

Quelle restauration pour l'estuaire de la Seine ?

Quatre images de l'estuaire de la Seine restauré

Phase 1 du projet PERCEES – implication des scientifiques

Janvier 2015

Projet de recherche financé par la Fondation de France dans le cadre de l'appel à projet « Quels littoraux pour demain ? » et par le GIP Seine Aval

Coordination : Audrey Coreau (AgroParisTech et Centre A. Koyré)

Equipe de recherche :

- Emmanuel Bulot (AgroParisTech)
- Audrey Coreau (AgroParisTech et Centre A. Koyré)
- Stéphanie Moussard (GIP Seine-Aval)
- Jean-Baptiste Narcy (AScA)

Sommaire

1. Les éléments communs aux 4 images	4
1.1. Conditions climatiques et hydromorphologiques	4
1.2. Caractéristiques biogéochimiques de l'eau et des sols	4
1.3. Biodiversité estuarienne	5
2. « Chef d'œuvre d'ingénierie » - une image cubiste	6
2.1. Conditions hydromorphologiques et sédimentaires	6
2.2. Caractéristiques biogéochimiques de l'eau et des sols	7
2.3. Une diversité d'habitats estuariens	7
2.4. Connectivités et espèces	9
Conclusion	9
3. « L'estuaire jardiné » - Une image pointilliste	12
3.1. Conditions hydromorphologiques et sédimentaires	12
3.2. Caractéristiques biogéochimiques de l'eau et des sols	13
3.3. Une diversité d'habitats estuariens	13
3.4. Connectivités et espèces	14
Conclusion	15
4. « L'estuaire arlequin » - Une image impressionniste	17
4.1. Conditions hydromorphologiques et sédimentaires	17
4.2. Caractéristiques biogéochimiques de l'eau et des sols	18
4.3. Une diversité d'habitats estuariens	18
4.4. Connectivités et espèces	20
Conclusion	20
5. « L'estuaire sauvage » - Une image romantique	23
5.1. Conditions hydromorphologiques et sédimentaires	23
5.2. Caractéristiques biogéochimiques de l'eau et des sols	23
5.3. Une diversité d'habitats estuariens	24
5.4. Connectivités, production et espèces	25
Conclusion	26

Introduction

Les quatre images de l'estuaire de la Seine en 2065 qui sont présentées dans ce document ont pour objectif de décrire la structure et le fonctionnement écologiques et hydromorphologiques d'un estuaire restauré dans son ensemble.

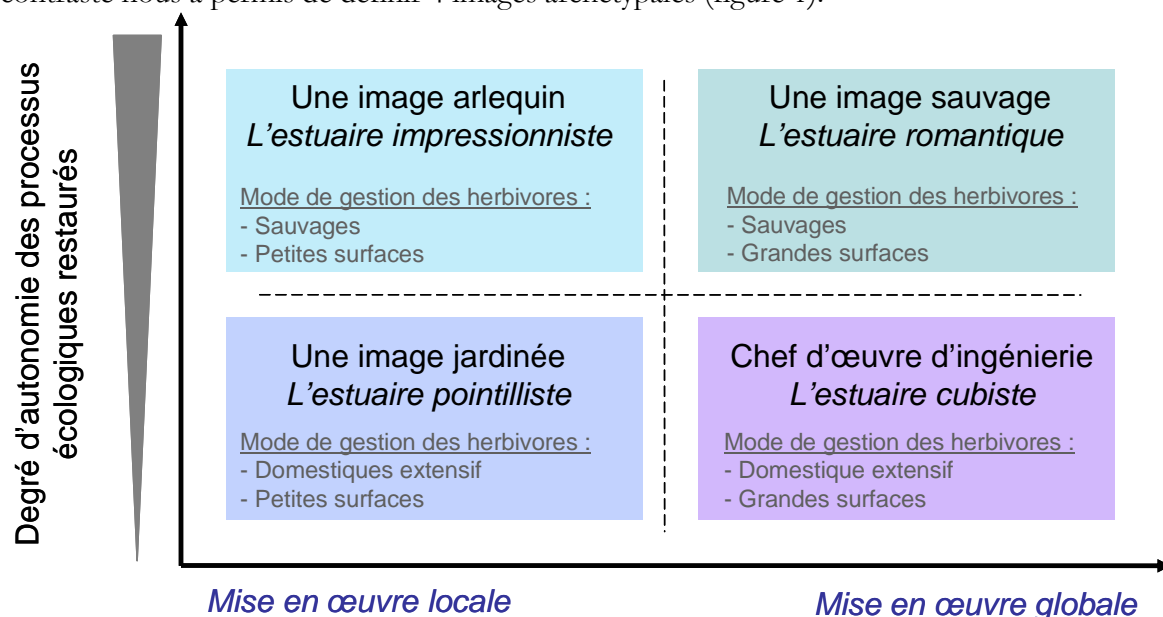
Pour s'assurer que les images ne seront pas prises pour ce qu'elles ne sont pas, et afin de mettre mieux en évidence les questions qu'elles posent, nous avons choisi de construire des images archétypales et fictives. Elles ne visent nullement à décrire ce que l'estuaire pourrait être en 2065, mais plutôt à grossir le trait pour que les messages soient les plus clairs possibles : elles visent à souligner les conditions écologiques d'une restauration cohérente et globale de l'estuaire.

Ces images seront mobilisées à plusieurs moments dans la suite du projet (sous des formes simplifiées) :

- lors d'entretiens avec les acteurs, afin d'interroger leurs projets et leurs attentes,
- lors du lancement de l'exercice de la phase avec les acteurs, pour poser les incontournables et le champ des possibles,
- lors de la construction des scénarios à 15 ans, pour s'assurer que ces derniers sont écologiquement et hydromorphologiquement cohérents.

Elles sont issues d'un travail étroit avec un groupe de scientifiques connaissant bien l'estuaire de la Seine et sa restauration. Après une série d'entretiens individuels avec eux afin de discuter des attentes de chacun en matière de restauration, des connaissances disponibles et des incertitudes, puis de leurs visions de la restauration de l'estuaire, 2 ateliers de travail ont été organisés en avril et septembre 2013 (3 jours au total) pour définir les principales caractéristiques d'images futures écologiquement cohérentes de la restauration écologique de l'estuaire de la Seine en 2065.

A l'issue des 2 ateliers, et en analysant les entretiens préliminaires avec les scientifiques, trois dimensions de contraste ont pu être définies : degré d'autonomie des processus écologiques restaurés, restauration de la connectivité longitudinale et latérale du fleuve ainsi que le mode de gestion des grands herbivores sur les espaces restaurés. Le croisement de ces 3 dimensions de contraste nous a permis de définir 4 images archétypales (figure 1).



Echelle de restauration de la connectivité longitudinale et latérale du fleuve

Figure 1 : éléments de distinction des 4 images contrastées

La suite du document fait tout d'abord état des éléments communs aux 4 images, afin d'éviter les redondances dans chacun des récits. Les récits descriptifs des 4 images sont ensuite présentés dans l'ordre suivant : « estuaire chef d'œuvre », « estuaire jardiné », « estuaire arlequin » puis « estuaire sauvage ». Nous avons choisi d'ajouter à ces titres un sous titre faisant référence aux mouvements de peintures, afin de mieux distinguer l'estuaire arlequin de l'estuaire jardiné. Chacun de ces récits est accompagné d'un schéma dont la légende est présentée en annexe (annexe A), accompagnée du schéma qui a servi de support, validé lors du premier atelier avec les scientifiques, et qui représente la structure actuelle de l'estuaire (annexe B).

1. Les éléments communs aux 4 images

1.1. Conditions climatiques et hydromorphologiques

En 2065, les changements climatiques ont modifié sensiblement les régimes hydrologiques du climat océanique connu jusqu'alors en Normandie. Les écarts à la moyenne en termes de température et de précipitation ont en effet considérablement augmenté depuis 50 ans. **Les volumes des précipitations annuelles sur le bassin versant et le territoire étudié ont diminué d'environ 10%**, avec néanmoins une forte variabilité dans le temps. **La température annuelle moyenne s'est élevée d'environ 2°C, passant de 12 à 14°C.** Par conséquent, une diminution du débit du fleuve est constatée en toute saison mais de manière accrue en été, accentuant les étiages : **le débit moyen annuel a diminué d'environ 20 % depuis 50 ans, étant désormais passé en dessous de la barre de 400 m³ par seconde.**

A l'échelle globale, l'augmentation de l'absorption océanique de dioxyde de carbone, de composés azotés et soufrés atmosphériques d'origine anthropique a provoqué une **acidification des océans** de 100% en 50 ans. Ce phénomène est responsable d'une baisse de 50 % de la biodiversité des organismes calcaires et d'une chute de quelques 20 % de la diversité des autres organismes marins. Sur l'estuaire de la Seine, l'influence de cette évolution du pH est moindre du fait de l'alcalinité des eaux du fleuve.

A l'embouchure, l'augmentation du niveau de la mer s'est traduite par une **élévation de 0,4 m** en 50 ans. Cette élévation est à peu près identique à l'amont, excepté lors des débits supérieurs à 800m³ à partir desquels elle s'atténue progressivement vers l'amont. Elle a par ailleurs conduit à une élévation du niveau de la nappe alluviale par submersion et pression latérale. Du fait de la remontée progressive du niveau marin et de la baisse du débit moyen du fleuve, la progression des sédiments (sables principalement) de la baie vers l'intérieur de l'estuaire s'est accentuée. La localisation et la forme des zones intertidales anciennes et restaurées entraînent différentes dynamiques de piégeage des matières en suspension.

Le positionnement du **bouchon vaseux** évolue depuis quelques années sous l'influence de la baisse des débits et de la remontée du niveau marin. Cependant, la tendance n'est pas encore nette. Les eaux du bouchon vaseux sont généralement saumâtres, bien que celui-ci puisse se déplacer vers le secteur marin ou limnique au gré des marées et des crues. Il lui arrive encore exceptionnellement d'être expulsé lors des fortes crues. Par ailleurs, l'intrusion saline varie sous l'influence, sensiblement, des mêmes facteurs que le positionnement du bouchon vaseux.

1.2. Caractéristiques biogéochimiques de l'eau et des sols

Le bouchon vaseux et les nouvelles surfaces intertidales continuent de jouer correctement leur rôle de réacteur chimique ou biochimique (biomasse microbienne), en termes d'épuration des **nutriments**, de transformation et de stockage des **contaminants chimiques** (métaux lourds et produits de synthèses) et microbiens. Cependant, de nombreux contaminants se retrouvent toujours dans les eaux, les sédiments et les terres de l'estuaire de la Seine, faute d'efforts de

dépollution, de réduction à la source ou parce que les dispositifs épuratoires en place ne sont pas toujours suffisants.

