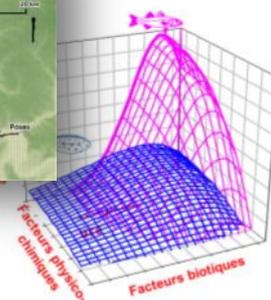


Projet MESSCENE



Fondation
de
France

Projet financé par
la fondation de France



Modélisation des fonctions
écologiques de l'Estuaire de la
Seine et ScENarios d'Evolution

Rapport Final

Mai 2013

Auteurs :

Nicolas Bacq¹

Jean-Philippe Lemoine¹

Stéphanie Moussard¹

Pierre Le Hir²

Jérémy Lobry³

¹ : GIP Seine-Aval

² : IFREMER, DYNECO

³ : IRSTEA, EPBX

Contributeurs :

Daan Guillerme¹

Marie Boulet¹

Florent Grasso²



Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

Contenu

1.	Contexte et objectif général de la démarche	5
1.1.	Le GIP Seine-Aval et les partenariats dans le projet MESSCENE	5
1.2.	Problématique générale.....	6
1.3.	Structure et fonctionnement de l'estuaire de la Seine	7
1.4.	La démarche SIG Habitats Fonctionnels de l'estuaire de la Seine	9
1.5.	Intérêts particuliers de la démarche au regard des missions du GIP Seine-Aval.....	11
2.	Etat d'avancement de la démarche et objectifs particuliers du projet MESSCENE	13
2.1.	Caractéristiques techniques de l'outil.....	13
2.2.	Espèces et facteurs structurants	13
2.3.	Règles de cartographie d'habitats potentiels.....	14
2.4.	Premières cartographies et validation itérative.....	16
2.5.	Objectifs du projet MESSCENE	17
2.5.1.	Evolution à long terme des facteurs structurants.....	17
2.5.2.	Simulation d'un projet de restauration.....	18
2.5.3.	Travaux menés dans le cadre de MESSCENE.....	18
3.	Les facteurs structurants dans MESSCENE	19
3.1.	La bathy-topographie	19
3.2.	Le substrat sédimentaire.....	23
3.3.	Milieus écologiques.....	26
3.4.	Salinité.....	29
3.4.1.	Utilisation des données de modélisation pour la cartographie des habitats.....	29
3.4.2.	Trois référentiels d'habitat, trois modélisations hydrodynamiques	31
4.	Spatialisation des habitats potentiels par fonction écologique : l'habitat fonctionnel	35
4.1.	Fonction de nurricerie dans MESSCENE.....	35
4.2.	Cartes d'habitats potentiels par espèce.....	36
4.3.	Des habitats potentiels de juvéniles aux habitats fonctionnels de nurricerie de poissons marins	41
5.	Simulation d'évolution des habitats fonctionnels de nurricerie de poissons marins sur le long terme.....	43
5.1.	Trajectoire d'évolution passée	43
5.2.	Trajectoire d'évolution à venir : le forçage hydrologique	45
5.3.	Bilan de l'exercice à l'échelle de l'estuaire.....	47
6.	Scénario « restauration écologique ».....	48

6.1.	Site d'étude, programme d'aménagement retenu et positionnement de l'étude MESSCENE	48
6.2.	Méthode retenue pour l'exercice d'évaluation des effets de la « décompartimentation » sur les habitats fonctionnels du site d'étude	50
6.3.	Scénarios d'évolution des milieux	51
6.4.	Evolution des habitats fonctionnels	54
6.4.1.	Les poissons	54
6.4.2.	Les oiseaux.....	56
6.5.	Bilan de l'exercice à l'échelle locale	57
7.	Bilan et perspective	59
	Annexe 1 : Evolution entre 1975 et 2010 du pourcentage de temps des grandes gammes de salinité	61
	Annexe 2 : Indice nourricerie MMD 1975 et 2100.....	62
	Annexe 3 : Experts scientifiques et techniques mobilisés dans la cadre du projet	63
	Liste des Figures	64
	Bibliographie.....	66

PREAMBULE

La démarche **SIG¹ Habitats Fonctionnels (Bacq et & al, 2011)** de l'estuaire de la Seine a pour ambition l'analyse des relations spatiales entre les facteurs structurants les milieux et les fonctions écologiques du système estuarien, tout en facilitant les analyses diachroniques. La démarche s'est focalisée en premier lieu sur **les fonctions liées au cycle de vie de trois grands groupes faunistiques : les invertébrés aquatiques, les poissons et les oiseaux**. Elle s'est donc intéressée aux habitats estuariens supports de la réalisation de ces fonctions biologiques impliquant des choix méthodologiques en termes **de modélisation des habitats**. La cartographie de ces « habitats fonctionnels » repose sur la notion **d'habitat potentiel**.

La démarche s'appuie sur le développement d'un SIG qui mobilise les **données relatives aux facteurs structurants les milieux estuariens** (bathymétrie, substrat sédimentaire, salinité, hydrodynamisme, végétation...) ainsi qu'un **système numérique de codification des préférendums écologiques** des espèces étudiées (hypothèses issues de la bibliographie et d'expertises). Un **couplage avec la modélisation MARS 3D** développée par Ifremer/Dyneco/Phyzed sur la Seine permet d'intégrer la spatialisation des facteurs hydro-sédimentaires.

Le **projet MESSCENE** intervient dans la phase de mise en œuvre opérationnelle de la démarche. Afin de mettre en évidence l'intérêt de l'approche fonctionnelle spatialisée dans un contexte d'évolution des milieux estuariens, deux types de scénarios d'évolution des paramètres structurants les habitats ont été étudiés :

- Le premier s'intéresse aux hypothèses **d'évolution à l'échelle de l'estuaire et sur le long terme des principaux facteurs** (ex. bathymétrie, salinité, débit, température) dans un contexte de changement global.
- Le second est construit autour de l'hypothèse **d'un projet d'aménagement visant une restauration écologique** de grande ampleur et d'objectifs prédéfinis dans un contexte opérationnel.

Ces scénarios ont été utilisés 1) comme cadre afin d'élaborer les méthodes de mobilisation de l'outil (construction des scénarios, intégration des scénarios dans l'outil, utilisation des résultats, mobilisation de l'expertise dans la démarche...) et 2) pour améliorer le potentiel de l'outil dans le contexte de la démarche de restauration à l'échelle globale de l'estuaire.

Cette mobilisation intègre donc une phase de modélisation hydrologique et une phase de modélisation écologique, couplées par la mise en œuvre du SIG afin de **tester cette démarche dans le cadre de l'analyse de la trajectoire d'évolution des milieux** de l'estuaire de la Seine.

¹ Système d'Information Géographique

1. Contexte et objectif général de la démarche

1.1. Le GIP Seine-Aval et les partenariats dans le projet MESSCENE

Le Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIP Seine-Aval) est un établissement public fondé en 2003 afin de mener à bien deux grandes missions :

- L'acquisition de connaissances scientifiques sur l'estuaire de la Seine depuis le barrage de Poses jusqu'à la Baie de Seine, notamment au travers du portage du programme de recherche Seine-Aval ;
- La centralisation, la valorisation et le transfert de l'information vers la communauté scientifique, les décideurs, les aménageurs et le public averti.

Début 2013, le GIP Seine-Aval a été reconduit pour 8 ans grâce aux financements de ses onze membres :

- l'Agence de l'Eau Seine-Normandie,
- les Grands Ports Maritimes du Havre et de Rouen,
- les Conseils Régionaux de Basse et Haute-Normandie,
- les Conseils Généraux du Calvados, de Seine-Maritime et de l'Eure,
- l'Union des Industriels de la Chimie - Normandie
- la Communauté de l'Agglomération Havraise
- la Communauté d'Agglomération Rouen-Elbeuf-Austreberthe



Véritable interface entre science et gestion, le GIP Seine-Aval s'inscrit au cœur du développement de l'axe Seine. Les connaissances scientifiques et techniques mise à disposition par le GIP Seine-Aval contribuent notamment à l'évaluation de l'état de santé environnementale de l'estuaire et son évolution, aux réflexions en matière de restauration écologique des milieux estuariens, à l'évaluation des risques environnementaux (qualité des eaux, inondations...).

Porté par le GIP Seine-Aval, le projet MESSCENE a bénéficié d'une collaboration renforcée avec certains acteurs scientifiques et techniques intervenant sur le territoire de l'estuaire, bénéficiant ainsi de :

- l'expertise de terrain et des données associées de La **Maison de l'estuaire** (Gestionnaire de la Réserve Naturelle Nationale de l'Estuaire de la Seine) ainsi que celle de l'équipe du **Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande**.
- L'expertise scientifique de l'**IRSTEA** (Unité de Recherches EPBX - "Ecosystèmes Estuariens et Poissons Migrateurs Amphihalins" – Centre de Bordeaux) dans le domaine de la modélisation des écosystèmes estuariens, ainsi que l'expertise de l'**IFREMER** (Unité Dynamiques de l'Environnement Côtier-DYNECO, centre de Brest) dans le domaine de modélisation hydro-sédimentaire.



Figure 1 : Partenaires techniques et scientifiques du projet MESSCENE

1.2. Problématique générale

Le fonctionnement des écosystèmes est désormais indissociable de la dynamique des activités humaines (Vitousek, 1997). Or, il est aujourd'hui établi que, depuis quelques décennies, des changements environnementaux à l'échelle locale et globale menacent la durabilité même de ces écosystèmes en modifiant l'équilibre entre les activités humaines et le fonctionnement des écosystèmes (Folke et al., 2005). La structure des communautés écologiques, les propriétés fondamentales et le fonctionnement global des écosystèmes sont fréquemment en déséquilibre et sont en train d'être drastiquement modifiés sous l'action de différents facteurs (arrivée d'une nouvelle espèce : Williams & Jackson, 2007 ; contamination chimique : Pierron et al., 2008, etc...). Il apparaît ainsi que, du fait du rythme et de l'intensité actuels des perturbations environnementales, les écosystèmes en place ne pourront voir leur trajectoire d'évolution passée se poursuivre en terme de structure, fonctions et services sur le long terme (Loreau et al., 2004 ; Fox, 2007). Il est donc indispensable de mieux comprendre ces phénomènes (Loreau et al., 2001).

Les écosystèmes estuariens et côtiers sont particulièrement vulnérables à ces évolutions (Hénocque & Denis, 2001 ; Hoegh-Guldberg & Bruno, 2010). L'émergence de la problématique du changement climatique a conduit à interroger les processus de reconfiguration des diverses composantes et fonctionnalités des éco-sociosystèmes (Décamps, 2010) sous l'influence des changements globaux (Turner et al., 2003). Le réchauffement global a ainsi conduit à une migration latitudinale majeure d'espèces de planctons (Beaugrand, 2009) ou de poissons (Perry et al., 2005 ; Hermant et al., 2010 ; Nicolas et al., 2011)

Les outils règlementaires envisagés pour atténuer les effets des activités humaines sur les écosystèmes, et notamment sur les écosystèmes côtiers et estuariens (Eu, 2000 ; Eu, 2005) prévoient d'évaluer l'état écologique des écosystèmes. Or, bien que l'état écologique d'un écosystème devrait nécessairement être considérée comme l'expression de la qualité de sa structure et de son fonctionnement (De Jonge et al., 2006), les exigences normatives des différentes directives règlementaires ont conduit à l'élaboration d'indicateurs de qualité essentiellement basés sur des éléments structuraux ou taxonomiques plutôt que sur des éléments relatifs au fonctionnement ou au rôle fonctionnel des écosystèmes (De Jonge et al., 2006 ; Hering et al., 2010). Dans un certain sens, cela revient à considérer que les caractéristiques structurelles de la biodiversité observées à l'échelle des communautés nous renseignent sur les processus à l'échelle de l'écosystème et les fonctions écologiques associées. Or, ce lien pose une double difficulté –conceptuelle et méthodologique– particulièrement accrue dans le cas des systèmes estuariens. Notamment du fait de ce que de

nombreux auteurs nomment l' 'Estuarine Quality Paradox'. (Dauvin, 2007 ; Elliott & Quintino, 2007). Ces auteurs notent que dans ces systèmes, naturellement stressés par des contraintes hydromorphosédimentaires fortes, les communautés écologiques sont naturellement caractérisées par un faible nombre d'espèces et une abondance élevée de quelques espèces adaptées à ces contraintes. Ces caractéristiques sont généralement associées à une biodiversité faible. Pourtant, les écosystèmes estuariens sont dans le même temps associés à de nombreuses fonctions écologiques - dont une production biologique particulièrement importante (voir par exemple la référence la plus emblématique : Costanza et al., 1997). Cela conduit, dans le cas des estuaires, à (1) une remise en question du lien entre biodiversité et processus écosystémiques et (2) une difficulté corollaire à distinguer les effets d'un stress d'origine anthropique de ceux d'un stress d'origine naturelle (Elliott & Quintino, 2007).

Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de changer de paradigme, d'aller plus loin dans l'analyse (Hering et al., 2010) et de mieux expliciter le lien entre biodiversité/structure et processus/fonctionnement à l'échelle des écosystèmes (Hillebrand & Matthiessen, 2009) pour ainsi mieux appréhender la trajectoire fonctionnelle des écosystèmes estuariens dans le contexte du changement global (Sala & Knowlton, 2006).

1.3. Structure et fonctionnement de l'estuaire de la Seine

Un estuaire est défini par la zone d'influence de la marée dynamique sur un cours d'eau. Pour la Seine, il correspond aux 160 derniers kilomètres du fleuve et est délimité par le barrage de Poses en amont (barrage le plus en aval sur la Seine) et la partie orientale de la baie de Seine en aval. Latéralement, l'estuaire inclut la plaine alluviale, notamment les berges et les zones humides connexes, ainsi que la frange littorale et la zone maritime proche. L'espace qui recueille les eaux de ruissellement et d'infiltration alimentant la partie estuarienne de la Seine s'étend sur une superficie de 11 500 km² répartie sur les régions Haute-Normandie et Basse-Normandie et les départements de la Seine-Maritime, de l'Eure et du Calvados. Le réseau urbain est structuré autour de deux pôles : la communauté d'agglomération du Havre (250 000 habitants pour 17 communes) et la communauté d'agglomération Rouen, Elbeuf, Austreberthe (près de 500 000 habitants pour 71 communes).

L'estuaire de la Seine est morcelé par de nombreuses entités de gestion et son unité est essentiellement physique et écologique, plutôt qu'administrative et sociale. Trois zones peuvent être distinguées d'amont en aval [Guézennec *et al.*, 1999 ; Figure 1] :

- L'estuaire amont ou fluvial, entre Poses et Vieux-Port : zone soumise à la marée dans laquelle les eaux sont douces ;
- L'estuaire moyen, en aval de Vieux-Port : zone de mélange des eaux douces et marines (gradient de salinité) ;
- L'estuaire aval ou marin : zone au fonctionnement marin encore soumis à l'influence de la Seine.

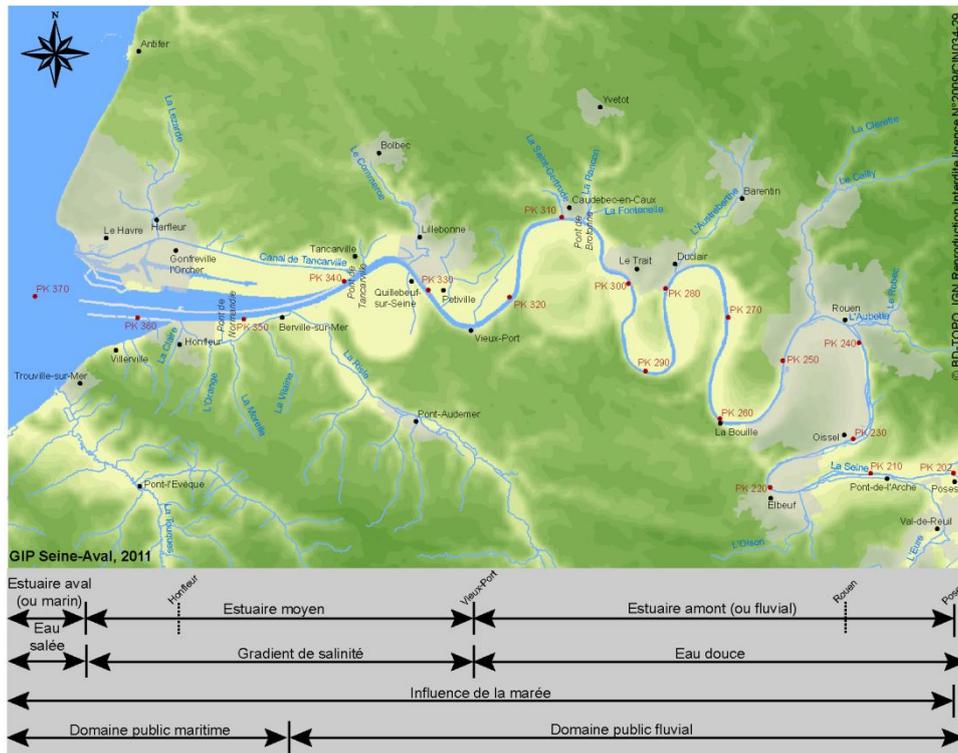


Figure 2 : Délimitations de l'estuaire de la Seine.

L'estuaire de la Seine est un **système** où coévoluent l'homme et la nature. Il fonctionne grâce à des éléments de structure sans lesquels les fonctions ne peuvent s'exprimer (Lévêque, 2001 ; Frontier, 2007 ; CGEDD, 2010).

Les **éléments de structure écologiques** sont définis (GIPSA, 2013) comme des **éléments**, biotiques ou abiotiques, constitutifs des compartiments (eau, MES, sels nutritifs, métaux, catabolites, pool d'espèces ou de gènes, ...), connectés par des **réseaux** d'origine naturelle ou anthropique (réseau trophique, réseau hydrographique, corridors écologiques, réseau routier, digues...) et organisés autour de **réservoirs** également d'origine naturelle ou anthropique (aquifères, fosses, habitats, espèces, eaux de ballasts...).

Les **fonctions écologiques** sont ses **flux** (déplacements d'espèces, flux d'énergie et de matière dans le réseau trophique, transferts de contaminants, déplacements de sédiments), des **stockages ou déstockages** à grandes échelles (érosions ou dépôts, accumulation de biomasse, de contaminants...), des **régulations** (interactions biologiques entre individus, espèces ou écosystèmes, régulation des débits, dissipation d'énergie de houle, de température...) et des **transformations** (production de biomasse, dégradation de matière organique, de contaminants...).

Le système anthropisé de l'estuaire de Seine fonctionne grâce aux **relations** d'interdépendance ou d'exclusion entre ces **éléments de structure** et ces **fonctions** écologiques, **tous impactés** (pressions, forçages) **ou utilisés** (usages) **par les activités anthropiques**.

Ces fonctions ou processus écologiques en système anthropisé peuvent être :

- **qualifiés par des facteurs structurants** d'origine naturelle ou anthropique (par exemple : température, faciès, hydrodynamisme, hygrométrie, concentration en nutriments, usages...) et les relations entre eux.

- **quantifiés par la manière dont ils s'expriment** : leur intensité, leurs fréquences et continuités spatiale et temporelle, leur redondance...

Ces processus doivent aussi être analysés à différentes **échelles spatiales et temporelles**. De plus, une même cause peut produire des effets différents suivant les secteurs ou dans le temps. L'estuaire est par définition un **milieu complexe, dynamique, évolutif** qui s'inscrit sur une trajectoire, en partie héritée du passé, en partie à construire pour l'avenir.

Principales relations entre structure/fonctions et services/usages sur l'estuaire de la Seine

- la circulation d'une eau profonde qui permet l'usage de **navigation** commerciale
- la capacité de dilution, évacuation, dégradation ou stockage de contaminants qui incite de nombreux rejets dans le milieu aquatique, **exutoire** du bassin versant
- la production biologique (fleuve, zones humides, terrasses alluviales...) qui fournit, notamment, la possibilité de développer (ou de maintenir) **des activités économiques liées aux ressources** halieutiques et agricoles
- les crués et les courants de la Seine qui impliquent de régulièrement renforcer et repenser les aménagements de lutte contre l'érosion des berges et de défense contre les inondations pour assurer le maintien et la sécurité **d'infrastructures de transport, zones urbanisées ou d'activités économiques industrialo-portuaires**, implantées depuis de nombreuses années en bordure de fleuve
- Le transport et le stockage pendant des siècles/millénaires de sables alluvionnaires et de granulats marins dans l'estuaire et la baie de Seine qui, devenus aujourd'hui une ressource convoitée, sont soumis à **extraction**.
- Les fonctions vitales de nombreuses espèces animales ou végétales qui se réalisent dans les habitats estuariens dont ils sont à la fois le support de réalisation et souvent la source d'altération. Certaines de ces espèces sont d'intérêt **emblématique** (saumon, drosera, vache normande), patrimonial (anguille, butor étoilé, scirpe triquetre ou maritime, peuplier noir), **fonctionnel** (*eurytemora affinis*, *néreis diversicolor*, grands herbivores), **commercial** (sole, bar, bovin), **visuel** (cigogne, phoque, saule, cheptels agricoles), **récréatif** (carpe, sandre, crevette grise) ou **pédagogique** (crapaud)...
- La structure morphologique de l'estuaire de la Seine qui offre à la fois un **axe de circulation** et une grande plaine alluviale pourvoyeuse **d'espaces en bord de fleuve**, objets de convoitise pour les grands pôles urbains, industriels, portuaires, agricoles et écologiques de la région.

1.4. La démarche SIG Habitats Fonctionnels de l'estuaire de la Seine

Des travaux récents ont souligné plusieurs limites dans notre appréhension de l'état écologique des écosystèmes et de son évolution dans le contexte du Changement Global. Ces limites ont été soulignées par différents auteurs (ex. De Jonge et al., 2006) et par plusieurs acteurs et gestionnaires (cf. synthèse du projet BEEST : Lévêque et al., 2011). Les conclusions du projet BEEST, financé dans le cadre du programme LITEAU III, concernent en particulier (1) la nécessité d'une appréhension plus fonctionnelle des écosystèmes, (2) l'intérêt de raisonner en termes dynamiques sur la base de scénarios plutôt que de façon statique sur la base de références et (3) le besoin de prendre en compte les évolutions dans le cadre du Changement Global.

La démarche **SIG Habitats Fonctionnels** (Bacq et al, 2011) de l'estuaire de la Seine s'inscrit dans cette approche avec pour ambition l'analyse des relations spatiales entre facteurs structurants les milieux et les fonctions écologiques du système estuaire de la Seine tout en facilitant l'analyse des évolutions. Cette modélisation s'appuie sur le développement d'un outil reposant sur un Système d'information géographique auquel sont intégrées les données nécessaires à cette analyse ainsi que les procédures de traitement de ces données, facilitant ainsi les mises à jour et la réalisation de scénarios.

La démarche s'est focalisée en premier lieu sur **les fonctions liées au cycle de vie de trois grands groupes faunistiques : les invertébrés aquatiques, les poissons et les oiseaux**. Elle s'est donc intéressée aux habitats estuariens support de la réalisation de ces fonctions impliquant des choix méthodologiques en termes **de modélisation des habitats**.

Ainsi, les habitats modélisés sont dits « fonctionnels » dans la mesure où ils représentent de manière intégrée des secteurs ayant un rôle dans le cycle de vie des espèces sélectionnées dans la démarche. La cartographie de ces « habitats fonctionnels » repose sur la notion **d'habitat potentiel**. Il se fonde sur la conjugaison du concept de niche écologique (Hutchinson 1957) et de la théorie des filtres environnementaux (Tonn et al. 1990, Keddy 1992).

Dans ce contexte, la niche écologique correspond à « l'ensemble des conditions dans lesquelles vit et se maintient une espèce déterminée » (Ramade 1984) et plus précisément, à « l'ensemble des paramètres qui caractérisent les exigences écologiques (climatiques, alimentaires, reproduction...) propres à une espèce » (Ramade 2008). La niche écologique ainsi définie peut être ventilée selon les phases du cycle de vie de l'espèce afin de déterminer les conditions environnementales propres à la réalisation de fonctions écologiques particulières. Appliquée à un contexte géographique déterminé, cette notion permet de modéliser et de cartographier l'habitat de l'espèce. L'habitat est ici entendu comme « l'ensemble des caractéristiques (ressources trophiques et conditions environnementales) présentes dans un espace donné qui permettent l'accomplissement de tout ou partie du cycle écologique (la survie i.e. nourriture, refuge... et/ou la reproduction) d'une espèce » (adapté de Ramade 2008). Lorsqu'elle est définie dans l'absolu (c.-à-d. sans tenir compte des interactions entre facteurs et des interactions biotiques), la niche écologique est dite fondamentale (ou potentielle) et permet de cartographier des habitats potentiels.

Ainsi cartographiée, la distribution spatiale potentielle d'une espèce réalisant une fonction donnée à un stade de vie particulier est ensuite analysée au regard des observations (présence/absence) de terrain mais également de paramètres influents non cartographiables (échelles d'analyse différentes, données non disponibles...) permettant d'aboutir à une cartographie 'validée' des habitats supports des fonctions biologiques des espèces étudiées.

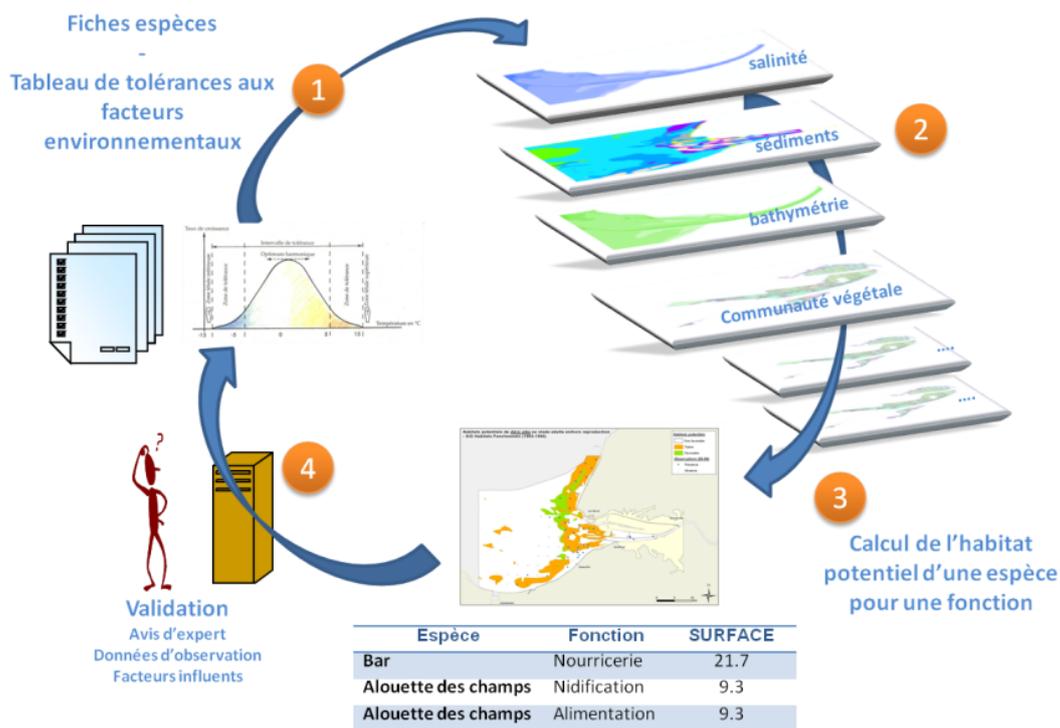


Figure 3 : Illustration de la démarche

La constitution d'un système d'information regroupant l'ensemble des données et résultats de modélisation permet ensuite des analyses plus globales par exemple par regroupement d'espèces, par secteurs fonctionnels...Elle permet également d'étudier l'effet de scénarios d'évolution des facteurs structurants sur les milieux support de fonctions écologiques.

1.5. Intérêts particuliers de la démarche au regard des missions du GIP Seine-Aval

D'une manière générale, en tant qu'interface entre science et gestion, le GIP Seine-Aval acquiert, capitalise, structure et valorise des données et connaissances scientifiques relatives au fonctionnement de l'estuaire de la Seine. La démarche sur les habitats fonctionnels, contribue à cette activité en tant que support :

- A la structuration des données environnementales à l'échelle globale de l'estuaire
- A l'analyse spatiale et temporelle originale des principaux facteurs environnementaux structurant les milieux estuariens.
- A la capitalisation des connaissances sur les relations abiotiques-biotiques dans l'estuaire.
- A l'identification des besoins en termes d'acquisition de connaissances sur le fonctionnement de l'écosystème estuarien et sa modélisation.

