



© M. Veigollet/CRIF

Île-de-France in the Seine's hydrosystem

The urban zones of Île-de-France, which represent 80% of the urban area of the Seine basin, have a decisive influence on the entire hydrographic basin of the Seine and on the quality of its water. Through the issues involved in managing the quality of the water (nitric contamination, eutrophication, oxygen deficits, organic and metal contamination), the researchers of the PIREN-Seine program analyse the way in which urbanisation and farming affect the ecological functioning of the river system.

L'Île-de-France dans l'«hydrosystème Seine»

Michel Meybeck, Sylvain Théry, Gilles Billen, Josette Garnier, Philippe Boët, Marc Chevreuil, Michel Poulin, Stéphanie Even, Catherine Mignolet
Programme PIREN-Seine¹

Les zones urbaines de l'Île-de-France, qui représentent 80 % de la surface urbaine du bassin de la Seine, ont une influence déterminante sur l'ensemble du bassin hydrographique de la Seine et la qualité de ses eaux. À travers les enjeux de gestion de la qualité de l'eau (contamination nitrique, eutrophisation, déficits d'oxygénation, contaminations organique et métallique), les chercheurs du programme PIREN-Seine analysent la façon dont l'urbanisation et l'agriculture conditionnent le fonctionnement écologique du système fluvial.

(1) UMR Sisyphe 7619 Sisyphe, boîte 123, Tour 56, étage 4, 4, Place Jussieu, 75005 Paris, France
Email : Gilles.Billen@ccr.jussieu.fr
<http://www.sisyphe.jussieu.fr/internet/piren/>

Le bassin hydrographique de la Seine partage avec l'Île-de-France, qui en occupe le centre, la caractéristique de cumuler la présence d'une agglomération urbaine de 10 millions d'habitants parmi les plus importantes d'Europe et d'une agriculture parmi les plus intensives. Au cours des 30 dernières années, l'exacerbation de la concentration urbaine autour de Paris, avec ce qu'elle a entraîné d'infrastructures lourdes et les transformations de l'activité agricole dans le bassin, ont constitué deux facteurs déterminants de l'évolution de la qualité des eaux de la Seine. Passant en revue les principaux enjeux actuels de gestion de la qualité de l'eau dans le bassin de la Seine (contamination nitrique, eutrophisation, déficits d'oxygénation,

contamination en micropolluants organiques et métalliques...), nous analyserons ici comment agriculture et urbanisation conditionnent le fonctionnement écologique du système fluvial, depuis les ruisseaux de tête de bassin, jusqu'aux grands cours d'eau canalisés et aux zones côtières de la baie de Seine. Les peuplements de poissons nous serviront d'intégrateur de la qualité générale du milieu aquatique. Nous verrons que la région Île-de-France a une influence capitale sur l'ensemble du bassin, depuis l'amont par les ouvrages de régulation des débits, la navigation fluviale ou l'exploitation des granulats, jusqu'à l'aval lointain, puisqu'elle génère la plus grande part des flux polluants apportés par la Seine à la Manche.

Pression démographique

Sur un territoire de moins de 16 % de celui du bassin de la Seine, l'Île-de-France regroupe aujourd'hui plus de 70 % de sa population. Les données démographiques à l'échelle communale rassemblées par le PIREN-Seine permettent de dresser une cartographie précise de l'évolution au cours des trente dernières années, qui montre la forte croissance de la population de l'Île-de-France dans son ensemble et celle des gros pôles urbains régionaux à l'amont et à l'aval, contrastant avec le dépeuplement généralisé des arrière-pays en tête des bassins de l'Oise, de la Marne, de l'Aube, de la Seine et de l'Yonne.

Figure 1- Dynamique de la densité de population du bassin versant de la Seine et de l'Île-de-France entre 1970-2000

On observe bien le dépeuplement de Paris et de la petite couronne, au bénéfique de la grande couronne, ainsi que l'impact des politiques de création de villes nouvelles dans les années 1970. À l'amont du bassin, se distinguent essentiellement les gros pôles urbains régionaux (Reims, Troyes, Auxerre) et leurs arrière-pays peu dynamiques en terme de population, tandis que sur les parties ouest et nord du bassin, les vallées de l'Oise-aval, de la Seine-aval et de l'Eure présentent des dynamiques positives.

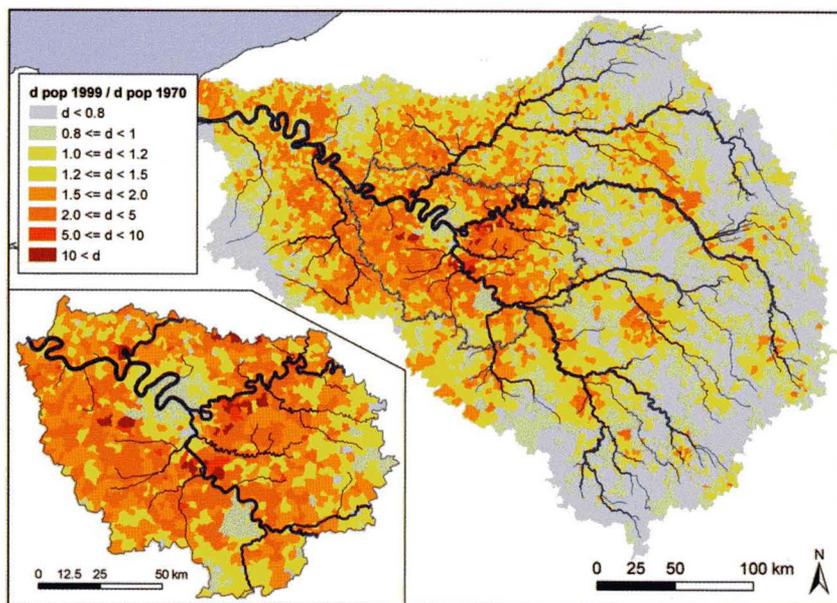
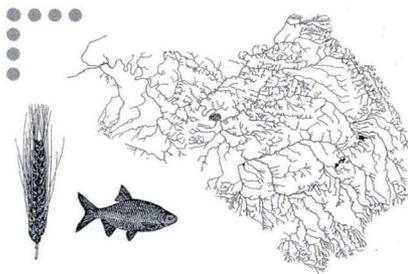


Tableau 1 - Population et usage du sol en Île-de-France et dans le reste du bassin de la Seine

	Population	Surface totale (km ²)	Zones urbaines	Terres arables	Prairies	Forêts	Zones humides
Île-de-France	10 877 632	12 080	16,1 %	60,4 %	0,4 %	22,4 %	0,6 %
Reste du bassin de la Seine	4 677 541	64 665	2,7 %	60,5 %	10,9 %	25,2 %	0,5 %
Total	15 555 173	76 744 km ²	3 691 km ²	46 418 km ²	7 097 km ²	19 001 km ²	396 km ²

Source : EEA, Corine Land Cover, 1996



Programme "PIREN-Seine"

Le PIREN-Seine est un Groupement de Recherche rassemblant des équipes du CNRS, du CEMAGREF, de l'INRA, du CEREVE et de diverses universités, grandes écoles et autres organismes de recherche. Il coordonne les travaux de près d'une centaine de chercheurs, en vue de comprendre et de modéliser le fonctionnement du 'système Seine', et de construire les outils prospectifs permettant d'évaluer les politiques publiques de gestion des ressources en eau à l'échelle du bassin. Ces travaux sont menés en concertation avec la plupart des acteurs publics ou privés de la gestion de l'eau (AESN, DIREN de Bassin, SIAAP, IIBRBS, SAGEP, SEDIF, Lyonnaise des Eaux, VNF, UNPG, CR Champagne-Ardenne...). Ces organismes sont les utilisateurs directs des résultats du programme et en assurent le financement. Le PIREN-Seine fait partie du Réseau de 'Zones Ateliers' mis en place par le CNRS. Les zones ateliers, sont des espaces de dimension régionale, siège de recherches interdisciplinaires à long terme sur les rapports entre les sociétés humaines et leur environnement.

