



eau
seine
NORMANDIE

PROGRAMME PIREN-SEINE

Programme Interdisciplinaire de Recherche
sur l'Environnement de la Seine

Le bassin de la Seine

Découvrir les fonctions
et les services rendus
par le système Seine

Sous la direction de Gilles Billen

ENSEMBLE
DONNONS
vie à l'eau

Agence de l'eau

SSO
RES

#1

L'Agence de l'eau Seine-Normandie a pour mission, conjointement avec les acteurs de l'eau, de conduire les eaux du bassin de la Seine vers le bon état écologique.

Depuis 1989, le Programme de Recherche Interdisciplinaire sur l'Environnement de la Seine (PIREN-Seine) nous aide à mieux comprendre le fonctionnement du bassin et contribue aux décisions de l'Agence.

Ce programme de recherche a apporté un éclairage décisif sur la manière dont les rivières et les zones humides participent à l'épuration de nos effluents, sur la nécessité de réduire nos rejets en phosphore pour limiter l'eutrophisation, sur l'impact attendu du changement de pratiques culturales afin de réduire la contamination des eaux par les nitrates, etc.

Partenaire du PIREN-Seine, l'Agence de l'eau souhaite valoriser l'important travail accompli et soutenir les recherches futures en contribuant à la publication de ces travaux.

C'est l'objet de cette collection que de faire partager au plus grand nombre ces connaissances longuement mûries.

Guy Fradin

Directeur de l'Agence de l'eau Seine-Normandie

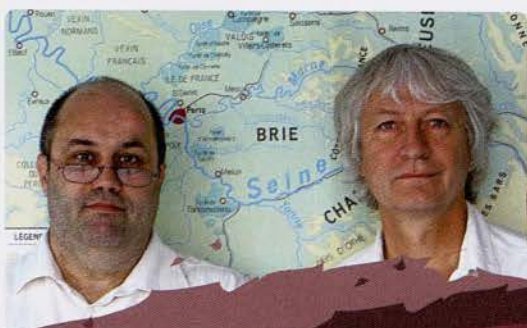
Le programme de recherche PIREN-Seine est né en 1989 de la volonté du CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) de faire se rencontrer les chercheurs de diverses disciplines (une centaine de personnes appartenant à une vingtaine d'équipes) et les acteurs qui ont en charge la gestion des ressources en eau (une dizaine d'organismes publics et privés) dans cet espace de 75 000 km² constituant le bassin hydrographique de la Seine. En s'inscrivant dans la durée, tout en redéfinissant périodiquement ses objectifs et ses orientations, le programme, basé sur la confiance et le dialogue, a permis l'émergence d'une culture scientifique partagée entre gestionnaires et scientifiques. Les recherches à caractère appliqué sont menées dans un cadre coordonné privilégiant le développement de notre capacité à analyser, à comprendre et à prévoir le fonctionnement de cet ensemble régional d'écosystèmes qu'est le bassin de la Seine : comment ce territoire, avec sa géologie, son climat, sa végétation, mais aussi avec ses activités agricoles, domestiques et industrielles, fabrique-t-il à la fois le milieu aquatique lui-même et la qualité de l'eau de nos rivières et de nos nappes ?

Par un pilotage souple et participatif, le programme a su concilier, au sein d'une même démarche, les exigences d'une recherche fondamentale qui vise à fournir les clés pour comprendre, avec celles de la demande sociale qui attend des outils pour guider l'action.

Mais la demande sociale ne s'exprime pas seulement par le questionnement technique des gestionnaires. Elle passe aussi par le débat public avec les élus, les associations, les citoyens. L'état présent du milieu aquatique résulte de l'action millénaire de l'homme sur son environnement. Sa qualité future dépendra de ce que nous en ferons ; ce qui appelle un débat sur la manière dont nous voulons vivre sur le territoire qui produit l'eau que nous buvons, compte tenu des contraintes que nous imposent la nature et la société. L'ambition du PIREN-Seine, en tant que programme de recherche publique engagé, est aussi d'éclairer un tel débat. C'est dans cet esprit que nous avons entrepris la publication de cette collection de travaux. Elle veut offrir aux lecteurs, sur les sujets porteurs d'enjeux en matière de gestion de l'eau, les clés de la compréhension du fonctionnement de notre environnement.

Jean-Marie Mouchel et Gilles Billen

Direction du Programme PIREN-Seine



La collection du programme PIREN-SEINE

Cette collection analyse différents aspects du **fonctionnement du bassin de la Seine** et de ses grands affluents, soit 75 % du territoire d'intervention de l'Agence de l'eau Seine-Normandie. D'autres programmes, en liaison avec le PIREN-Seine, s'intéressent à des régions ou des problématiques différentes. Ainsi Seine-Aval se focalise sur l'estuaire de la Seine et édite une collection similaire depuis 1999.



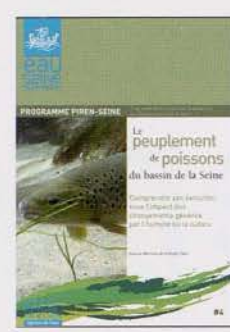
#1 - Le bassin de la Seine



#2 - L'hydrogéologie



#3 - La pollution par les nitrates

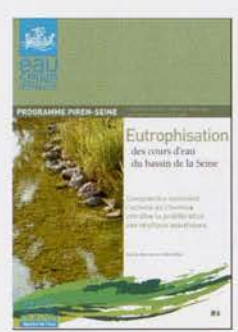


#4 - Le peuplement de poissons



#5 - L'agriculture

DREAL NORMANDIE
SMCAP/BARDO
N° d'inventaire : **7338**



#6 - L'eutrophisation des cours d'eau



#7 - Les métaux







#8 - La contamination microbienne



#9 - La micro pollution organique

D'autres fascicules sont à paraître dans les domaines suivants : les zones humides, les pesticides, l'histoire de Paris, les petites rivières urbaines et les risques écotoxicologiques.

La couleur de chaque fascicule renvoie à l'un des quatre objectifs principaux de l'Agence de l'eau :

-  Développer la gouvernance, informer et sensibiliser sur la thématique de l'eau
-  Satisfaire les besoins en eau, protéger les captages et notre santé
-  Reconquérir les milieux aquatiques et humides, favoriser la vie de la faune et de la flore
-  Dépolluer, lutter contre les pollutions de l'eau et des milieux aquatiques

Découvrir les
fonctions
et les
services
rendus par le
Systeme Seine

Auteurs :

Gilles Billen ⁽¹⁾, Marie Silvestre ⁽¹⁾, Sabine Barles ⁽²⁾, Jean-Marie Mouchel ⁽¹⁾,
Josette Garnier ⁽¹⁾, Florence Curie ⁽¹⁾ et Philippe Boët ⁽³⁾

Numéro ISBN : 978-2-918251-00-2

Numéro ISSN : 1968-5734

Dépôt légal : juin 2009

[1] UMR Sisyphe, UPMC-CNRS, Paris

[2] LTMU, Institut Français d'Urbanisme, Champs-sur-Marne

[3] Cemagref, Écosystèmes estuariens et poissons migrateurs amphihalins, Bordeaux

RÉSUMÉ

Ce fascicule donne un aperçu des diverses thématiques du programme PIREN-Seine, thématiques elles-mêmes organisées autour des principales fonctions assurées par le « Système Seine ». Il représente ainsi une introduction à l'ensemble de la collection PIREN-Seine.

Le cadre géographique est d'abord posé. Le réseau hydrographique de la Seine est au cœur d'une vaste cuvette sédimentaire qui recueille les eaux de pluies et les achemine jusqu'au Havre. Dans cet espace irrigué par les cours d'eau, l'homme a construit au fil des siècles un environnement anthropisé. Quelle population occupe aujourd'hui le bassin de la Seine, comment évolue-t-elle, comment est-elle répartie dans l'espace ?

Nourrir les hommes est la première fonction attendue du territoire. Le développement de l'agriculture, au cours d'une longue histoire, a complètement façonné le paysage de tout le bassin versant. Ce bassin a longtemps été l'espace nourricier des villes et de Paris en particulier. Aujourd'hui, si le bassin fournit toujours l'essentiel de l'eau potable des habitants, la production agricole n'est plus tournée principalement vers les besoins locaux, et s'ouvre sur les marchés mondiaux. Loger les hommes, les vêtir, les équiper sont d'autres fonctions remplies jadis principalement grâce aux seules ressources de l'espace du bassin, aujourd'hui assurées en puisant dans des réserves plus lointaines.

Transporter les biens de leur lieu de production à leur lieu de consommation, s'approvisionner en énergie, éliminer les déchets que génèrent production et consommation, sont autant de nouvelles vocations qui découlent de ces fonctions primaires.

Si pour remplir toutes ces missions, l'homme a complètement artificialisé son environnement, il a cependant toujours besoin de respirer de l'air pur, de boire de l'eau saine, de se ressourcer dans une nature apaisante. Il souhaite aussi préserver la biodiversité des organismes sauvages et domestiques qui constitue un patrimoine irremplaçable et participe parfois plus qu'on ne le croit à la réalisation de fonctions essentielles.

Comment gérer l'espace régional pour laisser coexister ces multiples fonctions, sans que l'une d'elle domine l'autre, sans empiéter non plus, en puisant trop largement dans les ressources extérieures, sur le fonctionnement d'autres systèmes régionaux ? Tel est le difficile enjeu d'une gestion durable de notre environnement. Parce que l'eau participe de toutes les fonctions que nous avons évoquées, la gestion des ressources hydriques, en quantité et en qualité est au centre de toutes ces questions. Le « bon état écologique » des masses d'eau, objectif imposé par la Directive Cadre européenne sur l'Eau, est ainsi étroitement lié au bon fonctionnement du système bassin versant.



SOMMAIRE

7 Introduction

8 BREF HISTORIQUE DU PROGRAMME PIREN-SEINE

SITUER

12 Le cadre géographique : le milieu et son occupation par les hommes

13 Les contraintes de la géologie et de l'hydrologie

14 La population du bassin de la Seine

- > Un bassin en marge de la dorsale européenne
- > Une population importante, organisée en fonction des cours d'eau
- > Une évolution constante vers l'urbanisation

DÉFINIR

18 Les fonctions primaires : se nourrir, se loger, s'équiper

19 Nourrir la Ville

- > Les besoins en nourriture
- > Les besoins en eau

22 LES GRANDES PHASES DU DÉVELOPPEMENT DE L'AGRICULTURE OCCIDENTALE

27 Bâtir la Ville

- > La pierre et le béton
- > Les autres matériaux de construction

29 Produire l'équipement

- > L'emploi dans le bassin de la Seine
- > Le métabolisme du plomb dans le bassin de la Seine
- > L'approvisionnement en coton et son empreinte hydrique

ASSURER

32 Les fonctions auxiliaires : transport, énergie, élimination des déchets

33 Les voies de transport

35 La consommation énergétique dans le bassin de la Seine

36 Les déchets urbains

- > Les déchets solides ménagers et industriels banals
- > Le traitement des eaux usées

40 ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ DE LA SEINE EN LIAISON AVEC L'ASSAINISSEMENT DE L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE

PRÉSERVER

42 L'air, l'eau, la faune et la flore

43 Émissions et transferts de polluants atmosphériques

- > Émissions et transferts de polluants atmosphériques
- > Émissions de gaz à effet de serre

44 La production d'eau potable par le bassin versant

46 Biodiversité

48 Conclusion

49 L'empreinte écologique du bassin de la Seine

50 La pluri-fonctionnalité des espaces : un enjeu pour l'aménagement durable du territoire

INTRODUCTION

Dans l'imaginaire collectif, la notion de source, lieu d'un perpétuel recommencement, symbole d'absolue pureté, revêt une permanence remarquable. «La» source de la Seine, en Côte d'Or, sur le plateau de Langres, fut l'objet dès l'époque gauloise, gallo-romaine puis chrétienne, d'un culte populaire dont témoignent les ex-voto de bois que l'on y a retrouvés en abondance : y furent adorés tour à tour la déesse Isicauna, la nymphe Sequana, puis Saint-Seine. Lorsqu'en 1865, Haussmann acquit pour le compte de la Ville de Paris, le Domaine des Sources de la Seine, et y fit ériger un monument kitsch à la gloire de la déesse Sequana, c'est la Ville Lumière qui tentait de s'approprier symboliquement tout le fleuve, dès sa sortie de terre.

Mais cette idée naïvement dominatrice se heurte à une réalité tout à fait différente. Un fleuve n'a pas une source, mais une multitude de sources, réparties sur l'ensemble du territoire -le bassin versant- drainé par un réseau de cours d'eau qui forment les rivières et le fleuve. Rien d'objectif ne permet de privilégier l'une plus que les autres sources comme étant celle du fleuve, de même qu'il est vain de se demander si c'est la Seine, l'Aube ou l'Yonne qui coule à Paris : dans certaines régions du monde, les rivières changent de nom après chaque grande confluence.

La notion de bassin versant* est relativement jeune dans l'histoire des sciences. Descartes défendait encore l'idée aristotélicienne selon laquelle le débit des rivières trouverait son origine dans l'eau des océans qui, après distillation par la chaleur du centre de la terre, s'écoulerait par les sources, vues comme des trous dans des montagnes creuses ! Ce sont les mesures d'Edme Mariotte et de Pierre Perrault (le frère du conteur) à la fin du XVII^e siècle qui établiront que la pluie sur le bassin de la Seine suffit à en assurer le débit, introduisant alors l'idée, aujourd'hui si familière, de cycle externe de l'eau. Mais cette notion entraîne une autre de première importance : si l'eau d'une rivière provient de la pluie infiltrée à travers les sols de toute l'étendue de son bassin versant, alors la composition de cette eau, et les organismes qui s'y développent, reflètent, en les intégrant dans l'espace et le temps, les caractéristiques de ces sols, la nature des roches du bassin versant, sa végétation et les activités humaines, agricoles, domestiques ou industrielles qui s'y déroulent. L'eau des rivières est ainsi le miroir de leur bassin versant. À qui sait lire dans ce miroir, elle offre un point de vue privilégié sur le fonctionnement d'ensemble d'un territoire régional, cette mosaïque d'écosystèmes urbains, ruraux et industriels que l'homme a construits tout au long de son histoire. Un système fluvial est donc un ensemble de milieux terrestres plus ou moins anthropisés et d'infrastructures humaines, structurés par un réseau de cours d'eau, en étroite interaction, échangeant de la matière avec l'atmosphère et les nappes souterraines.

Le « Système Seine » s'étend ainsi sur 75 000 km² drainés par 23 000 km de cours d'eau au travers desquels s'écoulent chaque année 14 milliards de m³ d'eau. Cette surface est habitée par une population de 16 millions de personnes qui récoltent tous les étés 12 millions de tonnes de blé, consomment chaque jour cent mille tonnes d'équivalent pétrole, utilisent 25 millions d'euros de médicaments, et bien d'autres choses encore... Le fonctionnement de ce système extraordinairement complexe est assuré par d'innombrables et incessants échanges de matière, d'énergie et d'information entre ses constituants. Certains de ces échanges (par exemple, la consommation de carburant, les travaux publics...) dépendent directement de la volonté humaine et sont organisés dans l'espace par des acteurs parfaitement identifiables, soumis à des réglementations. D'autres (comme les précipitations, l'infiltration de polluants dans les aquifères, la prolifération d'une espèce invasive) résultent de processus difficiles à maîtriser mais que l'activité humaine influence cependant elle aussi. Habitants du bassin de la Seine, nous dépendons tous les jours du fonctionnement de ce système, et sans le savoir nous y contribuons quotidiennement tout comme Monsieur Jourdain ignorait qu'il parlait en prose.

Mais le « Système Seine » n'est pas isolé dans le monde, il interagit aussi avec les systèmes voisins, exporte ses productions bien au-delà de ses frontières, importe des produits de la terre entière, puise dans les ressources de toute la planète, ce qui rend ce fonctionnement encore plus complexe. Reconnaître les multiples fonctions qu'assure notre environnement, comprendre les mécanismes qui les rendent possibles ou qui les entravent, développer des outils permettant de calculer l'effet à attendre sur le fonctionnement d'ensemble du système de telle infrastructure, de tel aménagement ou de telle mesure réglementaire : c'est l'objectif ambitieux que s'est donné le Programme PIREN-Seine qui réunit les scientifiques de tous les organismes publics de recherche et les principaux acteurs, publics et privés, de la gestion des ressources en eau dans le bassin de la Seine (voir encadré pages 8-9).

Bref historique du programme PIREN-Seine

PHASE 1 : MISE EN PLACE DU PIREN-SEINE (1989-1992)

Au milieu des années 1980, le CNRS lance les premiers PIREN, Programmes Interdisciplinaires de Recherche sur l'Environnement. Plusieurs PIREN-Grands Fleuves voient le jour sur le Rhône, sur la Garonne, sur la Plaine d'Alsace. Concernant le bassin de la Seine, où l'échiquier technico-politique en matière de gestion des ressources en eau était particulièrement complexe et conflictuel, il faut attendre 1989 pour que Ghislain de Marsily, Professeur à l'UPMC (Université Pierre et Marie Curie), réussisse à mettre en place le dialogue nécessaire entre tous les partenaires institutionnels du bassin et les organismes de recherche. De manière très pragmatique, les premiers axes de recherche sont retenus par le croisement des compétences des équipes scientifiques immédiatement mobilisables et des besoins exprimés par les gestionnaires. Quatre ateliers relativement indépendants ont ainsi été mis en place : ils étudient l'impact de la station d'épuration d'Achères en terme de fonctionnement écologique des secteurs aval du fleuve, l'évaluation des rejets urbains de temps de pluie*, la propagation et le devenir des lâchures d'eau par les barrages réservoirs*, et enfin l'érosion des sols agricoles.

