

Séminaire scientifique 2017 du GIP Seine-Aval

Mai 2017



PREAMBULE

La vallée de la Seine se caractérise par une diversité de milieux terrestres et aquatiques, supports d'un développement socio-économique d'importance nationale et européenne.

Dans ce contexte, l'estuaire de la Seine constitue un site particulier, dont les modalités de fonctionnement physique et chimique dépendent à la fois des apports de son bassin versant et de l'influence de la Manche. D'un point de vue écologique et dans des conditions « naturelles », la dynamique des différents types d'habitats présents confère à l'estuaire des propriétés spécifiques, qui permettent notamment la réalisation de fonctions écologiques majeures. Par exemple, il doit permettre à de nombreuses espèces estuariennes d'assurer la réalisation de tout ou partie de leur cycle de vie. Certains habitats en particulier constituent des zones de nourricerie et de migration de première importance pour des espèces de poissons, mais également une zone de séjour et de nourrissage de nombreuses populations d'oiseaux. En situation optimale, la traversée de l'estuaire par les eaux provenant du bassin versant permet la régulation des apports de nutriments, de contaminants chimiques et microbiologiques vers la mer (phénomènes d'épuration, de transformation, de stockage et de relargage). D'un point de vue socio-économique, il constitue un support incontournable pour de nombreux usages à vocations économiques et récréatives. Il joue un rôle essentiel dans le développement économique national, de la nouvelle Normandie et de l'axe Seine.

L'estuaire représente un système dont les interactions homme-milieu sont au cœur des enjeux d'aménagement du territoire. Ces enjeux orientent l'expression des questionnements cadres des membres du GIP Seine-Aval sur la période 2013-2020 :

- comment apporter des éléments de réponse aux préoccupations environnementales liées aux grands projets structurants et aux changements globaux ?
- comment le système estuarien fonctionne-t-il dans sa globalité ?
- comment évolue-t-il ?
- quels sont les risques encourus sur ce périmètre par les écosystèmes, les hommes et les activités économiques ?
- comment et pourquoi préserver, améliorer et restaurer certaines fonctions et certains services du système ?

Le Programme de recherche Seine-Aval existe depuis 1995 et son pilotage est assuré depuis 2003 par le GIP Seine-Aval. Il a déjà permis l'acquisition de nombreuses connaissances relatives au fonctionnement environnemental de l'estuaire de la Seine. Le programme représente aujourd'hui un des principaux pourvoyeurs de connaissances et permet de fédérer une communauté scientifique pluridisciplinaire autour des problématiques de l'estuaire de la Seine et en lien avec les acteurs du territoire. Depuis fin 2015, il est intégré dans la Zone Atelier Seine du CNRS (INEE) dont l'ambition est de structurer une recherche cohérente et pertinente sur le continuum aquatique depuis l'amont du bassin de la Seine jusqu'en proche baie de Seine et d'intégrer ces objectifs dans une réflexion nationale (réseau des zones atelier) et internationale (LTER).

Le séminaire 2017 a pour objectifs d'échanger sur les résultats des projets de recherche Seine-Aval 5 (2013-2017), disponibles à ce jour ; ainsi que de partager les objectifs des projets de recherche Seine-Aval 6 (2017-2020).

PROGRAMME DE RECHERCHE SEINE-AVAL 5 (2013-2017)

19 PROJETS - 36 EQUIPES

La phase 5 s'est structurée autour des thématiques scientifiques historiques du programme. L'objectif principal recherché était de consolider les connaissances et les outils d'intérêt particulier au regard des enjeux précités. Trois axes sont concernés :

- **Axe 1 : Fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire**
- **Axe 2 : Caractérisation et rôle des habitats**
- **Axe 3 : Anthropisation, contaminations – Où en est le milieu ?**

Cette phase avait également pour ambition de structurer l'intégration des connaissances dans une perspective de fournir des **diagnostics du fonctionnement à l'échelle de l'estuaire et des éléments d'aide à la gestion reposant sur la proposition de scénarios d'évolution.**

Ce recueil permet de rendre compte **des résultats des projets Seine-aval 5 disponibles en mars 2017.** Certains projets se termineront dans le courant de l'année.

Acronyme (année de démarrage)	Titre	Coordonnateur	Résumé
ECHANGES 2014	Interaction entre les différentes masses d'eau estuariennes et bilan hydrique de l'estuaire	J.P. Dupont <i>UMR M2C</i> <i>Université de Rouen</i>	p. 6
AffluSeine 2013	Flux sédimentaires des affluents intra-estuariens de la Seine : Quantification et relation avec les caractéristiques physiographiques des bassins versants	Benoit Laignel <i>UMR M2C</i> <i>Université de Rouen</i>	p. 7
SUSpEnSE 2014	StUdy Sediment fluxEs in the Seine-Estuary	Robert Lafite <i>UMR M2C</i> <i>Université de Rouen</i>	p. 8
HYMOSED 2013	Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-SEDimentaire de l'estuaire de la Seine	Florent Grasso <i>IFREMER – DYNECO/PHYSED</i>	p. 10
BARBÈS 2013	Associations biologiques en relation avec le transport sédimentaire : développement d'un modèle de bioturbation par les ingénieurs d'écosystèmes en estuaire de Seine	Francis Orvain <i>UMR BOREA</i> <i>Université de Caen</i>	p. 12
H2O 2013	Habitats Hétérométriques Originaux	Sandric Lesourd <i>UMR M2C</i> <i>Université de Caen</i>	p. 14
PROUESSE 2013	PROdUction primaire dans l'ESTuaire de SEine	Pascal Claquin <i>UMR BOREA</i> <i>Université de Caen</i>	p. 16
ZOOGLOBAL 2013	Etude du ZOOplancton et de ses habitats estuariens dans un contexte de changement GLOBAL : synthèse des acquis Seine-Aval et initiation d'une nouvelle approche intégrée	Sami Souissi <i>UMR LOG</i> <i>Université Lille 1</i>	p. 18
MODHANOUR 2014	MODÉlisation des HABitats de NOUrriceries en estuaire de Seine	Anik Brind'Amour <i>IFREMER</i>	p. 20
ANTROPOSEINE 2013	ANalyse de la structure TROPhique et cONtribution des habitats de l'estuaire de la SEINE	Nathalie Niquil <i>UMR BOREA</i> <i>Université de Caen</i>	p. 22
ANACONDHA 2015	Analyse spatiale de la connectivité des d'habitats fonctionnels pour les poissons à l'échelle de l'estuaire	Céline Le Pichon <i>Irstea</i>	p. 24
CRAPPSE 2013	Contamination et RéActivité de Pesticides et de Pharmaceutiques dans l'estuaire de SEine : bilan des contaminations, dégradation et impact toxique	Patrick Mazellier <i>UMR EPOC</i> <i>Université de Bordeaux 1</i>	p. 26
MOSAIC 2013	Dynamique de la Matière Organique dans le bouchon vaSeux de l'estuAire de Seine en lien avec les nutriments et les Contaminants organiques	Arnaud Huguet <i>UMR METIS</i> <i>Université Pierre et Marie Curie</i>	p. 28
DYNAPAT 2013	Impact de la dynamique particulière sur le devenir des bactéries pathogènes dans la zone du bouchon vaseux de l'estuaire de Seine	Fabienne Petit <i>UMR M2C</i> <i>Université de Rouen</i>	p. 30
RESET 2013	Rôle de l'estuaire de Seine dans l'écologie territoriale de la Normandie : cycles des nutriments et systèmes hydro-agro-alimentaires.	Josette Garnier <i>UMR METIS</i> <i>Université Pierre et Marie Curie</i>	p. 32
ECOTONES 2014	Effets de la COnTamination sur les OrgaNismes de l'Estuaire de la Seine	Benoît Xuereb <i>UMR-I-02 SEBIO</i> <i>Université du Havre</i>	p. 34
ANPHYECO- SEINE 2014	Analyse du fonctionnement hydrologique, morphologique, sédimentaire et écologique [en vue d'une recherche de pistes de restauration globale] de l'estuaire de la Seine	Stefan Van Damme <i>ECOBE</i> <i>Antwerp University</i>	p. 36

ECHANGES

Interaction entre les différentes masses d'eau estuariennes et bilan hydrique de l'estuaire

Coordination du projet : Jean-Paul Dupont

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR CNRS 6143 M2C, Université de Rouen – Jean-Paul Dupont
- Direction régionale Haute-Normandie du BRGM – Didier Pennequin
- Centre de Géosciences, MINES ParisTech, PSL Research University– Nicolas Flipo

Résumé du projet :

Dans l'appel à projet SA5-2013 lancé en 2013 par le GIP Seine-aval, le questionnement sur les échanges de flux entre la nappe et la Seine aval constitue un enjeu majeur puisque les modifications amont-aval du débit sont susceptibles d'agir sur les mécanismes hydrosédimentaires et biogéochimiques dans la Seine estuarienne. Bien que les conditions en matière de modélisation et de données disponibles ne soient pas réunies pour quantifier réellement les fluctuations spatio-temporelles des apports souterrains à la Seine, un consortium rassemblant l'ensemble des compétences a été constitué pour tester une approche de modélisation distribuée à base physique permettant de fournir une première évaluation des apports souterrains moyens dans le système de la Seine aval comme cela a pu être appliqué au bassin versant de la Seine amont.

Dans le bassin versant Seine aval, la difficulté de la modélisation hydrologique à grande échelle provient des particularités du contexte géologique et géomorphologique et du caractère karstique qui génèrent une forte hétérogénéité des écoulements. En ce qui concerne la recharge, les études locales en plateau montre que les formations superficielles peuvent jouer un rôle de stockage transitoire des eaux et une infiltration concentrée au niveau des bêtouilles vers l'aquifère de la craie sous-jacent. Le drainage karstique vers les vallées doit ensuite expliquer les niveaux de stockage sous les plateaux et, latéralement, les interactions nappe-rivière, prenant en compte le modèle géologique régional et incluant les formations alluviales. Dans le modèle hydrogéologique à grande échelle de la craie, l'objectif est d'affecter, à chaque maille, une valeur de transmissivité hydraulique moyenne permettant de reconstruire, de manière réaliste, la complexité et l'hétérogénéité de ces écoulements verticaux et horizontaux en 2D voire 3D en fonction des fluctuations climatiques. Pour répondre à une telle ambition, le consortium a donc eu pour objectif de rassembler une masse de données et d'observations suffisantes pour contraindre au mieux le modèle pour simuler au mieux les processus d'écoulement. Il a également procédé à des calculs préalables spécifiques sur cinq bassins versants d'affluents de la Seine pour quantifier plus précisément certains paramètres comme la recharge du système aquifère.

En dépit d'une insuffisance des données disponibles (réseau patrimonial piézométrique insuffisant dans l'ensemble des bassins versants et plus particulièrement autour et dans la basse vallée de la Seine), la confrontation des données observées des fluctuations piézométriques dans la craie et du débit des rivières avec les simulations du modèle est relativement satisfaisante et permet de fournir, pour le cycle hydrologique de 17 ans 1997-2014, une comparaison des flux moyens des apports nappe-rivière dans la Seine aval. Comme attendu, les flux calculés sont plus conséquents lors des périodes d'étiage de la Seine..

Des incertitudes subsistent et sont inhérentes à la difficulté de simuler la complexité et l'hétérogénéité des écoulements karstiques dans un modèle régional et ce d'autant plus que nous sommes confrontés à une insuffisance de données hydrologiques disponibles pour mieux contraindre les paramètres hydrauliques introduits dans le modèle.

Fin des travaux de recherche : Juin 2017

Flux sédimentaire des affluents intra-estuariens de la Seine : Quantification et relation avec les caractéristiques physiographiques des bassins versants

Coordination du projet : Benoit Laignel

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR CNRS 6143 M2C, Université de Rouen – Benoit Laignel
- Direction Risque et Prévention, BRGM Orléans – Oliver Cerdan

Résumé du projet :

Les impacts de l'érosion accélérée des sols sont particulièrement présents au niveau des plateaux loessiques normands des bassins versants intra-estuariens de la Seine et des rivières littorales du Pays de Caux (problèmes de pollutions des masses d'eaux, phénomènes de coulées boueuses...), et sont à ce titre étudiés depuis plusieurs décennies. Le projet AffluSeine dans le cadre du programme Seine Aval s'est proposé de :

- Quantifier de manière la plus précise possible les flux sédimentaires de l'ensemble des affluents intra-estuariens à la Seine, en combinant données acquises à base fréquence et celles acquises à haute fréquence, en utilisant différentes méthodes de calculs des flux développées ces dernières années dans la bibliographie, et proposer éventuellement une nouvelle méthode de quantification,
- Proposer une typologie des bassins versants Seine Aval-Manche et mieux comprendre le rôle des bassins versants et de leurs caractéristiques physiographiques sur les flux sédimentaires, à partir d'un croisement statistique de l'ensemble de ces données.

Le premier apport de ce travail a été de montrer que les méthodes d'interpolation et d'extrapolation utilisées dans la littérature (12 algorithmes testés) ne sont pas satisfaisantes et mal adaptées à notre contexte, aboutissant à de mauvaises performances de prédiction des flux sédimentaires, soulignant ainsi que l'utilisation conjointe des concentrations en MES hautes et basses fréquences est difficilement envisageable en l'état pour le calcul de flux sédimentaire.

Le second apport a été de proposer une typologie des bassins versants Seine Aval-Manche composée de 7 groupes de bassins et de montrer que de nombreux paramètres physiographiques sont susceptibles de jouer un rôle sur les flux sédimentaires (à partir d'analyses statistiques : CAH et ACP), ainsi que d'établir des cartes d'identité par bassin versant.

Le troisième apport a consisté à proposer un nouveau modèle de quantification des flux sédimentaires (WSRC : Weighted Sediment Rating Curve) et une méthodologie d'extrapolation régionale pour les rivières ne disposant pas de mesures sédimentaires à haute fréquence, reposant sur un indice de réactivité hydro-sédimentaire (HSR).

La cartographie du flux sédimentaire spécifique moyen ou taux d'érosion moyen (SSY) de chaque rivière du bassin Seine-Aval Manche qui en découle, indique que le SSY varie en moyenne entre 2.7 à 55.9 t.km⁻².y⁻¹, avec des valeurs plus élevées pour les rivières littorales du Pays de Caux que pour les affluents de la Seine... Le flux sédimentaire moyen annuel de la Seine au barrage de Poses est évalué à 494 000 t.an⁻¹, avec un écart type de 288 000 t.an⁻¹. Les apports sédimentaires moyens annuels des affluents intra-estuariens de Seine sont évalués à 55 500 t.an⁻¹, avec un écart type de 46 600 t.an⁻¹. Ils représentent ainsi 10% de l'ensemble des apports sédimentaires à l'estuaire de Seine.

Fin des travaux de recherche : septembre 2016

SUSPENSE

StUdy Sediment fluxES in the Seine Estuary

Coordination du projet : Robert Lafite

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR CNRS 6143 M2C, Université de Rouen – Robert Lafite
- Ifremer – Romaric Verney
- GIP Seine-Aval – Jean-Philippe Lemoine

Résumé du projet :

Les estuaires constituent des zones d'interfaces entre le domaine continental et la mer côtière. Ces zones complexes concentrent des enjeux multiples et croisés, à la fois environnementaux, économiques, sociétaux et scientifiques. La dualité de ces enjeux s'est renforcée au cours de ces dernières années, nécessitant la mise en place de réseaux de surveillance de la qualité des eaux estuariennes (réseau SYNAPSES pour la Seine).

Un verrou pour la prise en compte de ces différents enjeux concerne la quantification des flux sédimentaires et l'analyse de leurs évolutions dans l'estuaire. Le projet SUSPENSE vise à étendre et approfondir notre connaissance de la dynamique des matières en suspension (MES) au sein de l'estuaire en lien avec les principaux forçages et en s'appuyant sur les données acquises par le réseau de mesure SYNAPSES. Ce projet se structure autour de trois axes de recherche :

- l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des matières en suspension, et la quantification des concentrations en MES à partir des mesures de turbidité,
- l'étude de la variabilité transversale des concentrations en MES, et la quantification des flux liquides et solides à l'échelle de cycles de marée
- la mise en place d'une méthodologie de calcul des flux sédimentaires à partir des mesures SYNAPSES et l'analyse de leur variabilité

• **Méthodologie**

Le réseau SYNAPSES permet depuis 2012 un suivi haute fréquence des principaux paramètres caractérisant la qualité de l'eau en estuaire. Il repose sur 5 stations réparties d'amont en aval (Rouen, Val des Leux, Tancarville, Fatouville et Balise A), équipées de sondes multiparamètres YSI6600V2 mesurant température, conductivité, salinité, turbidité, oxygène dissous et fluorescence. Les mesures sont effectuées toutes les 5', a) 1m sous la surface pour les deux stations amont, b) en surface (-1m) et au fond (+1m) pour les stations Tancarville et Fatouville, c) 1m au dessus du fond à Balise A.