Schématisation spatiale de l'impact anthropique sur le bassin de la Seine

Le bassin de la Seine est tout d'abord caractérisé par la place centrale de l'agglomération parisienne (10 millions d'habitants), une des plus grosses pressions urbaines potentielles, en Europe et dans le monde, compte tenu du faible débit naturel de la Seine (40 m³/s en basses eaux). Le reste du bassin est surtout agricole, avec quelques massifs forestiers, liés aux sols pauvres, dans le Morvan et sur les auréoles sablo-argileuses du bassin, ou issus de l'héritage des forêts de chasses royales en Île-de-France. Le bassin combine la plupart des pressions anthropiques rencontrées en Europe, à l'exception de celles liées à l'exploitation minière et aux grands barrages hydroélectriques.

Les barrages-réservoirs (Grands lacs de Seine), en dérivation sur la Seine, l'Aube et la Marne (figure A) (BRS, BRA, BRM) écrètent les crues et soutiennent le débit d'étiage qui est aujourd'hui de 90 m³/s à Paris, facilitant la navigation, permettant l'alimentation en eau potable et assurant une dilution minimale des effluents de stations d'épuration. Les tronçons de rivière court-circuités par ces barrages voient par contre leur qualité affectée négativement. Les barrages du Morvan (BP) assurent surtout une régularisation des débits de crue de l'Yonne. La canalisation à grand et moyen gabarit d'une grande partie du réseau séquanien d'ordre hydrologique 6 à 8 est aussi caractérisée par une succession de barrages-écluses et par une artificialisation des rives. L'habitat benthique, est, de plus, affecté par les dragages (100 000 tonnes de matériel enlevé annuellement). Le développement de l'agglomération parisienne et des infrastructures de transport (autoroutes, TGV) a conduit depuis les années 1950/60 à l'exploitation des granulats : d'abord dans le lit mineur puis, après l'interdiction de celle-ci, dans les sables et graviers sub-fossiles, déposés il y a 800 000 à 10 000 ans dans la plaine d'inondation, aujourd'hui «mitée» autour de Paris et le long des axes majeurs de transport fluvial comme dans la Bassée ou le Val de Reuil.

La qualité du milieu aquatique doit aussi prendre en compte les milliers de petits ruisseaux d'ordre 1 à 3 qui correspondent à plus de 80 % du linéaire du bassin (figure B).

Dans le centre de l'Île-de-France (figure C), la situation du milieu aquatique présente aussi une grande complexité spatiale et une forte dynamique qu'on peut schématiser suivant un code couleur de bleu (impacts anthropiques nuls) à noir (impacts extrêmes). Pour les grands axes fluviaux (Seine, Oise et Marne) les parties amont de l'agglomération parisienne ont maintenant une qualité générale acceptable. La Seine se dégrade progressivement entre Corbeil et l'injection en rive gauche des effluents de la Station Seine Aval (SSA) qui traite aujourd'hui 6,5 millions d'équivalents habitants. Quelques kilomètres à l'aval de cette injection, les eaux de l'Oise reçues en rive droite permettent une amélioration sensible de la qualité des eaux par dilution mais celle-ci reste mauvaise par bien des critères notamment les micropolluants, jusqu'à la station de Poses. Certaines prises d'eau fluviale (Ivry, Aubergenville) sont situées à l'aval des rejets des stations de traitement. En période d'orage, les effluents unitaires du centre de l'agglomération et les effluents pluviaux débordent directement dans le milieu fluvial où ils peuvent générer pendant quelques heures des débits supérieurs à 10 m³/s. L'installation récente de bulleurs d'oxygène dans le fleuve limite aujourd'hui le choc anoxique autrefois fatal pour les poissons dans les tronçons à l'aval des surverses de Clichy et de la Brèche.

Les petits cours d'eau d'Île-de-France présentent aussi une qualité très contrastée. Dans les massifs forestiers (Compiègne, Rambouillet, Sénart) certaines têtes de bassins peuvent présenter des «qualités de référence» (bruit de fond naturel, comme dans les autres ruisseaux forestiers du bassin) qui se dégradent vers l'aval (Yvette, Yerres) lorsque la pression urbaine augmente (figure C). D'autres têtes de bassin (Mauldre, Rû de Gally, Bièvre) malgré une capacité de dilution très limitée reçoivent d'emblée des effluents urbains. Il en résulte des qualités extrêmement dégradées (Rû de Gally). Enfin, d'autres rivières ont été graduellement recouvertes au XX^e siècle (Crould, Bièvre) puis transformées en collecteurs d'eaux usées et/ou de

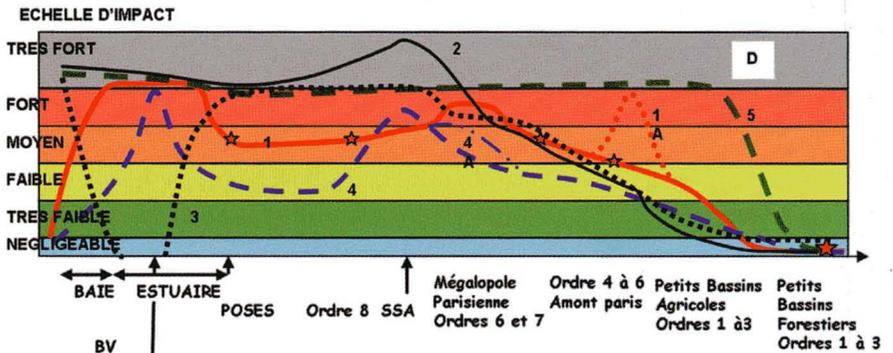
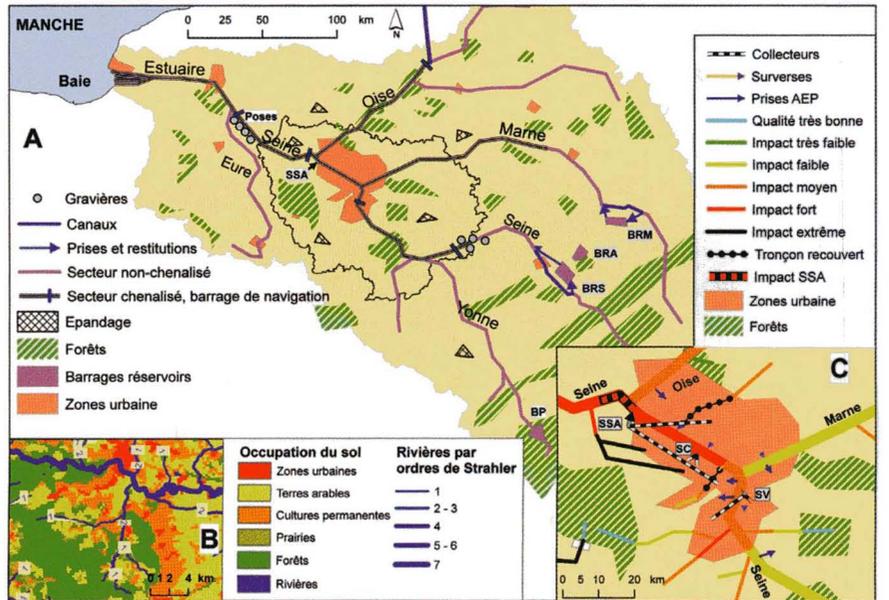
ruissellement. D'autre part, dans de nombreux cours d'eau franciliens la protection des zones inondables urbanisées a conduit au surcreusement artificiel du lit coupant les rivières et ruisseaux de leurs connexions latérales avec leur nappe d'accompagnement et dégradant ainsi l'habitat, même si la qualité chimique peut être satisfaisante. L'impact de l'agglomération parisienne sur l'amont du système fluvial se fait aussi par l'épandage des boues traitées de stations d'épuration et par les émissions de polluants atmosphériques.