Dès les premières années du programme, ces objectifs initiaux se sont considérablement élargis. Il est vite apparu, par exemple, que le fonctionnement des biefs aval de la Seine ne pouvait être compris sans être replacé dans le fonctionnement du continuum fluvial tout entier. Une démarche originale pour la modélisation du réseau hydrographique dans son ensemble a donc été développée, basée sur la notion d'ordre de drainage*. Elle a servi de base à l'étude du développement planctonique* et du transfert des nutriments* dans les parties amont du bassin. L'étude des rejets urbains de temps de pluie nécessitait une vision d'ensemble du fonctionnement des réseaux d'assainissement et de leur impact sur le milieu. Les travaux menés sur les lâchures des barrages réservoirs ne pouvaient se limiter à leurs seuls aspects hydrauliques, pas plus que les travaux sur l'interaction pluie-drainage-sols agricoles, pour lesquels des dispositifs lourds de terrains avaient été mis en place, ne pouvaient s'envisager sans la mesure simultanée des apports de pesticides et de nitrates.

Parallèlement, les échanges entre les chercheurs du programme et les institutions chargées de la gestion de l'eau se sont multipliés. La préparation de la nouvelle Loi sur l'Eau et la mise en place du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) suscitèrent des interrogations précises concernant la gestion d'ensemble du bassin.

PHASE 2 : LE GDR (GROUPEMENT DE RECHERCHE) "SYSTÈMES FLUVIAUX ANTHROPIÉS" (1993-1997)

Dans ce contexte, les objectifs scientifiques de la seconde phase du programme, toujours sous la direction de G. de Marsily, se devaient de couvrir de manière beaucoup plus globale l'ensemble des processus liés à la qualité de l'eau dans le bassin. Si l'accent avait été mis dans la première phase du programme sur la dimension longitudinale du continuum aquatique* (le gradient amont-aval), l'essentiel des efforts a été consacré cette fois aux interactions transversales que les cours d'eaux entretiennent avec leurs zones riveraines* (zones humides, annexes hydrauliques). Le rôle des zones humides dans la rétention des nutriments en provenance du bassin versant ou des cours d'eau eux-mêmes, le rôle des zones inondables dans la reproduction du brochet, le rôle des barrages réservoirs comme sources d'organismes ou comme puits de nutriments et de matières en suspension, le rôle des annexes hydrauliques comme zones de nutrition ou de reproduction des poissons, par exemple, ont ainsi été étudiés en détail.

On s'est également attaché à développer une meilleure compréhension du cycle urbain de l'eau et des polluants qui l'accompagnent et du devenir de ces polluants dans le milieu fluvial.

Collectivement, les résultats acquis à l'issue de cette deuxième phase offrent une vision d'ensemble du fonctionnement biogéochimique du « Système Seine » vu sous l'angle de la circulation de la matière (matières en suspension, nutriments, matières organiques, oxygène, micropolluants) et des équilibres trophiques dans l'ensemble du réseau hydrographique.

L'unité de démarche qui sous-tend la plupart des travaux du programme réside dans le recours à une forme originale de modélisation utilisée tout à la fois comme outil de compréhension et comme moyen d'aide à la décision. Comprendre c'est, dans le cas qui nous occupe, établir le lien entre la cinétique* de ces processus et le fonctionnement macroscopique de l'écosystème, tel qu'il se manifeste par les flux de matière entre ses principaux constituants et par leurs variations dans l'espace et le temps. Les modèles*, comme nous les concevons, permettent d'établir ce lien. Une fois validés, ces modèles permettent également de simuler la réponse du système à une modification des contraintes auxquelles il est soumis. Ces modèles, bien qu'en permanence remaniés et enrichis, sont maintenant parfaitement opérationnels et ont déjà été utilisés pour simuler des scénarios précis d'aménagement et en optimiser la conception : amélioration de l'infrastructure d'assainissement de la région Île-de-France, application de diverses directives européennes... Ils constituent le produit le plus tangible et le plus directement utilisable du programme PIREN-Seine. Ces deux premières phases ont conduit à la rédaction d'un ouvrage collectif de synthèse : "La Seine en son Bassin : fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé" (Meybeck, et al. 1998).



La Seine en plein coeur de Paris.

PHASES 3 ET 4 : LA SEINE, SON BASSIN VERSANT ET SON HISTOIRE (1998-2006)

En janvier 1998, une troisième phase du PIREN-Seine a été mise en place, sous la direction de Gilles Billen, Directeur de Recherche au CNRS, autour de trois axes fédérateurs.

Le premier de ces axes résidait dans la volonté de replacer davantage le réseau hydrographique dans la complexité du fonctionnement de son bassin versant. Il s'agissait, par exemple, de reconnaître la contamination nitrique comme la manifestation de l'ouverture du cycle terrestre de l'azote lié au développement de l'agriculture et de la chaîne agro-alimentaire moderne ; d'analyser les flux de métaux lourds transférés par le réseau fluvial comme un aspect du métabolisme industriel*, c'est à dire comme la conséquence des flux de production et de consommation de ces métaux par l'activité industrielle et domestique. Il fallait donc faire une place, dans les travaux d'écologie du milieu aquatique, à l'écologie industrielle du « Système Seine ».

Outre les dimensions longitudinales du continuum aquatique et les interactions transversales entre les cours d'eau et leurs annexes analysées au cours des deux premières phases, c'est l'étude de la dimension verticale qui a alors été entreprise avec l'élaboration de modèles hydrogéologiques des aquifères, couplés à des modèles agronomiques.

Ce deuxième axe a permis de promouvoir l'interdisciplinarité avec les sciences agronomiques, jusqu'alors absentes du programme. Compte tenu de l'inertie des aquifères, leur prise en considération a contribué à se projeter dans le futur au delà du calendrier fixé par la directive cadre (2015) et a permis de travailler à l'impact conjugué du changement climatique.

Le troisième axe fédérateur consistait dans la prise en compte du temps sur de longues durées. Prendre en compte le temps, c'est en effet reconnaître la nature dynamique de l'hydrosystème, c'est voir le fonctionnement présent comme le résultat d'une histoire qu'il convient de reconstituer, non pas seulement de manière narrative ou descriptive, mais dans le détail des mécanismes mis en jeu. Les modèles établis pour rendre compte du fonctionnement présent doivent aussi pouvoir s'appliquer aux états passés de l'hydrosystème, et permettre de faire le lien entre l'évolution de l'activité humaine dans le bassin et celle du fonctionnement de l'écosystème et de la qualité de l'eau. Cet accroissement de « profondeur de champ » des modèles devait aussi permettre de les utiliser de manière prospective pour établir l'état de l'hydrosystème correspondant à divers scénarios d'évolution future du socio-système qui sous-tend le bassin.

Un numéro spécial de la revue *Science of the total Environment* (Human Activity and Material Fluxes in a regional River Basin: The Seine River watershed , 375, 1-292) a permis de dresser le bilan des acquis de ces 8 années de recherches à l'intention de la communauté scientifique internationale.

PHASE 5 : RISQUES SANITAIRES, PAYSAGES, TERRITOIRES (2007-2010)

Jean-Marie Mouchel, alors directeur du CERERE (Centre de Recherche sur l'Eau la Ville et l'Environnement), reprend le flambeau en 2007 devenant professeur à l'UPMC. Cette cinquième phase du programme s'articule autour de 3 volets qui enrichissent le programme de problématiques nouvelles.

De nombreux travaux sont ainsi consacrés dans cette phase aux micropolluants émergents : molécules nouvelles aux effets encore mal connus, médicaments, agents pathogènes. Les risques que ces substances sont susceptibles de faire courir en matière de santé publique et d'écotoxicologie sont au cœur des interrogations.

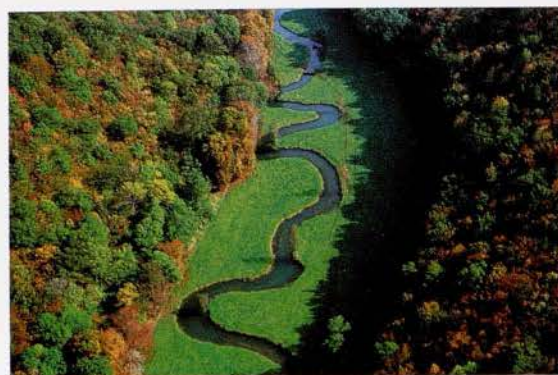
Dans l'axe paysage, il s'agit d'analyser non seulement le fonctionnement et la qualité des milieux (cours d'eau, avec une grande place aux petites rivières péri-urbaines, zones humides, bassins versants) mais aussi la perception qu'en ont les riverains, et l'organisation sociale qui en sous-tend les usages. Les préoccupations d'ingénierie écologique prennent ici toute leur place.

Le volet territoires, carbone, azote et changements globaux donne une nouvelle dimension aux travaux précédents du programme sur les cycles couplés du carbone et des nutriments dans le bassin. À l'heure de la réforme de la PAC (Politique Agricole Commune), de la montée des prix des céréales et des agro-carburants, l'avenir du bassin de la Seine et de la qualité de ses eaux passe nécessairement par une analyse intégrée de ces multiples enjeux liés au changement global.

Le développement d'outils de modélisation se poursuit, comme élément de structuration des connaissances acquises et comme outil d'appréhension globale des phénomènes étudiés.



Berges de Seine aux Andelys.



Le cadre

géographique :

le **milieu**

et

son

occupation

par les hommes

L'espace géologique du bassin parisien et le réseau hydrographique qui l'irrigue forment le cadre dans lequel la population humaine a construit son espace de vie au fil des siècles.



Les contraintes de la géologie et de l'hydrologie

Le bassin parisien est une vaste formation géologique sédimentaire, composée d'une alternance de roches calcaires, argileuses et sableuses déposées aux ères secondaire, tertiaire et quaternaire. Il forme comme une pile d'assiettes entourée des vieux massifs granitiques et cristallins du Morvan au Sud Est, de Normandie et de Bretagne au Sud Ouest et d'Ardenne au Nord Est. C'est dans cette formation qu'est contenu le bassin hydrographique de la Seine, mais aussi une partie de ceux de la Meuse, de la Saône et de la Loire.

Lors des épisodes climatiques anciens, l'érosion a fait son œuvre. Des sables et graviers alluvionnaires ou des limons éoliens ont été déposés. Diverses régions naturelles peuvent être distinguées en fonction des roches affleurantes et du relief que l'érosion y a imprimé, plus accentué sur les pourtours du bassin là où affleurent les massifs anciens ou là où les couches géologiques plus dures sont bordées de roches plus tendres (les côtes d'Île-de-France et de Champagne) :

- les plateaux bourguignons, à l'est du bassin, sont formés des épaisses couches calcaires du Jurassique. Ils sont limités à l'ouest par la Champagne humide, étroite bande argileuse formant une dépression humide, prolongée vers le nord par le massif de l'Argonne fait d'un grès plus dur ;
- la Champagne crayeuse forme au contraire un plateau sec et uniforme que traversent les grandes vallées alluviales de la Seine, de l'Aube et de la Marne ;
- on retrouve la craie à l'Ouest dans le pays de Caux et le Vexin, eux-mêmes recouverts de limons ;
- l'Île-de-France, délimitée par l'affleurement des roches tertiaires souvent recouvertes de limons éoliens, occupe le centre du bassin et comprend la Brie, le Gâtinais, le Soissonnais et la Beauce.

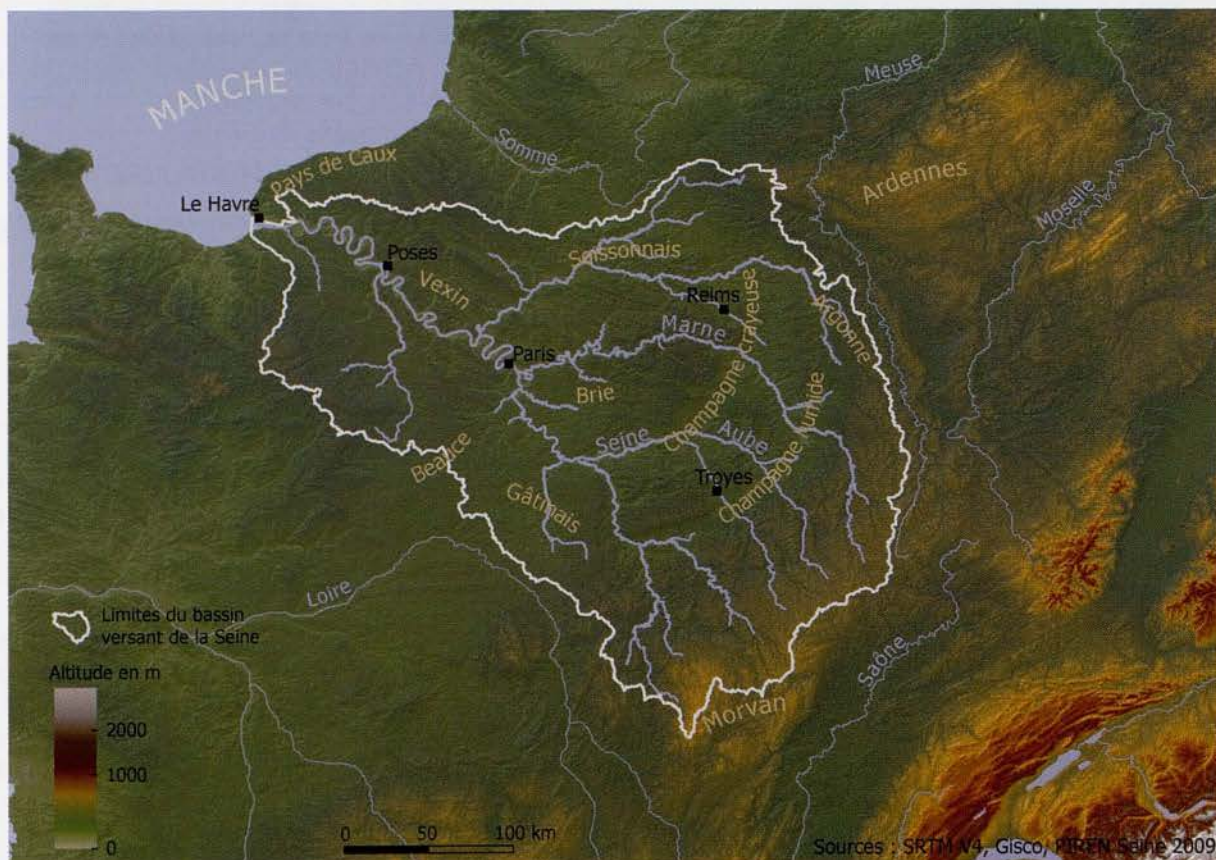


Figure 1 : Le bassin de la Seine dans le relief du Nord de la France.

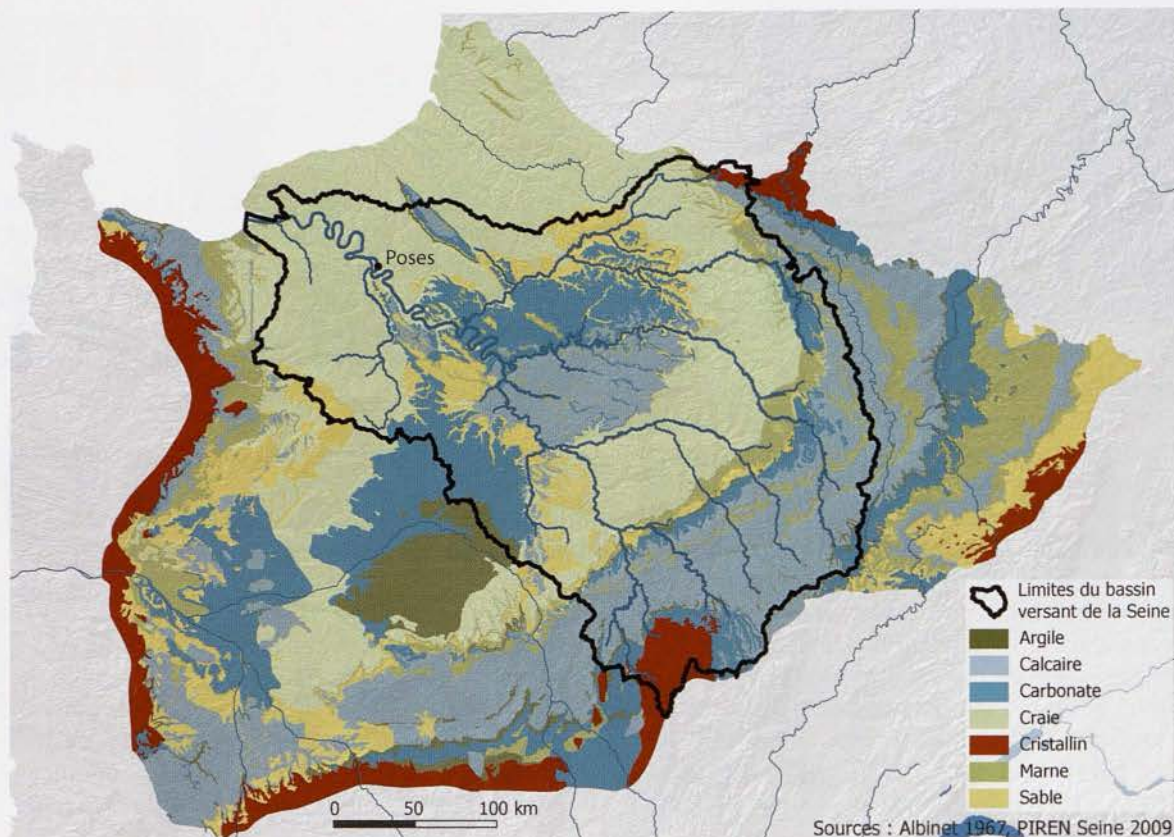


Figure 2 : Carte lithologique du bassin parisien (d'après Albinet, 1967).

