



PHRESQUES

*Projet d'Harmonisation et de REnforcement du Suivi haute-fréquence
de la QQualité de l'Eau de la vallée de Seine*

Version du 8 Mars 2016

Les deux phases du projet PHRESQUES ont pour objectif de mettre en place un dispositif de suivi en continu de la qualité de l'eau cohérent à l'échelle du continuum Seine. Par le regroupement et le développement des dispositifs existants, le méta-réseau PHRESQUES permettrait de suivre 10 paramètres, caractérisant le fonctionnement de l'hydro-système de l'amont de Paris à la baie de Seine.

En lien avec le rapprochement des programmes de recherche PIREN Seine et Seine-Aval, la mise en place de cet outil, parmi les plus performants à l'échelle mondiale, favorisera l'émergence de projets de recherches innovants et cohérents à l'échelle du continuum Seine. D'un point de vue opérationnel, les données et les connaissances acquises permettront aux gestionnaires de disposer d'un outil de suivi du fonctionnement de l'écosystème Seine fiable et particulièrement pertinent dans l'actuel contexte de changement climatique.

Contexte

La mise en œuvre du schéma stratégique pour l'aménagement et le développement de la vallée de la Seine, signé le 25 juin 2015, vise une gestion optimale du territoire et son développement durable, valorisant tant les espaces urbanisés que les zones naturelles.

Le Contrat de Plan Inter Etat Régions « vallée de Seine » souhaite intégrer les démarches ayant une claire valeur ajoutée inter-régionale, permettre de développer les synergies entre acteurs de la vallée de la Seine et de tirer le meilleur parti économique et environnemental de ce territoire. Une action spécifique identifie le besoin d'une « Harmonisation et homogénéisation de la connaissance des milieux ». L'objectif est, en s'appuyant sur les outils techniques existants, de construire un programme d'études partagé à l'échelle du territoire, inscrit dans la durée. Le Groupement d'Intérêt Public (GIP) Seine-Aval et le Programme Interdisciplinaire de Recherche en ENvironnement (PIREN) Seine sont identifiés en tant que porteurs potentiels de projets au titre de cette action.

Les financeurs du CPIER ont notamment mis en évidence la nécessité de mettre en cohérence les dispositifs de mesures existants et de couvrir les domaines insuffisamment traités tant sur l'axe Seine, que sur les cours d'eau adjacents et sur le littoral.

I. Intérêts et atouts du projet PHRESQUES pour le développement de l'axe Seine.

I.1 Un outil de développement des territoires

La vallée de Seine et son estuaire sont au cœur des développements économiques et sociaux du bassin de la Seine. Ce développement, s'appuyant sur la dynamique « Axe Seine » initié en 2007 par les acteurs du territoire, vise à favoriser l'ouverture de Paris sur la mer. Afin d'améliorer les connexions entre ces territoires, outre les rapprochements entre les agglomérations/métropoles Parisienne, Rouennaise et Havraise, le GIE HAROPA regroupant les ports de Paris, Rouen et le Havre a été créé. Cette nouvelle dynamique économique aura à moyen des termes des répercussions sur l'hydrosystème constitué de la Seine, son estuaire et la baie de Seine. Cette modification des pressions anthropiques aura pour conséquence de modifier les fonctionnements morphologiques et biogéochimiques de ces milieux.

La prédiction des inondations et submersions marines, l'anticipation des effets du changement climatique notamment sur la navigation, la compréhension du fonctionnement de l'écosystème support des usages liés à la nature comme la pêche sur le littoral ou l'évacuation et la transformation des rejets des zones urbaines ou encore l'amélioration de l'image du fleuve et du littoral pour promouvoir le cadre de vie nécessitent des approches globales et prédictives à l'échelle du continuum bassin versant-estuaire-baie de Seine.

La compréhension des flux de matières en suspension, de carbone, et d'éléments nutritifs depuis les territoires amont jusqu'à la mer est aujourd'hui un enjeu pour un développement harmonieux des territoires. Cette question est au cœur des problématiques scientifiques du réseau des Zones Ateliers¹.

Comprendre et anticiper les évolutions morphologiques du fleuve et les problématiques de la qualité de l'eau sont un préalable à la bonne prise en compte de nombreux enjeux de développement de l'axe Seine.

Dans une logique de “ mieux suivre, pour mieux comprendre, pour mieux gérer ”, une mise en synergie des dynamiques d'acquisition de connaissances, souvent menées de manière indépendante, apparaît indispensable. Elle doit notamment aider à la mise en cohérence des plans et programmes de gestion des milieux aquatiques (SDAGE, PGRI, PAMM...).

Comprendre et anticiper les processus à l'œuvre sur le continuum Seine est l'objet du projet PHRESQUES décrit dans la présente proposition. Il vise à harmoniser et homogénéiser le suivi en continu des milieux aquatiques de la vallée de Seine. Au-delà de son intérêt majeur pour le suivi de l'évolution du milieu, PHRESQUES servira de support aux recherches environnementales, qui seront menées dans le cadre de la Zone Atelier Seine, dont l'un des objectifs majeurs est de développer les connaissances nécessaires au développement durable de la vallée de Seine.

¹ Les Zones Atelier (ZA) sont des outils de l'Institut Ecologie et Environnement (CNRS) dont l'objectif est de favoriser, sur certains territoires où les enjeux liés à l'interaction homme-nature sont importants, des recherches pluridisciplinaires en environnement sur le long terme. La ZA Seine contribue ainsi à la mise en place d'une dynamique de recherche reposant sur 3 programmes (Piren-Seine, OPUR, Seine-Aval) afin d'apporter les connaissances nécessaires à la prise en compte des enjeux environnementaux du bassin de la Seine et du développement de l'Axe Seine.

L'objectif majeur du réseau PHRESQUES est de fournir une vision intégrée amont-aval de l'état de l'hydrosystème, soumis à de fortes pressions anthropiques de l'amont de l'agglomération parisienne jusqu'à la baie de Seine. A cet effet, le déploiement d'un réseau de suivi en continu des variables caractérisant le fonctionnement global du continuum permettra de positionner le bassin de la Seine à l'avant-garde de la prise en compte de l'environnement dans le développement de son territoire. Effectivement, le présent projet vise à la mise en place d'un méta réseau parmi les plus importants au plan international.

Ce réseau de suivi en continu servira, d'une part, de support à la mise en place d'indicateurs d'état du milieu en temps réel, et d'autre part permettra d'analyser les mécanismes expliquant le fonctionnement de ce système très dynamique. Les données acquises serviront de base à l'amélioration des modèles de simulation hydro-biogéochimique. Ces modèles pourront alors permettre d'interpoler spatialement les données obtenues aux stations, fournissant ainsi une vision spatiale continue de l'état du système. De plus, ces outils permettront d'établir des bilans de matière au sein du système et ainsi de tester différents scénarios de développement du territoire. Ces modèles permettront finalement d'anticiper les effets combinés du développement territorial et du changement climatique sur le fonctionnement hydro-sédimentaire et biogéochimique de l'écosystème Seine.