Plus particulièrement et selon le degré d'opérationnalité des résultats, le projet doit contribuer à la réflexion et aux analyses s'inscrivant dans la démarche de restauration écologique des milieux sur le territoire estuarien. Sur les grands estuaires français et notamment la Seine, quelques initiatives de

restauration ont émergé dans des contextes différents (mesures compensatoires des grands aménagements -Pont de Normandie, Port 2000, carrières...- ; SAGE ou contrats territoriaux ; Grenelle de l'environnement) et tendent aujourd'hui à s'intensifier. Le rôle d'accompagnement par le GIP Seine-Aval des maîtres d'ouvrage et des services instructeurs de ces restaurations s'est effectivement affirmé au cours de ces dernières années. Il doit en particulier assurer, auprès de ses membres et partenaires, l'animation d'une réflexion sur les objectifs de ces restaurations : pour qui, pour quoi, comment : quel estuaire voulons-nous ? (Lévêque, 2003). Il s'agit en particulier d'aider les porteurs de projets d'aménagement et/ou de restauration écologique à optimiser leurs actions en cherchant :

- comment trouver le meilleur compromis entre les contraintes de faisabilité et l'impact/le bénéfice écologique, à l'échelle locale et à l'échelle de grandes entités fonctionnelles de l'estuaire,
- la meilleure adéquation de leurs projets de restauration avec les besoins et les exigences de la société exprimés à différentes échelles territoriales.

Sur l'estuaire de la Seine, les projets les plus impactants en matière de fonctionnement écologique correspondent le plus souvent aux projets de compensation écologique d'aménagements industriels, portuaires ou urbains mis en place dans le cadre de la loi relative à la protection de la nature du 10 juillet 1976 et la doctrine Eviter-Réduire-Compenser (ERC, 2012)². Il est demandé aux porteurs de projet, accompagnés des services de l'Etat, de réparer les dommages faits aux ressources naturelles et leurs services éco-systémiques. Les impacts des projets eux-mêmes et de leur compensation sont difficiles à estimer faute de connaissances scientifiques suffisamment fines sur le lien entre ressources/habitats d'un côté et fonctions/services de l'autre. Il est noté également un déficit d'outils opérationnels pour les caractériser et les quantifier, voire les visualiser tels que pourrait le faire à termes le SIG Habitat Fonctionnels en ce qui concerne certaines fonctions biologiques.

Néanmoins les milieux écologiques de l'estuaire concernent également des fonctions et services écologiques non biologiques encore peu caractérisés (par exemple : atténuation des ondes de marées, épuration des eaux estuariennes ou telluriques, stockage de contaminants) qui rendent des services importants à la société et qu'une mauvaise compensation risque d'impacter fortement.

Par ailleurs, le GIP Seine-Aval est en train de mener un projet visant à définir les objectifs prioritaires en matière de restauration écologique de l'estuaire de la Seine (GIPSA, 2013). Ce travail s'appuie principalement sur un argumentaire qualitatif du fonctionnement de l'estuaire. La spatialisation des valeurs des facteurs structurant et de leur gradient tout au long de l'estuaire, comme la quantification des surfaces d'habitats ou de fonctions d'espèces par secteur de l'estuaire pourrait probablement aider à quantifier certains phénomènes utiles pour argumenter certaines hypothèses de restauration d'habitats écologiques.

² « Les mesures de réparation des dommages affectant les eaux et les espèces et habitats mentionnés aux 2° et 3° du I de l'article L. 161-1 visent à rétablir ces ressources naturelles et leurs services écologiques dans leur état initial et à éliminer tout risque d'atteinte grave à la santé humaine. L'état initial désigne l'état des ressources naturelles et des services écologiques au moment du dommage, qui aurait existé si le dommage environnemental n'était pas survenu, estimé à l'aide des meilleures informations disponibles »
= extrait de la LOI n° 2008-757 du 1er août 2008 relative à la responsabilité environnementale - art. 1 (Article L.162-9 du code de l'environnement) en application de la Directive européenne 2004/35/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 avril 2004 sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux.

2. Etat d'avancement de la démarche et objectifs particuliers du projet MESSCENE

2.1. Caractéristiques techniques de l'outil

L'architecture technique de l'outil a été mise en place en 2009-2010. Elle concerne le choix des logiciels, des formats de données et la mise en place de procédures de traitement des données.

L'un des enjeux du projet SIG Habitats Fonctionnels était de pouvoir automatiser au maximum les traitements de données notamment pour :

- faciliter le calcul des habitats potentiels selon différents référentiels de facteurs structurants
- faciliter l'élaboration de données synthétiques pour comparer les résultats selon différents scénarios (calcul d'indice, différentiel...)

Le choix technique s'est rapidement orienté vers un outil de gestion de base de données spatialisées (PostGRESQL-PostGIS ; QGIS), permettant de stocker dans un seul outil l'ensemble des informations nécessaires à la démarche :

- Les données spatialisées des facteurs structurants
- Les tables de codification des préférendums écologiques des espèces
- Les données résultantes des calculs d'habitats potentiels
- Les données résultantes des synthèses et analyses d'évolution

Cette stratégie repose sur des prétraitements de données des facteurs structurants et une mise en forme répondant à une structure de base de données établie. Sur cette base, des codes informatiques en langage SQL permettent les différents calculs et extraction des données nécessaires à la visualisation cartographique des résultats, au calcul de surface et donc leur analyse.

2.2. Espèces et facteurs structurants

Une étude bibliographique a été réalisée afin de décrire les préférendums (niches) écologiques d'une sélection de 80 espèces d'oiseaux, 27 de poissons et 50 d'invertébrés aquatiques. Cette synthèse a pris la forme de 130 fiches espèces, base scientifique des hypothèses de modélisation retenues par la suite (site web : <http://seine-aval.crihan.fr/web/pages.jsp?currentNodeId=175>).

À partir des fiches, une première sélection de facteurs structurants (ex. salinité) a été nécessaire pour définir ensuite les variables (ex. moyenne des maximums journaliers de la salinité de fond) à cartographier permettant la modélisation des habitats potentiels. **Afin d'aborder la cartographie de l'estuaire avec une approche fonctionnelle, les hypothèses de cartographie d'habitat sont établies fonction par fonction pour les espèces prise en compte.** Cette description est hétérogène selon les groupes et parfois selon les espèces au regard de leur mode de vie et des connaissances disponibles pour renseigner les exigences écologiques avec cette approche.

Pour le volet aquatique subtidal (zone toujours submergée), ces facteurs sont : **la bathymétrie, le faciès sédimentaire, la salinité, la turbidité et l'hydrodynamisme**. Les valeurs retenues pour la salinité, la turbidité et l'hydrodynamisme sont issues d'une modélisation mathématique développée par IFREMER dans le cadre du programme scientifique Seine-Aval (Le Hir et al., 2001 ; Le Hir et al., 2012) et mise en œuvre par le GIP Seine-Aval. Ce type de modèle permet, sous certaines hypothèses, de simuler l'évolution des éléments structurant les habitats (salinité, courant...) au regard de l'évolution de certaines caractéristiques hydro-morphologiques de l'estuaire (bathymétrie, débit, marée...). Dans la cadre de MESSCENE, le choix et le calcul des variables d'hydrodynamisme et la de turbidité n'étant pas aboutis, ils n'ont pas encore pu être utilisés comme facteurs structurants les habitats.

Au regard de difficultés à caractériser l'usage par des espèces de certains milieux par simple croisement de facteurs (manque de connaissance sur l'exigence écologique, habitat de faible emprise spatiale...), **il a été nécessaire de mettre en place en complément une typologie de milieux écologiques**. Elle concerne les secteurs intertidaux (zone successivement émergée ou submergée, selon la marée), les secteurs terrestres, le chenal de navigation et les annexes hydrauliques. **Une couche SIG spécifique est donc établie pour cartographier ces types de milieux**. Cela mobilise les données relatives à l'occupation du sol, la topographie, les niveaux d'eau, les substrats nus intertidaux, la présence de fossés, la connectivité hydraulique, la présence de clôtures, de haies; des habitats de la typologie Natura 2000. **Cette carte typologique constitue donc un facteur structurant qui pourra être croisé avec d'autres facteurs (salinité par exemple)**.

2.3. Règles de cartographie d'habitats potentiels

Le projet nécessite l'analyse conjointe de jeux de données hétérogènes dans leur nature, format, précision et géométrie (polygone, ligne...). D'autre part, des comparaisons diachroniques sont souhaitées. Il est donc apparu opportun de retenir la solution du « **carroyage** » comme mode de représentation des habitats. Ce mode permet une représentation des données par unités spatiales conceptuelles et homogènes dans leur forme et leur taille appelée « **maille** ». Le choix de la taille et de la forme des mailles a fait l'objet d'une étude préalable visant à optimiser la représentation spatiale des habitats et les temps de traitement.

Ainsi, l'ensemble des données spatialisées des facteurs structurants est associé à un carroyage uniforme avec des mailles de 50m de côté :

- pour les milieux écologiques, la surface de chaque type de milieu par maille est conservée dans la base de données permettant ainsi de rendre compte de manière précise des surfaces de milieux de faible emprise spatiale, mais important d'un point de vue fonctionnel.
- pour les autres facteurs, chaque maille de 2500 m² prend la valeur du facteur dont la surface est majoritaire dans la maille.

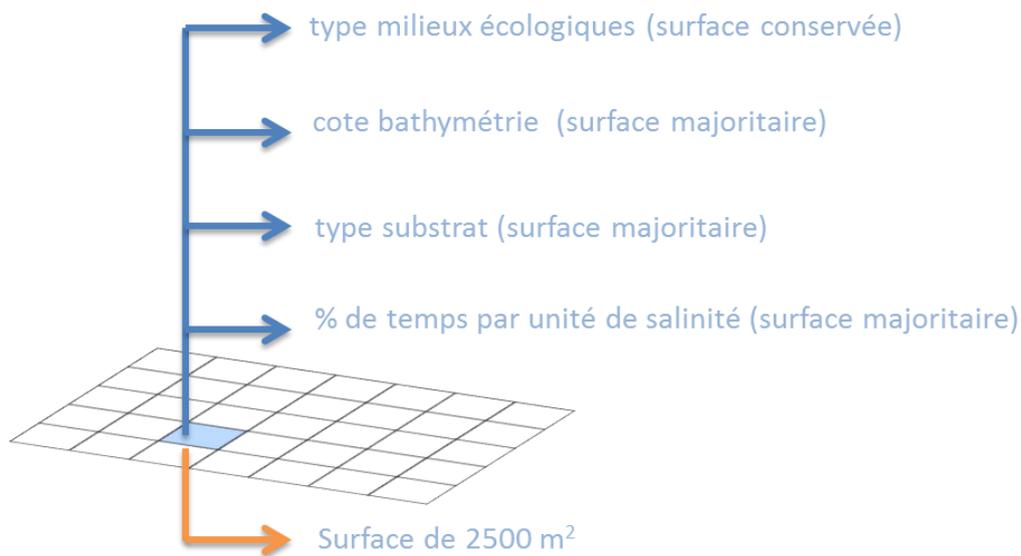
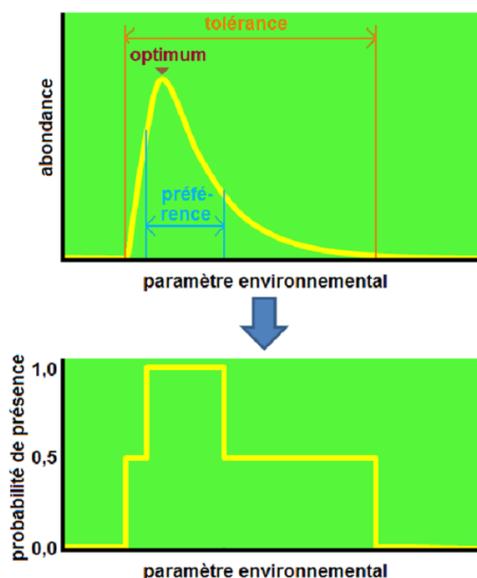


Figure 4 : Hypothèses pour renseigner les valeurs des facteurs structurants dans le carroyage

Les cartes d'habitat sont ensuite établies sur la base de la prise en compte des facteurs les plus pertinents au regard des secteurs de l'estuaire et des hypothèses retenues pour chaque espèce.



La codification des exigences écologiques des espèces pour chacune des valeurs possibles de facteurs structurants peut prendre les codes « exigence écologique » suivants (Ruellet, 2010 - Figure 5) :

- 0 : la valeur n'est pas tolérée
- 0.5 : la valeur est tolérée
- 1 : la valeur est optimale

Figure 5 : Principe retenu pour codifier les plages de tolérance et de préférence à chacun des paramètres environnementaux

A l'avenir, si les connaissances scientifiques permettent d'établir des courbes de tolérances aux facteurs pour les espèces étudiées, une codification plus continue pourrait être intégrée.

Ensuite, la carte d'habitat potentiel d'une espèce est réalisée par le calcul d'un indice « habitat potentiel » qui résulte du **produit en chaque maille des codes « exigence écologique » déterminés pour la valeur de chaque facteur structurant** dans la maille. Ainsi, la valeur de l'indice « habitat

potentiel » prend une valeur entre 0 et 1, la valeur 0 étant obtenue dès que la valeur d'un facteur n'est pas tolérée et la valeur 1 lorsque toutes les valeurs des facteurs sont optimales.

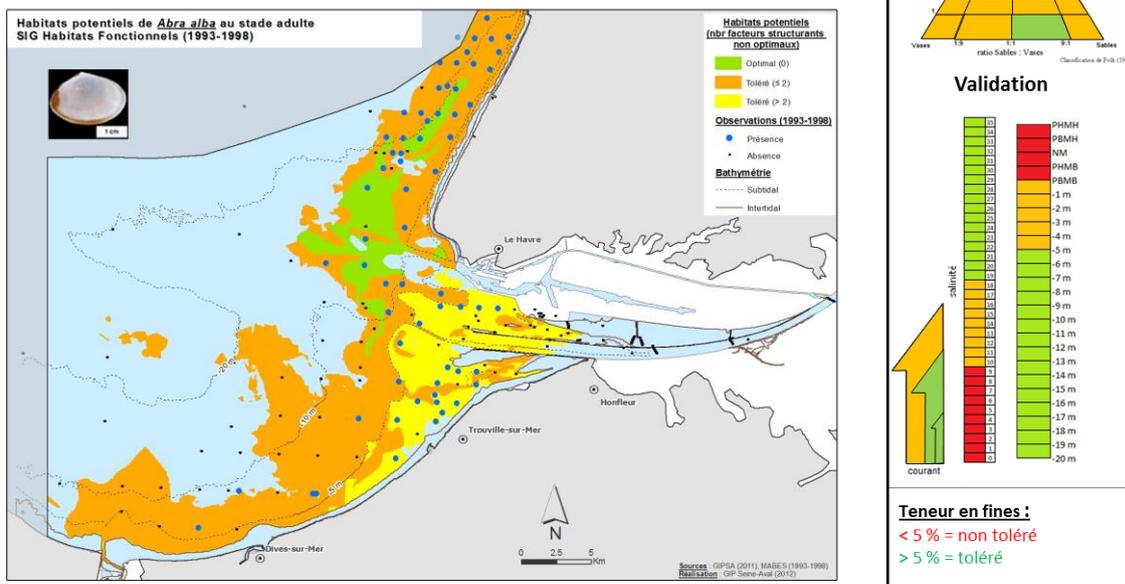
Ainsi, aucune pondération entre les facteurs n'est retenue dans ce choix méthodologique. Ceci pourrait évoluer si l'information sur l'écologie des espèces étaient disponibles pour pondérer l'importance des facteurs entre eux.

2.4. Premières cartographies et validation itérative

Sur la base de la tolérance des espèces à chacune des variables, l'outil a permis en 2010-2011 de proposer les premières cartographies des habitats estuariens selon leur rôle écologique pour une partie des espèces sélectionnées. Dans un premier temps, la période 1993-1996 et le secteur aval de l'estuaire ont été retenus pour la mise œuvre de l'outil sur le volet aquatique. Cette période ayant fait l'objet de nombreuses campagnes d'acquisition de données, elle a permis de confronter les hypothèses de modélisation d'habitat aux données d'observation. Concernant la partie terrestre, traitée pour les oiseaux, la mise en œuvre s'effectue sur la période récente (2008-2010) et sur l'ensemble du secteur.

Une méthode de validation itérative des hypothèses de modélisation des habitats issues des connaissances bibliographiques par confrontation d'avis d'experts et de données d'observation a été mise en œuvre en 2011 et appliquée en 2011-2012 (Bacq & al, 2012). Elle a permis de rendre pertinente, essentiellement sur le secteur le plus aval de l'estuaire, la cartographie des habitats potentiels de 10 à 15 espèces selon les groupes.

Figure 6 : Illustration de la cartographie de l'habitat potentiel d'une espèce au regard de la codification des preferendums écologiques pour chaque facteur structurant et superposition aux données d'observation.



2.5. Objectifs du projet MESSCENE

Au regard des hypothèses de modélisation des habitats précitées, le projet MESSCENE s'intéresse en particulier à l'utilisation de l'outil dans le cadre de simulations d'évolution des facteurs structurants les milieux et l'analyse en termes de trajectoires fonctionnelles de l'estuaire. Il a pour objectif de participer au développement des méthodes nécessaires à l'utilisation opérationnelle de cet outil pour les réflexions, décisions des acteurs de la préservation, restauration des milieux et de leurs fonctions écologiques ; ceci dans le cadre de projections d'évolution des principaux facteurs structurants ces milieux.

L'exercice de comparaison des surfaces d'habitats supports de fonctions écologiques de l'estuaire entre l'état actuel et différentes simulations d'évolution des facteurs structurants les habitats a ainsi été mené. Pour cela, deux types de simulations ont été produits :

- 1) Le premier s'intéresse à l'évolution sur le long terme à l'échelle de l'estuaire des principaux facteurs pris en compte dans la démarche avec une vision rétrospective et prospective.
- 2) Le second s'intéresse à une évolution des habitats à l'échelle locale déterminée par des objectifs de restauration écologique sur un site donné.

2.5.1. Evolution à long terme des facteurs structurants.

Une première approche consiste à **tester la sensibilité de l'outil à l'évolution des facteurs bathymétrie, substrat sédimentaire, salinité et milieux écologiques sur une période passée**. Pour cela, le référentiel 1975 a été retenu. Il est suffisamment ancien pour que l'amplitude d'évolution soit cohérente avec l'objectif d'analyse de sensibilité de l'outil notamment dans le contexte des changements globaux. D'autre part, les données pour étudier l'embouchure de la Seine sur cette période étaient disponibles, elles ont toutefois nécessité un travail important de mise en forme.

La seconde approche **consiste à tester la sensibilité de l'outil à l'évolution de l'hydrologie (débits fluviaux et élévation des niveaux marins) au regard des effets des projections de changement climatique**. Les facteurs structurants directement influencés par les modifications hydrologiques sont essentiellement la salinité, l'hydrodynamisme et la turbidité. Dans le cadre de ce projet, seule la salinité sera analysée. Cette évolution sera étudiée à géomorphologie constante, en raison de la non-disponibilité de projections d'évolution à long terme de la géomorphologie de l'estuaire.

Pour ces deux scénarios, nous avons analysé en particulier la **fonction de nourricerie de poissons marins**. Cette fonction qui a déjà été bien étudiée sur l'estuaire de la Seine nous a permis d'avoir une bonne confiance dans les résultats de cartographie d'habitat. L'ensemble de la démarche et des résultats présentés ci-après vont donc concerner une sélection de poissons marins dont le cycle de vie dépend de l'estuaire notamment dans leurs jeunes stades de vie.

2.5.2. Simulation d'un projet de restauration

Afin de tester la sensibilité de l'outil dans le cadre d'un projet de restauration, « l'étude de décompartmentation » de la plaine alluviale de l'embouchure de l'estuaire a été retenue. Cette étude, portée par le GPMH dans le cadre de son projet EMERHODE, a pour l'instant une vocation exploratoire : il n'est pas prévu de débouché immédiat sur des travaux de restauration écologique.

Le projet consiste à « ré-estuariser » une partie de la plaine alluviale de l'estuaire actuellement déconnectée de la Seine par une digue (la route de l'estuaire). Il est prévu plusieurs variantes d'un scénario consistant à créer des brèches dans cette digue, permettant la submersion par une partie des marées des terrains situés en arrière. Une dynamique d'évolution des milieux écologiques concernés devrait se mettre en place, entraînant des modifications dans la répartition des habitats potentiels d'espèces (notamment parmi celles étudiées dans le SIG Habitats Fonctionnels) ainsi qu'une adaptation des usages (fauche des roselières, pâturage des prairies, entretien des mares de chasse, circulation...).

2.5.3. Travaux menés dans le cadre de MESSCENE

Ainsi le projet a nécessité de se focaliser en particulier sur:

- la méthode de construction de scénarios d'évolution des facteurs structurants
- La consolidation des bases de données nécessaires à la construction des référentiels de facteurs structurants de chaque simulation et notamment la simulation des variations de l'environnement hydrologique à l'aide du modèle hydro-sédimentaire Seine-Aval.
- la mobilisation de l'outil dans un processus d'évaluation des évolutions :
 - modification selon les scénarios des facteurs structurants dans le SIG habitats fonctionnels
 - Réponse du SIG en termes de distribution surfacique des habitats potentiels d'espèces
 - Analyse et interprétation des résultats, en « différentiel » par rapport à une situation de référence.
- l'adaptation de l'outil pour le rendre le plus opérationnel possible dans ce processus de réflexion, décision et notamment la production d'indices.

3. Les facteurs structurants dans MESSCENE

Ce chapitre vise à décrire les méthodes de construction des référentiels de facteurs structurants pour les simulations d'évolutions des milieux à long terme. Dans le cadre du projet MESSCENE, quatre facteurs structurants ont été mobilisés : la bathy-topographie, le substrat sédimentaire, la salinité et les milieux écologiques.

3.1. La bathy-topographie

Les variables hypsométriques retenues comme facteur structurant font l'objet d'une approche spécifique selon que les milieux soient intertidaux ou subtidaux. La limite entre les deux est fixée à la cote théorique des plus basses mers pour un débit moyen ($400\text{m}^3/\text{s}$).

La bathymétrie en domaine subtidal est délimitée par les isobathes à un pas de 1m.

L'intertidal a été découpé en quatre niveaux qui correspondent à des limites physiologiques pour les organismes vivants en terme de tolérance à l'immersion.

Les cotes hypsométriques de ces limites sont basées sur les courbes de marée « type » connue en 17 marégraphes sur l'estuaire. Les plages suivantes ont été retenues (pour exemple voir la Figure 7) :

- cotes des plus basses marées basses aux plus hautes marées basses
- cotes des plus hautes marées basses au niveau moyen
- cote du niveau moyen aux plus basses marées hautes
- cotes des plus basses marées basses aux plus hautes marées hautes

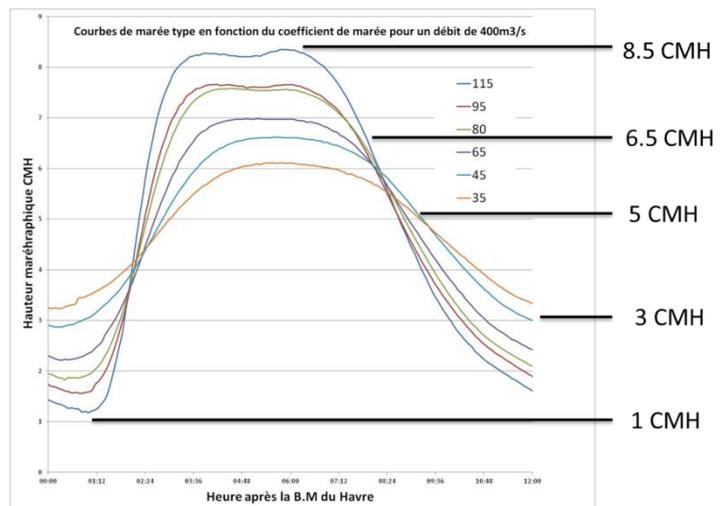


Figure 7 : Courbes de marée à Honfleur en fonction du coefficient et pour un débit de $400\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Cotes retenues pour la délimitation de la zone intertidale.

Sur cette base, les référentiels 1975 et 2010 ont été produits à partir de sources de données hétérogènes.

Le référentiel 1975 a été construit à partir des relevés bathymétriques disponibles. Pour certains secteurs de la baie de Seine moins sujets à de fortes évolutions, il a été complété par des sources de données plus récentes.

	Source	Année	Type de donnée
GPMR	Embouchure Seine	1975	Grille bathymétrique de 250m de côté
	Rouen-Tancarville		Carte des points de sonde non géoréférencée
GPMH	Rade du Havre	1977-78	Carte des points de sonde non géoréférencée
SHOM	MNT Baie de Seine	Etat connu en 2005	Grille bathymétrique de 100m de côté

Tableau 1 : Source des données mobilisées pour établir le référentiel bathymétrique 1975

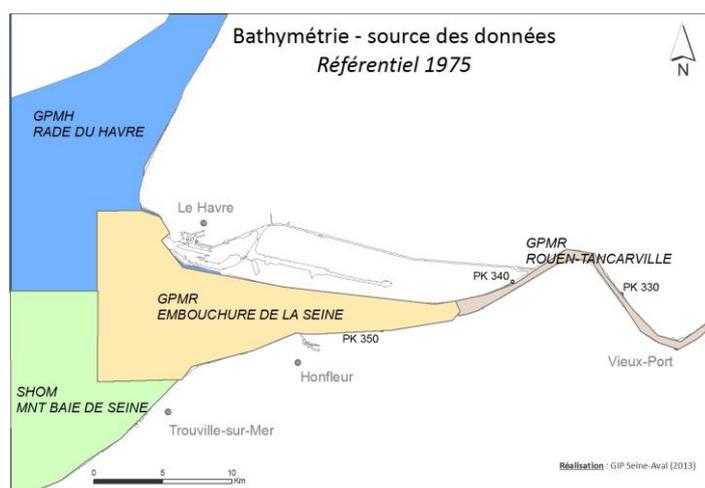


Figure 8: carte des sources de données bathymétriques pour le référentiel 1975

Les données de l'embouchure (GPMR-Embouchure) étaient déjà disponibles sous format SIG.

Dans le secteur nord-ouest de la zone d'étude, la carte GPMH-Rade du Havre a nécessité un travail de géoréférencement, puis de digitalisation des points de sondes.

Les bathymétries des zones subtidales du cours de la Seine dans le secteur endigué, ne sont pas intégrées dans l'outil SIG, cela constitue un unique milieu : le cours principal de la Seine (cf §3.3). Ainsi, la bathymétrie entre Rouen et Tancarville n'a pas fait l'objet d'un travail de géoréférencement et digitalisation. Néanmoins, cette source de données a été utilisée pour réaliser la bathymétrie dans le modèle hydrodynamique, notamment pour respecter le volume oscillant de 1975 en vue des calculs de salinité.

Les étages intertidaux sont bien décrits sur le secteur nord de l'embouchure. Ils sont moins précis dans les secteurs où la zone intertidale est plus restreinte.

Le référentiel 2010 a été construit sur la base de relevés bathymétriques et LIDAR terrestre.

	Source	Année	Type de donnée
GPMH	Depot Octeville	2011	Grille de 1m de côté (issu monofaisceau)
	Plage du Havre	2005	Grille de 2.5m de côté (issu monofaisceau)
	Zone influence Nord-Sud	2011	Grille de 20m de côté
	Chenal d'accès	2011	Semis de point (multifaisceaux)
	Port 2000	2011	
GPMR	RH Aval Tancarville 2011	2011	Grille bathymétrique de 10m
	Tancarville Rouen	2008	Grille bathymétrique de 5m
	Poses-Rouen	2005	
Dreal	Bras secondaire amont Rouen	2011	Grille bathymétrique de 2m
SHOM	MNT BAIE DE SEINE ORIENTALE	2005	Grille bathymétrique de 100m de côté
GIP Seine-Aval	Lidar	2010-2011	MNT 1m

Tableau 2 : Source des données mobilisées pour établir le référentiel bathymétrique 2010

Les étages intertidaux ont été déterminés de manière très précise grâce aux données LIDAR. Les cotes sont issues de données de synthèses sur les hauteurs d'eau mesurées pour un débit moyen (400 m³/s.) en 17 marégraphes tout au long de la Seine. Les cotes des différents étages ont été déterminées sur chaque marégraphe et interpolées linéairement entre chacun d'eux. Ces cotes ont ensuite servi à la délimitation spatiale des étages sur la topographie (données LIDAR).