Le réseau hydrographique de la Seine traverse de part en part ces diverses formations, au centre desquelles se rassemblent les principaux tributaires.

Le régime hydro-climatique de la Seine est celui des fleuves de plaine de l'Europe tempérée océanique : les crues ont lieu en hiver, dépassant fréquemment 1000 m³/s à Poses*.

A contrario, la fin de l'été est marquée par un étiage sévère avec un débit qui ne dépasserait guère 50 m³/s s'il n'était soutenu par les lâchures des barrages réservoirs de Champagne et d'Yonne.

La population du bassin de la Seine

UN BASSIN EN MARGE DE LA DORSALE EUROPÉENNE

Au nord et à l'est du bassin parisien géologique, s'étend l'une des régions les plus peuplées du monde, avec des densités de population de l'ordre de 500 hab/km². C'est la grande dorsale européenne (que les médias ont popularisée sous le nom de « Banane Bleue »), drainée par le Rhin, la Moselle et la Meuse et qui s'étend encore au-delà de la Manche dans le bassin de la Tamise et vers le sud jusqu'à la vallée du Pô.

Considérée par beaucoup comme le centre économique de l'Europe, cette dorsale est de fait le lieu historique des premiers développements commerciaux et industriels. Le bassin de la Seine n'appartient pas à cet espace ; l'énorme agglomération parisienne en est séparée par une ceinture de régions restées plus rurales.

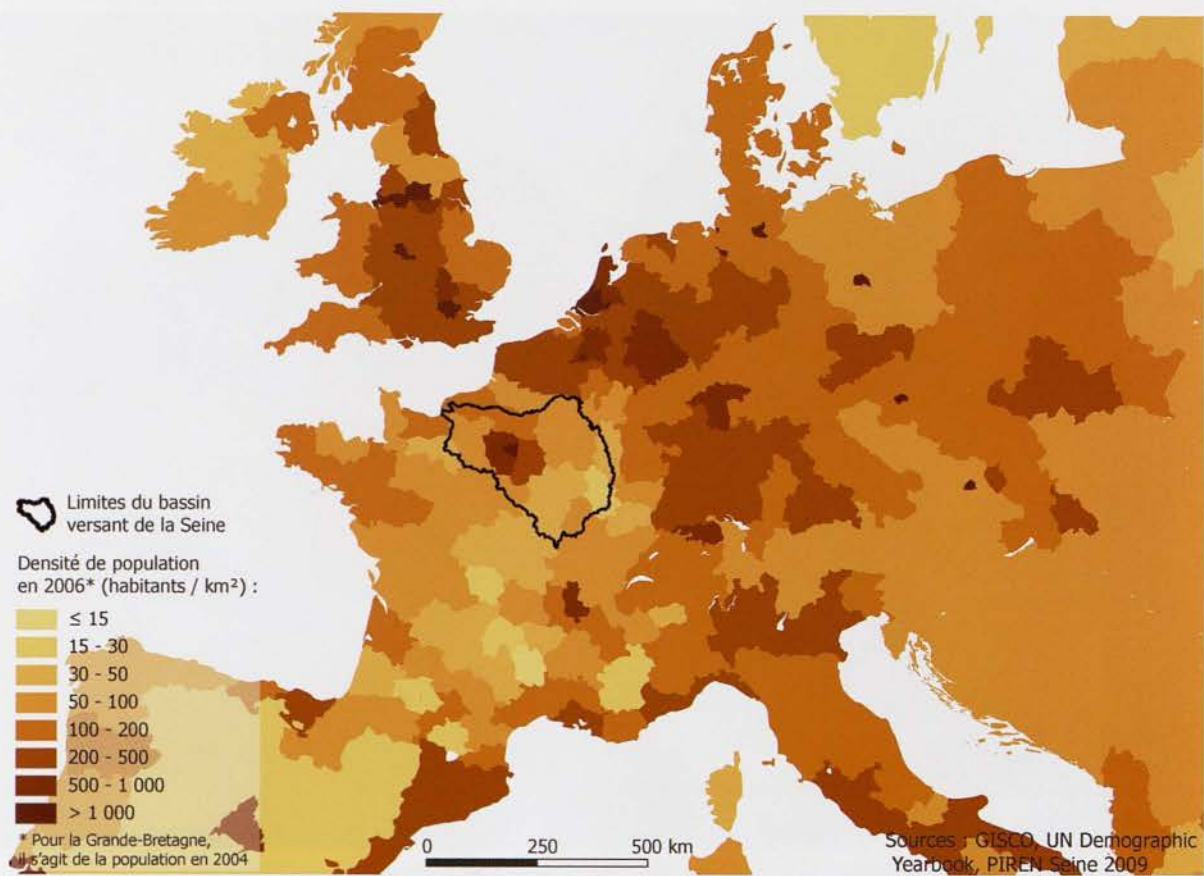


Figure 3 : Densité de population en Europe. On distingue bien la dorsale européenne et le relatif isolement du bassin parisien par rapport aux autres centres de population denses du nord de l'Europe.

UNE POPULATION IMPORTANTE, ORGANISÉE EN FONCTION DES COURS D'EAU

La population actuelle du bassin de la Seine se monte à environ 16 millions d'habitants, représentant plus du quart de la population française, avec une densité de population de 200 hab/km², le double de la moyenne nationale.

Cette population se concentre pour la plus grande part dans l'agglomération parisienne (10 millions d'habitants) et le long de l'axe principal de la Seine en aval de Paris jusqu'à Rouen et au Havre. En amont de la région parisienne, les principales agglomérations sont localisées le long des grands affluents, de sorte qu'il est frappant de constater que la densité de population suit assez fidèlement le tracé des cours d'eau, les interfluves étant caractérisés par des densités de population inférieures à 20 hab/km².



Aisey-sur-Seine, village typique du bassin de la Seine.

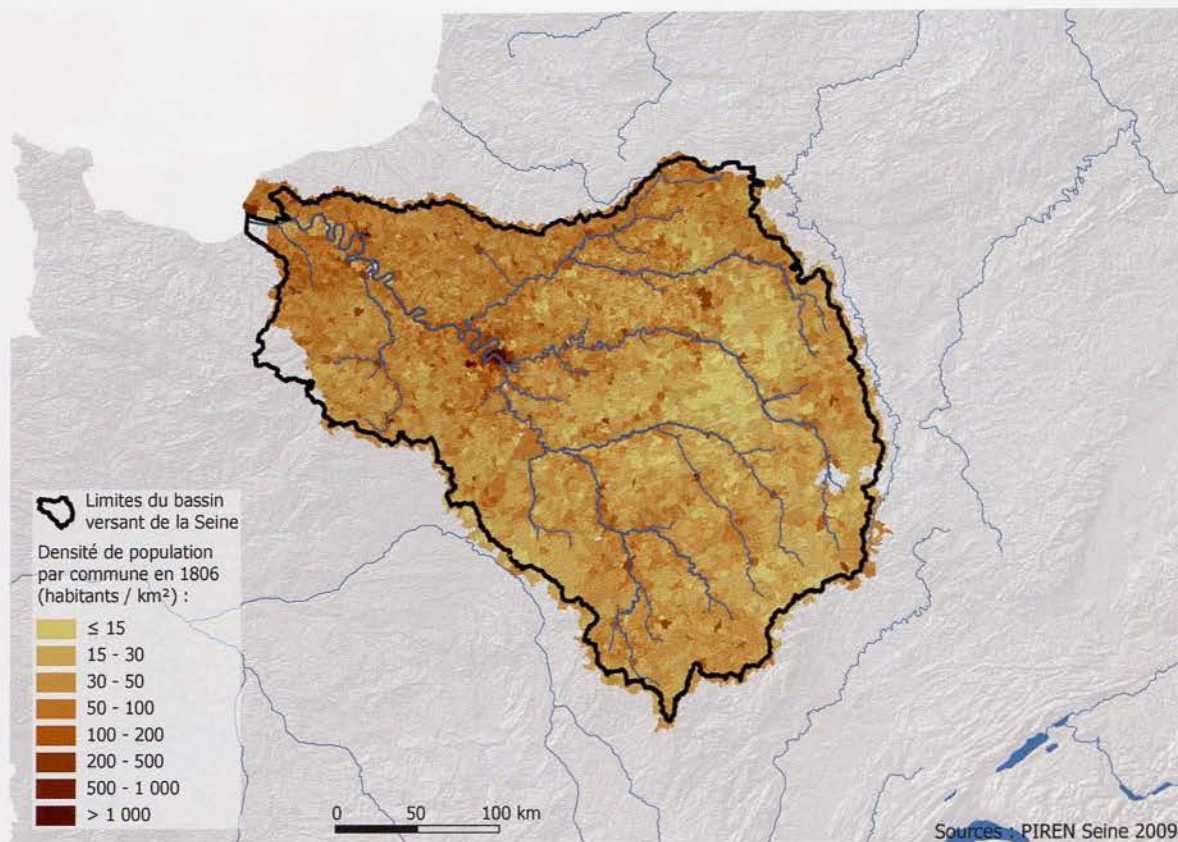


Figure 4 : Densités de population communale en 1806 dans le bassin de la Seine.

UNE ÉVOLUTION CONSTANTE VERS L'URBANISATION

Les données historiques dont nous disposons permettent de reconstituer l'évolution de la population du bassin de la Seine et de Paris depuis près d'un millénaire. Les X^e et XI^e siècles ont été, dans toute l'Europe occidentale, une période de rapide expansion d'une population qui reste essentiellement rurale. Du XII^e jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, si l'on excepte la période de guerre et d'épidémie du XIV^e siècle, la population du bassin de la Seine reste stable autour de 3 millions d'individus, soit une densité de population de 50 habitants par km². Durant cette longue période, le poids de la population urbaine, et plus particulièrement de la population parisienne évolue énormément : de quelques milliers d'habitants au début du XI^e siècle, Paris, devenue capitale du royaume sous le règne de Philippe Auguste (1180-1223), s'accroît rapidement pour atteindre 200 000 habitants au début du XIV^e siècle. La ville décroît ensuite puis reprend sa croissance après les guerres de religion pour s'élever à 600 000 habitants à la veille de la Révolution française.

Du XII^e au XVIII^e siècle, la population rurale est restée assez stable (toujours avec une densité proche de 50 hab/km²), tandis que le poids de la population urbaine s'est accru considérablement, passant de 5% à 20% du total.

Au cours des XIX^e et XX^e siècles, la population des villes, et de l'agglomération parisienne en particulier, est multipliée par 20. Ce mouvement s'accompagne, à partir de 1950, d'une diminution de la population rurale. Aujourd'hui, 85% de la population du bassin est urbaine au sens de l'INSEE, c'est-à-dire vit dans des agglomérations de plus de 2 000 habitants.

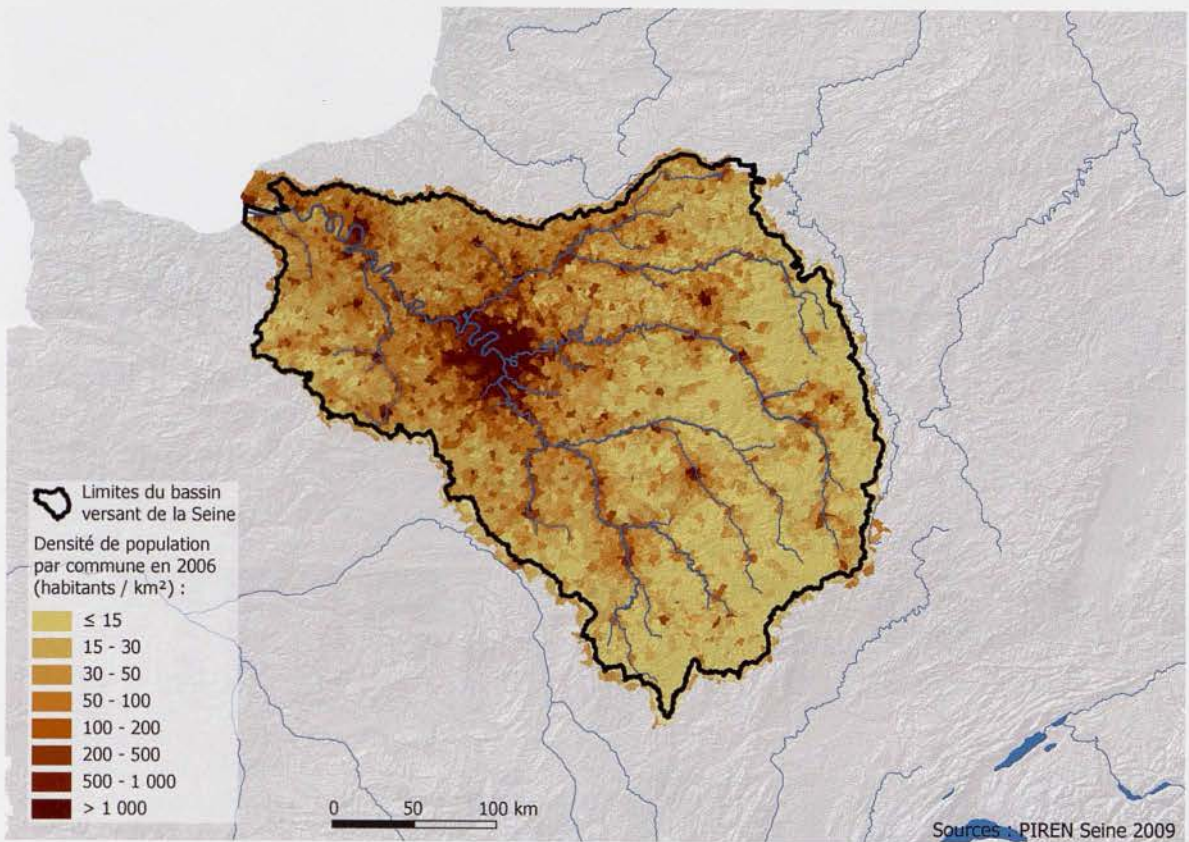


Figure 5 : Densité de population communale actuelle (INSEE 2006) du bassin de la Seine.

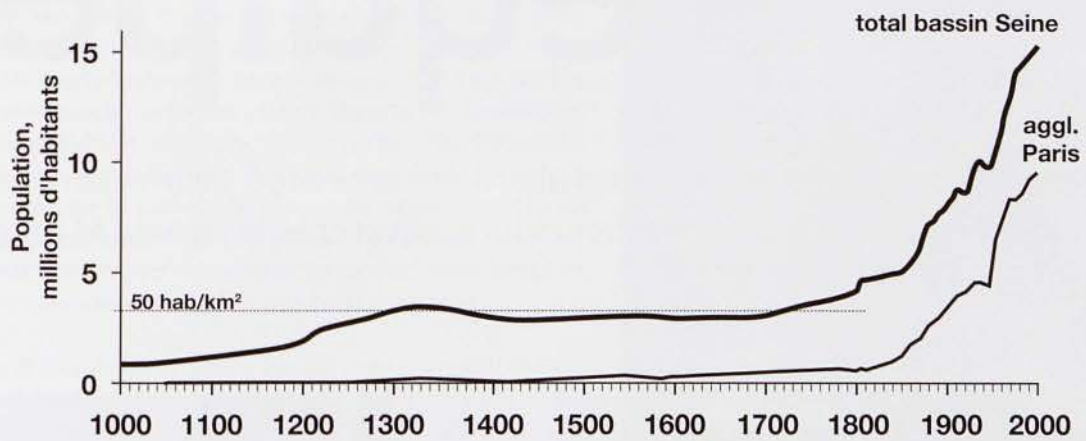


Figure 6 : Évolution historique de la population du bassin de la Seine et de l'agglomération parisienne (Billen et al., 2009).



Les fonctions

primaires :

**se nourrir,
se loger,
s'équiper**

Le territoire du bassin de la Seine a d'abord été aménagé pour répondre à des besoins fondamentaux : produire la nourriture, assurer le logement et fournir les équipements de sa population.



Nourrir la ville

Certains urbanistes définissent une ville comme un rassemblement de populations qui ne produit pas elle-même sa nourriture (Ascher, 2001). C'est dire que « nourrir la ville » est une fonction essentielle qui conditionne largement tout l'aménagement du territoire régional alentour.

LES BESOINS EN NOURRITURE

À la fin du XVIII^e siècle, Paris, on l'a vu, compte déjà plus de 500 000 habitants. On sait très précisément ce qui y est consommé, notamment grâce aux relevés « des marchandises et denrées de toute espèce qui se consomment annuellement à Paris » établis par Lavoisier, père de la Chimie et Fermier Général, en charge de la collecte de l'octroi. Ce que révèlent ces relevés qui comportent la mention de l'origine des biens importés, c'est que quantitativement 90% de la nourriture de Paris provient des provinces limitrophes, Île-de-France, Brie, Beauce, Champagne, Picardie et Normandie. Le bois de chauffage et de boulange, pour sa part, est acheminé par flottage depuis la région du Morvan. Une surface de 60 000 km², un cercle de 150 km de rayon autour de Paris est nécessaire à cette époque pour l'approvisionner.

