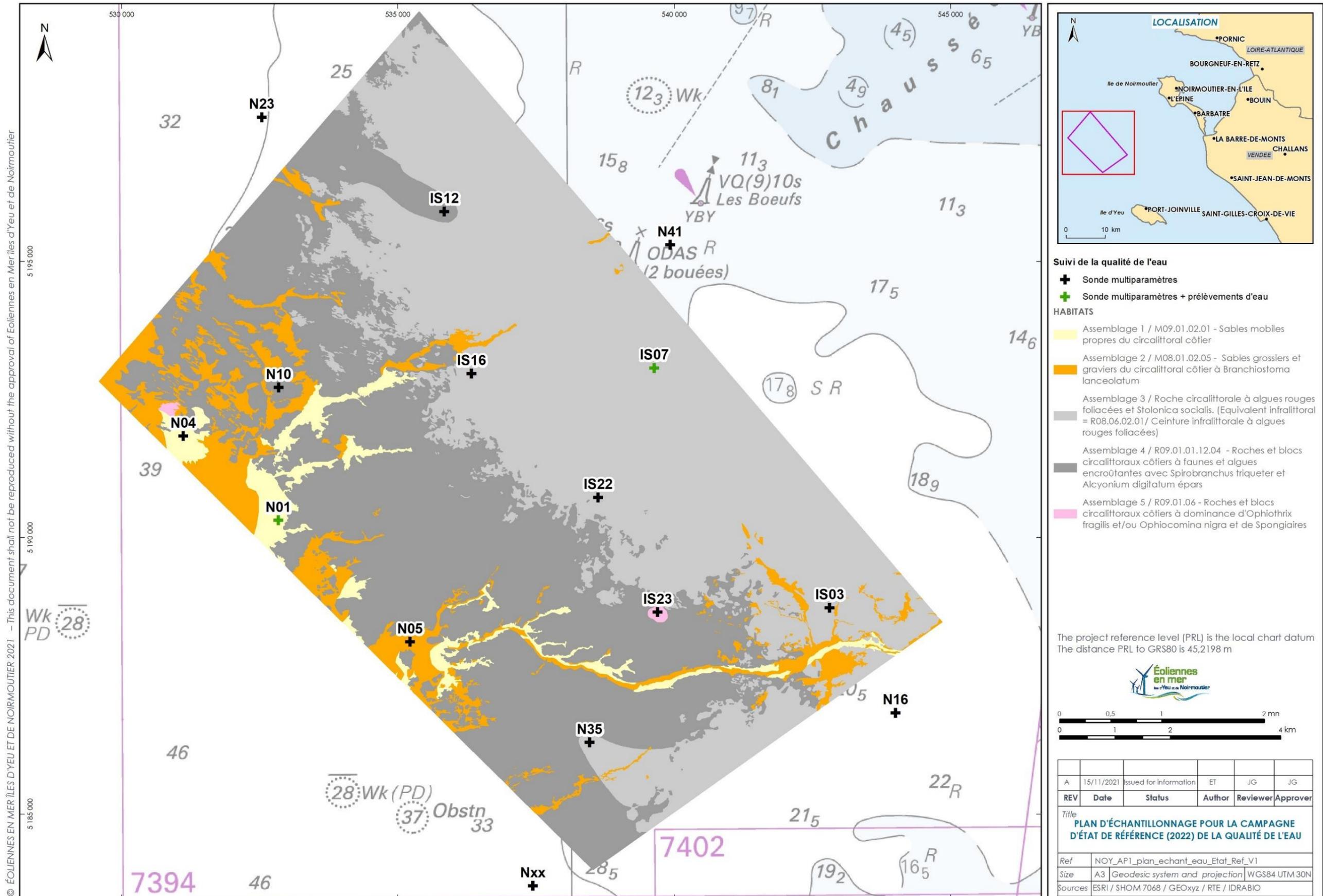


Figure 1. Localisation des 15 stations étudiées pour la qualité de l'eau (dont 2 pour prélèvements)

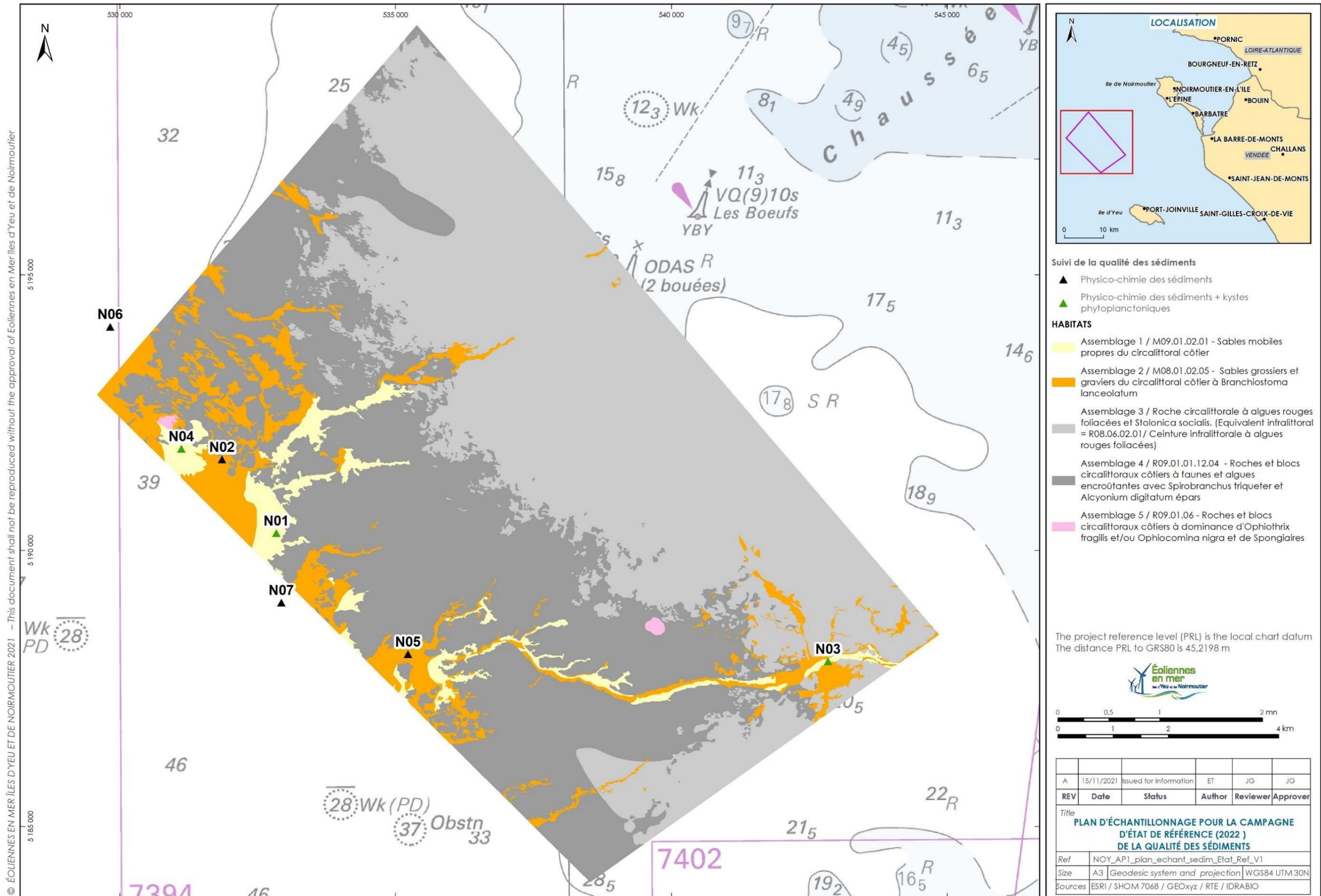


Figure 2. Localisation des 7 stations pour la qualité des sédiments (dont 3 pour analyses des kystes phytoplanctoniques)

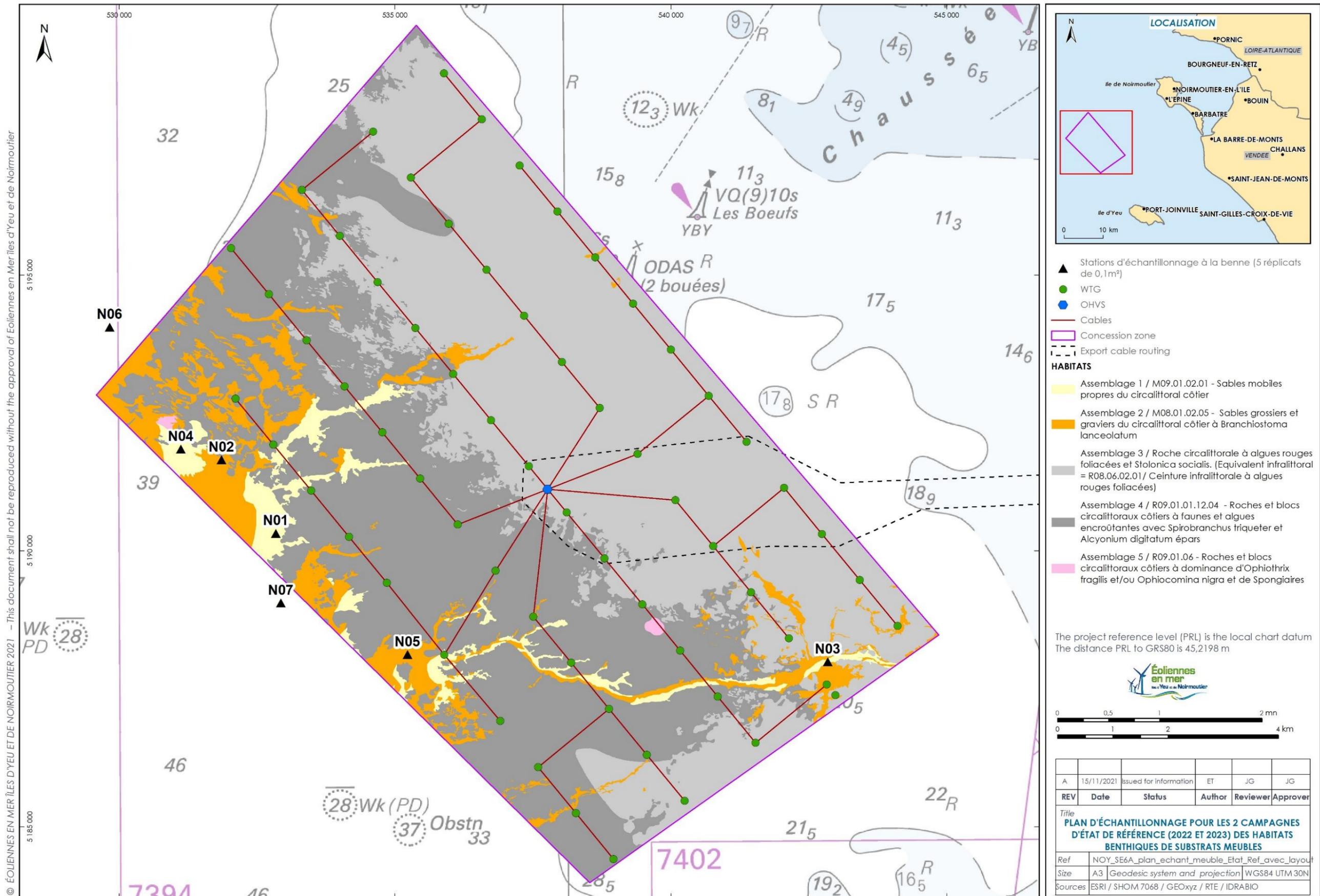


Figure 3. Localisation des 7 stations étudiées sur les substrats meubles

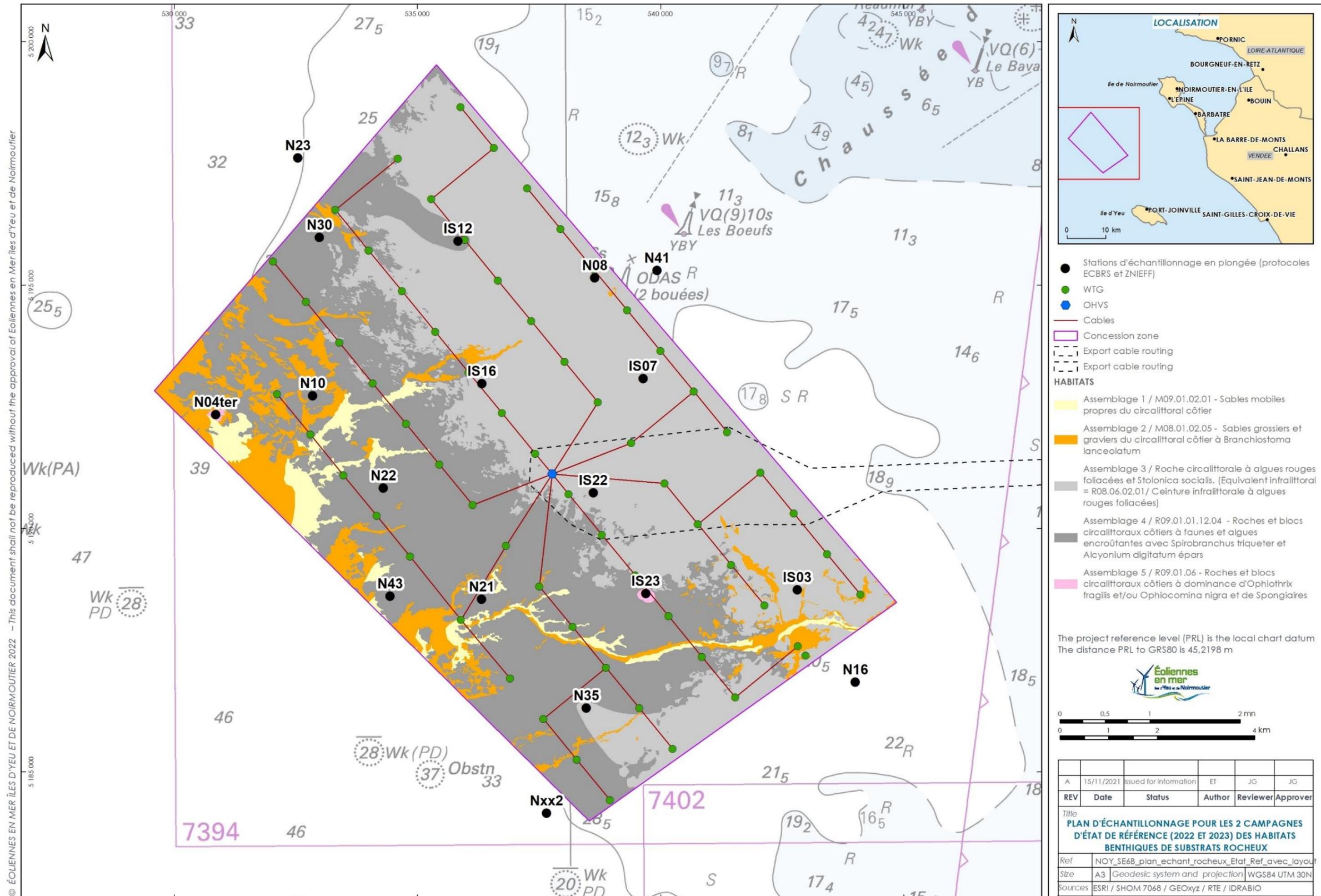


Figure 4. Localisation des 18 stations étudiées sur les substrats rocheux

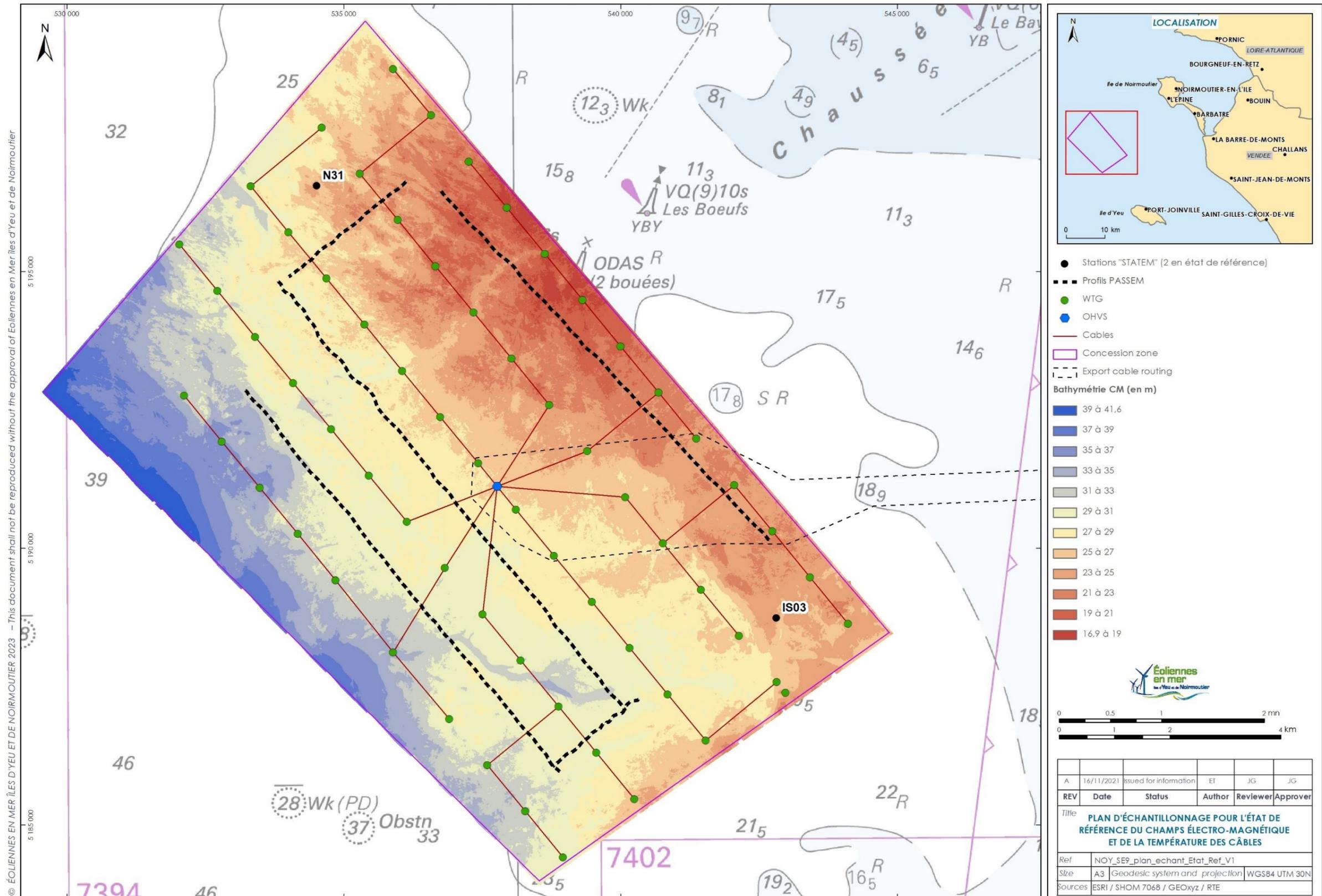


Figure 5. Localisation des profils au sonar PASSEM, et des 2 stations PASSEM

## 2.2. CAMPAGNES EN MER

Les prélèvements de 2022 et 2023 pour les analyses des substrats meubles (analyses physico-chimiques et kystes planctoniques, granulométrie tamis et peuplements benthiques) sont réalisés à bord du « Reborn », navire de la société Celtic Marine Service. Ce même navire est également le support de surface pour les mesures par sonar PASSEM, et la mise à l'eau des stations STATEM de la fiche SE9.