I.2 Des processus clés et leurs variables associées

I.2.1 Le cycle du carbone

Le carbone est une variable clé permettant de caractériser le fonctionnement des écosystèmes. De manière simplifiée, le cycle du carbone est organisé autour du monde du vivant structuré par deux mécanismes antagonistes de production et de dégradation de la matière organique dont le bilan traduit le métabolisme de l'écosystème. Les deux mécanismes biotiques agissent directement sur les flux gazeux d'oxygène et de dioxyde de carbone. Des estimations récentes indiquent que les émissions de CO₂ par les fleuves du monde compenseraient pour moitié la capture du CO₂ par les écosystèmes terrestres. Les rejets anthropiques dans le milieu naturel ont pour effet de modifier les flux de carbone et l'intensité des processus associés à leur transformation. Comprendre l'influence des activités humaines sur les émissions de CO₂ par les fleuves est donc aujourd'hui un enjeu considérable que le réseau PHRESQUES permettra d'évaluer. Aujourd'hui il existe des capteurs de mesures in situ permettant d'acquérir des jeux de données denses. Leur interprétation permettra de quantifier les flux de carbone et de gaz associés au sein des hydrosystèmes.

I.2.2 La dynamique sédimentaire

Une grande partie de la matière transitant dans les eaux se trouve sous forme particulaire ou dissoute. Si la matière dissoute est transportée au fil de l'eau, la matière particulaire est soumise à des processus de sédimentation et d'érosion. En estuaire, ces phénomènes ont d'importantes répercussions sur les évolutions de la morphologie du cours d'eau et donc sur la navigabilité ainsi que sur la dynamique des submersions. En baie, la turbidité induite par la dynamique sédimentaire limite la quantité de lumière disponible pour la photosynthèse et contrôle directement la production primaire. A ces processus sédimentaires sont également

associés des piégeages ou relargages d'éléments contenus dans l'eau interstitielle des sédiments. Il est maintenant reconnu que les processus benthiques (se produisant dans les sédiments de fond) jouent un rôle important dans le métabolisme global des masses d'eau de surface. Quantifier l'intensité des processus sédimentaires et leur spatialisation constitue donc un pré-requis à l'étude du cycle du carbone. Dans ce domaine, il existe également des capteurs de mesures in situ permettant d'étudier ces processus.

I.2.3 Quantifier les cycles biogéochimiques

L'azote, le phosphore, et la silice sont les trois nutriments majeurs, qui contrôlent la production des systèmes aquatiques. Depuis le début de l'ère industrielle, les cycles naturels de l'azote et du phosphore ont été totalement modifiés par les activités industrielles et agricoles. En comparant les flux générés par des processus naturels aux flux résultants des activités humaines, il apparaît que la part de ces dernières est en constante augmentation et peut souvent devenir prépondérante. Ces perturbations entraînent des modifications significatives de l'environnement avec un enrichissement très important des eaux de surface en éléments nutritifs, qui engendre une eutrophisation de quasiment l'ensemble des systèmes continentaux, ainsi que des estuaires et des zones côtières. Une des conséquences de l'eutrophisation est de modifier les concentrations en oxygène dissous dans l'eau et d'engendrer des périodes où la colonne d'eau est en anoxie. Cette absence d'oxygène a alors des conséquences dramatiques sur la vie piscicole entre autres. A l'enrichissement des eaux en éléments nutritifs s'ajoute la variation des rapports entre les éléments (dystrophie), qui influence fortement la structure des assemblages phytoplanctoniques et pourrait favoriser les occurrences de certaines espèces toxiques en milieu côtier. En fonction de l'élément nutritif considéré des capteurs existent, mais leurs niveaux de fiabilité sont variables.

I.3 Un continuum composés de milieux aquatiques interdépendants

La partie fluviale, de l'amont de Paris au barrage de Poses draine un bassin versant de 78 600 km² abritant l'agglomération parisienne et supportant 40% de l'activité économique et 30% de l'activité agricole nationale. Ce territoire concentre des pressions anthropiques (industrielles, agricoles, urbaines) dont les impacts physico-chimiques se font sentir sur le fleuve, l'estuaire et même jusqu'en baie de Seine. Par ailleurs, la partie fluviale de l'axe Seine, en plein développement dans le cadre du GIE HAROPA, assure actuellement 50% du trafic fluvial national. Le fonctionnement biogéochimique de cette portion du continuum est actuellement suivi par le réseau CARBOSEINE (cf. § II.).

La partie estuarienne, du barrage de Poses au Havre, est à l'interface entre le bassin versant et la Baie de Seine. L'estuaire de la Seine abrite la Métropole Rouen Normandie, l'agglomération du Havre et leurs grands ports maritimes (membres du GIE HAROPA), dont l'activité est directement liée à celle du bassin versant amont. Dans ce contexte et de par sa position sur l'une des routes maritimes les plus fréquentées au monde, l'estuaire de la Seine est un point clé du continuum. Ce secteur sous la double influence des processus continentaux et marins, présente de très forts gradients à l'origine de ses capacités épuratives tant pour les nutriments que les contaminants. La surconcentration de sédiments induite par la rencontre entre les eaux douces de la Seine et les eaux salées de la baie

engendre des évolutions rapides de la morphologie de l'estuaire. Ces dernières imposent aux deux grands ports maritimes de mener d'importants travaux d'aménagements pour accueillir les navires de commerces internationaux. Dans le contexte actuel de changement climatique, la connaissance des flux sédimentaires en estuaire est indispensable pour mieux se préparer et anticiper les évolutions futures du fonctionnement de l'estuaire. Le fonctionnement hydro-sédimentaire de cette zone est suivi par le réseau SYNAPSES (cf. § II.).

La baie de Seine correspond à la portion de la Manche qui s'étend entre le pays de Caux à l'est et la presqu'île du Cotentin à l'ouest. Ce territoire et ses activités économiques sont largement influencés par les apports de la Seine, qu'ils soient particuliers microbiologiques ou chimiques. En effet, ce territoire est le siège d'une activité touristique importante (Deauville, Trouville, Etretat, les plages du débarquement, etc.), mais est également l'une des plus importantes zones de conchyliculture française. En lien avec les apports de la Seine, ce secteur du continuum est particulièrement sensible au problème d'eutrophisation des eaux et aux efflorescences d'algues toxiques qui en découlent. Par ailleurs, la surveillance de la qualité de l'eau des zones de baignades et de pêche est également étroitement liée au transport sédimentaire et en particulier des particules potentiellement contaminées issues de l'érosion du bassin versant de la Seine. La bouée SMILE permet aujourd'hui de caractériser cet environnement côtier (cf. § II.).

II. Les dispositifs actuels

Les différents domaines présentés au paragraphe I.3 font actuellement l'objet de suivis indépendants visant des objectifs différents.