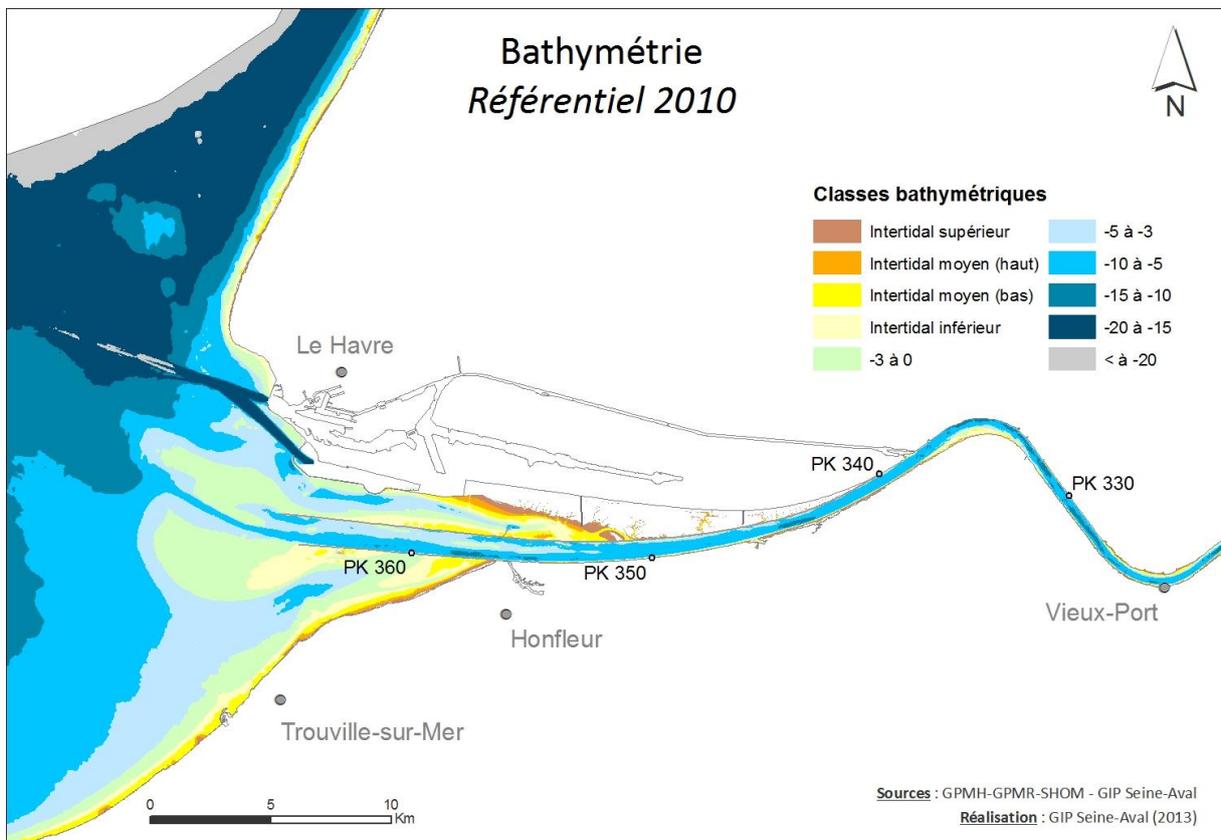
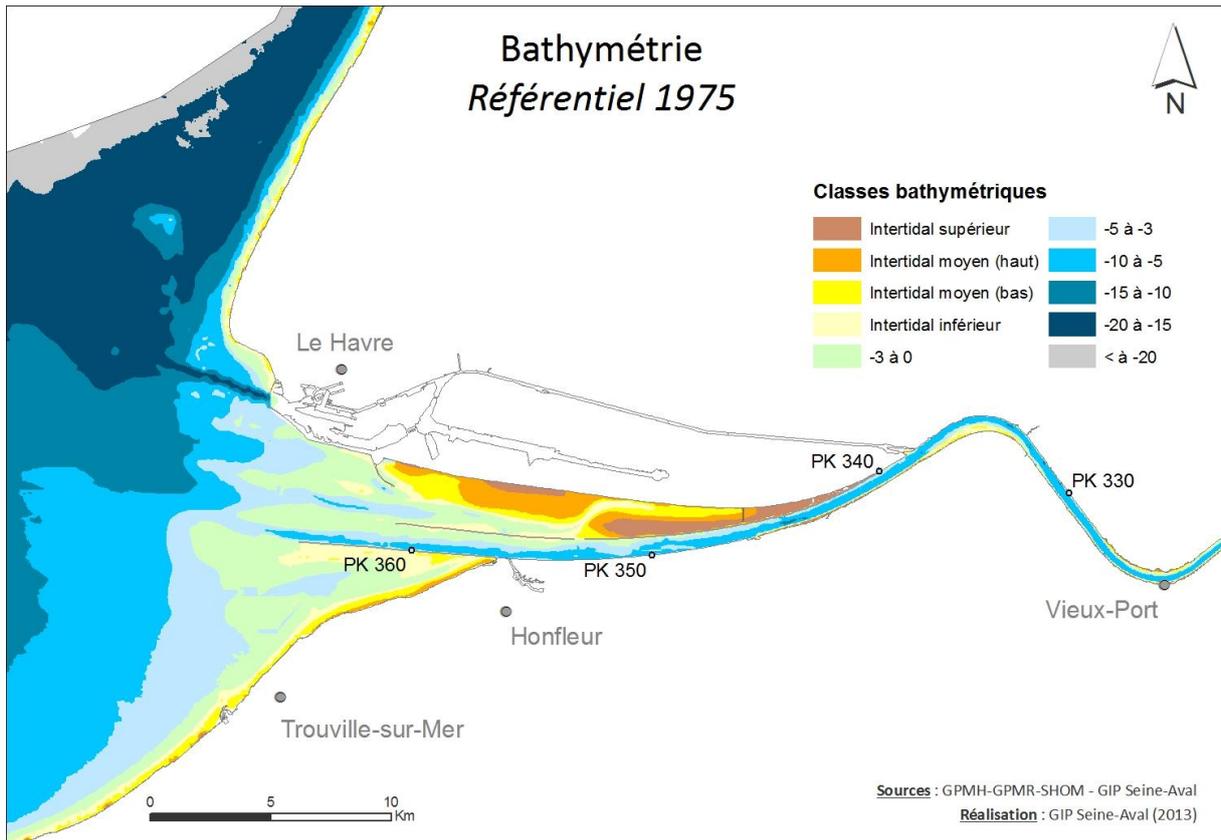


Figure 9 : Cartes bathy-topographiques

3.2. Le substrat sédimentaire

La nature sédimentaire des fonds a été cartographiée en utilisant la classification de Larssonneur (simplifiée), elle repose sur les seuils granulométriques de la Figure 10.

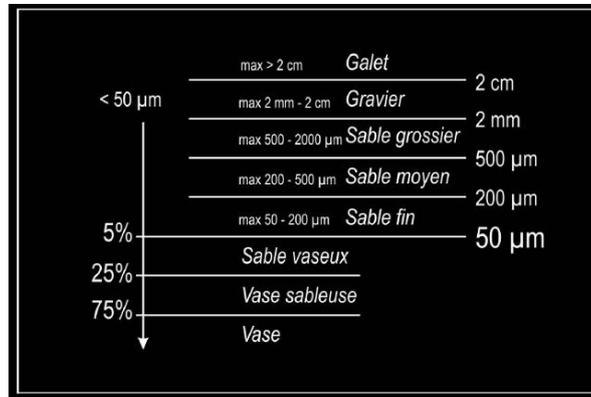


Figure 10 - seuils granulométriques selon la typologie Larssonneur simplifiée (en partie liée au pourcentage de la fraction < 50µm indiqué à gauche) (Dauvin, 2012)

Ces classes sont complétées par les substrats durs et les enrochements non liés.

Pour constituer le référentiel 1975, la carte de répartition des sédiments superficiels dans la partie orientale de la baie et dans l'embouchure est issue d'un travail de géoréférencement puis de digitalisation de cartes synthétisant un ensemble d'analyses granulométriques datant de 1977-1978 (Avoine, 1981).

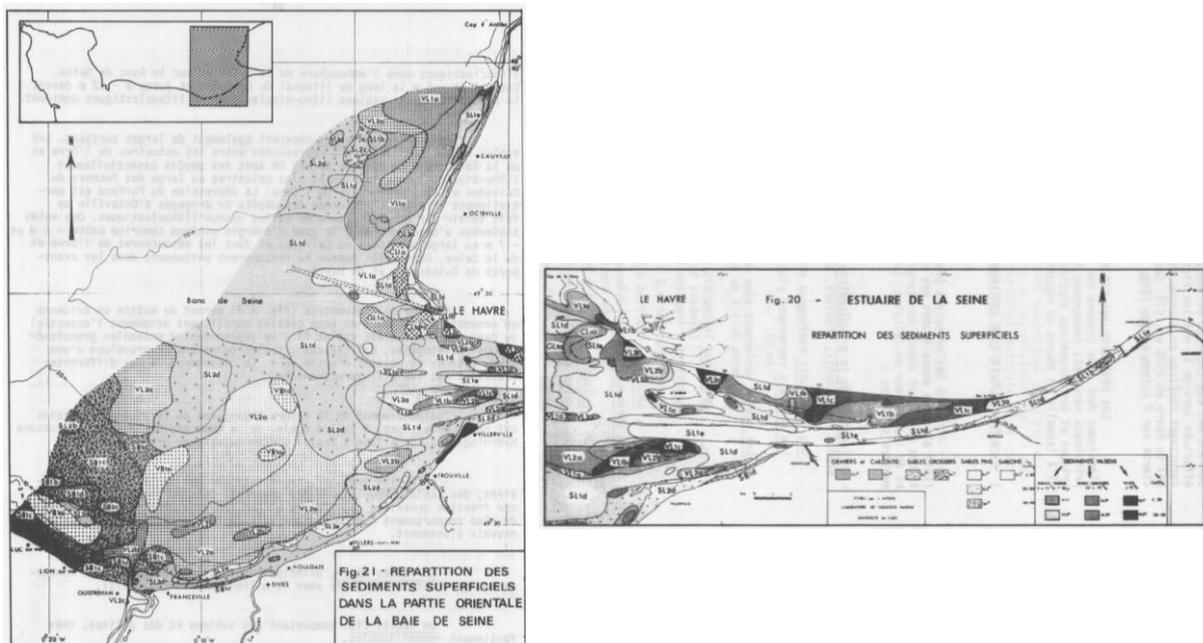


Figure 11 – Illustration des cartes de répartition des sédiments superficiels de 1977-78 (Avoine, 1981)

Une passerelle entre la typologie des sédiments utilisée par Avoine J., 1981 et la typologie mobilisée dans la présente démarche a été établie afin de produire la carte du référentiel 1975.

La carte de répartition des sédiments superficiels de 2010 sur l'ensemble de l'estuaire de la Seine et de la baie de Seine orientale a nécessité la mise en cohérence géographique et typologique de diverses sources de données. Un travail d'interprétation ortho-photographique a permis de compléter la carte sur certains types (localisation des enrochements non liés notamment).

Source	Type de donnée	Année
Substrats Subtidaux		
Programme Seine-Aval Projet COLMATAGE	Synthèse cartographique (Larsonneur simplifiée)	2009
Programme Seine-Aval Projet DEFHFIS –	Cartographie des substrats par photo- interprétation	2010
Maison de l'estuaire	Granulométrie	2010-2011
GIP Seine-Aval	Suivi morphologique des vasières	2010
GPMH	Cartographie des zones riveraines (CZR)	2010
GIP Seine-Aval	Ortho-photo 10cm	Aout 2011
GIP Seine-Aval	Ortho-photo 10 cm	Septembre 2010

Tableau 3 : Source des données mobilisées pour établir le référentiel « substrats » 2010

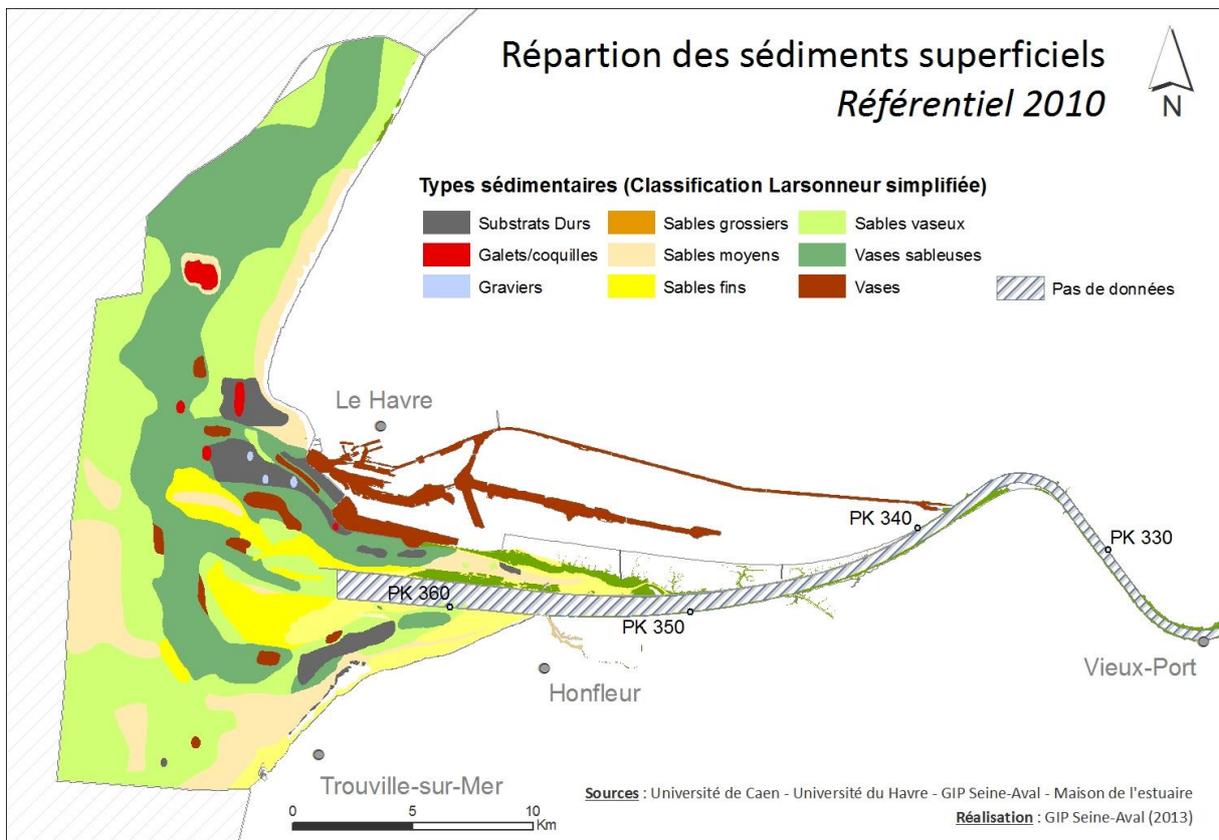
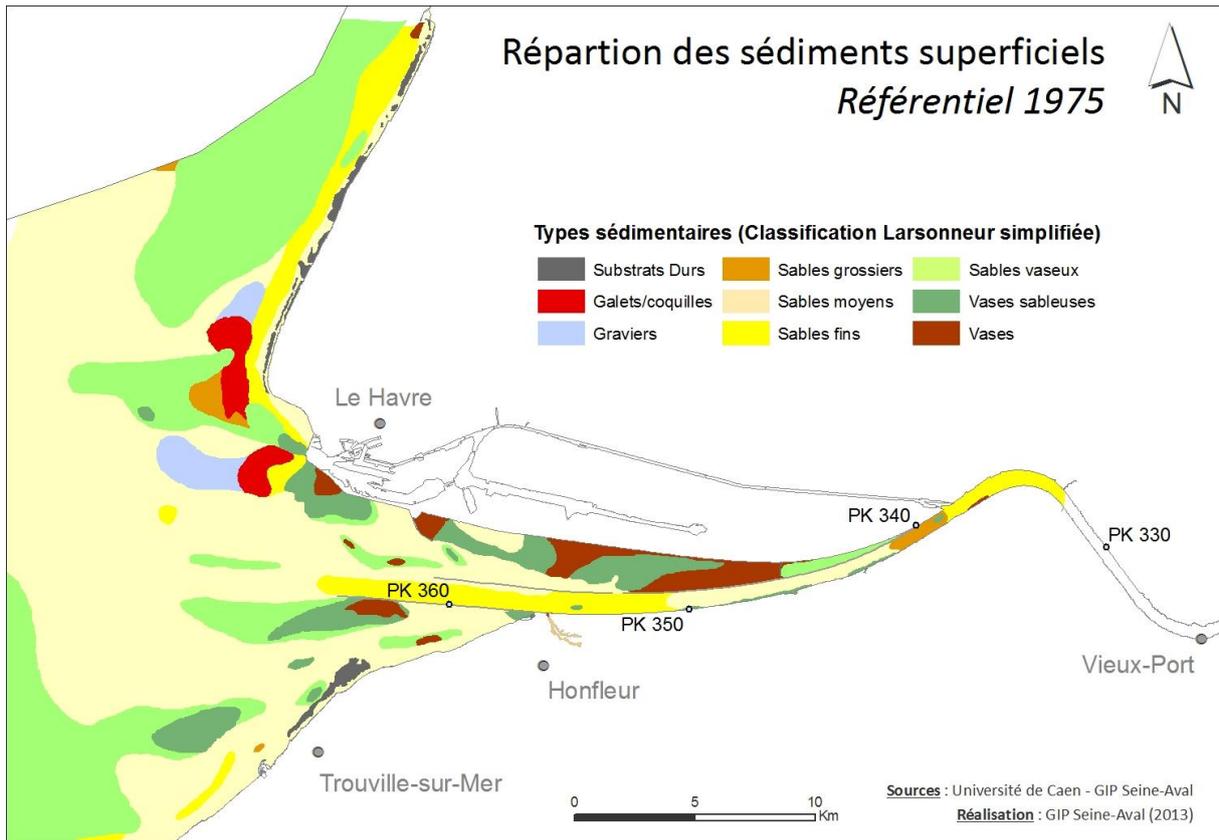


Figure 12 : Cartes de répartition des sédiments superficiels

3.3. Milieux écologiques

Une approche spécifique a été retenue pour identifier certains milieux pour lesquels le simple croisement de facteurs structurants dans l'outil SIG Habitats Fonctionnels ne permettait pas de les délimiter au regard de leur rôle dans le fonctionnement du système estuarien. Cette approche a été nécessaire pour :

- les milieux caractérisés par une hydro-morphologie spécifique dont la particularité est importante pour le cycle de vie des espèces étudiées (ex : chenal endigué, petit chenaux de marée (filandre), canaux/bassins...)
- Les milieux végétalisés : il n'a pas été introduit de facteurs structurants ces milieux (ex : pédologique, usages agricoles...).

Cette approche, qui consiste à spécifier directement les milieux, est d'autant plus pertinente que les données nécessaires à la caractérisation de ces milieux sont globalement déjà disponibles grâce notamment à la cartographie des modes d'occupation du sol ou des cartes d'habitats (ex : Natura 2000). Un travail spécifique a été nécessaire pour structurer les données sources dans une typologie adaptée aux objectifs de la démarche.

Ainsi, dans le cadre de MESSCENE, l'ensemble des milieux soumis au balancement des marées, milieux végétalisés et milieux constituant le chenal endigué de la Seine et ses annexes hydrauliques ont été cartographiés selon cette typologie. Cette couche d'information couvre ainsi la majeure partie des milieux typiquement estuariens.

Typologie de milieux écologiques	
Milieux végétalisés	Forêts
	Complexe de végétation arbustive ou herbacée
	Fourrés arbustifs
	Mégaphorbiaie
	Roselières
	Phragmitaies
	Parvoroselières
	Peupleraie
	Schorre
	Végétation éparses sur sablo gravier
Milieux agricoles	Cultures permanentes
	Terres arables
	Vergers
	Prairie sèche
	Prairie humide
Substrats nus intertidaux (sur 4 niveaux topographiques)	Substrat dur
	Vase
	Sable
	Graveleux
	Enrochements non liés

Surfaces en eau	Cours principal de la Seine
	Bras secondaires
	Confluences marnantes
	Bras morts
	Plans d'eau
	Mares (+ connectivité)
	Bassins portuaires (darses) et canaux (+ connectivité)
Autres	rivières
	Zone urbanisée
	Décharges
	Friches

Tableau 4 : Typologie de milieux écologiques

Que ce soit pour le référentiel de 1975 ou celui de 2010, le socle de construction de la carte des milieux écologiques est la cartographie des modes d'occupation du sol basée sur une photo-interprétation de d'ortho-photos datant respectivement de 1973-75 et 2009 (PNRBSN- GIP SA, 2012). Ensuite la mobilisation de base de données géographiques complémentaires (topographie, substrats, Natura 2000, limites des zones humides...) ont permis de cartographier la typologie (Tableau 4).



Figure 13 : Illustrations des ortho-photos 1973 et 2009 (zoom sur le secteur du Pont de Normandie)

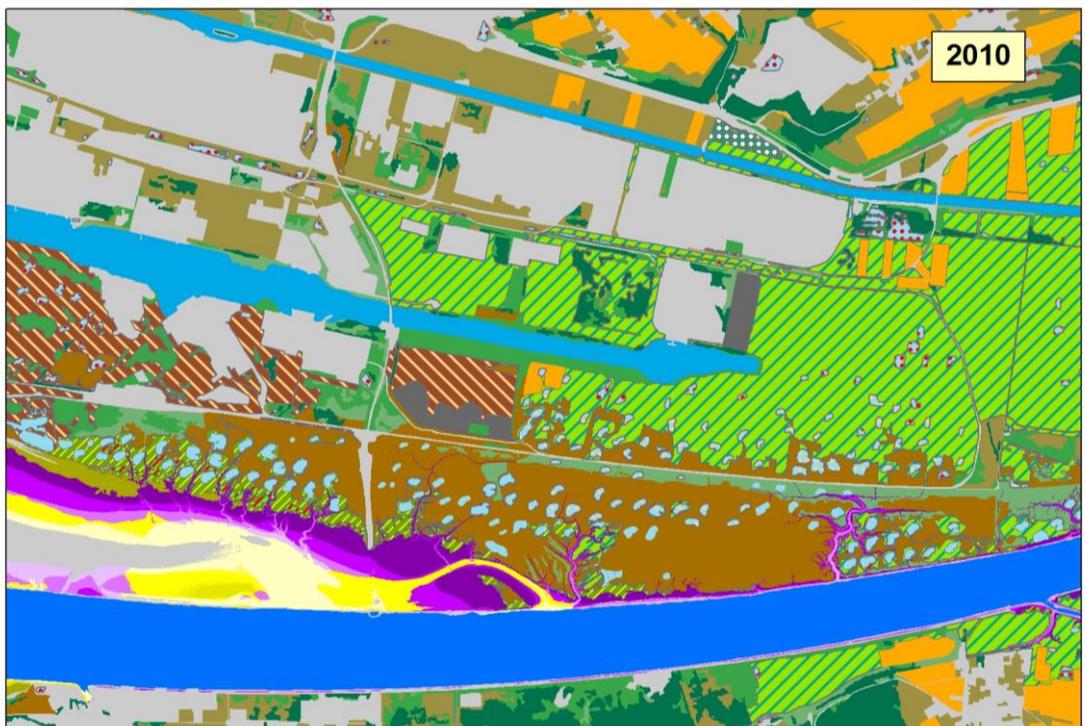
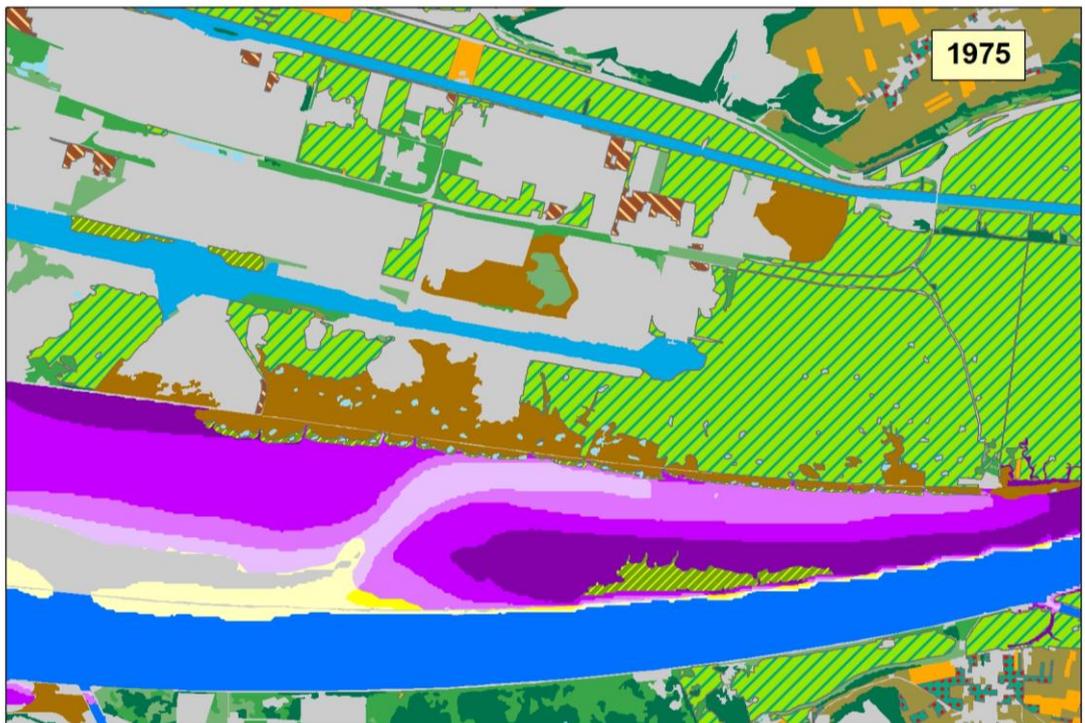


Figure 14 : Cartes des milieux écologiques (zoom sur le secteur du Pont de Normandie en rive Nord)

3.4. Salinité

3.4.1. Utilisation des données de modélisation pour la cartographie des habitats

Afin de définir les variations annuelles de salinité dans l'embouchure de l'estuaire, le modèle hydrodynamique développé par le laboratoire DYNECO/Phyzed de l'Ifremer dans le cadre du projet Seine-Aval « MODEL » sur la base du code Mars 3D a été mis en œuvre. Ce modèle hydrodynamique forcé par la marée, les conditions atmosphériques et le débit de la Seine est réputé calibré tant en hydrodynamique qu'en salinité (Le Hir et al., 2012).

Les variations de la salinité sont issues des interactions entre les forçages marins et fluviaux à l'embouchure, et sont à ce titre également fortement dépendantes de la morphologie de l'estuaire. Elle joue un rôle essentiel dans la structuration des espèces estuariennes et dans leur cartographie au sein de la démarche SIG Habitats Fonctionnels.

L'exploitation et l'intégration des résultats issus de Mars 3D au sein du SIG a nécessité le développement d'outils spécifiques transformant les données de sortie du modèle MARS 3D (fichiers volumineux de 16go en moyenne par simulation, rassemblant l'évolution horaire de la salinité pendant un an en chaque maille du modèle numérique) en données pertinentes pour la démarche de cartographie des habitats. Ces données doivent rendre compte des évolutions de la salinité en chaque point de l'estuaire pendant 1an, en tenant compte du comportement des espèces dans la masse d'eau et de leurs exigences écologiques pour ce facteur.

Dans le cadre de la démarche SIG Habitats Fonctionnels, deux types de variables sont extraits des simulations de salinité :

- Pour les espèces peu mobiles (endofaune notamment) : subissant localement des variations de salinité, des variables statistiques standards à l'échelle annuelle (moyenne des minimum et maximum journaliers) ont été calculées. Ces variables ont tendance à estomper les variations temporelles de la salinité liées à la périodicité des processus moteurs tels que la marée, les cycles mortes eaux/vives eaux ou encore les variations saisonnières des débits, mais permettent d'encadrer localement les préférences de salinité des espèces.
- Pour les espèces mobiles (pélagiques) : se déplaçant avec ou dans la masse d'eau, afin de mieux intégrer les variations liées à l'hydrodynamisme, le pourcentage de temps mensuel où la salinité est comprise entre 2 unités de salinité a été retenu comme pertinent et calculé localement (Figure 15). Pour l'instant cette donnée a été agrégée à l'échelle annuelle (la variable utilisée pour la cartographie est donc le pourcentage de temps sur une année par unité de salinité)... en attendant de mettre en place une stratégie pour cartographier les habitats de manière saisonnière.