Des campagnes de suivi mensuel des caractéristiques des MES ont été effectuées entre janvier 2015 et juin 2016. Les mesures consistent en la réalisation de profils verticaux toutes les 15' (turbidité, spectre de tailles et vitesse de courant) et de prélèvements au fond et en surface toutes les heures. Ces mesures ont été réalisées sur des cycles de marée complets et à proximité immédiate des sondes SYNAPSES.

Des mesures de flux liquides et solides sur les sections SYNAPSES ont été réalisées entre septembre 2016 et avril 2017 pour des débits d'étiage (inférieurs à 300m³/s) et moyens/soutenus (entre 500m³/s et 800m³/s) sur des marées de vives eaux et de mortes eaux. Ces mesures ont été effectuées par ADCP tracté par bateau sur un cycle de marée (une section toutes les 10'), associées à des profils optiques (turbidité et spectre en classes de taille) et des prélèvements en rive droite/gauche et au milieu de section (toutes les heures).

Au total, 81 journées de 13hr de terrain ont été effectuées dans ce projet, constituant ainsi un set de données extrêmement riche et unique en France sur les domaines estuariens.

- **Résultats**

Variabilités spatio-temporelles des caractéristiques des MES

Les observations in situ ont montré une forte dynamique des MES à l'échelle du cycle de marée, associée aux processus de floculation et à l'advection des MES, en particulier dans le bouchon vaseux. Cette dynamique tidale est modulée par une dynamique saisonnière, imposée principalement par le cycle hydrologique, dans une moindre mesure par le contenu en matière organique. Ces travaux ont également permis de quantifier la sensibilité de différents capteurs optiques de turbidité aux propriétés physiques des MES (Druine *et al.*, 2016, Druine *et al.*, in prep.). L'analyse conjointe des données *in situ* et des données SYNAPSES ont permis de calibrer les mesures de turbidité en concentration massique, avec une relation validée sur le cycle annuel et propre à chacune des stations. Une relation unique, inter-sites, est également proposée, associée à une incertitude relative moyenne de l'ordre de 30%. Ce travail a également permis de découvrir et solutionner un dysfonctionnement du système de mesure en surface pour certaines stations SYNAPSES (Druine *et al.*, 2016).

Représentativité des stations SYNAPSES et quantification des flux par section

Une première analyse de la représentativité des mesures SYNAPSES a pu être menée suite aux observations effectuées à partir du NO Côtes de la Manche en 2015 et 2016 à Fatouville, Tancarville et Balise A. Ces observations ont montré un gradient significatif de concentration en MES entre rive droite et rive gauche à Fatouville. Ce gradient a été confirmé lors des mesures ADCP réalisées entre 2016 et 2017 à Fatouville mais reste à évaluer sur les autres stations du réseau.

Analyse des données SYNAPSES

Les données en turbidité et salinité ont été analysées depuis 2012, de façon à proposer une première évaluation des transferts sédimentaires, en fonction des forçages tidaux et hydrologiques. Outre l'établissement de statistiques de turbidité pour chacune des stations SYNAPSES, un focus a été réalisé sur la dynamique du bouchon vaseux, avec la proposition d'un indicateur de positionnement longitudinal (Verney *et al.*, 2016). Ces mesures ont été confrontées aux résultats du modèle hydrosédimentaire validé dans le cadre du projet SA5 HYMOSED (Grasso *et al.*, in revision).

- **Perspectives**

Les mesures acoustiques sont actuellement en cours d'analyse, et permettront d'estimer un flux liquide et solide, instantané et résiduel sur un cycle de marée. Elles permettront également de quantifier la représentativité des mesures locales SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes et des flux solides sur la section. Ce travail permettra à terme d'évaluer notre capacité à quantifier les flux sédimentaires à partir des mesures en continues SYNAPSES.

Fin des travaux de recherche : Décembre 2017

Coordination du projet : Florent Grasso

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- IFREMER, DYNECO/PHYSED – Florent Grasso
- UMR 6538, Domaines Océaniques, LDO – Christophe Delacourt
- GEO-Transfert – Virginie Lafon
- UMR 7093, Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, LOV – David Doxaran
- UMR 6143, M2C – Julien Deloffre

Résumé du projet :

Le projet HYMOSED (« Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-SEDimentaire de l'estuaire de la Seine ») du programme de recherche Seine-Aval 5 avait pour objectif d'apporter une meilleure compréhension du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine à des échelles de temps événementielle à annuelle. Le travail de modélisation s'est appuyé sur un important effort de validation à partir des nombreux jeux de données récemment acquis en estuaire de Seine.

L'analyse de la dynamique du bouchon vaseux met en évidence une translation de sa position vers l'amont par rapport aux observations des années 1980. Alors que la position du bouchon vaseux est contrôlée par le débit et la marée, sa masse est peu influencée par le débit. En revanche, le phasage tidal (i.e. déchet/revif) influence significativement la position et la masse du bouchon vaseux.

L'étude des flux et bilans sédimentaires, basée sur quatre années hydrométéorologiques caractéristiques des vingt dernières années (années moyenne, sèche, humide et tempétueuse), met en évidence une influence variée des forçages (débit, marée, vagues) en fonction des zones de l'estuaire. Le bilan sédimentaire de l'estuaire aval est relativement à l'équilibre pendant une année hydrométéorologique moyenne alors qu'une année tempétueuse provoque une perte significative de sédiment dû au large export vers le large. En revanche, une année très humide (et peu tempétueuse) a tendance à engraisser l'estuaire aval dû au renforcement de la circulation barocline vers l'amont.

Les résultats de la modélisation morphodynamique de l'estuaire de la Seine montrent les capacités du modèle à reconstituer la plupart des patrons d'érosion/dépôts que l'estuaire connaît dans la période étudiée (autour de 2010). Un dépôt excessif sur le banc du Ratier reste cependant à corriger. La modélisation morphodynamique respecte les performances du modèle relatives au transport en suspension et au bouchon vaseux, et permet de restituer les quantités draguées par les Grands Ports Maritimes du Havre et de Rouen. L'utilisation d'un facteur morphodynamique dans un environnement mixte sable et vase a pu être testée : des limites sont apparues, mais l'intérêt de la démarche pour des simulations long terme est confirmé, compte tenu de l'analogie constatée sur les patrons d'évolution morphologique.

Les résultats du projet HYMOSED ont également permis d'apporter un état des lieux des paramètres environnementaux de l'estuaire aval (hydrodynamique, hydrologie, turbidité) pour les années 2010-2011 et 2014-2015, et ainsi de contribuer à l'étude du fonctionnement écologique de l'estuaire. Dans le cadre du programme Seine-Aval, ces résultats ont directement bénéficié à différents projets (ex. ANPHYECO, ZOOGLOBAL, BARBÈS, SUSPENSE et MEANDRES).

Au volet modélisation est associé un volet mesures du projet qui se décompose en deux axes distincts : le suivi des évolutions morphodynamiques des vasières latérales intertidales et la quantification des matières en suspension (MES) de surface par télédétection couleur de l'eau.

L'objectif du premier axe est d'évaluer notre capacité à observer les modifications morphodynamiques des vasières en comparant et combinant trois approches complémentaires (altimétrie ponctuelle ALTUS, topographie TLS (scanner laser terrestre), topographie par drone). Un suivi ALTUS sur 2 ans de trois vasières intertidales à l'aval de Tancarville (Tancarville, Pointe de la Roque, Vasière Nord) a été réalisé, permettant de quantifier l'influence des forçages hydrodynamiques et hydrologiques sur les phases de dépôt et d'érosion. En parallèle de ce suivi continu haute fréquence, les techniques de mesures par TLS et Drone ont été mises en œuvre ponctuellement au cours d'un cycle hydrologique. Les performances (résolution et précision) et limites (importance du géoréférencement fixe) de chacune des techniques ont été quantifiées, et comparées au suivi ALTUS. Les résultats ont montré la parfaite complémentarité des mesures hautes fréquences ponctuelles et basse fréquence spatialisée, ces dernières permettant une estimation des volumes érodés/déposés mais également de suivre les structures micro et moyennes échelles telles que les réseaux de drainage en haut de vasières et les filandres.

Le second axe du volet mesures est de poursuivre le travail engagé dans SA4 MODEL sur l'analyse des images satellites couleur de l'eau pour la compréhension des processus hydro-sédimentaires à l'embouchure de l'estuaire.

Des mesures complémentaires de réflectance et de concentrations en MES dans des zones fortement turbides ont permis de proposer une amélioration de l'algorithme de traitement des données. Ces données satellites ont été analysées par régime de forçages, de façon à caractériser par une métrique simple, la surface cumulée de concentrations supérieure à un seuil, les structures turbides de surface. L'influence du débit, de la marée et des vagues peut ainsi être quantifié. Ces métriques servent également de validation du modèle hydro-sédimentaire, *via* leur calcul à partir des concentrations en MES de surface simulées.

Fin des travaux de recherche : Mars 2017

BARBES

Associations biologiques en relation avec le transport sédimentaire : développement d'un modèle de bioturbation par les ingénieurs d'écosystèmes en estuaire de Seine

Coordination du projet : Francis Orvain

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR 7208 BOREA, Université de Caen – Francis Orvain
- IFREMER, DYNECO/Physed – Pierre Le HIR
- UMR 6143, M2C – Robert Lafite
- Laboratoire MMS, Université de Nantes – Laurent Barille
- Cellule de Suivi du Littoral Normand – Chloé Dancie
- Maison de l'estuaire – Thomas Lecarpentier

Résumé du projet :

Le projet SA5 "Barbès" visait à évaluer l'impact des organismes benthiques (macrozoobenthos et microphytobenthos) en tant qu'ingénieurs d'écosystème, ces organismes étant capables de modifier les propriétés d'érodabilité et donc la dynamique sédimentaire sur les estrans de l'estuaire de la Seine. Cette étude consistait i) à cartographier les interactions sédiment-microphytobenthos, ii) à mesurer les effets érosifs par des mesures d'érodimétrie sur 15 stations le long de gradients sablo-vaseux et bathymétriques en septembre 2014 et avril 2015, iii) à évaluer les effets des espèces principales en laboratoire et iv) à modéliser ces effets dans le modèle hydrosédimentaire MARS-3D. Les résultats d'érodimétrie en Seine montrent que les seuils critiques d'érosion se situent dans une gamme de valeurs très faibles dans cet écosystème (0.05 - 0.5 Pa aux deux saisons). Un rôle majeur du benthos été identifié en Seine mais contrairement aux écosystèmes où les forçages hydrodynamiques sont faibles et où les espèces déstabilisatrices jouent un rôle primordial sur des vases consolidées, ce sont les espèces à effet stabilisateur qui prédominent en Seine aux deux saisons et surtout la présence de ver annélide *Hediste diversicolor* (contrôlant les seuils critiques avec la concentration relative en vase) et des exopolymères associés à la sécrétion de mucus (EPS protéiques) sur les haute-slikkes de la vasière supérieure. La sécrétion d'EPS riches en carbohydrates par les diatomées benthiques vient également contrôler les flux d'érosion en masse sur les vasières de la rive Nord. Les expériences en laboratoire ont été menées avec 6 espèces macrozoobenthiques (3 mollusques, 1 crustacé amphipode et 2 vers annélides) pour paramétrer les équations de modèles mathématiques à fonction densité-dépendance. Ce modèle a ensuite été validé et complété par confrontation avec les données d'érodimétrie *in situ*. Les résultats obtenus avec *Hediste diversicolor* ont notamment permis de quantifier son rôle dans le contrôle de l'érodabilité du sédiment, avec un effet stabilisateur très net.

Une campagne de cartographie (environ 150 stations) a été réalisée en avril 2015 sur les zones intertidales de l'estuaire de la Seine pour caractériser par krigeage la spatialisation des variables sédimentaires, des biomasses microphytobenthiques ainsi qu'un indicateur de l'activité de la faune benthique. L'organisation spatiale des biomasses microphytobenthiques coïncide bien avec celle des sédiments fins et du gradient bathymétrique. Les plus fortes concentrations en chl *a* microphytobenthique sont inféodées à des zones de sédiments envasés de la grande crique mais aussi à des zones à mélange sablo-vaseux plus en aval de

l'estuaire. Les biomasses de chl *a* restent faibles et les pourcentages de phéopigment dépassent les 80% suggérant ainsi une activité de consommation primaire très structurante pour le microphytobenthos. Le secteur de la vasière Sud à Honfleur est constitué d'un estran sableux beaucoup moins riche en microphytobenthos. La quantité d'EPS en carbohydrate est très élevée à la surface des sédiments intertidaux de la Seine et constitue un bon indicateur de l'activité générale du biofilm microphytobenthique. La quantité d'EPS secrétée est corrélée à la production primaire de ces microalgues (fluorimétrie PAM), les sédiments des zones de transition (mélange sablo-vaseux) étant les plus riches en EPS et les plus stables vis-à-vis de l'érosion sédimentaire. Comme observé en laboratoire, Les fractions protéiques des EPS *in situ* semblent directement influencées par la densité d'annélide et il existe une stimulation de la croissance du biofilm en réponse aux effets bioirrigateurs de l'annélide *H. diversicolor*. Nos résultats suggèrent un effet synergique entre la biostabilisation par les galeries et par le biofilm sur l'érodabilité du sédiment, malgré une forte consommation par *H. diversicolor*.

La technique de télédétection a également été appliquée pour cartographier la végétation microphytobenthique de 2005 à 2015, mettant ainsi en évidence une répartition de la biomasse en fonction de la bathymétrie mais se regroupant également au niveau des chenaux de marée, riches en nutriments et ce particulièrement dans la zone du Havre. L'impact de l'ensemble de la communauté macrozoobenthique (les 6 espèces étudiées représentant plus de 95 % de la biomasse totale et des biofilms microphytobenthiques) est en cours d'intégration dans le modèle hydrosédimentaire MARS-3D pour prendre en compte les effets à long terme (en intégrant les variations saisonnières) et la répartition spatiale spécifique de chaque membre de la communauté benthique sur la dynamique sédimentaire.

Fin des travaux de recherche : Mars 2017

Coordination du projet : Sandric Lesourd

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR 6143 M2C, Université de Caen – Sandric Lesourd
- CNAM INTECHMER, GEOCEANO, Cherbourg – Yann Mear

Résumé du projet :

Le projet H2O se propose d'étudier des habitats spécifiques hétérométriques, de l'échelle de l'estuaire à l'échelle de la carotte. Les questions scientifiques structurent le Projet H2O en deux tâches, organisées vers l'étude de l'hétérogénéité sédimentaire. La première concerne les parties " internes " du sédiment ou à l'interface immédiate. La suivante cherche à qualifier l'hétérogénéité spatiale à l'échelle de l'estuaire et de la baie de Seine, pendant la période de 1985 à l'actuel.

Dans les environnements côtiers, et particulièrement les estuaires, les sédiments ne sont pas les seuls paramètres expliquant la répartition du benthos, telle que l'a montrée la tâche 1 du programme H2O pour l'estuaire de la Seine. Il a été ainsi montré les relations entre les espèces benthiques et leurs assemblages avec l'hydrodynamique (vitesse des courants, salinité) et la bathymétrie. Les analyses redondantes ont permis de distinguer six assemblages en relation avec ces paramètres. Les modèles statistiques permettent d'expliquer que ces paramètres supportent entre 30 à 89 % de la variance. Les espèces avec une large distribution spatiale sont celles montrant les plus bas pourcentages de variance, tandis que les espèces localisées dans un petit nombre de stations sont celles montrant le plus de variance expliquée, ce qui implique de forts effets locaux dans la distribution des espèces.

Le programme H2O a mis en évidence le fort intérêt de l'échelle de la carotte pour comprendre les interactions benthos-sédiment, ainsi que l'importance de la dimension verticale pour cette compréhension. Dans le cadre de H2O (tâche 2), 3 faciès ont été caractérisés. Le problème initial de la météorologie, empêchant toute manipulation sur les zones pressenties, a obligé à une solution de secours, c'est à dire réaliser des échantillonnages dans des zones plus abritées de la houle. Cet aspect est devenu un atout du projet, car les faciès échantillonnés ont permis de donner des critères de comparaison avec ce faciès gravier envasés et ainsi de mieux interpréter les données.

Les faciès sédimentaires ont pu être caractérisés en 3 dimensions, en utilisant un scanner médical. Si les scanners médicaux étaient connus pour l'étude des faciès sédimentaires, ils n'avaient pas été mis en œuvre en estuaire. Même si la technique est perfectible (problèmes de résolution, altération des images en raison de la qualité des PVC), l'échelle d'étude reste pertinente pour l'étude du benthos et celle du sédiment associé, tandis que l'aspect 3D est un plus par rapport à la radiographie au RX.