CARBOSEINE :

Mis en place en 2010, dans le cadre du programme PIREN Seine, le réseau CARBOSEINE comporte trois stations situées à l'aval de Paris entre Suresnes et Andrésy. Huit paramètres physico-chimiques (*Conductivité, T°, O2 dissous, turbidité, pH, chlorophylle multi-classes d'algues et phosphore réactif soluble*) et six paramètres météorologiques (*T°air, humidité relative, pression atmosphérique, vent (vitesse et direction), pluviométrie et irradiance*) sont mesurés toutes les 15 minutes (*sauf pour le phosphore mesuré toutes les 4hr*). Actuellement, les données issues du réseau CARBOSEINE sont principalement dédiées à l'étude des flux de matière en suspension et des cycles bio-géochimiques du carbone, de l'oxygène et du phosphore.

Les partenaires du réseau CARBOSEINE sont :



SYNAPSES :

Opérationnel depuis janvier 2012, le réseau SYNAPSES permet le suivi de la qualité de l'eau en estuaire de la Seine. L'architecture de ce réseau repose principalement sur les infrastructures, mises à disposition par le GPMR. Actuellement, 6 marégraphes ont été équipés de sondes de mesures multi paramètres. Les sites de mesures sont localisés à Rouen, Val-des-Leux, Heurteauville, Tancarville, Fatouville et Balise A. La turbidité, la concentration en oxygène, le pH, la conductivité des eaux et la concentration en chlorophylle A sont mesurés toutes les 5 minutes. Depuis 2014, ce réseau est inscrit dans le Service National d'Observation DYNALIT de l'INSU/CNRS soutenu par la Fédération de Recherche FR CNRS 3730 SCALE. L'objectif principal est l'étude des flux sédimentaires en estuaire, à l'interface entre le continent et le milieu côtier.

Les partenaires du réseau SYNAPSES sont :



D4-La Carosse

La bouée D4-La Carosse a été déployée en mars 2015 à la limite entre l'estuaire et la baie de Seine. Elle contribue à observer la dynamique des matières en suspension et notamment les interactions entre les particules minérales issues de l'érosion du bassin versant et la matière organique produite en baie de Seine. Ces mesures permettent de caractériser et quantifier les échanges sédimentaires entre l'estuaire et la baie et leurs modalités en fonction des forçages hydrodynamiques et hydro-météorologiques. La bouée D4-Carosse se compose de deux ensembles : une station de fond associée à une bouée de surface. La station de fond accueille un profileur de courant mesurant également les vagues, un

turbidimètre et un altimètre suivant l'évolution du fond. En surface une sonde multi-paramètres mesurant les principaux paramètres physico-chimiques (*température, salinité, turbidité*) est complétée par une station météorologique. Les partenaires de la bouée D4 Carosse sont :



SMILE

La bouée instrumentée SMILE a été mise à l'eau en baie de Seine le 4 juin 2015 dans le cadre d'un partenariat entre l'Université de Caen (CREC station marine), l'Ifremer et la société NKE. La bouée est équipée d'une station météorologique, d'un système mesurant la température, la salinité, la turbidité, l'oxygène, la biomasse de chlorophylle a et la production primaire (en cours de mise en place). Le déploiement d'un système de mesure de la production primaire à haute fréquence sur une bouée est novateur. Cette bouée se situe sur un point du réseau de suivi SOMLIT. Ce suivi complémentaire basse fréquence assure la validation des données SMILE acquise à haute fréquence. En 2016, la bouée devrait être équipée d'un auto-analyseur de sels nutritifs et d'échantillonneurs passifs pour suivre les contaminants. L'un des objectifs de la bouée SMILE est d'acquérir des données permettant de mieux comprendre la dynamique de la productivité primaire de différents groupes phytoplanctoniques ; et ainsi mieux caractériser la dynamique du phytoplancton dont certaines espèces peuvent être toxiques.

Les partenaires de la bouée SMILE sont :

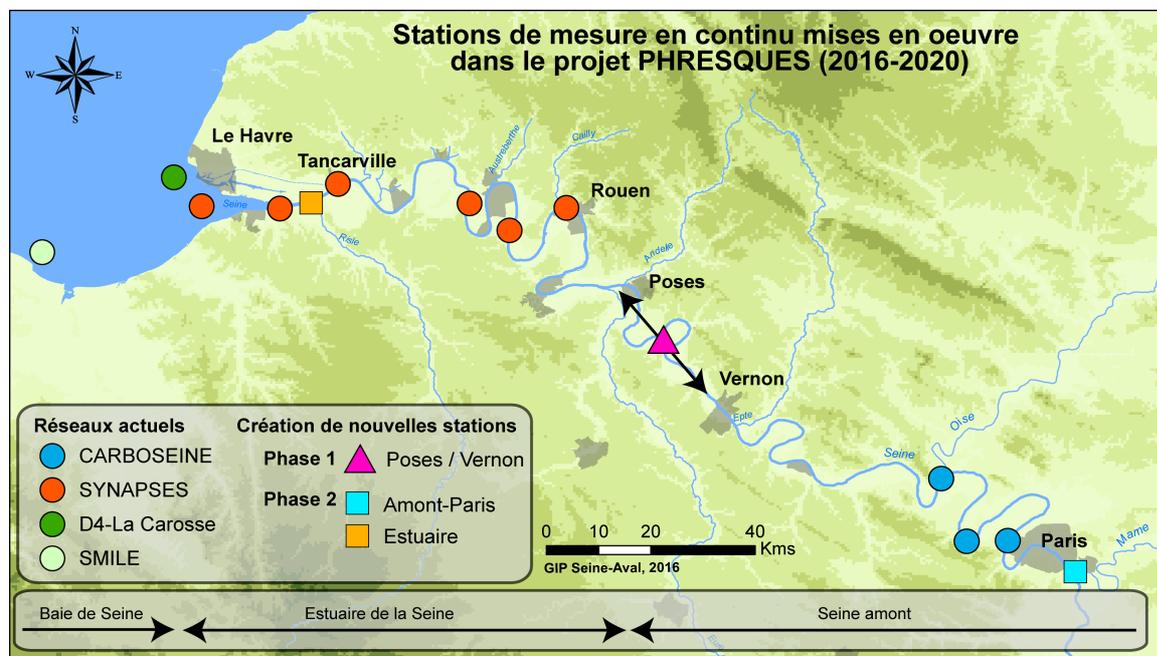


Figure 1 : Localisation des stations de mesure existantes et envisagées

III. Le projet PHRESQUES

Le projet PHRESQUES est un projet en deux phases, qui s'articule autour de 4 grandes actions :

- l'**harmonisation** des approches métrologiques et méthodologiques actuellement appliquées sur les réseaux existants,
- le **renforcement** spatial des réseaux et l'instrumentation de certains sites clefs non suivis pour le moment,
- l'**innovation** et le test de nouvelles technologies de capteurs permettant le suivi de nouveaux paramètres, qui amélioreront notre connaissance des processus sur le continuum,
- la **coordination et la valorisation** de la démarche et des données acquises dans le cadre du projet.

Au travers de ces différentes actions (détaillées au paragraphe IV), le projet PHRESQUES vise à mettre en place un suivi homogène et cohérent du continuum Seine.