Figure 6. Pont du Reborn (Celtic marine)



Figure 7. Maya One (Archipel pro)

En 2022, les mesures de sonde et les prélèvements d'eau ont été mutualisés avec les interventions en plongée sous-marine, à bord d'un semi-rigide de la société Archipel Pro :

- Du 09 au 10 mai 2022 (plongée + sonde) ;
- Du 30 mai au 03 juin 2022 (plongée + sonde + prélèvement eau le 30/05) ;
- Du 21 juin au 23 juin 2022 (plongée + sonde).

Un calendrier des campagnes d'intervention au cours des années 2022-2023 est présenté au Tableau 2. Concernant les stations STATEM, la fiche protocole prévoyait une immersion de 2 semaines, qui a été ramenée à 1 semaine en raison des contraintes croisées de météo et des impératifs de démarrage des travaux fin juin 2023 (donc une relève des dispositifs avant) : ceci n'impacte pas la robustesse des mesures pendant selon MAPPEM et Centrale Nantes.

Campagnes d'intervention	Stations substrats meubles + physico chimie et Granulométrie tamis	Analyse des kystes phytoplactoniques	Stations substrats rocheux (18)	Stations qualité de l'eau : mesure <i>in situ</i>	Stations qualité de l'eau : prélèvement	Champs électromagnétiques
05/04/2022	N01 à N07	N01 / N03 / N04				
9/05 au 10/05/2022			N10 / N04 ter / IS23	N10 / N04 ter / IS23		
30/05 au 3/06/2022			N43/ N30/ IS22/ N21/ IS16/ N23/ IS12/ N22/ N08	IS22/ IS16/ N23/ IS12/ N05/ N01	N01 et IS07	
21/06 au 23/06/2022			NX2/ N16/ N35/ IS03/ IS07/ N41	N41/ Nx2/ N35/ N16/ IS07/ IS03		
02/02/2023						Survey PASSEM
03/02/2023	N01 à N07					
22/05 au 25/05/2023			N23 / N22 / N08 / N35 / N16 / IS 16 / N41			
31/05 au 02/06/2023			N30 / IS03 / N21 / IS22 / N10			
07/06 au 09/06/2023			NX2 / IS23 / N43 / IS12 / N04 ter / IS07			
14/06/2023						Pose STATEM
20/06/2023						Relève STATEM

Tableau 2 : Calendrier des campagnes d'intervention entre 2022 et 2023

## 3. CHAMPS ELECTROMAGNETIQUE (SE9 / 2023) – PASSEM (MAPPEM)

Cette partie a été traitée par Mappem Geophysics.

### 3.1. GENERALITES

L'objectif de ces mesures est d'estimer le niveau des champs électromagnétiques dans la zone d'un futur parc éolien, avant l'installation des machines et des câbles. Il s'agit donc de mesurer le bruit de fond électromagnétique présent dans la zone pour évaluer à terme les variations des champs électromagnétiques induits par le fonctionnement des turbines et le transport de l'électricité vers la terre.

Il est anticipé un environnement électromagnétique calme dans la zone. La zone d'étude est en effet assez éloignée du littoral, à environ 15 km. La mesure d'un signal ayant une fréquence centrale de 50 Hz est tout de même attendu (signal émis par les installations électriques), ainsi que ses harmoniques. Aucune installation anthropique n'a été relevée sur le site d'étude, limitant également la présence éventuelle de signaux artificiels.

Le site de la campagne a été quadrillé selon un plan prévisionnel de positions d'une longueur totale de 32 km (Figure 8), **et les levés ont été réalisés le 02/02/2023.**

Les lignes sont orientées afin d'optimiser la mesure des signaux, notamment vis-à-vis de la bathymétrie et des courants principaux.

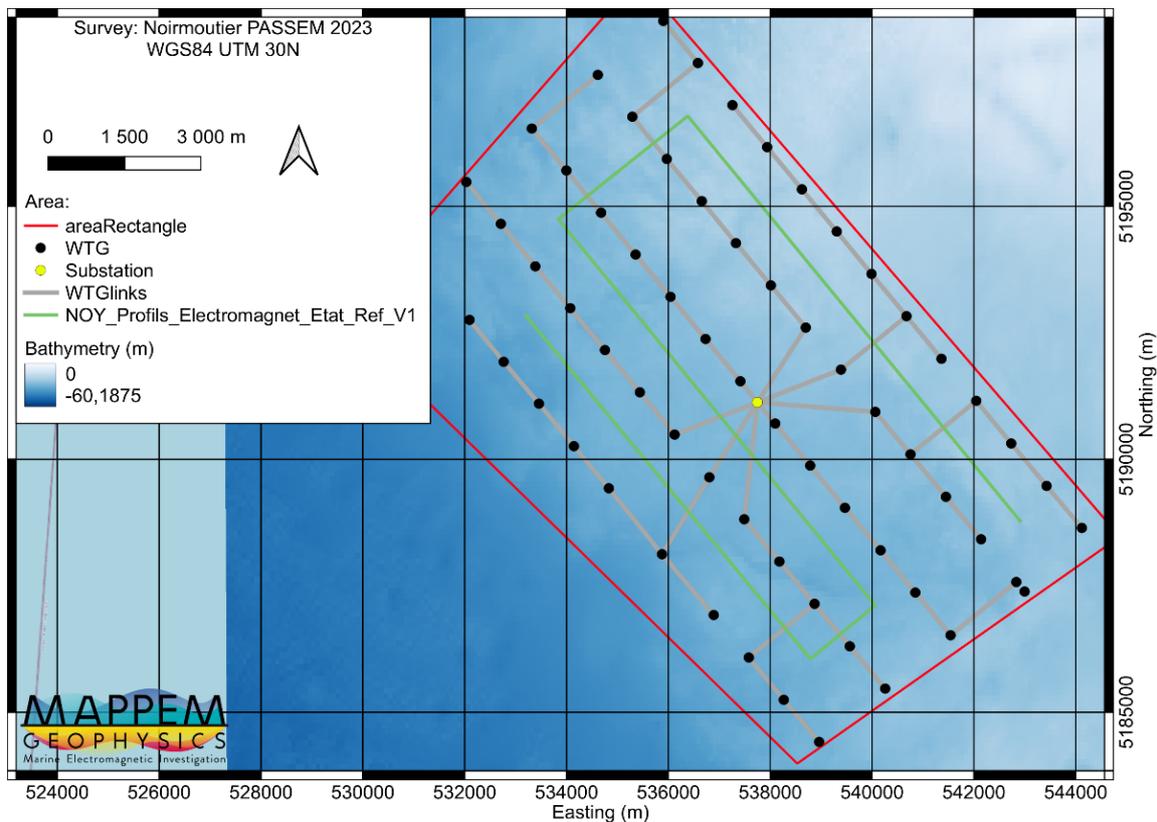


Figure 8. Plan de position prévisionnel de la campagne de mesure.

## 3.2. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES

### 3.2.1. Equipement utilisé

#### 3.2.1.1. Système PASSEM

##### ✓ Le principe

Le système PASSEM est un système de mesure passive des champs électromagnétiques, tracté derrière un navire dans la colonne d'eau (Figure 9). Le dispositif est basé sur le système MAPPEM, dispositif électromagnétique actif injectant un courant électrique dans le milieu pour mesurer les champs électromagnétiques induits par les matériaux du sous-sol marin et ainsi en déduire leur nature. Dans le cas du PASSEM, l'injection est désactivée et l'instrument mesure les champs électromagnétiques ambiants. Les mesures sont réalisées à la fréquence de 2000 Hz.

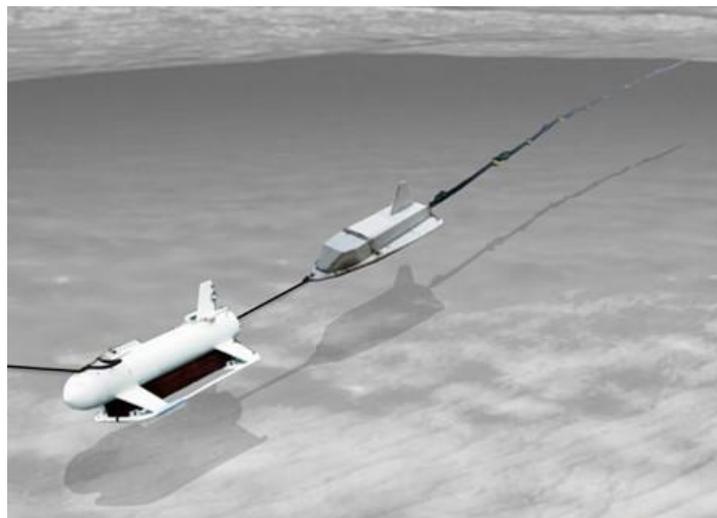


Figure 9. Système PASSEM

##### ✓ Description du système

Le système PASSEM (Figure 10) se compose d'un poisson principal (1,5 m de long, 20 cm de diamètre) comportant l'électronique d'acquisition, un poisson secondaire comportant la seconde électrode d'injection (inactive), ainsi qu'un câble de réception comportant 20 électrodes de mesure. Sur ces 20 électrodes, huit sont utilisées (Figure 10) pour mesurer les champs électriques ambiants en formant quatre dipôles de longueurs différentes (par exemple 2x4 m et 2x24 m de long).

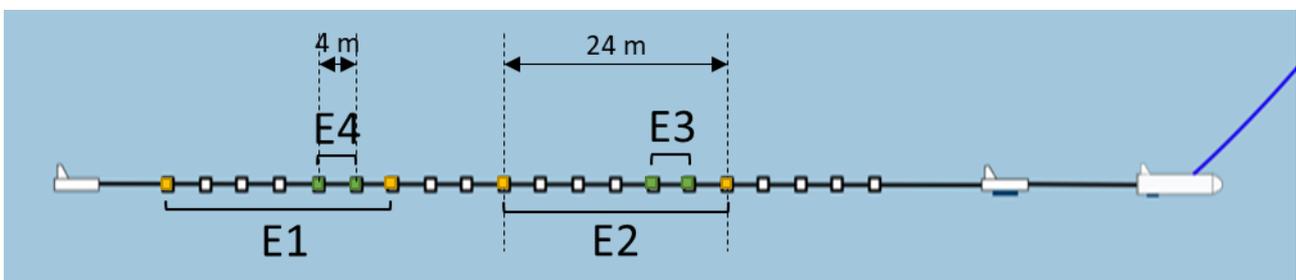


Figure 10. Exemple de configuration possible du système PASSEM avec un câble de 4 m de distance entre les électrodes. Les quatre dipôles de mesure passive sont indiqués en jaune et vert.

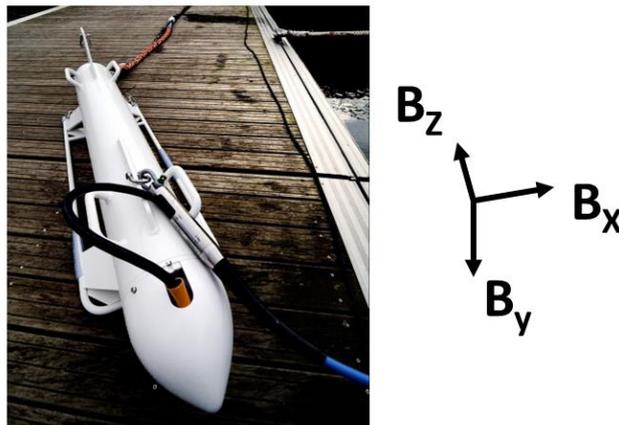
Le poisson principal est également équipé d'un magnétomètre Fluxgate (Bartington Mag-03 bas bruit) mesurant le champ magnétique sur les trois axes, ainsi que des capteurs d'attitude nécessaires au positionnement du système sous l'eau (profondimètre, altimètre). Le système peut utiliser

différentes configurations de dipôles selon les besoins. Les dipôles les plus longs capteront des signaux éloignés (éventuellement plus faibles), tandis que les dipôles les plus courts donneront une meilleure résolution spatiale des mesures. Les champs électriques sont mesurés grâce à des électrodes non polarisables AgCl et des préamplificateurs dédiés à forts gains. Une unité de puissance est installée dans le laboratoire sec du navire pour alimenter le système en énergie.

Les signaux sont enregistrés avec une grande précision : résolution sur 24 bits, niveaux de bruits inférieurs aux signaux ambiants : Bruit magnétomètre  $<10\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , Bruit amplificateurs  $<10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

#### ✓ Le Magnétomètre

Le magnétomètre est intégré à l'intérieur du poisson principal. L'instrument est orienté tel que présenté sur la Figure 2 4. Dans le référentiel du PASSEM, le champ «  $B_x$  » est orienté sur bâbord, le champ «  $B_y$  » vers le bas et le champ «  $B_z$  » vers l'arrière.



#### ✓ Mobilisation de l'équipement

Le matériel est mis en place sur le pont du navire. Les équipements sont ensuite installés et connectés entre eux avec une vérification systématique de leur bon fonctionnement. Deux ingénieurs de MAPPEM Geophysics réalisent cette mise en place, aidés de l'équipage pour les manutentions, la mise à l'eau et la récupération du système si besoin. Aucune procédure de calibration spécifique n'est nécessaire, les calibrations ayant été réalisées en laboratoire pour les différents capteurs.

#### ✓ Déploiement et récupération

Le déploiement et la récupération sont assurés par le treuil électrique et le câble électro-porteur connecté au système (Figure 12). Une poulie compteuse (Figure 12) est mise en place sur une grue ou un portique équipant le bateau. Les manœuvres de mise à l'eau et de récupération sont réalisables par deux personnes et le câble capteur est déployé manuellement.

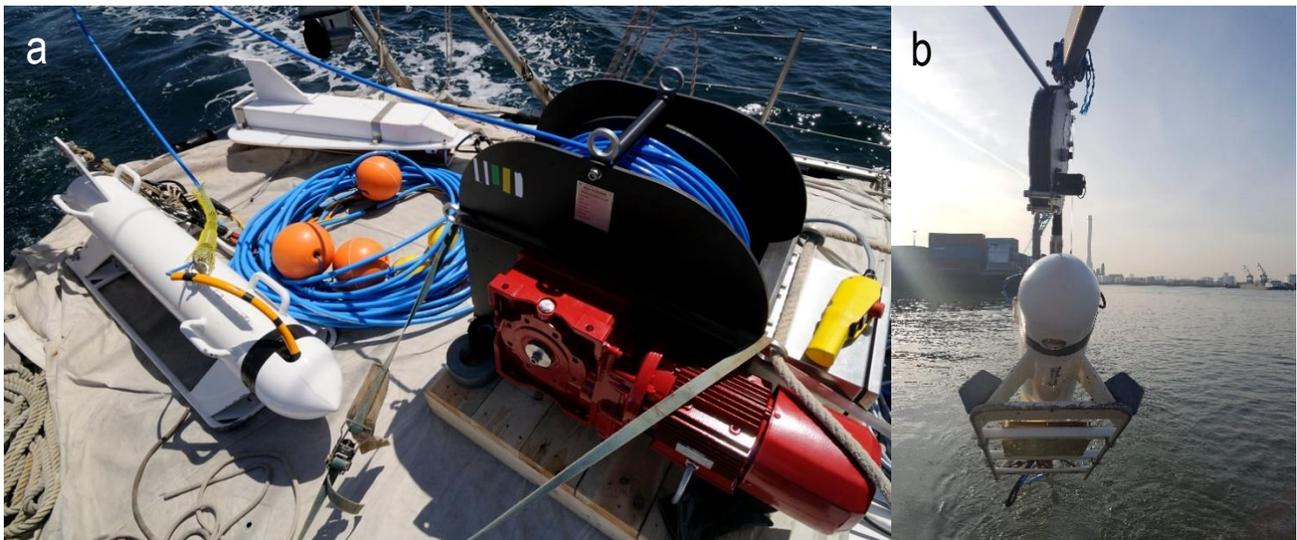


Figure 12. (a) Système PASSEM. Le câble de traction (en bleu) est enroulé sur le treuil électrique au premier plan. (b) Déploiement du système à l'aide de la poulie

✓ Déroulement de l'acquisition

Le système est tracté derrière le navire à une vitesse d'environ 2 à 4 nœuds. Le câble électro-porteur permet le transfert des données enregistrées à l'ordinateur de survey en temps réel. L'acquisition est contrôlée en permanence grâce à une interface de contrôle et de visualisation des données enregistrées (Figure 13). Les mesures de potentiels sont complétées par les informations sur la navigation (position GPS, profondeur, altimètre, compas, capteurs d'attitude...). Lors de l'acquisition, la longueur de câble filée est enregistrée afin de pouvoir recalculer la position du dispositif au fond lors du traitement.