Des corrélations entre macrofaune et granulométrie ont pu être établies, notamment avec les classes [0, 04 µm - 1, 5 µm[, [63 µm - 150 µm[et [150 µm - 450 µm[. Ces corrélations, difficiles à mettre en œuvre à l'échelle de la Seine et de la Baie de Seine, ont été rendues possibles par (1) l'échelle d'étude permettant un positionnement conjoint des échantillonnages granulométriques associés à l'individu, (2) une étude par

microgranulométrie laser et (3) l'établissement de classifications granulométrique propres à cette étude et cette zone permettant de discriminer correctement les populations de taille.

La macrofaune est répartie selon la profondeur essentiellement sur les premiers centimètres, comme connu dans la littérature. Le programme H2O a permis de quantifier cette répartition verticale en estuaire de Seine, en termes d'abondance, de richesse et de biomasse. Il a été mis en évidence un autre maxima d'abondance, inédit, à une profondeur spécifique, de l'ordre de la dizaine de centimètres, avec deux espèces d'affinité profonde : *Kurtiella bidentata* et *Chaetozone* spp.. Est-ce une préférence sédimentaire ou est-ce lié l'accès à l'interface eau-sédiment ? La question reste ouverte.

L'étude conjointe sédimentaire et biologique a mis en évidence des relations entre sédiment et espèces certes, mais aussi entre le benthos et les processus sédimentaires à l'origine du dépôt. Le faciès lité, de type tidalite et associés à des dépôts récents, en remaniement permanent, est caractéristique des processus sédimentaires dans cette zone, associant forte disponibilité sédimentaire et régime macrotidal. Il est associé à une grande profondeur d'oxygénation et une pauvreté en abondance et en richesse. Une fois ce faciès stabilisé, il autorise l'implantation pérenne du benthos qui perturbera la partie superficielle du dépôt (ce qui donnera le faciès en mélange sur base litée).

Une première quantification du remaniement sédimentaire par les organismes benthiques de l'estuaire de la Seine a été réalisée. De plus, de nouvelles quantifications ont pu être apportées pour certaines espèces. Il s'agit d'une première quantification du remaniement sédimentaire pour *L. koreni*, *P. pellucidus*, *A. brachiata* et *O. fusiformis*. Les chiffres évoluent de 0,44 (*A. brachiata*) à 37,8 cm².an⁻¹ (*L. koreni*). Les autres résultats (*A. alba*, *Nephtys* spp.) sont en accord avec la littérature. Il est montré le fort potentiel bioturbateur de *L. koreni*, véritable bulldozer de la Seine, qui est capable de profondément remanier les structures sédimentaires de manière à faire d'un faciès lité un faciès homogène. Cela permet de donner des informations précieuses dans le cadre des interprétations des faciès sédimentaires. Il a été également démontré un transport préférentiel des particules de petites tailles

Le couplage *in situ* / expérimentation, fruit d'une démarche exploratoire aboutie, donne lieu au développement de nombreuses perspectives

Fin des travaux de recherche : Mars 2017

PROUESSE

PROdUction primaire dans l'ESTuaire de SEine

Coordination du projet : Pascal Claquin

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR 7208 BOREA, Université de Caen – Pascal Claquin
- IFREMER, LERN – Philippe Riou
- BOREA MNHN-UPMC-CNRS 7208-IRD 207 – Jean-Pascal Lopez

Résumé du projet :

Les apports anthropiques provenant du bassin versant font de l'estuaire de Seine un système fortement eutrophisé où la richesse biologique est importante et génère une forte productivité. Cette productivité est généralement mal estimée. En effet, les compartiments phytoplanctonique et microphytobenthique sont souvent réduits à la teneur en chlorophylle du milieu. Or, l'estimation de la biomasse chlorophyllienne ne donne qu'une image figée de ces compartiments, les concentrations mesurées étant la résultante de la production primaire, de la dilution par les courants, de la mortalité par broutage ou sénescence, de la photo-acclimatation etc.

Le projet PROUESSE apporte ainsi une estimation de la production primaire et de sa dynamique pour ces deux compartiments clés et permet de mesurer la production autochtone de l'estuaire. Le couplage entre des mesures de production primaire à haute fréquence à l'aide de fluorimètres PAM (Pulse Amplitude Modulated) et de carbone ^{13}C nous a permis de mesurer la production à l'échelle de l'estuaire mensuellement au cours de l'année 2015.

A côté des mesures de production, la diversité du compartiment phytoplanctonique a été analysée en couplant la microscopie, la cytométrie en flux et la biologie moléculaire. Le projet PROUESSE a produit une quantité importante de données originales qui permettent à la fois de fournir des chiffres fiables utilisables pour la modélisation et les gestionnaires et des données fondamentales qui nous permettent de mieux comprendre le détail de processus.

Les campagnes phytoplanctoniques ont permis de mettre en évidence un rôle important des gradients de turbidité et de salinité sur la production primaire phytoplanctonique. Deux zones ont pu être caractérisées en fonction de la dynamique des paramètres abiotiques. Une zone amont, fortement influencée par le débit de la rivière, les apports nutritifs et la TMZ. Une zone avale, dynamisée par la marée et les apports de la baie. Contrairement à la zone amont, la zone photique de la zone avale est plus importante et les apports phytoplanctoniques de la baie permettent une production primaire plus importante. Nous avons notamment mis en évidence que le phytoplancton présent au fond se maintenait dans un bon état physiologique et qu'il représentait une ressource trophique de qualité pour le zooplancton et la faune benthique. Nos résultats montrent une production nette en zone avale qui varie de 46 et 82 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ contre 17 à 31 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ en zone amont. En tenant compte de la surface des zones étudiées, une moyenne de 64.75 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ a été estimée pour le compartiment phytoplanctonique. Ce niveau est caractéristique d'un système plutôt oligotrophe dont la production est ici limitée par la lumière directement dépendante de la turbidité. La

production phytoplanctonique annuelle a été estimée à 6032 tonnes de carbone. Le microphytobenthos produit d'après nos estimations de 122 à 159 gC.m⁻².an⁻¹. En considérant les surfaces intertidales, une production de 1053 tonnes de carbone par an a été estimée. La production autochtone de la partie de l'estuaire pris en compte dans notre étude est par conséquent de 7085 gC.m⁻².an⁻¹. Le phytoplancton et le microphytobenthos représentent ainsi respectivement 85% et 15% de la production primaire nette. L'analyse des excréctions de carbone sous forme d'exopolysaccharides (EPS) nous a permis de montrer que 9 à 34% des EPS de la colonne avaient pour origine le phytoplancton et que 0,1 à 6 % le microphytobenthos. D'autre part, une quantité importante d'EPS est produite sur les vasières, de 66 et 339 mgC par m² en fonction de la zone ce qui représente 0,88 tonne de carbone par an pour la vasière Nord.

L'étude de la diversité phytoplanctonique nous a permis de caractériser, en utilisant les outils moléculaires, la diversité des protistes (18S) et des bactéries (16S). Les données filtrées correspondent à 1 029 588 séquences pour le 16S et 3 052 352 séquences pour le 18S ; elles ont été rassemblées en 11 546 OTUs pour le 16S et 9 487 OTUs pour le 18S. Les premières analyses suggèrent que la diversité génétique au sein de l'estuaire est très importante. Ces analyses couplées à la cytométrie et la microscopie apportent une nouvelle vision de la diversité microbienne *lato sensu*. A côté des autotrophes, la diversité des protistes hétérotrophes est extrêmement forte. Ce compartiment joue un rôle clé dans le devenir de la matière que nous n'appréhendons pas pour le moment.

La somme d'informations et de données produites dans le projet PROUESSE nous permet de bien appréhender le fonctionnement des producteurs primaires dans l'estuaire, une extension à la baie et à la partie dulcicole de l'estuaire permettrait d'encore mieux appréhender le rôle écologique de l'estuaire. D'autre part, nous devons explorer plus en détail les relations entre la biodiversité et la productivité en fonction des zones et des saisons et utiliser les données acquises en interaction avec les autres compartiments biologiques étudiés dans l'estuaire.

Fin des travaux de recherche : Mars 2017

Etude du ZOOplancton et de ses habitats estuariens dans un contexte de changement GLOBAL : synthèse des acquis Seine-Aval et initiation d'une nouvelle approche intégrée.

Coordination du projet : Sami Souissi

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR CNRS-ULille1-ULCO 8187 LOG, Université Lille 1 – Sami Souissi
- UMR CNRS-UPS-INPT 5245 ECOLAB , Université de Toulouse 3 – Michèle Tackx

Résumé du projet :

Le projet ZOOGLOBAL propose une démarche scientifique combinant un grand effort de synthèse s'appuyant essentiellement sur la valorisation des acquis du programme Seine-Aval ainsi que l'initiation d'une nouvelle démarche interdisciplinaire d'étude du zooplancton (*in situ*, laboratoire et modélisation). Les deux principales équipes impliquées dans le projet (LOG-Wimereux et ECOLAB-Toulouse) ont été renforcées par les apports significatifs des partenaires externes (dont ETH Zurich pour la tâche 5), le GIP Seine-Aval ainsi que les collaborations avec le projet PROUESSE. Nous présentons ici les principaux résultats obtenus dans ce projet.

Paramétrisation de l'habitat de copépodes clefs de la Seine. Sur la base de la synthèse des données de terrain réalisée en tâche 2 du projet, nous nous sommes concentrés sur les données issues du point d'échantillonnage de référence Pont de Normandie et avons pu définir des équations liant la densité de deux espèces de copépodes clefs de l'estuaire de Seine (i.e. *Eurytemora affinis* et *Acartia* sp.) aux principaux facteurs forçants (la salinité et la température). Nous avons donc pu modéliser les niches réelles/réalisées de trois phases du cycle de vie (nauplii – copépodites C1-C4 et derniers stades C5-Adultes) de chacune de ces espèces de copépodes. Au sein de chaque espèce, on note une différence de *préférendum* en fonction des groupes de stades. Les deux espèces présentent des niches réalisées bien distinctes.

Par la suite, les équations de l'habitat potentiel des trois groupes de développements d'*E. affinis* ont été utilisées pour cartographier leurs habitats fonctionnels. La dimension spatiale a été apportée par les données de salinité fournies par le modèle MARS3D de l'Ifremer. A l'aide de ce dernier, nous avons obtenu des données spatiales de salinité pour la couche de fond avec un pas de temps d'une heure pour les années 2008-2009 et 2010. En l'absence de mesures de terrain pour ces années, les données de température nécessaires au calcul de l'habitat fonctionnel ont été estimées en proposant une relation statistique fiable entre les températures de l'eau enregistrées par les deux bouées Marel de Honfleur (n'est plus en service) et Carnot située à Boulogne-sur-Mer (toujours en service). Ainsi, nous avons pu cartographier l'évolution de la densité des trois groupes de stades de développement d'*E. affinis* dans l'estuaire de Seine pour les années 2008, 2009 et 2010. La délimitation, et quantification (en termes de volumes) des habitats fonctionnels ainsi que les analyses de leurs trajectoires rétrospectives se poursuivent. L'étude des résultats considérant un scénario pour l'année 2100, complètera et terminera le travail de cette tâche.

Afin de compléter ce travail de modélisation, qui n'intègre pas pour le moment les capacités adaptatives de ce copépode, nous avons pu valoriser dans deux publications les données expérimentales acquises sur plusieurs générations. En particulier, nous avons pu quantifier la perte de la fitness de la population d'*E. affinis* de la Seine face à un double scénario climatiques consistant à une augmentation de la température et/ou de la salinité. Une augmentation de la température a provoqué la baisse significative de la fécondité d'*E. affinis* qui se trouve accentuée par une augmentation de la salinité. La survie de la population n'a pas

été significativement affectée par les scénarios appliqués expérimentalement. Ceci confirme la difficulté de prédire les trajectoires évolutives de ce copépode dans un milieu estuarien. En effet, la réponse du même copépode caractérisé par une forte plasticité peut être variable d'un estuaire à un autre. Par exemple, le suivi à long-terme de l'estuaire de l'Escaut dans le cadre du programme OMES a permis de montrer que l'installation d'*E. affinis* en amont de l'Escaut favorisée par l'amélioration de la qualité de l'eau et des conditions trophiques (phytoplancton) favorables, s'est accompagnée par un décalage de l'optimum thermal apparent (observé *in situ*) vers des températures plus élevées. Ceci nous incite à bien intégrer 3 volets importants pour tester des scénarios futurs de la réorganisation du réseau trophique planctonique (phytoplancton et zooplancton) dans l'estuaire amont de la Seine : i) hydrodynamisme, ii) qualité de l'eau et iii) disponibilité du phytoplancton.

L'hydrodynamisme est un élément fondamental dans la structuration et le forçage de l'écosystème estuarien. Nous avons également pu étudier d'une façon approfondie le comportement natatoire d'*E. affinis* dans un milieu turbulent et ceci en collaboration avec ETH Zurich. Les résultats scientifiques novateurs ont fait l'objet de plusieurs publications communes et nous ont confirmé pour la première fois la capacité de ce copépode à faire des sauts quand la turbulence est forte. Ce comportement sert vraisemblablement à ajuster sa position dans la colonne d'eau.

Tous les résultats expérimentaux valorisés dans la synthèse des acquis et/ou obtenus dans ZOOGLOBAL vont servir à améliorer considérablement nos différentes approches de modélisation de cette espèce clef de l'estuaire.

Notre participation à des campagnes d'échantillonnage pluridisciplinaires a permis d'enrichir les études de l'abondance et de la communauté du zooplancton en zone de gradient de salinité. Pour le copépode dominant *E. affinis*, les nouvelles données du terrain confirment nos résultats antérieurs sur le positionnement des stades avancés près du fond. Il est donc important d'adapter la stratégie d'échantillonnage appropriée dans le suivi de cette espèce.

Enfin l'activité trophique du même copépode *E. affinis* a été quantifiée à l'aide d'expériences d'incubation (avril et septembre 2014) et de dosage des pigments intestinaux (avril et septembre 2015). Dans les deux cas, l'activité trophique (taux d'ingestion, pression sur les différents groupes de phytoplancton) a été dosée à travers la concentration en Chla et les pigments marqueurs des différents groupes d'algues (diatomées, algues vertes). L'ingestion de phytoplancton des adultes et CV d'*E. affinis* s'avère être limitée par des concentrations en MES > environ 300 mg L⁻¹. Avec des concentrations en phytoplancton faibles (< 1 à 12 µg Chla L⁻¹) et des concentrations en MES élevées (30 – 2200 mg L⁻¹) caractéristiques du printemps en aval de l'estuaire, une grande partie du phytoplancton échapperait à la prédation par *E. affinis*. A des abondances observées entre 0,1 et 10 individus L⁻¹, la population d'*E. affinis* (adultes et stades I-V de copépodites) consomme entre 0,1 et 7 % du stock de phytoplancton par jour, avec une sélectivité pour les diatomées. Exprimée en carbone, l'ingestion des adultes et copépodites *E. affinis* représente entre 0,2 et 8 % par jour de la production primaire.

Ces résultats suggèrent une ingestion d'autres ressources par *E. affinis* qu'uniquement du phytoplancton. Pendant le projet SENTINELLES (SA6), l'ingestion de microzooplancton sera également étudiée par observation microscopique. Des expériences seront également menées dans la zone d'eau douce, dans laquelle les concentrations en phytoplancton sont plus élevées qu'en aval. L'importance du broutage par le microzooplancton sur le phytoplancton dans le fonctionnement trophique de la zone pélagique de la Seine aval sera également évaluée.

Enfin, le projet SA6 SENTINELLES va bénéficier du travail de synthèse et de modélisation des habitats fonctionnels des copépodes pour l'appliquer au niveau de la communauté du macrobenthos dans la vasière Nord et notamment l'espèce sentinelle *Hediste diversicolor*. Une présentation succincte des objectifs de ce nouveau projet de recherche sera également faite à la fin de la présentation de ZOOGLOBAL.

Fin des travaux de recherche : Juin 2017

Coordination du projet : Anik Brind'Amour

Equipe(s) impliquée(s) :

- Ifremer, EMH, Centre Atlantique, Nantes – Anik Brind'Amour
- MNHN / CRESCO – Eric Feunteun
- CSLN – Sylvain Duhamel

Résumé du projet :

Le projet MODHANOUR a fait l'objet d'une réponse à un appel à projet dans le cadre d'une procédure relative aux questionnements orphelins SA5-2013. Il s'agissait d'identifier les facteurs explicatifs de l'évolution, entre 1995 et 2010, des abondances d'espèces de poissons utilisant le secteur en aval du pont de Tancarville comme nurricerie. Pour répondre à cette question, le projet MODHANOUR s'est concentré sur la fonction de nurricerie de l'estuaire de Seine et s'est décliné en trois tâches. La première tâche a porté sur l'exploration des jeux de données à disposition. Dans cette partie du projet, un travail de mise en forme des données disponibles et de standardisation entre les deux grands jeux de données de poissons en baie de la Seine, c'est-à-dire celui de l'Ifremer et celui de la Cellule de Suivi du Littoral Normand (CSLN) a été effectuée. Cette tâche a également permis de faire le constat du nombre limité de données environnementales disponibles sur la zone d'intérêt. Ce constat a été quelque peu handicapant pour la réalisation des objectifs suivants et en particulier pour la modélisation avec notamment des difficultés d'ajustement de modèles pour certaines espèces.