Fort de son expérience dans le pilotage de démarche scientifique à visée opérationnelle mobilisant des équipes de recherche pluridisciplinaires, le GIP Seine-Aval se propose d'animer un consortium composé d'équipes scientifiques impliquées dans les dynamiques de recherche structurées de longue date : les programmes PIREN-Seine et Seine-Aval. Ces programmes s'investissent dans le développement d'indicateurs et dans la mise en place d'outils prédictifs. Ces dynamiques de recherche renforcent actuellement leur synergie dans le cadre de la zone atelier Seine. Un des intérêts majeurs du projet est de créer une synergie entre les différents acteurs de ces suivis pour disposer à terme d'un réseau cohérent à l'échelle du continuum Seine.

Les principaux partenaires du projet sont :

- le Centre de Recherche en Environnement Côtier (CREC) de l'Université de Caen-Normandie
- le Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIP Seine-Aval)
- l'Ifremer
- l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP)
- le Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement de la Seine (PIREN Seine)
- la Fédération de Recherche CNRS3730 SCALE (Sciences Appliquées à L'Environnement)
- l'Unité Mixte de Recherche CNRS 6143 M2C Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C)
- l'Unité Mixte de Recherche BOREA Biologie des ORganismes et Ecosystèmes Aquatiques

IV. La première phase du projet PHRESQUES

La première phase du projet pourrait se dérouler de juin 2016 à juin 2018, la deuxième de juin 2018 à décembre 2020. Les objectifs de la deuxième phase du projet sont brièvement décrits au paragraphe V, car étant dépendant des résultats de la première phase, ils ne pourront être détaillés qu'à partir du premier semestre 2018.

IV.1 L'harmonisation des différentes approches

Actuellement les données issues des 4 réseaux sont gérées indépendamment, sans concertation entre les différents acteurs. Dans le cadre du projet, il est proposé d'initier une démarche visant à mutualiser les méthodes de validation et de gestion des données. En homogénéisant ces pratiques, cette tâche du projet facilitera l'analyse à l'échelle du continuum Seine, des données issues des réseaux existants.

Dans ce cadre, il est proposé de mettre en place 3 ateliers pour travailler sur la calibration et la validation i/ des données biogéochimiques ii/ des données hydro-sédimentaires et iii/ la mise en place d'une stratégie de gestion des données unique à l'échelle des 4 réseaux.

IV.1.1 Mise en cohérence des mesures de la biomasse phytoplanctonique à l'échelle du territoire :

Nous proposons ici de quantifier et caractériser la biomasse phytoplanctonique le long du continuum en utilisant des approches optiques basées sur des mesures de fluorescence de la chlorophylle résultant d'une excitation à différentes longueurs d'onde (fluorimétrie multibandes). Cette méthode permet une estimation de la biomasse et sa répartition entre les différentes grandes classes pigmentaires des assemblages phytoplanctoniques. Une information sur la qualité physiologique des microalgues par classes pigmentaires peut également être déterminée en estimant le rendement quantique du photosystème II (Capteur type AOA-BBE). Cette méthode permet de caractériser la teneur en chlorophytes, cyanobactéries, chromophytes (diatomées et dinoflagellés) et cryptophytes sans plus de distinction.

Des mesures de ce type, réalisées de 2011 à 2014 sur la Seine à l'aval de Paris et le long de l'estuaire en juillet 2015, ont confirmé le potentiel de cette approche. En effet, les changements de masse d'eau sont accompagnés de modifications importantes de la qualité pigmentaire du compartiment phytoplanctonique. Ces types de données doivent nous permettre de mieux appréhender la dynamique de ce compartiment, qui est généralement résumé à la seule chlorophylle a. Ces mesures sont facilement mises en œuvre mais elles nécessitent des calibrations en laboratoire, des « empreintes » des grands groupes pigmentaires. Ces empreintes étant influencées par la structure de la communauté et les espèces présentes, un travail de calibration adapté au continuum devra donc être entrepris. L'expertise de BOREA sur le phytoplancton et sa photobiologie, permettra une telle calibration en collaboration avec l'IPGP. Il en résultera deux voies d'utilisation des mesures fluorimétriques brutes : (i) l'exploitation des données à partir des calibrations en usine, immédiatement disponibles fournira un signal homogène appelé « empreinte spectrale de

l'écosystème » et (ii) une exploitation plus raffinée et spécifique des différentes espèces présentes et de leur état physiologique sera menée en tirant parti d'autres éléments de connaissance du système (espèces majoritaires présentes, concentration en matières en suspension et sels nutritifs également mesurés grâce au réseau).

En lien avec cette action, la fiabilité de ces mesures dans l'estuaire sera testée (cf. § III.3.1).

Cet atelier biogéochimie sera co-porté par l'UMR BOREA et l'IPGP. Le coût de la mise en place de cette démarche et des campagnes de mesures de calibration à l'échelle du continuum, est estimé à 88 589 € TTC.

IV.1.2 Mise en cohérence des mesures hydrosédimentaires

Le réseau PHRESQUES, reposant sur les stations présentes aujourd'hui ou envisagées à l'échelle du projet, permet de caractériser l'ensemble des gradients hydro-sédimentaires présents le long du continuum Axe Seine. Le réseau CARBOSEINE précise les apports et flux de matières en suspension à l'aval de la métropole parisienne. La création d'une nouvelle station à Poses (cf. § IV.2.1) permettra de réaliser un bilan de sortie du système continental et constituera une référence à l'entrée du système estuarien. Le réseau SYNAPSES contribue à l'étude des flux au sein de l'estuaire, avec les transferts amont/aval, les mécanismes complexes associés au bouchon vaseux et à sa dynamique spatiale et temporelle. La station D4 fait le lien entre l'estuaire et la baie de Seine et les échanges de matière entre ces compartiments, en fonction des forçages hydrologiques mais également météorologiques. La station SMILE caractérise la baie de Seine et le lien entre apports (continentaux et marins) et productivité phytoplanctonique.

Trois actions associées aux mesures hydrosédimentaires sont donc envisagées en phase 1 :

- i) Une harmonisation des protocoles métrologiques de la mesure de la turbidité ainsi que l'établissement d'une stratégie de calibration optimale des capteurs pour la quantification de la concentration massique (g/l). Ce volet associera une réunion de concertation des différents acteurs du projet, ainsi que des ateliers de calibration et d'inter comparaison métrologique.
- ii) Un volet complémentaire relatif à l'évaluation de la représentativité des mesures locales vis-à-vis de la section sera également réalisé en s'appuyant sur l'expérience acquises avec le projet SUSPENSE² associé au réseau SYNAPSES.
- iii) La validation d'un prototype de préleveur automatique sur seuils de turbidité permettant d'automatiser la calibration des capteurs de turbidité.

Le coût de cette tâche est estimé à 56 580 € TTC.

² Le projet SUSPENSE vise à améliorer notre connaissance de la dynamique des matières en suspension (MES) en estuaire de Seine. Issu d'un besoin du GIP Seine-Aval : connaître la représentativité des mesures de turbidité du réseau SYNAPSES et de les exploiter pour déterminer des flux sédimentaires, ce projet se base sur une thèse intitulée " Flux sédimentaires en estuaire de Seine : quantification et variabilité multi-échelle sur la base de mesure de turbidité", qui a débuté en octobre 2014.