Un siècle plus tard, au début du XX^e siècle, Paris compte 5 millions d'habitants : la population urbaine a décuplé, mais c'est toujours le même espace du bassin parisien qui la nourrit pour l'essentiel. Dans le même temps, le milieu rural a en effet évolué pour répondre à la demande urbaine et s'est profondément organisé autour de cette demande pour rendre possible la croissance urbaine, sans pourtant engendrer de modification majeure du paysage. De nouvelles pratiques agricoles ont fait leur apparition, comme l'abandon de la jachère triennale au profit de cultures de légumineuses fourragères fixatrices d'azote, permettant un accroissement de la charge en bétail et une meilleure fertilisation des terres arables.

Dans le bassin de la Seine depuis près d'un millénaire, des liens d'interdépendance très forts existent donc entre la ville et la campagne qui l'entoure, des liens très structurants qui ont permis à ces deux mondes d'évoluer ensemble.

Au cours du XX^e siècle (surtout dans sa deuxième moitié, depuis 1950), l'agglomération parisienne double encore sa population. Mais si l'on regarde aujourd'hui la surface qui serait théoriquement nécessaire

pour l'alimenter, compte tenu des rendements de l'agriculture moderne telle qu'elle est pratiquée dans le bassin parisien, un espace beaucoup plus petit pourrait y suffire : à peine 10 000 km² (Tableau 1, page 20). Le bassin parisien produit 25 fois plus de céréales que Paris n'en consomme et les exporte, principalement vers des régions qui, contrairement au centre du bassin de la Seine, se sont spécialisées dans l'élevage. Paris de son côté ne s'approvisionne plus préférentiellement dans son hinterland* naturel, et importe sa nourriture du monde entier. L'Île-de-France, partie centrale du bassin de la Seine, importe chaque année 14 millions de tonnes de produits alimentaires, dont un quart seulement trouve son origine dans l'espace du bassin ; elle en réexporte les deux tiers, après transformation par une puissante industrie alimentaire (sucreries, conserveries), pour moitié hors des limites du bassin.



Cultures en Beauce.

DÉFINIR

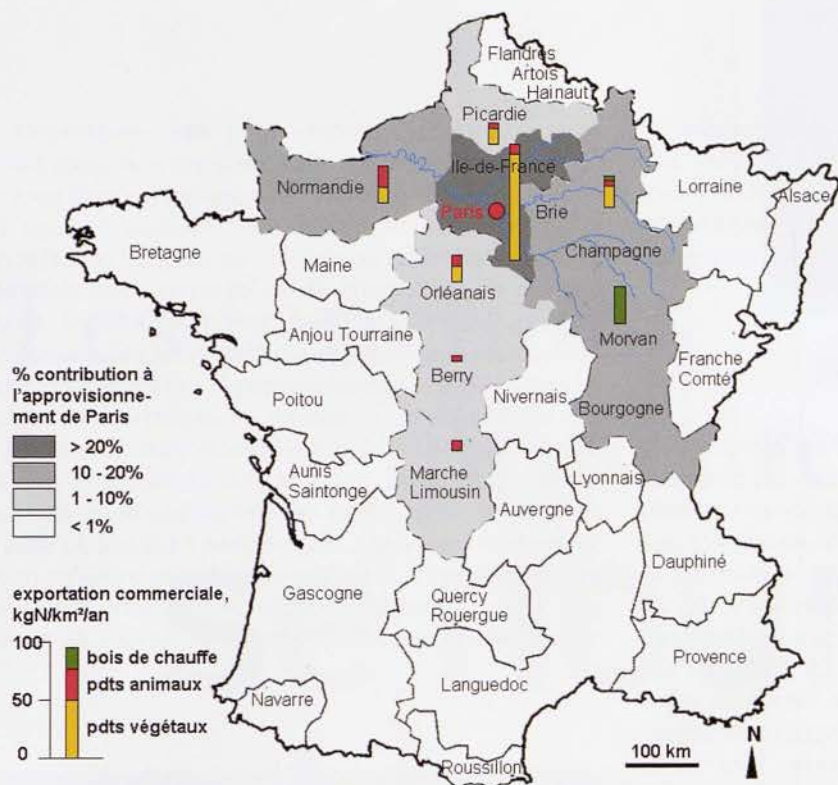


Figure 7 : Contribution des régions du bassin à l'approvisionnement de Paris à la fin du XVIII^e siècle (Billen et al., 2009).

	Consommation par l'agglomération parisienne	Production par zone centrale (1)	Production par Normandie (2)	Production par périphérie est (3)
surface, km ²		52 657	17 929	18 257
alimentation, ktonnes N/an				
pain et céréales	13	263	43	39
fruits et légumes	11	342	37	26
viande	29	7	7	3
poisson et fruits de mer	8	-	-	-
laitages	18	7	9,68	2,85
total, ktonnes N/an	78	619	96	72
% approvisionnement Paris	100	789	123	92
potentiel d'export, kgN/km ² /an				
en produits végétaux		11 401	4 350	2 914
en produits animaux		196	805	295

Tableau 1 : Consommation actuelle (2000) de denrées agricoles par l'agglomération parisienne et production correspondante des zones urbaines du bassin de la Seine, exprimées en terme de contenu en azote (Billen et al, 2009). (1) Seine-et-Marne, Oise, Aisne, Marne, Aube, Yonne, Eure, Eure-et-Loir. (2) Orne, Calvados, Seine-Maritime. (3) Ardennes, Haute-Marne, Nièvre.

L'extrême productivité de l'agriculture du bassin de la Seine et son choix d'exporter ses produits, en a fait un bassin autotrophe*, produisant plus que ne consomment localement les hommes et les animaux domestiques. Les zones hétérotrophes* du bassin de

la Seine sont constituées seulement par les grandes agglomérations urbaines et les zones périphériques du bassin à l'est et à l'ouest, où s'est reconcentré l'élevage, banni des grandes zones céréalières du centre du bassin.

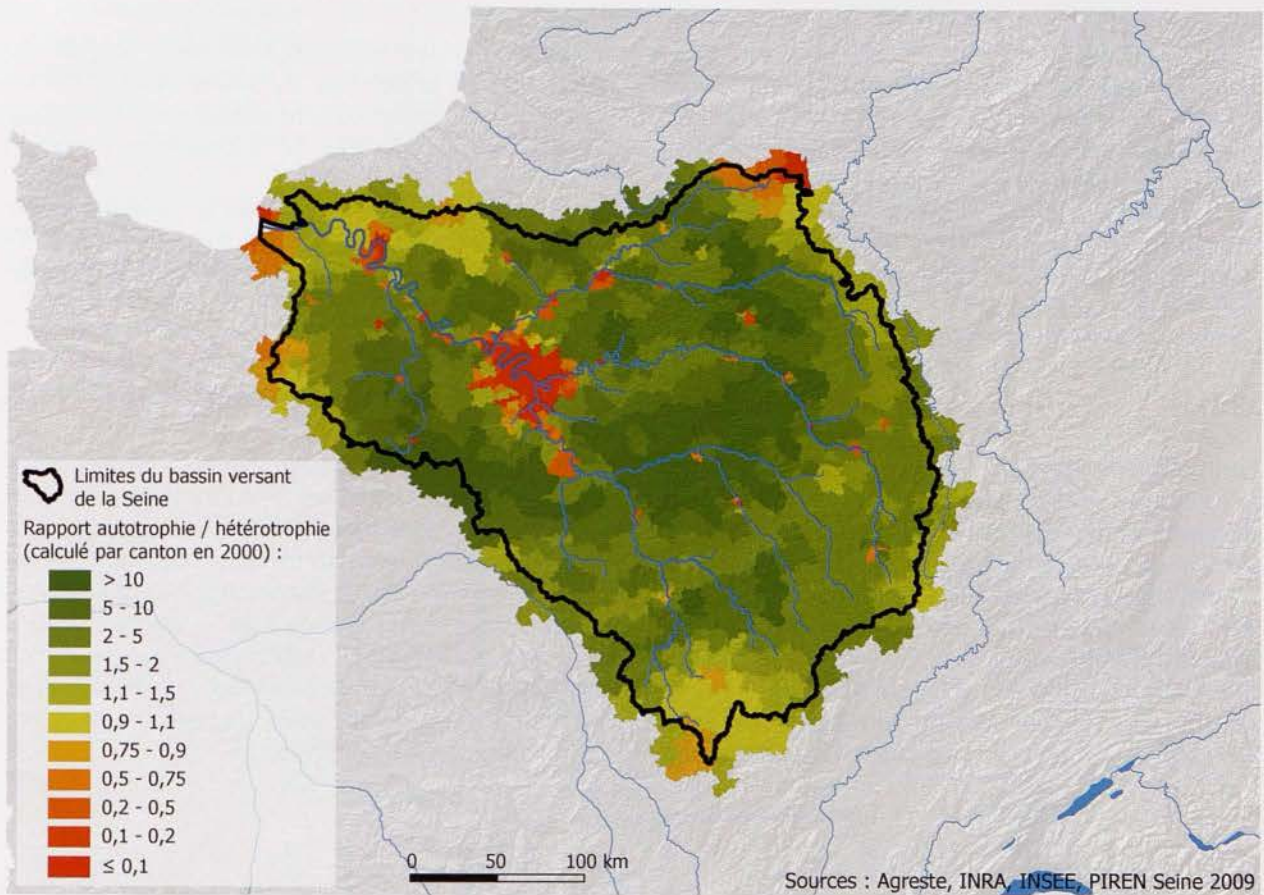


Figure 8 : Autotrophie/hétérotrophie du bassin de la Seine (Billen et al, 2007).

LES BESOINS EN EAU

Le lien entre Paris et le bassin parisien, rompu en ce qui concerne l'approvisionnement en nourriture reste encore essentiel en matière d'alimentation en eau potable. Qu'elle soit prélevée dans les aquifères ou dans les rivières, qu'elle subisse un traitement plus ou moins sophistiqué avant d'être distribuée, c'est le bassin versant qui, le premier, fabrique l'eau des villes (voir page 44). Or les pratiques agricoles qui se sont développées depuis une cinquantaine d'années, caractérisées par un recours massif aux engrais de synthèse et aux pesticides, menacent sérieusement la qualité de cette ressource, au point que le territoire qui produisait à la fois l'eau et la nourriture de la ville, ne peut plus assurer en maints endroits, la première de ces deux fonctions.

Les grandes phases du développement de l'agriculture occidentale

Les plantes les plus comestibles pour l'être humain, en particulier les céréales, sont assez exigeantes en nutriments, et incapables de mobiliser ceux-ci par l'exploitation en profondeur du sol et des roches sous-jacentes, ni par la fixation de l'azote atmosphérique. Toutes les formes d'agriculture consistent à faire pousser ces plantes dans des conditions de développement aussi favorables que possible, en restituant au sol, après la récolte, les éléments qui lui ont été enlevés.

Le développement de l'agriculture a accompagné l'évolution de la population ainsi que le développement de l'urbanisation. L'augmentation des rendements agricoles a en effet permis de subvenir aux besoins d'une population sans cesse croissante, mais aussi plus récemment, d'exporter les surplus dégagés vers les villes et vers d'autres territoires.

L'AGRICULTURE ITINÉRANTE SUR ABATTIS-BRULIS FORESTIER (ESSARTAGE, ÉCOBUAGE)

Les premières formes d'agriculture consistent à associer le pouvoir de mobilisation des éléments nutritifs de la forêt avec la culture des céréales en libérant, par la coupe et le brûlis d'une parcelle, les stocks d'éléments biogènes accumulés par la forêt pour mettre en culture les céréales le temps d'une (voire deux) récoltes. La récolte est suivie d'une longue jachère où la forêt recolonise le terrain et reconstitue les stocks de nutriments. Ce système agraire est parfaitement durable si la période de jachère est suffisamment longue et si les parcelles défrichées sont protégées de l'érosion. Il permet de soutenir une densité de population de l'ordre de 15 hab/km². Une parcelle de l'ordre de 1 ha, produisant 10 quintaux d'équivalents céréales est nécessaire pour nourrir une famille d'agriculteurs de 5 personnes. Le territoire, organisé en une mosaïque de parcelles cultivées itinérantes dans un paysage diversifié de forêts à divers stades de recolonisation, assure l'ensemble des besoins en aliments, en matériaux et en énergie de la communauté essentiellement composée de cultivateurs.

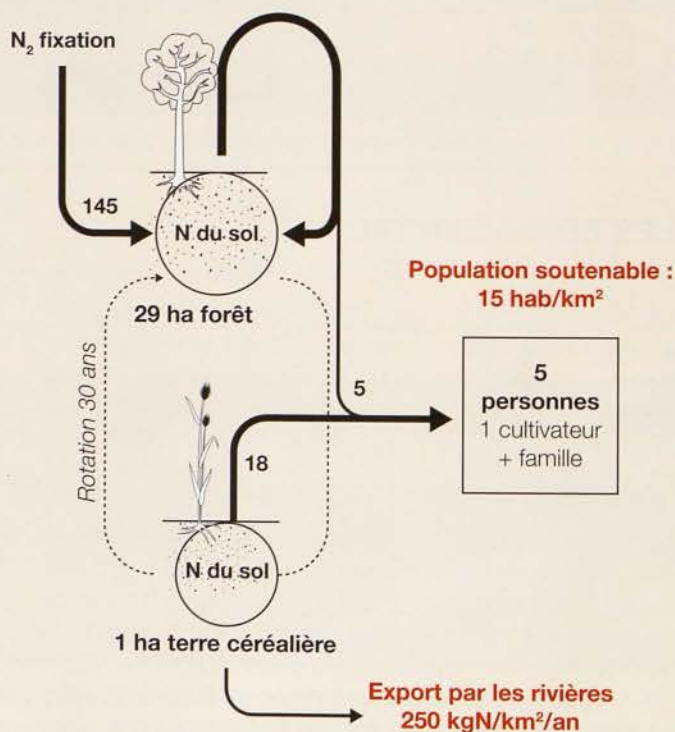


Figure 9 : Flux d'azote (en kgN/an) pour 30 ha territoire exploité par une famille d'agriculteurs itinérants.

LE SYSTÈME AGRAIRE TRADITIONNEL DE L'EUROPE OCCIDENTALE DU XI^E AU XVIII^E SIÈCLE

Le système agraire qui a façonné les paysages de l'Europe occidentale tempérée à partir du X^e siècle, est basé sur une étroite complémentarité entre l'élevage et la céréaliculture. C'est ici le bétail qui joue le rôle de vecteur des éléments nutritifs entre les zones semi-naturelles à fort pouvoir de mobilisation des éléments nutritifs minéraux (forêts et pâturages) et les soles céréalières. Celles-ci occupent les terres labourables, exploitées en rotation triennale avec une période de jachère au cours de laquelle elles sont enrichies par les déjections des animaux qui y sont parqués la nuit en été, et par le fumier récolté dans les étables en hiver. Espaces forestiers, pâturages semi-naturels et prés de fauche permettent de soutenir une charge animale de l'ordre de 2,5 têtes de gros bétail pour 5 ha de pâturages. Avec le rendement céréalier obtenu (typiquement 6 q/ha la première année, 4 q/ha la seconde année), les 6 ha de terres arables exploitables par une famille paysanne de 5 personnes permettent de dégager un surplus exportable hors de l'exploitation familiale de l'ordre de 40% de la production. Ce surplus est en partie consommé dans la communauté rurale dont fait partie l'exploitation (celle-ci comptant quelque 20% d'artisans ruraux non cultivateurs), en partie exporté vers la ville. La densité de population soutenable sur le plan alimentaire par ce système est de l'ordre de 50 hab/km². Le surplus alimentaire commercialisable en dehors de la communauté rurale atteint 50 kgN/km² par an.

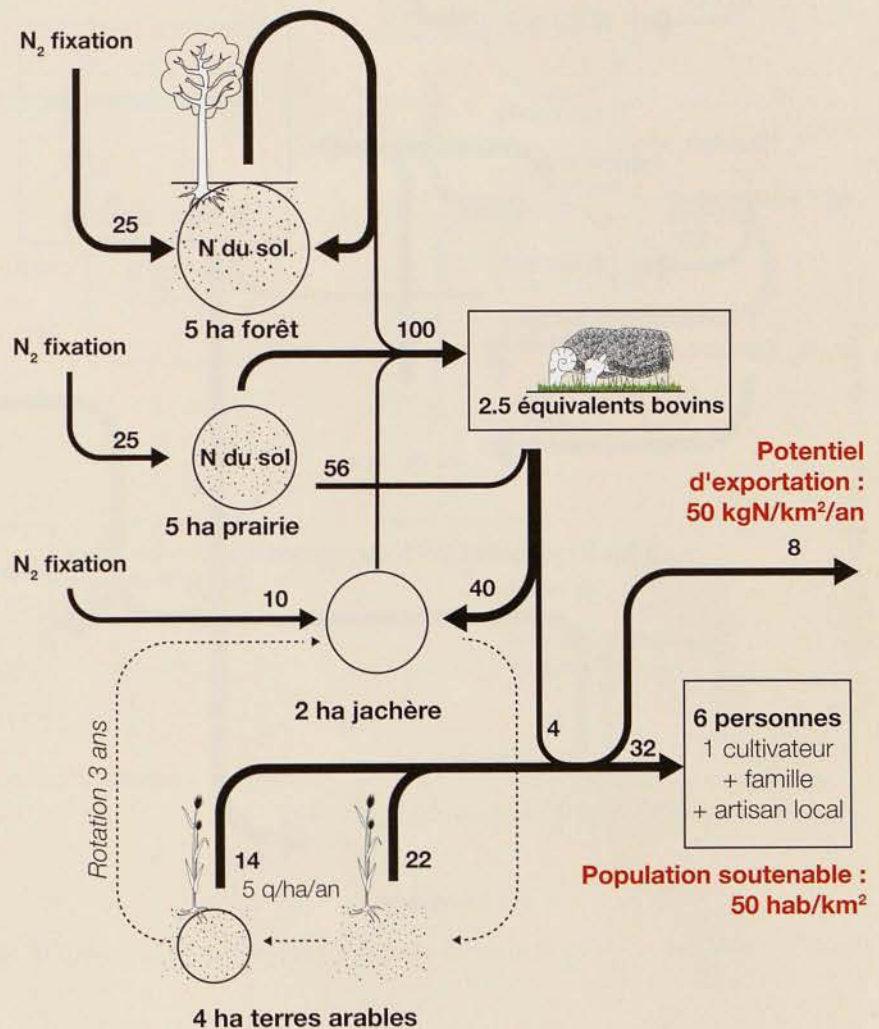


Figure 10 : Flux d'azote (en kgN/an) pour 16 ha territoire exploité par une famille d'agriculteurs au Moyen-Âge (assolement triennal avec jachère).