La figure D propose une synthèse des problèmes de qualité, sous la forme d'un profil unique depuis les têtes de bassin situées en massifs forestiers et les petits cours d'eau soumis aux seules pressions agricoles, jusqu'aux impacts multiples de l'agglomération parisienne. L'échelle d'impact utilisée, inspirée du SEQ-eau et d'autres échelles européennes, n'est qu'indicative : elle est basée sur des indicateurs multiples et simplifie l'hétérogénéité spatiale soulignée précédemment pour faire apparaître la seule dimension amont-aval. Dans les massifs forestiers, la qualité physico-chimique et la qualité de l'habitat sont généralement excellentes (D1) : ces petits cours d'eau, qui ont souvent échappé à la surveillance réglementaire, peuvent servir pour établir les références de bassin demandées par la Directive Cadre Européenne. Dès qu'ils drainent des régions d'agriculture intensive, ces ruisseaux voient leur qualité (nitrates, pesticides, habitats) se dégrader fortement. Pour les nitrates, cette dégradation se maintient jusqu'à l'estuaire (D5).

L'eutrophisation (D3) ne se manifeste que lorsque les conditions hydrodynamiques favorables se surimposent aux niveaux élevés de phosphore, apportés par les rejets urbains. L'eutrophisation sera encore plus difficile à réduire à l'aval des rejets de Seine-aval en raison du maximum des concentrations en phosphore. La biomasse algale produite dans la Seine est équivalente en début d'été à la charge organique de 3 millions d'habitants non traités : elle sera complètement dégradée dans la zone estuarienne. En baie de Seine, les niveaux très élevés d'azote et de phosphore peuvent générer des floraisons d'algues toxiques dans ces eaux plus claires.

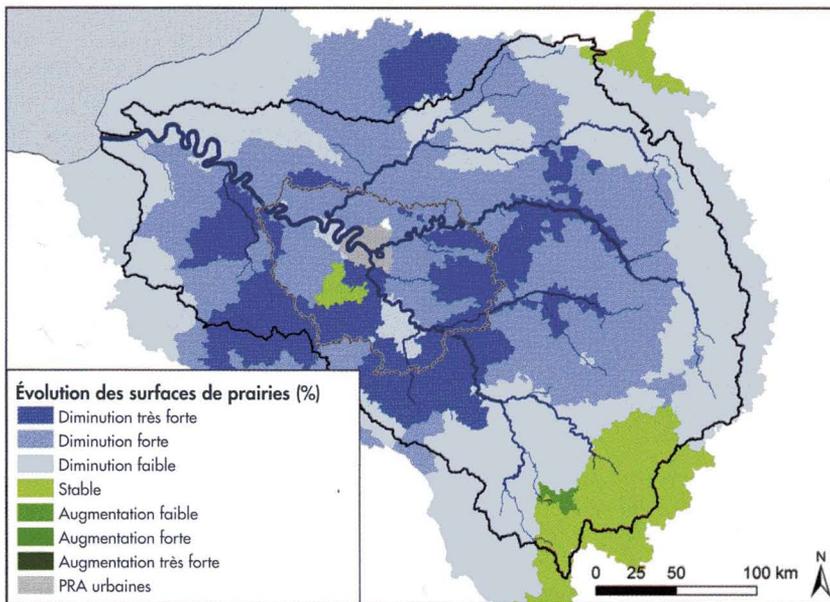
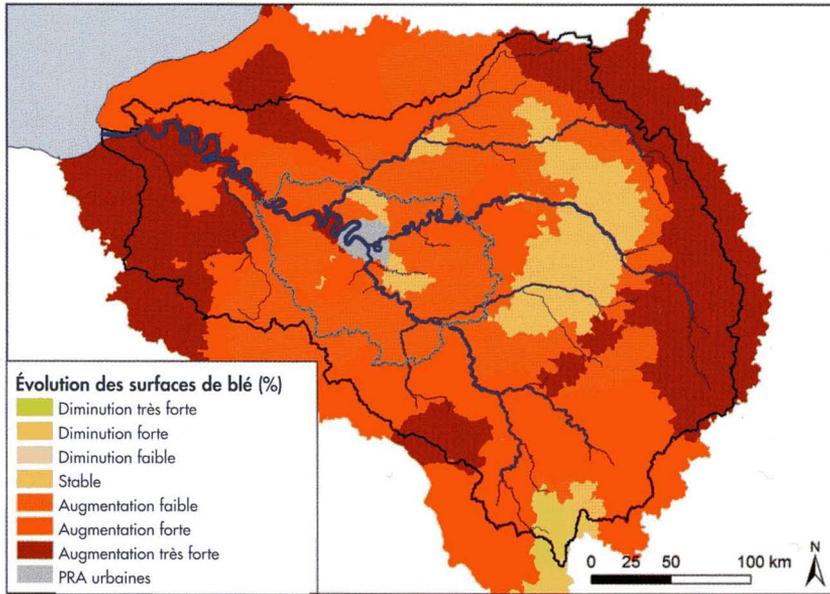
La contamination en micropolluants industriels et domestiques, comme les métaux augmente d'amont vers l'aval en fonction des pressions et présente un maximum à l'aval d'Achères. Les déficits en oxygène dissous, montrent également un pic à cet endroit qui augmente encore par temps de pluie dans l'ensemble de l'agglomération parisienne. La nitrification de l'ammonium rejeté en particulier par la station Seine-aval se traduit aussi par un déficit prononcé d'oxygène dissous dans l'estuaire au niveau de Rouen qui se cumule en été avec la dégradation de la biomasse algale résultant de l'eutrophisation.

Spatialisation de la qualité du milieu aquatique



A. aménagement du réseau fluvial, B. mosaïque d'occupation du sol et chevelu hydrographique, C. impacts dans l'Île-de-France, D. profil schématisique de certains impacts, depuis les têtes de bassins à la baie de Seine : 1. habitat, 2. métaux, 3. eutrophisation, 4. oxygénation, 5. nitrates.

Figure 2. Évolution de la part de surface agricole en prairies permanentes et en blé durant les 30 dernières années dans le bassin de la Seine.



L'évolution de l'utilisation des sols entre 1970 et 2000, étudiée sur les petites régions agricoles (Mignolet 2002) révèle une très forte dynamique, les prairies et les blés étant les systèmes de culture ayant évolué le plus. Les prairies sont en diminution légère (10 à 30 %) sur le pourtour du bassin, forte sur la Champagne crayeuse, le Vexin, la Beauce et très forte (plus de 50 %) sur la Brie, les vallées (Bassée, Marne), le Gatinais, etc. Elles n'augmentent que dans le Morvan et le plateau de Langres. Les surfaces en blé sont partout en augmentation, sur le Barrois (x 9), le pays d'Auge (x 4 à 8), la Champagne humide et la Thierarchie (x 6 à 4), la Normandie (x 6 à 5) et dans les départements des Ardennes, Haute-Marne et Vosges (x 3) ; seul le Morvan échappe à cette tendance.

La région Île-de-France est aussi dynamique que le reste du bassin : les prairies ont fortement diminué partout sauf en forêt de Fontainebleau/Hurepoix et le blé est en augmentation légère à forte. Par contre la SAU de la région a régressé, de 55,8 % à 50,5 %, alors qu'elle est restée remarquablement stable dans l'ensemble du bassin (92,7 %). (données RGA).

Pressions agricoles

Les zones urbaines de l'Île-de-France (16 % de la surface régionale) représentent 80 % de la surface urbaine du bassin. Les terres arables représentent 60 % de la surface de l'Île-de-France, soit une proportion sensiblement égale à celle du reste du bassin. L'Île-de-France est donc aussi agricole que le reste du bassin, mais les régions de Brie et de Beauce sont parmi celles qui, au cours des 30 dernières années, ont le plus été marquées par l'évolution vers une agriculture essentiellement céréalière, excluant progressivement les herbages (figure 2).