IV.1.3 Vers une stratégie unique de gestion des données

Afin de faciliter les échanges de données entre les différents acteurs du continuum, nous proposons de mettre en place une stratégie unique de gestion des données à l'issue de ce CPIER. Dans la première phase (jusqu'en 2018), nous proposons de travailler sur l'homogénéisation des référentiels de données et sur la mise en place d'un site web dédié aux réseaux de suivi en continu du système Seine. Ce site web ne permettra pas, dès la première phase, de consulter l'ensemble des données issues des 4 réseaux, mais redirigera l'internaute vers les sites des réseaux CARBOSEINE et SYNAPSES. Ce travail nécessitera de réunir toutes les équipes impliquées dans le projet au moins 3 fois et mobilisera le personnel du GIP Seine-Aval. Le budget nécessaire, à l'animation de ce groupe de travail et à la réalisation d'une première version d'un site web, est estimé à 9 706€ TTC.

IV.2 Le renforcement des dispositifs existants

IV.2.1 L'interface amont/estuaire : un enjeu crucial pour la cohérence des suivis

La répartition spatiale des réseaux met en évidence l'absence de suivi à l'interface entre les masses d'eau continentale et estuarienne, suivies respectivement par les réseaux CARBOSEINE et SYNAPSES (cf. Figure 1). Que ce soit pour l'étude des processus biogéochimiques ou hydro-sédimentaire, les données à cette interface constituent le véritable chaînon manquant dans l'étude des processus continentaux et estuariens. **L'installation d'une station de mesure à l'amont immédiat du barrage de Poses constitue la priorité de la première phase du projet.** Cette station, complétera le réseau de mesures amont afin de comprendre l'influence à large échelle de l'agglomération parisienne sur l'écosystème Seine, et fournira les flux de matières entrant dans la zone estuarienne. De plus, en adéquation avec la démarche de Zone Atelier Seine, cette station renforcera les liens existants entre les programmes de recherche PIREN-Seine et Seine-Aval. A ce titre, il est proposé que ce site soit en cogestion entre ces deux acteurs.

Les caractéristiques envisagées pour cette station de mesure seraient analogues à celles des stations CARBOSEINE (Figure 2). Le coût d'une telle station de mesure (*comprenant la structure, l'automate de contrôle, la liaison GPRS, le système de réception des données, la sonde multiparamètres, le spectrofluorimètre multiclassés d'algues et l'analyseur de phosphate*) est estimé à 160 000 €. Pour mener à bien cette installation, une assistance à maîtrise d'ouvrage et des moyens humains sont nécessaires pour permettre le déploiement de la station dans des délais compatibles avec la phase I du projet PHRESQUES. La mission de cette assistance à maîtrise d'ouvrage sera d'établir la pré-étude, de gérer les appels d'offres, l'administration et le contrôle jusqu'à réception de la station.

Au total, l'installation de cette nouvelle station nécessiterait un budget de 301 279€ TTC.

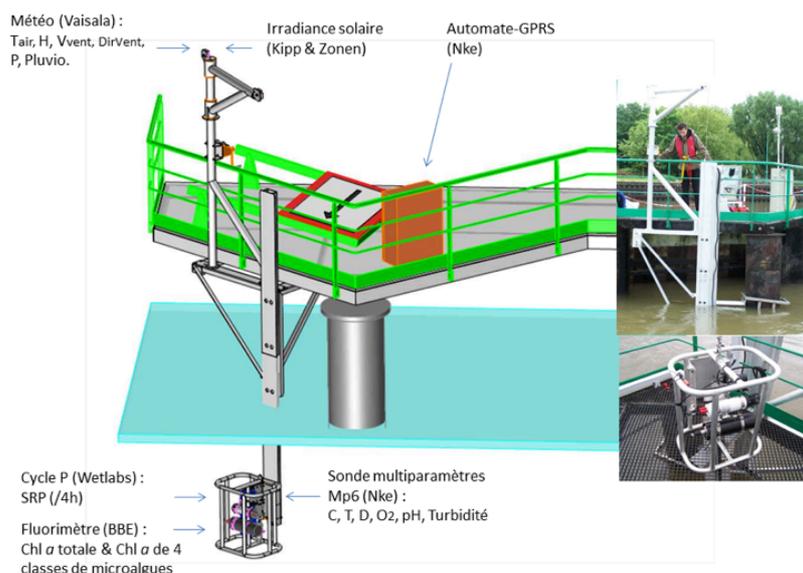


Figure 2 : Aperçu de la station de mesure en continu envisagée pour l'amont de Poses

IV.2.2 Mise à niveau de la station D4-La Carosse : suivis biogéochimiques à l'interface estuaire / Baie de Seine

L'estuaire constitue l'exutoire des apports continentaux au domaine marin, qu'ils soient sédimentaires ou biogéochimiques. La dynamique à l'interface entre l'estuaire et la baie de Seine est associée à différents processus clés de cet écosystème : i) la quantification des flux sédimentaires nets à l'embouchure, en lien avec les différents forçages hydrodynamiques et hydro-météorologiques, ii) en corolaire l'évaluation de la turbidité ambiante et iii) la biodisponibilité de la lumière et la quantification de la production primaire à proximité immédiate de l'embouchure, en lien avec les problématiques d'eutrophisation et d'efflorescence algales. La station D4-La Carosse qui est positionnée dans cette zone de transition (cf. Figure 1), permet d'évaluer les transferts au jusant entre estuaire et baie et ; à marée haute d'être représentative des eaux de la baie de Seine et ainsi évaluer la turbidité et biomasse phytoplanctonique associée. Elle constitue le **point de mesure complémentaire indispensable entre la baie de Seine et l'amont de Poses**. La station D4-Carosse est située à l'embouchure, à l'intersection de trois forçages majeurs : la marée, le débit de la Seine et la houle. Ces forçages, aux échelles de temps très hétérogènes, génèrent de nombreux gradients spatiaux (horizontaux et verticaux) et temporels (de l'événement à l'échelle annuelle). Ainsi, le panache en sortie d'estuaire est principalement développé en surface, tandis que le courant de marée et les tempêtes induisent des remises en suspension près du fond. La dynamique de phytoplancton est elle aussi associée à une forte variabilité sur l'ensemble de la colonne d'eau. Ces deux compartiments (sédiment et biogéochimie) sont en étroite interaction, à travers les processus d'agrégation/fragmentation, qui vont contrôler directement les transferts de matières (organiques et minérales) qu'ils soient horizontaux (import/export) ou verticaux : sédimentation/remobilisation.