La deuxième tâche a porté sur la description fine (i.e. mensuelle et à l'échelle des cohortes) de l'utilisation de l'estuaire par les juvéniles. Une typologie d'utilisation y est d'ailleurs présentée avec quatre grands patrons d'occupation de l'espace. La variation des facteurs de condition en lien avec cette dynamique d'occupation spatiale suggère une réponse potentielle liée à des facteurs d'ordre trophiques. En effet, il est souligné, pour plusieurs espèces de poissons et en particulier pour les juvéniles de poissons plats et le bar, une diminution du coefficient de condition au mois de juin. Cette diminution semble coïncider avec le déplacement géographique vers l'embouchure pour ces cohortes d'espèces. L'hypothèse de la variabilité de la disponibilité alimentaire durant la période estivale est donc suggérée.

Afin de traiter de la variabilité interannuelle des densités de juvéniles de poissons, des analyses préliminaires ont été effectuées avant le développement des modèles d'habitat. Il a été souligné l'importance du débit dans la distribution spatiale des poissons, un débit hivernal important favorisant une distribution plus marine des juvéniles (e.g. sole, flet, ...). Etant donné les liens avérés entre les débits fluviaux et la production benthique et sous l'hypothèse que les conditions environnementales des espèces étudiées sont contenues sous les seuils de tolérance haline et de température, le facteur trophique apparaît encore une fois comme un facteur explicatif des relations observées.

Une approche de type SDM (Species Distribution Model) a été menée afin d'identifier les facteurs responsables de la variabilité spatio-temporelle des juvéniles de poissons et pouvoir ainsi comprendre et

comparer les évolutions de l'estuaire. Dans cette troisième tâche, deux types de modèles GLM (General Linear Models) ont été mis en œuvre (modèles *Delta* et distribution *Tweedie*) sur des périodes différentes et à l'aide de différentes variables environnementales (physiques, chimiques et biologiques). Ces différents choix de modélisation ont été effectués selon la disponibilité des variables environnementales. Dans une première approche (i.e. modèle *Delta*) où l'ensemble des données disponibles a été mobilisé pour modéliser l'habitat des juvéniles, 36 modèles pour 12 espèces-cohortes de juvéniles de poissons sur les 48 modèles possibles ont été développés. Ceci est notamment dû à la rareté des variables environnementales nécessaires à la modélisation des espèces. Les modèles d'habitat basés sur les données de présence-absence ont souligné l'importance prépondérante des faciès sédimentaires et de la bathymétrie dans la distribution des espèces alors que les modèles basés sur des densités positives ont aussi mis en évidence l'importance de la température et de la salinité. Une projection cartographique avant-après Port 2000 pour le merlan, une espèce pour laquelle les modèles ont été jugés acceptables, est présentée en exemple dans le rapport. Dans cet exemple nous observons notamment un déplacement des individus juvéniles vers l'estuaire. Ce déplacement serait en lien avec les modifications halines et de température de l'estuaire.

La deuxième partie de la tâche de modélisation d'habitat visait à quantifier la contribution relative des différentes variables environnementales (trophiques et abiotiques) expliquant la distribution spatiale des poissons. Cette tâche a été réalisée à partir des données du projet Colmatage (2008-2009) dans lequel tous les compartiments (poissons, benthos, sédiments) ont été échantillonnés simultanément. Dans cette partie, il a été développé un ensemble de modèles GLM (modèle *Tweedie*) sous différentes hypothèses de contrôle environnemental pour chaque espèce de juvénile. Les résultats de la sélection des modèles ont montré une importance prépondérante des variables physico-chimiques en comparaison aux variables trophiques, dans le choix de l'habitat d'une espèce pour les deux années étudiées. Il est intéressant de noter que lorsque les variables trophiques expliquent une partie de la variabilité temporelle de la distribution des juvéniles, ce sont les variables associées à la disponibilité énergétique des proies qui ressortent en comparaison à celles associées aux guildes trophiques des proies. Ce résultat suggère l'intérêt d'une description basée sur l'apport énergétique des proies dans les modèles d'habitat. Toutefois, des améliorations techniques, notamment sur la sélection des variables restent à parfaire afin d'améliorer la qualité des modèles de cette partie.

En conclusion, l'analyse conjointe de l'évolution saisonnière et interannuelle de la position des populations le long du gradient amont aval de l'embouchure de la Seine a abouti à des résultats pertinents qui méritent d'être valorisés. Quatre grands patrons de la dynamique d'occupation du gradient estuaire-baie ont pu être mis en évidence. Le lien entre ces patrons et le débit hivernal de la Seine permet par ailleurs de proposer des hypothèses sur les mécanismes régissant cette dynamique d'occupation. Ces résultats ouvrent également une perspective intéressante en ce qui concerne l'étude de l'évolution saisonnière et interannuelle de la production de proies benthiques et de son lien avec la dynamique d'occupation de la Baie de Seine.

Fin des travaux de recherche : septembre 2016

ANTROPOSEINE

ANalyse de la structure TROPique et cONtribution des habitats de l'estuaire de la SEINE

Coordination du projet : Nathalie Niquil

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR 7208 BOREA, Université de Caen – Nathalie Niquil, Karine Grangeré
- IRSTEA, Unité EPBX, Centre de Bordeaux – Jérémy Lobry
- UMR 6143 M2C, Université de Caen – Jean-Claude Dauvin

Résumé du projet :

Lors des années passées, les projets financés par le Programme Seine Aval ont permis de décrire le fonctionnement écologique des différents secteurs du lit mineur de l'estuaire de la Seine et des différentes composantes de l'écosystème. De même, de nombreuses connaissances écologiques ont été acquises sur la partie orientale de la Baie de Seine. L'objectif principal du projet ANTROPOSEINE était de faire une synthèse de l'ensemble de ces connaissances afin de décrire le fonctionnement du réseau trophique des différents secteurs qui composent l'ensemble de cette zone, dans la continuité des travaux initiés en modélisation écosystémique, menés précédemment. Par l'association de différentes approches numériques, et des travaux méthodologiques complémentaires développés, la synthèse de ces informations préalables a pu être réalisée.

Il en ressort les principales conclusions suivantes :

1. Si les facteurs climatiques et environnementaux jouent un rôle majeur dans la dynamique de l'ichtyofaune dans l'estuaire, les productions benthique et zooplanctonique restent un facteur clé du fonctionnement trophique.
2. De même, les habitats intertidaux des zones Nord et Sud de l'estuaire jouent un rôle important de nourricerie pour les oiseaux et les poissons. Bien que fortement stressé, le potentiel trophique de la zone Nord n'est pas négligeable.
3. Ces zones au fort potentiel trophique définissent la capacité d'accueil trophique de l'estuaire pour les prédateurs. Ce potentiel est à préserver dans un contexte de marinisation généralisée des estuaires du littoral européen. En effet, dans ce contexte, et bien que cela ne se soit pas traduit dans les données analysées, on peut attendre un accroissement des abondances de poissons marins dans l'estuaire.
4. A ce titre, il apparaît, en première approximation, que les mesures de restauration d'habitats intertidaux associées à la construction de Port 2000 ont un effet significatif sur le fonctionnement du réseau trophique.
5. Dans un contexte plus global, même si leur interprétation en termes de stabilité et de maturité reste à approfondir, les indices ENA apparaissent comme de bons candidats pour devenir des indicateurs de surveillance holistiques des milieux côtiers et estuariens. Ils sont d'autant plus pertinents qu'ils sont associés à d'autres indicateurs (biodiversité, état écologique), qui apportent des informations complémentaires sur les processus et dynamiques à l'œuvre.

L'application du cadre théorique d'interprétation des indices de l'analyse des réseaux écologiques aux écosystèmes estuariens est cependant loin d'être évidente et reste un enjeu scientifique. En effet, les estuaires sont des systèmes géologiques relativement jeunes et éphémères. Dans ce contexte, le cadre conceptuel de la maturation des écosystèmes perd de sa consistance, ou tout du moins, les propriétés des estuaires doivent être regardées à l'aune de cette jeunesse. Les estuaires sont aussi singulièrement dynamiques et fluctuants. On pourrait ainsi supposer que la variabilité hydrodynamique qui maintient l'estuaire dans un état de non-climax empêchant l'établissement d'un système «mature» et «stable». Paradoxalement cela pourrait être l'origine d'une forme de résilience de l'écosystème face aux perturbations naturelles voire anthropiques, le recyclage et l'omnivorie jouant un rôle tampon face aux perturbations.

Fin des travaux de recherche : Mars 2017

Coordination du projet : Céline Le Pichon

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- Laboratoire Hydro-écologie fluviale, IRSTEA-Antony – Céline Le Pichon
- Laboratoire Fonctionnement des Ecosystèmes Estuariens, IRSTEA-Bordeaux – Jérémie Lobry

Résumé du projet :

Le projet ANACONDHA s'est intéressé à la connectivité fonctionnelle de l'estuaire de la Seine et à la capacité des différentes espèces de poissons d'y réaliser une partie ou l'ensemble de leur cycle de vie. L'objectif principal du projet était de tester une approche de modélisation géomatique de la connectivité fonctionnelle sur l'estuaire et d'évaluer sa capacité à quantifier les habitats estuariens potentiels ainsi que sa pertinence pour tester des scénarios de gestion. Cette modélisation utilise le concept de « résistance du paysage » et les calculs des chemins de moindre coût de déplacement qui permettent d'estimer l'accessibilité des habitats cibles. Considérant (i) la disponibilité des données géomatiques, (ii) les avis des experts en termes de priorités régionales et (iii) les différences entre les espèces en terme de traits de vie et de capacités de dispersion, le choix a été fait d'étudier deux cas : 1) les migrations tidales des juvéniles du bar commun vers les nourriceries et 2) les migrations des adultes de la truite de mer vers les frayères. Ce choix permettait de tester l'approche sur des cas qui impliquent des étendues spatiales (embouchure versus tout l'estuaire avec les affluents) et des échelles temporelles (un cycle de la marée versus une période de plusieurs mois) très différentes.

Le cas du bar : modélisations flot-jusant

Au cours de son cycle de vie, le bar commun réalise plusieurs migrations entre les milieux marins et estuariens. Les juvéniles de la première année (faibles en capacité de dispersion) colonisent l'estuaire de la Seine et entrent dans des cycles des migrations tidales journalières entre les zones de repos (jusant-basse mer) et les nourriceries de (flot-pleine mer). Leurs nourriceries sont localisées dans les zones de faibles profondeurs (voir zones intertidales) de la partie aval de l'estuaire et leur disponibilité et accessibilité sont fortement influencées par les dynamiques temporelles des conditions hydrologiques et potentiellement aussi par les modifications anthropiques de l'estuaire (les digues, le creusement du chenal de navigation). Les conditions hydrologiques et la connectivité du paysage estuarien varient sur plusieurs échelles temporelles : journalière (moment de la marée) et mensuelle ou saisonnière (coefficient de la marée, débit).

Au cours de la marée, l'étendue des zones en eau change et les digues sont progressivement submergées. La distribution des habitats et leur accessibilité changent ainsi selon le flot et le jusant. Pour prendre en compte cette dynamique une sélection de 10 pas de temps pertinents pour couvrir ce changement progressif de l'accessibilité d'habitat a été faite. Le modèle Mars 3D, le modèle de niveau d'eau et le MNT (GIP Seine Aval), ainsi que la carte détaillée de la distribution des substrats du fond dans l'estuaire (GIP Seine Aval) ont été utilisés pour cartographier les habitats et générer les cartes de probabilité d'accès par les juvéniles. Ainsi la connectivité entre les habitats pendant l'ensemble d'un cycle de la marée (flot-jusant) a pu être réalisée. Plusieurs scénarios de comportement des juvéniles ont été modélisés reflétant différentes étapes de la

colonisation des habitats et une augmentation de la capacité de dispersion des poissons au cours de leur croissance.

Pour prendre en compte les variations qui se produisent à plus grande échelle temporelle, une comparaison de la distribution des nourriceries potentielles a été faite pour trois coefficients de marée et deux débits. Les modélisations de la connectivité ont été réalisées pour des conditions médianes de débit ($250 \text{ m}^3/\text{s}$) et pour deux coefficients de la marée : 85 (quartile 75) et 45 (quartile 25) représentatifs des conditions observées lors de la période de migrations des juvéniles du bar (avril-octobre).

Ces travaux ont été accompagnés par un bilan bibliographique et la consultation de nombreux experts : chercheurs, acteurs régionaux et acteurs locaux.

Fin des travaux de recherche : juin 2017

CRAPPSE

Contamination et RéActivité de Pesticides et de Pharmaceutiques dans l'estuaire de SEine :
bilan des contaminations, dégradation et impact toxique

Coordination du projet : Patrick Mazelier

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR CNRS 5805 EPOC, LPTC, Université de Bordeaux 1 – Hélène Budzinski
- IRSTEA, LE, centre de Bordeaux – Jeanne Garric
- Société TOXEM – Jérôme Couteau

Résumé du projet :

Le projet CRAPPSE propose une approche pluridisciplinaire de l'étude de la contamination de la Seine et de son estuaire par les composés organiques polaires. Pour cela, ce projet étudie un large spectre de contaminants de polarité moyenne à élevée, en incluant des composés soit classés comme émergents, soit utilisés comme pesticides ou biocides. Ce projet a également pour objectifs de mieux appréhender les phénomènes de dégradation des molécules organiques et l'évolution de la toxicité associée. Ce projet s'articule ainsi en 3 axes :

- Caractérisation des apports en contaminants polaires en estuaire de Seine et recherche des produits de dégradation.
- Dégradation des contaminants à l'obscurité et photodégradation solaire.
- Caractérisation des effets toxiques des échantillons.

• Caractérisation des apports en contaminants en estuaire de Seine

L'objectif était de caractériser les apports en estuaire de Seine d'une grande diversité de contaminants polaires et ce par deux voies d'entrée : le barrage de Poses caractérisant les apports amont (Paris) et le rejet de la principale station de traitement des eaux usées (STEU) de l'estuaire : le petit Quevilly. Pour cela, tous les 2 mois pendant un an, un effluent de STEU moyenné 24h et un échantillon ponctuel provenant de Poses ont été récoltés. Cet échantillonnage a été complété par un échantillonnage passif de type POCIS de janvier à Mars 2015. La première phase de cette tâche a démontré l'imprégnation en composés pharmaceutiques (déjà étudiés lors du projet SA4 MEDSEINE) et en pesticides, grâce à 12 protocoles analytiques ultra-traces. Les résultats en lien avec les composés pharmaceutiques sont conformes à ceux observés lors du projet antérieur MEDSEINE : un apport majoritaire provenant de l'amont (30 fois supérieur à Poses) a été observé. Pour aller plus loin, de nouveaux composés pharmaceutiques ont été recherchés : les nouveaux anti-coagulants (NACOs) qui tendent à devenir des molécules préoccupantes dans l'environnement suite à l'augmentation de leur vente et de leur consommation ces dernières années. Certaines de ces molécules (Dabigatran) ont été retrouvées jusqu'à 510 ng/l en sortie de STEU. D'autres grandes classes de contaminants ont été recherchés : les désinfectants et en particulier le triclosan a été retrouvé à des concentrations de 17 ng/l à Rouen (effluent).

Le potentiel toxique des échantillons est mesuré à l'aide d'un panel de bioessais *in vitro* ciblant différentes familles de toxiques tels que des perturbateurs endocriniens (composés œstrogéniques, androgéniques et glucocorticoïdes), des composés dioxin-like et des composés génotoxiques. Les premiers résultats du projet concernent la campagne de prélèvements menée de mars 2014 à mars 2015. Cette campagne a révélé des profils d'activités montrant la présence, dans l'effluent de STEP et dans l'eau de Seine, d'activités de type

œstrogénique, glucocorticoïdique et génotoxique, quelle que soit la période d'échantillonnage. Ces résultats appuient ceux précédemment rapportés dans le cadre du projet MedSeine.