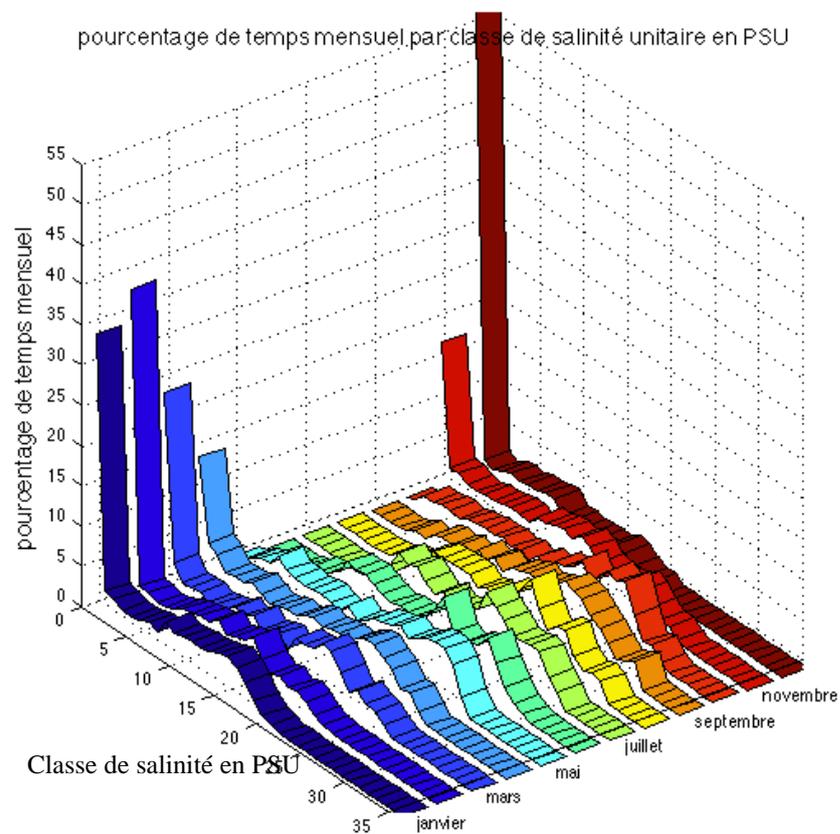


Figure 15 : Pourcentage de temps mensuel par unité de salinité en une maille du modèle MARS 3D

Le modèle Mars 3D fournissant des données en plusieurs niveaux de la colonne d'eau, ce sont soit les données calculées à la surface soit celles calculées au fond qui ont été mobilisées selon le comportement des espèces. La Figure 16 illustre le calcul de pourcentage de temps pour un exemple de gamme de salinité (ici la gamme polyhaline). Dans notre approche, une espèce dont le preferendum de salinité serait la gamme polyhaline peut potentiellement occuper les secteurs où le pourcentage de temps est supérieur à 10%. Ce seuil de 10% a été retenu pour exclure les secteurs trop peu soumis à la salinité exigée par l'espèce et donc peu utilisable. Toutefois, le choix de ce seuil n'a pas fait l'objet de test de sensibilité. Il sera également nécessaire de voir la sensibilité de cette approche en tenant compte de la saisonnalité.

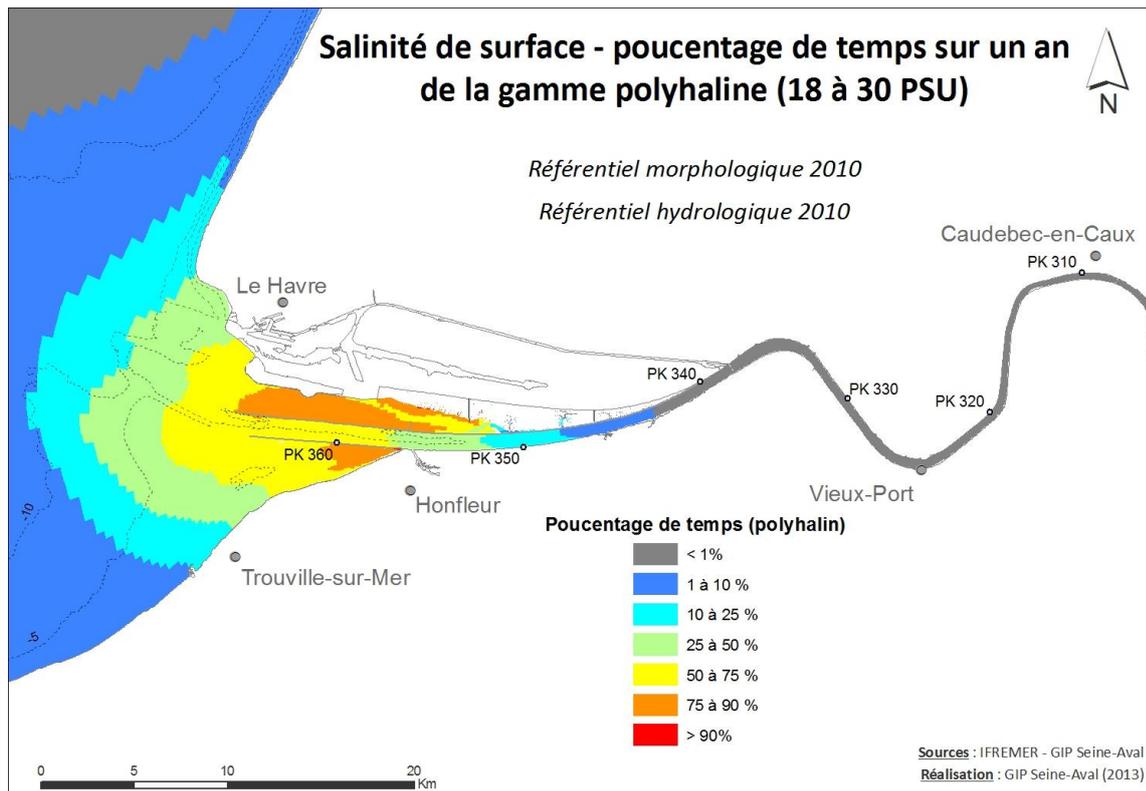


Figure 16 : Pourcentage de temps sur un an pour la gamme polyhaline – référentiel 2010

3.4.2. Trois référentiels d'habitat, trois modélisations hydrodynamiques

Dans le cadre du projet MESCCENE, 3 simulations d'une période d'un an chacune ont été réalisées afin d'évaluer l'effet de l'évolution des salinités (en lien avec les modifications de la morphologie, et des forçages hydrauliques) sur les habitats d'espèces. Ces simulations permettent d'obtenir en chaque point de l'estuaire, et à une fréquence constante, les variations de l'ensemble des variables hydrodynamiques et hydrologiques (dont la salinité).

La première simulation, correspondant au référentiel actuel, servira de point de comparaison avec les 2 autres. Il s'agit de la simulation réaliste de l'année 2010, dont l'ensemble des forçages hydrauliques et météorologiques est considéré comme représentatif des conditions environnementales des 15 dernières années (Le Hir et al., 2012). Les résultats de cette simulation peuvent donc être considérés comme représentatifs du fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire.

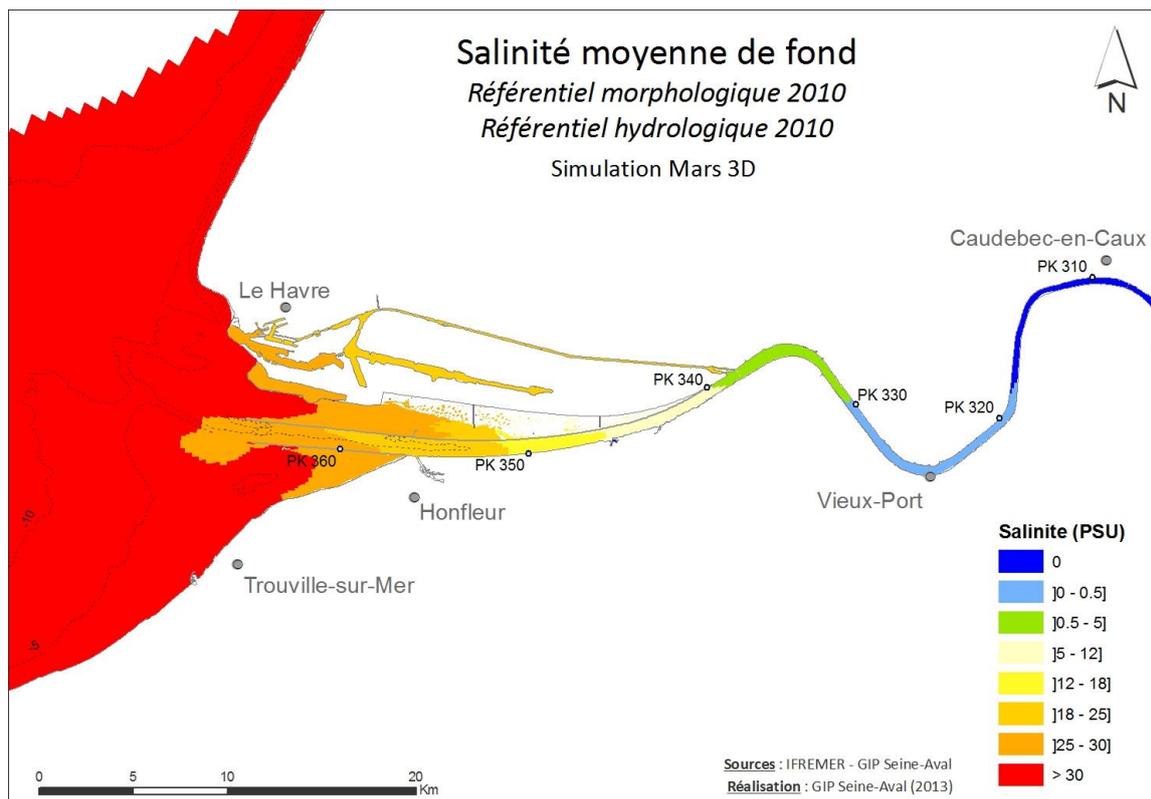


Figure 17 : Cartographie des salinités moyennes de fond calculées pour le référentiel habitat 2010.

La deuxième simulation vise à représenter les conditions hydrodynamiques en Seine au milieu des années 70. Les conditions hydro-météorologiques de 2010 considérées comme représentatives des conditions moyennes, ont été utilisées pour forcer le modèle, mais cette fois-ci sur la bathymétrie de 1975. Les résultats issus de cette simulation sont très contrastés avec ceux de 2010 (Figure 18). Cette simulation montre qu'en 1975, la morphologie de l'estuaire ne permettait pas au gradient de salinité de remonter dans l'estuaire de façon aussi importante que maintenant. Ceci peut en partie s'expliquer par le fonctionnement hydrodynamique des fosses nord et sud qui à cette époque étaient reliées au chenal de navigation par des brèches bien plus petites que maintenant. Le courant de marée associé au flot et transportant les eaux salées vers l'amont était donc moindre en 1975.

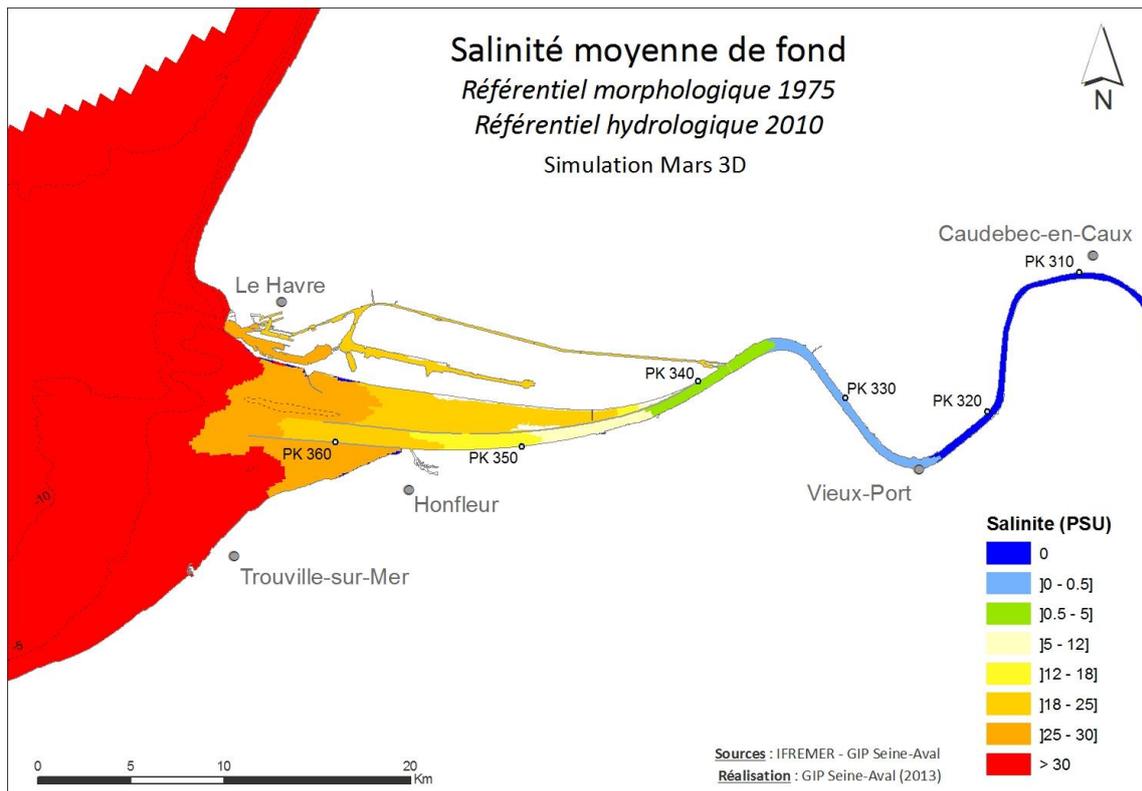


Figure 18 : Cartographie des salinités moyennes de fond calculées pour le référentiel habitat 1975.

La troisième simulation avait pour objectif d'étudier la sensibilité de la variable salinité aux évolutions des forçages hydrauliques (débit de la Seine et niveau marin), et ceci dans le contexte du changement climatique et ainsi d'en étudier les effets sur les habitats d'espèces.

Ainsi deux simulations ont été réalisées sur la bathymétrie de 2010 en prenant en compte :

- les résultats du projet Rexhyss (Ducharne A. & al., 2009) relatifs à l'évolution du débit au barrage de Poses sous contrainte de changement climatique
- des hypothèses sur l'élévation du niveau marin.

Ainsi, ces deux simulations tiennent compte d'une diminution des débits moyens annuels de 28% avec des étiages plus sévères et des crues légèrement plus fortes (Figure 19). Sur la base des résultats du projet Rexhyss, une loi de transfert entre le débit moyen actuel et le débit moyen simulé à l'horizon 2100 a été établie. Cette loi a ensuite été appliquée à la chronique de débit 2010. Les 2 simulations se distinguent par les valeurs d'élévation du niveau marin : 0,6 et 1m. Seule la simulation avec l'élévation du niveau marin de 1m a été présentée dans ce rapport.

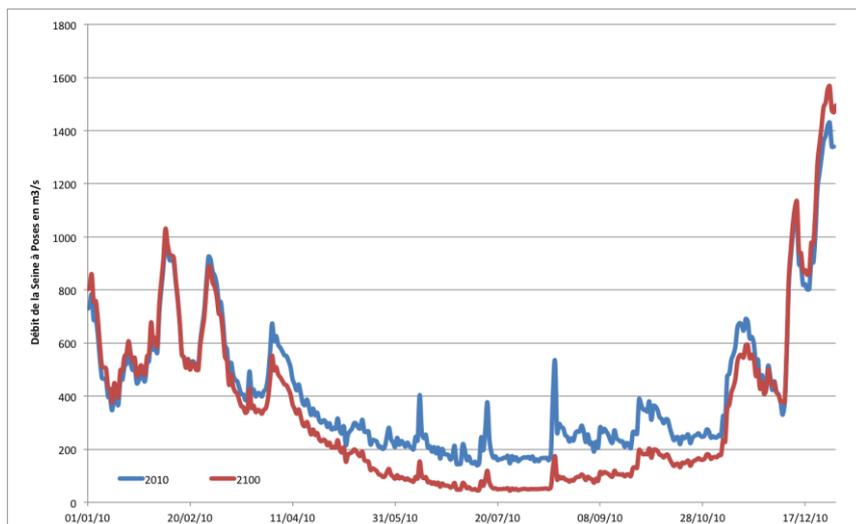


Figure 19 : projection du débit au Barrage de Poses à l'horizon 2100 (adapté de Ducharne A. & al, 2009)

Au niveau de la zone la plus aval, les résultats de cette simulation (Figure 20) en terme de salinité moyenne ne sont pas fondamentalement différents de ceux obtenus pour l'année 2010 ; le gradient de salinité a sensiblement la même forme pour ces deux simulations. Néanmoins, on observe une remontée du front de salinité de l'ordre de 10 km principalement liée à l'évolution des étiages.

Il est important de rappeler que ces résultats ont été obtenus en utilisant la bathymétrie actuelle (2010), ils ne tiennent donc pas compte des évolutions morphologiques qui accompagneront l'évolution des forçages hydrauliques. Ce test de sensibilité de la salinité à l'évolution des forçages hydrauliques ne doit donc pas être considéré comme une projection de l'évolution des salinités à l'horizon 2100.

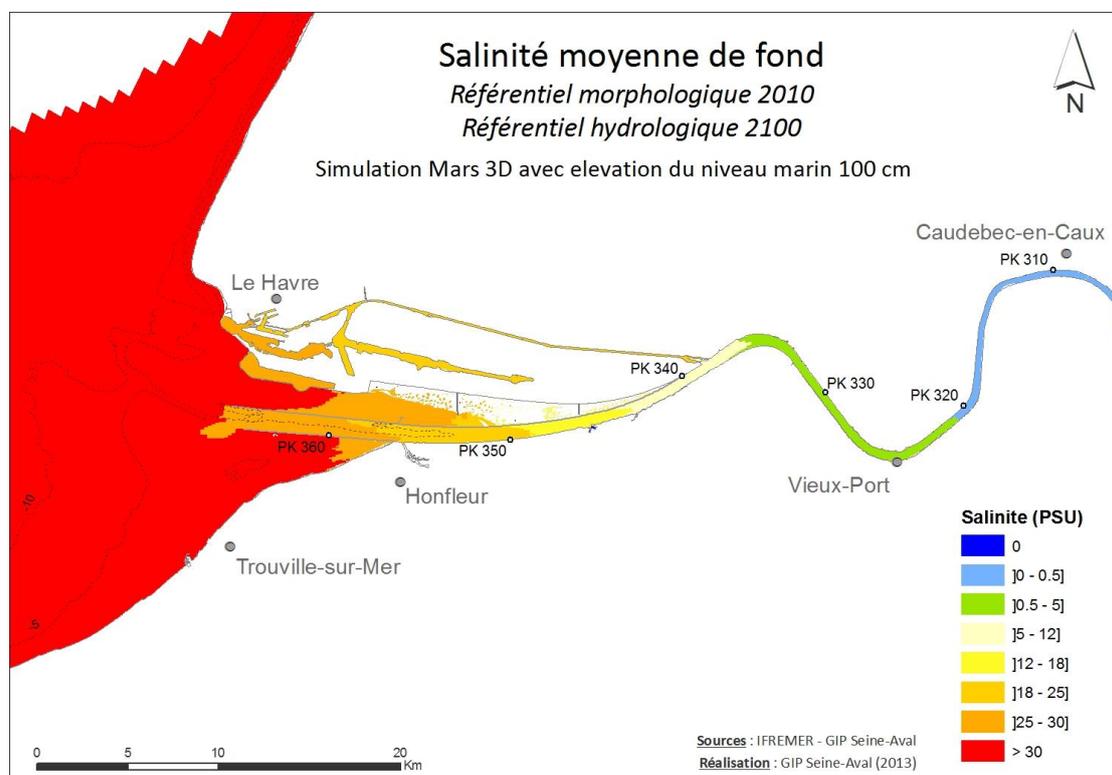


Figure 20 : Cartographie des salinités moyennes de fond calculées pour le référentiel habitat 2100.

4. Spatialisation des habitats potentiels par fonction écologique : l'habitat fonctionnel

4.1. Fonction de nourricerie dans MESSCENE

A l'origine de la démarche, sur la base de différents critères, une sélection d'espèces parmi les invertébrés aquatiques, les poissons et les oiseaux utilisant l'estuaire a été opérée.

Concernant les poissons, cette sélection d'espèces repose sur la notion de guildes écologiques (Elliott et Dewailly, 1995 ; Thiel et al., 2003 ; Martinho et al., 2007). Ces guildes sont directement définies sur la base des fonctions écologiques, réalisées par le milieu pour une espèce ou un groupe d'espèces, indépendamment de leur taxonomie. En estuaire, ces fonctions sont :

- Fonction d'**alimentation** : la richesse trophique du milieu estuarien attire des espèces de poissons à tous les stades ontogéniques de façon occasionnelle ou saisonnière. L'abondance en nourriture est de plus, souvent associée à des températures favorables à une croissance ou une maturation rapide: exemple de la motelle *Ciliata mustela* ou du mulot doré *Liza aurata*.
- Fonction de **refuge** : les eaux estuariennes offrent un habitat avec moins d'espèces piscivores, des eaux turbides limitant la prédation intra et interspécifiques, et des conditions environnementales favorables à une diminution des dépenses énergétiques basales, e.g. les températures faibles hivernales limitant le métabolisme pendant une période de faible abondance trophique (Elliott et al., 1990), ou une baisse de la salinité diminuant le coût énergétique de l'osmorégulation (e.g. Cardona, 2006) : exemple de sprat *Sprattus sprattus* et du mulot doré *Liza aurata*.
- Fonction de **nourricerie** : la fonction d'alimentation associée à celle de refuge fait de l'estuaire une zone particulièrement favorable à la croissance et la survie des jeunes stades de vie d'un grand nombre d'espèces (e.g. Costa et al., 1989 ; Elliott et al., 1990; Maes et al., 2005) : exemple de la sole *Solea solea* ou du bar *Dicentrarchus labrax*.
- Fonction de **transit** : les espèces amphihalines ont un cycle de vie complexe au cours duquel elles migrent entre le milieu marin et les eaux continentales pour accomplir leur cycle de vie. Les estuaires, en tant que masse d'eau de transition, constituent donc une zone de transit obligatoire au cours du cycle de vie : exemple de l'anguille *Anguilla anguilla*, et de l'esturgeon *Acipenser sturio*.
- Fonction de **reproduction** : pour certaines espèces, l'estuaire constitue ou offre des habitats favorables à l'établissement de frayères (Maes et al., 2004) : exemple de l'éperlan *Osmerus eperlanus* ou de l'aloise feinte *Alosa fallax*.

La fonction de nourricerie est l'une des principales assurées par les estuaires de la Mer du Nord et ceux de l'Atlantique européen (Whitfield & Elliott, 2002 ; Franco et al, 2008). Une fraction importante de l'ichtyofaune estuarienne est originaire du milieu marin et constitue la guildes des espèces **migrantes marines**, qui naissent en mer et peuvent pénétrer dans les estuaires de façon plus ou moins régulière puis retournent en mer pour leurs stades ultérieurs de développement.

La souris de mer (*Agonus cataphractus*) et le carrelet (*Pleuronectes platessa*) sont considérés comme des espèces **marines migrantes estuariennes-opportunistes** (MMO). Elles remplissent les critères

d'appartenance à la guilde des poissons *marins migrants*, mais sont capables d'exploiter également des habitats marins proches de la côte au stade juvénile (Bergman et al, 1988 ;Pihl et al., 2000).

Le bar (*Dicentrarchus labrax*) et la sole (*Solea solea*), également d'origine marine, dépendent plus étroitement au stage juvénile des habitats abrités estuariens, avec des niveaux d'abondance pouvant être très élevés pour les stades juvéniles ; on classe ces espèces en tant que **marines migrantes estuariennes-dépendantes** (MMD).

Ainsi, dans le cadre du projet MESSCENE et des simulations d'évolution des milieux à long terme, nous avons fait le choix de **se focaliser sur la guilde MMD** pour représenter les habitats de la fonction de nourricerie de poissons marins. La cartographie des habitats potentiels de l'estuaire pour cette fonction, repose sur une synthèse des cartes d'habitats potentiels des espèces de poissons marins utilisant l'estuaire comme habitat de nourricerie.

Dans notre démarche, et au regard des travaux de Duhamel (2012), 5 espèces répondent à ce critère. Pour chaque espèce, des cartes d'habitats potentiels sont produites selon différents stades de vie (ici selon les groupes d'âges, G0 = 1ere année de vie, G1 = deuxième année de vide...) ceci au regard des connaissances disponibles :

- *Clupea harengus* (Hareng) : 2 cartes=>G0 et G1 à G3
- *Dicentrarchus labrax* (Bar) :2 cartes=> G0 et G1
- *Pomatoschistus minutus* (Gobie Buhotte) : 1 carte => G0
- *Solea solea* (Sole) : 2 cartes => G0 (période estivale) et G1
- *Sprattus sprattus* (Sprat) : 1 carte G0 à G1

D'un point de vue opérationnel, les critères de choix des espèces à l'origine de la démarche SIG doivent être bien précisés (Bacq et & al, 2011) car selon les espèces sélectionnées les résultats sous forme d'indices conjuguant plusieurs espèces vont différer.

4.2. Cartes d'habitats potentiels par espèce

Les cartes d'habitats potentiels sont présentées dans les figures suivantes avec deux niveaux de potentialité :

- Habitat potentiel optimal (vert) = les valeurs de tous les facteurs dans la maille sont optimales pour l'espèce à son stade de vie considéré
- Habitat potentiel toléré (orange) = la valeur d'au moins un facteur n'est pas optimale, mais tolérée.

Pour chaque carte les hypothèses de cartographie sont présentées. Elle représente la codification des exigences écologiques de l'espèce/stade pour chaque facteur, selon la synthèse bibliographique et les avis d'experts. Le code couleur retenu pour les cartes est repris pour décrire les gammes de valeur optimale (vert) et tolérée (orange). Le rouge identifiant les valeurs non tolérées n'est lui pas repris sur les cartes. Concernant les niveaux bathymétriques intertidaux, les acronymes suivants sont utilisés :

PHMH : plus haute marée haute, **PBMB** : plus basse marée haute, **NM** : niveau moyen, **PHMB** : plus haute marée basse, **PBMB** : plus basse marée basse.

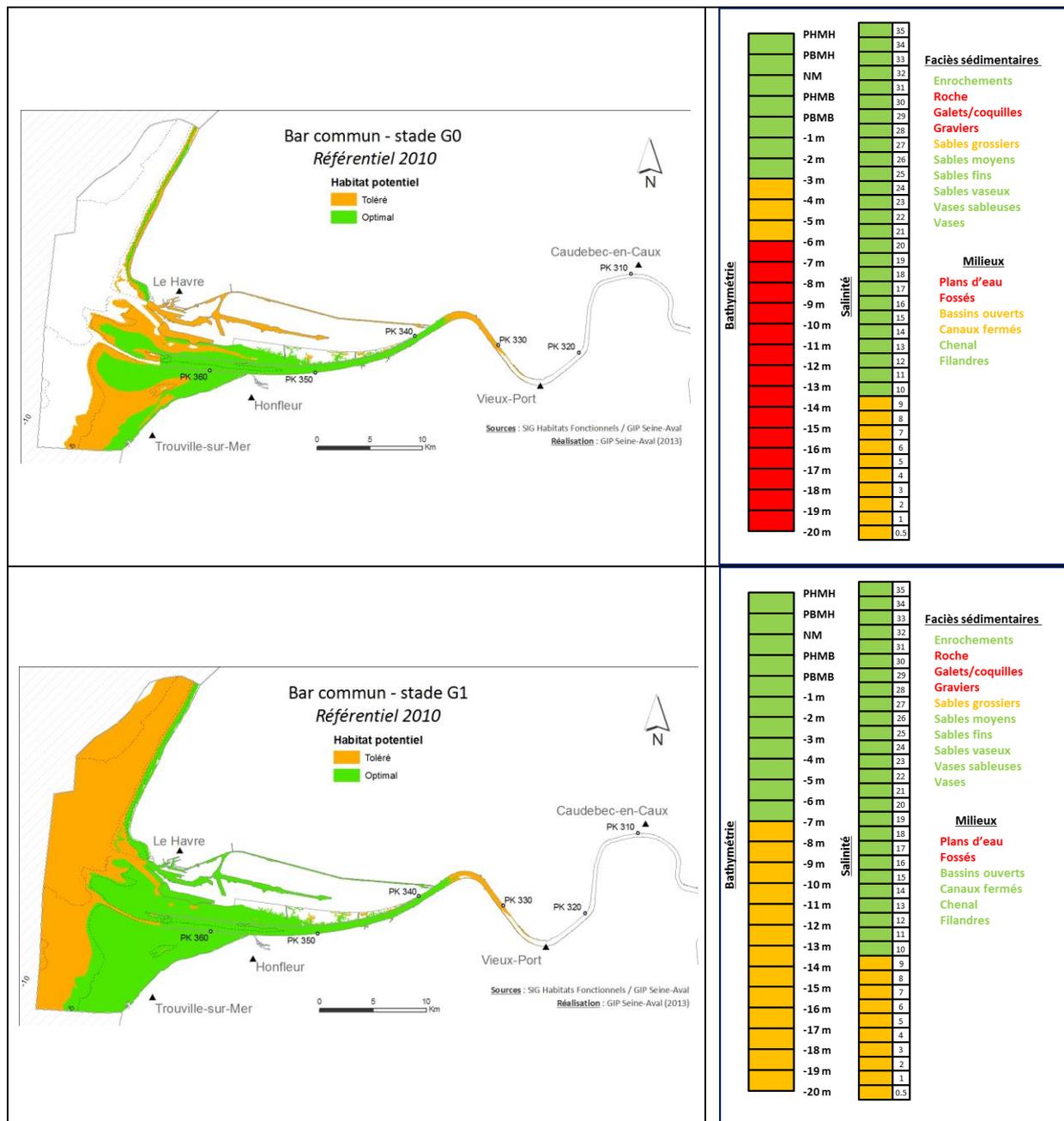


Figure 21 : Cartographie de l'indice « Habitat potentiel » pour les juvéniles de bar commun.