LE SYSTÈME AGRAIRE TRIENNAL SANS JACHÈRE DU XIX^e SIÈCLE

Parallèlement à l'accroissement de la population urbaine au XIX^e siècle, un nouveau pas dans l'accroissement du potentiel d'exportation commerciale du monde rural sera franchi progressivement par l'abandon de la jachère et son remplacement par une culture fourragère fixatrice d'azote. Le système ainsi mis en place, sans modifier significativement la taille de l'exploitation familiale moyenne, permet un nouvel accroissement de la charge animale et donc des ressources d'éléments fertilisants pour les terres arables. Le potentiel d'exportation commerciale du paysage rural s'accroît jusqu'à près de 500 kgN/km²/an, et la densité de population soutenable passe à 125 hab/km², dont plus des 2/3 en dehors de l'exploitation agricole.

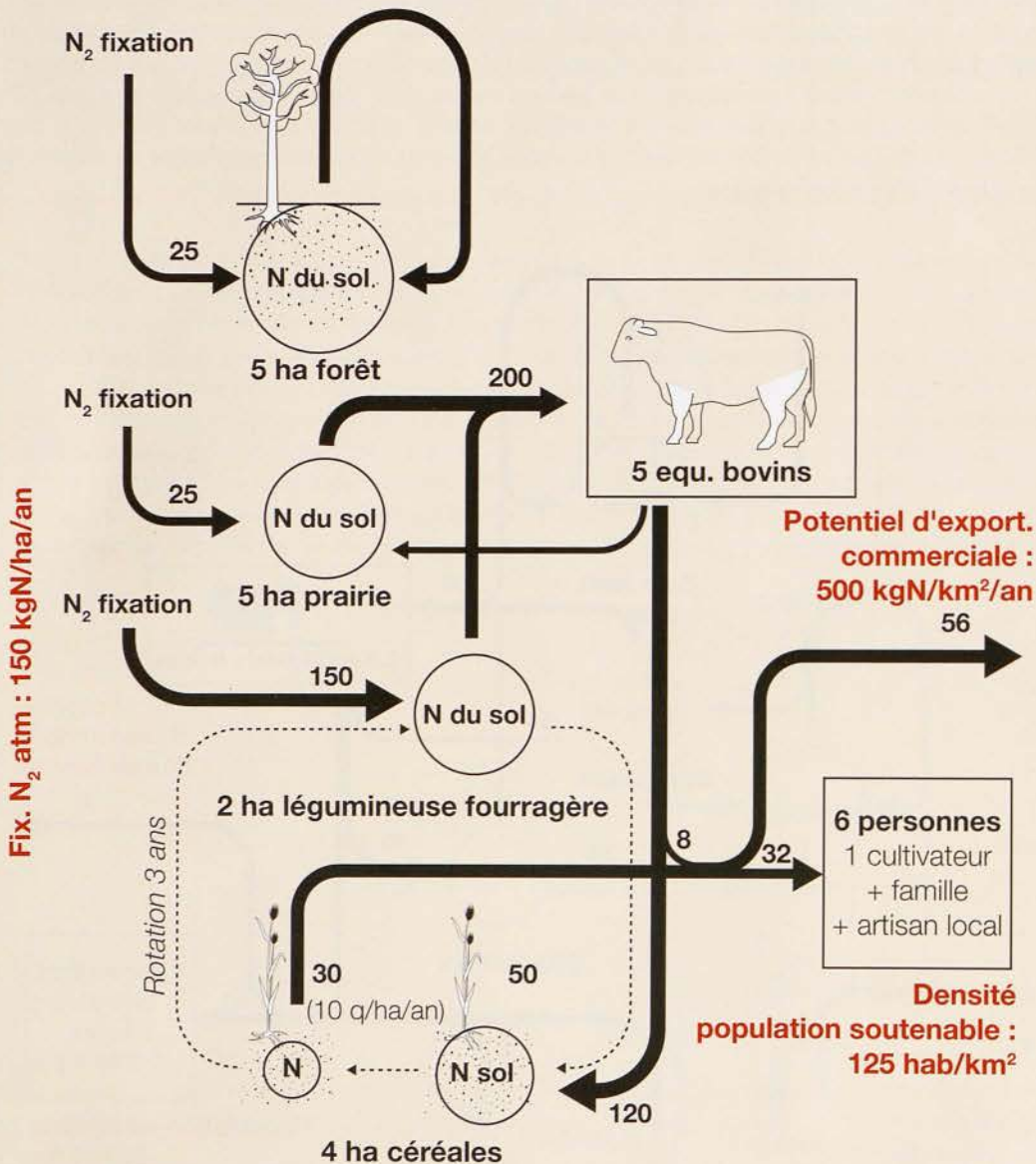


Figure 11 : Flux d'azote (en kgN/an) dans une exploitation familiale de 16 ha au XIX^e siècle (assolement triennal sans jachère).

L'AGRICULTURE MODERNE À FERTILISATION CHIMIQUE

La découverte en 1914 du procédé Haber-Bosch permettant la production industrielle d'acide nitrique et d'engrais azotés à partir de l'azote atmosphérique, va permettre de modifier complètement les contraintes imposées à tous les systèmes agraires précédents. Cinquante ans plus tard, la fertilisation chimique, généralisée dans l'agriculture occidentale, fait de la production agricole une activité totalement dépendante de l'industrie chimique lourde. Les flux de matières dans le milieu rural sont totalement simplifiés, et aboutissent, conjointement avec la mécanisation des activités culturales, à un accroissement sans précédent du potentiel d'exportation commerciale de produits agricoles. Cette nouvelle organisation de la production alimentaire est affranchie de la nécessité de l'étroite complémentarité entre agriculture et élevage qui caractérisait le système agricole traditionnel : en fonction du marché, de la nature des sols ou de facteurs socio-culturels, certaines régions se spécialisent dans la grande culture exportatrice, sans élevage, d'autres se tournent vers un élevage de plus en plus indépendant de la production agricole locale grâce à l'importation massive de produits fourragers en provenance d'autres régions.

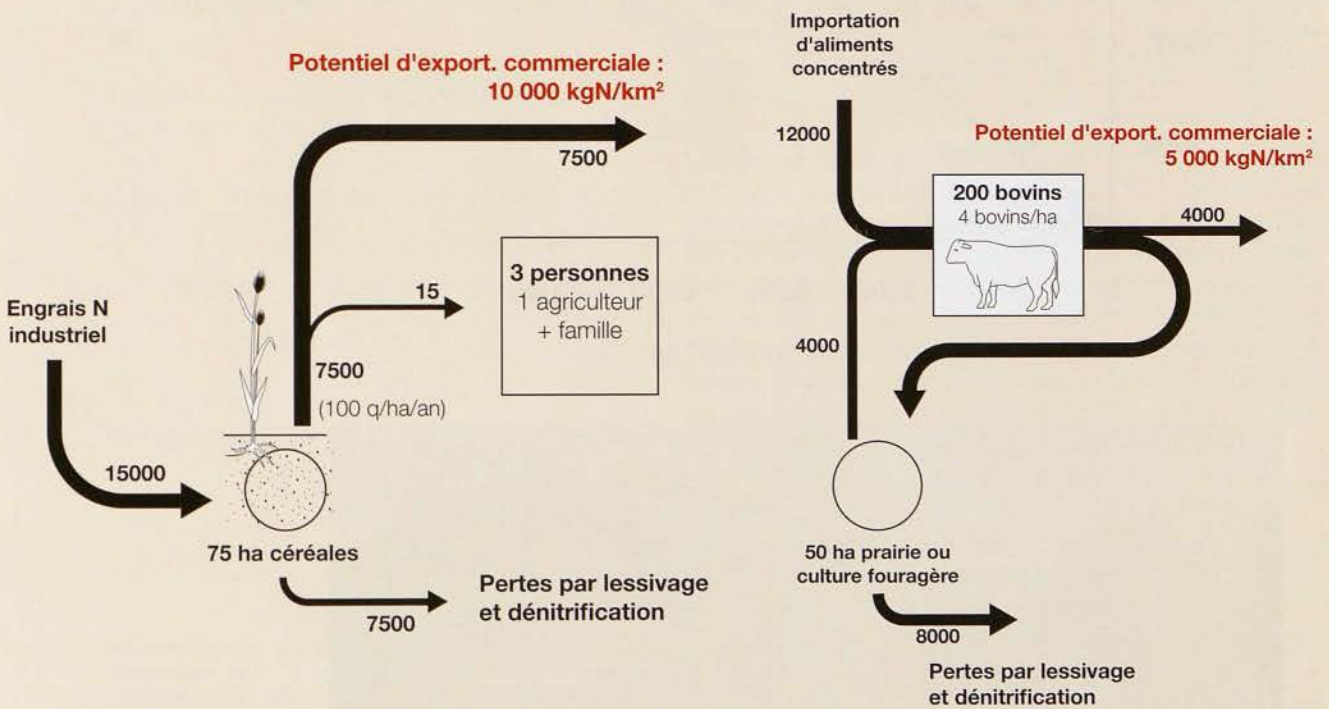


Figure 12a : Flux d'azote (en kgN/an) pour une exploitation céréalière moderne de 75 ha.

Figure 12b : Flux d'azote (en kgN/an) pour une exploitation d'élevage laitier moderne de 50 ha.

L'AUTOTROPHIE ET L'HÉTÉROTROPHIE DES TERRITOIRES RURAUX

Les caractéristiques de tous ces systèmes agricoles peuvent être résumées par les valeurs respectives de la production agricole par unité de surface de territoire (autotrophie) et de la consommation locale de nourriture par les hommes et le cheptel (hétérotrophie). Les territoires à autotrophie dominante, comme le bassin de la Seine, exportent des produits agricoles ; ceux qui, comme le bassin de l'Escaut, importent plus qu'ils ne produisent sont à dominante hétérotrophe. Cette différenciation est récente dans l'histoire.

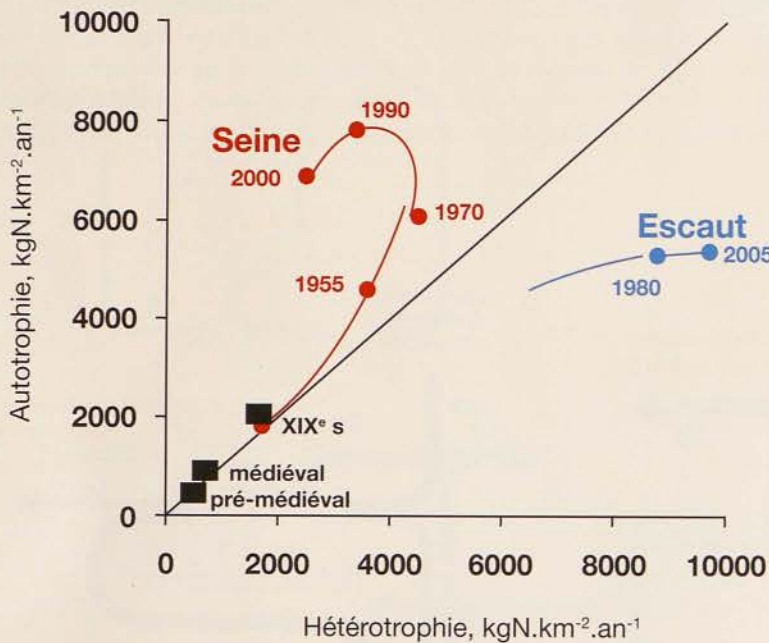


Figure 13 : Évolution au cours du temps de l'autotrophie et de l'hétérotrophie de deux bassins versants : la Seine qui se tourne vers les grandes cultures exportatrice et l'Escaut vers l'élevage intensif basé sur l'importation d'aliments pour le bétail.



Exploitation agricole.

Bâtir la ville

Ce qui caractérise aussi une ville, c'est le bâti, cette accumulation de bâtiments et d'infrastructures qui rend possible la vie urbaine, mais confère au paysage une dominante minérale.

LA PIERRE ET LE BÉTON

La pierre a longtemps été exploitée sur place dans des carrières à ciel ouvert puis souterraines (les actuelles catacombes en sont un vestige) tandis que le développement des voies navigables allait permettre l'importation sur des distances de plus en plus grandes. La géologie du bassin parisien se caractérise par l'affleurement de roches diverses, offrant une palette variée de matériaux de construction :

- calcaires propres à la fabrication de pierre de taille,
- meulières formées par silicification dans les calcaires de Brie et de Beauce,
- argiles de l'Yprésien pour les briques et les tuiles,
- sables d'Auvers et de Fontainebleau pour la verrerie...

Le béton a aujourd'hui supplanté la pierre. Fait de ciment (du calcaire et de l'argile chauffée à 1500°C qui durcit après réhydratation) englobant des granulats (sable ou graviers), il est produit largement à partir de ressources aussi proches que possible du lieu d'utilisation. Le bassin de la Seine ne manque ni de calcaire, ni d'argile : trois grandes cimenteries y sont en activité à Gargenville (78), au Havre (76) et à Couvrot (51). Les granulats sont les plus chers à transporter et la pression sur les ressources proches des villes est donc considérable ; les anciens dépôts alluvionnaires des grandes rivières du bassin en sont la source principale. La Bassée, à elle seule, produit près de 8 millions de tonnes de granulats, suivie par la vallée de la Marne autour de Meaux (2 millions de tonnes) dont les gisements sont en voie d'épuisement, et les boucles de la Basse Seine (Carrières-sous-Poissy et Guermes Moisson, 2 millions de tonnes), également presque épuisées. Au total, en Île-de-France, la surface de carrières en activité dépasse 4 000 ha.

L'agglomération parisienne a accumulé près de 3 milliards de tonnes de matériaux de construction. Pour entretenir et accroître son parc d'immeubles et ses infrastructures, elle consomme chaque année près de 3 millions de tonnes de matériaux, dont la moitié est extraite du sous-sol de l'Île-de-France, l'autre étant importée de l'extérieur. Dans le même temps, la ville génère 20 millions de tonnes de déchets de construction dont seuls 15% sont recyclés.

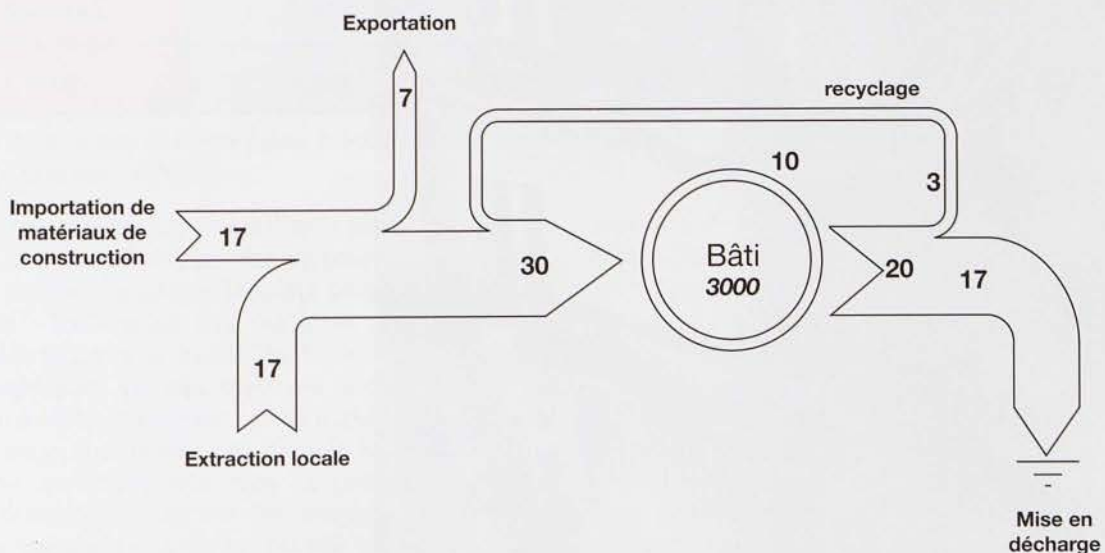


Figure 14 : Circulation des matériaux de construction en Île-de-France (autour de 2000), en millions de tonnes par an (simplifié d'après Barles, 2007).

LES AUTRES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Si la pierre domine dans la ville, une grande variété d'autres matériaux est nécessaire à sa construction. Leur accumulation au cours des siècles fait de la ville une mine de substances précieuses... ou potentiellement dangereuses. Dès 1820 par exemple, l'usage du zinc pour la couverture des toits connaît un véritable engouement à Paris : aujourd'hui, 40% de la surface des toits parisiens est recouverte de zinc, ce qui représente plus de 1000 ha. Annuellement, le ruissellement de l'eau de pluie sur les toits de Paris génère un flux de 30 à 60 tonnes de zinc et de 15 à 25 tonnes de cadmium vers les eaux de surface.