- **Réactivité des contaminants apportés en estuaire de Seine**

- ✓ Dégradation à l'obscurité en présence de bouchon vaseux (BV)

Le rôle accélérateur ou inhibiteur de ce milieu récepteur particulier (BV) dans la dégradation des composés présents en sortie de STEU de Rouen a été étudié. Deux incubations *in vitro* d'eaux estuariennes (Seine en Juillet 2015 et Gironde en octobre 2015) mélangés à l'effluent de STEU ont été réalisées. Au total, sur les 50 échantillons récoltés, 8 protocoles analytiques ont été utilisés sur la phase dissoute pour évaluer la dégradation des composés pharmaceutiques, des pesticides et HAP (en lien avec le projet MOSAIC). L'ensemble des données obtenues a permis d'évaluer les cinétiques de dégradation et le temps de demi-vie des composés en fonction des différents milieux étudiés (matière en suspension, salinité, stérilisation). Au final, un indice de persistance a été calculé pour chaque molécule permettant de donner une échelle relative de la stabilité des composés en Seine. Cette approche devrait permettre de mieux prendre en compte la persistance dans le cadre de la priorisation des molécules préoccupantes pour l'estuaire de Seine. En parallèle des analyses chimiques, différents bioessais *in vitro* ont été réalisés afin d'évaluer l'évolution des activités biologiques. Sur les différents tests appliqués (ER, AR et génotoxicité), aucune augmentation significative des effets n'a pu être observée. Cependant, une analyse globale par spectrométrie de masse haute résolution a été initiée dans le but de mettre en avant les produits de transformation générés durant ces expériences d'incubation.

- ✓ Photodégradation solaire

Dans un premier temps l'objectif a été d'évaluer la stabilité de divers contaminants polaires et l'évolution des activités biologiques, au sein d'un échantillon naturel. Pour cela, un effluent de la STEP de Rouen a été irradié sous un rayonnement solaire artificiel (SUNTEST CPS+, Atlas). Neuf protocoles analytiques ont été appliqués afin d'évaluer la stabilité des contaminants apportés en Seine. Aucune augmentation des effets biologiques étudiés n'a pu être mise en évidence (génotoxicité, activités œstrogéniques et androgéniques). Dans un deuxième temps, des études cinétiques ont été réalisées sur des molécules sélectionnées pour leur occurrence, leur toxicité ou le manque de données bibliographiques. Les cinétiques de dégradation et les temps de demi-vie en eau ultrapure (photodégradation directe) et en eau de rivière (photodégradation directe et indirecte) ont été calculés. Pour certaines familles (fluoroquinolones et NACO) dont les données bibliographiques sont encore rares, l'impact de la matière organique et des ions dissous sur les cinétiques de dégradation a été évalué. Un travail complémentaire en spectrométrie de masse haute résolution a permis d'identifier et confirmer la structure de 4 photoproduits, et de suspecter la structure d'un grand nombre de produits de transformation issus du Dabigatran, Apixaban, Rivaroxaban, Ofloxacin, Sarafloxacin, Danofloxacin et de l'Abacavir.

- Présence de produits de transformation dans le milieu

Dans le but d'évaluer la présence de composés traceurs et de rechercher la présence des produits de transformation identifiés en laboratoire, une campagne d'échantillonnage de 6 mois a été initiée fin novembre 2016. Trois sites ont été choisis : Oissel, La Bouille et Caudebec. Pour pallier aux faibles concentrations de ces milieux, des échantillonneurs passifs de type Polar Organic Chemical Sampler (POCIS) ont été exposés pendant 1 mois sur site, et des échantillonnages ponctuels ont été réalisés en parallèle. Deux objectifs majeurs de cette phase ont été : ⁽¹⁾ de réaliser une approche quantitative afin d'évaluer les concentrations de quelques composés traceurs dans ces milieux ; ⁽²⁾ d'utiliser les capacités de concentration des POCIS et la spectrométrie de masse haute résolution pour évaluer la présence des produits de transformation identifiés en laboratoire lors de la tâche.

Fin des travaux de recherche : Juin 2017

Dynamique de la matière organique dans le bouchon vaseux de l'estuaire de Seine en lien avec les nutriments et les contaminants organiques

Coordination du projet : Arnaud Huguet

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- METIS UMR 7619, Université Pierre et Marie Curie – Arnaud Huguet
- UMR CNRS 5805 EPOC, LPTC, Université de Bordeaux 1 – Edith Parlanti
- UMR BIOEMCO 7618, Université de Rennes – Anniet Laverman
- UMR 7154 IPGP, LGE, Université Paris 7 – Eric Viollier

Résumé du projet :

La sauvegarde des estuaires et de la qualité de leur eau représente un défi de société majeur au vu de la pression croissante exercée sur ces écosystèmes. Ceci est particulièrement vrai pour l'estuaire de Seine, dont le bassin contient l'une des plus grandes mégapoles d'Europe. La qualité et la quantité de matière organique (MO) – ensemble de macromolécules issues de la dégradation de matériel biologique animal ou végétal, d'origine terrestre ou aquatique – sont des paramètres clefs influençant la qualité de l'eau et les processus biogéochimiques en milieu estuarien. Les mécanismes impliqués dans le transport et la transformation des contaminants et des nutriments dans les estuaires, comme celui de la Seine, vont fortement dépendre de la taille, la structure et la biodisponibilité de la MO. Il apparaît donc indispensable d'étudier plus précisément la nature et les caractéristiques de la MO afin de mieux comprendre son influence sur la dynamique des contaminants et des nutriments lors de leur transit des eaux fluviales vers le milieu marin. Elucider la dynamique de la MO en milieu estuarien demeure cependant un véritable défi, de par (i) la nature hétérogène de cette dernière et (ii) la grande variabilité des processus environnementaux et physiques dans les estuaires.

Le projet MOSAIC avait pour but de contraindre les sources et le devenir de la MO dans l'estuaire de Seine au niveau global et moléculaire, et de déterminer sa variabilité spatio-temporelle. Nous avons en parallèle cherché à étudier l'influence des modifications qualitatives et quantitatives de la MO sur la dynamique des nutriments et de deux classes de contaminants (hydrocarbures aromatiques polycycliques - HAPs et composés pharmaceutiques) dans l'estuaire de Seine. Afin d'atteindre ces objectifs, 5 campagnes d'échantillonnage ont été réalisées sur le navire Côtes de la Manche (CNRS/INSU) entre janvier 2015 et avril 2016. Ces campagnes ont couvert les différentes parties de l'estuaire : en amont (Rouen / Caudebec), dans le bouchon vaseux (BV, zone de turbidité maximale, entre Fatouville et Tancarville) et en aval de ce dernier (Honfleur ou La Carosse). Des prélèvements d'eau (environ 500 pour l'ensemble des campagnes) et de sédiment (8 carottes de 10 cm) ont été effectués dans chaque partie de l'estuaire.

Les caractéristiques de la MO sous ses différentes formes (dissoutes - MOD ; particulaire - MOP ; sédimentaire) ont été déterminées au niveau global et moléculaire. L'analyse en composantes principales réalisée à partir de ces données a montré que la composition de la MOD différait de manière significative de celle de la MOP et MO sédimentaire. La datation des échantillons au ^{14}C a par ailleurs révélé l'âge récent (> 1950) de la MOD et de la MOP, contrairement à la MO sédimentaire, dont l'âge (jusqu'à 1000 ans B.P.) dépend fortement de la saison et des conditions hydroclimatiques associées. La variabilité spatiale des caractéristiques de la MO le long de l'estuaire a également été mise en avant. Ainsi, le mélange des eaux

douces et marines semble être le principal facteur contrôlant la composition de la MO dans l'estuaire, comme le révèle (i) l'augmentation linéaire du $\delta^{13}\text{C}$ de la MOP de l'amont vers l'aval et (ii) la diminution concomitante de la diversité moléculaire de la MOD déduite des analyses de spectrométrie de masse haute résolution (ca. 5000 molécules en amont vs. 2700 à l'aval). Par ailleurs, la dilution non linéaire de la MO chromophorique le long de l'estuaire a montré le caractère hautement dynamique de la MOD, qui ne résulte pas uniquement d'un mélange des eaux douces et marines, mais subit des transformations de l'amont vers l'aval et est soumise à des apports variés. Les analyses isotopiques et moléculaires de la MO indiquent en outre une origine principalement autochtone de cette dernière dans l'estuaire, même si des composés d'origine terrigène ont pu être détectés dans les différents échantillons. Enfin, des variations saisonnières de composition de la MO ont, dans une moindre mesure, été observées, les analyses spectroscopiques montrant par exemple que la MOD est plus aromatique et a une masse plus élevée en hiver qu'en été.

En parallèle, nos résultats ont également montré que les nutriments et une grande partie des éléments traces avaient un comportement conservatif dans l'estuaire. Différents processus biogéochimiques transforment les nutriments en dégradant la MO. Nous avons cherché à inventorier les activités et les micro-organismes associés aux cycles biogéochimiques dans l'eau et les sédiments de l'estuaire, avec un focus particulier sur le cycle de l'azote. La nitrification est le processus prédominant dans la colonne d'eau. Au contraire, dans le sédiment, les incubations réalisées en laboratoire ont montré que la dénitrification était dominante par rapport à la DNRA et à l'anammox, en accord avec les analyses de biologie moléculaire. Par ailleurs, les taux potentiels de transformation benthique de l'azote se sont révélés globalement supérieurs en surface (0-2 cm) qu'en profondeur (6-8 cm), potentiellement liés à la plus grande réactivité de la MO en surface. Les taux de transformation d'azote varient en outre le long de l'estuaire. Ils sont ainsi nettement plus élevés à Rouen que pour les autres sites. Les variations des taux sont dépendantes de la nature du sédiment (granulométrie, qualité/quantité de MO).

Enfin, les analyses de contaminants organiques ont montré que les HAPs légers étaient présents préférentiellement dans la phase dissoute et les plus lourds dans le sédiment et la phase particulaire, et que leur concentration dans l'eau était fortement liée à la marée (diminution d'un facteur 2 à 3 entre la pleine mer et la basse mer). En parallèle, un screening des composés pharmaceutiques a été réalisé sur un panel d'échantillons, permettant d'identifier 8 molécules « traceurs », considérées comme représentatives de l'ensemble des composés. Ces derniers sont faiblement concentrés dans les sédiments et dans la phase particulaire, et ont majoritairement (99%) été détectés dans la phase dissoute. Les concentrations en composés pharmaceutiques sont globalement stables en amont et dans le bouchon vaseux, et diminuent uniquement à l'embouchure. Par ailleurs, elles sont fortement dépendantes de la marée (basse mer vs. pleine mer) et des conditions hydrologiques (débit et hauteur d'eau).

Au final, notre projet a permis d'acquérir des informations précises sur les sources, le devenir et la variabilité spatio-temporelle de la MO, des contaminants organiques et des nutriments le long de l'estuaire. Les très nombreuses données seront prochainement croisées statistiquement afin d'examiner conjointement les dynamiques de la MO, des contaminants et des nutriments.

Fin des travaux de recherche : juin 2017

Impact de la dynamique particulière sur le devenir des bactéries pathogènes dans la zone du bouchon vaseux de l'estuaire de Seine

Coordination du projet : Fabienne Petit

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR 6143 M2C, Université de Rouen – Fabienne Petit
- UMR CNRS 5254, Université de Pau et des Pays de l'ADOUR – Robert Duran
- UMR INSERM S-1092, Université de Limoges – Marie-Cécile Ploy
- UMR CNRS 7070 M2N, Université Pierre et Marie Curie – Christophe Petit

Résumé du projet :

Le projet DYNAPAT visait à améliorer la compréhension de la relation entre la dynamique des MES (processus de floculation) et celle des communautés microbiennes dans la zone de l'embouchure de l'estuaire, en présence du bouchon vaseux. Dans ce contexte, un des objectifs du projet DYNAPAT était d'étudier la composante microbiologique des floccs, en s'intéressant d'une part à la communauté bactérienne autochtone des floccs, et d'autre part à la composante allochtone en se focalisant sur *Escherichia coli*, espèce bactérienne indicatrice de la contamination fécale, utilisée dans le modèle de la contamination fécale en Seine (Servais *et al.*, 2007), aux espèces pathogènes (*Vibrio* et *Aeromonas*), étendue à la problématique de l'antibiorésistance (intégron). Le projet s'est alors intéressé à: (i) caractériser la structure des composants particuliers et microbiens (dont les bactéries pathogènes) des floccs, (ii) étudier l'impact du forçage hydrodynamique permanent, sur les communautés microbiennes et les populations de bactéries pathogènes (floculation et érosion des sédiments de surface), (iii) évaluer l'occurrence de bactéries pathogènes dans la zone de l'embouchure, iv) évaluer l'occurrence des intégrons de résistance (intégrons cliniques et environnementaux) dans les sédiments. Trois problématiques de santé humaine étroitement liées à la dynamique sédimentaire de cette zone de l'estuaire (site de Tancarville) ont été étudiées: 1) l'occurrence d'espèces pathogènes de *Vibrio*, bactéries autochtones de l'estuaire ; 2) l'occurrence d'*Aeromonas* dont certaines espèces sont autochtones du milieu estuarien et d'autres impliquées dans des maladies nosocomiales; 3) l'antibiorésistance bactérienne en focalisant sur les intégrons cliniques, supports génétiques impliqués dans la multi-résistance aux antibiotiques (contaminants xénogénétiques aujourd'hui comme des bio indicateurs du risque de dissémination de l'antibiorésistance dans l'environnement en parallèle aux intégrons environnementaux (marqueurs globaux d'une adaptabilité génétique aux contaminants chimiques)).

Cette étude s'appuie sur des observations *in situ* (5 campagnes) sur les site de Tancarville et des expérimentation dans le réacteur FLOCSIM. La reproductibilité des prélèvements dans l'embouchure de l'estuaire a été validée sur la base des valeurs du débit et du coefficient de marée afin de s'assurer de la présence du bouchon vaseux, sur le site de Tancarville. Un décanteur, spécifiquement développé dans le cadre de ce projet a permis de travailler sur 4 fractions enrichies en particules dont la vitesse de chute est $\geq 1 \text{ mm.s}^{-1}$ (fraction décantable F1), de $10^{-1} \text{ mm.s}^{-1}$ (fraction décantable F2), de $10^{-2} \text{ mm.s}^{-1}$ (fraction décantable F3) et $\leq 10^{-2} \text{ mm.s}^{-1}$ (fraction non décantable F4 obtenue après 4h10). Les résultats obtenus montrent que :

En surface et lorsque le bouchon vaseux est formé

Dans toutes les fractions on observe des floccs polymorphes organo-minéraux. La taille de ces floccs est plus petite dans la fraction F4 (vitesse de chute $< 0,01 \text{ mm.s}^{-1}$), alors que des floccs de taille supérieure à $50 \mu\text{m}$ sont spécifiquement retrouvés dans la fraction F1 (vitesse de chute $>1 \text{ mm.s}^{-1}$).

La composition minéralogique des floccs est essentiellement constituée d'aluminosilicates, de quartz, de carbonates ; ces derniers étant plus spécifiquement retrouvés dans la fraction F4 et dans l'eau de surface.

La diversité des microorganismes, composante organique active de ces floccs, ne présente pas de différence entre la fraction F1 et F4, et ce quelle que soit la taille du flocc, sauf pour les communautés microbiennes présentes sur les floccs de taille supérieure à 50 µm dont la vitesse de chute est >1 mm.s⁻¹.

Quantitativement *E. coli* est majoritairement présente dans la fraction F4, et associée, à raison de 74%, à des particules de taille comprise entre 2 µm et 50 µm, et 26% à des particules de taille comprise entre 0,45 µm et 2 µm.

Il n'existe pas de différence de structure de population de *E. coli* entre le fond et la surface, ni entre les différentes fractions, ce qui suggère un brassage des matières en suspension important gouverné par l'hydrodynamisme de l'estuaire. En revanche, en période de crue (et hors bouchon vaseux), la structure de la population d'*E. coli* présente dans l'eau de surface, est différente de celle observée en présence du bouchon vaseux (à basse mer et en étiage). La période de crue se caractérise par un apport plus important de souches d'origine humaine (effluent de STation de traitement des Eaux Usées - STEU), alors qu'en période d'étiage la structure des populations évoque un apport majoritairement d'origine animale (affluents intra-estuariens).

Aeromonas: dans l'embouchure cohabitent des espèces autochtones de l'estuaire, des espèces spécifiquement associées au biote (copépodes) et des espèces pathogènes pour l'Homme rejetées par les STEU (qui ne sont jamais retrouvées associées aux copépodes).

Des espèces pathogènes de *Vibrio* sont présentes dans la colonne d'eau et dans les sédiments des vasières intertidales.

Rôle des vasières dans la contamination de la colonne d'eau et le maintien des intégrons cliniques

L'érosion des vasières intertidales est responsable d'un apport en *E. coli* et en *Vibrio* pathogènes dans la colonne d'eau. Les vasières de l'estuaire sont donc une zone dynamique où les *E. coli* et les bactéries pathogènes se déposent à pleine mer et au jusant, et sont remises en suspension dans la colonne d'eau au flot.

Les sédiments de Seine, sont des environnements où une grande diversité d'intégrons environnementaux est retrouvé au sein des génomes des communautés microbiennes, suggérant une réponse adaptative de ces communautés à une exposition chronique aux contaminants chimiques.

Dans les zones impactées par des rejets de STEU, les intégrons cliniques se déposent à la surface mais ne s'y maintiennent pas en fonction du temps, notamment dans les zones avec des forçages dynamiques importants (embouchure, transect « Risle – Embouchure »). En revanche dans la carotte Rhapsodis, prélevée dans une zone non soumise à des phénomènes d'érosion naturelle, les intégrons peuvent se maintenir.