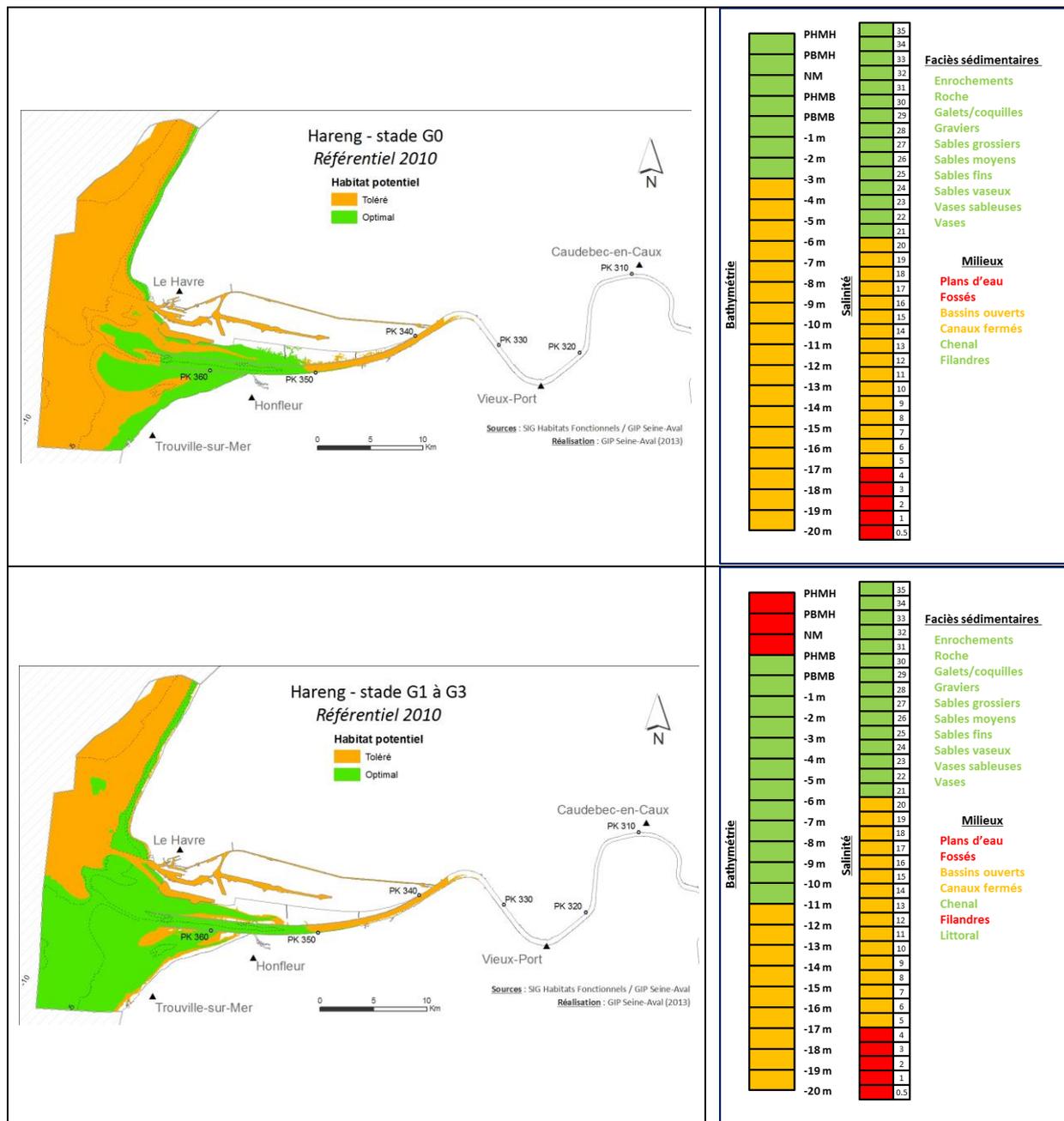


Figure 22 : Cartographie de l'indice « Habitat potentiel » pour les juvéniles de hareng.

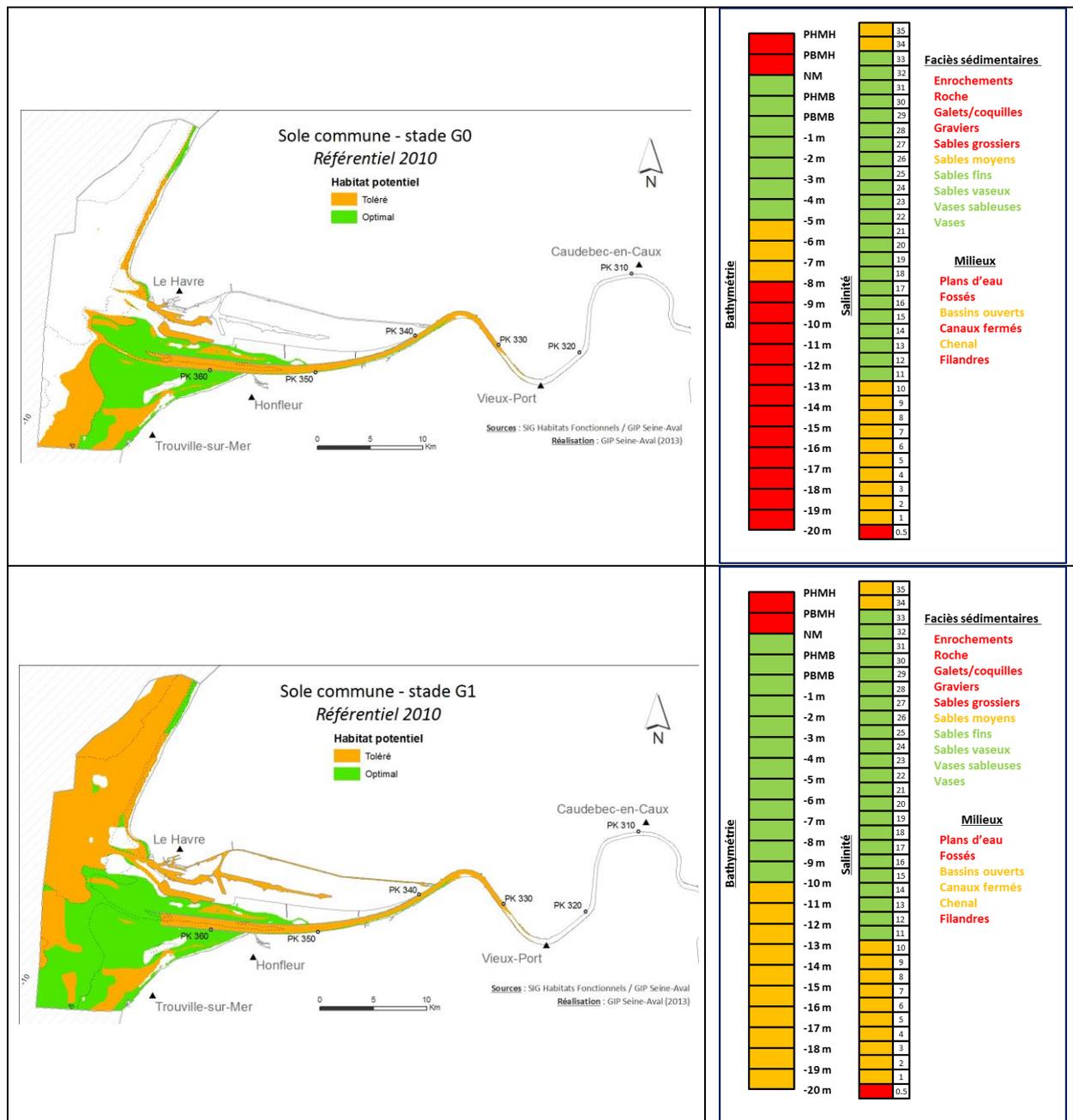


Figure 23 : Cartographie de l'indice « Habitat potentiel » pour les juvéniles de sole commune.

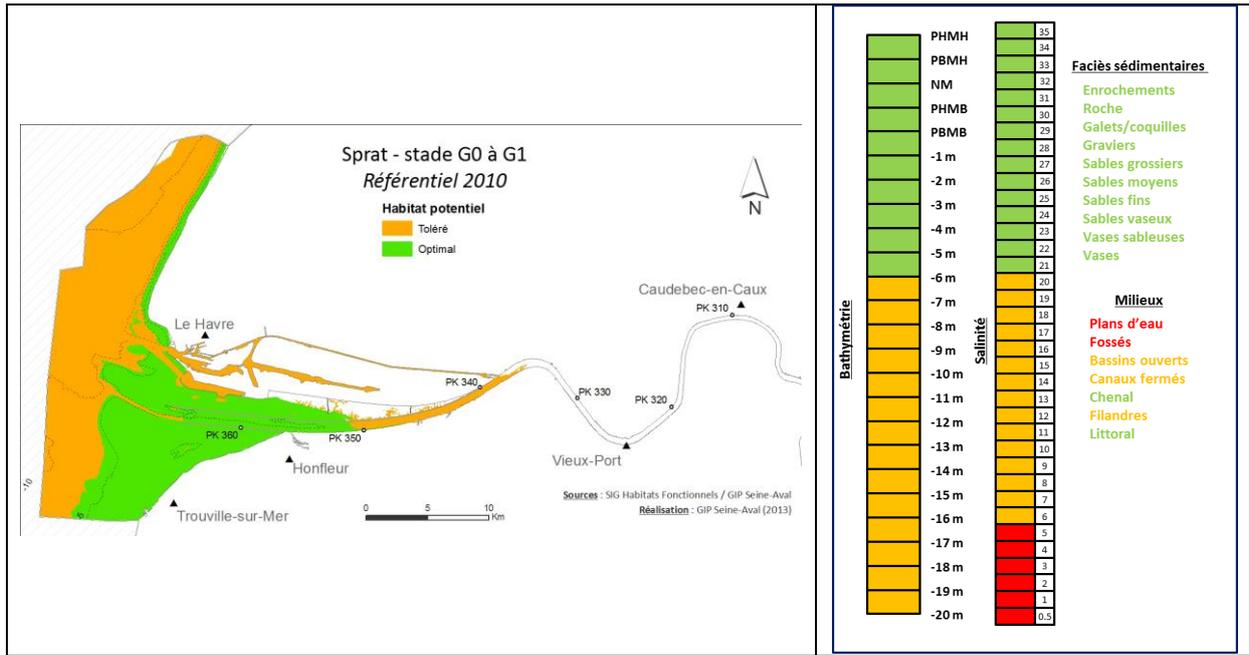


Figure 24 : Cartographie de l'indice « Habitat potentiel » pour les juvéniles de sprat.

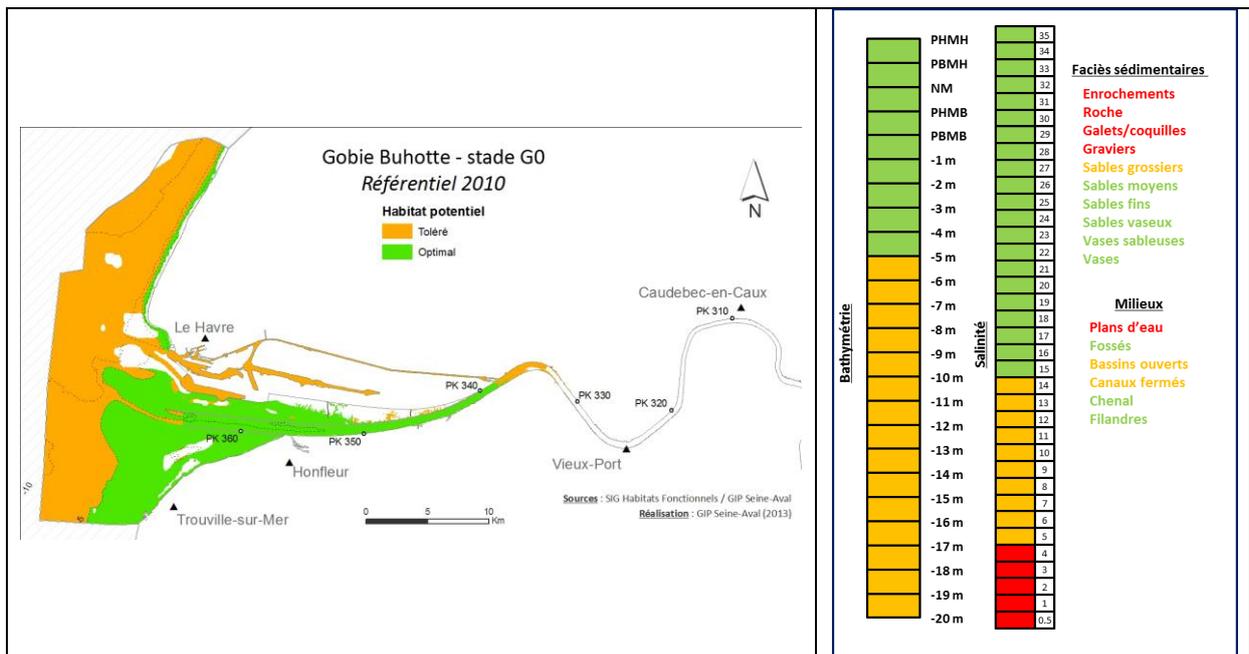


Figure 25 : Cartographie de l'indice « Habitat potentiel » pour les juvéniles de gobie buhotte.

4.3. Des habitats potentiels de juvéniles aux habitats fonctionnels de nourricerie de poissons marins

Afin d'apporter des éléments synthétiques pour l'analyse globale des trajectoires d'évolution des habitats supports de fonctions écologiques, une réflexion a été initiée sur la cartographie d'un indice « habitat fonctionnel ». Ici, **nous considérons l' « habitat fonctionnel » comme les secteurs de l'estuaire jouant potentiellement un rôle dans la réalisation de la fonction étudiée.** Appliquée à la fonction de nourricerie de poisson marin, l'indice est calculé à partir des cartes « d'habitats potentiels » par espèce pour la guildes MMD.

La méthode de calcul de l'indice retenue, mobilise localement les valeurs du calcul de l'habitat potentiel des cartes par espèce/stade de vie. Il correspond au ratio en chaque maille du carroyage de la : **\sum valeur habitat potentiel de chaque espèce-stade / maximum possible de la \sum valeurs habitat potentiel de chaque espèce-stade**

Dans notre cas, pour la guildes MMD, ce maximum est de 8 (8 fois l'optimum, cf.§ 4.1)

Ainsi, l'indice évolue de 0 à 1 où 0 indique que l'habitat ne présente pas de potentiel pour la fonction de nourricerie alors que 1 est optimal pour toutes les espèces étudiées.

Le calcul et la cartographie de cet indice pour le référentiel 2010 est illustré en Figure 26.

Le choix des classes de valeurs pour la représentation de cet indice peut mettre en évidence des zonations différentes. Une représentation simple en quatre classes équivalentes permettant de représenter un gradient continu d'évolution de cet indice a été retenue.

Le même indice calculé en ne tenant compte que des stades 1ere année de vie est illustré en **Figure 27**. Il ressort, en comparant ces deux cartes, une enveloppe optimale légèrement plus importante pour la seconde, une partie de zone intertidale passant en optimale.

Dans les deux cas, cette cartographie n'est qu'une première étape vers la cartographie des habitats fonctionnels de nourricerie. Effectivement, elle ne tient compte que des principaux facteurs physiques et hydrologiques. Or une nourricerie se définit avant tout par la présence d'une nourriture en forte abondance. Il apparaît donc clairement qu'il sera nécessaire de compléter cette approche par une estimation de la productivité des milieux en cohérence avec les stratégies alimentaires des espèces.

Par la suite, nous avons retenu arbitrairement l'indice calculé avec l'ensemble des stades juvéniles pour simuler les évolutions.

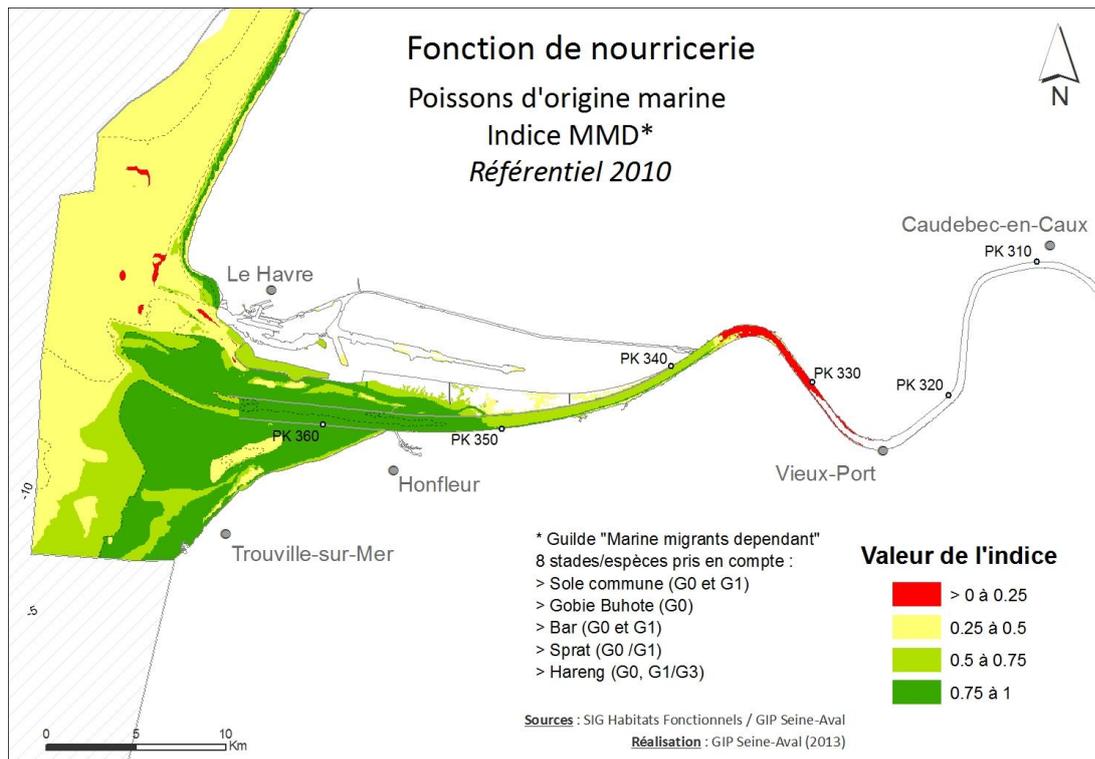


Figure 26 : Cartographie de l'indice « Habitats Fonctionnels » Nurricerie de poissons d'origine marine

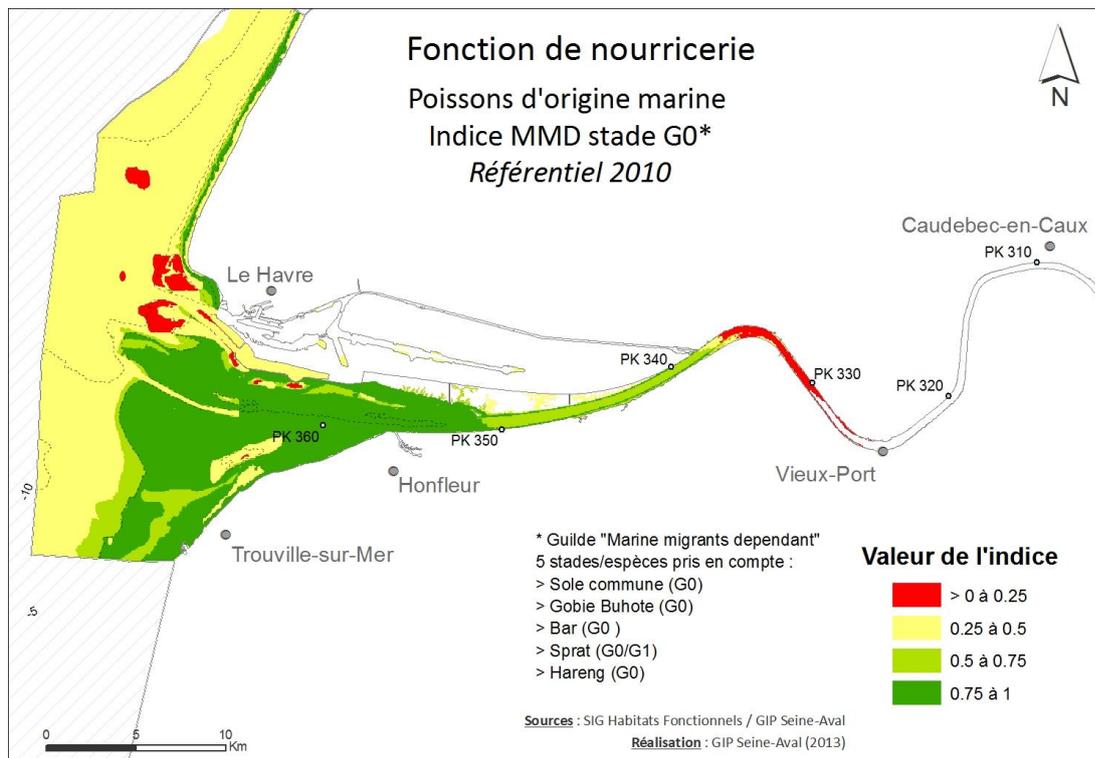


Figure 27 : Cartographie de l'indice « Habitats Fonctionnels » Nurricerie de poissons d'origine marine au stage G0.

5. Simulation d'évolution des habitats fonctionnels de nurricerie de poissons marins sur le long terme

Afin de rendre compte des évolutions des habitats fonctionnels sur le long terme, les référentiels 1975 et 2100 ont été intégrés à l'outil, puis les calculs d'indices d'habitats fonctionnels calculés. Ensuite les cartes des différentiels de la valeur de cet indice sont utilisées pour analyser les évolutions.

5.1. Trajectoire d'évolution passée

La différence d'évolution de l'indice « habitats fonctionnels » nurricerie de poisson marin entre 1975 et 2010 est illustrée en **Figure 28**.

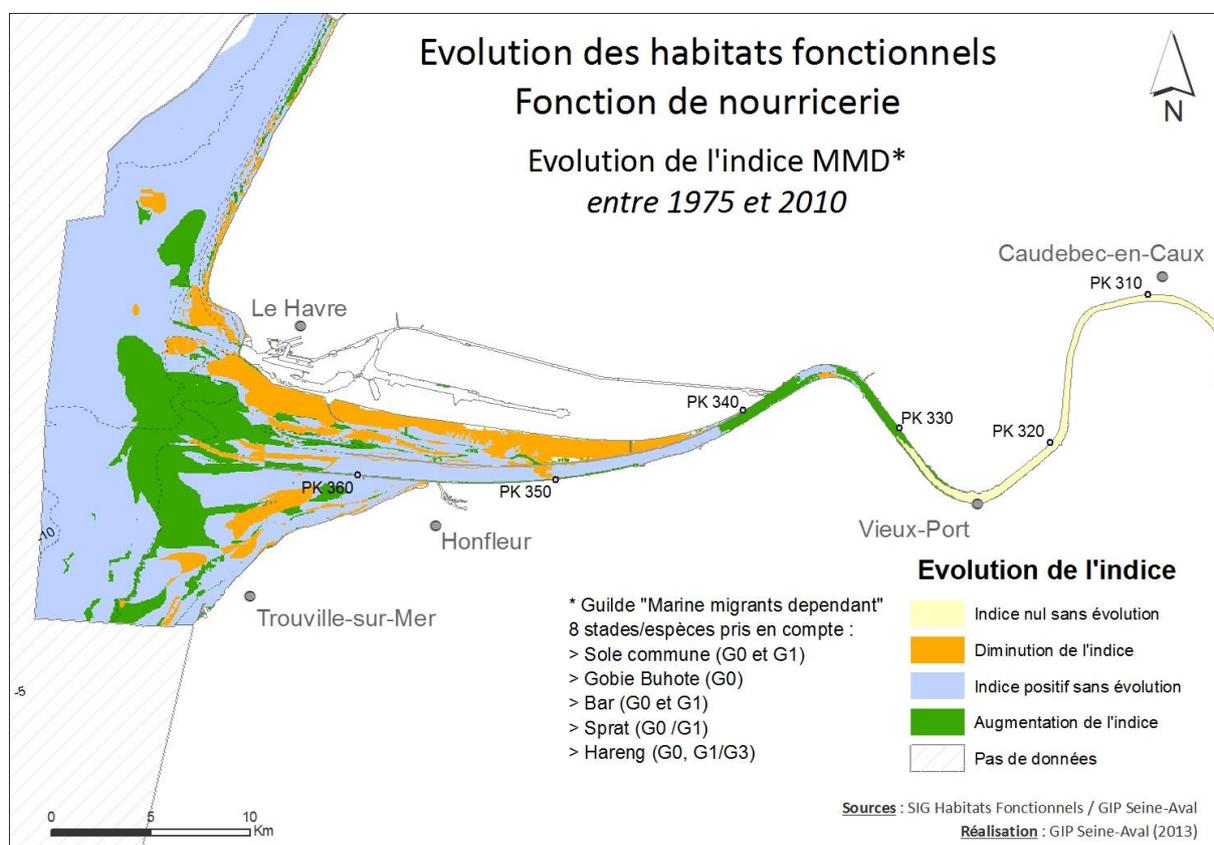


Figure 28 : Cartographie de l'évolution de l'indice « Habitats Fonctionnels » Nurricerie de poissons d'origine marine entre 1975 et 2010

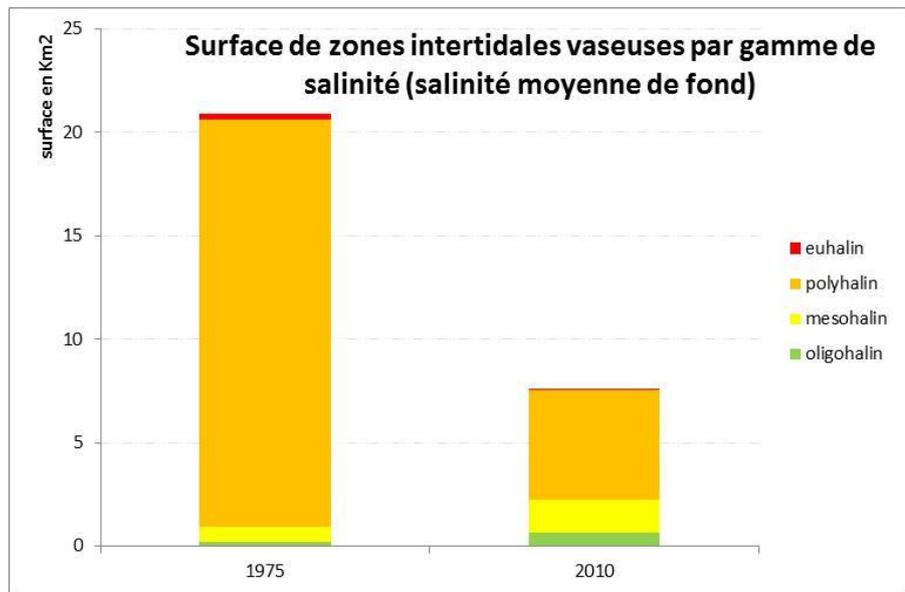
Les principales évolutions constatées à partir des résultats de l'outil sont les suivantes :

- On observe une contraction latérale depuis la rive nord dans le secteur de nurricerie optimale (environ entre les Pk 342 et 370)
- Cette contraction semble en partie compensée par une amélioration de l'indice vers l'aval (augmentation de l'indice en aval du pk 365) et vers l'amont (en amont du pk 341).

Cette évolution est à relier à l'évolution des principaux facteurs structurants.

La contraction latérale observée dans ces résultats est liée en grande partie à la diminution importante des zones de vasières intertidales en domaine polyhalin.

Figure 29 : évolution des surfaces de zones intertidales par gamme de salinité entre 1975 et 2010



Les évolutions positives dans la partie ouest de l'embouchure constatées dans ces résultats sont à relier à l'évolution géomorphologique. Effectivement, le différentiel bathymétrique (voir Figure 30) montre une élévation du fond importante dans la partie la plus externe de l'embouchure. Cette évolution doit être reliée d'une part aux usages locaux (zone de dépôt de dragage) et d'autre part à une évolution morphologique globale de l'embouchure où une progradation vers la baie de bancs de sable est observée.