Le stock de plomb accumulé dans les villes du bassin de la Seine est estimé à quelques 260 000 tonnes (Thévenot et al., 2007), dont plus de la moitié sous forme de canalisations, de gaines électriques et de peintures au plomb associées aux anciens bâtiments d'habitation. Les problèmes de santé publique qui en résultent (risque de saturnisme) conduisent à des réglementations sévères visant au remplacement de ces équipements. Ce remplacement demandera plusieurs décennies, tant l'inertie de ces stocks accumulés est considérable.



Les toits de Paris, comme une mine de zinc.

Produire l'équipement

Vivre aujourd'hui en société c'est aussi disposer, outre des moyens de se nourrir et de se loger, d'un certain nombre d'outils et de biens de consommation, et profiter d'un certain nombre de services. La production et le commerce de ces biens et de ces services occupent la partie active de la population.

L'EMPLOI DANS LE BASSIN DE LA SEINE

À cet égard, l'espace du bassin de la Seine se distingue surtout du reste du territoire national par l'importance du développement des activités de service, largement liées au rôle administratif central dévolu à la capitale et à la désindustrialisation de l'agglomération à partir des années 1970 (Beaujeu-Garnier, 1977).



Au loin, la Défense : un pôle d'emplois tertiaires important.

secteur	Bassin Seine	%	Île-de-France	%	France	%
Agriculture	105 951	1.4	18 818	0.3	946 662	3.4
Construction	400 314	5.3	259 966	4.7	1 809 795	6.5
Industrie	968 224	12.8	560 563	10.2	4 315 665	15.5
Commerce	971 627	12.8	702 872	12.8	3 814 491	13.7
Services	5 130 492	67.7	3 952 855	71.9	16 928 544	60.8
total	7 576 608	100	5 495 074	100	27 843 000	100

Tableau 2 : Structure de l'emploi dans le bassin de la Seine et en Île-de-France par rapport à la moyenne nationale, exprimée en nombre d'actifs (source INSEE).

Cette tertiarisation importante de la partie centrale du bassin, jointe à la faiblesse des ressources minières du bassin parisien, explique le faible poids de l'industrie de base. Les cycles des matières premières sont très ouverts dans le bassin de la Seine, qui importe une large part de ses matières premières et des équipements consommés par sa population. Du point de vue de la qualité de l'eau dans le bassin, il résulte de cette caractéristique que la pollution liée aux établissements industriels est moins problématique dans le bassin de la Seine qu'elle peut l'être dans d'autres bassins, sièges d'une activité industrielle plus lourde. Néanmoins, il conserve, sous la forme de sites et sols pollués, la mémoire d'activités aujourd'hui révolues.

Même s'il subsiste encore une activité industrielle diversifiée, où la chimie, la papeterie et les constructions métalliques jouent un grand rôle, c'est davantage la pollution liée à l'activité domestique et à l'extrême concentration de population et d'équipements au centre du bassin qui constitue l'enjeu majeur en matière de qualité des eaux. Pourtant, l'activité au sein du bassin dépend étroitement d'activités extérieures à ses frontières : tout se passe comme si le bassin de la Seine avait externalisé certaines, parmi les plus polluantes, des fonctions qui lui sont nécessaires. Elles se traduisent comme une « empreinte » que l'activité du bassin de la Seine exerce sur des territoires extérieurs, parfois lointains. Les deux exemples qui suivent illustrent et précisent ce propos.

LE MÉTABOLISME DU PLOMB DANS LE BASSIN DE LA SEINE

On a évoqué précédemment (page 28) l'importance des stocks de plomb accumulés dans le bâtiment : canalisations, gaines électriques, peinture. D'autres équipements contiennent du plomb : batteries, accumulateurs, verres au plomb utilisés dans les écrans (oxydes), plomb de chasse, etc. Certains usages anciens du plomb sont en voie de disparition : les caractères d'imprimerie, les peintures au plomb, aujourd'hui interdites, le plomb tétraéthyle dans l'essence, banni depuis 2000. Ces biens sont produits à partir de plomb métal obtenu soit à partir de minerai (première fusion), soit à partir du recyclage d'objets en plomb (deuxième fusion) (figure 15).

Le bassin de la Seine, qui ne possède pas de ressource de minerai, ne comporte pas d'usine de première fusion. L'importance des stocks d'objets en plomb liés aux concentrations urbaines, constituant ce que l'on

peut qualifier de matière première secondaire, justifie par contre l'existence d'une activité de seconde fusion qui couvre une part importante des besoins locaux de plomb du territoire bassin de la Seine, mais également les exportations de biens manufacturés contenant du plomb. Au total, le bassin importe presque autant de plomb métal produit par première fusion à l'extérieur du système qu'il n'exporte de produits manufacturés vers l'extérieur : le bassin échappe ainsi à la partie la plus polluante du cycle du plomb.

La contamination de l'atmosphère, des sols et de l'hydrosphère résulte donc essentiellement ici des fuites liées à la production et à la consommation de produits en plomb ainsi qu'à l'« érosion » des stocks en place à très long temps de séjour, qui pour beaucoup d'entre eux représentent l'héritage de modes anciens de fonctionnement industriels.

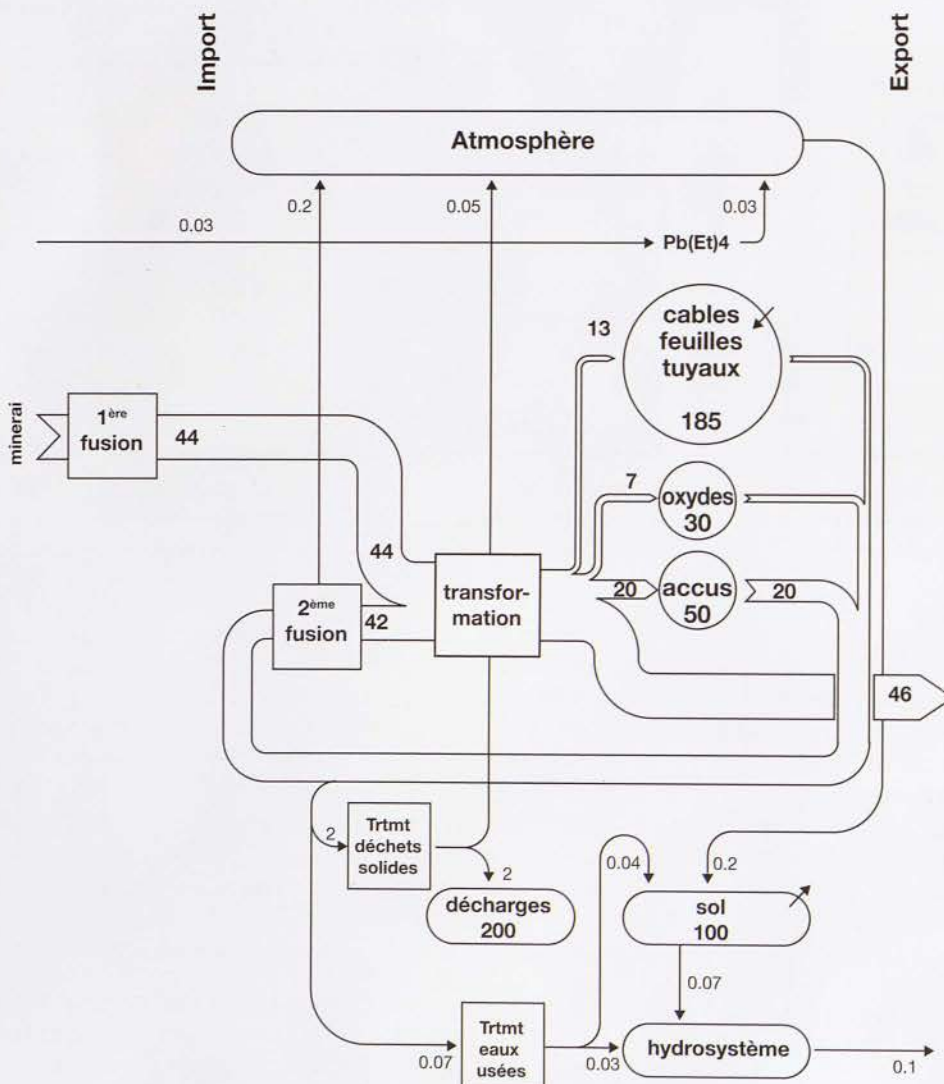


Figure 15 : Le métabolisme du plomb en France et dans le bassin de la Seine en 2000

Sources : Lestel et al. (2007 ; L. Lestel & J.M. Mouchel, comm pers.).

L'APPROVISIONNEMENT EN COTON ET SON EMPREINTE HYDRIQUE*

Chaque habitant du bassin de la Seine consomme en moyenne 7 kg de coton par an, essentiellement pour son habillement, le coton constituant aujourd'hui 40% des fibres textiles utilisées pour les vêtements. Le coton n'étant pas cultivé en France, à peine en Europe, toute l'industrie textile européenne dépend de l'importation de matière première extérieure. Elle est aussi en concurrence très forte avec les pays émergents qui ont développé une importante activité de transformation de la fibre et de confection. Le secteur du coton est donc un des secteurs économiques les plus mondialisés. En faisant l'hypothèse que le bassin de la Seine, qui comporte une activité textile significative, se comporte comme la moyenne européenne, il est possible de retracer la place des flux de coton du territoire Seine dans les grands échanges mondiaux de fibres (Figure 16). Pour son activité de transformation, le bassin de la Seine importe principalement des fibres des pays arides d'Asie centrale (Turkmenistan), d'Asie mineure (Turquie, Égypte, Syrie,...) et d'Afrique de l'ouest, des pays qui n'ont pas développé une activité transformatrice très importante. Mais pour notre consommation finale de textile, l'importation de produits d'origine asiatique (Chine, Inde, Pakistan) est massive et le prix de production très bas des articles courants issus

de cette partie du monde oblige l'industrie française à s'orienter surtout vers les produits à haute valeur ajoutée et haute technologie. On a donc ici encore un secteur où, pour d'autres raisons que dans l'exemple précédent du plomb, la fourniture des biens consommés localement est assurée largement par l'importation de produits finis.

La production de coton exige, à tous les stades de sa production des quantités d'eau très importantes : pour sa culture d'abord, à cause de la nécessité d'irriguer les terres plantées en cotonniers, des engrais et des traitements phytosanitaires nécessaires pour la filature, le tissage et la teinture. Le calcul des quantités d'eau nécessaires à toutes ces étapes dans les différents pays qui contribuent à l'approvisionnement du bassin de la Seine en coton montre que ce bassin importe virtuellement, avec les produits textiles qu'il consomme, près de 1200 millions de m³ d'eau par an, soit l'équivalent de la consommation d'eau potable de la population. Ce qui est paradoxal dans cette situation, c'est que cette « empreinte hydrique » du bassin de la Seine s'exerce dans des pays, en Asie et en Afrique, qui manquent cruellement d'eau par ailleurs.

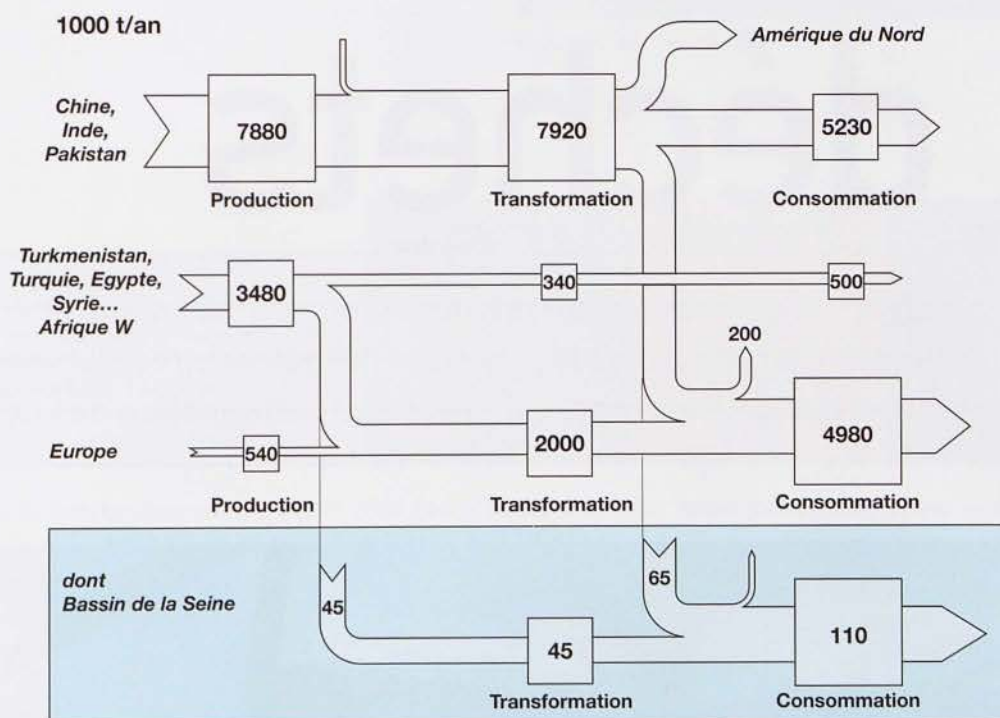


Figure 16 : Représentation simplifiée des flux de coton (en milliers de tonnes par an) entre l'Europe et les principales régions du monde qui contribuent à son approvisionnement. Les flux correspondants à l'échelle du bassin de la Seine (encadré bleu) sont calculés sur la base d'une consommation moyenne de coton de 7 kg/hab/an et selon l'hypothèse d'une similitude des échanges avec la moyenne des flux européens. (sources : Maligne, Montagni & Weyl, 2008).

Les fonctions
auxiliaires :



transport, énergie, élimination des déchets

À côté des fonctions essentielles (alimentation, construction et logement), le «Système Seine» exerce aussi des fonctions d'infrastructure qui visent à permettre le transport des biens, la fourniture d'énergie et l'élimination des déchets.



Pour assurer l'alimentation de la population, son logement et son approvisionnement en biens et services, de la matière et de l'énergie (ainsi que de l'information) doivent être transportées, à l'intérieur du bassin et à travers ses frontières, parfois sur de très longues distances. Nous examinons ici l'ampleur des transferts de matière et d'énergie opérés par l'activité humaine au sein du bassin de la Seine, et les voies qu'ils empruntent. Nous examinerons aussi comment s'organisent la collecte, le recyclage, l'élimination ou le stockage des résidus de la consommation de matière associée à cette activité humaine.

Les voies de transport

Le bassin de la Seine importe chaque année, du reste de la France et de l'étranger, plus de 130 millions de tonnes de marchandises : matériaux de construction, matières premières, combustibles, produits alimentaires, produits chimiques, biens manufacturés... Il en exporte quasiment autant, et les échanges internes aux régions qui le composent représentent près de 400 millions de tonnes de marchandises.

Les flux de marchandises transitent par route, par voie ferrée et par voie fluviale. La route représente de loin le mode de transport le plus important, avec plus de 80% de l'ensemble des quantités transportées.



Transport par péniche.

	national	international	total
flux internes	387 208		387 208
flux entrant vers le bassin	119 440	11 924	131 365
flux sortant du bassin	109 392	11 935	121 326
total	616 040	23 859	639 898

Tableau 3 : Flux de marchandises transportées en 2006 dans le bassin de la Seine (toutes marchandises et tous modes de transport confondus) en milliers de tonnes par an. (Source : base SitraM, MEEDDAT).



Figure 17 : Carte des voies fluviales et projet de canal Seine - Nord Europe.

La voie fluviale a représenté dans le passé un moyen de transport privilégié. Cela explique en partie la localisation des grandes agglomérations et marque encore profondément la distribution actuelle de la population du bassin. Des aménagements très lourds de la Seine et de ses principaux affluents en barrages éclusés ont permis, à partir de la seconde moitié du XX^e siècle, de réguler le niveau du plan d'eau de ces rivières, indépendamment du débit, de manière à rendre possible, en toute saison la navigation de péniches au tirant d'eau toujours plus important.

Le transport fluvial concerne encore aujourd'hui des flux d'échanges significatifs de marchandises, particulièrement en ce qui concerne les matériaux de construction et les combustibles. Les meilleures performances écologiques du transport fluvial constituent un atout indéniable par rapport au transport routier et pourraient lui permettre de reprendre une place plus importante dans le transport de marchandises.

Deux grands chantiers sont actuellement en cours pour accroître le trafic par voies d'eau : Port 2000 et la liaison Seine-Nord. La mise à grand gabarit du secteur Nogent-sur-Seine est également à l'étude. L'extension des capacités d'accueil du port du Havre, qui va profondément modifier le fonctionnement de l'estuaire

de la Seine, vise surtout à permettre un doublement de la capacité d'accueil des porte-containers -ces grands transporteurs maritimes qui ont participé à la mondialisation des échanges commerciaux- et de reprendre ainsi des parts de marché aux grands ports d'Anvers et de Rotterdam qui desservent aujourd'hui près d'un tiers du trafic international vers le bassin parisien. Le projet Seine-Nord Europe est en partie complémentaire. Il a pour objectif d'assurer une liaison par voies d'eau accessibles aux grands convois de plus de 4000 t entre le bassin de la Seine et ceux de l'Escaut et du Rhin. Outre la mise à grand gabarit d'une partie du réseau existant de rivières et de canaux déjà navigables, il s'agit essentiellement du creusement d'un canal de 105 km entre Compiègne et l'Escaut. La mise en service est prévue pour 2015.

Aucun aménagement de la morphologie des cours d'eau n'est neutre vis-à-vis de leur fonctionnement écologique. En modifiant les courants et les temps de séjour des masses d'eau, ces aménagements modifient le transport des particules et le développement des algues. Les grands secteurs canalisés des rivières du bassin de la Seine sont ainsi plus vulnérables à l'eutrophisation*, ce qui justifie des efforts accrus de réduction des apports de nutriments qui leur parviennent.