En terme de valorisation, au delà d'une valorisation scientifique des résultats dans des revues à comité de lecture (1 soumise, 5 en préparation), la valorisation opérationnelle des résultats sur la vitesse de chute des populations d'*E. coli* contribuera à enrichir les modèles sur la dynamique de la contamination fécale dans la zone du bouchon vaseux, développés à Ifremer. Un guide de stratégie d'échantillonnage pourrait être proposé à destination des scientifiques ou institutionnels concernés. Les résultats sur l'occurrence des intégrons cliniques pourront être présentés au CES eaux de l'Anses et intégrés dans la revue systématique des connaissances : « Quelles sont les solutions efficaces pour lutter contre la contamination des milieux naturels en antibiotiques, résidus et bactéries résistantes ? (Fondation pour la recherche sur la biodiversité, Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer).

Fin des travaux de recherche : Mars 2017

RESET

Rôle de l'estuaire de Seine dans l'écologie territoriale de la Normandie : cycles des nutriments et systèmes hydro-agro-alimentaires.

Coordination du projet : Josette Garnier

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- METIS UMR 7619, Université Pierre et Marie Curie – J. Garnier
- IFREMER, LERN – Philippe Riou
- Géocités, Université Paris Sorbonne – Sabine Barles

Résumé du projet :

Il existe un lien étroit entre l'organisation du système agro-alimentaire des régions Normandes (c'est-à-dire la manière dont sont produits, transformés, distribués et consommés les biens alimentaires) et la qualité de l'eau et le fonctionnement écologique de l'estuaire de la Seine, lui-même indissociable du fonctionnement du réseau hydrographique amont et de son bassin versant. C'est donc une démarche très englobante d'**écologie territoriale** qui a été initiée dans le projet RESET pour analyser le fonctionnement actuel de l'estuaire de la Seine dans le contexte du système agro-alimentaire Normand et ses tendances évolutives.

Plusieurs **outils méthodologiques** originaux ont été mis au point à cet effet :

L'analyse de la base de données SiTraM sur le transport de marchandises entre départements a été rendue possible grâce au développement d'un logiciel dédié (Amstram), recodé en Python dans le cadre du projet.

Une chaîne de modélisation (GRAFS-Seneque/Riverstrahler) a permis de relier la description des flux de matière à travers les principaux compartiments du système agro-alimentaire avec les apports diffus et ponctuels à l'hydrosystème, et de permettre ainsi une modélisation complète des transferts de nutriments depuis les bassins versants jusqu'à l'exutoire du réseau hydrographique.

Le modèle hydrodynamique côtier MARS-3D développé par l'Ifremer et appliqué avec succès sur des écosystèmes côtiers a été étendu au contexte estuarien entre Tancarville et Poses. La mise à jour des données bathymétriques et le calage de l'hydrodynamique estuarienne et de la dynamique sédimentaire du bouchon vaseux, et l'ajout des processus biogéochimiques liés à l'oxygène et aux groupes de phytoplancton et zooplancton d'eau douce en plus des groupes marins existants, ont permis de mettre au point un outil de modélisation fiable du fonctionnement estuarien, utilisant en conditions limites les flux calculés par le modèle Seneque/Riverstrahler à Poses et à l'exutoire de l'Eure et de la Risle.

Pour caractériser les déterminants politiques, écologiques, économiques et sociaux qui fondent la géographie du système agro-alimentaire normand, outre une recherche bibliographique et une analyse d'archives approfondies, des enquêtes ont été menées auprès des principaux acteurs du système régional.

Ces outils ont permis de retracer de manière synthétique la **trajectoire historique** du système agro-alimentaire normand depuis le début du XXe siècle.

Du début du XXe siècle à la fin des années 1950, se met en place un régime socio-écologique hybride, marqué encore par un haut degré d'autonomie alimentaire et par la prévalence de la polyculture –élevage, même si sont déjà présentes des caractéristiques de métabolisme à cycle ouvert liées aux exportations agricoles vers la région parisienne, un transit important de marchandises par les Ports et l'abandon du recyclage des excréta urbains.

À partir des années 1960, ce régime bascule vers toujours plus de linéarité dans un contexte d'industrialisation, de spécialisation et de mondialisation. L'agriculture se spécialise, soit vers les grandes cultures, comme dans l'Eure, soit vers un élevage spécialisé, comme dans la Manche, et a recours à toujours

plus d'intrants (engrais de synthèses, aliments pour bétail importés). La grande distribution prend le pas sur le commerce de détail et contrôle une grande part de l'approvisionnement alimentaire Normand à travers ses centrales d'achats. La Normandie devient une région exportatrice de produits agricoles, qui cesse de se nourrir elle-même, non qu'elle ne puisse le faire compte tenu de ses productions, mais parce les mutations de la distribution et du commerce alimentaire ont contribué à les dé-territorialiser.

Ce régime socio-écologique atteint son apogée dans les années 1980. Plusieurs éléments conduisent alors à des adaptations à la marge, le plus souvent initiées par un souci croissant de protection de l'environnement, qui pérennisent plus qu'elles ne remettent en question le régime dominant. Enfin, au cours des dernières années, des signaux faibles sont détectables et pourraient annoncer une transition, qui est pourtant loin d'être pleinement engagée, et donc loin d'être achevée, ni d'ailleurs certaine, vers une relocalisation et une re-circularisation du fonctionnement du système agro-alimentaire.

L'analyse de **l'évolution de la qualité de l'eau** de l'axe principal de la Seine (entre l'amont de Paris et Poses) au cours de cette trajectoire séculaire du système hydro-agro-alimentaire révèle un parallélisme très clair. Les apports diffus de nitrate liés à l'agriculture montrent, en amont de Paris, une croissance continue depuis les années 1960 avec une stabilisation depuis la fin des années 1990. En revanche, l'amélioration du traitement des eaux usées urbaines conduit à une amélioration par pallier des dommages résultants des apports ponctuels (oxygénation, contamination en phosphore et en ammonium). La simulation du fonctionnement biogéochimique de l'estuaire permet d'en évaluer le **rôle filtre** vis-à-vis des nutriments qui lui parviennent depuis le bassin versant amont. Ce rôle apparaît aujourd'hui assez limité et variable d'une année sur l'autre en fonction de l'hydraulicité : de 0 à 30% pour l'azote total, de 0-25% pour la silice, de -5 à +20% pour le P.

Le dernier volet du projet a consisté à élaborer 4 **scénarios d'évolution à long terme** (horizon 2050) du système agro-alimentaire et d'en modéliser les conséquences en termes de fonctionnement biogéochimique et de qualité de l'eau de l'estuaire. L'objectif de ces visions n'est pas de définir le futur probable ou souhaité du territoire, mais de susciter la réflexion, et une meilleure compréhension des tendances, parfois antagonistes, visibles actuellement dans le territoire.

Le scénario intitulé *Le futur radieux du Grand Paris et l'hyper-spécialisation des territoires agricoles*, décrit une vision poussant jusqu'à l'extrême une orientation marquée par le désir de croissance économique très présent dans les discours officiels, qui s'accompagne de l'accroissement de la spécialisation territoriale dans la mondialisation, de la poursuite de l'intensification agricole, de la concentration de la population le long de l'axe Seine au détriment du bassin amont.

Un futur bio-autonome-démocratique, sobre et écologiquement vertueux privilégie au contraire les tendances à la relocalisation et à la circularisation des flux dans un contexte de sobriété de la consommation.

Une agriculture duale propose la coexistence des deux modèles précédents grâce à un partage du territoire entre aires de développement économique spécialisées et espaces de protection. Ces derniers, constitués des aires d'alimentation de captages d'eau potable et des Parcs Naturels Régionaux, concernent plus d'un tiers du territoire du bassin de la Seine, ce qui rend non négligeable l'impact des pratiques qui y sont expérimentées.

Enfin le scénario *Et si rien n'avait été fait en matière de réglementation depuis 40 ans ?* permet de mesurer en creux les effets sur l'environnement obtenus grâce à l'application des directives nationales et européennes. Il met en garde contre tout désengagement d'une nation ou d'une Europe en crise, ne pouvant plus investir dans de nouvelles infrastructures ou ayant peine à maintenir l'existant.

Au final, le projet RESET, en offrant une vision large du fonctionnement du système hydro-agro-alimentaire de la Normandie et du bassin de la Seine, ouvre la voie à une réflexion d'ensemble sur les **projets de développement** souhaités pour ces territoires en lien avec les conséquences environnementales qu'elles impliquent.

Fin des travaux de recherche : Mars 2017

Coordination du projet : Benoit Xuereb

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s):

- UMR-I-02 SEBIO, Université du Havre – Benoit Xuereb
- UMR LIENSs – Paco Bustamente
- MMS EA 2160, Université Catholique de L'ouest – Catherine Mouneyrac
- MMS EA 2160, Université de Nantes – Laurence Poirier
- UMR 8187 LOG, Université de Lille 1 – Sami Souissi
- Société TOXEM
- UMR 5805 EPOC, Université de Bordeaux – Héléne Budzinski

Résumé du projet :

Les réponses biologiques mesurées de la molécule à l'individu, communément regroupées sous le terme générique de biomarqueurs (incluant la bioaccumulation), trouvent aujourd'hui leur place au sein des réglementations visant à classer la qualité des masses d'eau. En effet, elles apparaissent comme un complément essentiel aux analyses chimiques eau/sédiment et aux approches biocénologiques, en permettant de caractériser plus spécifiquement les effets de la contamination sur les organismes exposés. Toutefois, le déploiement de biomarqueurs dans le cadre d'un réseau de surveillance environnemental nécessite au préalable de préciser les conditions d'application des différents outils déployés et d'établir, au regard de leur pertinence écotoxicologique et écologique, une grille de lecture conduisant à une interprétation claire et intégrative. Si de tels niveaux de finalisation méthodologique commencent à être atteints en milieu marin et dans certaines portions des bassins versants continentaux, ce n'est pas encore le cas pour les écosystèmes estuariens. C'est donc dans ce contexte qu'a émergé le projet ECOTONES. Fort de l'expertise acquise lors de précédents travaux (e.g. Programmes Seine Aval, PNETOX, OSPAR), ce projet a pour ambition d'initier une stratégie de suivi pérenne des effets de la contamination sur l'état de santé de la faune estuarienne et son évolution. Résolument centré sur la mesure de réponses biologiques chez des organismes indigènes de l'estuaire de la Seine, ECOTONES a pour objectif de proposer, à terme, une sélection d'outils opérationnels en vue de caractériser l'état écotoxicologique du système.

La stratégie mise en place repose sur une approche multi-espèce (i.e. annélides, mollusques, crustacés, poissons et oiseaux) qui cible des organismes présentant un intérêt sur le plan écologique et écotoxicologique, et pertinents vis à vis du réseau trophique. L'approche employée se veut également multi-marqueurs, puisque les effets de la contamination sont examinés sur différentes fonctions biologiques et à différents niveaux d'organisation (i.e. sub-individu, individu, population), afin de permettre une estimation de l'état de santé des organismes et guider les interprétations écologiques sur l'état de santé des populations. En ce sens, les perturbations en lien avec des grandes fonctions biologiques susceptibles d'avoir des répercussions en terme de fitness des individus et des populations, sont particulièrement ciblées (i.e. génotoxicité, reprotoxicité, immunotoxicité et pathologies, comportement, traits d'histoire de vie). Certains outils déployés (i.e. couple marqueur/espèces) bénéficient déjà d'un important recul scientifique. D'autres,

au contraire, ont été sélectionnés en dépit de leur aspect novateur, du fait de leur pertinence écotoxicologique et/ou pour pallier au manque de connaissances.

Le projet a débuté durant le dernier trimestre 2014 pour une durée de 4 ans. Les premiers prélèvements et les analyses associées ont commencé dès le printemps 2015 (avec un rythme propre aux contraintes liées à chaque outil), et se clôtureront à l'issue de l'année 2017. Plus des deux tiers des constantes biologiques mesurées sur la faune aquatique présentent des valeurs anormales, voire préoccupantes. A titre d'exemple, 15 % des flets mâles prélevés en 2016 montrent des signes d'intersexualité au niveau de la structure de leurs gonades. L'ADN des spermatozoïdes de crevettes montre un taux d'endommagement jusqu'à 230 % supérieur à la normale. En ce qui concerne l'avifaune qui fait l'objet d'un volet plus exploratoire, le dosage d'éléments traces souligne la présence d'arsenic, de mercure et de plomb en concentrations non-négligeables dans le plasma des trois espèces de goélands suivies. La caractérisation isotopique tend à montrer que cette imprégnation métallique est dépendante du niveau trophique et de l'habitat d'alimentation. Les résultats préliminaires de dosages de polluants organiques persistants tendent à montrer que ce sont les HAPs les plus volatils (< 4 cycles) qui se retrouvent majoritairement dans le plasma des 3 espèces indépendamment du site ou de l'espèce, suggérant davantage une contamination par inhalation. Enfin, fait remarquable, le sexage moléculaire montre un déséquilibre du sexe ratio en faveur des mâles chez les goélands marins (20 mâles sur 26 individus), phénomène qui a été rapporté chez les goélands bourgmestres en Arctique en lien avec une contamination élevée en pesticides organochlorés (Erikstad *et al.* 2011).

Au delà de la donnée brute, le consortium d'ECOTONES travaille à la définition d'une grille de lecture, pour chaque outil, permettant (1) d'estimer la (non)-significativité et la spécificité de la réponse biologique vis-à-vis du stress chimique et (2) de classifier le niveau de gravité de l'effet observé. L'atteinte de cet objectif nécessite de disposer de valeurs auxquelles se référer. Cette problématique occupe une place centrale dans la mesure où ECOTONES se veut résolument centré sur l'estuaire de la Seine et n'intègre de ce fait aucun point dit « de référence ». Différentes stratégies sont appliquées dépendamment de la nature et de l'expertise disponible pour chaque couple indicateur/espèce: (1) l'utilisation de grilles de lectures déjà disponibles comme dans le cas des outils développés dans le cadre de la convention OSPAR, (2) la mise au point de distributions de référence à partir de banques de données collectées par ailleurs sur des sites peu impactés, ou (3) l'estimation du degré de perturbation sur la base d'expérimentations de dépuración en laboratoire. In fine, l'objectif est de proposer un ou quelques indices intégrateurs des différents résultats générés dans le cadre du projet (ie. interprétations croisées des différentes mesures en intra- et/ou inter-espèces) comme un outil d'aide à la gestion pour caractériser la qualité écotoxicologique des masses d'eau estuarienne.

Fin des travaux de recherche : mars 2018

ANPHYECO-SEINE

Analyse du fonctionnement hydrologique, morphologique, sédimentaire et écologique
[en vue d'une recherche de pistes de restauration globale] de l'estuaire de la Seine

Coordination du projet : Stefan Van Damme

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- Ecosystem Management Research Group (ECOBIE), Antwerp University (UAntwerpen), Stefan Van Damme
- IFREMER, DYNECO/PHYSED – Pierre Le Hir
- Flanders Hydraulics - Wouter Vandenbruwaene
- Institute of Estuarine and Coastal Studies (IECS), The University of Hull – Mike Elliot

Résumé du projet :

Le projet Anphyeco propose une analyse de l'écosystème avec une approche **globale, holistique et systémique**, s'appuyant sur les **principaux facteurs de contrôle** du fonctionnement du système. Il cherche en effet 1/ à mettre en évidence, un diagnostic du fonctionnement écologique (HMS, Biologie) de l'estuaire de la Seine grâce à une analyse diachronique et une comparaison inter-estuariennes et 2/ à cibler des leviers de gestion et étudier leur pertinence dans une démarche visant à améliorer la situation mise en évidence dans l'étape précédente.

Le projet ANPHYECO-Seine s'appuie sur les acquis du projet Interreg TIDE (2010-2013). Dans ce projet, quatre estuaires européens ont été comparés pour caractériser le fonctionnement écologique et aboutir à des propositions méthodologiques pour aider la gestion intégrée de ces systèmes.

Le projet Anphyeco a produit un premier diagnostic global, qui met en évidence :

1/ par comparaison avec l'Escaut, les **faibles concentrations de chlorophylle** et probablement une plus faible intensité de la production primaire dans le secteur fluvial de l'estuaire de Seine et **le rôle du temps de résidence** de l'eau dans ce phénomène ;

2/ un **déficit estival en silice en baie de Seine qui limite la production de diatomées** (source préférentielle d'aliments pour les consommateurs primaires) en lien avec des blooms phytoplanctoniques et le débit;

3/ les résultats acquis dans SA5-PROUESSE ont mis en évidence qu'une partie de production primaire produite en baie revient avec la marée en estuaire et constitue une ressource trophique pour la zone d'embouchure. La modélisation hydrodynamique Mars 3D permet d'évaluer, selon les secteurs de production et les conditions hydrodynamique, la part de cette matière qui serait rendue disponible pour le système trophique embouchure ;

4/ par l'analyse de l'évolution diachronique de l'hydrologie, des MES et de la qualité de l'eau du système, des signes d'un **accroissement de ce déficit de fonctionnement trophique** entre 1960 et aujourd'hui.