Certains polluants sont susceptibles de se retrouver dans l'ensemble de la chaîne alimentaire à des concentrations parfois élevées en raison du phénomène de bioaccumulation. Si les suivis à long terme des métaux dans les sédiments et la matière vivante montrent des tendances globalement en diminution, les nouvelles molécules (biocides, produits pharmaceutiques, etc.) actives à des concentrations très faibles, sont encore difficiles à mesurer.

Conséquence de la restauration de certains espaces et de modifications des pratiques agricoles sur l'estuaire (voir le détail dans chacune des images), les flux de **nitrate**s des eaux diminuent progressivement. Cette diminution n'est cependant notable que depuis 10 ans, soit 30 ans après les derniers apports massifs sur les sols agricoles, en raison de l'inertie des nappes souterraines.

Les **macro-déchets** sont facilement piégés dans les zones intertidales restaurées. Dans les parties les plus hautes, ils sont retenus dans la végétation dense et dans les zones dépressionnaires, où l'énergie de la marée n'est plus suffisante pour les enlever.

Les sols de l'estuaire contribuent largement au recyclage de la matière organique, à la régulation du cycle de l'eau et à la décontamination de l'eau. L'érosion des sols est moindre que par le passé et leur fertilité est pour partie au moins restaurée.

1.3. Biodiversité estuarienne

Les conséquences de la restauration sur les espèces et les milieux naturels sont dépendantes des hypothèses faites dans les différentes images, il y a donc peu de points communs.

Malgré les travaux de restauration entrepris, les populations de certaines espèces migratrices sur l'estuaire de Seine sont dans un état de conservation défavorable (canard pilet, anguille européenne notamment). Ce phénomène est, semble-t-il, dû à des modifications importantes de fonctionnement écologique survenues sur d'autres sites dans le monde, affectant le cycle de vie de ces espèces.

Les grands herbivores sauvages ou domestiques présents de façon extensive sur la plaine et les terrasses alluviales de l'estuaire participent de la restauration de la biomasse et de la biodiversité estuarienne. Ils ont en particulier un impact positif sur la biodiversité édaphique (en particulier la biodiversité microbienne). La biomasse des lombricidés s'est accrue, améliorant la structuration des sols. Ils constituent une importante source de nourriture, notamment pour l'avifaune.

2. « Chef d'œuvre d'ingénierie » - une image cubiste

2065

Dans cette image, les mesures de restauration des continuités hydrauliques et des milieux terrestres privilégiées sont de **grande ampleur**. Elles touchent d'emblée de grandes surfaces (plusieurs centaines d'hectares environ), avec des moyens conséquents pour restaurer d'importants flux d'eau et de sédiments.

L'entretien et le fonctionnement de ces espaces sont assurés par de l'énergie anthropique, c'est-à-dire des moyens techniques ou humains importants (portes à flot, vannes, pompes, digues amovibles, etc.). **L'énergie naturelle** (marée, débit, houle...) **est contrôlée**, sans toucher à la profondeur du chenal.

Sur les milieux terrestres ou d'interface, **l'élevage extensif** de races domestiques sur de grandes étendues assure le retour d'une importante biodiversité, renforçant les réseaux trophiques.

2.1. Conditions hydromorphologiques et sédimentaires

En 2065, le **déplacement de sédiments est** d'origine naturelle (transport sédimentaire dans le fleuve et ses affluents) mais surtout anthropique. En effet les activités humaines ont un impact important sur l'expulsion ou le déplacement des sédiments, du fait du dragage, des différents aménagements de chenalisation, d'extraction de sables et graviers. La profondeur du chenal n'a pas vraiment changé depuis plus de 50 ans.

La résultante de ces dynamiques avait tendance à accélérer le comblement de l'estuaire jusqu'en 2020, les conséquences des changements climatiques et les grands aménagements estuariens réalisés dans les années 2020-2030, entretenus et modernisés jusqu'à nos jours, ont profondément modifié cette dynamique. A différents endroits de l'estuaire, ces aménagements permettent de créer des **zones de dépôts** des sédiments avec accroissement des zones **intertidales** et **subtidales** (environ 1500 ha de vasières permettant entre autres un accroissement de **l'épuration des nutriments**). Ces grands espaces fortement aménagés entretiennent de manière artificielle une dynamique hydromorphosédimentaire, grâce à des systèmes (portes, batardeaux, vannes, circuits de pompes, digues submersibles amovibles, etc.) et des opérations de gestion ou d'entretiens appropriés (contrôle des flux hydrosédimentaires entrant et sortant, curage et traitement des sédiments, pâturage, fauchage, arrachage, à-secs, etc.). Dans le secteur aval, afin de redonner plus de **volume à la fosse nord**, de limiter son comblement et celui du chenal, la **digue basse Nord** a été partiellement (7 km) décalée vers le Sud et les brèches redimensionnées.

Lors des phénomènes de crues, des débordements sont provoqués de manière contrôlée sur de grandes surfaces agricoles dans la partie amont de l'estuaire, ce qui permet de réduire les risques d'inondation. Cependant, dans des conditions localisées de forte imperméabilisation des sols (autour des zones urbaines et industrielles) et de présence d'un niveau de nappe affleurant, les **probabilités d'inondation** par remontée de nappe sont élevées.

La position du maximum de turbidité s'est déplacée de quelques kilomètres et les dernières études de suivi estiment que le gradient salé s'est lui aussi déplacé de quelques kilomètres (5 à 10) vers l'amont depuis 50 ans. Ainsi le centre de gravité des **vasières intertidales mésohalines** très productives s'est globalement décalé aussi vers l'amont.

2.2. Caractéristiques biogéochimiques de l'eau et des sols

Le renouvellement des eaux sur les grandes surfaces intertidales et dans les zones de lagunage pour le piégeage des contaminants en amont, assure un bon taux d'**épuration** des nutriments des eaux de Seine.

Des espaces sont dédiés au stockage des **sédiments contaminés** (métaux lourds et produits de synthèses). Selon leur qualité ils peuvent 1/ être laissés à leur propre dynamique de sédimentation, 2/ faire l'objet de phytoremédiation ou 3/ être retraités (extraction-traitement-relargage) dans la partie amont de l'estuaire (l'essentiel des contaminants provient du bassin versant amont de la Seine) ou juste à proximité des zones à danger (rejets accidentels...).

La **dépollution des sols**, notamment sur les zones riveraines (avant leur connexion au fleuve), le déplacement d'activités à risques ou bien la mise en zone de protection a permis de limiter les risques d'apport massif de contaminants lors des phénomènes d'inondation. Les zones de protection correspondent principalement aux grands espaces fortement industrialisés non délocalisés (port Jérôme, les zones industrialo-portuaires de Rouen et du Havre, de Sotteville-les-Rouen, de Pitres...). Ces espaces ont été encadrés par des digues, équipés de réseaux de drainage et de puissants systèmes de pompage permettant d'évacuer les eaux.

La plupart des **macro-déchets** sont également prélevés au niveau du barrage de Poses grâce à des systèmes de capture et de prélèvement robotisés.

Malgré les efforts réalisés sur la qualité des rejets d'eaux usées, des **contaminations bactériologiques** sont occasionnellement apportées par les eaux de ruissellement, notamment parce que de grands troupeaux occupent, de manière extensive, certains espaces restaurés.

2.3. Une diversité d'habitats estuariens

Milieux aquatiques et intertidaux

A l'instar d'un projet sur l'Escaut, les grandes zones intertidales restaurées en estuaire de Seine sont soumises à un contrôle des entrées, des circulations et des sorties d'eau qui permettent effectivement de maîtriser les flux sédimentaires et hydrauliques, et donc une partie des conditions de développement d'habitats écologiques « intertidaux ». La bonne maîtrise de ces techniques a permis d'augmenter artificiellement les surfaces intertidales. Au sein de chaque casier, les **milieux sont variés**, malgré leur comblement lent et progressif, ce qui implique un entretien régulier. Des « trous en eau permanente » sont aménagés pour offrir des refuges aux espèces aquatiques à marée basse. Grâce à l'augmentation des surfaces de vasières intertidales, les zones de **production primaire** benthiques (phytobenthos) se sont étendues.

En 2005, sur une partie des secteurs aval et médian, plus de **10 km « linéaires » de rives reconnectées** contribuent à la restauration de **gradients transversaux** de pentes, de courants et de substrats. Ces aménagements offrent une large surface d'habitats d'écotones typiquement estuariens entre fleuve et plaine alluviale, entre zone subtidales, intertidales et terrestres.

Une **gigantesque filandre** en équilibre avec les milieux écologiques adjacents (autres filandres, vasières, schorre, roselière, zones subtidales, fossés...) est créée et entretenue en aval. La fonction de **nourricerie** pour les bars et les soles s'améliore nettement.

Quelques grands ensembles de parcelles de marais sont reconnectés à la Seine par l'intermédiaire de **réseaux de fossés** aux débouchés aménagés pour une gestion contrôlée des niveaux d'eau, selon les besoins du bétail, de la faune sauvage et des stocks d'eau souterrains. Leur qualité trophique n'en fait pas des milieux hautement patrimoniaux, mais la structure de la végétation, des sols et leur productivité sont très intéressantes à l'échelle de l'estuaire. Des chapelets de mares sont également aménagés perpendiculairement à la Seine, vers les boisements.

Au sein de la boucle de Duclair, d'anciennes ballastières ont été comblées par des sédiments de dragage autorisés, d'autres connectées entre elles et à la Seine. Ces aménagements conséquents ont permis de créer ainsi un **très grand bras mort artificiel** de plusieurs kilomètres de long tout en préservant la qualité de la nappe alluviale. Mieux que les darses plus en amont, aux pentes

abruptes, il offre un ensemble **d'habitats et de fonctions biologiques complémentaires** pour la faune aquatique ou liée aux milieux aquatiques.

A l'aval, à l'embouchure, deux grandes îles ont été créées, l'une comportant une lagune de 5 hectares, l'autre recréant des habitats de falaises. Ces **îles et les récifs artificiels** constituent des zones de repos pour de nombreuses espèces avicoles marines et estuariennes (limicoles, sternidés, laridés,...) mais également les populations piscicoles dont les migrateurs (esturgeon européen, saumon atlantique, alose feinte, lamproie fluviatile, lamproie marine etc.).

Le **secteur marin**, est soumis à des activités d'extractions de granulats. Ces excavations forment des « **souilles** » profondes qui sont utilisées pour le stockage de sédiments contaminés. Une fois comblés, ces espaces restent interdits à la pêche et offrent des habitats fonctionnels (reproduction, nourricerie, zone de repos) pour de nombreuses espèces marines (algues, mollusques, poissons).