La consommation énergétique dans le bassin de la Seine

Les transports et le secteur résidentiel se partagent à part pratiquement égales 80% de la consommation énergétique du bassin de la Seine ; l'industrie consomme l'essentiel des 20% restants. Les produits pétroliers et le gaz naturel représentent ensemble 72% de l'approvisionnement, essentiellement importé si l'on excepte les quelques 540 milliers de tonnes de pétrole extraites des gisements encore exploités en Île-de-France.



Centrale nucléaire.

ktep/an	charbon	pétrole	gaz naturel	électricité	bois	autres	total	%
Industrie	317	640	4 537	2 281	207	398	8 381	19,1
résidentiel et tertiaire	0	2 790	6 795	6 534	1 104	1 102	18 326	41,9
agriculture		358	21	30			410	0,9
transport		16 209		457			16 666	38,1
total	317	19 997	11 354	9 303	1311	1 500	43 783	100
%	0,7	45,7	25,9	21,2	3,0	3,4	100	

Tableau 4 : Consommation finale d'énergie dans le bassin de la Seine en 2006, par secteur d'activité et par forme d'énergie (en milliers de tonnes d'équivalent pétrole par an).

L'approvisionnement en électricité est largement couvert par la production interne au bassin de la Seine ou par les centrales proches, qui représente 24 250 milliers de tonnes équivalent pétrole par an. Il s'agit essentiellement de production nucléaire dans les centrales de :

- Nogent-sur-Seine (Aube) 2 x 1300MW
- Chooz (Ardennes) 2 x 1450MW
- Paluel (Seine Maritime) 4 x 1300MW.

Les centrales thermiques classiques ne sont plus utilisées par EDF que pour assurer les pointes de consommation :

- Porcheville 4 x 600MW (fioul)
- Le Havre 2 x 600MW (charbon)
- Gennevilliers 250MW (turbine à combustion)
- Vitry-sur-Seine 2 x 250MW (charbon) + 2 x 250MW (turbine à combustion)
- Vaires-sur-Marne 2 x 250MW (turbine à combustion)

La production d'électricité renouvelable (éolienne et hydraulique) est très limitée (140 ktep en 2006).

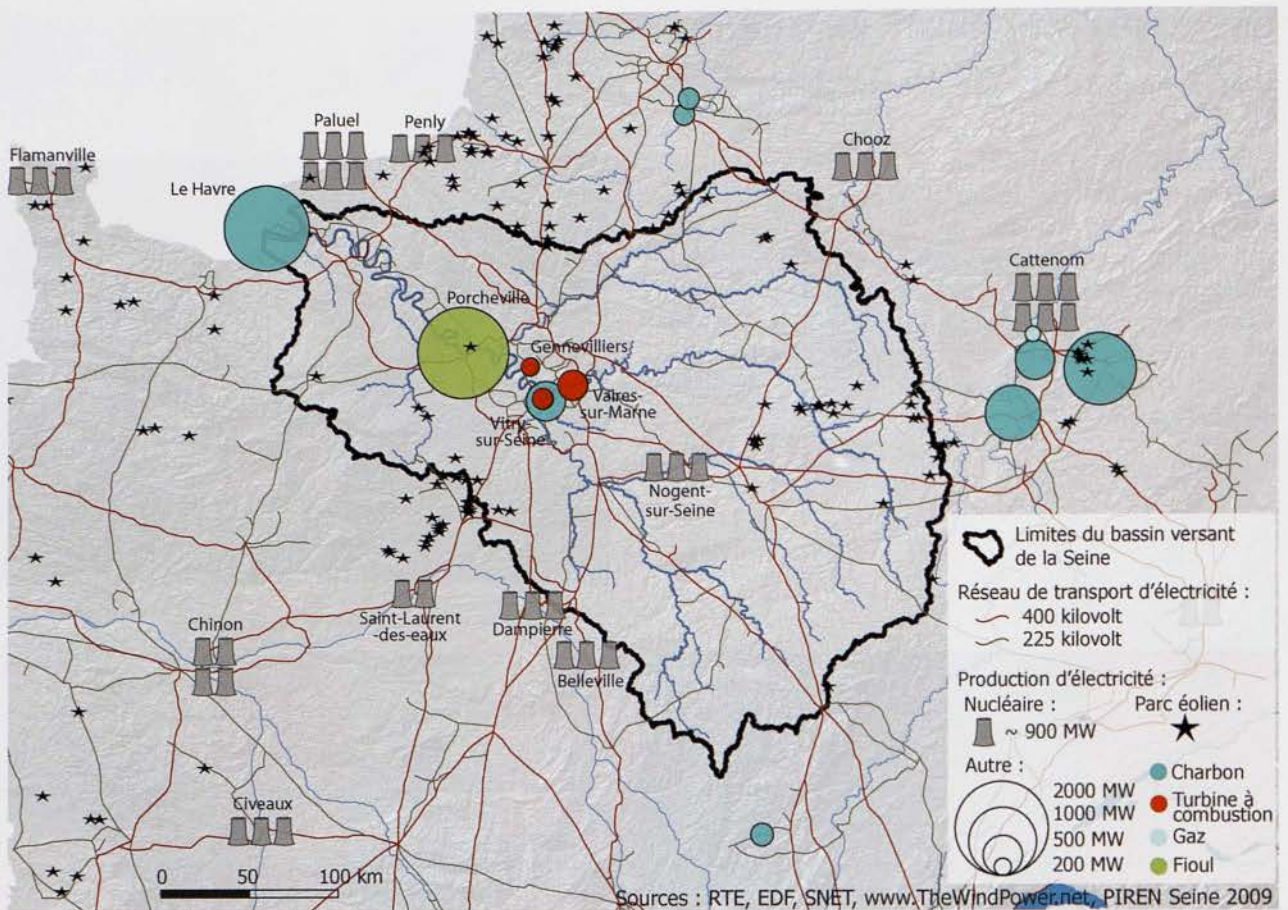


Figure 18 : Carte des centrales électriques et des sites nucléaires dans le bassin de la Seine et alentour.

On remarquera que la localisation des grandes centrales thermiques (nucléaires ou à flamme) est toujours en bordure d'un cours d'eau (ou de la mer). La production thermique d'électricité suppose en effet

des capacités de refroidissement considérables et est, de ce fait, grande consommatrice d'eau : 0,7 à 1 m³/s par tranche de 1000 MW, ce qui représente tout de même l'écoulement moyen d'une surface de 150 km².

Les déchets urbains

La consommation des agglomérations urbaines s'accompagne aujourd'hui de la production de déchets, à raison d'environ 1,5 kg de déchets solides et 300 l d'eau usée par habitant et par jour.

Les municipalités ont mis en place des circuits complexes et coûteux pour récolter, transporter, traiter, éliminer et parfois recycler ces déchets. Si de tels circuits existent depuis aussi longtemps que les villes elles-mêmes, leur finalité est bien différente de ce qu'elle était jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Les excréta urbains ont en effet longtemps constitué une précieuse source de matière première pour l'activité industrielle urbaine naissante, ainsi qu'une source d'engrais pour l'agriculture.

C'est en se détournant de ces « matières premières secondaires » au profit de sources plus abondantes, plus rentables, plus commodes, que le système industriel du XX^e siècle a « inventé » la notion de déchets urbains (Barles, 2005) et les moyens sauvages de leur élimination que constituaient la mise en décharge des ordures ménagères et l'élimination des eaux usées vers les rivières par le tout à l'égout.

LES DÉCHETS SOLIDES MÉNAGERS ET INDUSTRIELS BANALS

En Île-de-France, la production totale de déchets ménagers et assimilés représente quelques 5700 milliers de tonnes/an, auxquelles s'ajoutent près de 4700 milliers de tonnes de déchets industriels ordinaires (hors déchets du bâtiment). Depuis une loi de 1992, la mise en décharge ne devrait plus concerner aujourd'hui que les déchets ultimes, c'est-à-dire ne pouvant subir aucune valorisation par recyclage, compostage ou incinération. On en est encore loin aujourd'hui : près d'un million de tonnes d'ordures sont encore enfouies par an, auxquelles s'ajoutent 820 millions de tonnes de déchets industriels banals, pour la seule région Île-de-France. Si le tri sélectif et le recyclage sont en progression, ils ne concernent encore que moins de 15% des déchets ménagers. L'incinération est aujourd'hui le mode de traitement dominant des déchets solides urbains : la combustion transforme les ordures en gaz qui sont réinjectés dans l'atmosphère (pour plus d'un tiers du contenu) et en mâchefers qui sont valorisés comme remblais dans les travaux publics.



Usine d'incinération.

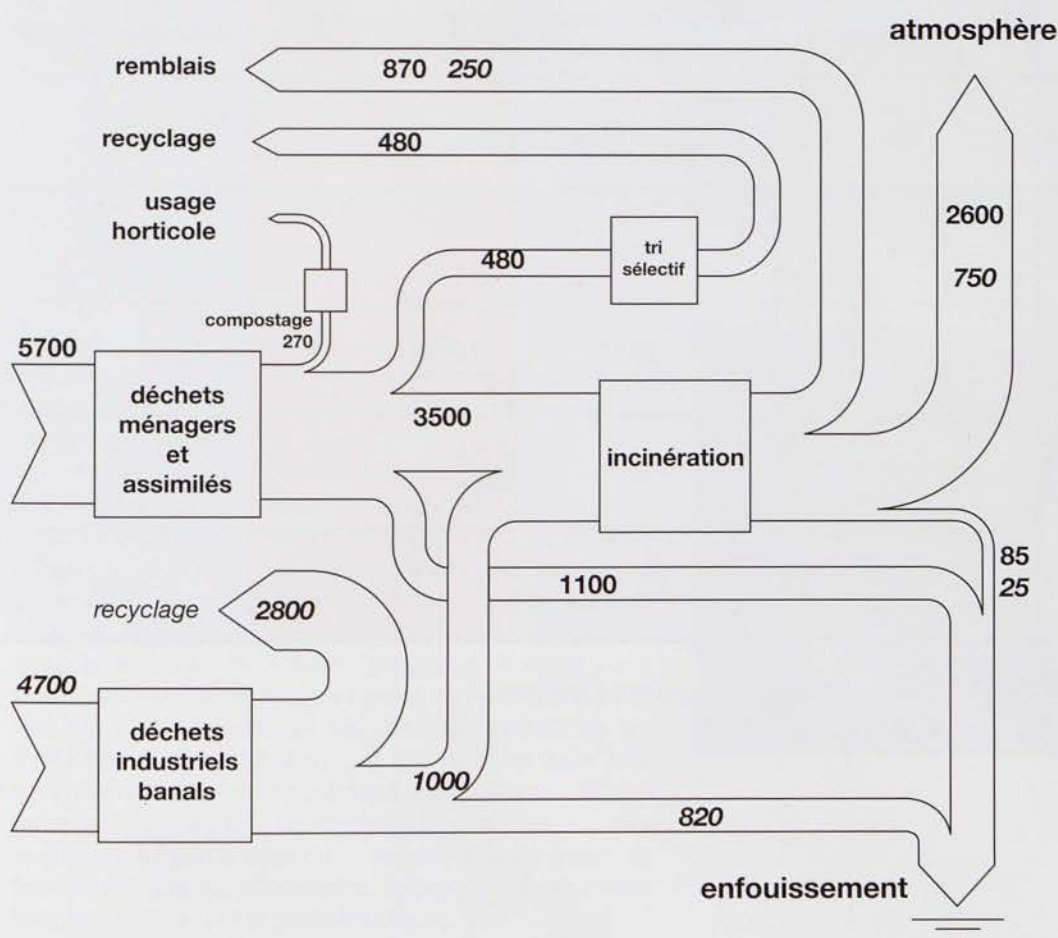


Figure 19 : Circuits de traitement et destination finale des déchets urbains en Île-de-France autour de 2004 (en milliers de tonnes). Les chiffres relatifs aux déchets industriels banals sont en italique pour les distinguer de ceux relatifs aux déchets ménagers et assimilés (d'après Barles, 2007).

LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES

Depuis la fin du XIX^e siècle, la généralisation de la distribution d'eau potable à domicile en milieu urbain s'est accompagnée de la mise en place de la collecte des eaux usées par un réseau d'égouts destiné à les acheminer vers les cours d'eau, à l'aval des villes.

L'équivalent habitant (equ-hab.) désigne la charge polluante brute rejetée en moyenne par un habitant avec ses eaux usées. Elle représente par jour environ 20 g de carbone organique biodégradable, 15 g d'azote sous forme organique ou ammoniacale, 2 g de phosphore, ainsi que 80 milliards de bactéries fécales et des quantités non négligeables de substances artificielles liées au mode de vie moderne, détergents, médicaments, métaux lourds...

Les stations d'épuration qui traitent les eaux usées avant leur rejet en rivière retiennent ou éliminent une partie de cette charge polluante.

Les stations d'épuration les plus courantes, utilisant le procédé biologique par boues activées, minéralisent la matière organique contenue dans les eaux usées, évitant ainsi les déficits d'oxygène causés par leur rejet dans les rivières ; elles sont cependant peu efficaces pour éliminer l'azote et le phosphore que seuls des traitements spécifiques, plus coûteux, peuvent retenir significativement (traitement tertiaire).

Enfin des traitements particuliers de désinfection par UV sont mis en place lorsqu'il y a nécessité de réduire très fortement les risques épidémiologiques liés aux bactéries fécales présentes dans les rejets urbains.

	Avant traitement	Après traitement par boues activées	Après traitement tertiaire	Après désinfection
Matière en suspension (g/hab/j)	80	10	8	8
Matière organique biodégradable (gC/hab/jour)	18	4	2	1,5
Azote total (gN/hab/jour)	15	12	2	
Phosphore total (gP/hab/jour)	3	2	0,2	
Coliformes fécaux (10 ⁹ /hab/jour)	80	5	0,5	0,002

Tableau 5 : Performance des différents types de traitement en stations d'épuration.

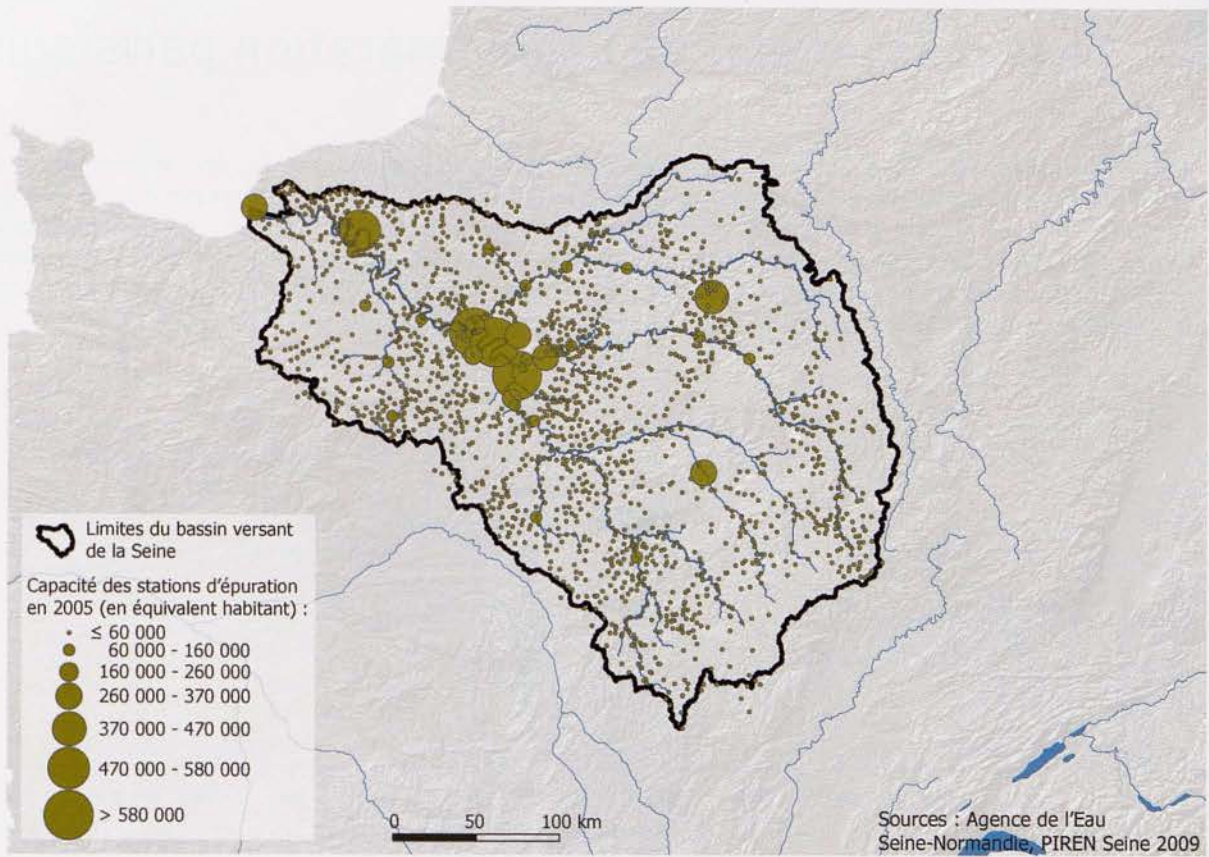


Figure 20 : Carte des stations d'épuration des eaux usées urbaines dans le bassin de la Seine.