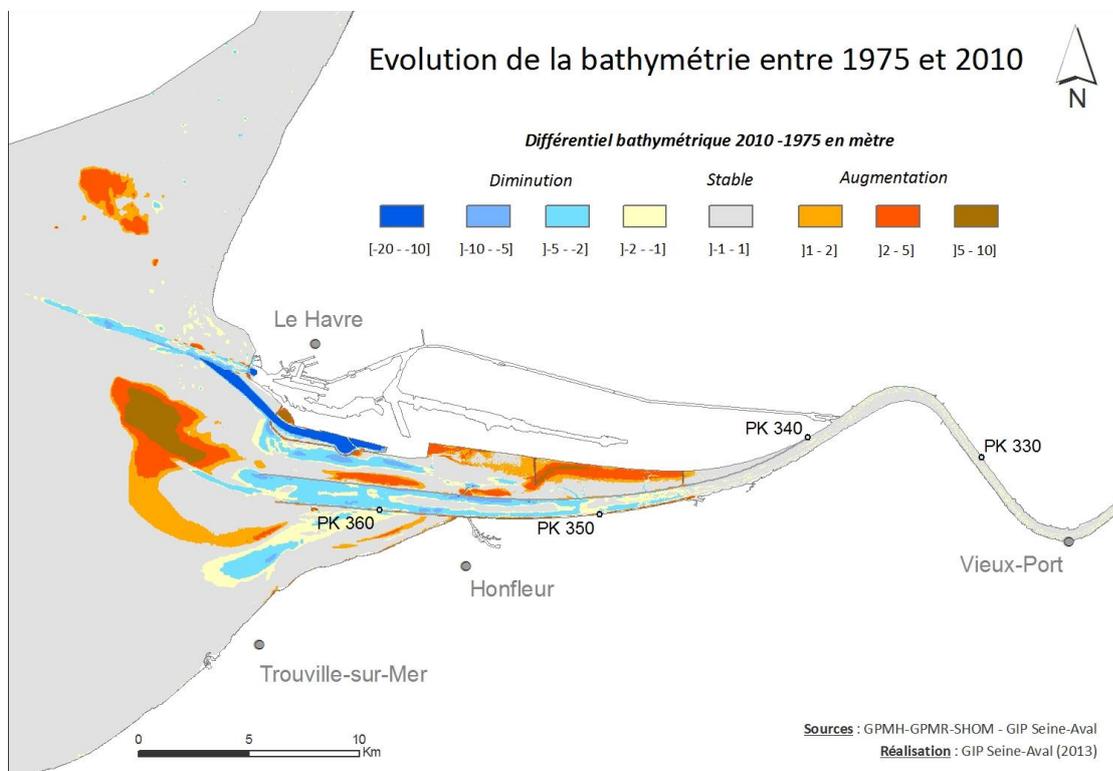


Figure 30 : Carte du différentiel bathymétrique entre 2010 et 1975

Les évolutions positives de l'indice vers l'amont sont à mettre en relation avec l'augmentation de la salinité, elle-même liée aux modifications morphologiques de l'estuaire. Cette évolution est illustrée dans la Figure 31. L'évolution entre 1975 et 2010 de la salinité est également illustrée en annexe 1 selon la variable pourcentage de temps sur l'année par gamme de salinité (variable mobilisée pour les cartographies d'habitats d'espèces pélagiques).

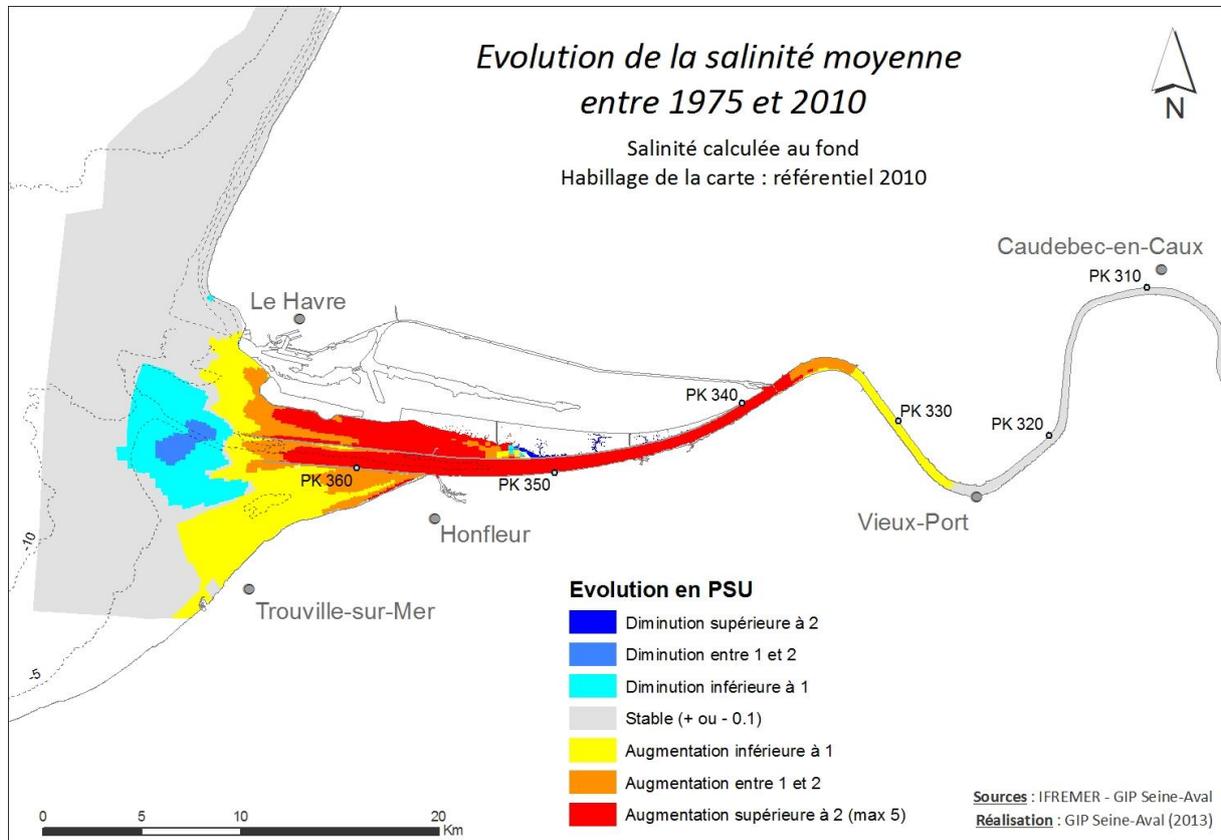


Figure 31 : Carte du différentiel des salinités moyennes de fond entre 2010 et 1975

5.2. Trajectoire d'évolution à venir : le forçage hydrologique

Cette simulation repose uniquement sur l'évolution de la salinité. La carte d'évolution de l'indice « habitats fonctionnels » nourricerie de poisson d'origine marine entre 2010 et 2100 (Figure 32) met en évidence une augmentation de l'indice vers l'amont en lien avec l'augmentation de la salinité (Figure 33) dans ces secteurs.

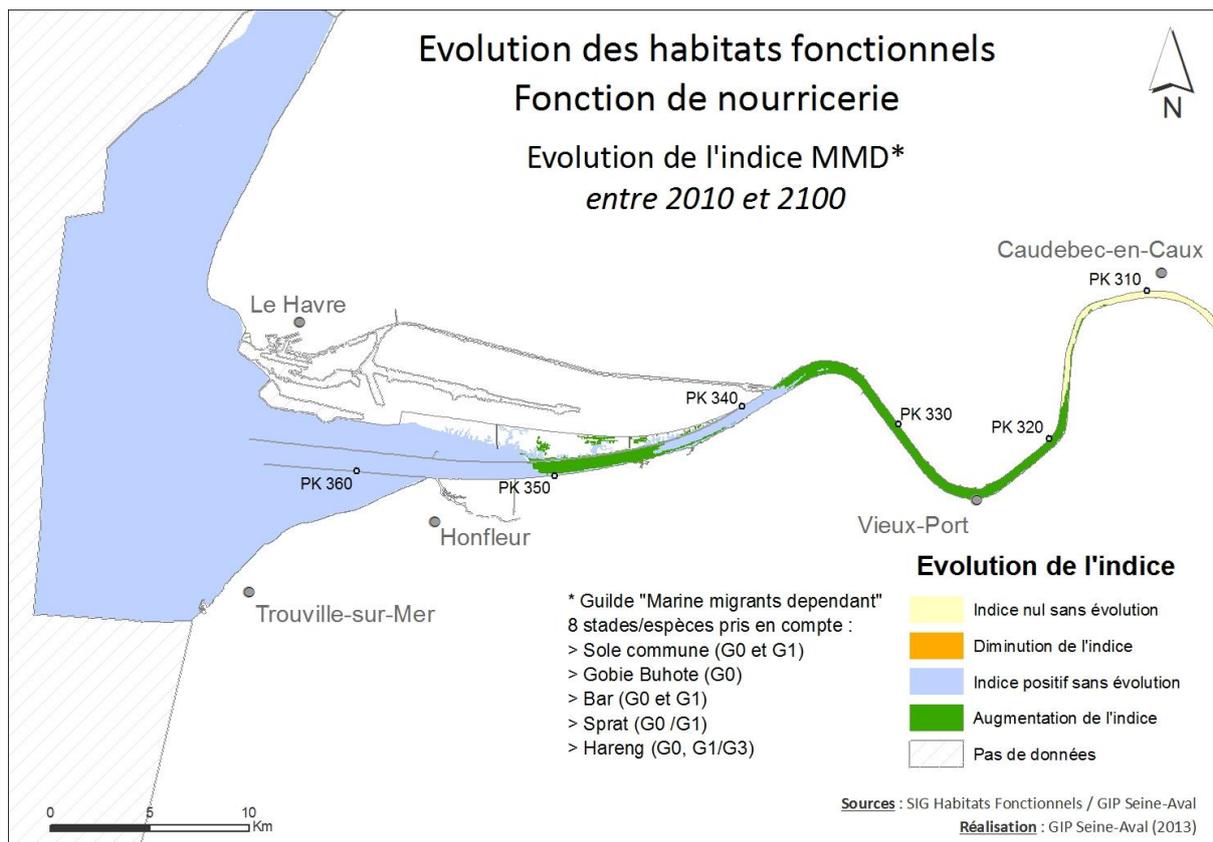


Figure 32 : Cartographie de l'évolution de l'indice « Habitats Fonctionnels » Nurricerie de poissons d'origine marine entre 2010 et 2100

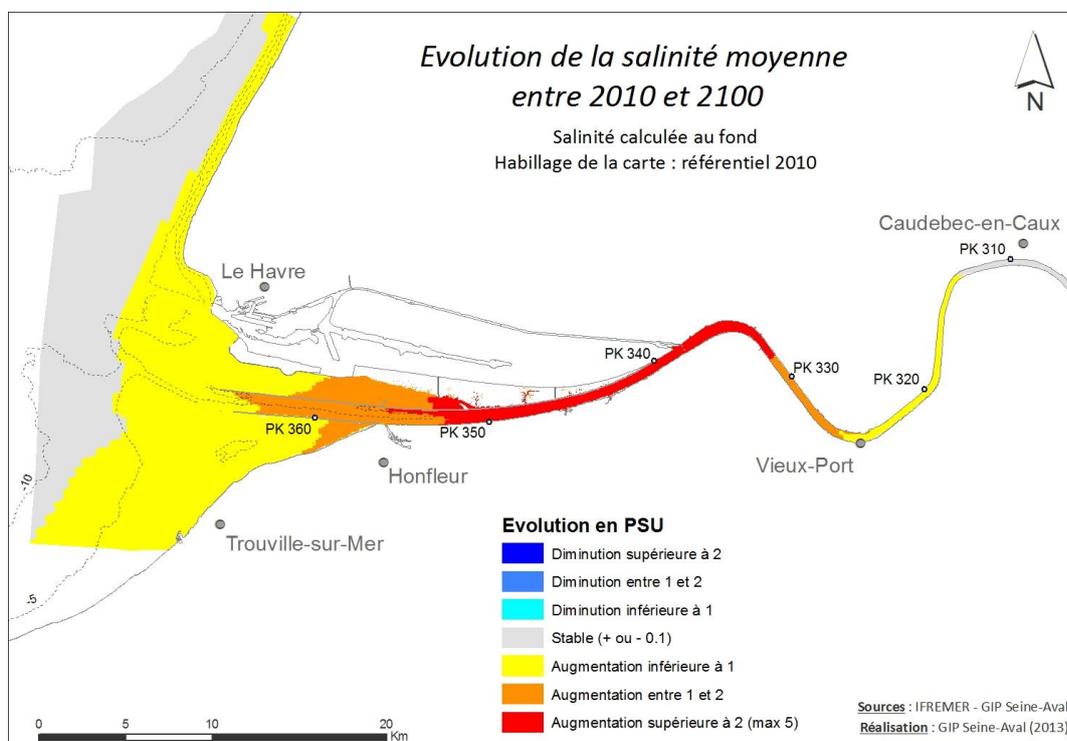


Figure 33 : Carte du différentiel des salinités moyennes de fond entre 2100 et 2010

5.3. Bilan de l'exercice à l'échelle de l'estuaire

Ainsi, à l'échelle de l'estuaire (ici uniquement la partie soumise à salinité), dans un premier temps l'exercice d'analyse rétrospective a permis de mettre en évidence les capacités de l'outil à :

- Intégrer les principales variables environnementales structurant les milieux au regard de leur rôle dans le cycle de vie des poissons d'origine marine.
- Synthétiser spatialement pour une guildes fonctionnelle les habitats potentiels de la fonction de nourricerie de poissons marins.
- Mettre en évidence de manière intégrée une évolution rétrospective de ces habitats entre les années 70 et l'actuel en intégrant pour la première fois l'évolution de la salinité par modélisation.
- Illustrer les liens entre évolution des facteurs structurants et évolution des habitats fonctionnels

En complément de l'analyse rétrospective, la projection à 2100 sur l'hydrologie du système et ses effets sur le facteur salinité a permis :

- de poser les bases méthodologiques relatives à la prise en compte d'évolutions hydrologiques liées aux projections du changement climatique dans la modélisation numérique de la salinité, puis à l'avenir d'autres facteurs (turbidité...).
- de rendre compte d'une bonne sensibilité de l'outil SIG aux facteurs hydrologiques.
- de rendre compte de tendances d'évolution à venir de la variable salinité même si l'échéance 2100 est peu opérationnelle d'un point de vue aménagement/restauration écologique. La tendance à plus court terme resterait la même mais l'ampleur des variations serait moindre.

Ce dernier résultat apporte ainsi un support à la réflexion pour définition de priorités en termes de restauration afin de tenter d'y intégrer cette trajectoire possible d'évolution des habitats, espèces et fonctions écologiques

6. Scénario « restauration écologique »

L'objet ici est d'étudier les apports et limites de la démarche SIG Habitats Fonctionnels dans le cadre d'une étude visant la mise en place d'un aménagement de restauration écologique. Le cas d'étude retenu est la réflexion sur la « Décompartmentation » de l'estuaire engagée par le GPMH dans le contexte de la recherche de mesures potentielles d'accompagnement environnemental du projet de raccordement du grand canal du Havre au Canal de Tancarville : projet EMERHODE.

Les objectifs de cette étude sont d'examiner, l'opportunité et les possibilités d'augmenter les volumes des espaces directement soumis à la marée. Elle s'intéresse à la manière de réduire l'incidence des cloisonnements existants (digue présente dans la plaine alluviale). Sur la base de plusieurs scénarios, il s'agit ensuite d'approfondir le plus apte à répondre aux attentes du Grand Port Maritime et des parties prenantes. L'étude a été confiée à l'entreprise Artelia qui a proposé en avril 2012 un programme d'aménagement et les conditions de sa mise en œuvre.

Sur la base des hypothèses de ce programme d'aménagement, il était donc possible d'envisager l'évolution potentielle des milieux naturels et facteurs structurants les habitats d'espèces. L'objectif final étant de tenter d'analyser les évolutions en termes d'habitats fonctionnels avec l'outil développé, puis d'en discuter l'intérêt et les limites.

6.1. Site d'étude, programme d'aménagement retenu et positionnement de l'étude MESSCENE

Le site d'étude, localisé dans la Réserve Naturelle Nationale de l'Estuaire de la Seine (RNNES) entre le Pont de Normandie et le Pont de Tancarville en rive droite, se trouve dans la zone de mélange entre eau douce et eau salée. Il regroupe un ensemble de prairies et de roselières distribué autour d'un réseau hydrographique, en partie connecté à la Seine par des chenaux de drainage ramifiés (nommés filandres) qui se développent à la surface de nombreuses vasières intertidales (Figure 34).



Figure 34 : Localisation du site d'étude.

La route de l'estuaire constitue une barrière hydraulique limitant l'emprise spatiale des secteurs soumis librement à la marée. Après analyse de plusieurs scénarios, un programme d'aménagement constitué de brèches dans cette levée a été retenu pour restaurer des échanges hydrauliques naturels avec la Seine (Figure 35). Ce programme d'aménagement repose sur la volonté de maintenir naturellement fonctionnelles les filandres présentes dans ce secteur en restaurant leur connectivité amont et en favorisant leur croissance (longueur et largeur des drains).

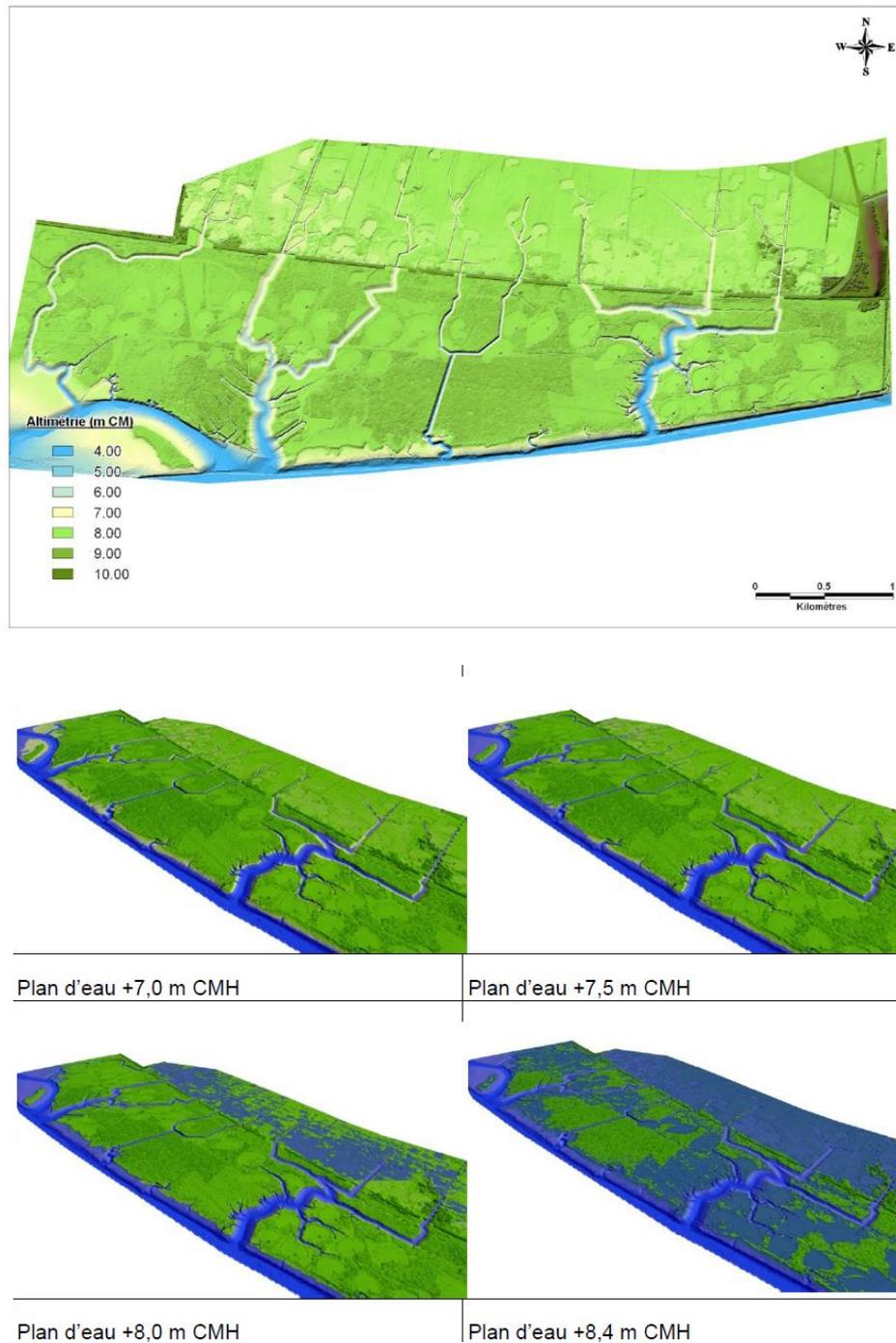


Figure 35 : Illustration des résultats potentiels du programme d'aménagement en termes de zones inondées selon différents niveaux d'eau (approche statique) (source Artelia 2012).

Ce cas d'étude fait interagir différentes logiques d'acteurs et ainsi présente un intérêt pour discuter des apports et limites d'une démarche de rationalisation et transfert des connaissances telle que la mise en œuvre du SIG Habitats Fonctionnels. Effectivement, l'étude préalable à cette proposition d'aménagement a permis de faire ressortir que les sensibilités à cet aménagement, exprimées par les acteurs, sont contrastées (Artelia 2011), notamment entre :

- Les naturalistes, qui ont une vision locale et actuelle de la zone qu'ils étudient et travaillent avec une approche patrimoniale des milieux et espèces, se positionnent en défenseurs de l'existant et entretiennent les fortes incertitudes sur le devenir des milieux avec un tel aménagement.
- D'autres environnementalistes qui ont une vision plus globale et à plus long terme, abordent les enjeux avec une approche fonctionnelle, écosystémique en intégrant par exemple plus facilement les conséquences des changements climatiques ...
- Les usagers qui défendent leurs activités et proposent des modes de gestion adaptés à leur besoin pour maintenir leurs activités tout en valorisant les services rendus par leur pratiques (ports, agriculteurs, faucheurs de roseau...).

Au moment de la réalisation de l'exercice MESSCENE, le calendrier d'avancement des suites de la réflexion « Décompartmentation » ne permettait pas de disposer d'une étude d'impact de ce programme d'aménagement. Ainsi, nous ne disposons pas d'informations validées sur l'évolution attendue des milieux. D'autre part, l'exercice se voulant à l'origine très méthodologique, il a été mené en chambre avec les principaux interlocuteurs de la réflexion initiale et dissocié des discussions officielles plus opérationnelles. Les résultats pourront toutefois alimenter les débats à venir sur ce projet.

6.2. Méthode retenue pour l'exercice d'évaluation des effets de la « décompartmentation » sur les habitats fonctionnels du site d'étude

Deux réunions de travail ont mobilisé les deux Grands Ports Maritimes, la Maison de l'Estuaire (gestionnaire des terrains concernés), le bureau d'études Artelia et le GIP Seine-Aval.

Le déroulement de l'exercice a été le suivant :

- Identification, de manière collective lors de la première réunion, de **deux scénarios d'évolution des facteurs structurants** les habitats (limités à ceux pris en compte dans l'outil SIG : milieux écologiques, salinité) au regard du programme d'aménagement.
- Modification par le bureau d'étude Artelia des données du « référentiel actuel » de facteurs structurant au regard du projet d'aménagement et des scénarios d'évolution des milieux
- Mise en œuvre par le GIP SA de l'outil SIG Habitats fonctionnels sur la base des deux scénarios d'évolution contrastés des facteurs structurant.
- Echange sur les résultats lors de la seconde réunion collective.

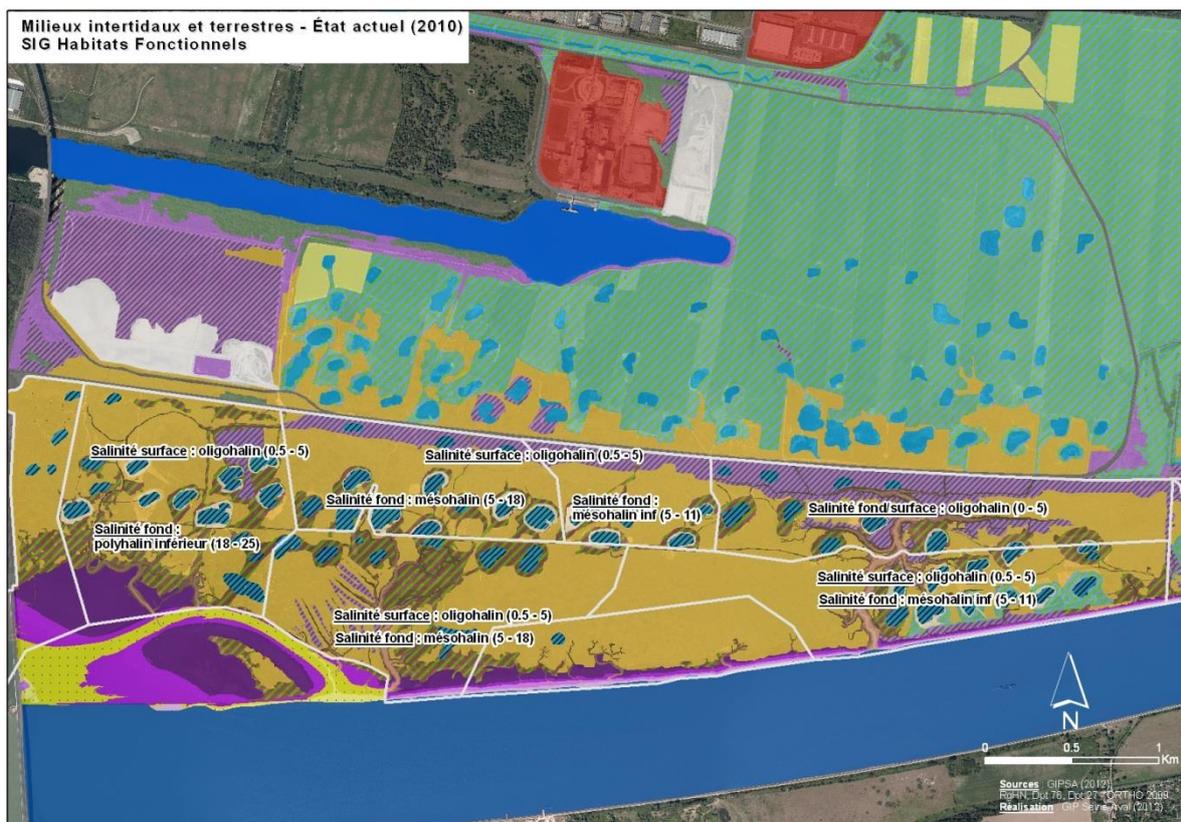
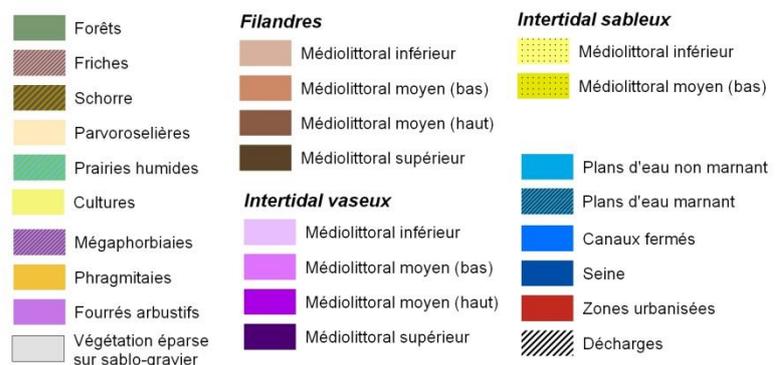
Il est important de noter que, dans un contexte plus opérationnel (étude d'impact par exemple), il aurait fallu :

- Prendre en compte d'autres projets en cours ou prévus pour les intégrer dans les évolutions des milieux
- Faire valider les hypothèses des scénarios d'évolution des facteurs structurants par une concertation plus large
- Mobiliser une expertise pour valider les effets de l'ensemble des hypothèses sur l'évolution des milieux.

6.3. Scénarios d'évolution des milieux

Les principaux facteurs structurants mobilisés dans cet exercice sont les milieux écologiques et la salinité. L'analyse des usages agricole a été également nécessaire afin de prendre en compte leur effet sur la végétation.

Figure 36 : Cartographie du référentiel actuel de facteurs structurants : salinité et milieux



Le choix de ces scénarios était **volontairement contrasté et très théorique** afin de tester la sensibilité de l'outil SIG Habitats Fonctionnels.

Ainsi, deux scénarios ont été retenus :

- Scénario DECOMPARTIMENTATION (S1) : Modification hydro-morphologique liée à la reconnexion de filandres avec les prairies en arrière de la route de l'estuaire **sans** changement majeur dans les usages agricoles (mise en place de pâturage à défaut de fauche au nord de la route) et **sans** évolution du gradient Est-Ouest de salinité
- Scénario DECOMPARTIMENTATION + Modification facteurs (S2) : Modification hydro-morphologique liée à la reconnexion de filandres avec les prairies en arrière de la route de l'estuaire **avec** un changement majeur dans les usages (suppression des usages au nord de la route) et **avec** une évolution du gradient Est-Ouest de salinité par augmentation vers l'amont (à l'image de tendance d'évolution à venir , voir § 3.4.2).

Les points communs des 2 scénarios sont les suivants :

- La gestion agricole au sud de la route de l'estuaire est inchangée par rapport à l'actuel
- Le réseau de drainage (filandres et fossés non marnant) est modifié au regard des propositions de l'étude « Décompartmentation ».
- Disparition de plans d'eau au nord de la route au regard de l'évolution des réseaux de drainage.
- Le secteur le plus à l'ouest et au nord de la route évolue en schorre du fait de l'intrusion du gradient de salinité au nord de la route.