La contamination nitrique

Cette agriculture intensive affecte profondément les ressources en eaux souterraines et superficielles. Les petits ruisseaux de tête de bassin, à l'exclusion des ruisseaux forestiers, contiennent ainsi déjà l'essentiel de la charge azotée issue du lessivage des sols agricoles. Dans la plupart des zones de grandes cultures du centre du Bassin parisien, les eaux d'infiltration atteignent en moyenne, à la base de la zone racinaire, des concentrations en nitrates supérieures à la norme de potabilité de 50 mgNO₃/l. Si les eaux souterraines n'ont pas toutes encore atteint ce niveau de contamination, c'est à cause d'une part de la dilution au sein des masses d'eau souterraine avec des eaux d'infiltration forestières, et d'autre part de la durée du transit des nitrates dans la zone non saturée qui retarde leur arrivée dans la nappe, alors que les pratiques modernes d'agriculture ne se sont mises en place que depuis une trentaine d'années. Les modèles dont dispose le PIREN-Seine montrent que la poursuite des pratiques agricoles actuelles devrait amener le niveau de contamination moyen de l'aquifère du calcaire de Champigny à près de 65 mgNO₃/l, celui de la Craie de

Figure 3. Bilan actuel (1995-2000) des transferts d'azote dans le bassin de la Seine, exprimé en milliers de tonnes d'azote par an.

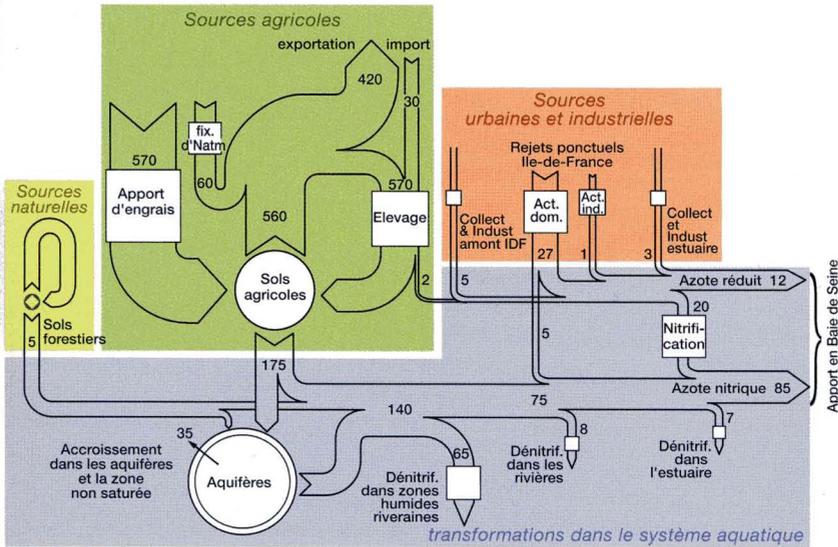
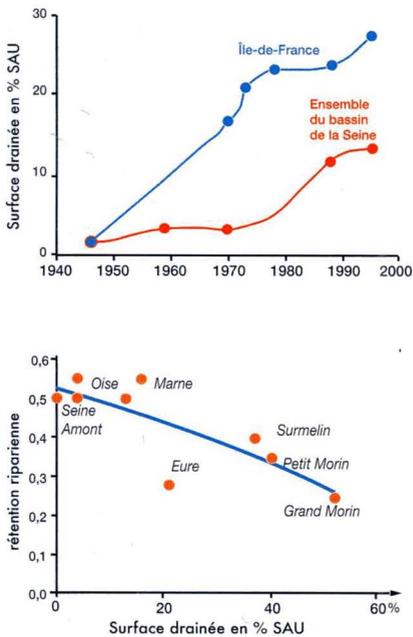


Figure 4. La dégradation des zones humides riveraines et leur court-circuitage par le drainage agricole, ont fait perdre au paysage une part importante de son pouvoir de rétention vis-à-vis des nitrates.



En haut, l'évolution des surfaces agricoles drainées (en pourcentage de la surface agricole utile) en Île-de-France et dans l'ensemble du bassin de la Seine.

En bas, on voit sur l'exemple de quelques bassins versants que l'extension du drainage agricole conduit à la diminution du pouvoir de rétention des zones humides riveraines vis-à-vis de l'azote.

Champagne à plus de 80 mgNO₃/l (Gomez et al., 2003) à l'horizon de plusieurs décennies.

Fort heureusement, les teneurs en nitrates des cours d'eau sont significativement inférieures à celles des eaux sous-raciales et phréatiques qui les alimentent, grâce à la dénitrification et au prélèvement par la végétation naturelle des zones humides qui bordent les ruisseaux. Près de 40 % des apports diffus des sols du bassin de la Seine sont ainsi éliminés avant même de rejoindre les eaux de surface par cet effet filtre que jouent les zones humides riveraines (Billen & Garnier, 1999 ; Sebilo et al., 2003)(figure 3). Et pourtant, en maints endroits, particulièrement en Brie, le drainage agricole, qui aboutit au court-circuitage des zones humides riveraines par les eaux d'infiltration, a considérablement réduit cet effet de filtre naturel(figure 4), par rapport à ce qu'il pouvait être dans le paysage rural traditionnel, caractérisé de plus par la présence d'innombrables étangs ajoutant encore à la rétention des flux d'eau et de nutriments.

Si les mesures destinées à réduire les pertes nitriques de l'agriculture sont indispensables (particulièrement celles qui visent, par le recours aux cultures

Les apports dominants sont ceux, diffus et sous forme de nitrates, liés au lessivage des sols agricoles, et donc très dépendants des conditions hydrologiques (les chiffres donnés correspondent à une situation moyenne). L'Île-de-France y contribue pour environ 30 %.

On voit que la dénitrification dans les zones riveraines des cours d'eau élimine une bonne moitié de ces apports agricoles. Les rejets ponctuels urbains, essentiellement sous forme d'ammonium, dont l'Île-de-France apporte 78 %, représentent tout de même près du tiers des apports totaux du fleuve à la mer.

intermédiaires, à limiter les périodes de sol nu), elles ne seront malheureusement suivies d'effets visibles dans la concentration des nappes phréatiques qu'après plusieurs décennies. Parallèlement, des mesures d'aménagement du paysage destinées à préserver ou à restaurer le caractère rétentif du bassin versant, tant vis-à-vis des flux d'eau que de nitrates, devraient être mises en place. La question des apports diffus de produits phytosanitaires (principalement des herbicides) se pose un peu dans les mêmes termes : les eaux contaminées en nitrates le sont systématiquement aussi en pesticides. Dans ce domaine toutefois, une réglementation stricte des pratiques pourrait être suivie d'effets plus immédiats, car la rémanence de ces molécules est moindre que celle des nitrates.

L'eutrophisation, ses effets et ses causes

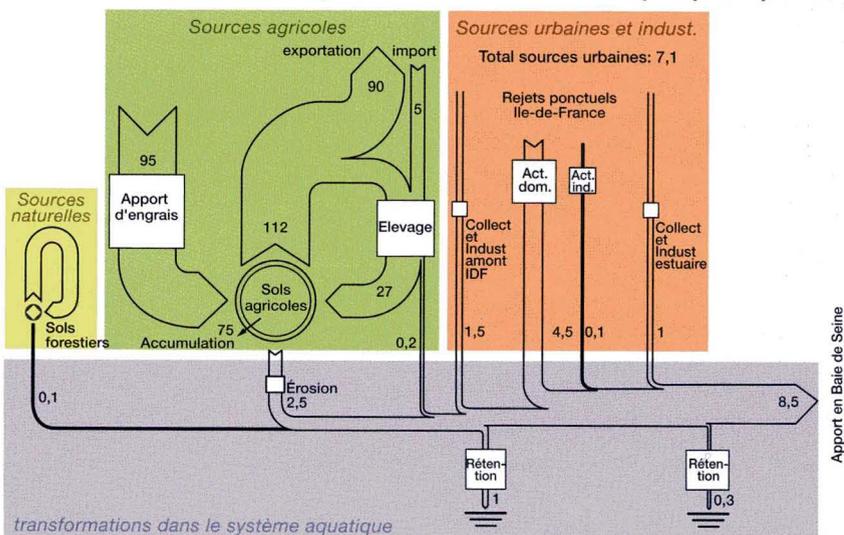
Dans la Seine, comme dans la plupart des grands bassins européens, les apports d'azote liés au lessivage des sols agricoles et les apports de silice, liés à l'altération des roches, sont tels que ces deux éléments sont largement excédentaires, dès les têtes de bassins, par rapport aux besoins de la croissance des végétaux aquatiques (Garnier et al., 1998). C'est alors le phosphore qui constitue l'élément

limitant potentiel de la croissance végétale en eau douce. Le phosphore est amené aux eaux de surface par l'érosion des sols agricoles, mais surtout par les rejets ponctuels d'eaux usées urbaines (figure 5).