Les plaines alluviales

En 2065, des milieux de **vastes prairies** dominant en milieu rural. Le pastoralisme largement présent sur l'estuaire permet une gestion écologique des milieux naturels. La richesse en microorganismes et microfaune des sols est restaurée, favorisant la stabilité des chaînes trophiques. Des battues sont régulièrement organisées pour éviter l'installation des loups sur l'estuaire et ainsi permettre le maintien d'un élevage extensif ovin et bovin économiquement viable.

Le système tourbeux du marais Vernier est maintenu, protégé des apports d'eaux saumâtres. D'anciennes tourbières ont été artificiellement réactivées en lien avec le comblement des anciennes ballastières entre Duclair et Rouen.

Les **ripisylves** avaient pratiquement disparues sur l'estuaire de la Seine il y a 50 ans. Ces habitats sont aujourd'hui bien représentés sur les îles et les rives en amont de Rouen, sur le pourtour des zones reconnectées. Les espèces y sont choisies en fonction des besoins identifiés (par exemple, des essais ont été menés très localement pour implanter du cyprès chauve). Elles sont occasionnellement entretenues afin d'éviter les embâcles dans les ouvrages.

Les terrasses et coteaux

La rive concave est protégée contre l'érosion par de gros blocs destinés à casser l'énergie hydraulique. Ces blocs ont été rapidement colonisés par différents groupes d'espèces.

Les **espaces forestiers** (forêt domaniale de Brotonne, de Roumare, La Lande-Rouvray etc.) sur les terrasses ou coteaux sont principalement composés de hêtres, de chênes, d'aulnes et de charmes. Des grands espaces de forêts ont également été replantés perpendiculairement au fleuve afin de renforcer la continuité de ces milieux et de faciliter l'adaptation au changement climatique. Les efforts de diversification des essences et des modes de gestion favorisent l'accueil d'une diversité d'espèces faunistiques, mais également de lichens, bryophytes, champignons....

L'enfrichement des **prairies sèches** des terrasses et coteaux aux expositions différentes est en régression grâce au développement du pâturage. Elles retrouvent tout leur potentiel écologique qui diversifie encore la représentativité d'habitats variés au sein de l'estuaire.

Les espaces agricoles et urbains

Depuis 40 ans, une partie des systèmes d'exploitation a évolué vers l'élevage de grands herbivores domestiques et rustiques (vaches, chevaux, moutons ...) sur de vastes parcelles de prairies (« ranching »), entretenant ainsi, par différents modes de gestion (fauche, pâture différenciée...), des milieux ouverts diversifiés.

Les mares, les fossés inter- ou intra-parcellaires et les berges de Seine servant au bétail de lieu pour s'abreuver sont protégés (effondrement, piétinement...). Des haies ont été plantées entre les très grandes parcelles, et quelques bosquets en leur sein. Dans ce prolongement, des voies de circulation des espèces sont aménagées entre les grands ensembles (allant parfois jusqu'à la restauration d'anciennes voies de transport à des fins de corridors écologiques). Les grandes

agglomérations ont aménagé au cœur des villes et villages des réservoirs de biodiversité (bois, mares, prairies...), qui servent d'accueil pour certaines espèces de faune et de flore.

Les zones industrielles à risque (inondation vs contamination) ont été délocalisées ou fortement endiguées (voir plus haut).

2.4. Connectivités et espèces

Les taxons représentés dans les milieux aquatiques de l'estuaire sont relativement diversifiés. En particulier, les espèces étendards (esturgeon, saumon, balbusard pêcheur, etc.) et clés de voûtes des écosystèmes font l'objet de protections et de repeuplements plus ou moins efficaces. Les espèces végétales, les oiseaux, les insectes et les mammifères associés aux grands espaces de prairies sont bien représentés. Les « trous en eau permanente », connectés à la Seine sont très fréquentés par les poissons, leurs prédateurs : cormorans, ardéidés (aigrette, héron cendré...) mais également par les oiseaux d'eau (canards, foulques...). Les dernières études de recensement de l'ichtyofaune estuarienne ont dénombrées 100 espèces de poissons fréquentant l'estuaire (hors espèces d'eau douce).

La **mosaïque à très grandes mailles** de milieux semi-naturels et agricoles, constituée des lagunages ou espaces intertidaux restaurés, des prairies pâturées et des espaces forestiers est le support d'une relative **hétérogénéité** des habitats à l'échelle inter- ou intra-parcellaire. Elle s'intercale de façon parfois complémentaire avec les espaces cultivés, les zones urbanisées, industrialisées, les axes de transport.

La réduction de traitement antiparasitaire sur les animaux les plus rustiques a permis le retour d'une richesse microbienne et notamment les endo- et ecto-parasites qui participent à l'augmentation de la complexité du réseau trophique.

Pour les espèces à faible déplacement, l'estuaire permet surtout d'accueillir celles liées à des habitats plutôt homogènes (grande taille). Il est moins favorable pour celles attachées à une proximité de milieux complémentaires (amphibiens par exemple), sinon sur des espaces spécialement conçus pour elles. Les grands espaces, les longs corridors (aménagés pour atténuer les effets des collisions, des pollutions sonores et lumineuses) facilitent, par contre, l'accueil, le déplacement et les mouvements migratoires d'espèces à forte capacité de déplacement (mammifères, d'oiseaux...). Les grands espaces de roselières, de vasières, de prairies aux modes de gestion différenciés (pâturage, fauche...) offrent des zones de repos, de nourrissage, de nidification pour un grand nombre d'espèces d'oiseaux.

Les continuités aquatiques, gérées par l'homme, améliorent l'accessibilité à des habitats aquatiques variés, disponibles sur les réseaux hydrauliques (affluents, canaux, fossés...), même si, résultant de compromis d'usages, tous ne sont pas accessibles au bon moment, au bon endroit. De même, les voies de transport aquatique, difficilement contournables, ainsi que les grands espaces uniformes constituent encore des obstacles pour quelques espèces.

Conclusion

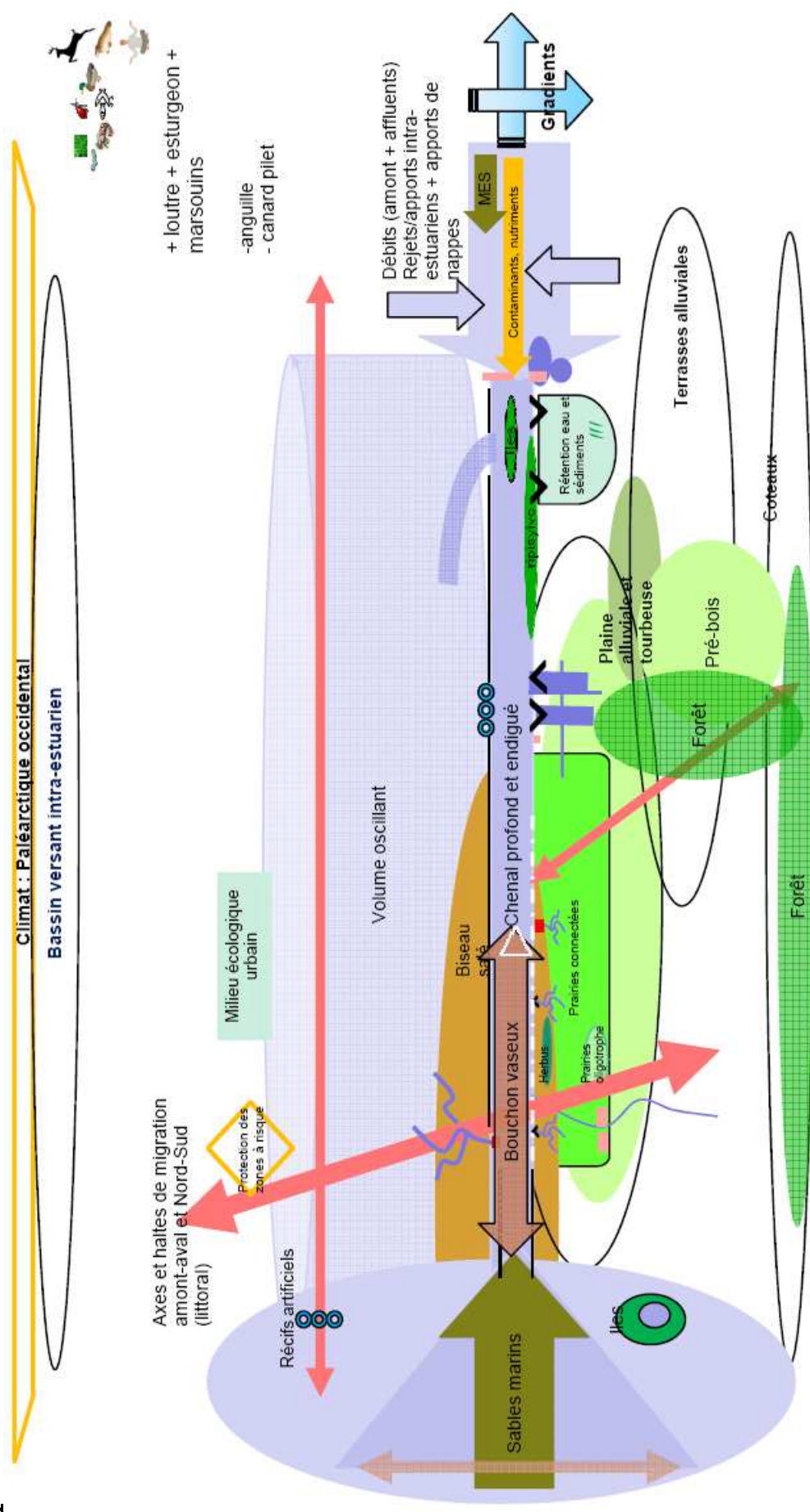
Malgré les nombreuses modifications qu'a pu subir l'estuaire de la Seine par le passé, ainsi que les pressions actuelles, dans un contexte de changement climatique, le système estuarien a recouvré grâce aux travaux de restauration, un certain **degré d'hétérogénéité** qui lui assure un fonctionnement écologique satisfaisant.

Des aménagements conséquents et toujours entretenus grâce à des techniques complexes sont nécessaires. La mise en œuvre, depuis plusieurs dizaines d'années, de ces actions de restauration contrôlées, sur de grandes surfaces, et la protection des zones à risques, ont permis de restaurer un fonctionnement estuarien.

La fragilité de ce système réside avant tout dans sa forte **dépendance** aux travaux d'entretien et, pour quelques ouvrages, aux incertitudes liées aux technologies employées. Par ailleurs, la localisation fixe d'infrastructures parfois lourdes peut limiter l'adaptation de l'estuaire à des changements futurs (position du bouchon vaseux, nouvelles barrières physico-chimiques sur

le lit mineur, etc.), et mettre à mal la complémentarité entre différents espaces, et donc le fonctionnement du système dans son ensemble.