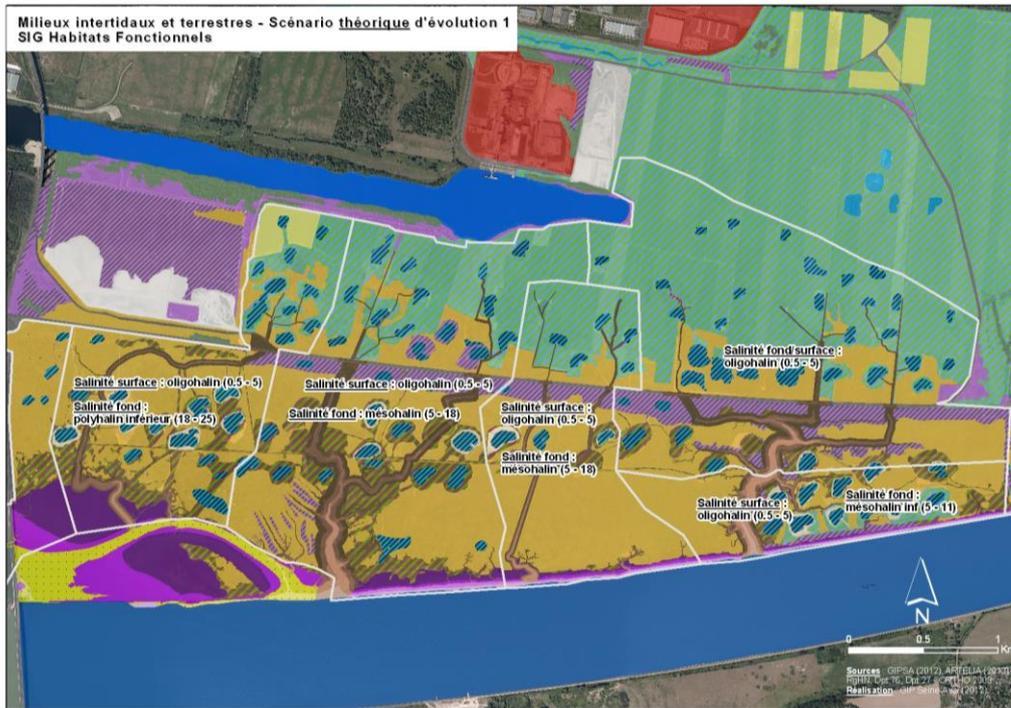
La résultante des deux scénarios diverge sur la salinité et la limite prairie/roselière au nord de la route :

S1 : « Gestion agricole - pas d'évolution du gradient de salinité est-ouest »

- Limite prairie/roselière : La gestion agricole des prairies au nord de la route est maintenue. La limite de la roselière est donc équivalente à la limite actuelle.
- Salinité : Le gradient Ouest-Est de salinité n'évolue pas par rapport à l'actuel au sud de la route et est par contre étendue au nord du fait de la nouvelle connectivité.

S2 : « Pas de gestion agricole et remontée vers l'amont du gradient de salinité en Seine »

- Limite prairie/roselière : aucune gestion agricole n'est maintenue au nord de la route. Une nouvelle limite d'extension de la roselière pourra être établie au regard des connaissances actuelles sur la végétation et de l'influence de la topographie sur les temps d'inondabilité qui influe sur le développement de la végétation.
- Salinité : le gradient Ouest-Est de la salinité évolue au regard des tendances observées actuellement. Ainsi des modifications sont apportées sur les filandres pour renforcer leur caractère marin (augmentation de l'ordre de 5 PSU pour les plus aval) tout en maintenant un gradient ouest-est dans ce renforcement.



- | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Forêts | Filandres | Intertidal sableux |
| Friches | Médiolittoral inférieur | Médiolittoral inférieur |
| Schorre | Médiolittoral moyen (bas) | Médiolittoral moyen (bas) |
| Parvoselières | Médiolittoral moyen (haut) | |
| Prairies humides | Médiolittoral supérieur | Plans d'eau non marnant |
| Cultures | | Plans d'eau marnant |
| Mégaphorbiaies | Intertidal vaseux | Canaux fermés |
| Phragmitaies | Médiolittoral inférieur | Seine |
| Fourrés arbustifs | Médiolittoral moyen (bas) | Zones urbanisées |
| Végétation éparse sur sablo-gravier | Médiolittoral moyen (haut) | Décharges |
| | Médiolittoral supérieur | |

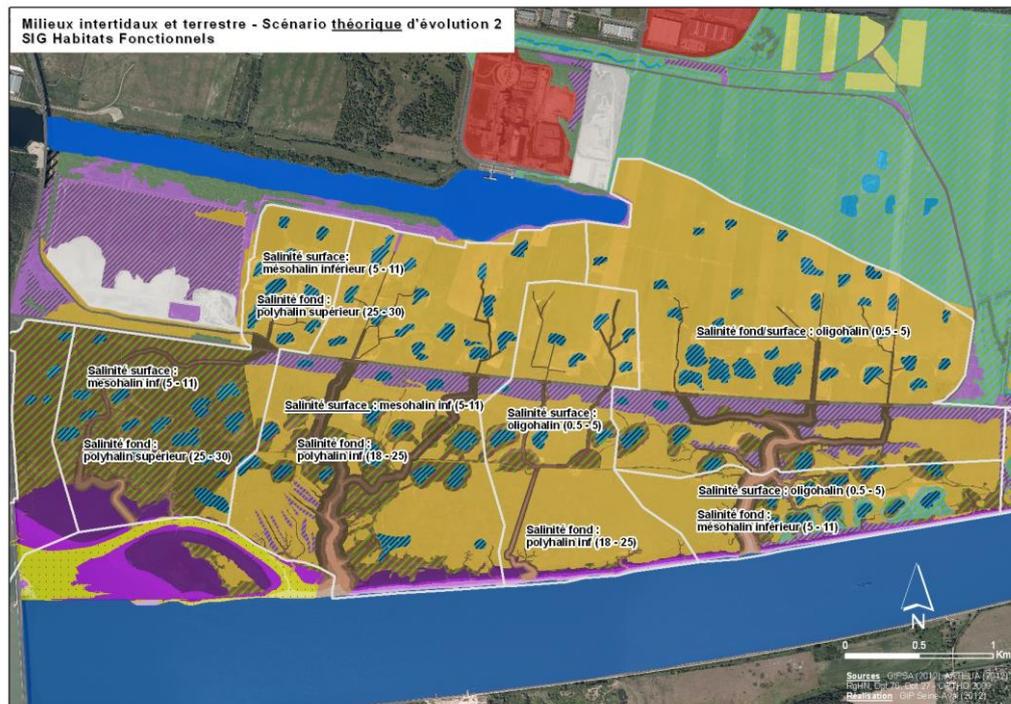


Figure 37 : Cartographie des référentiels de facteurs structurants pour les deux scénarios d'évolution des milieux.

6.4. Evolution des habitats fonctionnels

Les cartes sur **les invertébrés** n'ont pas été analysées. A l'échelle du projet seules 4 espèces qui sont extrêmement dépendantes des surfaces de vasières et filandres, sont prises en compte dans l'outil. De plus, aujourd'hui l'outil ne permet de faire le lien fonctionnel entre présence/abondance des proies et qualité de la nourricerie/alimentation pour les oiseaux et les poissons.

Des résultats sur les poissons et oiseaux ont été présentés et discutés.

6.4.1. Les poissons

Parmi les espèces étudiées et dont les hypothèses de modélisation d'habitat sont considérées comme « validées », une sélection a été faite afin d'illustrer les effets d'un projet de « décompartimentation » sur les fonctions écologiques supportées par les milieux en tenant compte des trois situations (l'actuel et les deux scénarios proposés).

Ainsi, des cartes d'habitats potentiels **de poissons**, pour les juvéniles de bar, de sole, de hareng, de sprat et de gobie buhotte ont été établies (par exemple Figure 38) illustrant l'influence des évolutions de milieux sur la fonction de nourricerie. D'une manière assez générale, il ressort des résultats différents selon les espèces :

- avec pour chacune (sauf la sole) une augmentation des surfaces d'habitats liées à l'accroissement des surfaces de filandre.
- une influence notable du scénario 2 en lien avec l'évolution de la salinité pour le hareng (augmentation de la surface d'habitat optimal) et le gobie (diminution de la surface d'habitat optimal)

Les cartes d'habitats potentiels de l'épinoche pour la fonction de reproduction ont été présentées en réunion pour les trois scénarios. Elles mettent en évidence la diminution d'habitat après reconnexion des prairies à la Seine (disparition de plan d'eau stable). Le degré de connectivité des milieux est un facteur essentiel pour ce type de fonction.

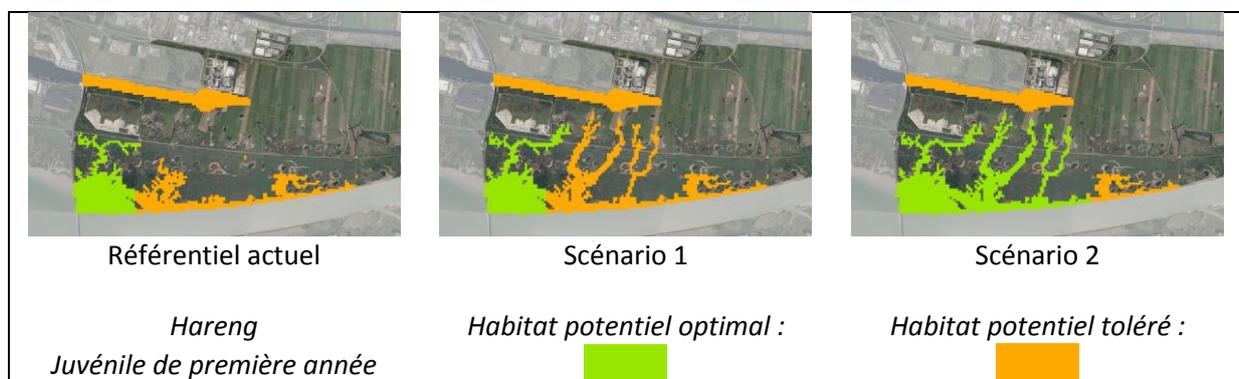


Figure 38: Evolution des habitats potentiels du hareng G0 selon les 2 scénarios

Des propositions de **cartes de synthèse** ont été discutées avec le groupe de travail. Deux types de cartes ont été produits.

La première proposition concerne des cartes d'évolution d'habitat potentiel par espèce/stade et par scénario : elles indiquent l'apparition, la disparition ou la stabilité de l'habitat. La représentation est simplifiée à l'échelle d'un carroyage de 50m/50m, mais les calculs de surface d'évolution sont réalisés à partir des données réelles de surface stockées dans la base de données.

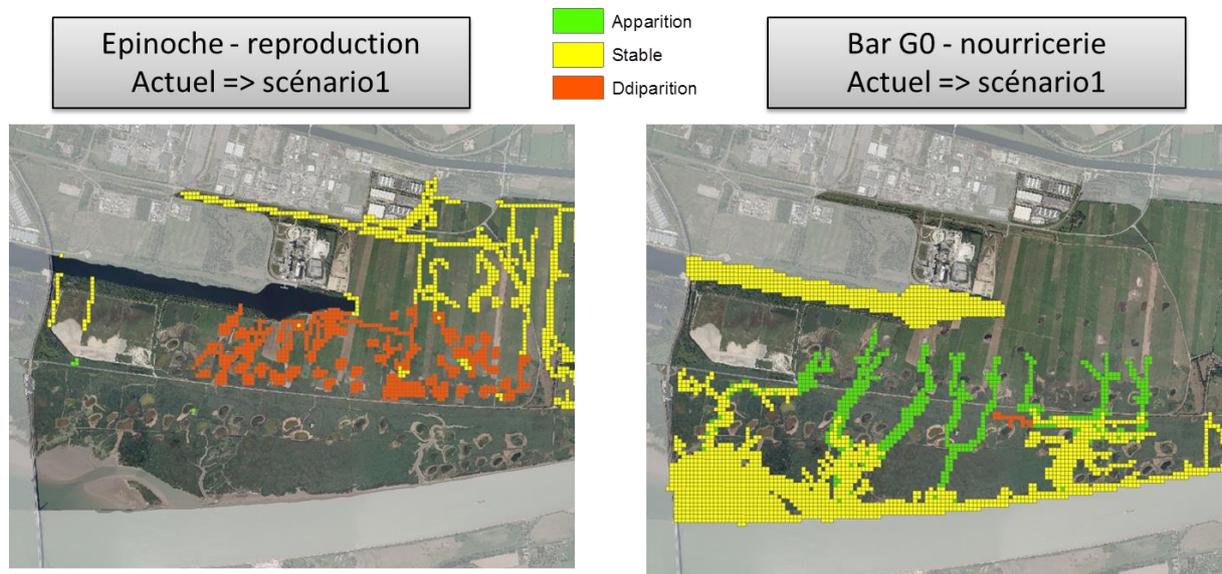


Figure 39 : exemples de carte d'évolution

La seconde carte de synthèse reprend la notion **d'indice « habitat fonctionnel »** présenté au paragraphe 4.3. et la fonction de nurricerie de poissons d'origine marine. Les cartes d'évolution de l'indice sont présentées selon trois cas :

- Différence entre le scénario 1 et l'actuel
- Différence entre le scénario 2 et l'actuel
- Différence entre le scénario 2 et le scénario 1

Dans ces trois configurations l'indice « habitat fonctionnel MMD » est stable ou augmente.

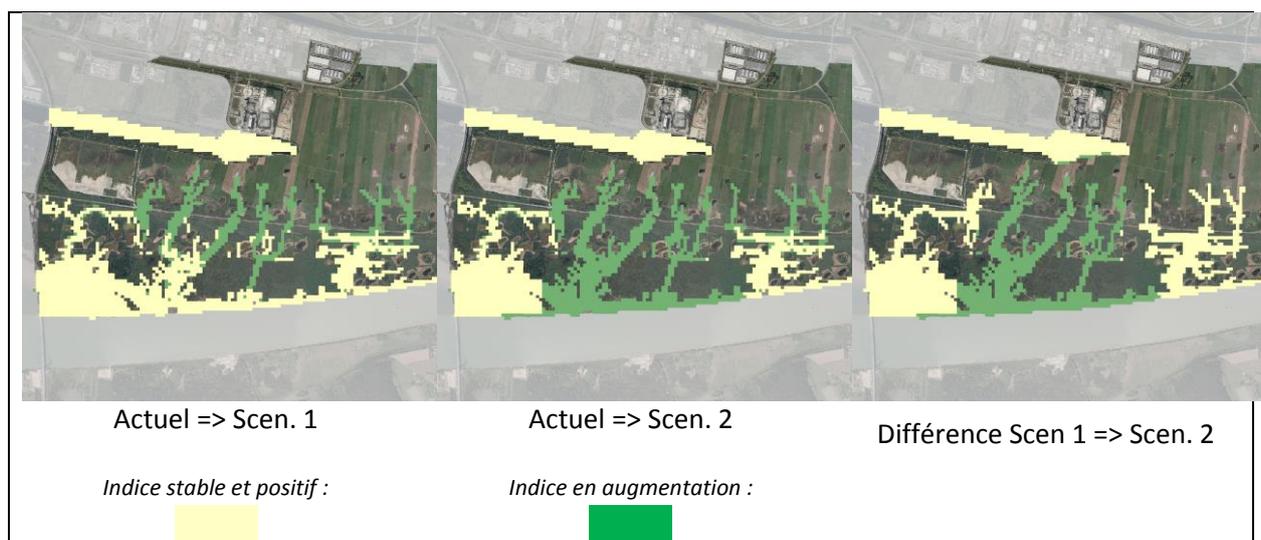


Figure 40 : cartographie de l'évolution de l'indice MMD selon les différents scénarios et entre scénarios

Il ressort de cette analyse synthétique une évolution positive de la nurserie des poissons de la guild MMD avec l'accroissement des filandres et d'autant plus dans le scénario 2 avec l'accroissement de la salinité.

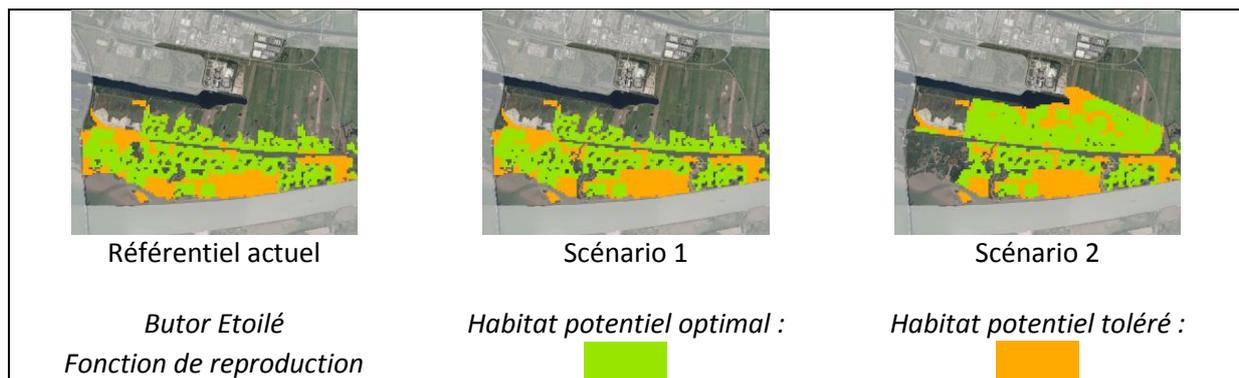
Cette évolution synthétique a été jugée essentielle et intéressante dans ce type d'analyse et de débat.

Il est utile de rappeler ici qu'à chaque résultat cartographique, il peut être intéressant d'associer les valeurs correspondantes en surface ou linéaire d'habitat, l'outil SIG produisant un tableau « espèce-fonction-scénario-surface-linéaire ».

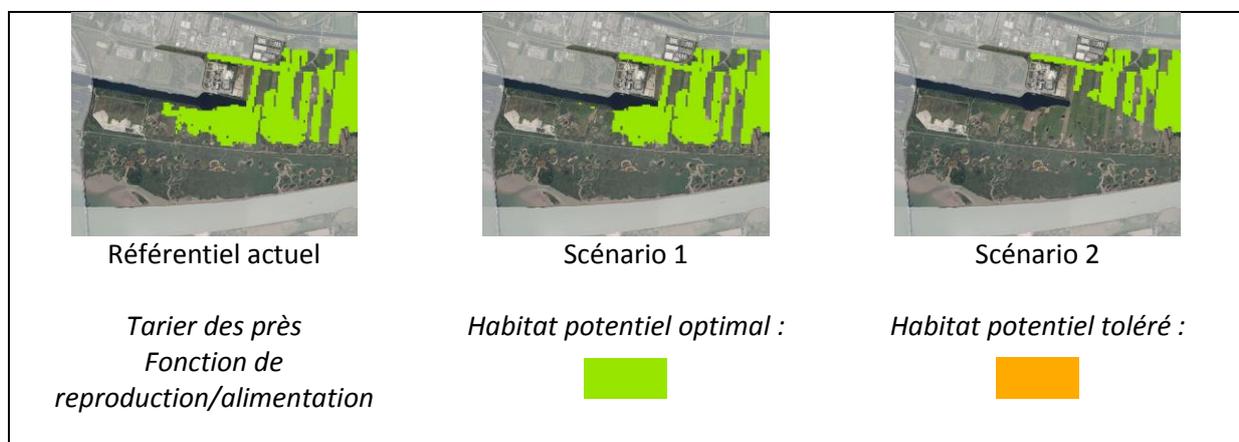
6.4.2. Les oiseaux

Concernant l'avifaune, les résultats analysés concernaient :

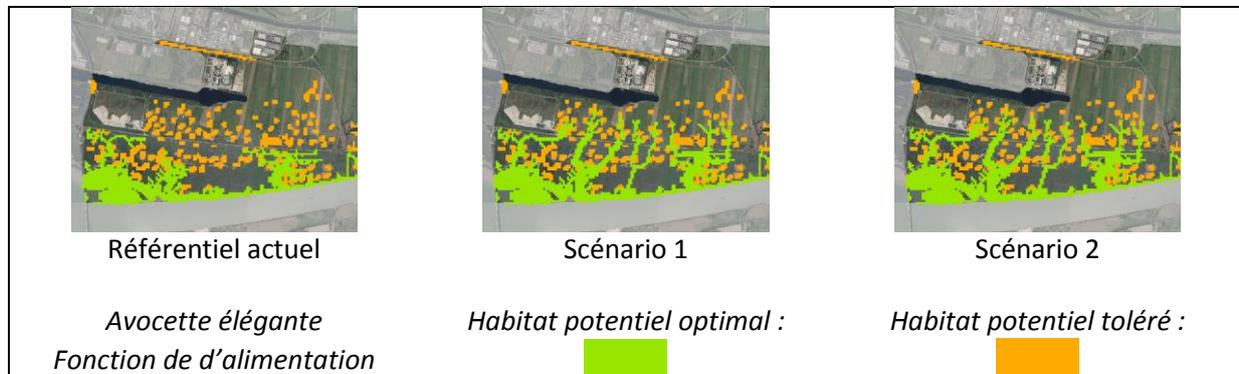
- L'habitat potentiel de reproduction du Butor Etoilé, qui évolue peu pour le scénario 1, mais qui augmente fortement pour le scénario 2 en lien avec le développement de la roselière (lui-même lié à la suppression des usages agricoles)



- L'habitat potentiel de reproduction/alimentation du Tarier des prés qui diminue dans les deux cas en lien avec l'usage de fauche qui disparaît pour le scénario 1 et la disparition de la prairie pour le scénario 2



- Les habitats d'alimentation d'une part et de repos d'autre part pour l'avocette élégante évoluent d'une manière générale positivement, par un accroissement de la complémentarité des habitats : l'augmentation des surfaces d'alimentation au nord de la route et le maintien des plans d'eau pour l'activité cynégétique. L'activité cynégétique apparaîtrait comme un facteur limitant.



Il n'y pas eu pour l'instant de travail sur des indices de synthèse pour les oiseaux.

6.5. Bilan de l'exercice à l'échelle locale

L'analyse d'un projet d'aménagement visant la restauration de certaines fonctions environnementales a été un exercice intéressant permettant un changement d'échelle d'analyse et une mobilisation de l'outil dans un contexte opérationnel. Il a permis de rendre compte de certaines limites par rapport à la démarche SIG Habitats Fonctionnels :

- Le travail conséquent à mener pour avoir une précision suffisante sur les facteurs structurants à cette échelle d'analyse. L'information n'existe pas forcément et doit donc être acquise. Lorsqu'elle existe elle peut nécessiter un travail d'analyse et de structuration complémentaire à ce qui est déjà fait à l'échelle de l'estuaire.
- Les modèles d'habitat potentiel développés à l'échelle de l'estuaire peuvent manquer de robustesse pour une application locale. Les principaux facteurs structurants pourraient être mobilisés différemment et compléter par d'autres facteurs mobilisables à cette échelle.

Toutefois, il a été mis en évidence l'intérêt de l'approche cartographique par fonction comme support des débats en illustrant :

- Le gain ou la perte de certains habitats fonctionnels, perçu de manière positive ou négative selon les acteurs.
- L'importance des usages dans le maintien ou la restauration de fonctions écologiques.
- La sensibilité des évolutions possibles des milieux à l'évolution globale du système, comme par exemple la remontée du gradient de salinité.

Le calcul de surface d'habitats fonctionnels apporte également une plus-value intéressante.

Dans un second temps, il apparaît également intéressant de repositionner le projet local dans la trajectoire d'évolution des différentes fonctions à l'échelle globale de l'estuaire ou de grandes entités fonctionnelles. Sur l'exemple de la fonction de nurricerie de poissons d'origine marine, la réflexion « Décompartimentation » se situe dans le secteur où l'évolution passée montre une forte réduction des habitats supportant cette fonction. Ce projet trouverait donc toute sa justification pour inverser cette tendance à la réduction des habitats potentiels de nurricerie. Si l'on s'intéresse à la trajectoire future, les potentialités se déplacent vers l'amont (ici uniquement au travers de la salinité). Il apparaît alors opportun d'analyser les opportunités d'aménagement/restauration plus en amont de l'estuaire afin d'apporter une cohérence d'ensemble dans l'analyse des potentialités de restauration.

7. Bilan et perspective

Les travaux menés dans le cadre du projet MESSCENE ont été le support pour le GIP Seine-Aval d'une valorisation de la démarche de cartographie initiée en 2009. Cette démarche apparaît aujourd'hui importante pour l'intégration et la valorisation d'une partie des données environnementales concernant la thématique des habitats écologiques de l'estuaire de la Seine. Elle apporte également un regard novateur car intégré, tout en tentant une approche fonctionnelle dans l'étude des habitats écologiques encore balbutiante dans les travaux scientifiques actuels.

A l'échelle de l'estuaire (échelle de travail de l'outil), cette approche intégrée apporte des éléments synthétiques (indices), pédagogiques (cartes) et quantifiés (surfaces) utiles à l'analyse des trajectoires d'évolution de l'estuaire.

Cette dernière est utilisée notamment dans la compréhension du fonctionnement de l'estuaire pour laquelle le développement d'une approche comparative utilisant les notions d'habitats potentiels et d'habitat réalisé (à partir des données d'observations d'espèces) apparaît comme une base de travail intéressante pour l'analyse des facteurs influençant (limitant) l'expression d'une fonction écologique. Ce travail nécessitera le développement d'une approche permettant la spatialisation de l'habitat réalisé. Cet exercice est rendu délicat de par la très forte variabilité des abondances dans les peuplements biologiques notamment sous l'effet de facteurs externes au système étudié (recrutement...).

Au regard des réflexions en cours visant la définition d'objectifs prioritaires en matière de restauration écologique de l'estuaire de la Seine (GIPSA, 2013) la spatialisation des valeurs et des gradients de valeurs des principaux facteurs structurants (ex. gradient de salinité, de bathymétrie...) tout au long de l'estuaire, et ce pour différents référentiels temporels, sont utiles dans la **description du fonctionnement** actuel de l'estuaire et ses projections à venir. L'analyse croisée de ces facteurs et de leur évolution au regard de certaines fonctions écologiques sera un support pour **argumenter les propositions d'objectifs prioritaires**. Le simple outil SIG Habitats Fonctionnels ne suffit évidemment pas dans ce type de projet. **Le dire d'expert est également essentiel pour discuter des résultats de l'outil mais également pour les compléter** en incluant dans le raisonnement les nombreux facteurs influents, naturels ou anthropiques, structurels ou conjoncturels qui, dans la mesure du possible, doivent également être pris en considération. Des « idées reçues » véhiculées par le dire d'experts, peuvent également être remises en question par cet outil et ouvrir éventuellement sur de nouveaux questionnements.

Au regard de la grande variabilité des conditions environnementales rencontrées dans les milieux estuariens, la modélisation de l'ensemble des habitats s'avère complexe. Si les démarches de modélisation statistique d'habitats potentiels se développent couramment maintenant, elles apparaissent pertinentes dans des environnements homogènes du point de vue des conditions environnementales et donc difficilement applicables dans un contexte tel que celui de l'estuaire de la Seine dans son ensemble. Le mode opératoire de construction des cartes d'habitats potentiels retenu ici apporte une souplesse qui autorise la prise en compte d'expertises complémentaires aux modèles et données bibliographiques facilitant la construction d'une vision d'ensemble cohérente. Elle ne

permet pas par contre de quantification sous forme d'abondance ou de biomasse, ce qui s'avère très limitant dans une approche fonctionnelle.

Seuls les principaux facteurs structurants les habitats sont à l'heure actuelle mobilisés de manière opérationnelle dans la démarche de cartographie. La variabilité saisonnière de certains facteurs (salinité par exemple) pourrait être facilement intégrée grâce à la modélisation. D'autres facteurs comme la turbidité et l'hydrodynamisme ont fait l'objet d'une ébauche d'intégration, ébauche rapidement limitée par le manque de bibliographie relative aux exigences écologiques des espèces sur ces facteurs. Concernant les milieux terrestres, certains facteurs essentiels à la cartographie d'habitats d'oiseaux (inondabilité des terrains, ouverture/fermeture des milieux) sont déjà listés comme manquant pour affiner les modèles d'habitats.