Dans les petits cours d'eau amont, avec des apports urbains encore faibles, le phosphore, essentiellement d'origine agricole, limite fortement la croissance algale (Garnier et al., 1998). Plus en aval, à la faveur des apports urbains de phosphore, notamment dans les grands axes fluviaux canalisés où les conditions hydrauliques sont optimales, la croissance du phytoplancton forme des biomasses si importantes qu'elles posent des problèmes dans les traitements de potabilisation de l'eau : c'est par exemple le cas dans la Marne à Neuilly. Depuis les années 1980, les apports domestiques de phosphore ont été considérablement réduits, davantage d'ailleurs suite aux mutations du marché des poudres à lessiver avec et sans polyphosphates que par la déphosphatation en station d'épuration, encore peu pratiquée. Cette diminution reste toutefois insuffisante pour diminuer significativement les proliférations algales par temps sec. Les travaux de modélisation (figure 6) (Riverstrahler, Garnier et al., 2004) montrent que pour atteindre cet objectif il sera nécessaire, non seulement d'appliquer un traitement de déphosphatation à 90 % sur toutes les stations d'épuration du bassin, mais encore de réduire de 50 % les apports diffus de phosphore, par des mesures paysagères destinées à prévenir l'érosion des sols, qui ont accumulé de grandes quantités de phosphore depuis 50 ans.

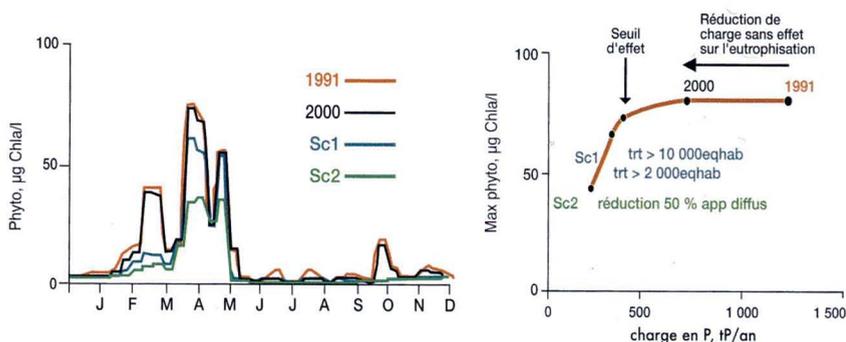
Tout à fait à l'aval du bassin, en baie de Seine, les problèmes d'eutrophisation liés aux apports fluviaux de nutriments prennent une autre forme. C'est là surtout l'excès d'azote et de phosphore par rapport aux apports naturels de silice qui provoque,

Figure 5. Bilan actuel (1995-2000) des transferts de phosphore dans le bassin de la Seine, exprimé en milliers de tonnes de phosphore par an.



Les apports de l'agriculture, par érosion des sols agricoles sont très dépendants des conditions hydrologiques (les chiffres donnés correspondent à une situation moyenne). Les apports dominants sont ceux des agglomérations urbaines. La rétention correspond à la sédimentation du phosphore particulaire dans les plaines alluviales ou dans les étangs et réservoirs.

Figure 6. Scénarios de la réduction des apports de phosphore sur l'eutrophisation de la Marne à Neuilly (d'après Garnier et al., 2004).



Simulation par le modèle Riverstrahler des proliférations algales (mesurées par la chlorophylle *a*) dans la Marne à Neuilly dans des conditions hydrologiques de temps sec (celles de 1991) et pour différents scénarios d'apports ponctuels et diffus.

(1) apports ponctuels de 1991 (3 100 kgP/jour) (2) apports ponctuels de 2000 (1 260 kgP/jour) (3) scénario 1 : apports ponctuels réduits par application systématique d'un traitement de déphosphatation en station d'épuration (200 kgP/jour) (4) scénario 2 : idem (3) mais avec une diminution de 50 % des apports diffus liés à l'érosion des sols agricoles.

surtout en année sèche, une prolifération d'algues non siliceuses indésirables, telles que les dinophysis, responsables de la contamination des coquillages par des toxines diarrhéiques. Là encore, la modélisation, couplant le modèle Riverstrahler avec un modèle de l'estuaire et de la baie

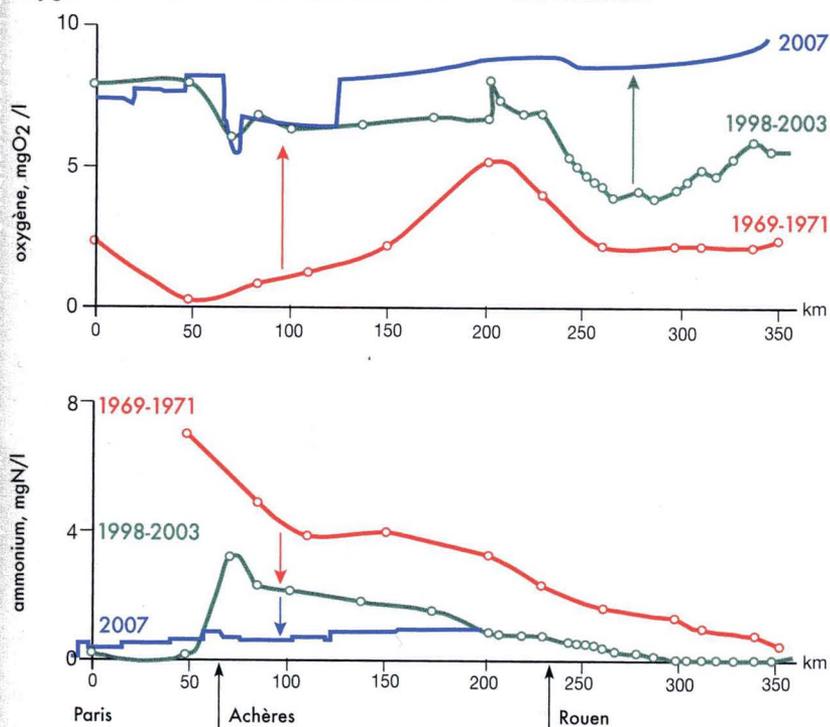
de Seine (SiAM-Elise : Cugier et al., 2005), permet de montrer que le seul traitement de déphosphatation à 90 % des eaux usées résiduaire urbaines sur l'ensemble du bassin permettrait de réduire de plus d'un facteur 10 l'occurrence de ces épisodes de prolifération d'algues toxiques.

La pollution organique et ammoniacale

Si le développement des algues est une des causes principales de dégradation de la qualité de l'eau dans les grands affluents en amont de Paris, les rejets urbains de l'agglomération parisienne y ajoutent encore leur effet sur la Seine fluviale. Au cours des années 1970, la Seine présentait en été un déficit important en oxygène dès l'aval de Paris (figure 7). L'amélioration du traitement des eaux usées (Achères III (1972), Achères IV (1978), Valenton 1A (1987), Valenton 1B (1992) puis Colombes (1998)) a progressivement conduit à une amélioration sensible de l'oxygénation et à une réduction des rejets d'azote ammoniacal dans ce secteur fluvial.