Schéma structurel de l'estuaire de la Seine en 2065 : estuaire chef d'œuvre d'ingénierie (compartiments, réseaux et flux)



3. « L'estuaire jardiné » - Une image pointilliste

2065

Dans cette image, la restauration des continuités hydromorphologiques latérales et longitudinales, par une **approche locale et expérimentale**, est une priorité sur l'ensemble de l'estuaire. Les mesures de restauration se font sur des surfaces de quelques hectares à quelques dizaines d'hectares environ, dans le cadre d'une cohérence globale du fonctionnement de l'estuaire.

Le maintien des fonctions écologiques recherchées nécessite des travaux d'**entretien** et de gestion réguliers. Ainsi, de nombreuses liaisons latérales créées avec la Seine, sont **régulées** par de petits ouvrages afin notamment d'augmenter les surfaces intertidales et de maintenir le dynamisme des filandres localement. Dans le lit mineur ou en mer, des aménagements artificiels plus ou moins complexes et évolutifs (épis, bras morts, récifs, etc.) ont été mis en place. La réduction de la profondeur du chenal est initiée depuis plusieurs dizaines d'années, afin de restaurer certains habitats.

Enfin, de **grands herbivores domestiques** sont élevés de façon extensive un peu partout sur l'estuaire en raison de leur adaptabilité aux zones humides et de leur capacité à participer localement, dans les espaces à vocation naturelle, à l'entretien et au maintien d'une forte biodiversité.

3.1. Conditions hydromorphologiques et sédimentaires

En 2065, le **déplacement de sédiments** est d'origine naturelle (transport sédimentaire dans le fleuve et ses affluents) et anthropique (dragages résiduels dans le chenal peu profond, extractions). La partie maritime de l'estuaire reste concernée par des extractions de granulats.

Pour contribuer à la restauration d'un fonctionnement écologique qui soit cohérent à l'échelle de l'estuaire, de **nouvelles connexions vers des espaces intertidaux** (environ 800 ha) ont été créées tout au long de l'estuaire, notamment dans la zone de gradient de salinité et de forte turbidité. Elles contribuent à la forte productivité estuarienne, aux nourriceries des poissons marins et d'oiseaux limicoles, à l'atténuation des ondes de marée... Pour répondre au mieux aux choix de restauration écologique, un entretien régulier par des travaux de curage, de faucardage est pratiqué. Ces espaces de surfaces variables (de quelques hectares à quelques dizaines d'hectares) sont équipés d'ouvrages de régulation permettant une gestion fine des niveaux d'eau (portes à flot, clapets, vannes, batardeaux...). La gestion hydraulique des réseaux aquatiques constitués des fossés permet la circulation des espèces et des flux d'eau et de sédiments entre la Seine et les marais.

Là où la qualité de la nappe n'est pas menacée, des ouvertures permettent la connexion à la Seine d'anciennes ballastières et la création de **bras morts**. Dans l'estuaire amont, l'ensemble des aménagements permet de limiter les risques d'inondation grâce à de nombreuses surfaces dédiées à la rétention d'eau.

Depuis 30 ans, les pieds des endiguements tout au long de l'estuaire entre Tancarville et Rouen sont équipés de **fascines**. Celles-ci sont installées parallèlement au cours du fleuve de façon à favoriser le piégeage des particules et donc faciliter la restauration de **pentés douces** en domaine intertidal ou subtidal. Les **épis** adossés aux digues et disposés de manière différente par rapport au cours du fleuve permettent de tester la possibilité d'augmenter **l'hétérogénéité** des substrats et des courants. L'ensemble de ces dispositifs donne, pour la faune aquatique, accès à des habitats complémentaires en fonctions écologiques, dans le temps et l'espace.

Le positionnement du positionnement du **bouchon vaseux évolue** depuis quelques années, la tendance n'est pas encore nette. Le changement de profondeur du chenal joue à contre sens

d'autres facteurs tels que la baisse du débits et la remontée du niveau des eaux observée ces dernières décennies. Ainsi, la position de son maximum de turbidité s'est déplacée de St-Sansom-de-la-Roque - Tancarville vers Vatteville-la-Rue.

3.2. Caractéristiques biogéochimiques de l'eau et des sols

Les opérations de curage et de dragage ont participé à la **remise en suspension** des contaminants récents. Si les effets de ces contaminants remobilisés, malgré les efforts pour les supprimer ou les contenir, se sont dissipés peu à peu, un bruit de fond résiduel se fait encore sentir. Ces contaminants se retrouvent dans l'ensemble de la chaîne alimentaire à des concentrations parfois élevées en raison de la bioaccumulation. Les analyses effectuées sur les organismes filtreurs inféodés à ces milieux (bivalves, annélides et crustacés) témoignent d'une contamination résiduelle des sédiments dans l'estuaire.

Par ailleurs, malgré les efforts réalisés sur la qualité des rejets d'eaux usées, des **contaminations bactériologiques localisées** sont occasionnellement apportées par les eaux de ruissellement, notamment parce que des troupeaux occupent, de manière extensive, certains espaces restaurés.

Les **macro-déchets** sont facilement piégés dans les ouvrages (ex. fascine) ou dans les zones intertidales restaurées : dans les parties les plus hautes, ils sont retenus dans la végétation dense et dans des dépressions où l'énergie de la marée n'est pas suffisante pour les enlever.

3.3. Une diversité d'habitats estuariens

Milieux aquatiques et intertidaux

Les espaces reconnectés, de petite à moyenne surface, sont conçus (brèches dans les digues, fascines, épis, dépressions...) et gérés (ouvrages de régulation, entretien) de façon à **maintenir des pentes faibles et une large gamme de courants, de substrats, etc.** L'hétérogénéité et la **complémentarité** des milieux, à l'échelle de l'estuaire, est donc favorisée. De plus, en milieu intertidal ou terrestre, les élevages de bovins et d'équidés rustiques domestiques assurent une **pression de pâturage** suffisante pour limiter l'évolution naturelle des milieux ouverts vers le boisement. C'est le cas notamment sur les bassins versants des filandres. Les habitats de type **vasières subtidales, intertidales, schorre et prairies humides** sont parmi les grands bénéficiaires de ces restaurations. La qualité trophique des eaux de la Seine participe de la productivité de ces milieux.

Les ripisylves et les forêts alluviales sont essentiellement représentées dans la partie amont, sur le pourtour des espaces reconnectés ainsi que sur les rives des affluents de la Seine (Risle, Eure).

Au sein du secteur aval de l'estuaire, de petites **îles** ont été recrées en réutilisant et stabilisant les sédiments contaminés. Elles servent de zones d'accueil pour des populations de mammifères marins ainsi que pour de nombreuses espèces d'oiseaux grâce aux efforts réalisés en matière de création et d'entretien d'une diversité d'habitats (exposition, topographie, substrats).

Les **extractions de granulats en mer sont réalisées par des excavations peu profondes** sur des surfaces relativement importante, sur lesquelles l'activité de pêche est fortement limitée pendant la période d'exploitation. Elles offrent des habitats fonctionnels (reproduction, nourricerie, zone de repos) pour de nombreuses espèces marines (algues, mollusques, poissons).

La plaine alluviale, les terrasses et les coteaux

En 2065, les habitats de la plaine alluviale sont relativement diversifiés et offrent une **mosaïque de petite maille** d'habitats assez différents, dans laquelle domine néanmoins les petites prairies en pâturage extensif. La **banque de graines** des sols se recharge progressivement. La **tourbière** du marais Vernier a été conservée, grâce à la mise en œuvre d'une gestion hydraulique et au rehaussement de certaines digues. D'anciennes tourbières ont également été « réactivées » localement dans le secteur des méandres.

Les **espaces forestiers** sont présents par taches, de **manière éparse** sur le territoire (forêt domaniale de Brotonne, de Roumare, La Lande Rouvray, etc.). Elles sont pour la plupart constituées de feuillus (hêtres, chênes, bouleaux et charmes).

Des **blocs** disposés sur la rive concave permettent de casser l'énergie du fleuve afin de limiter l'érosion du fleuve qui a taillé des coteaux très abrupts dans le plateau crayeux, avec la présence de pitons et fronts rocheux. Sur les **coteaux** se développent des milieux calcicoles - bois et pelouses - particulièrement riches en espèces rares. Une attention particulière est apportée à ces espaces sur lesquelles divers modes de rajeunissement floristiques sont réalisés (prairies pâturées par des herbivores ou fauche).

Les espaces agricoles et urbains

La modification du parcellaire et la diversification des systèmes d'exploitation a favorisé l'utilisation de linéaires arborés en bordure de parcelles. Des rangées d'arbres parallèles à la pente permettent de réduire les vitesses de ruissellements des eaux provenant du plateau limitant ainsi l'érosion des sols sur les coteaux.

Les élevages de bovins rustiques sont nombreux, essentiellement sur les espaces naturels ne présentant aucun risque de contamination. Sur les espaces à risque, l'activité de faucardage et de coupe du roseau permet d'évacuer voire d'éliminer les polluants.

Par ailleurs, depuis 30 ans, des espaces boisés ont été plantés pour développer des productions diversifiées de baies, de châtaignes et de champignons.

Les villes et villages ont aménagé dans les centres urbains des réservoirs de biodiversité (bois, mares, prairies...), qui servent d'accueil pour certaines espèces de faune et de flore. Comme pour les espaces restaurés, leur entretien fin permet de créer une diversité d'habitats. Les lisières de transition avec le milieu rural sont particulièrement soignées.

3.4. Connectivités et espèces

La mosaïque paysagère permet d'accueillir une grande diversité de taxons que ce soit les oiseaux, les insectes, les mammifères, les amphibiens, les champignons, les bryophytes, les lichens, etc. En effet, la réduction de traitement antiparasitaire sur les animaux les plus rustiques a permis le retour d'une richesse microbienne et notamment les endo- et ecto-parasites qui participent à l'augmentation de la complexité du réseau trophique. Il a également été observé le retour de nombreuses espèces de coprophages dans les espaces boisés. La biodiversité des sols est également très élevée et la biomasse des lombricidés s'est accrue, constituant une importante source de nourriture, notamment pour l'avifaune.

Les **écotones** restaurés entre fleuve et plaine, entre les prairies et milieux forestiers, entre ville et campagne, favorisent la circulation des espèces à l'intérieur de la mosaïque d'habitats reconstituée. L'estuaire permet à la fois d'accueillir des espèces liées à des habitats spécifiques et celles attachées à une complémentarité de milieux. Aujourd'hui, la mosaïque de petite maille d'habitats (ouverts, semi-ouverts et abrités) facilite l'accueil, les déplacements et les mouvements migratoires pour les espèces, d'oiseaux, pour certains mammifères (chiroptères, micromammifères), pour les amphibiens et les insectes.