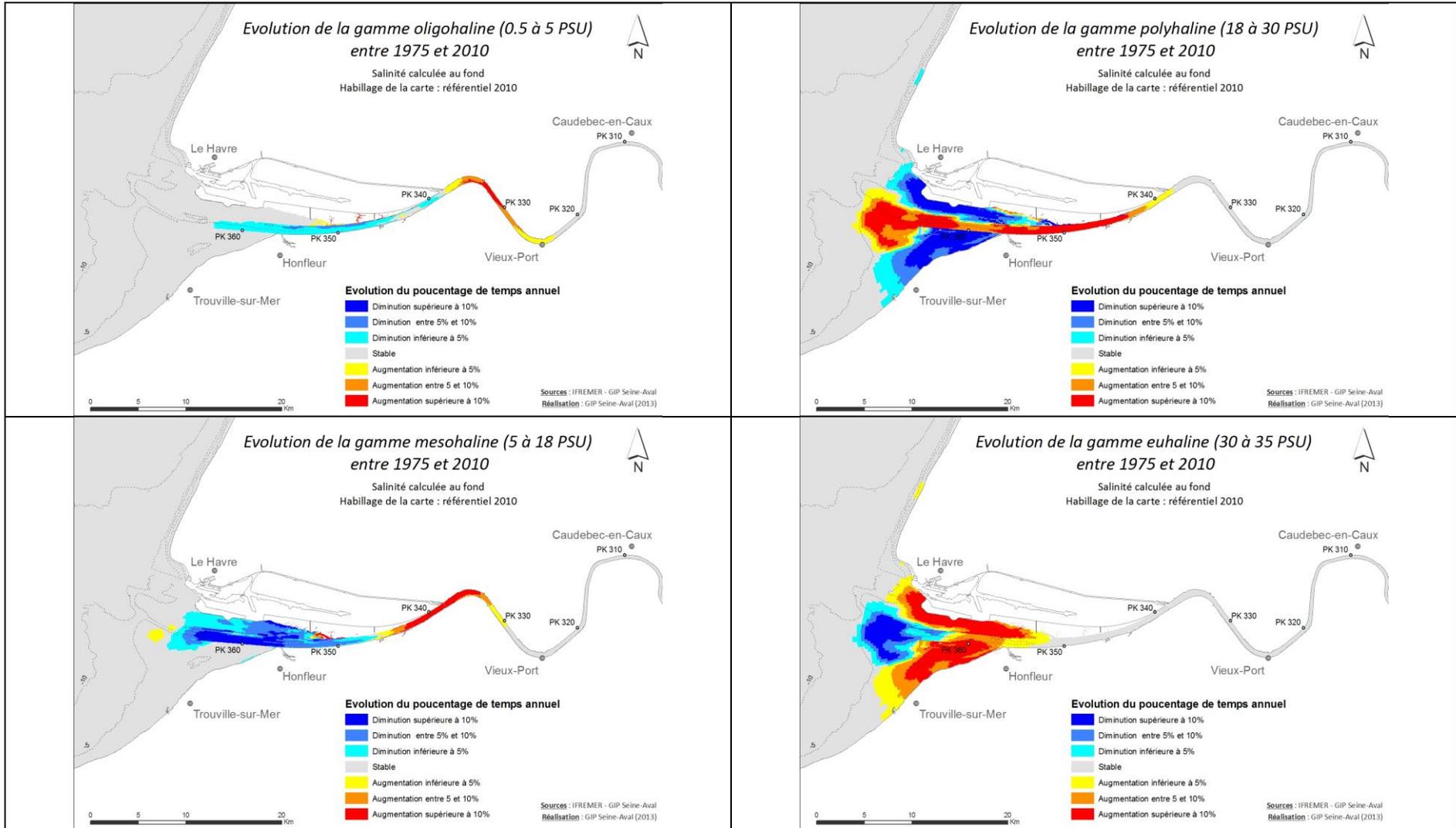
Concernant les modèles d'habitats potentiels d'invertébrés aquatiques, ils pourraient mobiliser comme facteur structurant les sorties de modèles de production primaire développés sur l'estuaire afin de mieux rendre compte des potentialités du milieu et peut-être envisager une approche plus évoluée que la simple présence/absence.

L'approche fonctionnelle devrait être mieux développée en valorisant les travaux de modélisation d'habitat potentiel des invertébrés dans une approche réseau trophique. Cette étape nécessite d'appréhender les comportements alimentaires des poissons et oiseaux et la spatialisation des abondances et biomasses de proie pour être intégrées comme facteur structurant les habitats d'alimentation. Pour les oiseaux, cette approche ne pourrait être envisagée dans notre contexte uniquement sur la base des invertébrés aquatiques.

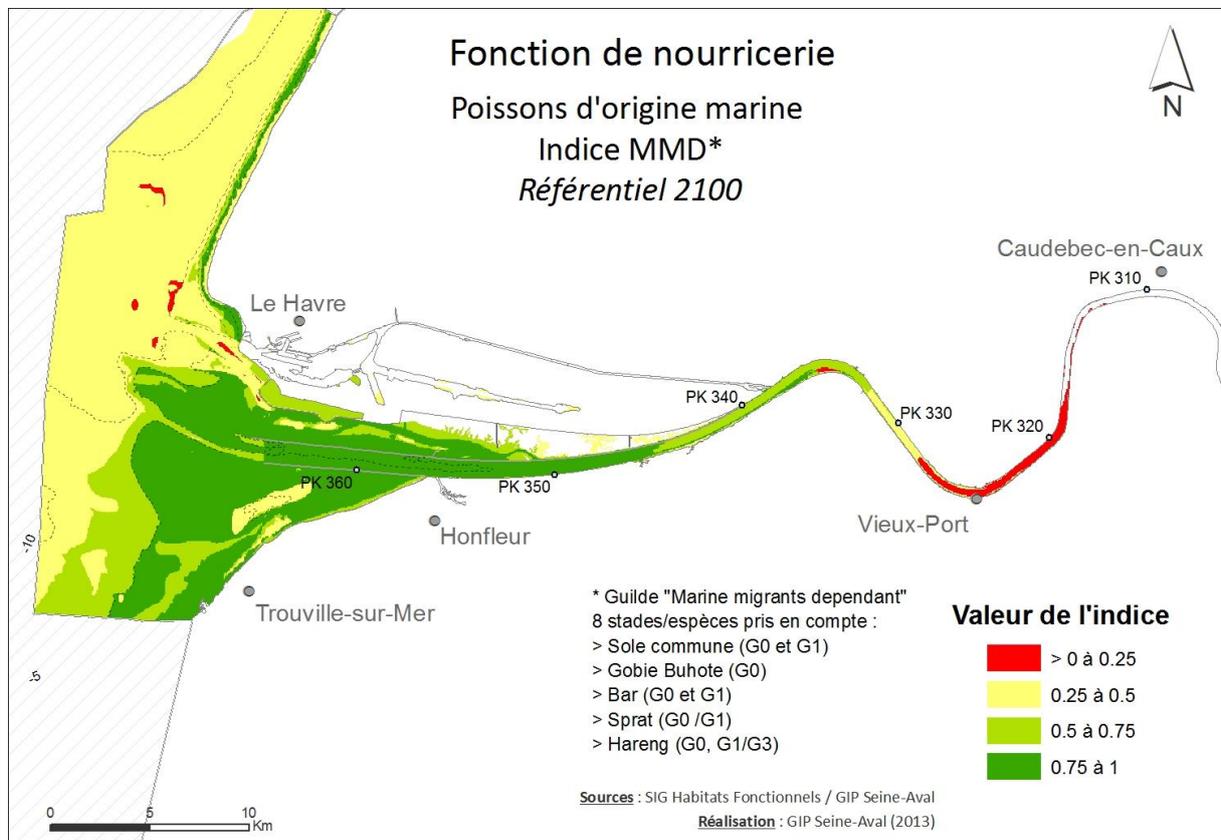
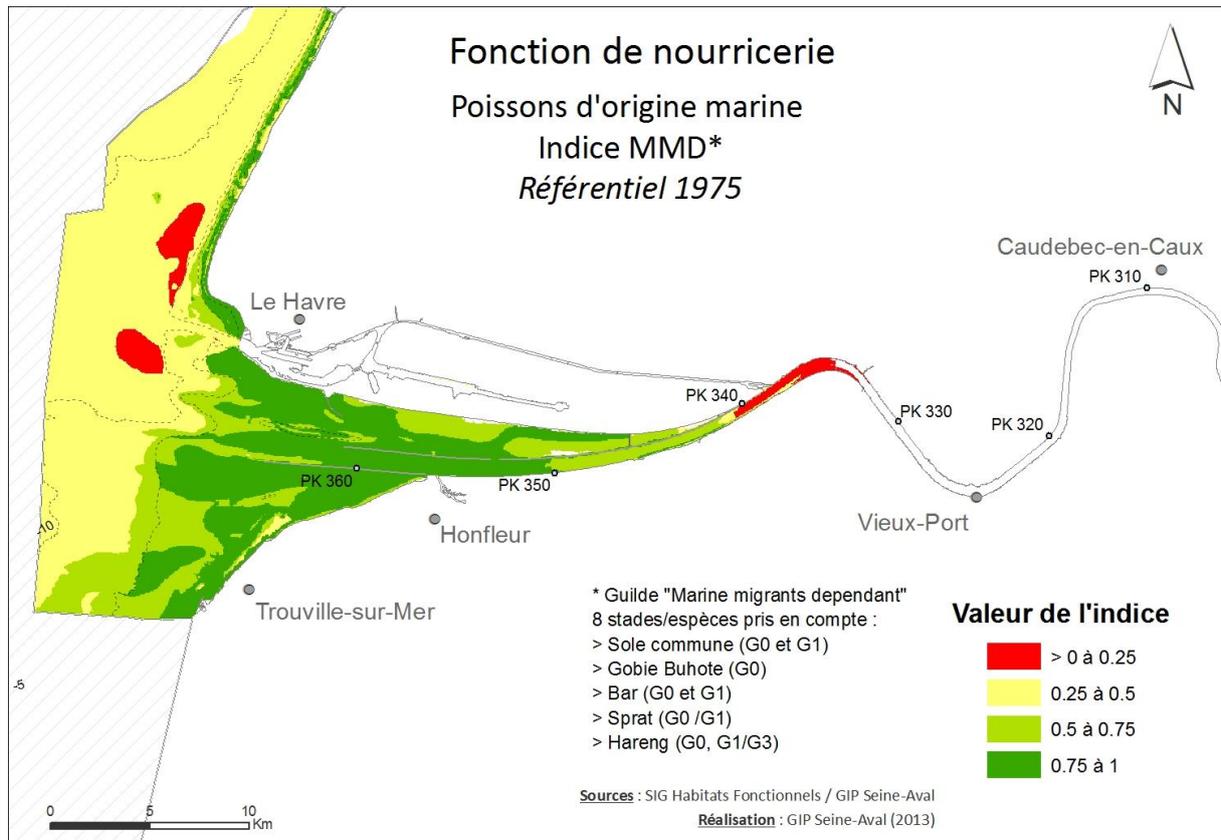
A plus ou moins long terme, dans cette continuité, d'autres fonctions écologiques, pas uniquement biologiques pourraient être intégrées à l'outil de façon sommaire (épuration de l'azote, amortissement de l'énergie hydraulique,...)

Des fonctions aux services écologiques, il semble n'y avoir qu'un pas. Cependant pour convaincre qu'un service soit réellement utile, bénéfique (ou au contraire qu'un préjudice soit vraiment nuisible) à la société, sa quantification semble inévitable. Aussi, le lien fonctions/services pourrait-il être envisagé mais sans doute plus dans une approche plus théorique que pragmatique. Tout en progressant dans la cartographie des habitats, des réflexions méthodologiques pourraient être engagées dans ce sens.

Annexe 1 : Evolution entre 1975 et 2010 du pourcentage de temps des grandes gammes de salinité



Annexe 2 : Indice nourricerie MMD 1975 et 2100



Annexe 3 : Experts scientifiques et techniques mobilisés dans la cadre du projet

Hypothèses modélisation habitats invertébrés	Thierry Ruellet (GEMEL) Jean-Claude Dauvin (M2C, Université de Caen) Christophe Bessineton (Expert indépendant) Sami Souissi (LOG, Université de Lille 1) Gwenola De Roton (CSLN)
Hypothèses modélisation habitats poissons	Sylvain Duhamel (CSLN) Gwenola De Roton (CSLN) Eric Feunteun (MNHN -CRESCO) Thomas Lacoue-Labarthe (MNHN -CRESCO) Jocelyne Morin (IFREMER)
Hypothèses modélisation habitats oiseaux	Christophe Aulert (AMP) Pascal Provost (Observatoire Avifaune de l'estuaire de la Seine) Elodie Rémond (Observatoire Avifaune de l'estuaire de la Seine) Géraud Ranvier (PNRBSN) Franck Morel (GON) Frédéric Malvaud (LPO)
Constitution des référentiels de facteurs structurants	Sandric Lesourd (Université de Caen) Thomas Lecarpentier (Maison de l'Estuaire) Guillaume Fauveau (Maison de l'Estuaire) Christelle Dutilleul (Maison de l'Estuaire) Franck Boittin (PNRBSN) Hervé Rémy (PNRBSN)

Liste des Figures

Figure 1 : Partenaires techniques et scientifiques du projet MESSCENE	6
Figure 2 : Délimitations de l'estuaire de la Seine.	8
Figure 3 : Illustration de la démarche	11
Figure 4 : Hypothèses pour renseigner les valeurs des facteurs structurants dans le carroyage	15
Figure 5 : Principe retenu pour codifier les plages de tolérance et de préférence à chacun des paramètres environnementaux	15
Figure 6 : Illustration de la cartographie de l'habitat potentiel d'une espèce au regard de la codification des préférences écologiques pour chaque facteur structurant et superposition aux données d'observation.	16
Figure 7 : Courbes de marée à Honfleur en fonction du coefficient et pour un débit de 400 m ³ .s ⁻¹ . Cotes retenues pour la délimitation de la zone intertidale.	19
Figure 8: carte des sources de données bathymétriques pour le référentiel 1975	20
Figure 9 : Cartes bathy-topographiques	22
Figure 10 - seuils granulométriques selon la typologie Larsonneur simplifiée (Dauvin, 2012)	23
Figure 11 – Illustration des cartes de répartition des sédiments superficiels de 1977-78 (Avoine, 1981)	23
Figure 12 : Cartes de répartition des sédiments superficiels	25
Figure 13 : Illustrations des ortho-photos 1973 et 2009 (zoom sur le secteur du Pont de Normandie)	27
Figure 14 : Cartes des milieux écologiques (zoom sur le secteur du Pont de Normandie en rive Nord)	28
Figure 15 : Pourcentage de temps mensuel par unité de salinité en une maille du modèle MARS 3D	30
Figure 16 : Pourcentage de temps sur un an pour la gamme polyhaline – référentiel 2010	31
Figure 17 : Cartographie des salinités moyennes de fond calculées pour le référentiel habitat 2010.	32
Figure 18 : Cartographie des salinités moyennes de fond calculées pour le référentiel habitat 1975.	33
Figure 19 : projection du débit au Barrage de Poses à l'horizon 2100 (adapté de Ducharne A. & al, 2009)	34
Figure 20 : Cartographie des salinités moyennes de fond calculées pour le référentiel habitat 2100.	34
Figure 21 : Cartographie de l'indice « Habitat potentiel » pour les juvéniles de bar commun.	37
Figure 22 : Cartographie de l'indice « Habitat potentiel » pour les juvéniles de hareng.	38
Figure 23 : Cartographie de l'indice « Habitat potentiel » pour les juvéniles de sole commune.	39
Figure 24 : Cartographie de l'indice « Habitat potentiel » pour les juvéniles de sprat.	40
Figure 25 : Cartographie de l'indice « Habitat potentiel » pour les juvéniles de gobie buhotte.	40
Figure 26 : Cartographie de l'indice « Habitats Fonctionnels » Nourricerie de poissons d'origine marine	42
Figure 27 : Cartographie de l'indice « Habitats Fonctionnels » Nourricerie de poissons d'origine marine au stage G0.	42
Figure 28 : Cartographie de l'évolution de l'indice « Habitats Fonctionnels » Nourricerie de poissons d'origine marine entre 1975 et 2010	43
Figure 29 : évolution des surfaces de zones intertidales par gamme de salinité entre 1975 et 2010	44
Figure 30 : Carte du différentiel bathymétrique entre 2010 et 1975	44
Figure 31 : Carte du différentiel des salinités moyennes de fond entre 2010 et 1975	45
Figure 32 : Cartographie de l'évolution de l'indice « Habitats Fonctionnels » Nourricerie de poissons d'origine marine entre 2010 et 2100	46
Figure 33 : Carte du différentiel des salinités moyennes de fond entre 2100 et 2010	46
Figure 34 : Localisation du site d'étude.	48
Figure 35 : Illustration des résultats potentiels du programme d'aménagement en termes de zones inondées selon différents niveaux d'eau (approche statique) (source Artelia 2012).	49
Figure 36 : Cartographie du référentiel actuel de facteurs structurants : salinité et milieux	51
Figure 37 : Cartographie des référentiels de facteurs structurants pour les deux scénarios d'évolution des milieux.	53
Figure 38: Evolution des habitats potentiels du hareng G0 selon les 2 scénarios	54

Figure 39 : exemples de carte d'évolution _____ 55
Figure 40 : cartographie de l'évolution de l'indice MMD selon les différents scénarios et entre scénarios _____ 55

Bibliographie

ARTELIA, 2011, **Etude relative à la décompartmentation de la plaine alluviale. Entretien et collecte de données.** 202 p

ARTELIA, 2012, **Etude relative à la décompartmentation de la plaine alluviale. Définition du programme de mesures retenues et du mode opératoire, Estimation financière.** 58 p.

AVOINE J., 1981. **L'estuaire de la seine : Sédiments et dynamique sédimentaire.** Thèse 3e cycle, Université de Caen, 236p

Bacq N., Guillaume D., 2011. **SIG Habitats Fonctionnels de l'estuaire de la Seine : objectifs, hypothèses et premiers résultats.** Rapport du projet BEEST. 75p.

Bacq N., Guillaume D., Duhamel S., De Roton G., 2012. **SIG Habitats Fonctionnels de l'estuaire de la Seine-Volet Poisson. Etat d'avancement : objectifs, hypothèses et premiers résultats.** Rapport du projet BEEST. 75p.

Bacq N., Guillaume D., Duhamel S., De Roton G., 2012. **SIG Habitats Fonctionnels de l'estuaire de la Seine-Volet Poisson. Etat d'avancement de la démarche.** Rapport méthodologique du GIP Seine-Aval. 60p.

Bacq N., Guillaume D., Duhamel, 2012. **SIG Habitats Fonctionnels de l'estuaire de la Seine-Volet invertébrés aquatiques. Etat d'avancement de la démarche.** Rapport méthodologique du GIP Seine-Aval. 74p.

Beaugrand, G., 2009. **Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas.** Deep-Sea Res II 56: 656-673.

Bergman, M.N.J., Van der Veer, H.W., Zijlstra, J.J., 1988. **Plaice nurseries : effects on recruitment.** Journal of Fish Biology, 33 : 201-218.

Cardona, L., 2006. **Habitat selection by grey mullets (Osteichthyes: Mugilidae) in Mediterranean estuaries: the role of salinity.** Sci Mar 70, 443-455.

CGEDD, 2010. **Projet de caractérisation des fonctions écologiques en France.** Etudes et documents, n°20.

Costa, M.J., Bruxelles, A., 1989. **The structure of fish communities in the Tagus estuary, Portugal, and its role as a nursery for commercial fish species.** Sci Mar 53, 561-566.

Costanza, R., D'arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. & Van Den Belt, M., 1997. **The value of the world's ecosystem services and natural capital.** Nature 387: 253-260.

Dauvin, J.-C., 2007. **Paradox of estuarine quality: Benthic indicators and indices, consensus or debate for the future.** Marine Pollution Bulletin 55: 271-281.

Dauvin J.C., Brind-Amour A., Cuvilliez A., Dancie C., Desroy N., Le Hir P., Lesourd S., Mear Y., Morin J., 2012. **Projet COLMATAGE : Couplages bio-morpho-sédimentaires et dynamique à long terme des habitats et peuplements benthiques et ichtyologiques en Seine aval.** Projet Seine-Aval4, 209p

Décamps, H. (Ed.), 2010. **Evènements climatiques extrêmes. Réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux.** EDP Sciences, 194 pp.

De Jonge, V.N., Elliott, M. & Brauer, V.S., 2006. **Marine monitoring: Its shortcomings and mismatch with the EU water framework directive's objectives.** Marine Pollution Bulletin 53: 5-19.

- Ducharne, A. & al., 2009. **Rapport final du Projet REXHySS : Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme.** . Sysyphe, Université Jussieu, pp. 62p.
- Elliott, M., Dewailly, F., 1995. **The structure and components of european estuarine fish assemblages.** **Netherlands Journal of Aquatic Ecology** 29, 397-417.
- Elliott, M., O'Reilly, M.G., Taylor, C.J.L., 1990. **The Forth estuary: a nursery and overwintering area for North Sea fishes.** *Hydrobiologia* 195, 89-103.
- Elliott, M., Whitfield, A.K., Potter, I.C., Blaber, S.J.M., Cyrus, D.P., Nordlie, F.G., Harrison, T.D., 2007. **The guild approach to categorizing estuarine fish assemblages : a global review.** *Fish and Fisheries* 8 : 241 – 268.
- Elliott, M. & Quintino, V., 2007. **The Estuarine Quality Paradox, Environmental Homeostasis and the difficulty of detecting anthropogenic stress in naturally stressed areas.** *Marine Pollution Bulletin* 54: 640-645.
- Eu, 2000. Parliament and Council Directive 2000/60/EC of 23rd October 2000. **Establishing a Framework for Community Action in the field of Water Policy.** Official Journal PE-CONS 3639/1/00 REV 1, Brussels.
- Eu, 2005. **Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council, establishing a Framework for Community Action in the field of Marine Environmental Policy.** COM (2005), 505 final, SEC (2005), 1290, Brussels, 31 pp.
- Folke, C., Hahn, T., Olsson, P. & Norberg, J., 2005. **Adaptive governance of social-ecological systems, Annual Review of Environment and Resources.** *Annual Reviews, Palo Alto*, pp. 441-473.
- Fox, D., 2007. **Back to the no-analog future.** *Science* 319: 823-825.
- Guézennec L., Romaña L.A., Goujon R., Meyer R., 1999. **Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes.** Fascicule Seine-Aval n°1, 29 p. Editions Ifremer, Plouzané (France). ISBN 2 84433 026-6
- GIPSA, 2013. **Vers des priorités en matière de préservation et de restauration des fonctions écologiques de l'estuaire de la Seine.** Préambule. Coordination Moussard. S. & Bessineton C.
- Hénocque, Y. & Denis, J. (Eds), 2001. **A Methodological Guide: Steps and Tools Towards Integrated Coastal Area Management.** *Manuals and guides*, 42. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Paris, 65 pp.
- Hering, D., Borja, A., Carstensen, J., Carvalho, L., Elliott, M., Feld, C.K., Heiskanen, A.S., Johnson, R.K., Moe, J., Pont, D., Solheim, A.L. & Van De Bund, W., 2010. **The European Water Framework Directive at the age of 10: A critical review of the achievements with recommendations for the future.** *Science of the Total Environment* 408: 4007-4019.
- Hermant, M., Lobry, J., Bonhommeau, S., Poulard, J.C. & Le Pape, O., 2010. **Impact of warming on abundance and occurrence of flatfish populations in the Bay of Biscay (France).** *Journal of Sea Research* 64: 45-53.
- Hillebrand, H. & Matthiessen, B., 2009. Biodiversity in a complex world: consolidation and progress in functional biodiversity research. *Ecology Letters* 12: 1405-1419.
- Hoegh-Guldberg, O. & Bruno, J.F., 2010. **The impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems.** *Science* 328: 1523-1528.
- Hutchinson G, 1957. **Concluding remarks.** *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22:415-427

- ICES, 2008. Report of the ICES/GLOBEC **Working Group on Life Cycle and Ecology of Small Pelagic Fish** (WGLESP).
- Keddy PA, 1992. **Assembly and response rules: two goals for predictive community ecology**. Journal of Vegetation Science 3:157-164
- Le Hir P., Ficht A., Silva Jacinto R., Lesueur P., Dupont J.P., Lafite R., Brenon I., Thouvenin B., Cugier Ph., 2001. **Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine estuary (France)**. Estuaries, Vol. 24, No 6B pp. 950-963
- Le Hir P., Lafite R., 2012, **Projet MODEL : Modélisation validée de l'hydro-morpho-sédimentologie base physique d'une modélisation environnementale de l'estuaire de la Seine**. Projet Seine-Aval4, 130 p.
- Lévêque C. Van der Leeuw S., 2003. **Quelles natures voulons-nous ? - Pour une approche socio-écologique du champ de l'environnement**. Elsevier, 324 p.
- Loreau, M., Naeem, S., Inchausti, P., Bengtsson, J., Grime, J.P., Hector, A., Hooper, D.U., Huston, M.A., Raffaelli, D., Schmid, B., Tilman, D. & Wardle, D.A., 2001. **Ecology - Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges**. Science 294: 804-808.
- Loreau, M., De Mazancourt, C. & Holt, R.D., 2004. **Ecosystem Evolution and Conservation**. In: Ferrière, R., Dieckmann, U. & D., C. (Eds), Evolutionary Conservation Biology. Cambridge University Press, International Institute for Applied Systems Analysis, London, pp. 327-343.
- Maes, J., Van Damme, S., Meire, P., Ollevier, F., 2004. **Statistical modeling of seasonal and environmental influences on the population dynamics of an estuarine fish community**. Mar Biol 145, 1033-1042.
- Maes, J., Limburg, K.E., Van de Putte, A., Ollevier, F., 2005. **A spatially explicit, individual-based model to assess the role of estuarine nurseries in the early life history of North Sea herring, Clupea harengus**. Fish Oceanogr 14, 17-31.
- Martinho, F., Leitão, R., Viegas, I., Dolbeth, M., Neto, J.M., Cabral, H.N., Pardal, M.A., 2007. **The influence of an extreme drought event in the fish community of a southern Europe temperate estuary**. Estuar Coast Shelf Sci 75, 537-546.
- Meire et al, 2007. **Managing a heavily impacted estuary: the crucial role of the restoration of ecosystem functions**. Séminaire Restauration Seine-Aval.
- Nicolas D (2010) **Des poissons sous influence ? Une analyse à large échelle des relations entre les gradients abiotiques et l'ichtyofaune des estuaires tidaux européens**. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I
- Nicolas, D., Chaalali, A., Drouineau, H., Lobry, J., Uriarte, A., Borja, Á. & Boët, P., 2011. **Impact of global warming on European tidal estuaries: some evidence of northward migration of estuarine species**. Regional Environmental Change 11: 639-649.
- Perry, A.L., Low, P.J., Ellis, J.R. & Reynolds, J.D., 2005. **Climate change and distribution shifts in marine species**. Science 308: 1912-1915.
- Pihl L., Modin, J., Wennhage, H., 2000. **Spatial distribution of newly settled plaice (Pleuronectes platessa L.) along the Swedish Skagerrak archipelago**. Journal of Sea Research, 44 : 65-80.
- Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande (PNRBSN) & GIP Seine-Aval, 2012. **Mise en œuvre d'une base de données sur l'évolution de l'occupation du sol**.
- Pierron, F., Baudrimont, M., Dufour, S., Elie, P., Bossy, A., Baloche, S., Mesmer-Dudons, N., Gonzalez, P., Bourdineaud, J.P. & Massabuau, J.C., 2008. **How cadmium could compromise the completion of the European eel's reproductive migration**. Environmental Science and Technology 42: 4607-4612.

- Ramade F (1984) **Eléments d'écologie: écologie fondamentale**. Mc Graw Hill, Paris
- Ramade F (2008) **Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité**. Dunod, Paris
- Ruellet T., 2010. **SIG « habitats fonctionnels de l'estuaire de la seine » - Expertise sur les invertébrés aquatiques**. GEMEL, Rapport d'expertise pour le GIP Seine-Aval, 167p.
- Sala, E. & Knowlton, N., 2006. Global marine biodiversity trends, Annual Review of Environment and Resources. Annual Reviews, Palo Alto, pp. 93-122.
- Thiel, R., Cabral, H., Costa, M.J., 2003. **Composition, temporal changes and ecological guild classification of the ichthyofaunas of large European estuaries - A comparison between the Tagus (Portugal) and the Elbe (Germany)**. J Appl Ichthyol 19, 330-342.
- Tonn et al. 1990, Tonn WM, Magnuson JJ, Rask M, Toivonen J (1990) **Intercontinental comparison of small-lake fish assemblages: The balance between local and regional processes**. Am Nat 136:345-375
- Turner, B.L., Kasperson, R.E., Matson, P.A., Mccarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A. & Martello, M.L., 2003. **A framework for vulnerability analysis in sustainability science**. Proceedings of the National Academy of Sciences 100: 8074-8079.
- Vitousek, P.M., 1997. **Human domination of Earth's ecosystems (vol 277, pg 494, 1997)**. Science 278: 21-21.
- Whitfield, A.K., Elliott, M., 2002. **Fishes as indicators of environmental and ecological changes within estuaries : a review of progress and some suggestions for the future**. Journal of Fish Biology 61: 229-250.
- Williams, J.W. & Jackson, S.T., 2007. **Novel climates, no-analog communities and ecological surprises**. Frontiers in Ecology and the Environment 5: 475-482.