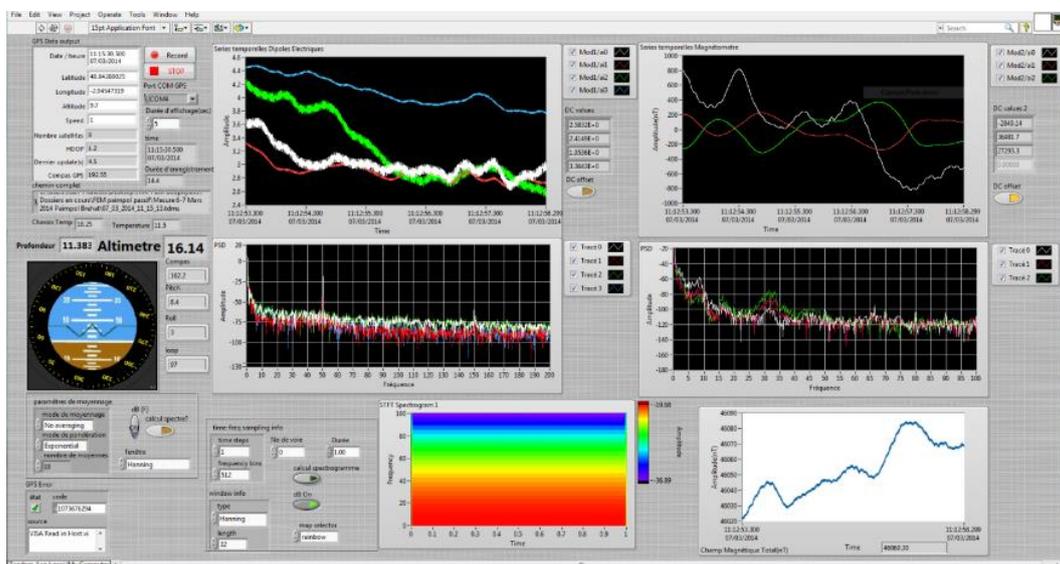


Figure 13. Interface d'acquisition permettant le contrôle en temps réel des données enregistrées

3.2.1.2. Positionnement et données de navigation

Le positionnement du navire est enregistré par l'intermédiaire d'un récepteur DGPS Hemisphere R110 pour atteindre une précision de positionnement inférieure à 1 m. Avant l'acquisition, le positionnement fourni par le récepteur GPS est vérifié par comparaison avec le positionnement du GPS du bateau. La position du système de mesure sous l'eau est obtenue par un calcul de type « Layback », en utilisant les distances mesurées à bord entre l'antenne GPS et le portique de déploiement, puis en estimant la déformée du câble et en intégrant les données de position fournies par les capteurs de navigation du système (altitude, profondeur d'immersion). Le système est

déployé avec une poulie compteuse qui mesure en temps réel la longueur de câble déployée et enregistre la valeur horodatée avec le reste des données.

### 3.2.1.3. Sonde CTD

Une sonde CTD (Conductivity Temperature Depth) est déployée deux fois (en début et en fin de chaque journée d'acquisition) afin de mesurer la conductivité de la colonne d'eau, laquelle est susceptible d'influencer les signaux mesurés. La sonde CTD est une sonde CastAway® (Figure 14), qui réalise des mesures tous les 30 cm environ.



Figure 14. Sonde CTD utilisée pendant le survey

## 3.2.2. Paramètres d'acquisition

- Configuration des dipôles électriques

Quatre dipôles de mesure sont utilisés, de dimensions différentes (Tableau 3).

Tableau 3. Configuration du dispositif de mesure.

Dipôle	Longueur [m]	Indice de la 1 <sup>ère</sup> électrode	Indice de la 2 <sup>nde</sup> électrode
E1	19	1	20
E2	17	2	19
E3	4	5	9
E4	4	13	17

- Paramètres géodésiques

Toutes les coordonnées géographiques et projetées, sauf indication contraire, sont basées sur le système de référence WGS84. Les données projetées sont exprimées en projection UTM30N.

- Référence verticale

La référence verticale est le niveau moyen des plus basses mers astronomiques (zéro hydrographique), indiqué par l'abréviation LAT (Low Astronomic Tide). Une correction de marée est appliquée sur les données après traitement.

- Référence temporelle

Toutes les données enregistrées et les métadonnées attenantes sont indiquées en UTC.

## 3.2.3. Mise en place du matériel

- Mobilisation

La mobilisation du système PASSEM est une manœuvre relativement rapide. Elle consiste essentiellement en l'installation et la sécurisation du treuil sur le pont arrière, ainsi que l'installation et le test de tous les équipements électroniques avant le début des mesures (Figure 15 a). L'ensemble de la mobilisation nécessite quelques heures. Tous les équipements sont placés sur le pont de manière à être directement opérationnels (Figure 15 b).



Figure 15. (a) Photographie du treuil. (b) Photographie du treuil et de la poulie avec le système à la mer. (c) Photographie du poste d'acquisition

- Configuration du pont

Pour cette campagne de mesure, le bateau est équipé d'une grue sur l'avant (Figure 15 b). L'antenne GPS est positionnée sur le toit du bateau pour une réception optimale. Le schéma du pont arrière du navire indique la configuration du pont ainsi que les distances respectives entre les différents équipements (Figure 16) pour le recalcul du positionnement du dispositif de mesure. Le Reborn utilisé pour cette campagne de mesure a une configuration peu habituelle pour ce type de mesure, avec une implantation « inversée » de type barge, ce qui nécessite de déployer le système par le côté du navire.

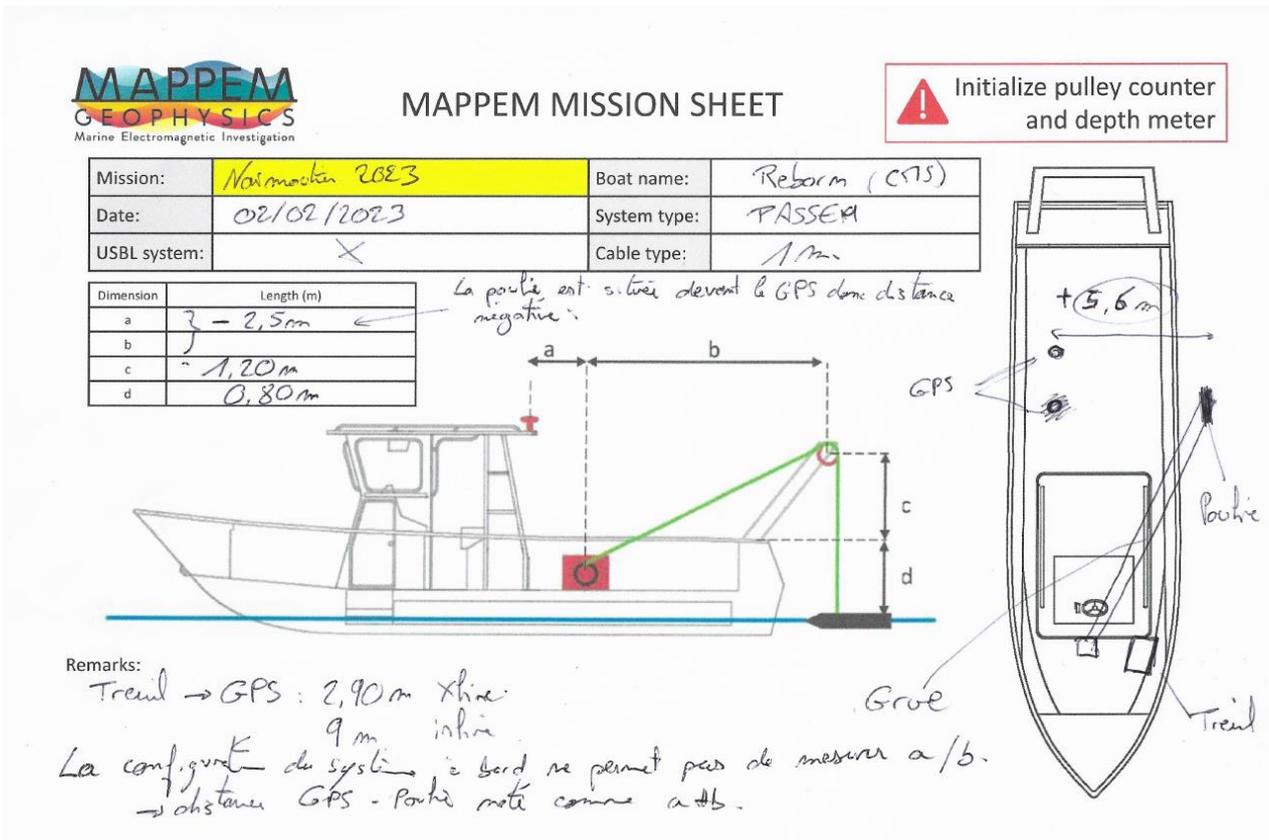


Figure 16. Schéma de la disposition du pont du navire.

- Vérifications avant survey

L'équipement PASSEM ne nécessite pas de calibrations spécifiques avant l'acquisition. Les calibrations et vérifications sont réalisées dans les locaux de MAPPEM Geophysics avant l'acheminement du matériel sur le lieu de la campagne de mesure. Cependant, tous les appareils sont vérifiés une fois la mobilisation terminée :

- o Manœuvres du treuil (sur le pont, sans charge)
- o Positionnement GPS
- o Communication et enregistrement

### 3.2.4. Remarques générales sur la campagne

La mobilisation du matériel a été effectuée le 01/02/2023 : chargement du matériel, montage, sécurisation. **La campagne de mesures a eu lieu le 02/02/2023.**

L'acquisition des données PASSEM sur la zone de Noirmoutier s'est globalement bien déroulée. Le PASSEM a acquis l'ensemble des données électriques et magnétiques prévues.

Un point géographique mal enregistré sur le système de navigation du navire implique que le premier profil est légèrement en diagonale par rapport à sa position théorique sans que cela n'impacte la validité des mesures.

Les filets de pêches annoncés sur la zone ont finalement été déplacés et n'ont pas impacté la tenue des mesures.

### 3.2.5. Lignes enregistrées

- Règles de nomenclature

Chaque ligne est désignée par son nom à l'enregistrement.

La nomenclature du nom d'enregistrement suit le schéma suivant : AAAA-MM-JJTHH-MM-SS.

Avec :

- JJ *journée d'enregistrement de la ligne*
- MM *mois d'enregistrement de la ligne*
- AAAA *année d'enregistrement de la ligne*
- HH *heure de début d'enregistrement de la ligne*
- MM *minute de début d'enregistrement de la ligne*
- SS *seconde de début d'enregistrement de la ligne*

- Détail des lignes

Un total de 5 lignes a été enregistré durant la campagne (Figure 17). Les détails sont donnés dans le Tableau 4.

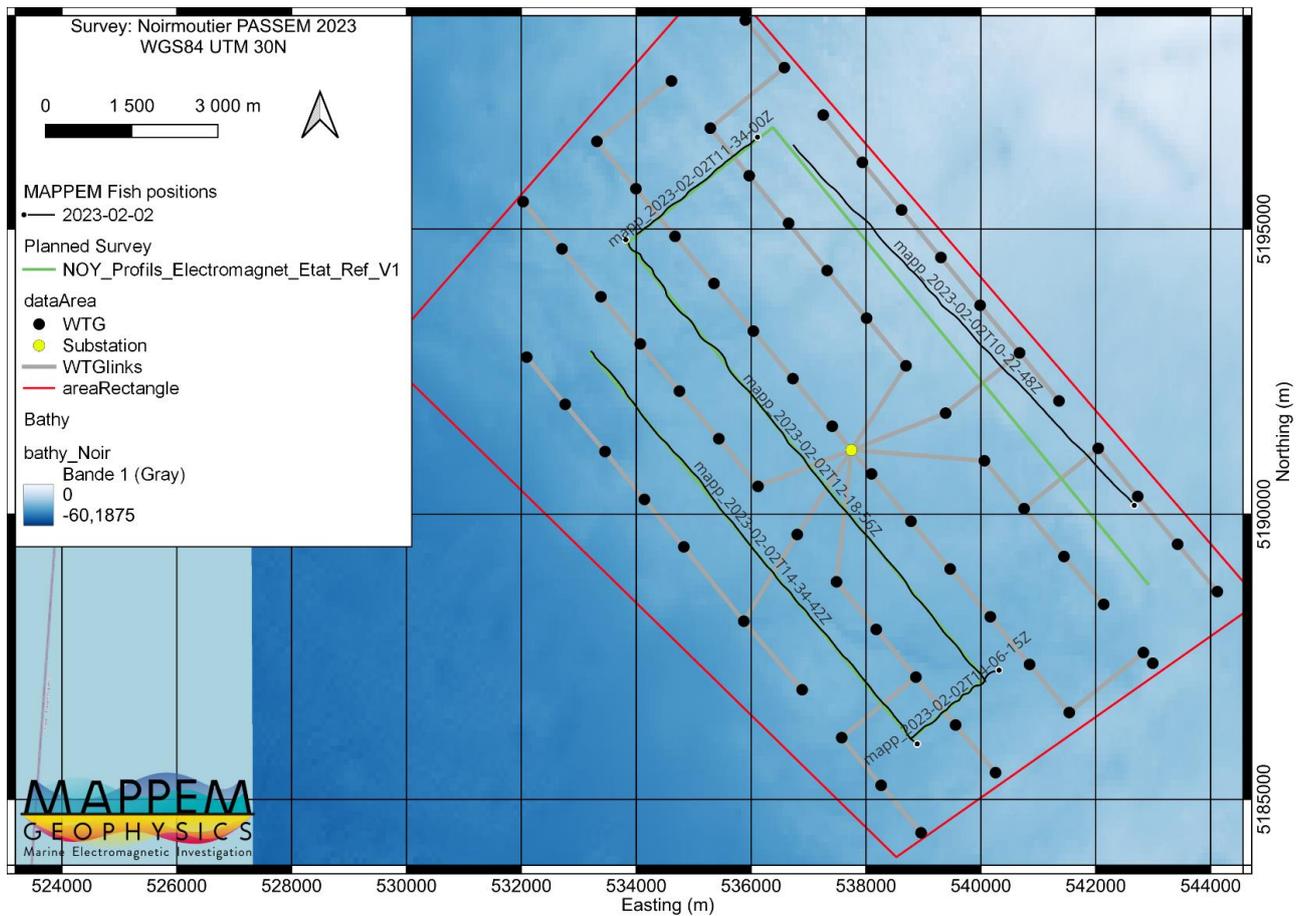


Figure 17. Lignes enregistrées

Tableau 4. Détail des lignes enregistrées.

Nom d'enregistrement	Longueur [m]	Altitude moyenne du système au-dessus du fond [m]
2023-02-02T10-22-48Z	8734	8
2023-02-02T11-34-00Z	2743	11
2023-02-02T12-18-56Z	10175	9
2023-02-02T14-06-15Z	2042	12
2023-02-02T14-34-42Z	9050	13.5

### 3.2.6. Sondages CTD

Les sondages CTD fournissent une information auxiliaire non indispensable à la bonne tenue de l'acquisition des données et à leur traitement. Un sondage CTD est effectué dans la mesure du possible une fois par jour afin de connaître les principales propriétés de l'eau (conductivité, température, ...)

Tableau 5. Détail sur les sondages CTD réalisés (degrés décimaux).

Numéro de sondage	Date	Heure UTC	Latitude	Longitude
01	2023/02/02	09:08:22	46.8562874	-2.4302165
02	2023/02/02	15:56:36	46.8918350	-2.5693811

### 3.2.7. Traitement des données

Au cours de la mission d'acquisition, différents types de données sont enregistrés :

- Positionnement et synchronisation GNSS,
- Mesures de champs électriques,
- Mesures de champs magnétiques,
- Capteurs de navigation dont la longueur de câble déployée
- Salinité.

Une séquence de pré-traitement spécifique a été développée pour permettre un contrôle qualité en temps réel des données à bord du navire. Le traitement final des données est réalisé après le levé par MAPPEM Geophysics. Le traitement des données PASSEM implique de traiter chaque ensemble de données séparément avant de les fusionner en tant qu'ensemble de données finales interprétable.

Le processus de traitement commence par le positionnement, puis le traitement des signaux pour leur analyse ultérieure.

#### ➤ **Données de positionnement**

- Données GNSS

Le traitement des données GNSS suit un *workflow* de traitement classique de filtrage des positions de longitude et de latitude. L'horloge GNSS est également vérifiée pour assurer un bon enregistrement.

- Longueur de câble

Les données de la poulie compteuse sont traitées pour calculer la longueur réelle du câble de remorquage déployé.

- Données d'attitude du poisson

Les données d'attitude des poissons sont traitées selon un processus classique. La principale donnée utilisée pour le positionnement est la profondeur du poisson principal PASSEM. Les données de positionnement sont également corrigées à partir de paramètres environnementaux (par exemple, correction d'altitude en fonction de la vitesse locale de l'eau de mer).

- Positionnement par rétroprojection (layback)

La position du poisson principal est calculée à l'aide de la méthode de rétroprojection (layback). Le calcul basé sur les données du GNSS, la poulie compteuse, la profondeur principale du poisson et la disposition des instruments sur le pont du bateau. On estime que le poisson principal est aligné avec le bateau et le câble de remorquage est supposé suivre une ligne droite.

L'incertitude sur la localisation de l'instrument est composée de plusieurs éléments :

- Incertitude de positionnement absolu (GNSS) (< 1 m),
- Poulie compteuse (< 1 m),
- Calcul du layback (fonction de la longueur du câble, à la fois le long de la ligne de survey et perpendiculairement),
- Courant marin (difficile à estimer).

La position du poisson principal est ensuite rétroprojetée pour calculer la position de chaque électrode de mesure.

L'estimation de la position absolue des mesures est ainsi estimée à quelques mètres, ce qui est suffisant pour l'estimation globale des champs électromagnétiques dans la zone du parc.

➤ **Données électromagnétiques**

Le traitement des données électromagnétiques suit une série de traitement qui a été développée en interne par MAPPEM Geophysics. Le workflow est soigneusement adapté à la configuration du système et aux spécificités liées à l'acquisition des données pour améliorer la qualité des données. Les jeux de données nécessaires à l'interprétation des données PASSEM sont générés sous différents formats pour permettre un traitement rapide à l'aide des différents outils développés par MAPPEM Geophysics.

Les données électriques sont corrigées des longueurs des dipôles afin d'obtenir des niveaux de signal comparables. Les données électriques peuvent être affichées temporellement ou en densité spectrale de puissance. Le calcul de la densité spectrale de puissance est effectué en utilisant la méthode de Welch (1967). La méthode est basée sur l'estimation du spectre du périodogramme. Cette méthode permet de réduire le bruit du spectre.

### 3.3. RESULTATS

Il est important de rappeler que cette campagne de mesure est une mesure « d'état zéro » électromagnétique de la zone. Celle-ci étant vierge de toute infrastructure, il n'est pas attendu de détecter des signaux particuliers, hors des signaux naturels (houle, variations naturelles des champs électromagnétiques) et de quelques signaux terrestres détectables en mer (essentiellement ayant pour origine le réseau électrique).

#### 3.3.1. Exemples de données acquises

Comme attendu, aucun signal particulier n'a été repéré. Les résultats de ces mesures et analyses sont présentés dans la partie suivante. Nous présentons les données enregistrées pour certaines lignes acquises. L'analyse spectrale est effectuée dans la partie suivante, avec une analyse des signaux identifiables.

Les noms des lignes et leurs positions sont indiqués en Figure 2 10.