La profondeur moyenne du chenal, les passes à poissons et ascenseurs installés sur les seuils, les efforts permettant d'apporter une diversité d'habitats, notamment grâce à une diversité de courants, ainsi que l'amélioration de la qualité de l'eau ont profité à la fois aux populations de poissons amphihalins (saumon atlantique, alose feinte) et aux populations de poissons blancs. Les dernières études de recensement de l'ichtyofaune estuarienne ont dénombré un peu moins d'une centaine d'espèces de poissons (hors eau douce).

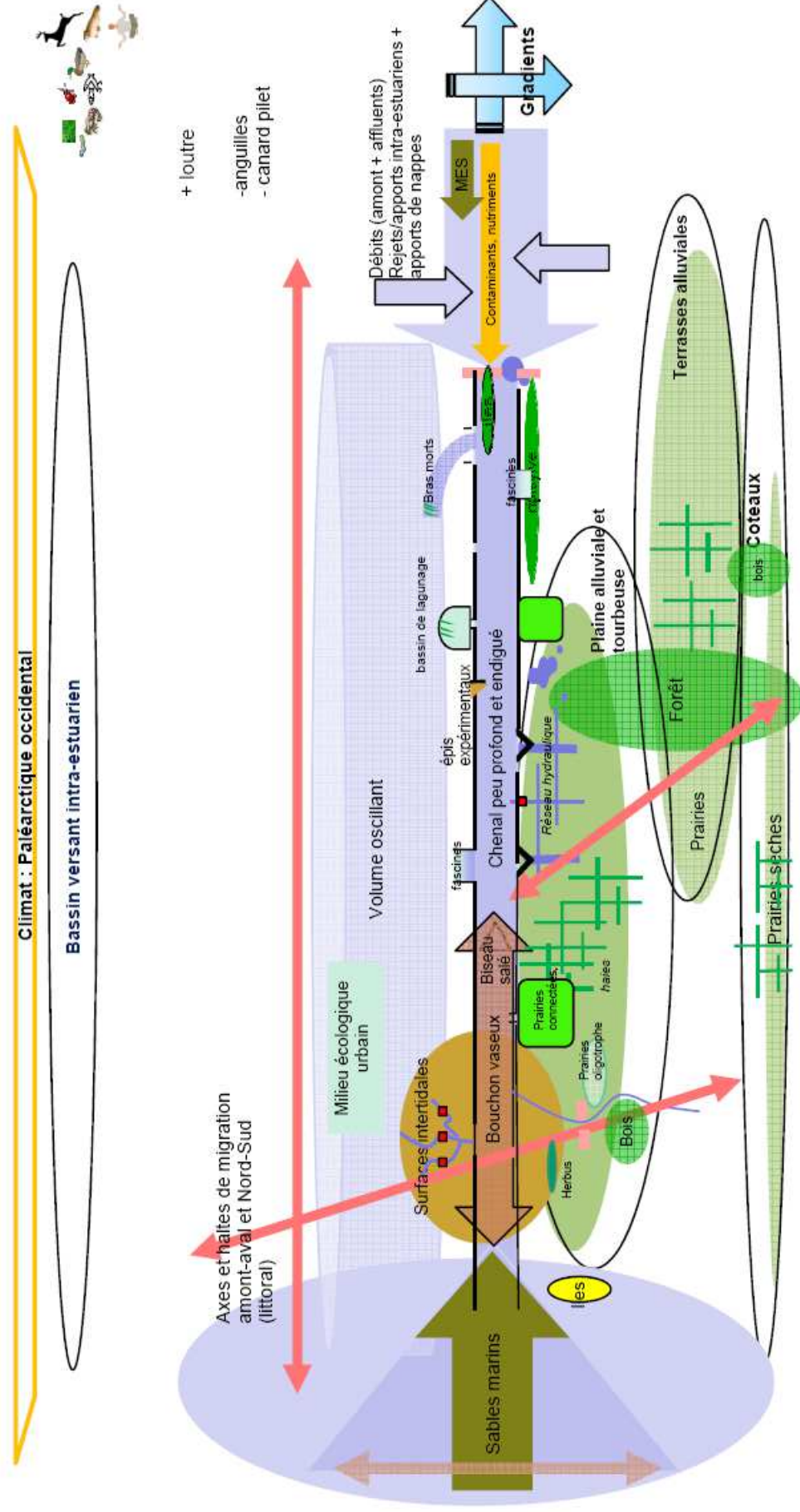
Cependant, les déplacements des grands herbivores au sein de ce territoire ainsi que les déplacements longitudinaux des mammifères marins restent limités en raison de la fragmentation des habitats et de la forte hétérogénéité des milieux.

Conclusion

Malgré les nombreuses modifications qu'a pu subir l'estuaire de la Seine par le passé, ainsi que les pressions actuelles, dans un contexte de changement climatique, le système estuarien a recouvré, globalement, grâce à la restauration, un certain **degré d'hétérogénéité et de redondance fonctionnelle entre les sites** qui lui assurent un fonctionnement écologique plus satisfaisant que par le passé. La répartition des opérations dans l'espace et le contrôle possible de chacune d'elles, offrent une **capacité de gestion adaptative très efficace** du système dans son ensemble, en réaction à d'éventuels changements de trajectoire non désirés.

Pour autant, le nombre des actions de restauration augmente la difficulté de maintien de la cohérence de chacune d'elle vis-à-vis des objectifs à l'échelle de l'ensemble de l'estuaire (c'est à dire leur cohérence entre elles). De même la petite taille des **surfaces restaurées** peut en soi constituer aussi un problème d'efficacité écologique.

Schéma structurel de l'estuaire de la Seine en 2065 : estuaire jardiné (compartiments, réseaux et flux)



4. « L'estuaire arlequin » - Une image impressionniste

2065

Dans cette image, les mesures de restauration des continuités hydromorphologiques et des milieux terrestres privilégiées sont celles qui nécessitent un **minimum d'énergie anthropique**. Il s'agit donc de maximiser la capacité d'auto-entretien de l'estuaire et de chaque aménagement. Ainsi, l'accueil de grands animaux sauvages (cervidés, bovidés, équidés) y participe. Cette acceptation du **laisser faire** sur les milieux naturels résulte d'un changement profond de paradigme. Les milieux naturels sont les témoins d'une dynamique écologique restaurée, laissée à elle-même.

Par ailleurs, les mesures de restauration sont **menées à l'échelle locale**, sur des surfaces de quelques hectares à quelques dizaines d'hectares environ (filandres, fascines, bras morts, etc.), dans le cadre d'une cohérence globale du fonctionnement de l'estuaire. Les espaces naturels conservés ou restaurés sont donc nombreux et répartis sur l'ensemble de l'estuaire.

4.1. Conditions hydromorphologiques et sédimentaires

Le **déplacement de sédiments** sur l'estuaire est d'origine naturelle (transport sédimentaire dans le fleuve et ses affluents) et anthropique. Les activités humaines ont un impact sur l'expulsion ou le déplacement des sédiments, au travers des activités de dragage, d'endiguement, d'extraction. La profondeur du chenal n'a pas vraiment changé depuis plus de 50 ans. Par ailleurs, la partie maritime de l'estuaire reste concernée par des extractions de granulats marins.

Les espaces sont restaurés sur l'ensemble du territoire estuarien et contribuent à la **diversification des habitats aquatiques**. Il s'agit par exemple, dans les boucles d'Elbeuf, d'Anneville-Ambourville et de Roumare notamment, de l'ouverture localisée des digues (brèches) et de décaissements d'anciens lits de bras secondaires ou bien de connexions de ballastières à la Seine par des ouvertures amont et aval. Ces espaces sont conçus pour favoriser leur **auto-entretien** (c'est-à-dire ralentir ou empêcher leur comblement à l'échelle pluri-annuelle), ce qui nécessite des études poussées. Globalement, l'auto-entretien des bras secondaires restaurés fonctionne assez bien. Cependant, la maîtrise de la conception en milieu estuarien dynamique et évolutif n'étant pas aisée, les résultats diffèrent selon les emplacements et les aménagements. La nature des habitats restaurés et leur répartition spatiale ne sont donc pas toujours liées à des choix volontaires.

Quelques îlots ont été aménagés dans la partie aval de l'estuaire grâce aux sédiments de dragages. L'emplacement, les matériaux utilisés et le design de ces îlots permettent une évolution libre des surfaces intertidales et subtidales associées. Les courants et les **fonds bathymétriques s'adaptent**, ils évoluent en conséquence.

A l'inverse des évolutions avant 2015, l'augmentation du niveau de la mer et la réduction des débits **ont eu pour conséquence la remontée du bouchon vaseux vers l'amont**. Ainsi, la position de son maximum de turbidité s'est déplacée de St-Sansom-de-la-Roque - Tancarville vers Tancarville - Lillebonne. Les dernières études de suivi estiment que le gradient salé s'est déplacé de quelques kilomètres (entre 5 et 10) en amont depuis 50 ans. Ainsi, grâce aux restaurations en zone intertidale, le centre de gravité du bouchon vaseux s'est globalement décalé aussi vers l'amont et a permis la création de **vasières intertidales mésohalines très productives**.

Parallèlement aux conséquences du changement climatique, la chenalisation de la Seine participe à l'augmentation globale des niveaux d'eau en Seine mais également aux risques de débordements à l'amont en période de crue. De plus, localement, là où se conjuguent les

phénomènes anthropiques de forte imperméabilisation des sols et de nappe affleurante en période de fortes pluies, les **probabilités d'inondation** par remontée de nappes, augmentent.

4.2. Caractéristiques biogéochimiques de l'eau et des sols

La contamination passée et celle qui dépend de l'extérieur de l'estuaire ne sont pas complètement résolues. Les individus ou populations de grands herbivores présents dans les parties hautes des zones intertidales pour s'alimenter peuvent parfois accumuler certains polluants.

Plusieurs facteurs contribuent à la **réduction des risques de contaminations bactériologiques et parasitaires d'origine fécale** : 1/ la diminution des rejets, 2/ la diminution du ruissellement, 3/ la répartition diffuse des animaux (contrairement à des conditions d'élevage par exemple).

4.3. Une diversité d'habitats estuariens

Milieux aquatiques et intertidaux

Les **zones intertidales et subtidales** nouvellement créées grâce à l'ouverture de **brèches** dans les digues et grâce aux **fascines** ont favorisé localement la restauration des **gradients** transversaux de pentes, de courants et de substrats. Ces aménagements augmentent les **surfaces de transition** et permettent de diversifier très nettement la nature, la localisation et donc les fonctions des habitats aquatiques.