Par contre, dans le secteur estuarien, à l'aval de Rouen, persiste encore un déficit en oxygène très important lié pour l'essentiel à l'activité des bactéries nitrifiantes qui métabolisent, 100 km en aval de son point de rejet, l'ammonium apporté par les effluents d'Achères (Garnier et al., 2001), ainsi qu'à la minéralisation des débris planctoniques générés par l'eutrophisation fluviale. Le traitement tertiaire de nitrification prévu à l'horizon 2007 dans le cadre du 'scénario C' de l'assainissement de la région centrale d'Île-de-France, devrait remédier à cette situation, comme le montre le résultat de la simulation du scénario tendanciel 2015 réalisé à l'aide de la chaîne de modélisation SENEQUE, PROSE, SiAM (Even et al., 2004).

Figure 7. Évolution de 1970 à 2003 des concentrations moyennes estivales en oxygène et en ammonium dans la Seine de Paris à Honfleur.



Les profils montrent l'amélioration sensible intervenue depuis 30 ans dans le niveau d'oxygénation à l'aval immédiat de l'agglomération parisienne et l'amélioration supplémentaire, surtout dans la zone estuarienne, qui résultera de la mise en œuvre, dès 2007, d'une nitrification de l'ammoniaque à la station d'épuration d'Achères. Juillet à septembre (débits de l'ordre de 200 m³/s à Poses ; les années 2000 et 2001, caractérisées par des débits estivaux de plus de 400 m³/s, ont été exclues).

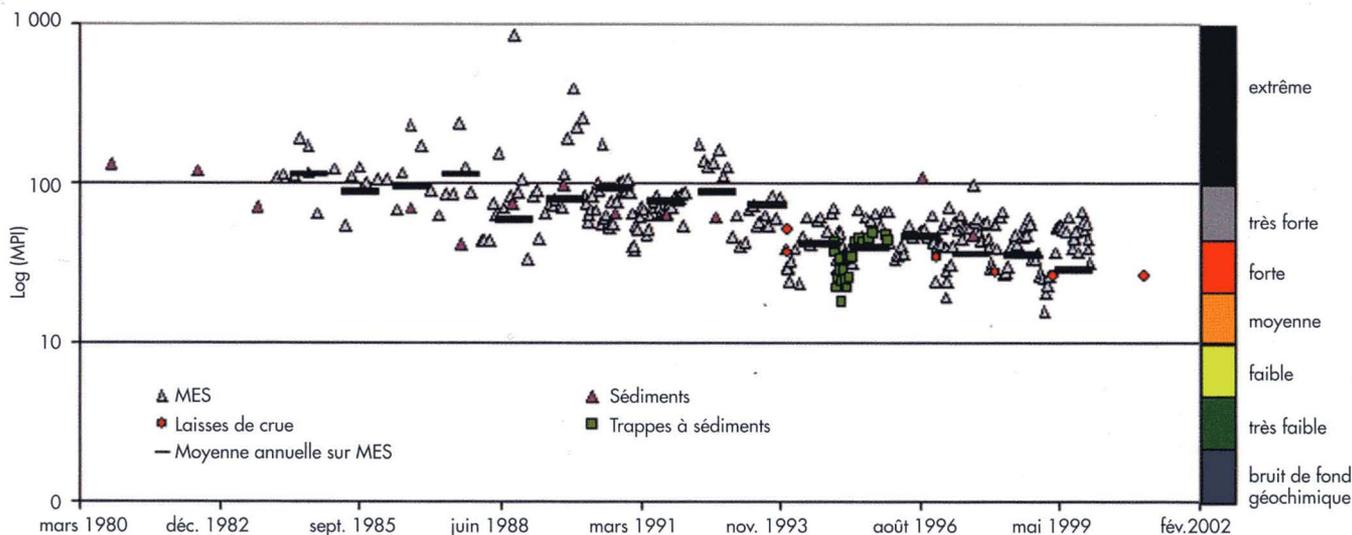
Ce scénario C prévoit aussi de nombreuses infrastructures permettant d'améliorer la collecte et le traitement des rejets urbains de temps de pluie. C'est en effet lors des épisodes d'orage que le délestage des différents réseaux d'assainissement apportent en Marne et en Seine des eaux non traitées, dont la charge polluante, considérable, est très pénalisante pour la qualité de l'eau. Des ouvrages de rétention (cumulant un volume de plus de 1 500 000 m³) sont donc projetés afin de stocker une partie de ces flux polluants, qui pourront alors être acheminés vers les différentes stations d'épuration pour un traitement différé.

Cela est d'autant plus nécessaire que les épisodes pluvieux et le ruissellement sont à l'origine de bouffées de pollutions en micropolluants organiques dans le réseau d'assainissement. Ainsi, par temps de pluie, les apports d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et polychlorobiphényles (PCB) sont respectivement 5 à 3 fois supérieurs à ceux de temps sec. L'accroissement du flux de pollution en HAP par temps de pluie est essentiellement lié au ruissellement sur les aires de circulation automobile, tandis que pour les PCB, il est directement lié à la charge polluante des eaux de pluie elles-mêmes, résultat du transport atmosphérique de ces polluants sur de longues distances (Garban et al., 2002).

La contamination métallique

Si l'évolution à long terme de la contamination métallique (Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) de la Seine montre une amélioration considérable, de l'ordre d'un facteur 8 en 20 ans, elle reste néanmoins l'une des plus élevée en Europe. L'Île-de-France a un poids majeur dans la contamination de la Seine en métaux lourds toxiques tels que le cadmium

Figure 8. Évolution de la contamination polymétallique de la Seine à Poses



(de Ponteves, 2005) L'indicateur de contamination basé sur Cd, Cu, Hg, Pb et Zn (Meybeck et al., 2004) est mesuré sur les sédiments déposés et les matières en suspension (MES) au sein du Réseau national de bassin et sur les laïsses de crues annuelles et les MES recueillies sur trappes par le PIREN-Seine. La variabilité temporelle fine de la contamination peut être élevée (MES, trappes) en raison de la dilution variable des rejets. La tendance générale est à la décroissance exponentielle de la contamination, extrême il y a 20 ans, forte à moyenne, actuellement.

(Cd), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le plomb (Pb) et le zinc (Zn). L'outil SEQUAMET (Gueguen et al., 2004), développé dans le cadre du PIREN-Seine, rassemble toutes les données permettant d'apprécier l'importance de cette contamination polymétallique, de dresser le bilan des apports métalliques des différents secteurs du bassin, d'évaluer la part de ces apports qui provient du bruit de fond 'naturel' (érosion des sols non-pollués) par rapport aux rejets anthropiques (agriculture, industries automobiles et de traitement de surface, ruissellement urbain, sources domestiques, hôpitaux, etc.) et enfin de proposer des indicateurs intégratifs de contamination métallique comme le MPI (Meybeck et al., 2004) (figure 8).

Les flux naturels ne représentent que 3 % (mercure) à 15 % (zinc) des flux moyens actuels de métaux exportés par la Seine, et l'Île-de-France contribue pour 73 à 80 % à la partie anthropique de ces flux, conformément au poids de sa population dans le bassin

Tableau 2 - Flux moyens annuels de métaux lourds particuliers (1995-2001) (en tonnes/an) apportés par les affluents de la Seine hors Île-de-France, comparés aux flux générés dans la région Île-de-France (flux calculés par SEQUAMET, Meybeck et al., in preparation).

Tonnes/an	Cadmium	Cuivre	Mercure	Plomb	Zinc
Île-de-France	1,60	52,3	0,52	55,9	196
Reste du bassin (*)	0,32	18,3	0,14	25,7	74
Ensemble du bassin à Poses	1,9	70,6	0,65	81,6	270
% Île-de-France	84	74	80	68,5	72,6
% flux naturels à Poses	7,8	14,4	3,1	16,7	15,2

(*) essentiellement Bourgogne, Champagne-Ardennes, Picardie (Eure et Risle exclus).