- Ligne 2023-02-02T14-34-42Z

Les données brutes électriques et magnétiques pour la ligne 2023-02-02T14-34-42Z montrent très peu de variation du signal le long de la ligne. Les plus grosses oscillations (Figure 18) sont essentiellement dues aux mouvements de houle (houle longue océanique à une fréquence de l'ordre de 10 secondes). Ceci est visible sur le spectre (Figure 19). Les spectres montrent aussi quelques signaux typiques du réseau électrique (à la fois en provenance de la terre, mais aussi des générateurs du navire tracteur).

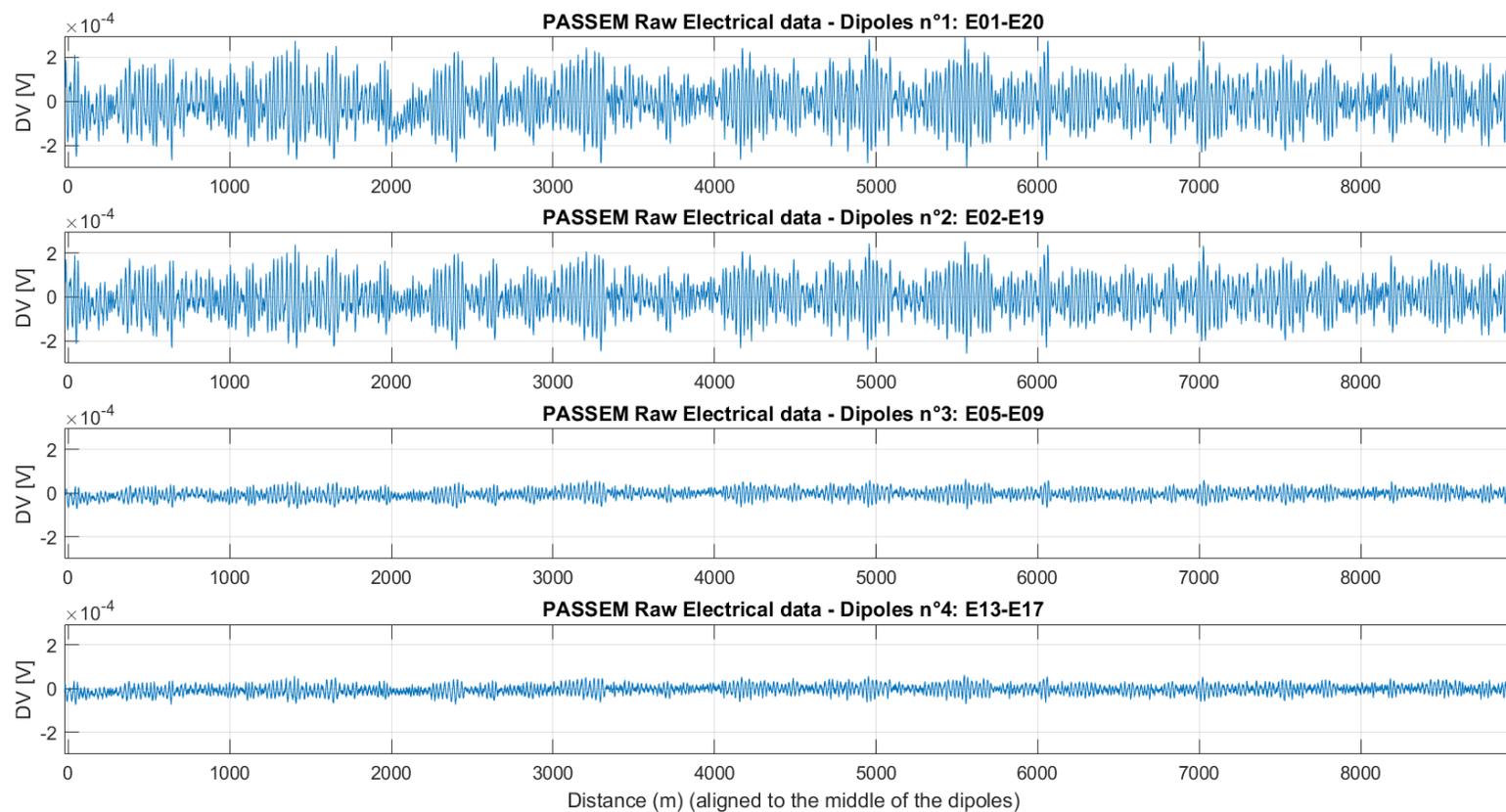


Figure 18. Données électriques pour la ligne 2023-02-02T14-34-42Z. De haut en bas : dipôles électriques de 1 à 4 (les valeurs ne sont pas corrigées des longueurs des dipôles)

Line: 2023-02-02T14-34-42Z

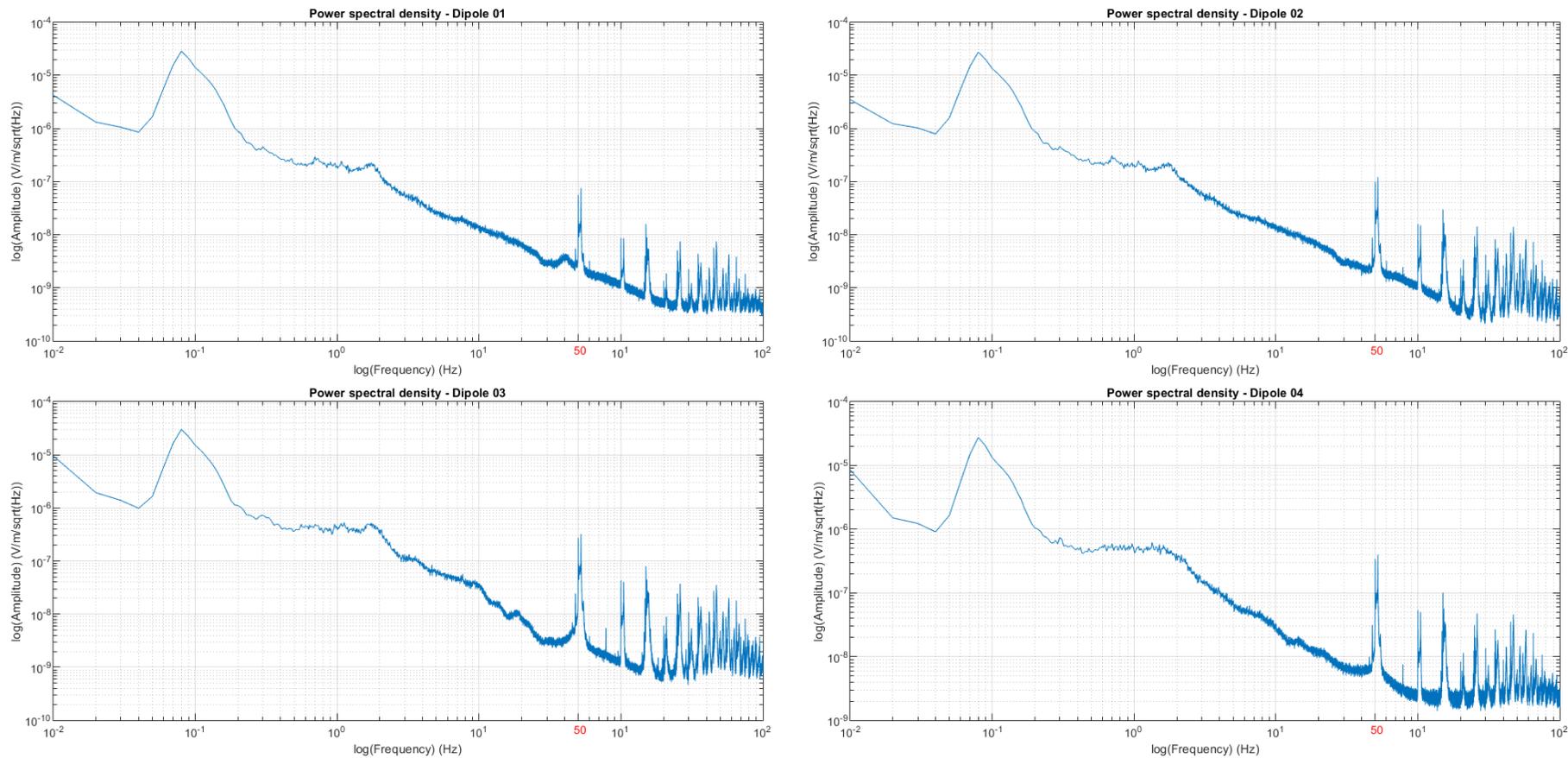


Figure 19. Spectrogramme des données électrique pour la ligne 2023-02-02T14-34-42Z pour chacun des dipôles.

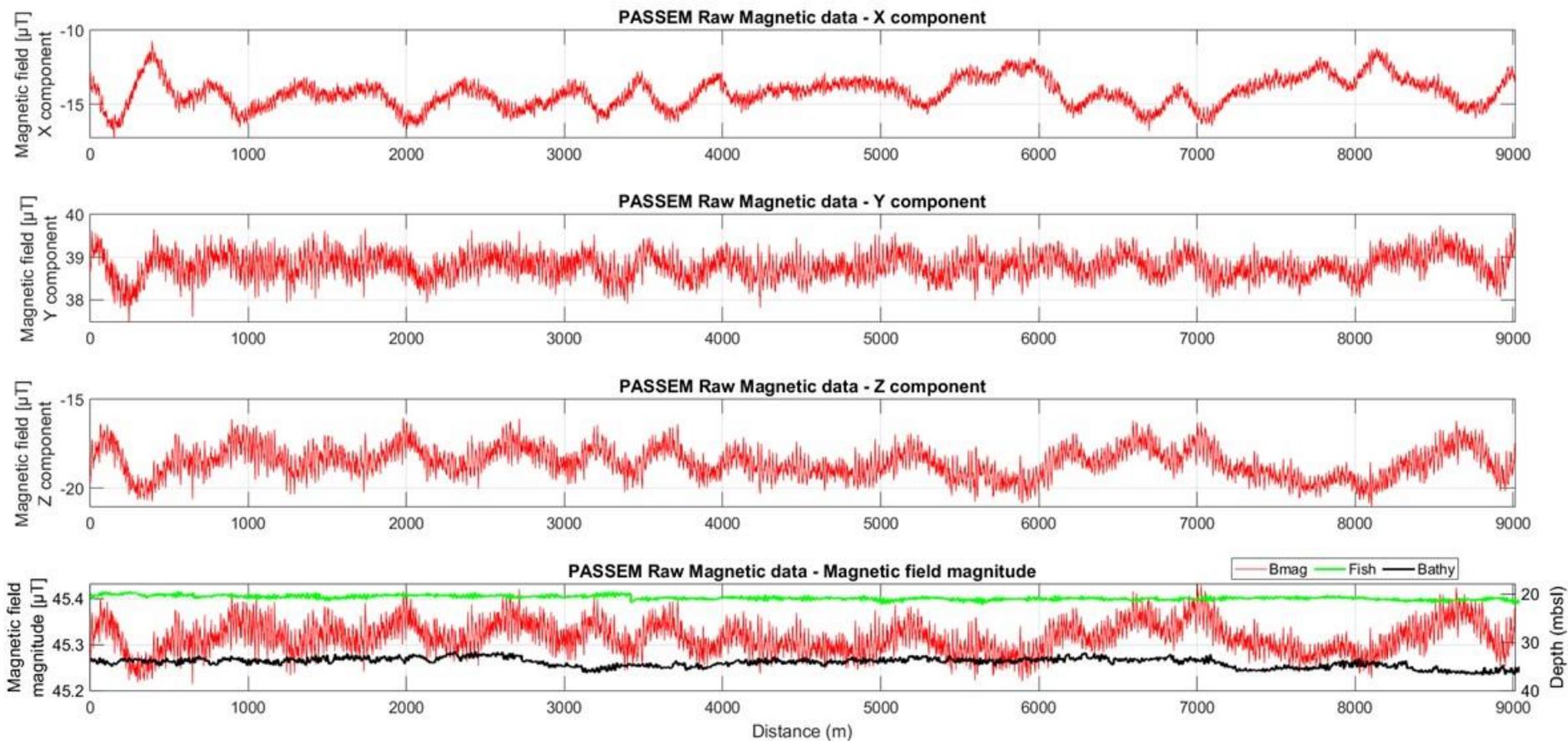


Figure 20. Données magnétiques pour la ligne 2023-02-02T14-34-42Z. De haut en bas : champ magnétique Bx, By, Bz. Dernière figure : champ magnétique total (rouge), bathymétrie (noir) et profondeur du poisson (vert).

- Ligne 2023-02-02T11-34-00Z

Les données brutes électriques et magnétiques pour la ligne 2023-02-02T11-34-00Z montrent très peu de variation du signal le long de la ligne. Un signal significatif est à relever vers la position X=250 m (distance parcourue depuis le début du profil) sur les données électriques et magnétiques. Ce signal est lié à la présence de l'épave du Dryskos dans la zone, coulé en 1917 (Figure 21 et Figure 23).

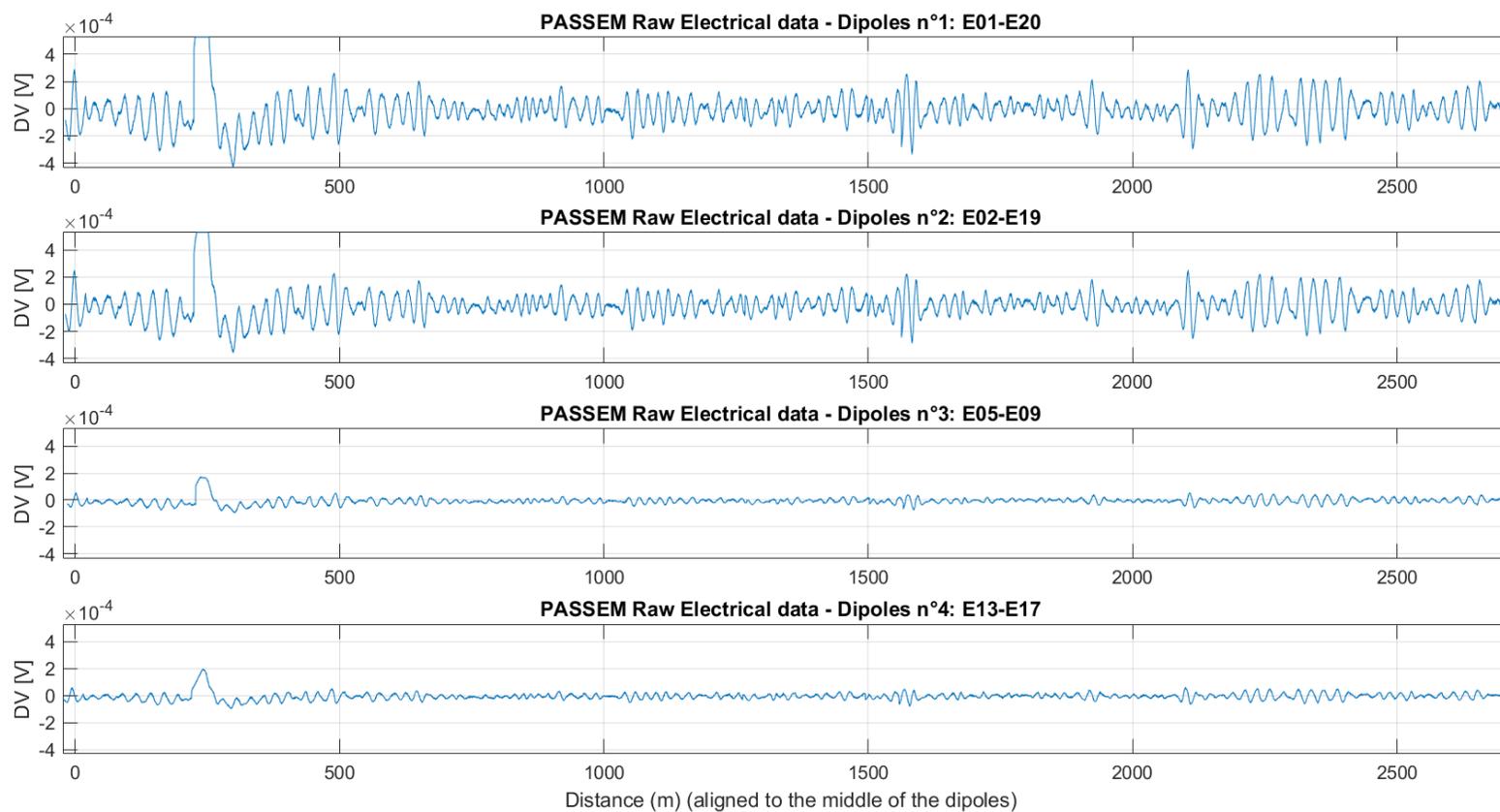


Figure 21. Données électriques pour la ligne 2023-02-02T11-34-00Z. De haut en bas : dipôles électriques de 1 à 4 (les valeurs ne sont pas corrigées des longueurs des dipôles).