Aujourd'hui, ces milieux aquatiques et intertidaux sont à la fois laissés à l'action de la **marée** et des grands **herbivores** sauvages (cervidés, bovidés, équidés) qui assurent tous deux naturellement une certaine forme d'entretien. La marée limite l'envasement et l'atterrissement, les herbivores évitent la fermeture complète des milieux en maintenant une relative alternance de prairies ouvertes et de boisements plus ou moins clairsemés (**pré-bois**). Les surfaces intertidales de petite taille sur l'ensemble du cours du fleuve forment donc un réseau hydrodynamique complexe composé d'entités fonctionnelles, partiellement autonomes les unes des autres du point de vue hydromorphologique. Elles présentent des modes de fonctionnement écologique et des peuplements relativement variés. Celles présentes dans le gradient de salinité offrent de bonnes conditions pour une forte production primaire et secondaire.

Dans la partie amont et centrale de l'estuaire, les habitats des **îles** créés par la réactivation et la création de quelques **bras secondaires** sont laissés en libre évolution. Au niveau des îles et de certaines rives en amont de Vieux-Port, des boisements commencent réellement à s'installer, quelques uns ont déjà évolué vers de véritables **bois alluviaux** en partie atterris. Ces derniers, créant embâcles, ombrages, zones dépressionnaires..., offrent des conditions d'accueil de plus en plus favorables à l'avifaune et l'ichtyofaune (repos, reproduction, alimentation). Les **réécifs artificiels** dispersés longitudinalement aux pieds des digues constituent des zones de repos pour l'ichtyofaune.

Dans la partie aval de l'estuaire, la création de brèches ou leur modification dans les digues basses nord et sud a effectivement permis **d'éviter le comblement des fosses** grâce à l'énergie de la marée au flot. Il en est de même pour la plupart des espaces restaurés en aval. Le dimensionnement des brèches et l'énergie de la marée permettent d'éviter ou tout au moins ralentissent fortement le comblement de ces espaces. Depuis qu'en rive nord l'amont des **filandres** a été reconnecté aux prairies du Hode et aux prairies sub-halophiles grâce à de grandes brèches sous la voie ferrée, on constate à quel point celles qui s'auto-entretiennent sont bien celles dont l'aire couverte par le volume oscillant est la plus pâturée. Les moins pâturées, là où les grands herbivores n'accèdent presque plus, se combleraient progressivement. Un **équilibre** continue d'exister au sein de cet ensemble dynamique de filandres. Celles alimentées, par l'amont, par le réseau de fossés du marais du Hode, connecté à la fois au canal de Tancarville et à la Seine, se combleraient également un peu moins vite.

En rive Sud, avec la baisse de la pression de pâturage (pas de pâturage agricole mais uniquement sauvage), **les roselières se sont développées**. Alors que l'on ne remarque pas de différence notable entre les conditions de pâturage sauvage entre la rive nord et la rive sud, l'évolution de la mosaïque d'habitats pourrait s'expliquer par la différence des deux réseaux hydrauliques.

Dans les zones intertidales restaurées les plus soumises à **l'atterrissement** (comblement par les fines, là où les dynamiques estuariennes ne suffisent pas à remobiliser les sédiments déposés et où s'implante progressivement la végétation), **la faune et la flore évoluent** progressivement de populations benthiques ou hygrophiles intertidales à des populations terrestres. Les **milieux de transition** se développent naturellement. Schorre, roselières et ripisylves continuent de croître au dépend des vasières restaurées, dont on estime malgré tout que la surface cumulée comporte 600 ha de plus qu'il y a 50 ans.

La dynamique de montée du niveau marin semble **jouer à l'inverse de la dynamique de comblement** de certaines surfaces intertidales, permettant de gagner régulièrement quelques nouvelles surfaces. Mais ces jeux de comblements, érosion, submersions ne sont pas répartis également tout au long de l'estuaire.

Les quelques **rares prairies primaires** qui apparaissent au gré des modifications du cours de l'estuaire, là où la pression de pâturage par les herbivores sauvages est la plus importante, constituent des habitats rares à l'échelle nationale. Leur qualité trophique et leur caractère halin évolue selon la qualité physico-chimique des eaux de la Seine.

Le **secteur marin**, quant à lui, est soumis à des activités d'extractions de granulats qui peuvent être favorables à certaines espèces au détriment d'autres. Quelques excavations ont volontairement été creusées sur le même principe que la « **souille** » CNEXO de façon à ne pas être atteignables par les engins de pêche tout en offrant des habitats intéressants à certaines espèces. Quelles qu'elles soient, ces zones d'excavation constituent des zones de piège à macro-déchets.

La bathymétrie des surfaces subtidales et intertidales des **îlots** de ce secteur marin n'est pas stable. En fonction des années, certains îlots ayant subi une forte érosion sont entièrement immergés, d'autres restent émergés et permettent l'installation d'une colonie de phoques veau marin estimée aujourd'hui à 400 individus. Certains de ces îlots constituent également des sites de repos de pleine mer pour de nombreuses espèces d'oiseaux marins.

La plaine alluviale, les terrasses et les coteaux

Au-delà des milieux reconquis par le fleuve par la restauration des continuités hydrauliques, la plaine est occupée par une alternance de milieux agricoles, urbains, naturels, industriels, tertiaires, routiers... Vu du ciel, l'occupation du sol est une sorte de mosaïque de milieux naturels, cultivés et anthropisés, y compris sur les berges où alternent substrats nus, végétation herbacée, ripisylve et digue. La **banque de graines** des sols se recharge progressivement.

Certaines des prairies mésotrophes préexistantes de bord de fleuve sont désormais alimentées en eau par les réseaux de fossés inter-parcellaires non obstrués. Pour la plupart de ces fossés, l'abandon de leur curage systématique participe, avant leur comblement, à l'accroissement du temps de permanence de l'eau dans ces espaces, puis dans les prairies adjacentes. Ces prairies sont majoritairement pâturées par des herbivores sauvages.

La rive concave est protégée contre l'érosion par des gros blocs destinés à casser l'énergie hydraulique et qui sont colonisés par différentes espèces.

La plantation **d'arbres** (en linéaires ou en bosquets non entretenus), l'abandon d'anciennes surfaces agricoles à la colonisation par de jeunes **saulaies-bétulaies** et le positionnement de nombreux **espaces restaurés** ont été raisonnés pour accueillir les herbivores sauvages, tout en favorisant les continuités écologiques et les réservoirs de biodiversité. La ripisylve et les bois

alluviaux qui se sont considérablement développés en amont occasionnent, en période de crue, des déplacements d'arbres formant localement des embâcles.

Le marais Vernier est fréquenté par des herbivores sauvages et domestiqués, non sans entraîner quelques risques sanitaires et quelques concurrences au pâturage, difficiles à gérer en période sèche. La réduction des travaux d'entretien sur ce marais emblématique conduit de nouveau au comblement progressif de la « Grand Mare ».

Les espaces agricoles et urbains

Les espaces agricoles sont présents sur l'ensemble de la plaine et des terrasses, sur une surface légèrement réduite depuis quelques années au profit des pré-bois et des zones inondables.

Des friches et jardins communaux, volontairement peu entretenus, favorisent en ville l'accueil d'une faune et d'une flore ordinaire mais abondante et parfois même peu courante en zone urbaine.

4.4. Connectivités et espèces

Les écotones et corridors biologiques sont restaurés entre fleuve et plaine et, au sein de la plaine, entre prairies et milieux forestiers ou, entre milieu urbain et rural. Ils constituent des réseaux au sein d'une mosaïque d'habitats complémentaires. Ils favorisent la circulation interne, les mouvements migratoires et l'accueil de nombreuses espèces d'oiseaux, de mammifères, d'amphibiens d'insectes et de poissons. Néanmoins en réponse aux difficultés posées par les herbivores sauvages sur les zones de culture, des clôtures sont localement érigées pour en limiter les dégâts. Sur les bords de Seine les espèces peuvent plus facilement circuler et évoluent en général entre ces milieux ripariens et les espaces forestiers.

A l'échelle du complexe estuarien, **les observations de loups** deviennent de plus en plus fréquentes. Les quelques couples installés sur le territoire se contentent des grands herbivores sauvages présents. Avec la chasse, ils participent ainsi à leur régulation, restaurant la présence de grandes carcasses et donc contribuant largement à l'équilibre des chaînes trophiques.

Les barrages sont **équipés de passes à poissons**. Le retrait localisé de certains clapets et vannes hydrauliques pour faciliter l'alimentation des réseaux hydrauliques et la circulation des espèces dans les marais ou dans les affluents de la Seine augmente le potentiel de transit ou de migration pour les poissons amphihalins (saumon atlantique, alose feinte, etc.). Les dernières études de recensement de l'ichtyofaune estuarienne ont dénombré 70 espèces de poissons en dehors des espèces d'eaux douces.

Faute de surfaces suffisantes et de conditions favorables dans le chenal, les mammifères marins présents dans le secteur aval, ne s'aventurent généralement pas au delà du Pont de Normandie.