Tableau 3 - Flux moyens annuels de métaux lourds en excès par habitant (1995-2001) (en g/an.habitant)

	Cadmium	Cuivre	Mercure	Plomb	Zinc
Île-de-France	0,11	3,55	0,04	3,75	13,3
Reste du bassin	0,07	3,7	0,04	5,35	15,1
Ensemble du bassin à Poses *	0,11	3,6	0,038	4,0	13,6

* Eure et Risle exclus

(82,5 %). L'exemple du zinc est illustré par le bilan de la figure 9. Le tableau 3 montre les rejets actuels de métaux par habitant dans les différentes régions du bassin : si les flux de zinc sont étonnamment constants, l'Île-de-France rejette plus de cuivre et de

cadmium par habitant que les régions amont (Picardie, Champagne-Ardennes, Bourgogne) mais moins de mercure, alors que la Normandie rejette par habitant plus de cuivre et de cadmium et surtout plus de plomb, que les autres régions du bassin.

Le peuplement piscicole

Le peuplement de poissons représente l'indicateur biologique par excellence de la qualité du milieu aquatique. Certaines espèces sont très exigeantes en terme de qualité physico-chimique de l'eau, d'autres en terme d'habitat, enfin les migrateurs requièrent une continuité sur tout le réseau hydrographique qui n'est plus assurée sur la Seine en raison des barrages-écluses et des berges du Morvan.

En dépit des multiples modifications imposées par les hommes à leurs habitats, la plupart des espèces de poissons vivant dans nos cours d'eau avant la révolution industrielle sont encore présentes, à l'exception des migratrices, hormis l'anguille. Le profil moyen de la richesse spécifique actuelle en poissons traduit une nette dégradation de

la périphérie vers le centre du bassin, en Île-de-France, en relation avec le gradient de pression des activités humaines sur le milieu aquatique, en particulier immédiatement à l'aval de la station Seine-aval et dans le bouchon vaseux estuarien (localisé dans les eaux douces ou légèrement saumâtres).

Certaines espèces sont menacées de disparaître, soit parce que leur habitat est dangereusement fragmenté, comme pour la lote ou parce que les conditions indispensables à leur reproduction sont de moins en moins présentes, soit parce que leur habitat est dangereusement fragmenté, comme pour la lote ou parce que les conditions indispensables à leur reproduction sont de moins en moins présentes, soit parce que leur habitat est dangereusement fragmenté, comme pour la lote ou parce que les conditions indispensables à leur reproduction sont de moins en moins présentes.

Les petits cours d'eau amont souffrent des pollutions diffuses ou de l'érosion des sols, responsables du colmatage

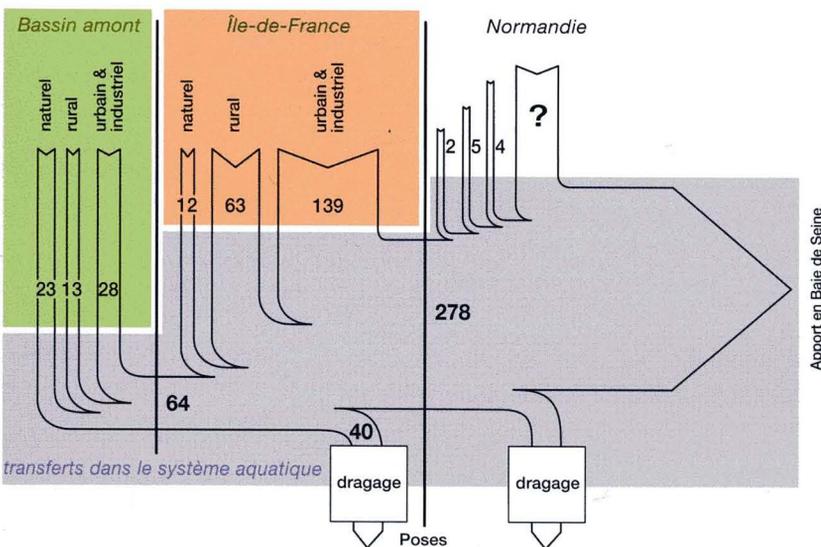
des fonds, autant de phénomènes qui pénalisent la reproduction de nombreuses espèces ainsi que leur développement. Aujourd'hui, en Île-de-France, il s'agit d'abord de préserver les têtes de bassin des cours d'eau les moins altérés, tels que l'amont du Petit-Morin ou l'amont de l'Yerres, tous deux classés zones Natura 2000, en raison de la présence d'espèces protégées en France par la loi de 1992, lamproie de Planer, vandoise, bouvière ou loche de rivière.

Sur les grands axes fluviaux navigués en amont de Paris, les efforts en matière de qualité physico-chimique de l'eau ont conduit à une amélioration sensible. Ce sont maintenant les aménagements pour les besoins de la navigation qui, en réduisant la diversité des habitats aquatiques, sont le principal facteur de la dégradation des peuplements piscicoles. C'est donc à leur réhabilitation qu'il convient aujourd'hui d'œuvrer par des mesures d'ingénierie écologique : réaménagement de berges, restauration de sites de ponte, reconnexion de bras-morts ou de zones humides rivulaires.

Les très nombreuses carrières de granulats ouvertes sur le réseau fluvial pourraient aussi jouer un rôle de refuge et de frayère, après un réaménagement approprié, compensant partiellement la perte de fonction écologique des zones humides inondables : un plan de gestion d'ensemble de ces milieux situés essentiellement en Île-de-France pourrait améliorer un habitat bien dégradé.

Depuis 1970, grâce aux efforts consentis en matière d'épuration, les conditions de survie du poisson se sont nettement améliorées alors que la pression potentielle urbaine n'a fait que croître en Île-de-France : 28 espèces de poissons sont maintenant dénombrées dans la région Île-de-France sur un total de 46 espèces pour l'ensemble du réseau hydrographique de la Seine.

Figure 9. Bilan des flux de zinc particulaire (tonnes Zn/an) transportés par la Seine à la Manche (période moyenne 1995-2001).



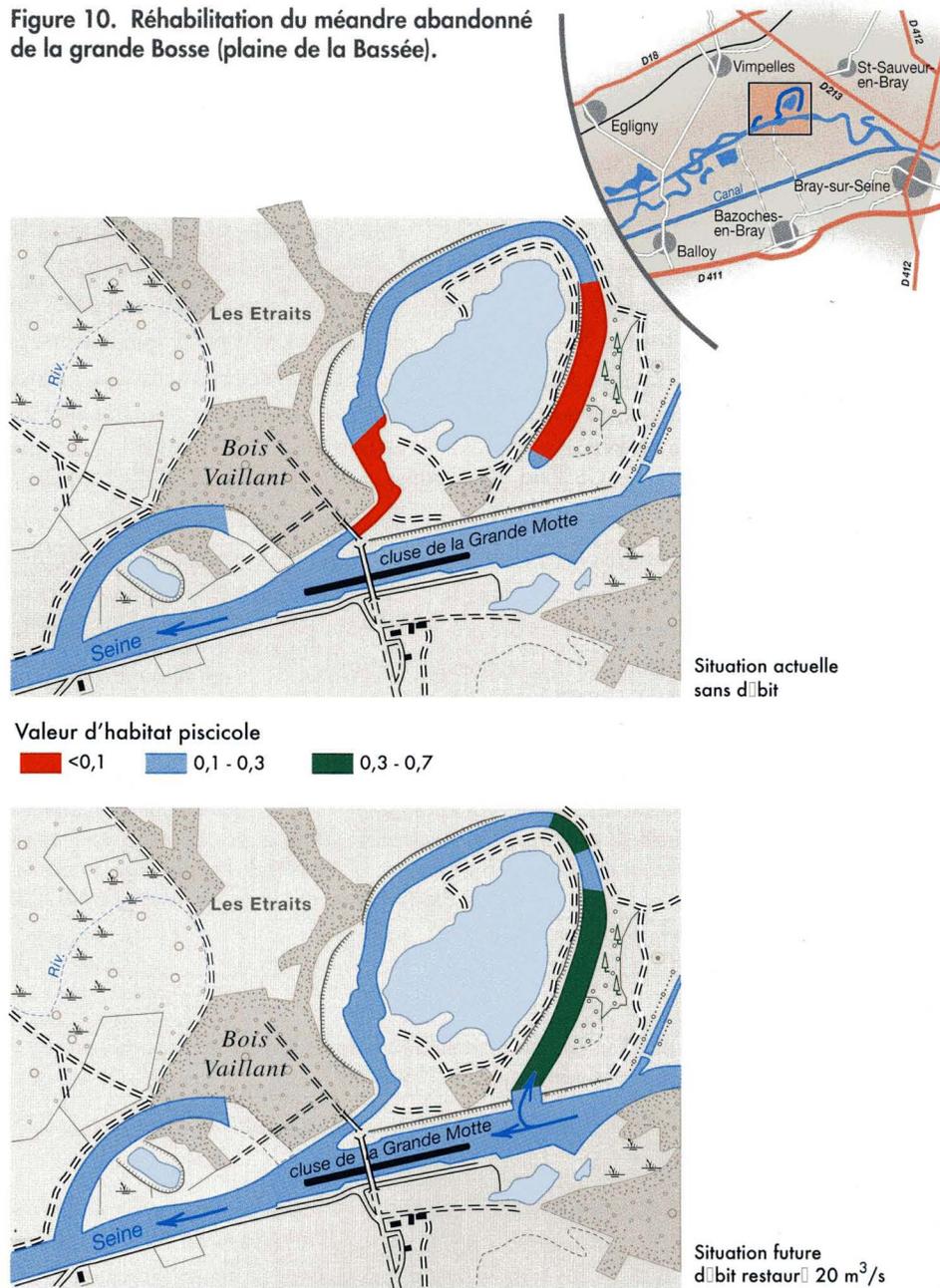
L'Île-de-France, malgré une réduction marquée des rejets en métaux de 1980 à 2002 reste la source dominante de la contamination en métaux du bassin de la Seine (Meybeck et al., Rpt PIREN, 2002).