Line: 2023-02-02T11-34-00Z

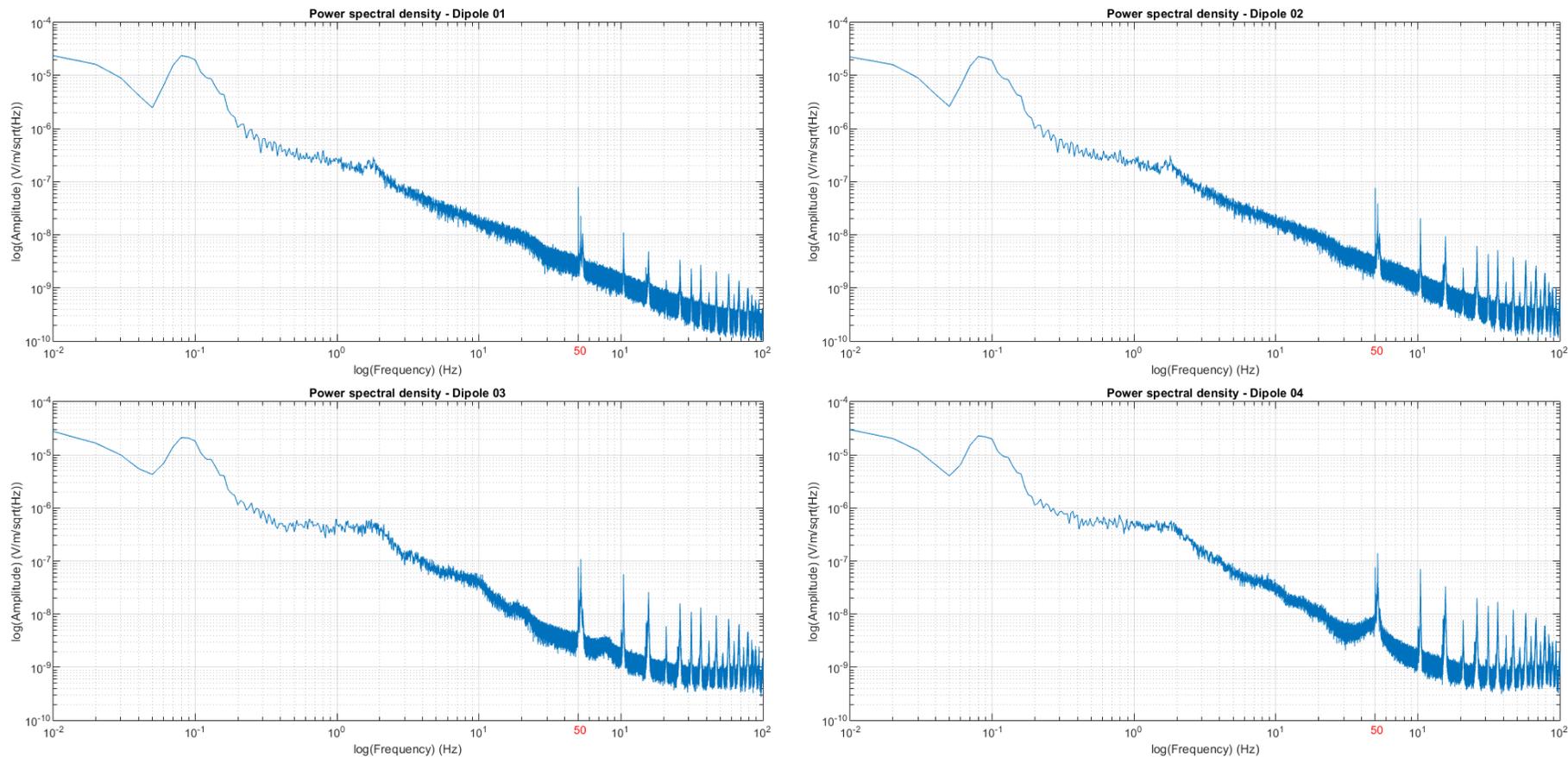


Figure 22. Spectrogramme des données électriques pour la ligne 2023-02-02T11-34-00Z pour chacun des dipôles.

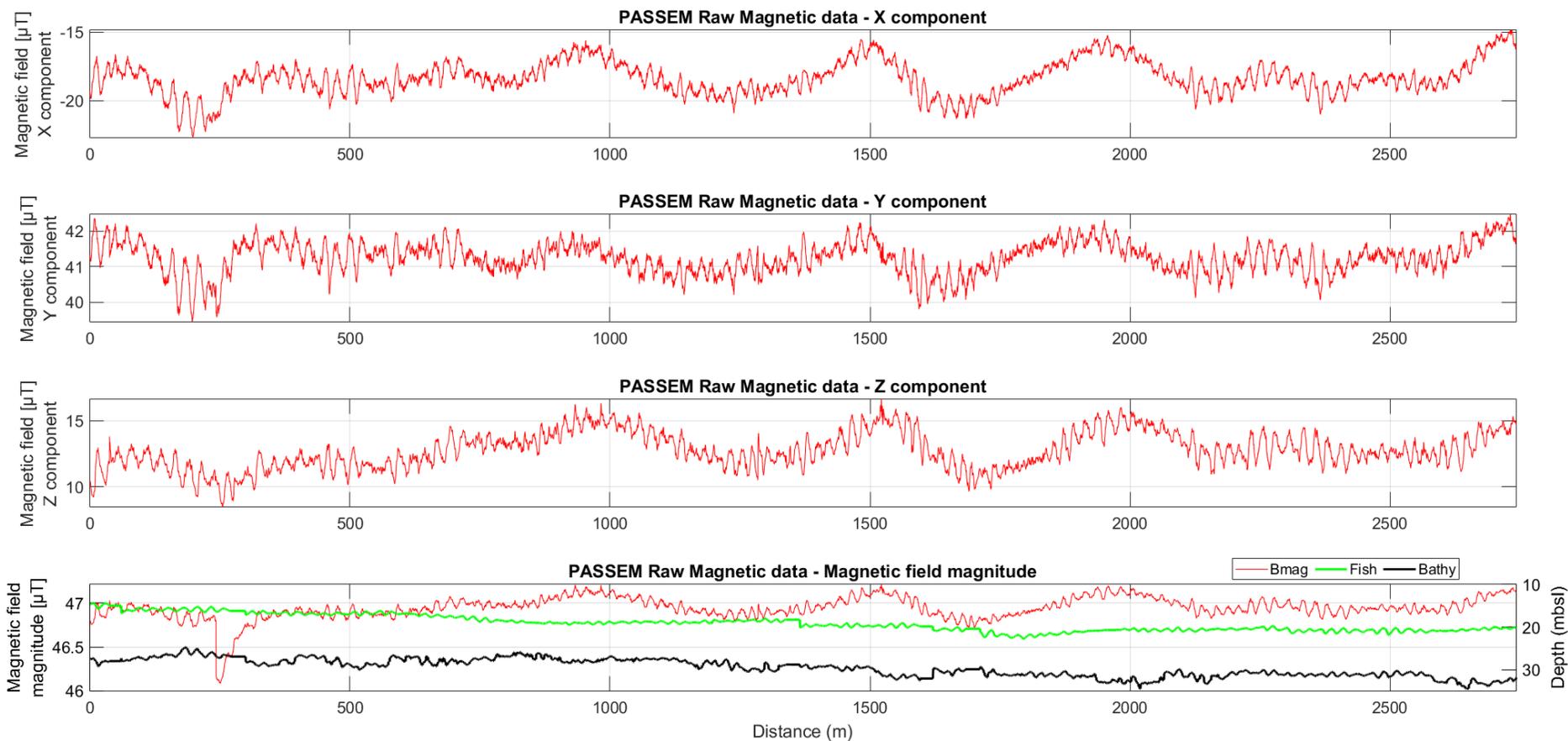


Figure 23. Données magnétiques pour la ligne 2023-02-02T11-34-00Z. De haut en bas : champ magnétique Bx, By, Bz. Dernière figure : champ magnétique total (rouge), bathymétrie (noir) et profondeur du poisson (vert).

### 3.3.2. Etude des données électriques

L'analyse des données électriques apporte d'avantage d'informations lorsqu'elles sont visualisées en spectre de fréquence. Cet affichage est privilégié pour la suite de l'étude.

- Signal anthropique : 50 Hz

#### ✓ Signal terrestre

Un signal fort, de fréquence fondamentale 50 Hz est quasi-systématiquement mesuré par le système PASSEM dans les environnements côtiers. Ce signal est le résultat des installations électriques présentes à terre ou en mer. La présence de ce signal est clairement visible en affichant le spectre en fréquence des mesures électriques du PASSEM (Figure 24). Les harmoniques de ce signal (100 Hz, 150 Hz, ...) ainsi que les harmoniques du signal lié au bateau sont bien visibles dans les données (Section 4.3.1.2).

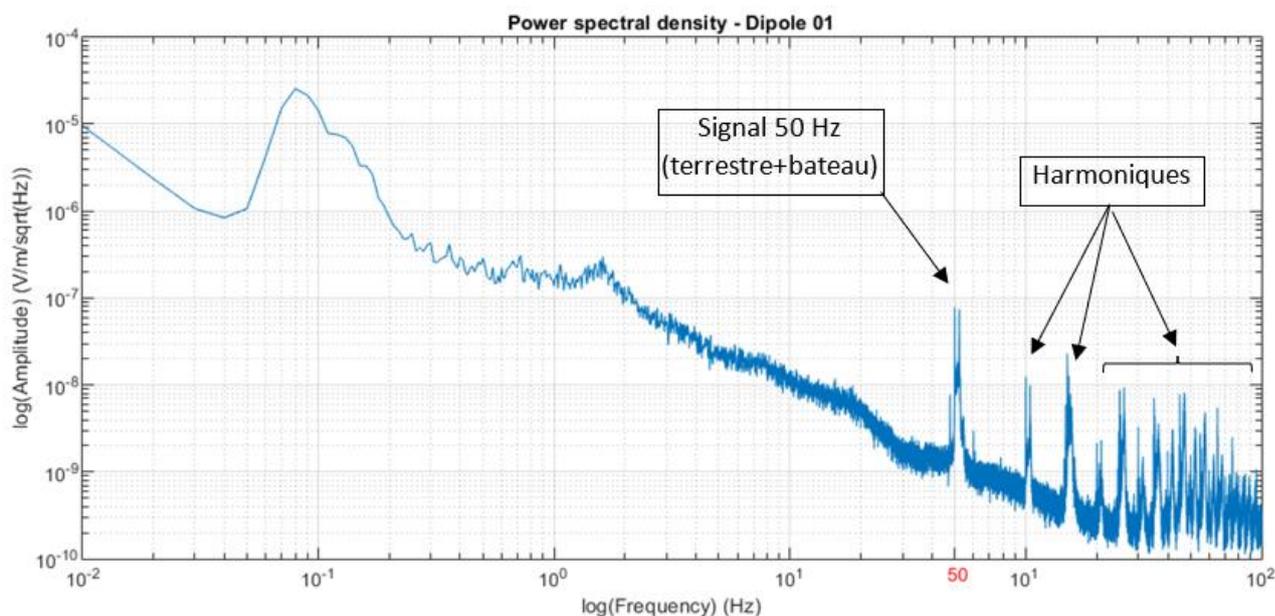


Figure 24. Spectre en fréquence pour le dipôle 3 de la ligne 2023-02-02T14-06-15Z. La fréquence 50 Hz est marquée en rouge.

#### ✓ Signal bateau

Un second signal ayant pour fréquence centrale 52.3 Hz (et harmoniques : 104.6 Hz, 156.9 Hz, ...) est également visible sur les données (Figure 25). Ce signal est moins étroit que le signal 50 Hz précédemment mentionné et plus épaté (Figure 25). Ce type de signal est généralement associé au groupe électrogène du bateau, en théorie réglé sur 50 Hz mais moins stable (variations de régime moteur en fonction de la charge).

Il est important de noter que ces signaux sont somme-toute faibles (de l'ordre de  $1\mu\text{V/m}$ ), mais que la sensibilité des systèmes de mesure permet de les mesurer. Un autre signal un peu plus bas en fréquence pourrait avoir pour origine un autre groupe électrogène présent sur le bateau.

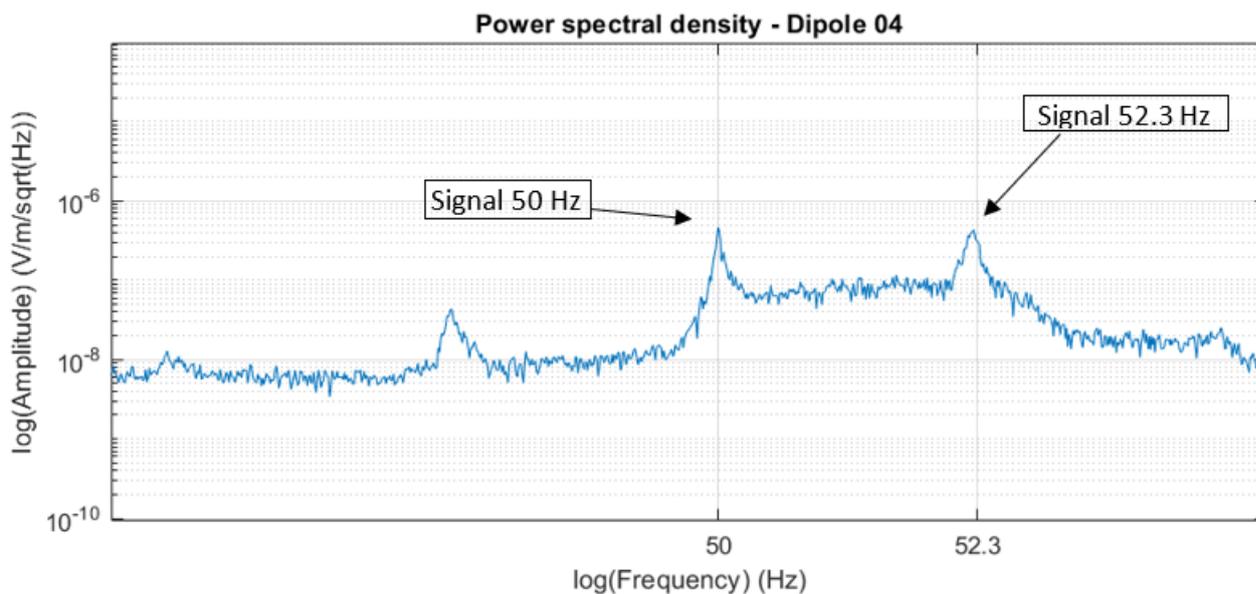


Figure 25. Spectre en fréquence des données électriques de la ligne 2023-02-02T14-06-15Z (dipôle 4), zoomé autour de la fréquence 50 Hz.

- Bruit lié à la houle

L'effet de la houle est observable sur les données électriques comme un signal de période de quelques secondes jusqu'à 15 ou 20 secondes pour les houles les plus longues, selon les conditions de mer lors de l'acquisition. Les conditions d'acquisition étaient clémentes lors de la mission mais un signal autour de 10 secondes est cependant visible. Ce signal correspond au mouvement de la masse d'eau dans le champ magnétique terrestre, et induit des signaux électriques.

### 3.3.3. Etude des données magnétiques

L'analyse des données mesurées par le magnétomètre permet de détecter la présence de différents signaux.

- Signal anthropique : 50 Hz

Lié signal lié aux activités humaines (et au bateau) avec pour fréquence fondamentale 50 Hz est également visible sur les données du magnétomètre.

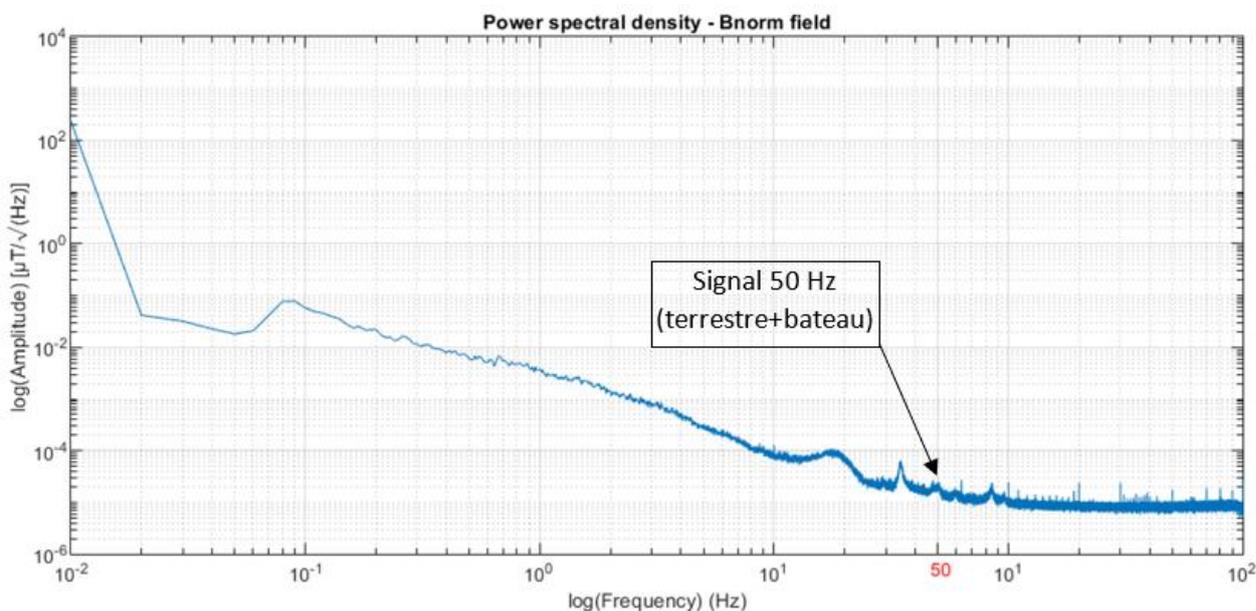


Figure 26. Spectre en fréquence pour le champ magnétique total mesuré pour la ligne 2023-02-02T10-22-48Z.

- Bruit lié à la houle

L'effet de la houle est moins visible sur les données magnétiques, mais est aussi présent à une fréquence similaire à celle observée sur les données électriques.

- Autres signaux

Un bruit faible ayant pour fréquence fondamentale 10 Hz (et harmoniques 20 Hz, 30, 40...) est visible sur les données du magnétomètre. L'origine de ce bruit est vraisemblablement liée aux signaux internes de l'instrument. L'altimètre du PASSEM, monté directement sur le poisson principal, pourrait en être la cause, celui-ci effectue des mesures toutes les 0,1 secondes. Ce capteur est indispensable à la navigation du dispositif.

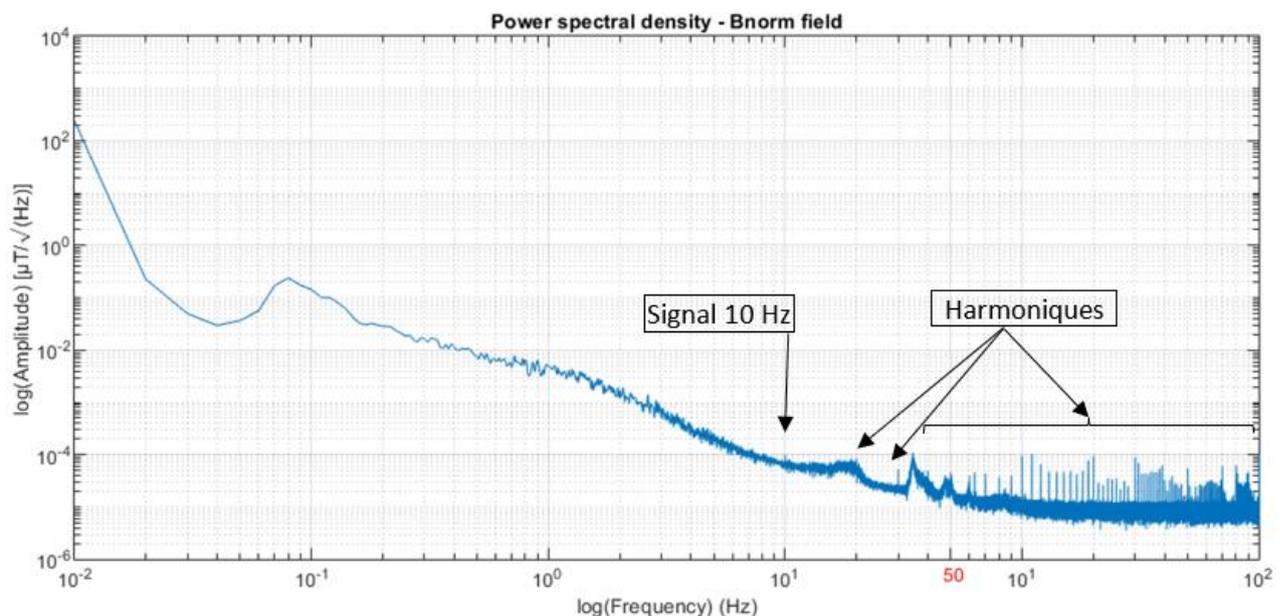


Figure 27. Spectre en fréquence pour le champ magnétique total mesuré pour la ligne 2023-02-02T14-06-15Z.