Le renforcement de la bouée D4-La Carosse nécessiterait d'en revoir la structure physique et électronique, car cette dernière n'était pas conçue comme une station long terme, et souffre d'un manque de modularité et de facilité de mise en œuvre et de maintenance. Les gradients attendus nécessitent une observation à la fois en surface et au fond, avec

notamment l'implantation de capteurs optiques mesurant fluorescence et turbidité. Pour une cohérence accrue du méta-réseau PRHESQUES, le capteur de fluorescence de surface sera identique à celui utilisé à la fois à l'amont (Stations CarboSeine et Vernon). La sonde multiparamètre de surface sera équipée en plus des paramètres hydrologiques usuels d'un capteur d'oxygène dissous. La modularité de la station sera accrue de façon à pouvoir accueillir de nouveaux capteurs lors de la seconde phase du projet.

Le coût de cette mise à niveau de la station "D4-La Carosse" est de 227 235€ TTC.

Le courant de marée et la houle sont deux forçages forts de la zone de transition estuaire/baie de Seine. A ce titre, leur quantification permettrait une meilleure compréhension des observations sédimentaires et biogéochimiques. L'implantation d'un courantomètre acoustique profilant la vitesse sur l'ensemble de la colonne et mesurant les principaux paramètres de vagues est donc proposée. Son déploiement permettrait également d'estimer la concentration en MES sur l'ensemble de la colonne d'eau en inversant le signal acoustique rétrodiffusé, apportant ainsi la capacité d'évaluer finement les gradient verticaux de MES et de quantifier les flux de matières associés (cf. §III.3.4).

IV.3 Innovation

IV.3.1 Vers la mise en œuvre des suivis biogéochimiques en estuaire

Les capteurs de fluorimétrie multibandes décrits au paragraphe IV.1.1, qui permettent d'estimer la biomasse algale totale et les grands groupes pigmentaires, n'ont jamais été testés à long terme en condition estuarienne (fortes variations, de la salinité, des courants et de fortes charges en suspension). Cependant, leur intérêt scientifique a été mis en évidence dans les campagnes SUSPENSE et PROUESSE³. Avant d'envisager leur installation dans le cadre d'un réseau de mesure en continu pérenne, il s'avère indispensable de vérifier leurs résistances dans ce milieu et la fiabilité de leur calibration. Si cette phase s'avère concluante, il pourrait être envisagé d'équiper une des stations SYNAPSES de l'un de ces capteurs durant la deuxième phase du projet. Cette tâche serait prise en charge par l'UMR BOREA/CREC de l'UniCaen. Le coût associé à cette phase de test métrologique est de 56 292€.

IV.3.2 Vers le suivi du cycle du carbone en continu

Le carbone organique dissous et la pression partielle de CO₂ sont des paramètres clés pour mieux quantifier les flux exportés de carbone, et comprendre les processus à l'œuvre. Actuellement, nous n'avons aucun retour d'expérience sur la pertinence de ces capteurs pour faire du suivi en continu en milieu naturel. Il est donc envisagé de mener une étude des systèmes disponibles et des différentes technologies dans le cadre de ce projet. Cette partie est incontournable, afin de bien tester leur adéquation avec la mesure dans l'écosystème. Si cette phase de test s'avère concluante, l'installation de ces capteurs sera proposée dans la

³ Le projet PROUESSE vise à évaluer la dynamique spatiotemporelle de la production primaire (benthique et planctonique) et de la biodiversité du compartiment phytoplanctonique dans le secteur soumis au gradient de salinité.

seconde phase du projet. Ces mesures permettront alors de rendre beaucoup plus robustes les bilans de phosphore et de biomasse algale. En complément, les données de flux de carbone obtenues par ces approches en milieu côtier seront mises en parallèle avec les estimations de production primaire de carbone mesurées sur la bouée SMILE à l'aide d'un Fast Repetition Rate Fluorometer (FRRF), ce qui apportera une vision fiabilisée et très innovante de ces flux. Pour cette partie du projet, le coût d'étude et d'achat du matériel associé est estimé à 104 338€.

IV.3.3 Suivi des sels nutritifs en continu

Les sels nutritifs représentent un enjeu en termes de gestion tant au niveau de leurs concentrations que de leurs proportions respectives. Lors du programme LITEAU FLAM (2013-2015), qui traitait de la problématique du phytoplancton toxique notamment en baie de Seine ; il a été confirmé que les problèmes de dystrophie jouaient probablement un rôle clé dans l'apparition de certaines espèces toxiques au-delà de la concentration absolue en éléments nutritifs. Il ne s'agit donc pas uniquement de déterminer les limitations ou au contraire des risques d'eutrophisation par rapport aux concentrations mais également d'appréhender la dynamique des ratios entre les sels nutritifs.

Un suivi automatisé des sels nutritifs doit être mis en place sur la bouée SMILE (nitrates-nitrites ; phosphates, ammonium, silicates) dans le cadre du programme SMILE en 2016. Il serait pertinent de pouvoir équiper d'autres stations dans le cadre du projet PHRESQUES pour mesurer les concentrations en sels nutritifs à haute fréquence le long du continuum. Le suivi du phosphore réactif dissous est déjà opérationnel à l'échelle du réseau CarboSeine, et sera déployé plus largement au sein du réseau PHRESQUES. Par contre, la mesure des nitrates, nitrites et de l'ammonium étant complexe à mettre en œuvre, une étude de faisabilité et des tests préalables, à l'interface amont/estuaire, sont proposés en phase 1. Cette tranche du projet est estimée à 86 461 € TTC.

IV.3.4 Hydrodynamique et MES par acoustique

Les stations du réseau PHRESQUES permettent l'acquisition haute fréquence de paramètres de suivi de la qualité des eaux du bassin versant de la Seine à la proche baie de Seine de manière ponctuelle. L'analyse de ces observations et l'estimation des flux d'eau et de matières, dissoutes et particulaires, nécessitent une connaissance fine des forçages hydro-météorologiques et hydrodynamiques. Au sein du continuum Seine, les forçages identifiés sont à la fois le débit du fleuve, les courants de marée et la houle. Si le débit varie saisonnièrement, l'intensité des courants de marée varie à la fois temporellement (échelle semi-diurne et semi-lunaire) mais également spatialement, avec un renforcement des courants avec la convergence de l'estuaire. La propagation de la houle en baie de Seine et à l'embouchure est fortement contrainte par le frottement sur le fond, croissant avec la diminution de la profondeur d'eau à la côte. Si l'intensité des vagues diminue rapidement vers l'amont (estimée négligeable par rapport à l'action du courant à l'amont du pont de Normandie), elle est importante en baie de Seine et à l'embouchure.

Cette action permettrait de mesurer en temps réel par ADCP :

- des profils horizontaux transversaux dans la partie fluviale afin de quantifier au mieux les débits liquides.
- des profils verticaux du courant et les paramètres de houle aux sites où les profondeurs et les gradients hydrologiques verticaux sont importants.

Outre la quantification des forçages hydrodynamiques, les mesures ADCP permettent la quantification des MES le long du profil acoustique via des méthodes d'inversion éprouvées dans le cadre de projets précédents (EC2CO/Seine Aval FLUMES). Ainsi, les gradients verticaux de MES en baie de Seine pourraient être quantifiés, apportant une meilleure quantification des flux de MES.