Ce diagnostic conduit à rechercher les leviers les plus efficaces pour renforcer la production primaire en Seine, en perspective d'améliorer son fonctionnement trophique. Augmenter le **temps de résidence** à l'échelle du système apparaît aujourd'hui peu envisageable en raison de l'ampleur des aménagements et des usages sur la Seine. Le projet ANPHYECO souhaite tester l'impact, sur la **production primaire et les équilibres en nutriments** de la Seine, de la création d'annexes hydrauliques connectées à l'estuaire à chaque marée dans la zone située entre Tancarville et Poses. Le principe de ce type de mesure sera illustré.

Fin des travaux de recherche : septembre 2017

PROGRAMME DE RECHERCHE SEINE-AVAL 6 (2017-2020)

9 PROJETS – 28 EQUIPES

Les objectifs sont de mieux appréhender la complexité des relations entre les différentes composantes de l'estuaire : physique, hydrologique, chimique, écologique et anthropique dans une démarche focalisée sur la fonctionnalité des habitats et des trajectoires d'évolution long terme.

Les résultats escomptés permettront de :

- **mieux décrire les facteurs qui gouvernent la qualité des milieux estuariens et d'être en capacité de prédire leur évolution,**
- **mieux évaluer l'influence de la qualité des milieux de l'estuaire dans le maintien et la santé des populations de poissons,**
- **mieux comprendre et anticiper les évolutions de l'estuaire sur le long terme, en lien avec l'évolution du territoire.**

Pour cela, le programme Seine-Aval 6 s'inscrit dans une dynamique qui vise à :

- approfondir l'analyse des interactions entre activités humaines et les facteurs naturels qui régissent le fonctionnement de l'estuaire ;
- appréhender les problématiques de l'estuaire en lien étroit avec celles de la baie de Seine et favoriser les comparaisons avec d'autres estuaires ;
- articuler les orientations avec les programmes d'acquisition de connaissances sur le bassin de la Seine (Zone Atelier Seine).

Acronyme	Titre	Coordonnateur	Résumé
MEANDRES	Modélisation de l'Effet des déplAcements aNthropiques de séDiments sur l'estuaiRE de la Seine	Pierre Le Hir <i>IFREMER</i>	p. 39
PHARE-SEE	Productivité microphytobenthique des HABitats intertidaux en lien avec la dynamique sédimentaire, biogéochimique et les ingénieurs d'écosystème de la faune benthique: implication pour des enjeux de modélisation et de REhabilitation des vasières de la SEine Estuarienne	Francis Orvain, <i>Université de Caen</i> Arnaud Huguet <i>Université Pierre et Marie Curie</i>	p. 40
SENTINELLES	Fonctionnement des écosystèmes de l'embouchure de l'estuaire de la Seine à travers une étude interdisciplinaire ciblant le zooplancton et le macro-zoobenthos	Sami Souss <i>Université Lille 1</i>	p. 42
PLASTIC-Seine	Flux et impacts des micro-plastiques dans l'estuaire de la Seine	Jérôme Cachot <i>Université de Bordeaux 1</i> Johnny Gaspéri <i>Université Paris-Est</i>	p. 44
CAPES	CApacité trophique des nourriceries de Poissons de l'Estuaire de Seine	Anick Brind'Amour <i>IFREMER</i>	p. 46
CHOPIn	Contaminants organoHalogénés histOriques et d'intérêt émergent : Présence et transfert vers la sole commune – Impact de la contamination sur la Nourricerie et conséquences sur la population	Pierre Labadie <i>Université de Bordeaux 1</i>	p. 48
HQFISH	Impact de la qualité des habitats estuariens de la Seine sur le fonctionnement d'une population de poisson (du recrutement des juvéniles, au processus de reproduction ^o)	Rachid Amara, <i>Université du Littoral</i> Jean Laroche <i>Université de Bretagne Occidentale</i>	p. 49
TraEsSi	Trajectoires de l'Estuaire depuis la fin du XVIIIe Siècle. Approche géo-historique de l'évolution de l'état de l'estuaire en fonction de ses usages	Laurence Lestel <i>Université Pierre et Marie Curie</i>	p. 51
MORPHOSEINE	Modélisation de l'évolution morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine	Pierre Le Hir <i>Ifremer</i>	p. 52

MEANDRES

Modélisation de l'Effet des déplacements anthropiques de sédiments sur l'estuaire de la Seine

Coordination du projet : Pierre Le Hir

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- IFREMER, DYNECO/PHYSED – Pierre Le Hir
- GIPSA – Jean-Philippe Lemoine

Résumé du projet :

Le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire (HMS) d'un estuaire dragué pour les besoins de la navigation peut se révéler très sensible au déplacement des masses sédimentaires liées aux opérations de dragage et au dépôt de matériaux dragués. D'une part ces interventions génèrent des flux s'ajoutant aux flux naturels liés aux courants et aux vagues, mais surtout elles entraînent une modification morphologique susceptible d'impacter en retour les courants et transports sédimentaires. Selon l'emplacement des rejets de dragage, une part des sédiments dragués est susceptible de revenir dans l'estuaire, voire dans le secteur dragué, et ainsi influencer le volume des dragages d'entretien. Plus généralement, les opérations de dragages influencent le bilan sédimentaire. Dans le cas de la Seine, les 6 millions de m³ dragués sont supérieurs à l'estimation des apports naturels de sédiment à l'estuaire, d'origine marine ou fluviale.

En s'appuyant sur un modèle hydro-sédimentaire déjà validé dans le cadre du Programme Scientifique Seine-Aval, le projet Seine-Aval 6 MEANDRES a pour objet d'étudier l'effet des transferts anthropiques de sédiments sur le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Après une phase de validation de la nature des sédiments et des quantités draguées, les facteurs de forçages météo-océaniques à l'origine des dépôts de sédiments à draguer seront analysés. Par une technique de marquage numérique des particules, un suivi spatio-temporel des sédiments dragués puis clapés en mer sera réalisé, afin de caractériser la part de ces matériaux susceptibles de réalimenter le bouchon vaseux et les vasières latérales ou les bancs d'embouchure, ainsi que les temps de transferts associés. L'influence des stratégies de dragage sur l'évolution long terme (20 à 50 ans) de la morphologie de l'estuaire et de la nature de sa couverture sédimentaire sera considérée, selon différents scénarios prospectifs.

Fin des travaux de recherche : Aout 2019

PHARESEE

Productivité microphytobenthique des HABitats intertidaux en lien avec la dynamique sédimentaire, biogéochimique et les ingénieurs d'écosystème de la faune benthique: implication pour des enjeux de modélisation et de REhabilitation des vasières de la SEine Estuarienne

Coordination du projet : Francis Orvain, Arnaud Huguet

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR 7208 BOREA, Université de Caen – Francis Orvain
- UMR 7619 METIS, Université Pierre et Marie Curie - Arnaud Huguet
- IFREMER, DYNECO – Bénédicte Thouvenin
- UMR 6143 M2C, Université de Rouen – Valérie Mesnage
- UMR 5805 EPOC, Université de Bordeaux – Olivier Maire
- UMR 6553 ECOBIO, Université de Rennes 1 – Anniet Laverman
- UMR 8222 Laboratoire d'Ecogéochimie des Environnements Benthiques, Observatoire océanologique de Banyuls – Katell GUIZIEN
- UMR LIENS, UMRi 7266, Université de La Rochelle – Vincent Lefouest
- UMR 7154, IPGP – Eric Viollier
- UMR 7618 IEES, Université Pierre et Marie Curie – Mathieu Sebilo
- Maison de l'estuaire - Thomas Lecarpentier

Résumé du projet :

Ce projet propose de modéliser la production primaire microphytobenthique en relation avec la dynamique sédimentaire et les processus biogéochimiques impliquant la reminéralisation de la matière organique, la sécrétion d'exopolymères composant la matière organique dissoute et liée, la production bactérienne et la bioturbation. Un modèle bi-couche décrivant la production primaire microphytobenthique a été réactualisé récemment pour intégrer l'assimilation des nutriments azotés. Nous proposons d'implanter ce modèle dans un modèle générique MARS1DV qui sera utilisé comme modèle générique pour comparer la réponse microphytobenthique à différents forçages estuariens en termes de courant/vagues, température, lumière et substrat sédimentaire (les flux diffusifs de nutriments variant en fonction du mélange sablo-vaseux et de l'intensité de la bioturbation par la méiofaune/macrofaune benthique).

La consommation par les maillons inférieurs des consommateurs primaires appartenant à la méiofaune et la macrofaune sera intégrée grâce à l'acquisition de nouvelles données sur le transfert trophique vers des espèces-clé comme le ver *Hediste diversicolor* et le bivalve *Scrobicularia plana* ainsi que la méiofaune.

Des expériences d'exclusion/ensemencement de faune seront menées sur le site (vasière nord) pour mesurer l'impact des 3 types de bioturbateurs sur les processus écologiques et leurs couplages sur 2 faciès sédimentaires représentatifs (haute fréquence temporelle).

Ce modèle permettra de comparer le fonctionnement estuarien de vasières (slikkes) de la Seine avec d'autres écosystèmes estuariens. Ce modèle sera ensuite spatialisé (3D) pour paramétrer la structure spatiale de la croissance du biofilm et de son exportation par érosion et consommation directe (broutage) dans l'estuaire de la Seine en réponse aux variations sédimentaires et biogéochimiques.

Fin des travaux de recherche : Juin 2020

SENTINELLES

Fonctionnement des écosystèmes de l'embouchure de l'estuaire de la Seine à travers une étude interdisciplinaire ciblant le zooplancton et le macro-zoobenthos

Coordination du projet : Sami Souissi

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR 8187 LOG, Université de Lille – Sami Souissi
- EA 2160 MMS, Université Catholique de l'Ouest - Catherine Mouneyrac
- UMR CNRS-UPS-INPT 5245 ECOLAB , Université de Toulouse 3 – Michèle Tackx

Résumé du projet :

Le projet SENTINELLES cible deux compartiments clefs du fonctionnement de l'écosystème de l'estuaire de la Seine au niveau de l'embouchure et qui sont le macro-zoobenthos intertidal et le zooplancton. Pour cela, il s'appuie sur un consortium composé de trois équipes de recherche très complémentaires. Le programme de recherche du projet SENTINELLES est structuré essentiellement autour de trois tâches et comporte des interactions fortes avec d'autres projets comme PHARE-SEE et PLASTIC-Seine.

La première tâche vise à rassembler toutes les données et les informations utiles obtenues dans des suivis de la macrofaune benthique et les paramètres environnementaux au niveau de la vasière Nord. Ce travail de synthèse va permettre la construction d'une base de données pluriannuelle qui sera par la suite analysée pour mieux caractériser la variabilité spatio-temporelle des principaux assemblages du macro-zoobenthos et identifier les principaux paramètres environnementaux structurants. Les outils statistiques basés sur la cartographie multivariée bayésienne développés par le porteur du projet dans le cadre d'autres projets seront mobilisés et adaptés à cette problématique.

Dans la même tâche, une deuxième action sera dédiée au ver annélide polychète *Hediste diversicolor* qui a fait l'objet d'autres études scientifiques dans la Seine (vasière Nord) et dans d'autres estuaires contrastés (Authie, Loire et Escaut). Cette analyse va consolider la démarche de modélisation des habitats fonctionnels en essayant de confronter notre modèle statistiques (à concevoir pour la Seine) à d'autres habitats similaires mais se trouvant dans d'autres estuaires.

Une deuxième tâche basée sur un suivi in situ dans la vasière Nord sera conduite conjointement par le projet PHARE-SEE et le projet SENTINELLES. Il s'agit de réaliser un suivi de la dynamique de population de *H. diversicolor* et mesurer tous les paramètres pertinents afin de perfectionner nos modèles d'habitats fonctionnels et en même temps contribuer scientifiquement à la dynamique globale de tous les projets ciblant l'écosystème de la vasière Nord.

Enfin, la dernière tâche du projet SENTINELLES cible le compartiment zooplanctonique et comporte deux actions. La première action a pour objectif de quantifier l'abondance et la biomasse totale (rotifères, copépodes, cladocères) du zooplancton, disponible, en moyen, comme nourriture pour les niveaux trophiques supérieurs (mysides, poissons). La deuxième action propose de réaliser des incubations sur le

terrain selon un protocole déjà testé et validé dans la Seine afin de bien estimer le rôle du micro-zooplancton et du méso-zooplancton dans le contrôle par broutage du phytoplancton.

Les résultats escomptés pourront intéresser les projets travaillant sur la modélisation de la production primaire et le devenir de la matière organique ainsi que les projets qui s'intéressent à la qualité des habitats vis-à-vis des jeunes poissons et la fonction nourricière assurée par l'estuaire. D'une façon générale, le projet contribue à l'enrichissement des outils opérationnels du GIP Seine-Aval comme le SIG habitats fonctionnels mais également au questionnement global sur la meilleure façon de conserver et/ou favoriser certains habitats de l'embouchure de la Seine.

Fin des travaux de recherche : Mars 2020

Fonctionnement des écosystèmes de l'embouchure de l'estuaire de la Seine à travers une étude interdisciplinaire ciblant le zooplancton et le macro-zoobenthos

Coordination du projet : Anik Brind'Amour

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- IFREMER – Anik Brind'Amour
- Cellule de Suivi du Littoral Normand – Sylvain Duhamel
- UMR 6143 M2C, Université de Caen – Jean-Claude Dauvin

Résumé du projet :

La fonction de nurricerie d'un habitat est définie par sa capacité à maximiser la croissance et la survie des juvéniles de poissons. Le nombre de recrues d'une espèce nurricerie-dépendante étant directement proportionnel à la superficie de ces habitats côtiers, le maintien de la taille ainsi que de la qualité de tels habitats est décisif dans le renouvellement des espèces de poissons qui leur sont associées. Depuis les 30 dernières années, l'estuaire de Seine a subi de profondes modifications morphologiques. Or, cet estuaire assure une fonction de nurricerie, indispensable au recrutement et donc au renouvellement des stocks de plusieurs espèces de poissons. De récents travaux ont estimé à plus de 40% la perte de production de juvéniles de soles en estuaire de Seine depuis 1850 (Rochette *et al*, 2013), la principale cause évoquée étant la forte diminution surfacique des nurriceries - estimée à près de 33% - pour cette espèce (Delsinne, 2005). En parallèle, la qualité trophique de certains habitats tels les vasières intertidales, montrent des diminutions importantes de proies potentielles de poissons (e.g. *Hediste diversicolor*, Bessineton, 2009).

Le projet CAPES a pour objectif principal la description et la quantification spatio-temporelle de la capacité trophique de la baie de Seine et de ses effets sur l'état physique (croissance et condition physique) des juvéniles avec une focale sur quatre espèces nurriceries-dépendantes (sole, plie, merlan, bar). Il propose d'échantillonner sur deux périodes particulièrement importantes dans la vie d'un juvénile de poisson, au moment de l'installation sur la nurricerie au mois de mai et à la fin de la période de croissance forte, c'est-à-dire à la fin de l'été au mois d'octobre. L'atteinte de l'objectif de CAPES repose sur trois axes de travail. Le premier axe comporte une description et une quantification spatio-temporelle des communautés benthiques. L'originalité du projet dans cet axe repose sur la prise en compte de l'intégralité écologique des proies potentielles des poissons, incluant les organismes benthiques, suprabenthiques et la méiofaune. Le deuxième axe propose de mettre en lien ces communautés benthiques avec les communautés de poissons via l'analyse spatialisée des réseaux trophiques et des contenus stomacaux des juvéniles de poissons. L'utilisation de modèles de mélange isotopiques et l'analyse des contenus stomacaux permettront de sectoriser l'importance trophique de la baie de Seine. Le troisième axe permettra d'appréhender les implications halieutiques de la capacité trophique sur le recrutement de juvéniles des espèces sélectionnées. Cet axe se déclinera sur une échelle temporelle intra-annuelle où les effets de la disponibilité alimentaire sur la croissance et la condition des juvéniles seront analysés en mai et en octobre. Dans un second temps, seront mis en relation la variabilité interannuelle de la capacité trophique de la baie avec notamment le débit de la Seine et les indices de recrutement estimés par le CIEM. A cette étape sera utilisé un ensemble de données acquises dans le cadre de différents projets financés par Seine Aval, en parallèle de données acquises au cours de la campagne Nourseine (FEAMP 2016) menées au mois de septembre de 2017 à 2019.