### 3.4. CONCLUSION

Cette campagne de mesure des champs électromagnétiques dans la zone du futur parc éolien marin de Noirmoutier, réalisée avec le système PASSEM, s'est déroulée du 01 au 02/02/2023.

L'objectif de la campagne est d'effectuer une mesure de référence de l'état zéro électromagnétique. L'analyse des données électriques et magnétiques enregistrées par le PASSEM sur la zone de Noirmoutier montre la présence de signaux cohérents avec une zone libre d'installations humaines, mais à proximité des côtes. L'analyse des deux jeux de données révèle la présence de signaux à la fréquence de 50 Hz (et harmoniques) générés au niveau de la côte par le réseau électrique ainsi que de deux signaux probablement liés aux générateurs électriques du bateau et détectés par l'instrument. Ces signaux sont faibles et de l'ordre de  $1\mu\text{V}/\text{m}$ . Par ailleurs, les signaux naturels sont également présents, comme les signaux liés à la houle (donc dépendant de l'état de la mer), ou une forme de spectre caractéristique des signaux géo-électriques (variations naturelles des champs électromagnétiques dont l'origine est le vent solaire). Globalement, les signaux sont un bruit de fond électromagnétique et il est normal de ne pas distinguer de signaux importants ou significatifs.

Après l'installation et la mise en production du parc éolien, une autre campagne de mesure est prévue sur les mêmes lignes de mesure. Cette campagne permettra de mesurer la

différence des champs électromagnétiques, donc la contribution des installations du parc (en particulier le passage du courant dans les câbles inter-éoliennes et le câble export).

## 4. CHAMPS ELECTROMAGNETIQUE (SE9 / 2023) – STATEM (MAPPEM)

Cette partie a été traitée par Mappem Geophysics.

### 4.1. GENERALITES

L'objectif est d'effectuer un état initial de l'environnement électromagnétique de la zone avant l'installation du parc éolien. Ces mesures sont effectuées par deux stations fixes de mesures électromagnétiques STATEM, développées par MAPPEM Geophysics. Le début des travaux étant prévu pour juillet 2023, il était important d'effectuer les mesures avant cette période.

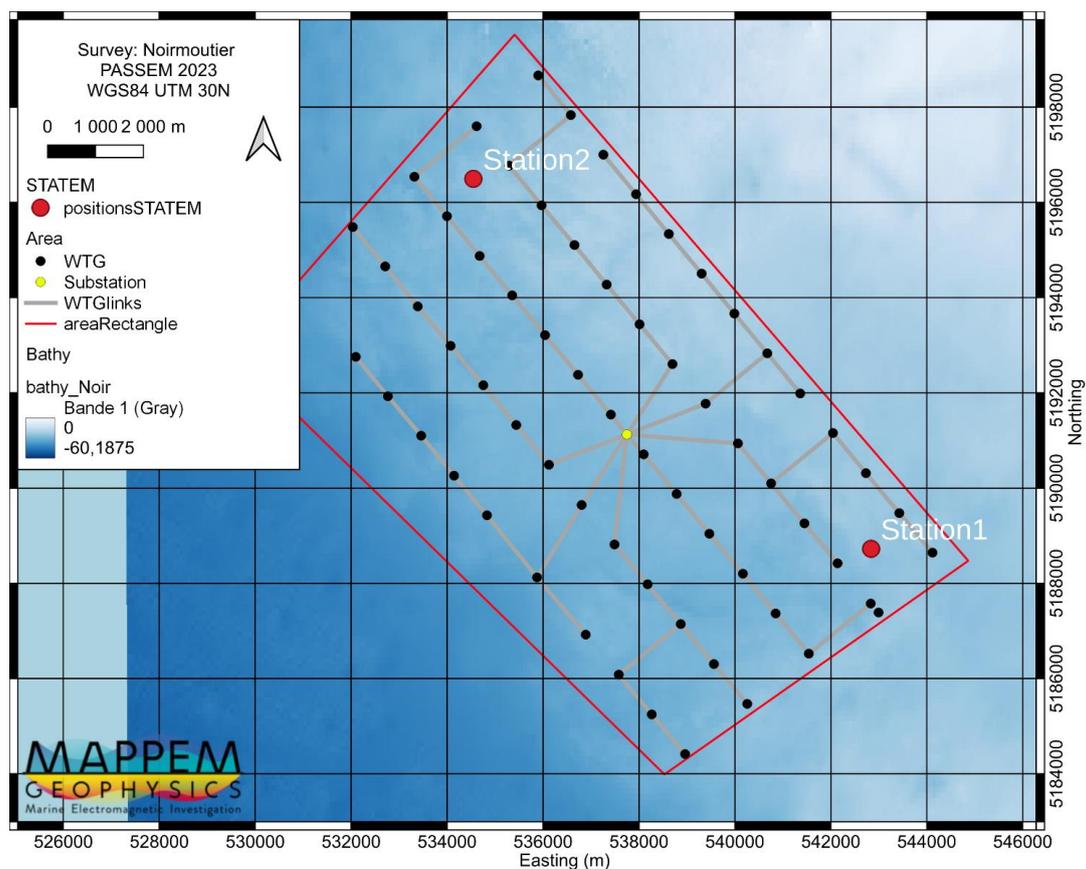


Figure 28. Zone d'étude.

Les deux stations STATEM, N31 et IS03, ont été posées par environ 25 m CM le 14/06/2023, et ont été relevées la semaine suivante le 20/06/2023.

## 4.2. ACQUISITION & TRAITEMENT DES DONNEES

### 4.2.1. Équipement utilisé

- L'instrument STATEM

#### ✓ Principes

Le système STATEM est un dispositif de fond de mer dédié à la mesure des champs électromagnétiques marins. Cette station est équipée d'un capteur magnétique vectoriel de 3 composantes et de deux dipôles électriques perpendiculaires horizontaux. De taille moyenne (environ 2 m x 2 m hors tout), le STATEM est équipé de capteurs électriques et magnétiques et enregistre jusqu'à 1 mois les 5 composantes à 512 Hz. Ces stations permettent d'observer l'évolution des champs électriques et magnétiques au cours du temps.



Figure 29. Un instrument STATEM configuré avec des dipôles électriques de 5 m.

#### ✓ Description du système

Une station STATEM se compose d'une plateforme de 1 m x 1 m servant de base à l'instrument. Sur cette plateforme sont montés :

- L'enceinte étanche abritant l'électronique du système et les batteries,
- Un magnétomètre *fluxgate* 3 axes
- Les électrodes disposées dans les 4 coins de l'instrument pour former 2 dipôles perpendiculaires horizontaux de longueur 2 m (ils peuvent être allongés pour certaines applications).
- Les lests en béton pour maintenir la station au fond. Les tests sont récupérés en même temps que la station en fin d'acquisition (rien n'est laissé au fond).

La station enregistre le champ électrique selon deux composantes perpendiculaires et le champ magnétique selon les trois composantes. L'enregistrement des données s'effectue à 512 Hz.

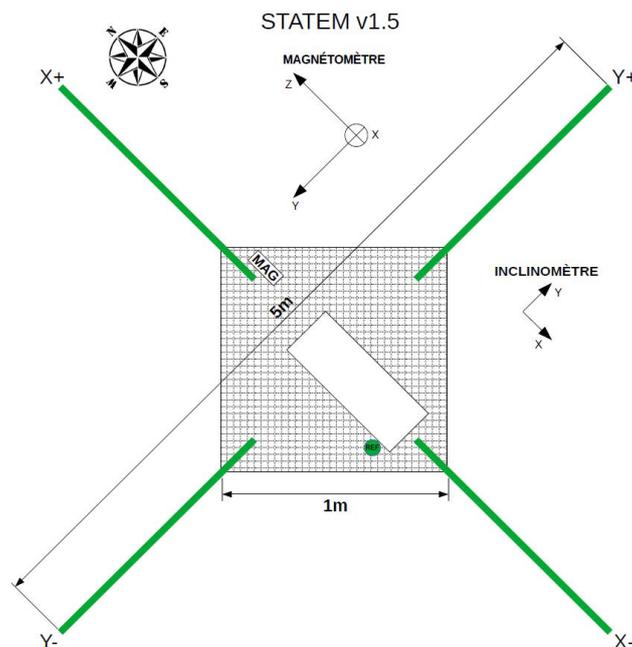


Figure 30. Description technique d'un instrument STATEM dans une configuration avec des dipôles électriques longs (5 m).

✓ Déploiement et récupération

Avant son déploiement, le système est mis en route sur le pont du bateau (Figure 31). La station enregistre la position et l'heure GPS et démarre l'acquisition des données, et est alors prête à être déployée. Cette étape permet également de vérifier le bon fonctionnement de l'instrument (batterie, niveaux de mesure, acquisition du signal GPS, ...).

**Le déploiement d'une station STATEM s'effectue à l'aide de deux plongeurs pour assurer la position et la stabilité de la station au fond de l'eau dans de bonnes conditions.** Le déploiement peut aussi s'effectuer à l'aide d'une grue ou à la main en faisant glisser la station à l'eau depuis le bateau, selon la profondeur d'eau et les conditions de déploiement. Dans les deux cas, les plongeurs assurent la bonne réception de la station au fond. Les plongeurs accompagnent ensuite la station au fond de l'eau et s'assurent de la mise à l'horizontale de la station à l'aide d'un niveau à bulle monté sur la plateforme. Les plongeurs s'assurent également que la station est correctement orientée, le magnétomètre pointant vers le nord (Figure 30).

La récupération de la station est effectuée par des plongeurs qui vont y accrocher un ballon parachute afin de remonter la station en surface. La station peut ensuite être sortie de l'eau à l'aide d'une grue.



Figure 31. Déclenchement du début de l'acquisition d'une station STATEM par MAPPEM Geophysics.

#### 4.2.2. Positions enregistrées

- Plan de position

Deux stations **N31** et **IS03** ont été déployées sur la zone du futur parc éolien de Noirmoutier. Chaque station a enregistré des données électriques et magnétiques pendant toute la durée de déploiement (6 jours).

Les informations de déploiement et de récupération de chaque station sont regroupées dans le Tableau 6. Les numéros des stations indiqués dans le tableau font références aux numéros des instruments.

	DATE MISE A L'EAU	HEURE UTC DÉPLOIEMENT	LATITUDE	LONGITUDE	PROF (M CM)	DATE RECUPERATION	HEURE UTC RECUPERATION
<b>N31</b> (STATION 2)	<b>14/06/2023</b>	10 :47	46°55,259' N	2°32,769' W	25,6	<b>20/06/2023</b>	~11 :35
<b>IS03</b> (STATION 1)	<b>14/06/2023</b>	12 :42	46°51,034' N	2°26,257' W	25,8	<b>20/06/2023</b>	~13 :32

Tableau 6. Stations déployées.

#### 4.2.3. Remarques générales sur la campagne

Le déploiement des stations s'est effectué dans de bonnes conditions météorologiques le 14/06/2023. Un ingénieur de MAPPEM Geophysics était présent pour l'allumage des stations et deux plongeurs d'IDRA Bio et Littoral se sont occupés de la pose au fond de l'instrument. Le déploiement a été effectué depuis le navire « Reborn » de Marine Celtic Services.

La récupération en mer des instruments a été réalisée par les plongeurs d'IDRA Bio et Littoral le 20/06/2023. Les stations ont ensuite été transmises à MAPPEM Geophysics pour le téléchargement et le traitement des données enregistrées. Après vérification, les deux stations ont correctement enregistré les données pendant les 6 jours d'acquisition, jusqu'à leur extinction par MAPPEM Geophysics, le 21/06/2023 à Saint-Renan.



Figure 32. Pose et montage des poids sur une station STATEM par les plongeurs d'IDRA Bio et Littoral.

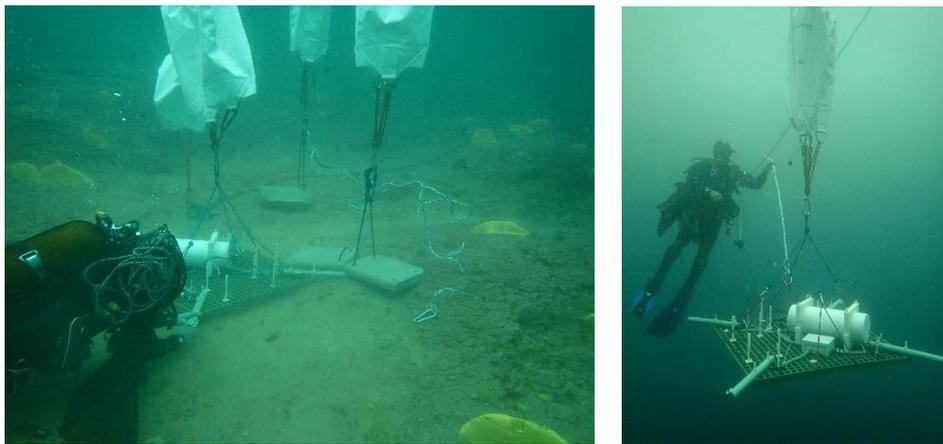


Figure 33. Relève du STATEM par les plongeurs d'IDRA Bio et Littoral

L'objectif des mesures effectuées à Noirmoutier étant de produire un état initial de l'environnement électromagnétique de la zone du futur parc éolien, le traitement effectué sur les données STATEM consiste essentiellement à une mise en forme et une analyse temps-fréquence afin de mettre en évidence la présence éventuelle de signaux remarquables. Cependant, l'état initial électromagnétique doit en principe identifier peu de signaux significatifs.

Le champ magnétique total à la position de la station est calculé. Des spectres en fréquence sont calculés à partir des champs électriques et magnétiques.

### 4.3. RESULTATS

L'objectif de cette partie n'est pas de montrer l'intégralité des données, mais de fournir les caractéristiques notables des signaux observés. Tout l'intérêt de ces signaux, en tant qu'état initial, sera de les comparer avec les signaux enregistrés après la mise en fonctionnement du parc éolien.

#### 4.3.1. Données électriques

- Série temporelle

L'analyse des données électriques montre que les mesures effectuées aux deux stations STATEM sont cohérentes entre elles.

La Figure 34 montre une comparaison des données enregistrées simultanément par les deux stations (les données sont filtrées à 1 Hz). La figure montre des variations du champ électrique de l'ordre de quelques  $\mu\text{V}$  qui sont cohérentes entre les deux stations. Ces variations basses

fréquences ont pour origine les fluctuations naturelles des champs électromagnétiques (variations provenant des vents solaires), de l'état de mer et des courants marins.

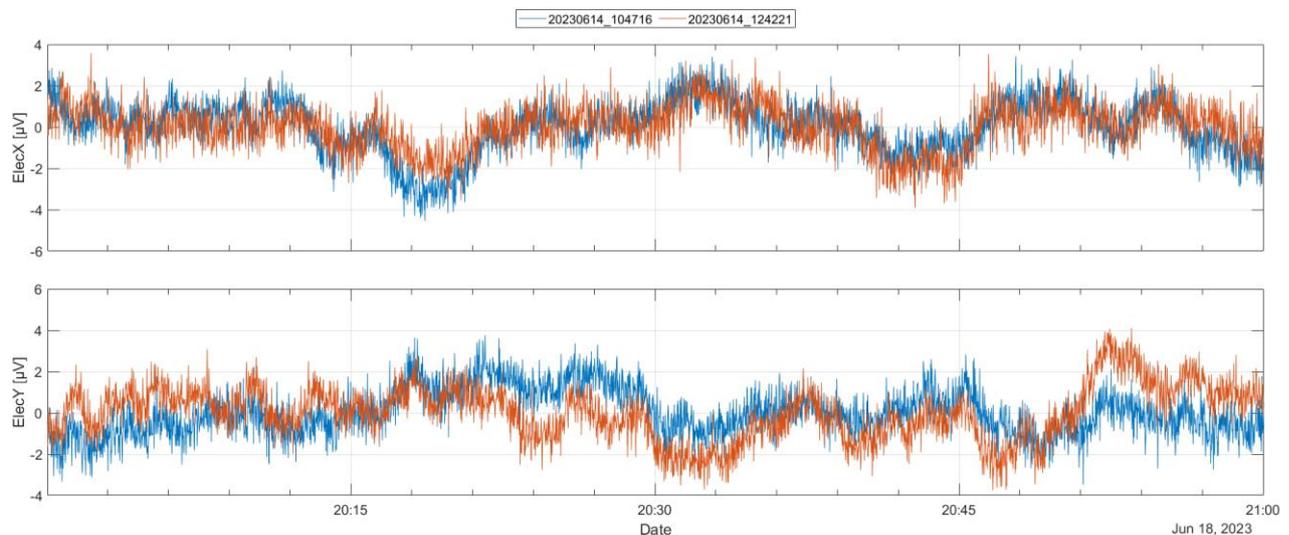


Figure 34. Exemple de variation du champ électrique au cours d'une heure de données acquises par les deux stations STATEM. Les deux voies X et Y sont représentées.

- Analyse spectrale

Le calcul du spectre des données acquises permet d'en étudier le contenu fréquentiel. La Figure 35 présente un exemple de spectre des deux stations, calculés pour une durée d'une heure à la mi-journée (vers 14h).

On observe un unique signal particulier, présent pour les deux stations à 50 Hz, représentant la mesure des signaux électromagnétiques émis par le réseau électrique national. Ce signal est relativement faible, du fait de la distance à la côte.

Le bruit présent à environ 0.4 Hz ainsi que ses harmoniques est lié à l'enregistrement des données par la station, et n'a pas été filtré.

A plus basse fréquence, les signaux observés vers 0.1Hz jusqu'à 1Hz environ sont directement liés à l'état de mer (houle et vagues présentes dans la zone). A plus basse fréquence, les signaux sont des signaux géoélectriques liés aux variations du champ électromagnétique naturel.