Dans la zone fluviale chenalisée (Poses), les mesures horizontales permettraient d'associer à une quantification fine des courants sur la section une quantification des MES et de leur possible variabilité transversale et ainsi évaluer les flux de MES au droit de la station de mesure.

En milieu côtier, les ADCP "verticaux" permettent, en plus de mesurer la répartition spatiale des courants et des MES, de caractériser également la houle. A l'embouchure de l'estuaire de la Seine, les flux sédimentaires sont étroitement liés à l'agitation marine (houles/vagues) et aux contraintes qu'elle génère sur le fond. La connaissance de ce paramètre est donc essentielle à la compréhension des flux sédimentaires à l'embouchure de l'estuaire.

L'action hydrodynamique et MES par acoustique se distribue sur les deux phases de PHRESQUES. Les deux actions proposées en phase 1 sont

- l'installation d'un ADCP horizontal à l'interface amont/estuaire estimée à 94 556 € TTC
- l'installation d'un ADCP vertical à l'interface estuaire/baie de Seine estimée à 54 879 € TTC

En phase 2, la station SMILE en baie de Seine et la station "estuaire" (cf. §IV) pourraient être équipées (objectifs similaires à la station D4) et une réflexion sera menée sur la possibilité de déployer un ADCP en amont de Paris et dans la station estuaire.

IV.4 Coordination et animation de la démarche

La mise en cohérence de l'ensemble des démarches, actuellement indépendantes, nécessite un important travail de coordination. Outre les tâches administratives (contractualisation, financement, etc.), cette coordination globale du projet nécessitera la tenue d'au minimum 2 réunions par an. Une de ces réunions sera dédiée à la présentation de l'avancement du projet aux financeurs. Enfin il est proposé d'organiser un séminaire de valorisation du projet et de ces résultats en fin de première phase. Ce séminaire sera l'occasion, pour les scientifiques et les gestionnaires du territoire, d'échanger au sujet de la seconde phase du projet. Cette tâche de portage et d'animation du projet serait prise en charge par le GIP Seine-Aval. Son coût est estimé à 24 445 € TTC.

v. Perspectives pour la seconde phase du projet 2018-2020

A l'issue de la première phase, une véritable dynamique cohérente de suivi des évolutions biogéochimiques et hydrosédimentaires aura été mise en place. Les développements méthodologiques et l'expérience acquise dans le projet auront renforcé les liens entre les différents acteurs du suivi en continu, et permettront de proposer dans une seconde phase de nouvelles actions qui amélioreront encore notre compréhension des évolutions de la qualité de l'eau sur le continuum Seine. Les grandes actions actuellement envisagées pour cette phase ultérieure sont :

- la poursuite de la dynamique initiée en phase 1,
- la mise en place d'un système commun de gestion/valorisation web de la donnée,
- l'installation d'une ou deux nouvelles stations à l'amont de Paris, afin de mieux estimer l'impact de l'agglomération parisienne sur la qualité de l'eau,
- l'installation d'une nouvelle station en estuaire, afin de mieux cerner le rôle épurateur de l'estuaire de la Seine,

Sous réserve, que les résultats de la phase 1 soient probants, l'enveloppe budgétaire de la phase 2 est actuellement estimée à 1 200 000€ TTC.

CONCLUSION

La réalisation du projet permettra d'équiper le continuum Seine de l'un des réseaux de suivi de la qualité de l'eau des plus performants à l'échelle mondiale. En effet, le méta-réseau PHRESQUES permettra de suivre 10 paramètres caractérisant le fonctionnement de l'hydro système sur près de 400 km (Figure 3). En améliorant notre compréhension des mécanismes amont-aval les mesures produites par le réseau permettront aux gestionnaires d'identifier les leviers de gestion permettant d'améliorer la qualité de l'eau. Dans un second temps, les données issues du réseau pourront être utilisées pour suivre et évaluer l'effet des mesures de gestion sur la qualité du milieu. Ainsi, au-delà de son intérêt scientifique, le réseau constituera pour les gestionnaires un outil de suivi du fonctionnement de l'écosystème Seine performant et particulièrement pertinent dans le contexte actuel de changement climatique.

Synthèse des mesures mises en œuvre dans le cadre du projet PHRESQUES

		8 stations sur 3 domaines couverts par Phresques					Suivi Homogène sur le continuum à l'issu de PHRESQUES	
		2 stations baie de Seine		1 station Estuaire	5 stations amont			
	Mesures	SMILE (1)	D4 (1)	SYNAPSES (1*)	POSES (1)	CARBOSEINE (3)		Amont de Paris (1)
PHRESQUES (Phase 1 +Phase 2)	température	X	X	X	X	X	X	✓
	O2	X	X	X	X	X	X	✓
	conductivité	X	X	X	X	X	X	✓
	pH	X	X	X	X	X	X	✓
	turbidité	X	X	X	X	X	X	✓
	biomasse algale	X	X	X	X	X	X	✓
	pCO2 & CDOM	X	X	X	X	X	X	✓
	sels nutritifs P	X		X	X	X	X	✓ sauf D4
	sels nutritifs N	X			X	X	X	✓
	météo	X	X	X	X	X	X	✓
	courant & MES (acoustique)	X	X		X		X	✓

X = Actuellement opérationnel	X = Installation en 1ere phase	X = Installation en 2ieme phase
-------------------------------	--------------------------------	---------------------------------

(x) = nombre de station *: une seule des 5 stations SYNAPSES évoluera dans le cadre de PHRESQUES