Conclusion

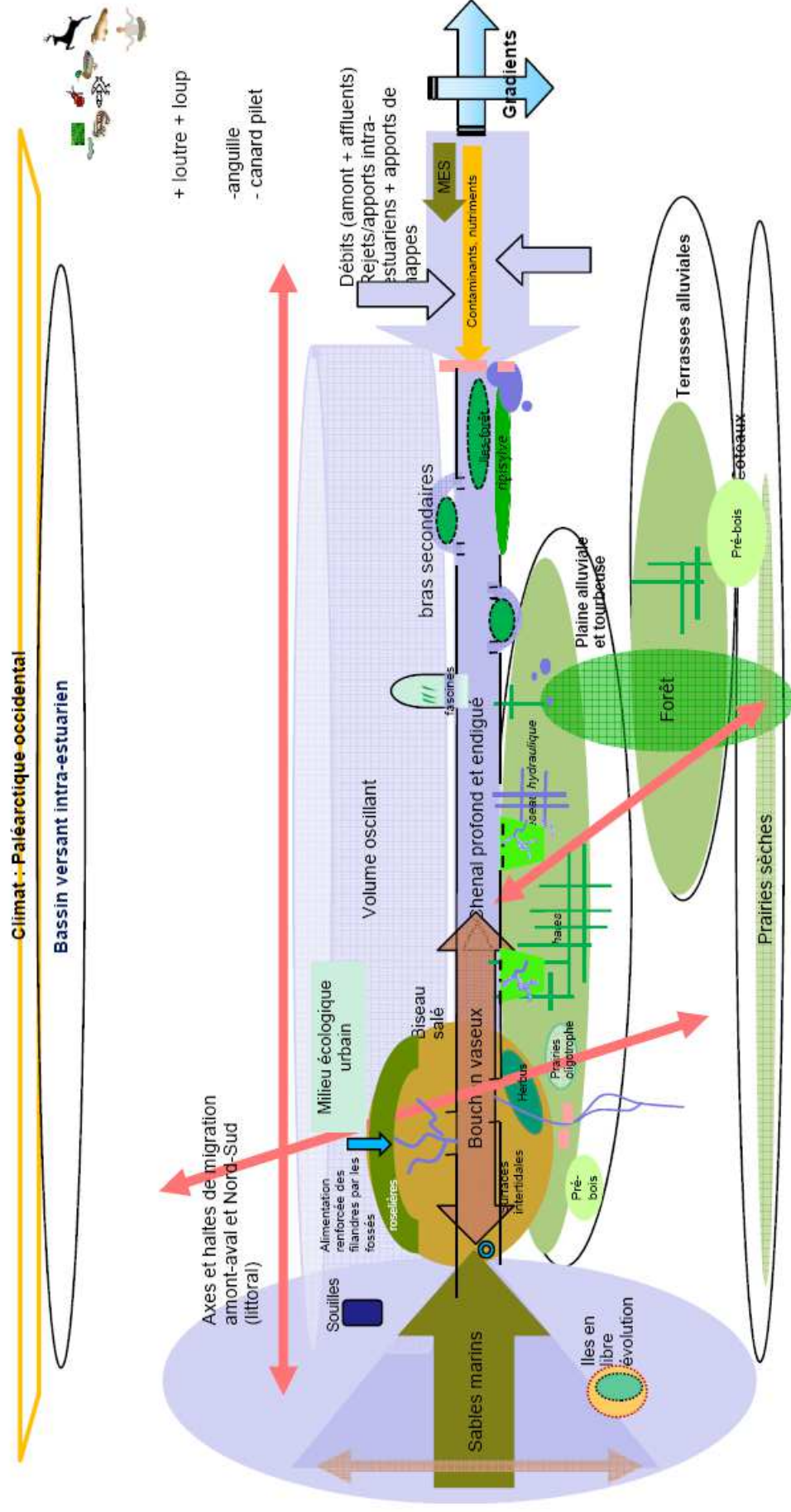
Malgré les nombreuses modifications qu'a pu subir l'estuaire de la Seine par le passé, ainsi que les pressions actuelles, le système estuarien a recouvré globalement, grâce à la restauration, un certain degré d'hétérogénéité, de redondance fonctionnelle entre les sites lui assure un fonctionnement écologique satisfaisant pour un estuaire.

La dynamique naturelle des milieux restaurés sur de petites surfaces mais tout au long de l'estuaire conduit à une différenciation des sites et de leurs habitats, chacun évoluant sur sa propre trajectoire. Cela accentue progressivement leur **diversité** sur un gradient latéral et longitudinal. Les milieux de **transition** sont nombreux et largement étendus. La mosaïque d'habitats terrestres facilite la réalisation de fonctions écologiques complémentaires (augmentation de la redondance fonctionnelle, brassage génétique...). Les habitats du lit mineur permettent aux principales fonctions estuariennes de s'exprimer.

Cependant, dans un estuaire où les restaurations sont locales, parfois espacées les unes des autres, et en l'absence d'intervention sur les milieux, l'évolution naturelle des habitats est

incertaine : cela peut tout aussi bien fragiliser que renforcer la complémentarité des fonctions biologiques dans le temps et l'espace.

Schéma structurel de l'estuaire de la Seine en 2065 : estuaire jardiné (compartiments, réseaux et flux)



5. « L'estuaire sauvage » - Une image romantique

2065

Dans cette image, la restauration des **continuités hydromorphologiques** latérales et longitudinales de l'estuaire avec une **ampleur** importante est une priorité sur l'ensemble de l'estuaire. Certaines digues ont été renforcées sur des lieux stratégiques (très fortes contaminations, sensibilité aux niveaux d'eau,...) mais la plupart ont été cassées ou enlevées ; d'autres, non entretenues, se sont dégradées sous l'effet des écoulements de la plaine. Le chenal est profondément modifié : en grande partie comblé à l'aval, en cours de comblement à l'amont. Ces importantes modifications ont réduit la zone d'influence de la marée, qui correspond désormais aux 140 derniers kilomètres du fleuve.

Par ailleurs, les processus écologiques sont restaurés afin de favoriser le plus possible **l'auto-entretien**. Un changement de paradigme important, vers une plus grande forme de la naturalité, a permis de laisser plus de place à l'expression et à la régulation naturelle des phénomènes exceptionnels (type inondation). Choissant le recul stratégique, certaines infrastructures se sont progressivement retirées vers les terrasses et les plateaux, où les crues ne menacent pas.

Enfin, la présence de **grands herbivores sauvages** (cervidés, bovidés, équidés), qu'ils aient été introduits ou qu'ils soient revenus sur l'estuaire en colonisant progressivement l'Europe, renforce certaines chaînes trophiques sur les espaces terrestres de l'estuaire.

5.1. Conditions hydromorphologiques et sédimentaires

Suite à la disparition d'une majorité du linéaire de digues, **l'estuaire s'est largement comblé en aval**. Peu profond, anastomosé, l'estuaire forme, au gré des saisons, des méandres entre des bancs de sables plus ou moins atterris. Les données ne sont pas suffisantes pour déterminer si le mascaret est de retour, mais des études sont en cours. **Les surfaces intertidales ont très fortement augmenté** dans l'estuaire. Les estimations font état de 3000 ha de surfaces intertidales supplémentaires en 50 ans.

Les activités humaines n'ont plus d'impact sur l'expulsion ou le déplacement des sédiments, du fait de l'arrêt des activités de dragage et de l'entretien du chenal. Le **déplacement de sédiments** est donc majoritairement d'origine naturelle (transport sédimentaire dans le fleuve et ses affluents) et des aménagements permettent de restaurer certains axes de circulation sédimentaire de l'estuaire (Pont de Normandie sur pilotis par exemple).

La localisation et la forme des zones intertidales entraînent un piégeage de particules. L'augmentation des surfaces intertidales, la réduction de la profondeur du chenal et l'augmentation du niveau de la mer ont permis une **diminution de la densité du bouchon vaseux**. La modification du chenal et l'augmentation des forces de frottements de l'estuaire ont repoussé vers l'aval la limite amont de la zone d'influence de la marée. Les gradients de turbidité et de salinité évoluent encore (plutôt vers l'aval) sans que l'on sache encore très bien (au vu des autres facteurs d'influence : niveau d'eau, débit, frottements,...) si la tendance définitive, par rapport à la période pré-restauration sera vraiment à sa descente ou non vers l'aval et de quelle ampleur.

5.2. Caractéristiques biogéochimiques de l'eau et des sols

L'étalement des eaux du fleuve sur de grandes surfaces intertidales et l'augmentation du linéaire de ripisylves **assurent un bon taux d'épuration** des eaux de Seine, modifiant localement la concentration en oxygène dissous, la qualité microbiologique et l'équilibre des nutriments.

Suite à l'abandon des digues, quelques dégâts n'ont pas pu être évités, en particulier la remobilisation des sédiments contaminés n'a pas toujours été évitée. Lors d'événements

exceptionnels, l'érosion peut encore aggraver cette remobilisation. Certaines substances toxiques se retrouvent alors dans des compartiments de chaînes alimentaires à des concentrations parfois élevées (phénomène de bioaccumulation). C'est le cas en particulier des individus ou populations de grands herbivores souvent présents dans les parties hautes des zones intertidales pour s'alimenter.

Plusieurs facteurs contribuent à la **réduction des risques de contaminations bactériologiques et parasitaires d'origine fécale** : 1/ la diminution du ruissellement, 2/ une répartition diffuse des animaux (contrairement à des conditions d'élevage par exemple) et 3/ le recul stratégique.

5.3. Une diversité d'habitats estuariens

Milieux aquatiques et intertidaux

Les changements écologiques liés à la modification progressive du lit mineur du fleuve (abandon de l'entretien du chenal, des digues, des brèches...) se sont traduits par la restauration des **gradients** transversaux et longitudinaux de pentes, de courants et de substrats offrant une **très large surface d'habitats typiquement estuariens**, écotones entre fleuve et plaine alluviale. Les habitats tels que les vasières intertidales, les roselières, les prairies primaires et les forêts alluviales sont parmi les grands bénéficiaires de ces évolutions. Certains événements climatiques extrêmes, les épisodes récurrents de crues et d'étiage, les embâcles et les hauteurs de fonds, favorisent également la présence et « l'auto-entretien » **d'habitats pionniers** ouverts, contribuant à la forte production estuarienne, tels que les bancs et îlots.

L'augmentation du niveau de la mer et la variabilité annuelle et interannuelle des débits du fleuve et des affluents influencent la **répartition géographique de ces habitats**.

Là où les pressions de pâturage le permettent, des **prairies primaires** apparaissent sur l'estuaire. Leur qualité trophique est très liée à celle des eaux de la Seine. **Par ailleurs, les nombreux bras morts et « trous d'eau » isolés** constituent des écosystèmes aquatiques très riches qui servent d'habitats ou de refuges temporaires à une multitude d'espèces, d'abreuvoir ou de lieu d'alimentation pour la faune sauvage.

Alors que la **ripisylve** avait pratiquement disparue sur l'estuaire de la Seine il y a 50 ans, ces habitats sont désormais bien représentés sur les îles et les rives en amont de Vieux Port. Ripisylves et forêts alluviales connectées constituent des milieux abrités, intrinsèquement assez hétérogènes (embâcles, racines, dépressions, végétation interstitielle...) qui, par leur répartition tout au long de l'estuaire participent à la diversification des habitats aquatiques et forestiers et aux continuités écologiques.

La plaine alluviale

Le recul stratégique débuté il y a 15 ans a considérablement modifié les plaines alluviales, redonnant au fleuve de la surface pour son lit mineur et son lit majeur.

Globalement caractérisés par une forêt alluviale clairsemée, les milieux de type **pré-bois** dominant. Ils sont entretenus par la pression exercée par les grands herbivores sauvages, en libre circulation. Les populations de **cervidés** (chevreuils, cerfs, élans...) ont été rapidement reconstituées grâce à quelques introductions. Le loup est également un élément précieux de cette chaîne alimentaire, permettant de réguler les populations. Les grands îlots de prairies pâturées qui parsèment les pré-bois contribuent à la **mosaïque de milieux ouverts et fermés**. La gestion de l'homme sur ces espaces est assez faible, quelques battues sont organisées, quelques bois sont exploités et quelques chemins d'accès à l'estuaire sont entretenus. A l'échelle de l'estuaire, le gradient d'habitats laissant pleinement s'exprimer les milieux d'interfaces (lisères, schorre, prairies primaires,...) offre une forte richesse spécifique.