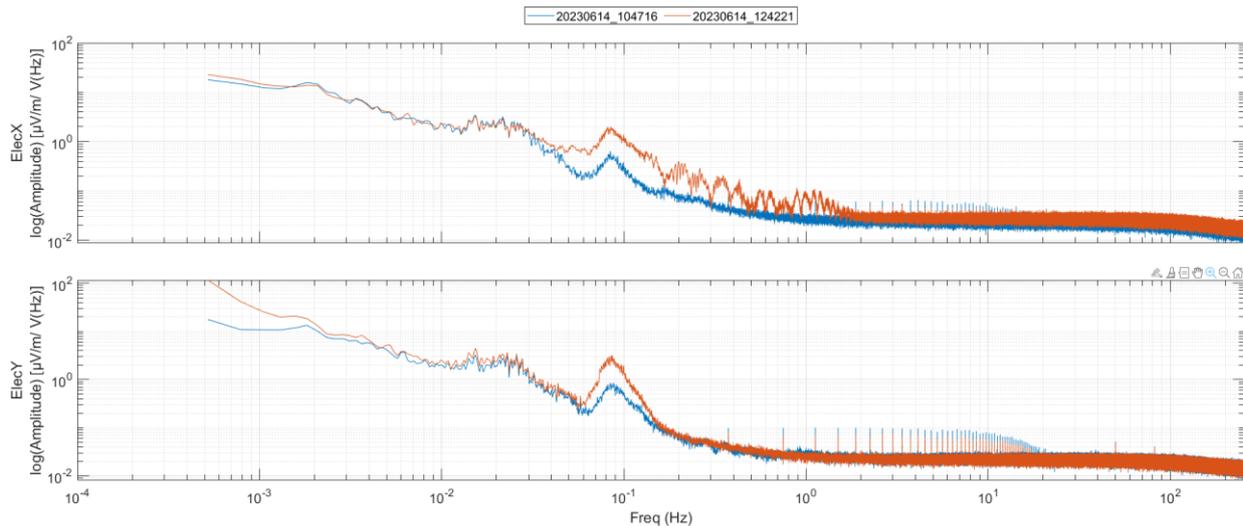


Figure 35. Spectres en fréquence des données des deux stations STATEM pour les voies électriques X et Y, calculés sur 24h de données.

### 4.3.2. Données magnétiques

- Spectre des données magnétiques

Le signal généré par le réseau électrique français, d'une fréquence de 50 Hz n'est pas mesuré par l'instrument car son amplitude se trouve sous le seuil de bruit du magnétomètre pour cette gamme de fréquence (Figure 36).

Un signal lié à la houle est visible à 0.1 Hz à la fois sur les données électriques et magnétiques.

L'analyse en fréquence des données magnétiques montre la présence d'un signal d'une fréquence d'environ 0.4 Hz et ainsi que les fréquences harmoniques associées (y compris les pics à 24 Hz et au-delà). Ce signal est lié au bruit généré par l'électronique d'acquisition des systèmes STATEM eux-mêmes.

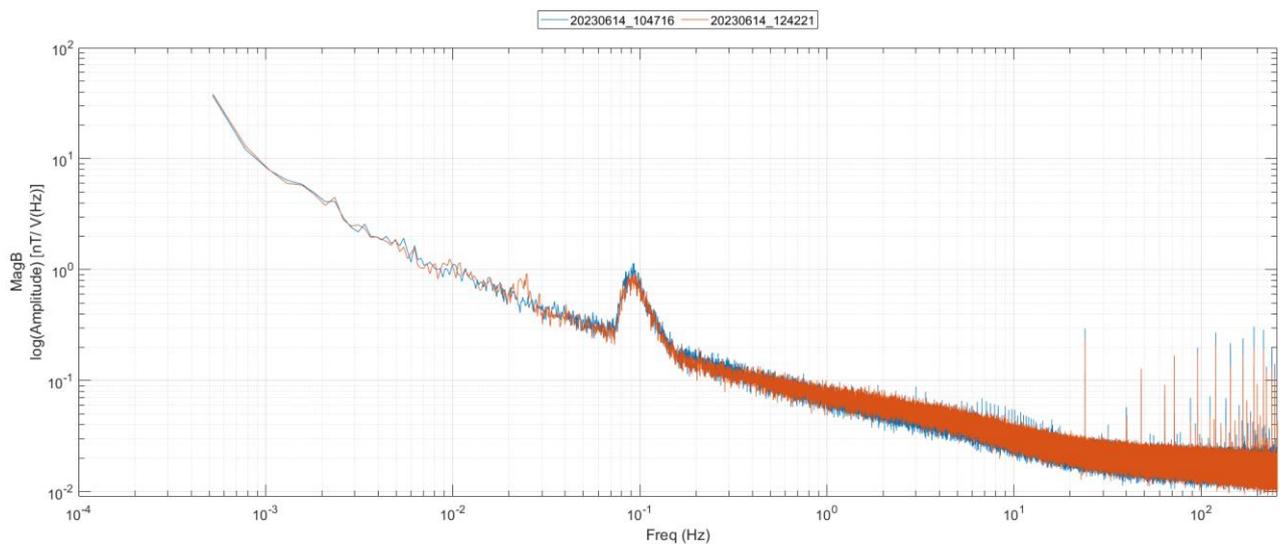


Figure 36. Spectre en fréquence des données des deux stations STATEM pour le champ magnétique total, calculé sur 24h.

- Comparaison avec l'activité géomagnétique.

Les données enregistrées par les stations STATEM peuvent être comparées avec l'activité géomagnétique en cas d'activité solaire (source de bruit électromagnétique).

On utilisera les données Kp (indice K planétaire) afin de représenter les perturbations du champ magnétique terrestre. Les données de Kp sont téléchargées du site internet du SIIG (Service International des Indices Géomagnétiques). Des valeurs de Kp situées autour de 0 ou 1 indiquent une faible perturbation du champ magnétique terrestre, des valeurs situées au-delà de 5 montrent la présence d'une tempête géomagnétique.

Les données Kp du mois de juin 2023 montrent la présence d'une tempête géomagnétique de niveau 6 autour du 16 juin (Figure 37). La présence de cette tempête géomagnétique n'affecte pas la qualité ou la validité des données STATEM dans le cadre de cette étude pour la période en question.

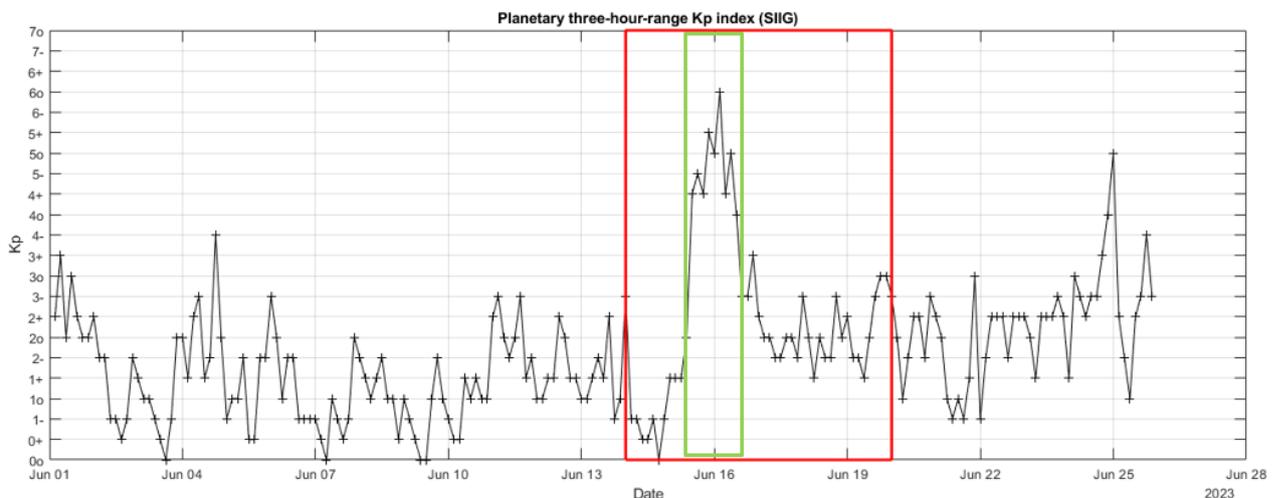


Figure 37. Valeurs Kp au mois de Juin 2023. Le cadre rouge représente la fenêtre d'acquisition des stations STATEM.

La norme du champ magnétique (marquée « B ») mesurée par les deux stations est représentée par la Figure 38. On observe une variation plus importante de la norme du champ magnétique dans la nuit du 15 au 16 juin (marquée par un rectangle vert (Figure 37, Figure 38)). Cette mesure est en parfait accord avec les valeurs de Kp relevées à cette date. En étudiant le spectre en fréquence des données électromagnétiques, l'amplitude des basses fréquences est plus importante lors de la tempête géomagnétique (Figure 39).

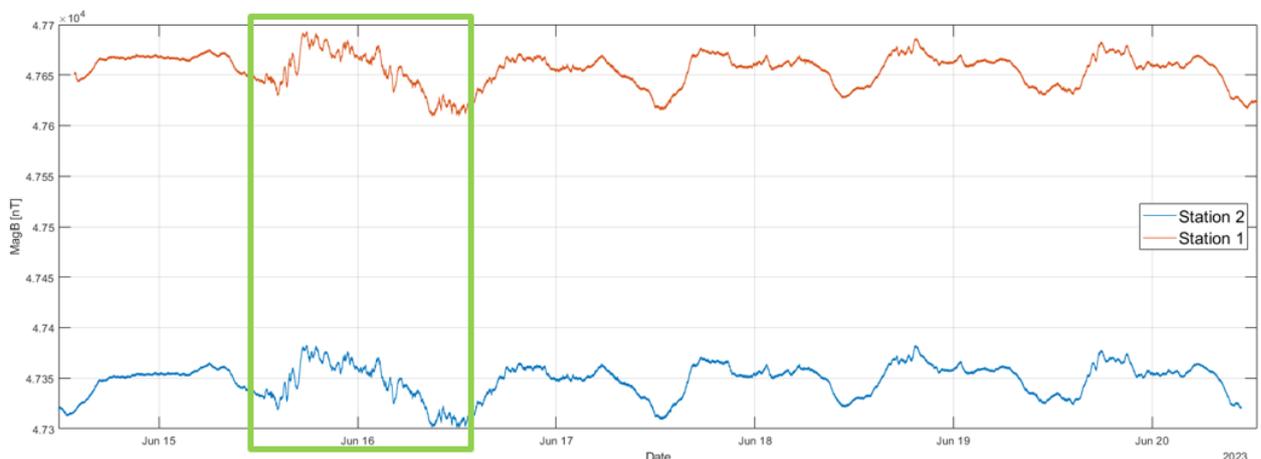


Figure 38. Norme du champ magnétique enregistrée par les deux stations STATEM.

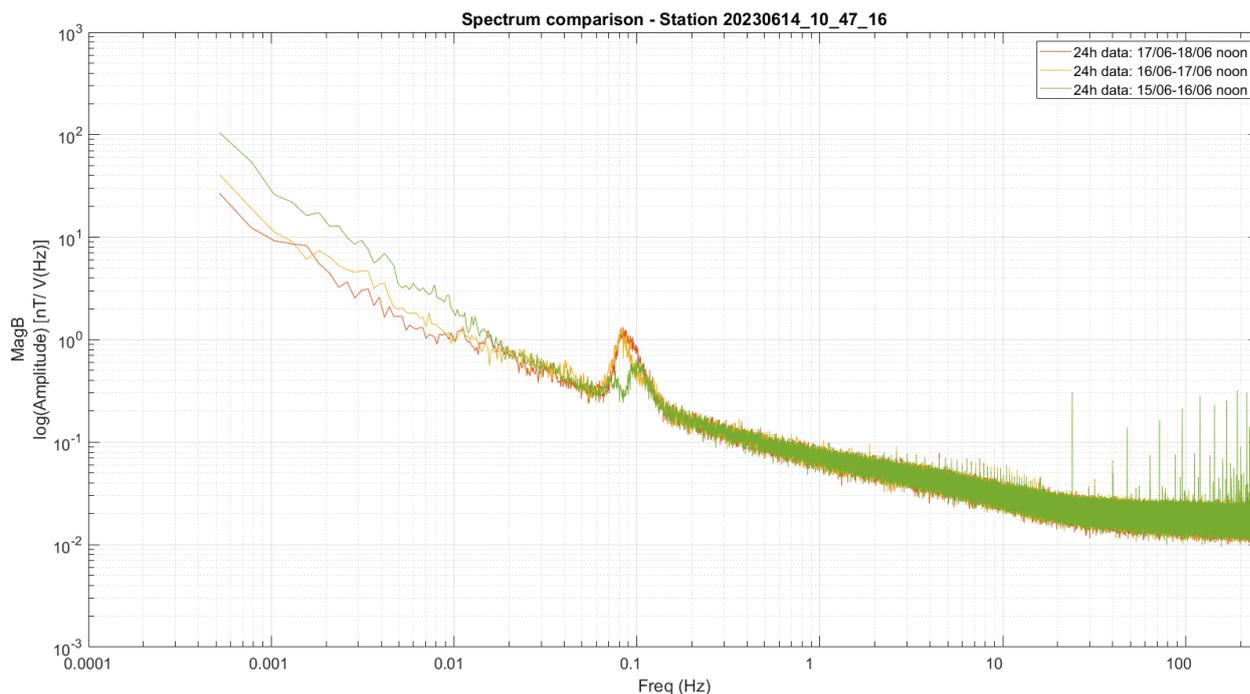


Figure 39. Comparaison des spectres entre 24h de données pendant la tempête géomagnétique (15/06-16/06 de midi à midi, courbe verte) avec deux autres jours de données.

#### 4.4. CONCLUSION

Deux stations STATEM ont été déployées pendant 6 jours au large de l'île de Noirmoutier dans le but d'effectuer des mesures de niveau de bruit électromagnétique, en tant qu'état initial avant la mise en place du parc éolien.

Le déploiement et la récupération des stations se sont effectués dans de bonnes conditions de sécurité, pour les personnels comme pour le matériel. Les deux stations ont enregistré comme prévu les champs électriques et magnétiques sur l'ensemble de la période.

La mesure des signaux électromagnétiques dans la zone du futur parc éolien de Noirmoutier n'a pas révélé la présence de signaux anthropiques de forte amplitude. Le seul signal notable est un signal de fréquence 50 Hz mesuré sur les voies électriques des deux stations STATEM, résultat attendu pour toute mesure effectuée non loin des côtes, ce signal ayant pour origine la circulation des courants électriques du secteur.

Les mesures réalisées en juin 2023 serviront de base de comparaison pour de futures mesures qui seront effectuées aux mêmes positions à la suite de l'installation du parc éolien de Noirmoutier.

## 5.SUIVI DE LA MODIFICATION DE LA TEMPERATURE EMISE PAR LES CABLES (SE9 - 2023) – FONDATION OPEN-C

Cette partie a été traitée par la fondation Open-C.

### 5.1. GENERALITES

Les structures offshore telles que les éoliennes, les stations intermédiaires, les boîtes de jonction et surtout les câbles export d'énergie transportent des courants importants générant des champs électromagnétiques. Leurs amplitudes dépendent de l'intensité des courants électriques, mais aussi de la structure du câble ou de l'infrastructure considérée.

Lors du passage d'un courant électrique dans un câble, une partie de cette énergie est transformée en énergie thermique que l'on appelle en physique l'effet Joule. L'intensité de cette radiation thermique dépend des caractéristiques techniques et de la puissance du câble (ou des infrastructures électriques) ainsi que de leur méthode de stabilisation.

A une période donnée, **l'objectif de cette étude est principalement de tester la méthode de déploiement pour le futur suivi.**

Dans un second temps, après la mise en service du parc, l'étude permettra d'évaluer la température potentiellement émise par les infrastructures du parc éolien, notamment en comparant les résultats des mesures obtenues sur les structures en place VS celles obtenues à distance de celles-ci (stations témoin).

La quantification de ces évolutions permettra de définir l'aire de perturbation éventuelle ainsi que les potentielles incidences sur les communautés benthiques et les espèces pouvant être sensibles aux champs électromagnétiques.

### 5.2. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES

#### 5.2.1. Protocole et moyens mis en œuvre

Le paramètre étudié dans cette étude est la **température** (en degrés Celsius).

La stratégie d'échantillonnage consiste à disposer 3 capteurs de température (réplication de la mesure) en deux stations d'étude. Les capteurs de température sont positionnés sur le dispositif STATEM de mesure de champ électromagnétique (Figure ci-dessous).

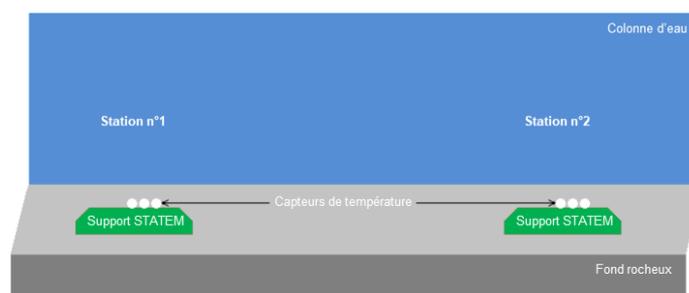


Figure 40. Schéma représentant la stratégie d'échantillonnage

La mise en œuvre de deux stations de mesures permet de vérifier l'homogénéité du site d'étude et la réplication (x3) des capteurs permet d'assurer un recueil de données en cas de perte ou de défaillance éventuelle.

Les capteurs de température sont des Nautical MS5803-30BA (© Alpha Mach). Ces capteurs sont de petite taille (48 × 31 × 19mm pour 19.2g) encapsulés dans une résine époxydique à base de PETG (Polyéthylène téréphtalate glycol) pour un déploiement à long terme et submersibles jusqu'à 140m de profondeur. La résolution de ces capteurs est de 0.01°C et la précision annoncée est de +/- 0.8°C.

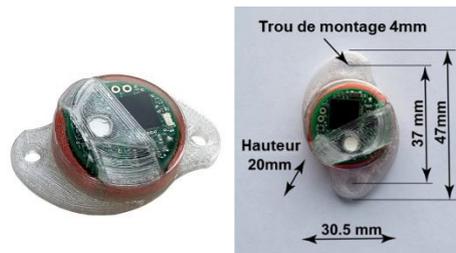


Figure 41. Photographies et mesure des capteurs de température Nautical MS5803-30BA (crédit : Alpha Mach).

La capacité de stockage est de 190 000 mesures. La fréquence d'échantillonnage est d'une mesure toutes les 10 minutes.

La programmation et la récupération des données enregistrées par les capteurs s'effectuent grâce au logiciel « Alpha Mach Wapp ». Les capteurs de température communiquent par RFID c'est-à-dire via des ondes radio (fréquence : 134.2 kHz).