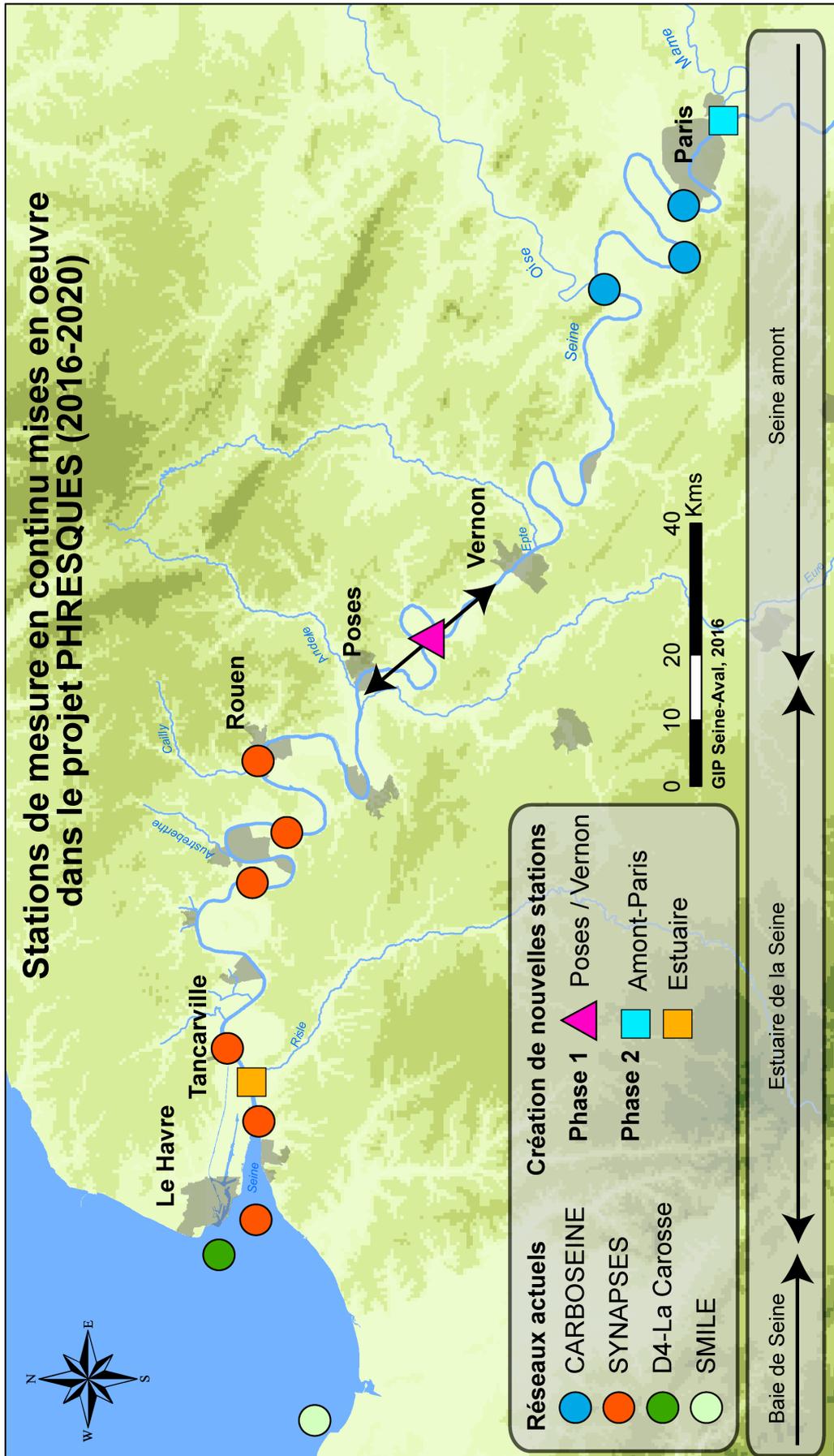
Figure 3 : Synthèse des mesures mises en œuvre dans le cadre du projet PHRESQUES

Synthèse des coûts envisagés (phase 1 : 2016-2018)

Action	Paragraphe correspondant dans la proposition	Organisme Référent	Secteur géographique concerné	Nature de la dépense		Coût € HT	Total par tâche		
							€ HT	€ TTC	
Harmonisation	Mise en place d'une démarche cohérente de calibration validation des données biogéochimiques	IV.1.1	UMR BOREA / IPGP	Continuum Seine	Investissement	Moyens de mesure	0	85 550	88 589
						Installation	0		
					Fonctionnement	Moyens humains	70 800		
						Frais de missions et consommables	14 750		
Harmonisation	Mise en place d'une démarche cohérente de calibration validation des données hydrosédimentaires	IV.1.2	M2C / IFREMER	Continuum Seine	Investissement	Moyens de mesure	12 000	50 400	56 580
						Installation	0		
					Fonctionnement	Moyens humains	20 400		
						Frais de missions et consommables	18 000		
Renforcement	Installation d'une nouvelle station à Poses	IV.2.1	PIREN-Seine	Interface amont/estuaire	Investissement	Moyens de mesure	59 930	263 755	301 279
						Installation	103 225		
					Fonctionnement	Moyens humains	81 600		
						Frais de missions et consommables	19 000		
Renforcement	Mise à niveau de la station "D4-La Carosse"	IV.2.2	Ifremer	Interface estuaire /baie de Seine	Investissement	Moyens de mesure	39 800	194 547	227 235
						Installation	66 600		
					Fonctionnement	Moyens humains	35 866		
						Frais de missions et consommables	52 281		
Innovation	Test des capteurs biogéochimiques en estuaire	IV.3.1	UMR BOREA	Estuaire	Investissement	Moyens de mesure	25 000	49 700	56 292
						Installation	0		
					Fonctionnement	Moyens humains	17 700		
						Frais de missions et consommables	7 000		
	Test des capteurs "carbone"	IV.3.2	IPGP /UMR BOREA	Seine amont	Investissement	Moyens de mesure	67 600	90 000	104 338
						Installation	0		
					Fonctionnement	Moyens humains	20 400		
						Frais de missions et consommables	2 000		
	Test d'un auto analyseur de sels nutritifs	IV.3.3	UMR BOREA	Interface amont/estuaire	Investissement	Moyens de mesure	36 500	77 500	86 461
						Installation	0		
					Fonctionnement	Moyens humains	34 000		
						Frais de missions et consommables	7 000		
Hydrodynamique et MES par mesure acoustique amont/estuaire	IV.3.4.a	M2C	Interfaces amont/estuaire	Investissement	Moyens de mesure	60 000	78 900	94 556	
					Installation	8 000			
				Fonctionnement	Moyens humains	2 900			
					Frais de missions et consommables	8 000			
Hydrodynamique et MES par mesure acoustique estuaire/baie	IV.3.4.b	IFREMER	Interfaces estuaire/baie de Seine	Investissement	Moyens de mesure	24 900	46 000	54 879	
					Installation	6 600			
				Fonctionnement	Moyens humains	2 900			
					Frais de missions et consommables	11 600			
Coordination & Valorisation	Coordination et valorisation Rapport d'avancement du projet et séminaire de restitution	IV.4	GIP Seine-Aval	Continuum Seine	Investissement	Moyens de mesure	0	22 900	24 445
						Installation	0		
					Fonctionnement	Moyens humains	15 400		
						Frais de missions et consommables	7 500		
Coordination & Valorisation	Mise en place d'un référentiel unique de données	IV.1.3	GIP Seine-Aval	Continuum Seine	Investissement	Moyens de mesure	0	9 500	9 706
						Installation	0		
					Fonctionnement	Moyens humains	8 500		
						Frais de missions et consommables	1 000		

	€ HT	€ TTC
<i>Investissement</i>	510 155	615 247
<i>Fonctionnement</i>	458 597	489 112
<i>Frais de gestion (15%)</i>	145 313	165 654
TOTAL (phase 1)	1 114 065	1 270 013

Localisation des stations de mesure existantes et envisagées



Liste des acronymes :

GIE HAROPA : Groupement d'Intérêt Economique HAVre ROuen Paris

GIP Seine-Aval : Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval

GPMR : Grand Port Maritime de Rouen

Ifremer : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

IPGP : Institut de Physique du Globe de Paris

PIREN : Programme Interdisciplinaire de Recherche en Environnement,

FR SCALE : Fédération de Recherche CNRS SCiences Appliquées À L'Environnement

SMILE : Système de Mesure Instrumenté Littoral pour L'Environnement

SOMLIT : Service d'Observation du Milieu LITtoral

SYNAPSES : SYstème de surveillaNce Automatisé de la PhySico-chimie en Estuaire de la Seine.