Certaines de ces espèces restent encore fort rares en raison des impacts multiples des pressions anthropiques.

L'appréciation de la qualité générale des eaux du bassin de la Seine dépend du problème et de l'échelle spatiale considérés. Les problèmes liés aux nitrates, aux pesticides, à l'eutrophication, se posent déjà dans les bassins amonts et jusqu'en baie de Seine. Les problèmes d'oxygénation et de micropolluants toxiques sont plus typiques des secteurs aval, ou des petits cours d'eau en milieu périurbain.

En dépit d'une amélioration très sensible depuis 30 ans sur la plupart des problèmes de qualité du milieu aquatique dans l'Île-de-France, la situation reste préoccupante. La région Île-de-France exerce toujours un poids capital sur l'ensemble du bassin, même à l'amont de celui-ci, par la régulation hydrique, la navigation fluviale, l'exploitation des granulats, la réutilisation des boues traitées de station d'épuration, les émissions de contaminants atmosphériques (Thévenot et al., 2002 ; Garban et al., 2002 ; Blanchard et al., 2003). La région génère aussi environ 80 % des flux de la Seine en micro polluants et 37 % des flux d'azote : elle reste un acteur essentiel de la contamination de la Manche. Les enjeux actuels de gestion sont multiples. Il faut tout d'abord conserver la très bonne qualité de quelques têtes de bassins franciliens, exceptionnelle pour le bassin séquanien, mais encore mal connue. Il faut ensuite progresser dans le gain de qualité d'amont vers l'aval. La lutte réussie contre la pollution organique doit maintenant se poursuivre par la prise en compte de sources de dégradation insuffisamment considérées jusqu'ici : rejets de temps pluie, pollutions toxiques, modifications des régimes hydrauliques et homogénéisation des conditions de l'habitat physique des poissons.

Figure 10. Réhabilitation du méandre abandonné de la grande Bosse (plaine de la Bassée).



La grande Bosse fait actuellement l'objet d'une opération de réhabilitation, visant à y rétablir la connexion amont avec le cours de la Seine. Le modèle EVHA (EVALUATION de l'HABITAT piscicole) mis au point par le Cemagref, permet de montrer que la restauration d'un courant naturel permettra une amélioration sensible de la « valeur d'habitat » de ce méandre qui redeviendra ainsi plus propice à la reproduction des poissons pour tout un tronçon fluvial artificiel.

Références bibliographiques

- Billen, G. & Garnier, J. (1999). Nitrogen transfers through the Seine drainage network : a budget based on the application of the 'Riverstrahler model'. *Hydrobiologia*, 410, 139-150.
- Billen, G., Garnier J., Deligne C., Billen, C. (1999). Estimates of early industrial inputs of nutrients to river systems : implication for coastal eutrophication. *The Science of the Total Environment*, 244:43-52 .
- Billen G., Garnier J., Ficht A. , Cun C. (2001). Modelling the response of water quality in the Seine Estuary to human activity in its watershed over the last 50 years. *Estuaries* 24: 977-993
- Blanchard M, Teil MJ, Ollivon D, Legenti L, Chevreuil M (2003) : PAHs and PCBs in Paris (France) waste. Impact upon wastewater and sewage sludge qualities. *in press Water Research*.
- Cugier, P., Billen, G., Guillaud, J.F., Garnier, J., Ménesguen, A. (2005). Modelling eutrophication of the Seine Bight under present, historical and future Seine river nutrient loads. *Journal of Hydrology* (in press)
- Even S., Mouchel J.M., Servais., Seidl M., Poulin M. (2004). Modelling oxygen deficits in the Seine River downstream of combined sewer overflows, *Ecological Modelling*, (in press).
- Garban, B., Ollivon, D., Teil, M-J., Blanchard, M., Blanchoud, H., Moteley-Massei, A., Chesterikoff, C., Hanselin, L., Rolet, J., Le Genti, L., Chevreuil, M., (2002). Activités humaines et transferts de polluants organiques persistants (POP), Rapport d'activité PIREN-Seine, 36p.
- Garnier, J., Billen, G., Hanset, P., Testard, P. & Coste, M. (1998). Développement algal et eutrophisation dans le réseau hydrographique de la Seine, In *La Seine en son Bassin: Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, M. Meybeck , G. de Marsily & E. Fustec, (eds) Chapitre 14, pp. 593- 626.
- Garnier, J., Némery, J., Bilen, G. & Théry, S. (2005). Nutrient dynamics and control of eutrophication in the Marne River system: modelling the role of the exchangeable phosphorus. *Journal of Hydrology* (in press)
- Garnier, J., Servais, P. Billen G., Akopian, M. & Brion, N. (2001). Lower Seine river and estuary (France) carbon and oxygen budget during low flow. *Estuaries*. 24 : 964-976.
- Gomez E., Ledoux E., Viennot P., Mignolet C., Benoît M., Bornerand C., Schott C., Mary B., Billen G., Ducharme A., Brunstein D.,(2003). Un outil de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique : application au bassin de la Seine, *La Houille Blanche*, n°3/2003, p. 38-45.
- Meybeck et al., (2004) The geochemistry of Seine River Basin particulates. Part I : Spatial and temporal declines in Cd, Cu, Hg, Pb and Zn (1980-2000) based on the analysis of various sample media. *Sci. Total Environment*. (submitted).
- Mignolet, C., Schott, C., Benoit, M., (2002). Dynamique des pratiques agricoles. Rapport d'activité PIREN-Seine, 19 p.
- Ollivon D., Blanchoud H., Motelay-Massei A. and Garban B. (2002). Atmospheric deposition of PAHs to an urban site, Paris (France) *Atmospheric Environment*, 36 (17)2891-2900.
- de Pontevès C., Guéguen Y., Bacq N., Théry S., Meybeck M.(2005). SequaMet : un système expert pour le diagnostic de la contamination métallique dans le bassin de la Seine. Rapport d'activité PIREN-Seine.
- Sebilo, M., Billen, G., Grably, M., Mariotti, A. (2003). Isotopic composition of nitrate-nitrogen as a marker of riparian and benthic denitrification at the scale of the whole Seine River system. *Biogeochemistry*, 63: 35-51.
- Thévenot, D., Meybeck, M., Lestel, L. (2002). Métaux lourds : des bilans en mutation, Rapport d'activité PIREN-Seine, 78 p.