Les deux stations de mesure correspondent aux 2 stations déployées pour le dispositif STATEM, à savoir les stations **N31 et IS03** (Tableau 6 p38), dont les caractéristiques de pose et de relève sont identiques (du 14 au 20 juin 2023).

## 5.3. RESULTATS

### 5.3.1. Résultats des 6 capteurs de mesures de température et de pression

Les résultats obtenus par les trois capteurs de mesures sur les stations N31 et IS03 sont présentés ci-dessous.

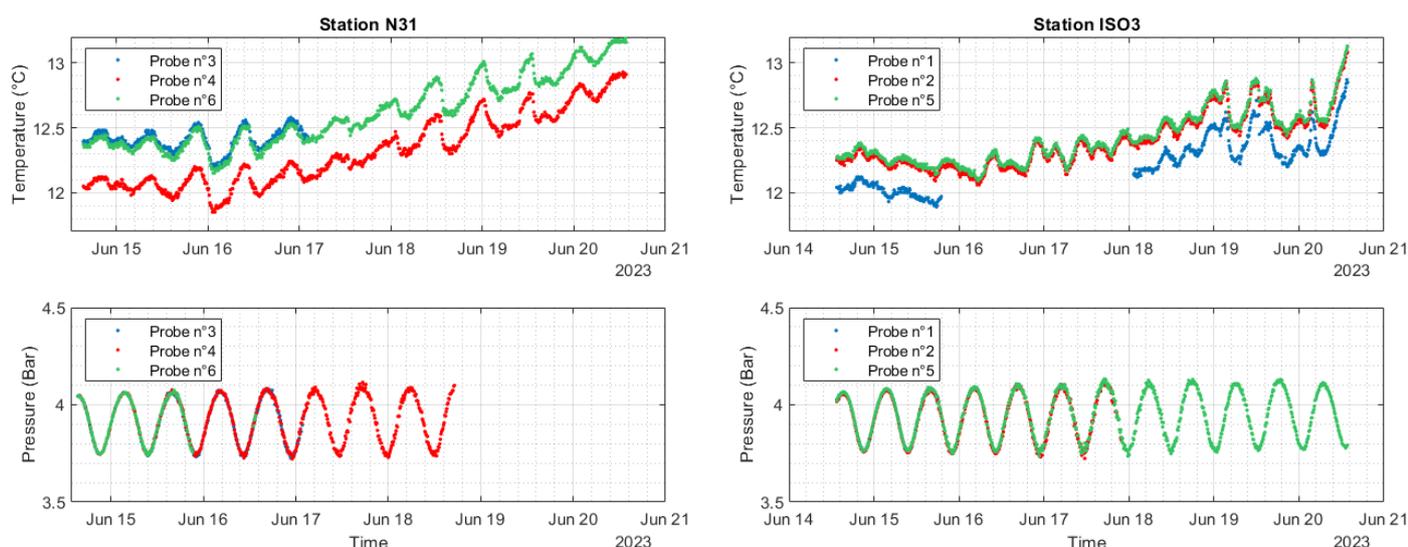


Figure 42. Température et pression mesurées par les six capteurs aux stations N31 et ISO3

Les capteurs n°1 et n°3 ont fonctionné en mesure de température respectivement 41% et 62% du temps, alors que les autres capteurs ont fonctionné pendant toute la durée d'acquisition. Le choix de positionner plusieurs capteurs sur une même station afin d'assurer une redondance de la mesure en cas de perte de la mesure s'avère donc justifié.

Le taux de recouvrement et le nombre de mesures acquises sont précisés dans le Tableau ci-dessous.

	Station N31			Station ISO3		
	Capteur n°3	Capteur n°4	Capteur n°6	Capteur n°1	Capteur n°2	Capteur n°5
Nombres de mesures	353	866	866	535	866	866
Pourcentage de recouvrement	41%	100%	100%	62%	100%	100%

Tableau 7. Taux de recouvrement et quantité de données acquises.

Pour la station N31, on observe un biais systématique entre le capteur n°4 d'une part et les deux autres capteurs n°3 et n°6 d'autre part. Ce biais est de de  $-0,29\text{ °C}$  entre le capteur n°4 et n°6.

Pour la station ISO3, on observe un biais systématique entre le capteur n°1 d'une part et les capteurs n°2 et n°5 d'autre part. Ce biais est de de  $-0,22\text{ °C}$  entre les capteurs n°1 et n°2.

Les biais observés sont dans la limite de la précision annoncée des capteurs  $\pm 0,8\text{ °C}$ .

Il est proposé de retenir une valeur de température sur chaque station calculée par la moyenne des signaux lorsque les trois mesures sont disponibles simultanément. L'écart entre la moyenne obtenue et un signal complet (respectivement issu des capteurs n°2 et n°6) est calculé et appliqué sur toute la durée du signal pour afficher le signal de température moyen corrigé (courbes noires ci-dessous).

Les températures mesurées présentent des oscillations de même fréquence que la fréquence de marée, avec des température minimum correspondant aux phases de marée haute (colonne d'eau et donc pression les plus hautes).

Les résultats des températures mesurées, de la moyenne corrigée et des statistiques correspondantes sont présentés sur les figures et dans les tableaux des deux sections ci-dessous.

### 5.3.2. Station N31

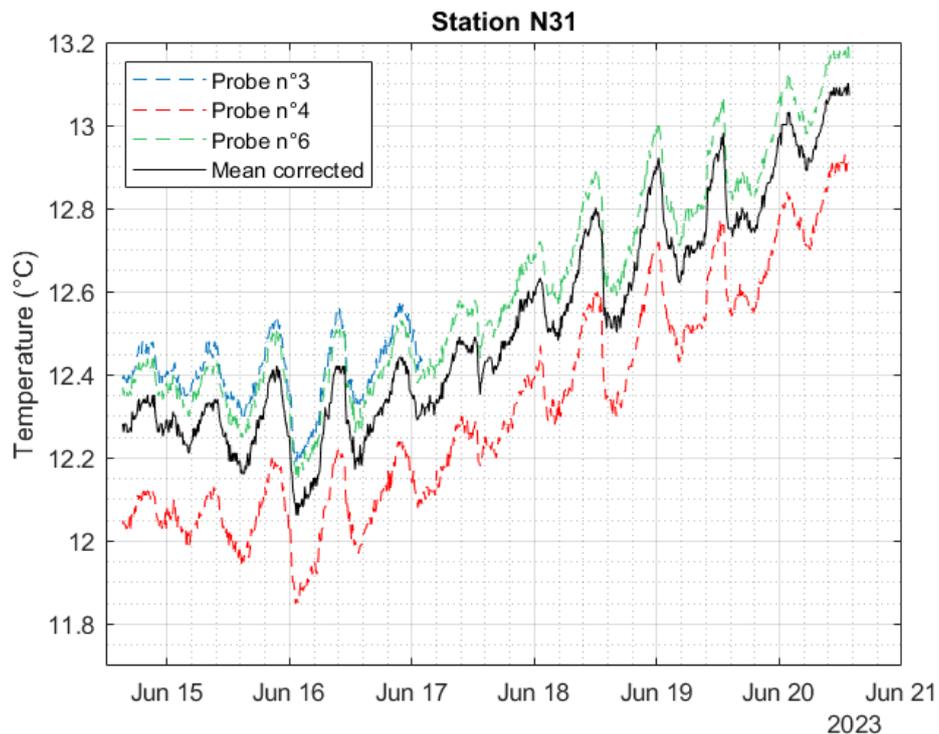


Figure 43. Courbes de températures mesurées et moyenne corrigée obtenues à la station N31

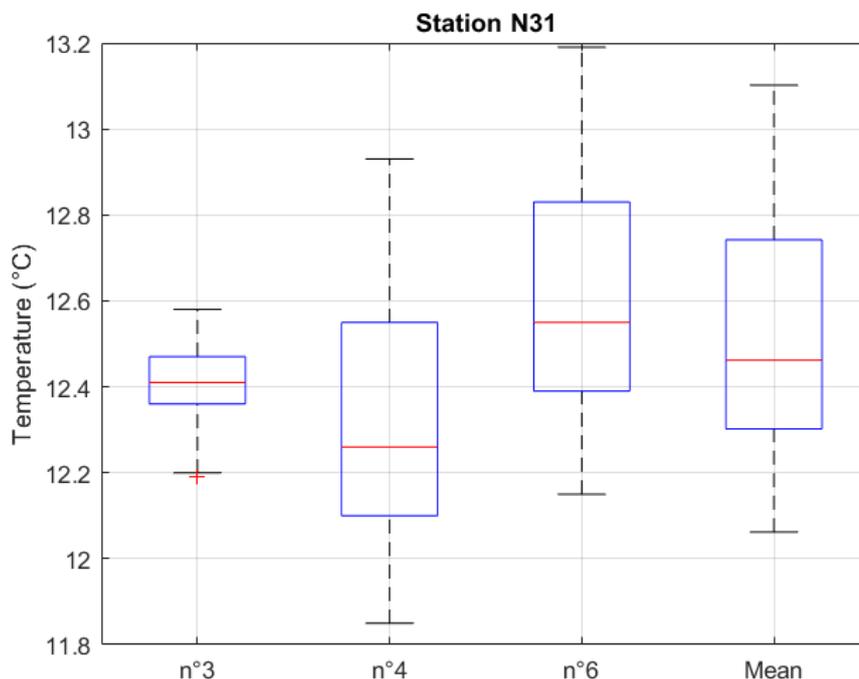


Figure 44. Boxplot des températures mesurées et de la moyenne corrigée à la station N31

Paramètres	Capteur n°3	Capteur n°4	Capteur n°6	Moyenne
Moyenne	12.41	12.32	12.61	12.52
Médiane	12.41	12.26	12.55	12.46
Ecart-type	0.08	0.27	0.26	0.26
Minimum	12.19	11.85	12.15	12.06
Maximum	12.58	12.93	13.19	13.10

Tableau 8. Statistiques des températures et moyenne corrigée obtenues à la station N31

### 5.3.3. Station IS03

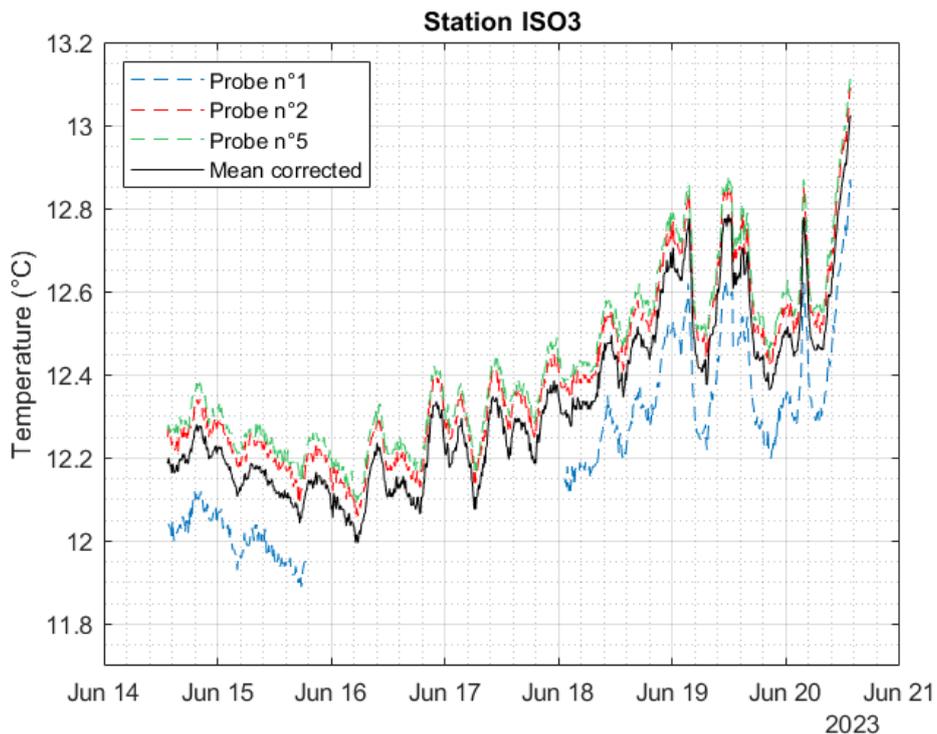


Figure 45. Courbes de températures mesurées et moyenne corrigée obtenues à la station IS03

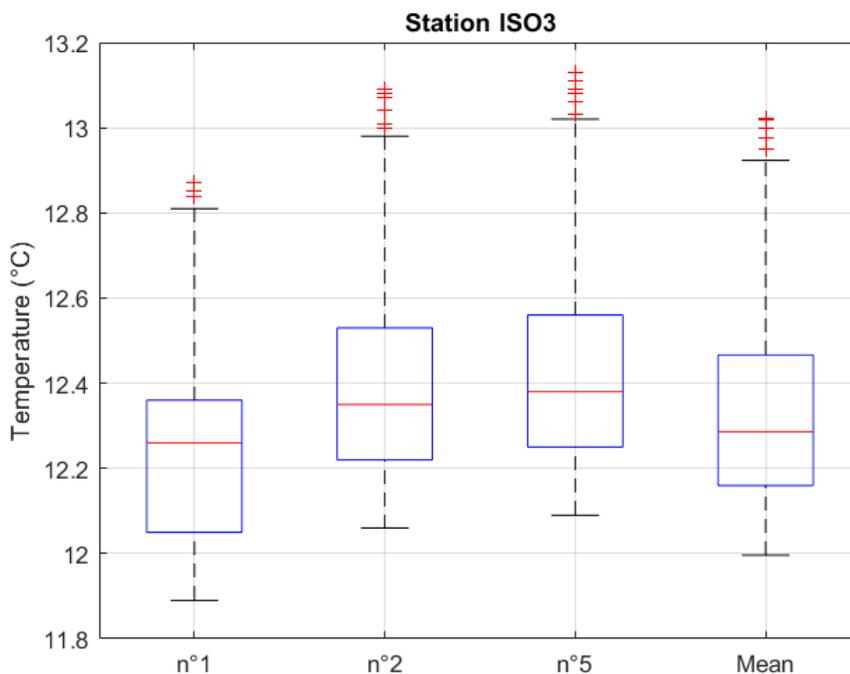


Figure 46. Boxplot des températures mesurées et de la moyenne corrigée à la station IS03

Paramètres	Capteur n°1	Capteur n°2	Capteur n°5	Moyenne
Moyenne	12.24	12.39	12.42	12.33
Médiane	12.26	12.35	12.38	12.29
Ecart-type	0.21	0.20	0.20	0.20
Minimum	11.89	12.06	12.09	12.00
Maximum	12.87	13.09	13.13	13.02

Tableau 9. Statistiques des températures et moyenne corrigée obtenues à la station IS03

## 5.4. CONCLUSION

Cette étude a permis de dresser un état initial sur une durée courte (6 jours) de la température en deux stations du futur parc éolien en mer des îles d'Yeu et de Noirmoutier.

Des variabilités ont été observées lors de la mesure, à la fois en termes de valeurs obtenues par différents capteurs, de localisation et de variabilité temporelle (oscillations à la fréquence de la marée, et variabilité à l'échelle du mois). On peut s'attendre à ce que la variabilité annuelle soit également significative.

Cela implique de conserver un protocole d'étude comparable lors de phases d'étude suivante, après la mise en service du parc. Une analyse détaillée de cet état initial viendra par ailleurs compléter, de manière spécifique et comparative, l'analyse produite après la mise en service. **Ainsi, cette étude, bien qu'elle ne fournisse pas un état initial à proprement parler, permet principalement de valider la méthode générale** - notamment la nécessité de réplication des capteurs, les points de pose, etc... -. Cette approche pourra être utilisée lors de la phase d'exploitation du parc en disposant des capteurs à proximité directe des infrastructures (ex : câbles), et en comparant alors les données avec celles obtenues à distance de ces éléments, ceci dans l'objectif d'évaluer les éventuels effets que les infrastructures pourraient générer sur la température du milieu.

## 6.SYNTHESE

Les principales informations à retenir sont les suivantes :

➤ **Champs électromagnétiques (MAPPEM) :**

- L'analyse des données électriques et magnétiques enregistrées par le PASSEM sur la zone de Noirmoutier le 02/02/2023 montre la présence des signaux cohérents avec une zone libre d'installations humaine, mais à proximité des côtes. Les signaux mesurés sont un bruit de fond électromagnétique et il est normal de ne pas distinguer de signaux importants ou significatifs.
- La mesure des signaux électromagnétiques par le dispositif STATEM sur les 2 stations N31 et IS03 du 14 au 20 juin 2023 sur la zone du futur parc éolien de Yeu-Noirmoutier n'a pas révélé la présence de signaux anthropiques de forte amplitude. Le seul signal notable est un signal de fréquence 50 Hz mesuré sur les voies électriques des deux stations STATEM, résultat attendu pour toute mesure effectuée non loin des côtes, ce signal ayant pour origine la circulation des courants électriques du secteur.

➤ **Suivi de la température émise par le câble (Fondation Open-C) :**

- Les stations de mesure utilisées sont celles des dispositifs STATEM, avec une fixation des capteurs de température sur les structures immergées aux 2 stations N31 et IS03.
- Des variabilités ont été observées lors de la mesure, à la fois en termes de valeurs obtenues par différents capteurs, de localisation et de variabilité temporelle (oscillations à la fréquence de la marée, et variabilité à l'échelle du mois).

Ainsi, si ces éléments ne permettent pas d'aboutir à un état de référence approfondi sur la zone, notamment en raison des courtes durées d'investigation, ils permettent néanmoins de décrire les paramètres sur une durée ciblée, et donc de valider les principes de la méthode de mesure pour la phase d'exploitation. Après la mise en service du parc, les enregistrements de ces paramètres sur les infrastructures et à distance de celles-ci, permettront de calculer d'éventuelles variations, et donc de fournir des éléments davantage conclusifs quant aux possibles effets du parc éolien sur les champs électro-magnétiques et sur la température générés par les infrastructures immergées.

## 7. REFERENCES

Fondation-OPEN-C, 2023. Parc éolien en mer des îles d'Yeu et de Noirmoutier / fiche SE9 : suivi de la modification de la température émise par les câbles. Pour IDRABIO et Littoral : NOY-SE9-Livrable-El-Fondation-OPEN-C.

Mappem GEOPHYSICS, 2023. Campagne de mesures & traitement des données du dispositif PASSEM sur le parc éolien de Yeu-Noirmoutier.

Mappem GEOPHYSICS, 2023. Campagne de mesures & traitement des données du dispositif STATEM déployés sur 2 stations sur le parc éolien de Yeu-Noirmoutier.