Le système tourbeux et notamment les tourbières fluviogènes sont aujourd'hui réactivées dans certains secteurs grâce à l'ouverture latérale du fleuve. Elles sont alimentées essentiellement par des eaux de nappe et ponctuellement par des crues du fleuve. Le cordon sableux protégeant

la grande tourbière du marais Vernier ayant cédé il y a 5 ans, l'ensemble de ce marais est désormais un vaste espace intertidal.

Les terrasses et coteaux

Historiquement les rives concaves ont subi une forte érosion par le fleuve qui a taillé des coteaux très abrupts dans le plateau crayeux, avec la présence de pitons et fronts rocheux. Ces espaces sont parfois soumis à d'importants éboulements en raison de l'érosion. Sur les extérieurs de boucles, se développent ainsi de nouveaux milieux calcicoles de pied de coteau - bois et pelouses.

Entre les espaces forestiers (forêt domaniale de Brotonne, de Roumare etc.) des terrasses, composés principalement de feuillus (hêtres, chênes, bouleaux et charmes), les pré-bois de la plaine, et les ripisylves ou bois alluviaux connectés de bord de fleuve, circule une grande faune dans laquelle on retrouve notamment des sangliers et de nombreux cervidés (chevreuils, cerfs, daims, élans...).

Sur ces terrains, la végétation en place limite les ruissellements et favorise l'infiltration, participant à la recharge de la nappe alluviale, essentielle pour atténuer ne serait-ce que très légèrement les étiages annuels et les épisodes de sécheresse importants.

Les espaces agricoles et urbains

Depuis 15 ans, la restauration de la submersibilité d'une grande partie de la plaine alluviale a transformé progressivement la plupart des anciennes zones de cultures et d'élevage en vastes espaces intertidaux ou de prés-bois. Protégés des submersions, les espaces de production agricoles se concentrent principalement autour des villes et villages. Les élevages sont généralement associés aux vergers.

Le recul stratégique a conduit à une augmentation des anciennes friches urbaines offrant des habitats écologiques nouveaux et diversifiés. Les centres urbains et industriels situés sur les terrasses et coteaux sont quant à eux, traversés par des corridors boisés le plus souvent situés le long des cours d'eau.

Quelques espaces industriels abandonnés et lourdement contaminés ou d'anciennes chambres de dépôts sont protégés des submersions pour éviter les diffusions en milieu naturel.

5.4. Connectivités, production et espèces

Les zones de **production primaire** pélagique (phytoplancton) se sont étendues grâce à la réduction de la densité du bouchon vaseux et à l'augmentation des surfaces de faible profondeur (meilleure pénétration de la lumière dans la masse d'eau). Les surfaces intertidales désormais présentes sur l'ensemble du cours de l'estuaire, associées notamment à la richesse accrue en carbone biodégradable (roselières et prairies connectées) expriment tout leur **potentiel productif**. Le peuplier noir séquanien qui avait quasiment disparu est désormais largement présent sur les ripisylves, grâce à la restauration de l'hydrodynamisme estuarien.

Les micro-organismes, la faune et la flore benthique, les amphibiens, les bryophytes, les oiseaux (limicoles, sternidés, laridés) mais également les populations de poissons migrateurs (esturgeon européen, saumon atlantique, alose feinte, lamproie fluviatile, lamproie marine et anguille européenne) sont aujourd'hui bien représentées. La banque de graines se recharge.

En milieux terrestres, le retour massif des grands herbivores a été déterminant pour plusieurs raisons. Il a permis le regain d'une **diversité et d'une productivité microbienne** détritivore, d'espèces coprophages et nécrophages à la base de plusieurs réseaux trophiques interconnectés. Ainsi, les taxons présents sur l'estuaire sont actuellement assez diversifiés que ce soit les niveaux supérieurs (oiseaux, mammifères...) ou non (insectes amphibiens, champignons, bryophytes, fougères, lichens, etc.). La biodiversité des sols est également très élevée et la biomasse des lombricidés s'est accrue, constituant une importante source de nourriture, notamment pour l'avifaune.. Les guildes de grands herbivores (bovidés, cervidés, équidés) sont des proies pour les grands carnivores. A l'échelle du complexe estuarien, la diminution des pressions de dérangement

a largement contribué au retour progressif des **prédateurs supérieurs**, que ce soit sur les milieux terrestres ou aquatiques. Ils contribuent à la régulation des populations. La fréquentation de plus en plus en amont de l'estuaire de la Seine par les mammifères marins et la recolonisation par certains grands poissons constituent aujourd'hui un indicateur du bon état de l'estuaire.

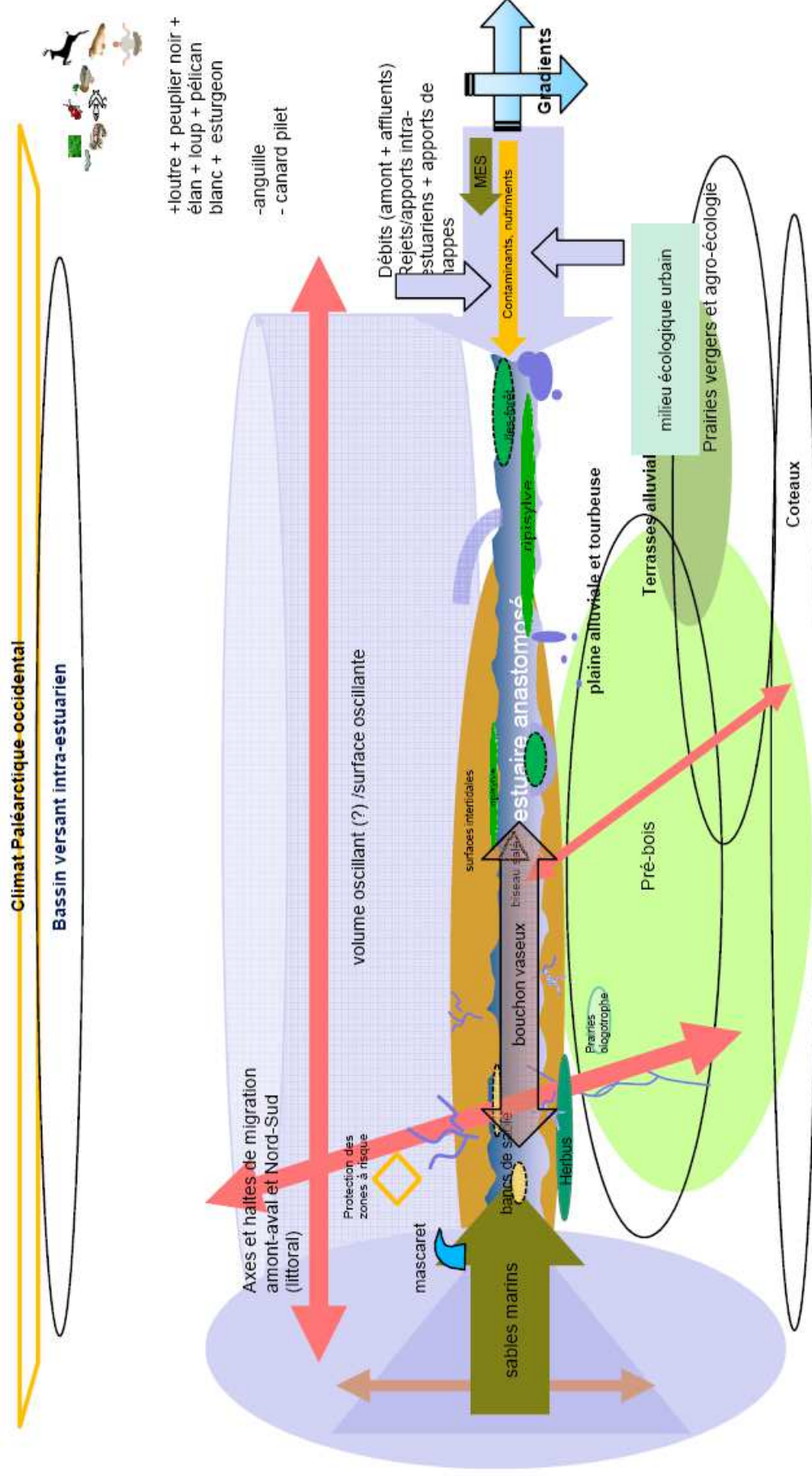
Les écotones qui se développent et évoluent naturellement entre fleuve et plaine, entre forêts, pré-bois et prairies, entre ville et campagne, favorisent la **circulation** de certaines espèces ubiquistes, au détriment des espèces inféodées à un type principal de milieu (râle des genêts, bécassine des marais, lapins, etc.). En plaine on constate une amélioration des continuités écologiques grâce à la réduction des perturbations anthropiques (obstacles, bruits, lumière, etc.). La morphologie du fleuve facilite quant à elle les déplacements des grands mammifères terrestres d'une rive à l'autre. L'estuaire est également un lieu de déplacement privilégié pour de nombreuses espèces de poissons (marins, amphihalins, limniques, estuariens). La restauration des gradients et l'abandon de la plupart des ouvrages hydrauliques (barrages, seuils sur les affluents, vannes ou buses à clapet...) ont permis **l'accès** à de nombreux types d'habitats aquatiques répartis dans le corridor fluvial. Complémentaires les uns des autres, ils ont favorisé le développement des populations de poissons, notamment de certains migrateurs (esturgeon européen, saumon atlantique, alose feinte, lamproie fluviatile, lamproie marine et anguille européenne) aujourd'hui bien représentées bien qu'encore sensibles à la qualité de l'eau. Environ 150 espèces de poissons (hors eaux douces) sont dénombrées sur l'estuaire.

Conclusion

Les nombreuses modifications qu'a pu subir l'estuaire de la Seine par le passé, ainsi que les pressions actuelles (les rejets de l'amont et les résidus de pressions anthropiques aujourd'hui dépassées ou contenues), n'ont pas empêché un effectif retour à une forte naturalité. Cette dynamique a été encouragée par le recul stratégique depuis les années 2030 et par la mise en œuvre d'actions de restauration ambitieuses et de grande ampleur. Cependant les évolutions de l'estuaire ont entraîné la remobilisation de quantités non négligeables de contaminants (pourtant contenus du mieux possible), entraînant quelques perturbations dans la dynamique de certaines populations animales.

Très différent de ce qu'il a pu être à différentes époques, très productif, le système estuarien de la Seine a recouvré aujourd'hui de **l'espace** permettant à de nombreux habitats de s'exprimer et d'évoluer librement, progressivement. En 2065, l'estuaire de la Seine semble avoir gagné en **résilience** vis-à-vis des changements, notamment climatiques.

Schéma structurel de l'estuaire de la Seine en 2065 : estuaire sauvage (compartiments, réseaux et flux)



Annexe A : Légende des schémas