Les résolutions temporelles (intra et interannuelle) et la sectorisation de CAPES s'inscrivent dans une logique de gestion spatialisée de la baie de Seine. La compréhension des processus écologiques (e.g. trophique) sous-jacents au maintien de la capacité d'accueil des poissons permettra d'alimenter les mesures de gestion à l'échelle des habitats de la baie de Seine. Cette transposition est d'autant plus réaliste que ces habitats sont facilement identifiables par les gestionnaires et qu'ils sont le siège de différentes évolutions temporelles souvent en lien avec certaines activités anthropiques (e.g. Port 2000 et mesures d'accompagnement en fosse nord et travaux d'approfondissement et dragages permanents dans le chenal de navigation du Port de Rouen).

Fin des travaux de recherche : Mars 2020

Flux et impacts des microplastiques dans l'estuaire de la Seine

Coordination du projet : Jérôme Cachot, Johnny Gasperi

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s):

- UMR CNRS EPOC 5805, Université de Bordeaux - Jérôme Cachot
- LEESU, Université de Paris Est - Johnny Gasperi
- EA 2160 MMS, Université Catholique de l'Ouest - Catherine Mouneyrac
- IFREMER, *LER Normandie* : Marie-Pierre Halm-Lemeille , *LER Provence-Côte d'Azur* : François Galgani , *HGS-LRH* : Marie-Laure Begout , *RDT-LDCM* : Emmanuel Rinnert
- UMR 8187 LOG, Université de Lille – Sami Souissi
- UMR INERIS-02 SEBIO, Université du Havre – Benoit Xuereb

Résumé du projet :

Le projet PLASTIC-Seine (Flux et impacts des microplastiques dans l'estuaire de la Seine) a pour objectif d'étudier de manière intégrée l'occurrence et les niveaux d'imprégnation de l'estuaire de la Seine par les microplastiques (colonne d'eau, sédiment et réseau trophique), mais également d'évaluer leur devenir et leur impact sur différents niveaux du réseau trophique. Il permettra de dresser un premier état des lieux de la contamination en microplastiques de l'estuaire. L'intérêt d'étudier les microplastiques est particulièrement pertinent dans l'estuaire de la Seine dans la mesure où il draine un bassin versant très fortement urbanisé et industrialisé et présente de nombreuses zones d'accumulation de macrodéchets. Ces particularités suggèrent que les différents compartiments de l'estuaire (colonne d'eau, sédiment et biote) pourraient être fortement contaminés par des microplastiques générés directement par les activités humaines ou produits secondairement par dégradation des macrodéchets. Ces microplastiques pourraient induire des effets délétères de nature physique ou toxicologique sur différents niveaux du réseau trophique.

Pour répondre à ces objectifs, le projet PLASTIC-Seine est structuré autour de trois tâches analytiques et expérimentales et une tâche de coordination.

La première tâche vise à dresser un état des lieux de la contamination des compartiments abiotiques sur le fleuve Seine de l'amont de Paris jusqu'à l'embouchure de l'estuaire de Seine par les microplastiques. Au total, 6 stations réparties entre l'amont de Paris et la baie de Seine seront étudiées (amont de Paris (Choisy-le-Roi), aval immédiat de Paris (Triel-sur-Seine), entre la partie amont et aval du bassin de la Seine (Pose), estuaire moyen (Quillebeuf/Honfleur), estuaire aval (entre Honfleur et le Havre) et partie orientale de la baie de Seine (secteur Ouistreham/Antifer)). La morphologie des microplastiques retrouvés en Seine sera décrite et la nature des polymères sera caractérisée par des méthodes spectroscopiques infra-rouge et Raman sur une partie représentative des échantillons. Des premières tentatives de calcul de flux de microplastiques sur le continuum Seine seront conduites en considérant les différentes sources urbaines et campagnes de mesures.

La seconde tâche se focalise sur l'état de la contamination du réseau trophique de l'estuaire de Seine par les microplastiques. Sept espèces emblématiques du réseau trophique de l'estuaire de Seine seront échantillonnées sur plusieurs sites de l'estuaire de Seine : deux composantes du zooplancton les copépodes *Eurytemora affinis* et *Acartia* sp., une annélide polychaete *Hediste diversicolor*, un crustacé décapode

Palaemon longirostris, un mollusque bivalve *Mytilus edulis* et enfin trois poissons dont deux espèces benthiques *Platichthys flesus* et *Solea solea* et la troisième pélagique *Dicentrarchus labrax*. Les MP seront dénombrés in toto dans le zooplancton et les invertébrés, dans les fèces pour les vers et dans les branchies et le tractus digestif pour les poissons. Pour les poissons, la présence de lésions cutanées (ulcères, érosions des nageoires...) et de parasites sur la peau, les branchies et dans le tube digestif sera également notée. La nature et la morphologie des MP retrouvés dans les organismes échantillonnés seront caractérisées et comparées à celle observées dans les compartiments abiotiques.

La troisième tâche a pour objectif de mieux comprendre l'ingestion, l'excrétion des microplastiques et leurs effets sur plusieurs maillons du réseau trophique de l'estuaire. D'une part, les cinétiques d'ingestion et d'excrétion de microplastiques environnementaux sur trois espèces représentatives (le copépode *Eurytemora affinis*, l'annélide polychaete *Hediste diversicolor* et le poisson *Solea solea*) seront étudiées. A partir de ces cinétiques, Le taux d'ingestion et d'excrétion ainsi que le temps de transit dans le tractus digestif de ces MP seront déterminés pour chaque espèce sélectionnée. D'autre part, les effets d'une exposition à deux mélanges environnementaux de microplastiques collectés dans la colonne d'eau et les sédiments de l'estuaire de Seine seront évalués sur la survie, le comportement et les grandes fonctions physiologiques de ces trois espèces.

Le projet PLASTIC-Seine délivrera ainsi les premières connaissances sur l'état de contamination des compartiments abiotiques et biotiques en Seine. Il offrira une vision intégrée de cette contamination sur une large échelle spatiale et pour de nombreux compartiments environnementaux. Ces connaissances seront utiles aux différents gestionnaires pour élaborer des actions de réduction des quantités de micro-déchets en mer (défis 4 du SDAGE 2016-2021), mais aussi dans le cadre de la DC-SMM (descripteur 10) pour mieux cerner les pressions par le bassin versant, le devenir et les effets des microplastiques sur le continuum fleuve, l'estuaire et la baie de Seine.

Fin des travaux de recherche : Mars 2020

CHOPIN

Contaminants organoHalogénés histOriques et d'intérêt émergent : Présence et transfert vers la sole commune – Impact de la contamination sur la Nourricerie et conséquences sur la population

Coordination du projet : Pierre LABADIE

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR CNRS EPOC 5805, Université de Bordeaux - Pierre LABADIE
- IFREMER, Laboratoire Biogéochimie des Contaminants Organique, Unité Biogéochimie et Ecotoxicologie – Véronique Loizeau
- IRSTEA, Equipe « Fonctionnement des Ecosystèmes Estuariens », Unité de Recherches « Ecosystèmes Aquatiques et Changements Globaux » - Jérémy Lobry
- Cellule de Suivi du Littoral Normand – Sylvain Duhamel
- Agrocampus Ouest - Olivier Le Pape
- TOXEM, Jérôme Couteau

Résumé du projet :

De nombreuses espèces marines d'intérêt halieutique réalisent la phase juvénile de leur cycle de vie dans des habitats restreints, en milieu côtiers et estuariens. Ces nourriceries sont ainsi considérées comme des habitats halieutiques essentiels, notamment chez de nombreux pleuronectiformes (ordre des poissons plats auquel appartient la sole commune *Solea solea*). Les habitats constitutifs des nourriceries ne fournissent pas systématiquement des conditions de vie optimales, notamment en raison de leur état de contamination chimique.

Dans ce contexte, CHOPIN étudiera, dans l'estuaire de la Seine, les transferts de contaminants organohalogénés (COH) historiques et d'intérêt émergent depuis le sédiment et via le réseau trophique au cours de la phase juvénile de la vie de la sole. Ce projet visera par ailleurs à mieux comprendre l'impact de la contamination globale de la nourricerie de l'estuaire de Seine sur la capacité de renouvellement du stock de sole de Manche Est, alimenté par cette nourricerie.

Fin des travaux de recherche : Mars 2020

Impact de la qualité des habitats estuariens de la Seine sur le fonctionnement d'une population de poisson (Du recrutement des juvéniles, au processus de reproduction)

Coordination du projet : Jean Laroche, Rachid Amara

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- LEMAR UMR 6539, Université de Bretagne Occidentale - Jean Laroche
- UMR 8187 LOG, Université du Littoral – Rachid Amara
- UMR CNRS EPOC 5805, Université de Bordeaux - Jérôme Cachot
- UMR INERIS-02 SEBIO, Université du Havre – Christophe Minier
- LEHAN UMR 5023, ENTPE – Alain Devaux
- CEDRE – Stéphane Le Floch
- LASIR, Université de Lille 1 – Baghdad Ouddane
- LIEC, Université de Lorraine – Simon Devin
- TOXEM, Jérôme Couteau

Résumé du projet :

Le projet HQFish a pour objectif de fournir à la communauté scientifique et aux gestionnaires des milieux aquatiques : (1) une information spatialisée sur la qualité des habitats concourant à la production piscicole en estuaire de Seine, (2) des éléments permettant d'apprécier la trajectoire temporelle de paramètres biologiques pertinents qui seront combinés pour apprécier la dynamique d'une population de poissons. Cette dimension spatio-temporelle dans la compréhension des services écosystémiques produits par un milieu estuarien est encore très rare dans la bibliographie.

L'étude repose sur l'utilisation d'une espèce emblématique de l'estuaire de la Seine, le flet européen (*Platichthys flesus*), poisson amphihalin sur lequel nous disposons d'importantes connaissances scientifiques, de données historiques sur la Seine et sur d'autres estuaires de la Façade Atlantique Française. Ce poisson, par son cycle de développement qui se déroule entièrement en estuaire, est étudié de manière croissante à l'échelle de l'Europe (de la Baltique au Portugal), en tant qu'espèce sentinelle de la qualité des habitats estuariens.

HQFish se décompose en quatre phases, la première visant à explorer la qualité des nourriceries estuariennes de la Seine. Des prélèvements de flets juvéniles seront tout d'abord effectués sur un gradient amont-aval dans l'estuaire, et une approche multi-marqueurs sera développée sur ces individus en se focalisant sur des paramètres biologiques liés à la fitness (production énergétique, état des réserves, détoxification, dommages tissulaires, croissance). Des analyses de contaminants dans les tissus des poissons et dans les sédiments, seront menées parallèlement aux analyses biologiques. Ces indicateurs de l'état de santé du poisson et ces signatures chimiques seront comparés entre l'estuaire de Seine et un système de « référence » peu contaminé en Manche, la Canche. Une expérience de caging sera ensuite menée à partir de juvéniles de la Canche, placés en cages durant un mois, sur un gradient amont-aval en Seine et sur un site en Canche ; ces poissons seront sacrifiés pour une approche multi-biomarqueurs couplée avec l'analyse des polluants dans les organismes et dans le sédiment au niveau des cages. Cette

première partie du projet sur les réponses des poissons juvéniles *in natura* et mis en cage, nous permettra d'évaluer la fonctionnalité des nurseries de l'estuaire de Seine sur un gradient amont-aval, comparativement à celle d'un milieu « peu stressé » en Manche, l'estuaire de Canche.

La deuxième phase de HQFish va explorer l'impact de la qualité des estuaires de Seine vs Canche sur la fitness des flets adultes. Nous allons ainsi prélever des poissons adultes en Seine & Canche à deux périodes, en pleine période de reproduction (février), et en période de repos sexuel (juin). Parallèlement aux teneurs en contaminants dans les tissus des poissons, plusieurs indicateurs de la fitness vont être mesurés au niveau individuel (bioénergétique, état des réserves, dommages cellulaires, pathologie, maturation sexuelle). Une expérimentation sera de plus conduite sur des poissons des deux estuaires pour tester leur fertilité, et notamment la relation possible entre le niveau de dommages à l'ADN des spermatozoïdes et leur pouvoir fécondant. Cette phase 2 de HQFish nous conduira donc à estimer les capacités de flets adultes de Seine vs Canche, à boucler leur cycle biologique en produisant une descendance viable, et donc à assurer la pérennité de la population.

La phase 3 de HQFish sera consacrée à une analyse de l'évolution temporelle (de 2003 à nos jours) de la diversité génétique de la population de flets en Seine ; toute réduction de la diversité génétique d'une population naturelle pouvant se traduire par une perte de son adaptabilité face à un environnement changeant. Nous développerons aussi une analyse de la variabilité temporelle de la taille efficace (soit un estimateur du nombre de poissons adultes qui produisent une descendance viable) dans la population de Seine, pour vérifier si elle se maintient au cours du temps. Cette approche démo-génétique en phase 3 de HQFish nous permettra de décrypter l'évolution démographique de la population de flet de Seine sur ces 15 dernières années.

Dans la phase 4 de HQFish, nous proposons d'intégrer les réponses phénotypiques & génétiques des stades juvéniles et adultes de flet face à la pression anthropique en estuaire de Seine, pour faire le bilan sur le service écosystémique de cet estuaire vis-à-vis du fonctionnement des populations de poisson. Notre projet va de plus explorer différentes métriques synthétiques visant à la production de descripteurs de la qualité/dysfonctionnement des habitats estuariens qui devraient devenir à terme des outils pour les gestionnaires de l'environnement.

Fin des travaux de recherche : Mars 2020

TRAESSI

Trajectoires de l'Estuaire depuis le XIXe Siècle. Approche géo-historique de l'évolution de l'état de l'estuaire de la Seine en fonction de ses usages

Coordination du projet : Laurence Lestel

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- UMR 7619 METIS, UPMC - Laurence Lestel
- EA 3832 CETAPS, Université de Rouen – Olivier Sirost
- UMR 6266 IDEES, Université du Havre – Bruno Lecoquière

Résumé du projet :

Ce projet a pour ambition d'appliquer une méthodologie interdisciplinaire pour décrire la trajectoire environnementale de l'estuaire depuis le XIXe siècle, c'est-à-dire mettre en relation l'évolution de l'état environnemental de différents territoires le constituant avec les événements sociétaux (évolution des pressions, des usages et perceptions de l'estuaire, des actions menées par les gestionnaires) qui ont pu provoquer de telles évolutions.

L'outil méthodologique sera l'analyse DPSIR prônée par l'Agence européenne de l'environnement, et les études de cas porteront sur le chenal, les berges, les espaces naturels et la problématique du franchissement de l'estuaire. On espère ainsi montrer l'efficacité des réponses apportées par la société aux problèmes environnementaux dénoncés et identifier, grâce à cette étude diachronique, certains forçages actuels hérités du passé.

Ce travail permettra également de resituer l'estuaire dans un territoire marqué par la pression amont d'un fleuve très anthropisé et lui-même inscrit dans la dynamique plus large de l'arc Manche.

Fin des travaux de recherche : Mars 2020

MORPHOSEINE

Modélisation de l'évolution morphosédimentaire de l'estuaire de la Seine

Coordination du projet : Pierre Le Hir

Equipe(s) impliquée(s) – Coordinateur (s) :

- Ifremer - DYNECO/DHYSED – Pierre Le Hir
- ARTELIA - Régis Walther
- UMR 6143 M2C, Université de Rouen – Benoît Laignel

Résumé du projet :

Ce projet exploitera le modèle hydromorphosédimentaire développé dans le cadre de SA4 MODEL et validé dans le cadre de SA5 HYMOSED en termes d'évolution morphodynamique et sédimentaire de l'embouchure de la Seine sur une cinquantaine d'années. La validation repose sur la capacité du modèle à simuler l'évolution observée depuis 1960, avec ou sans "assimilation" des bathymétries intermédiaires. Des simulations rétrospectives et prospectives (de l'ordre de 50 ans) sont proposées pour caractériser des trajectoires plausibles de l'estuaire, soit passées (ce qui se serait passé si tel aménagement n'avait pas été réalisé, ou si le climat avait été différent...), soit à venir, selon des scénarios tendanciels (avec variabilité climatique) ou incluant un changement climatique ou bien tenant compte de stratégies d'adaptation.

Une confrontation des résultats de ce modèle (développé avec le soutien de Seine-Aval) avec le modèle hydromorphosédimentaire mis en œuvre par ARTELIA pour le compte des GPM du Havre et de Rouen est proposée sur des périodes plus courtes (9 ans en rétrospectif, 10 ans en prospectif).

Une participation du laboratoire M2C/Rouen est prévue pour aider à la définition des scénarios (forçages climatique et hydrologique).

Fin des travaux de recherche : Mars 2020

POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT

Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval
Pôle Régional des Savoirs
115, Boulevard de l'Europe
76100 ROUEN
Tél : 02 35 08 37 64
gipsa@seine-aval.fr

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce document, il devra être cité sous la forme suivante :

GIP Seine-Aval, 2017. Séminaire Scientifique 2017 du GIP Seine-Aval. Recueil de résumés. 54 p

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