Le traitement des eaux usées est rendu plus difficile par temps de pluie. Les eaux de ruissellement urbain sont particulièrement chargées en pollution parce qu'elles reprennent l'ensemble des dépôts atmosphériques accumulés sur les surfaces urbaines : métaux lourds, micropolluants organiques, pesticides urbains, etc. Dans la plupart des centres villes, les égouts sont de type unitaire, c'est-à-dire qu'ils collectent à la fois les eaux usées domestiques et les eaux pluviales. L'afflux soudain, lors d'un orage, de volumes importants supplémentaires à traiter provoque d'abord une modification brutale des conditions de fonctionnement des stations d'épuration qui diminue l'efficacité du traitement ; dans certains cas les volumes sont tels qu'un délestage sans traitement est inévitable. Même dans les zones plus récemment urbanisées où des systèmes d'égouts séparatifs ont été mis en place, le traitement des eaux pluviales apportées de manière très irrégulière, reste problématique.



Station d'épuration.

Évolution de la qualité de la Seine en liaison avec l'assainissement de l'agglomération parisienne

Les eaux usées apportent au milieu aquatique de la matière organique et de l'ammoniaque que des microorganismes consomment en respirant l'oxygène de l'eau, ce qui la rend impropre à la vie des poissons. Depuis la mise en place à la fin du XIX^e siècle du tout à l'égout et des premiers dispositifs d'épuration des eaux usées, voici quatre stades de l'évolution de la qualité de la Seine en aval de Paris. Les points représentent des mesures effectuées dans la rivière en situation de bas débit estival (80-150 m³/s à Poses, température >20°C). Les courbes résultent du calcul effectué par les modèles mis au point par le PIREN-Seine.

1874 : PARIS COMPTE 2 MILLIONS D'HABITANTS. LEURS EAUX USÉES SONT REJETÉES SANS TRAITEMENT À CLICHY. LA SEINE EST PRIVÉE D'OXYGÈNE SUR 40 KM EN AVAL. LA RÉCUPÉRATION SE FAIT RAPIDEMENT APRÈS LA CONFLUENCE DE L'OISE.

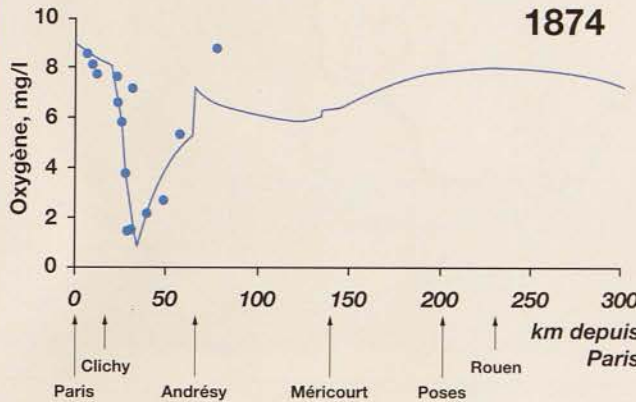


Figure 21

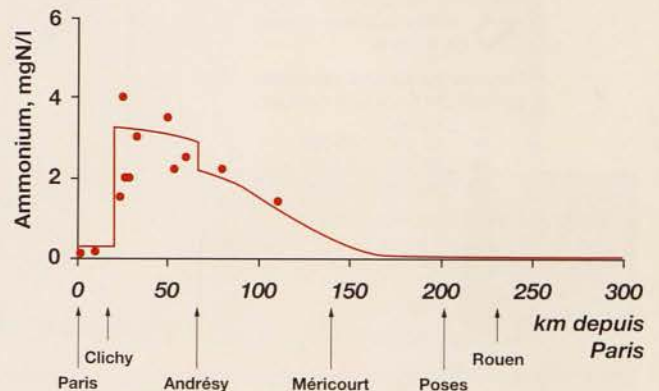


Figure 22

1970 : L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE COMPTE 10 MILLIONS D'HABITANTS. UNE PARTIE DES EAUX USÉES EST ENCORE REJETÉE À CLICHY, UNE AUTRE PARTIE EST ACHÉMINÉE VERS LA STATION D'ÉPURATION D'ACHÈRES QUI NE LA TRAITE QU'IMPARFAITEMENT. LA SEINE EST SOUS-OXYGÉNÉE SUR 100 KM EN AVAL DE PARIS, PUIS ENCORE SUR PLUS DE 50 KM DANS LA RÉGION ROUENNAISE, À CAUSE DE L'OXYDATION DE L'AMMONIUM.

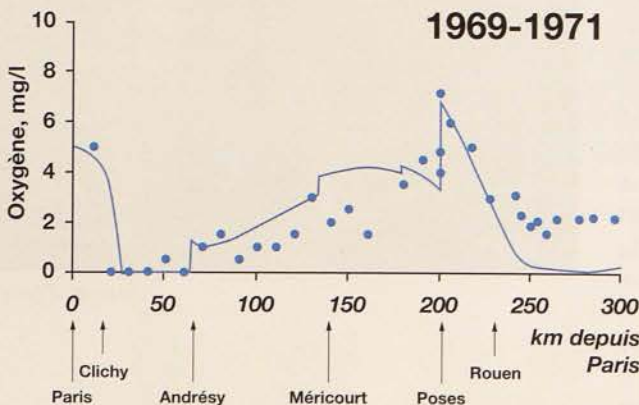


Figure 23

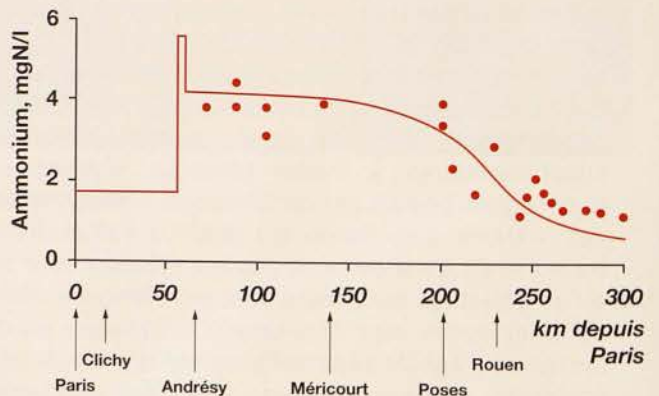


Figure 24

40

2000 : TOUTES LES EAUX USÉES PARISIENNES SONT ACHÉMINÉES VERS LES STATIONS D'ÉPURATION. UNE BONNE OXYGÉNATION EST RESTAURÉE PARTOUT, SAUF À L'AVAL IMMÉDIAT D'ACHÈRES ET DANS LA RÉGION ROUENNAISE.

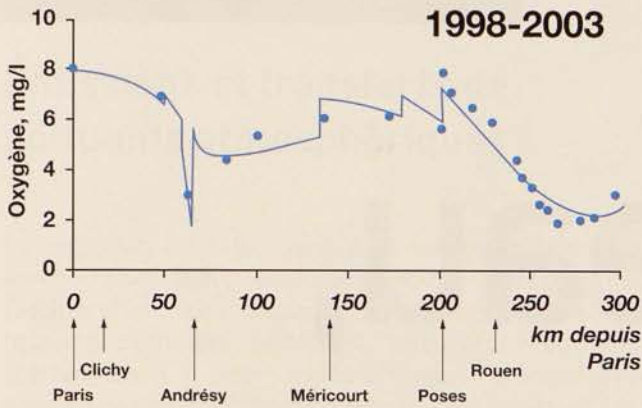


Figure 25

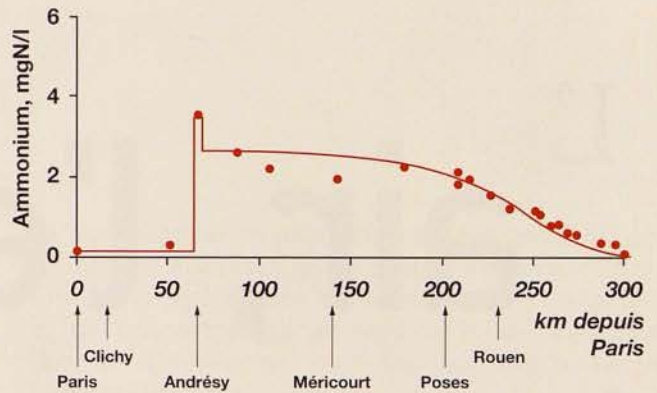


Figure 26

2007 : L'ÉPURATION COMPLÈTE DE L'AMMONIUM DES EAUX USÉES PARISIENNES, EST MISE EN PLACE, CE QUI PERMET DE RESTAURER UN BON NIVEAU D'OXYGÉNATION PARTOUT DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE.

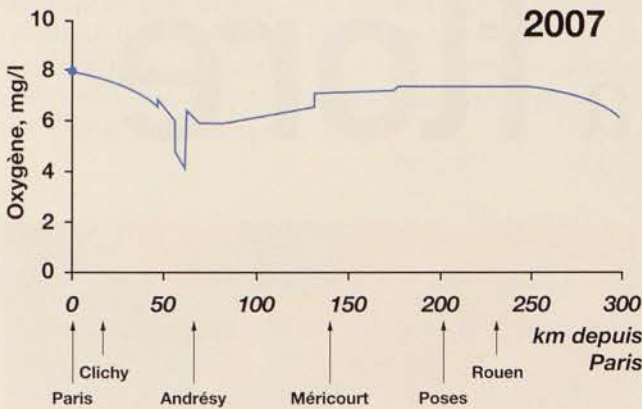


Figure 27

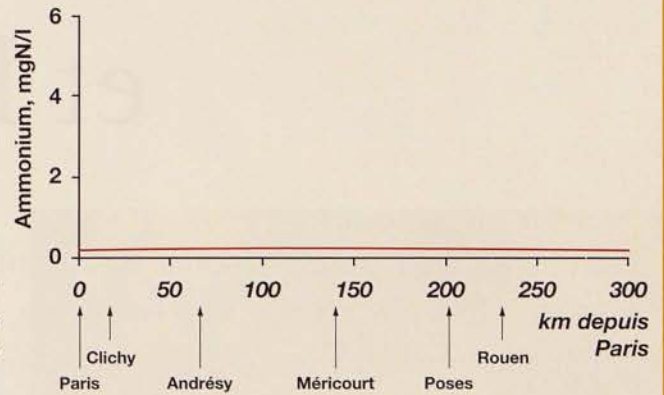


Figure 28



L'air, l'eau, la faune, et la flore

Le climat, l'air qu'on respire, les plantes et les animaux sauvages, tout ce qu'il reste de la « Nature » sur le territoire, font aussi partie du « Système Seine ». Ils participent étroitement à son fonctionnement.



L'atmosphère, c'est l'air qu'on respire. C'est aussi le réceptacle de toutes les substances gazeuses émises par les activités humaines, des substances éventuellement susceptibles de retomber au sol sous forme de poussière ou dissoutes dans la pluie, à des distances plus ou moins grandes de leur lieu d'émission.

C'est enfin le principal régulateur du climat de la planète. Par l'atmosphère, les territoires sont donc connectés aux territoires voisins, voire au-delà à la planète entière, et influencent donc le climat par leurs émissions de gaz à effet de serre.

Émissions et transferts de polluants atmosphériques

La pollution de l'atmosphère trouve principalement son origine dans les combustions associées à l'incinération des ordures et à l'utilisation de produits pétroliers (véhicules, chauffage, centrales thermiques...). Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), sous-produits cancérigènes des combustions d'hydrocarbures, ainsi que les dioxines figurent en bonne place parmi ce type de polluants. Les combustions à haute température sont aussi génératrices d'oxydes d'azote (NOx), responsables de la production d'ozone dans la basse atmosphère et de l'acidification des pluies. La volatilisation de produits toxiques au niveau des sites de production, d'utilisation ou de décharge contribue aussi à la pollution atmosphérique : il en est ainsi des polychlorobiphényles (PCB) utilisés jusqu'en 1976 comme lubrifiants et isolants dans les gros transformateurs électriques, et qui continuent à polluer l'environnement à partir de leurs sites de stockage.

Le transport aérien peut disperser ces polluants sur de longues distances, avant qu'ils ne retombent sous forme de dépôts secs ou entraînés par les pluies, et ne soient transportés vers le milieu aquatique par le ruissellement sur les surfaces urbaines imperméabilisées.

Comme le transfert atmosphérique se fait dans le sens des vents dominants, d'ouest en est, et que l'activité humaine est concentrée dans la partie aval du bassin de la Seine, il en résulte un mécanisme de redistribution des polluants de l'aval vers l'amont.

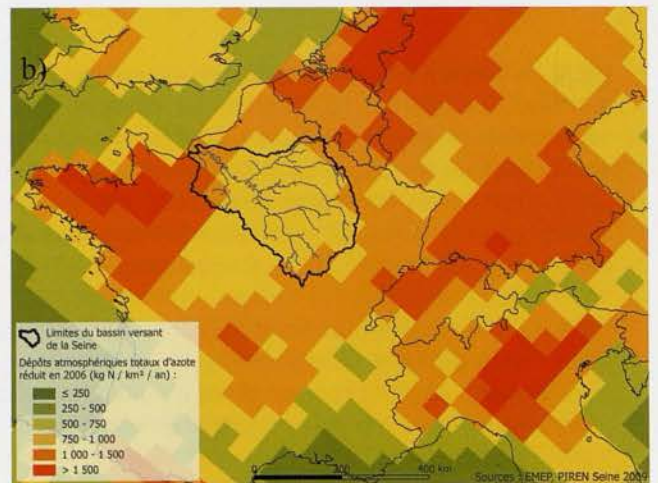
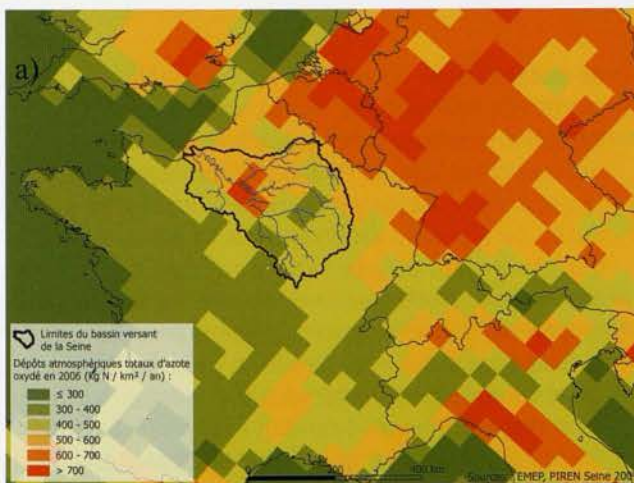


Figure 29 : Dépôts atmosphériques totaux d'azote oxydé (a) et réduit (b) (données EMEP). Les oxydes d'azotes sont surtout générés par les villes (trafic automobile et centrales thermiques). L'azote réduit provient surtout de l'élevage.

ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Les gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O) ne sont pas à proprement parler des polluants : ils font partie des cycles naturels du carbone et de l'azote ; les perturbations induites dans ces cycles par les combustibles des fossiles d'une part, par la fixation industrielle de l'azote d'autre part, ont cependant conduit à un accroissement important de la teneur de ces gaz dans l'atmosphère, avec les conséquences que l'on sait pour le climat planétaire.

Les chiffres de la consommation énergétique du bassin de la Seine permettent d'évaluer les émissions de CO_2

liées à la consommation de combustibles fossiles à quelques 30 millions de tonnes de carbone.

L'agriculture, pourtant peu consommatrice de combustibles fossiles, est aussi émettrice de gaz à effet de serre : des gaz comme le protoxyde d'azote (N_2O) et le méthane (CH_4), émis surtout par les sols agricoles pour les premiers, par les ruminants pour le second, contribuent significativement à l'effet de serre, en nettement moindre proportion que les activités urbaines et le transport cependant.

secteur	Unité spécifique	Mt CO_2 equiv/an
Combustibles fossiles (tous secteurs)	30 200 kt eqC/an	110
Combustibles fossiles par l'agriculture	360 kt eqC/an	1,3
N_2O émis par l'agriculture	6 000-17 000 t N- N_2O /an	3 - 8
CH_4 émis par l'élevage	132 000 t CH_4 /an	3
total		116 - 121

Tableau 6 : Principales émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique dans le bassin de la Seine (sources : ADEME, 2007 ; Garnier et al., 2009; Toche, in prep.).

Les abréviations t, kt et Mt sont utilisées respectivement pour tonnes, kilo tonnes et million(s) de tonnes.

La production d'eau potable par le bassin versant

L'eau de pluie n'est pas potable ; c'est sa percolation à travers le sol qui lui confère sa composition en sels minéraux en même temps qu'elle la débarrasse des composés issus de la pollution atmosphérique. Cette percolation la charge également des éléments contenus dans le sol. Ce sont donc les sols du bassin versant qui élaborent l'eau que nous buvons.

Dans la plupart des communes rurales, c'est l'eau souterraine pompée localement que l'on distribue, le plus souvent sans traitement autre qu'une chloration. Mais l'agriculture intensive a profondément altéré la qualité de cette ressource.

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 nitrate supérieures à la norme

de potabilité de $50 \text{ mgNO}_3/\text{l}$ (11.3 mgN/l). Si les eaux souterraines n'ont pas toutes encore atteint ce niveau de contamination, c'est grâce à la dilution au sein des masses d'eau souterraines par des eaux d'infiltration forestières et herbagères, mais aussi en raison de la durée du transit du nitrate dans la zone non saturée* qui retarde leur arrivée dans la nappe. La poursuite des pratiques agricoles actuelles devrait amener le niveau moyen de contamination des aquifères du bassin de la Seine au dessus de la limite de potabilité. L'usage systématique des herbicides en grandes cultures (le « sarclage chimique ») conduit également à contaminer les eaux superficielles et les eaux souterraines par des molécules actives potentiellement toxiques ou par leur produits de dégradation qui ne le sont pas moins. La diversité des substances utilisées en rend le contrôle très ardu.

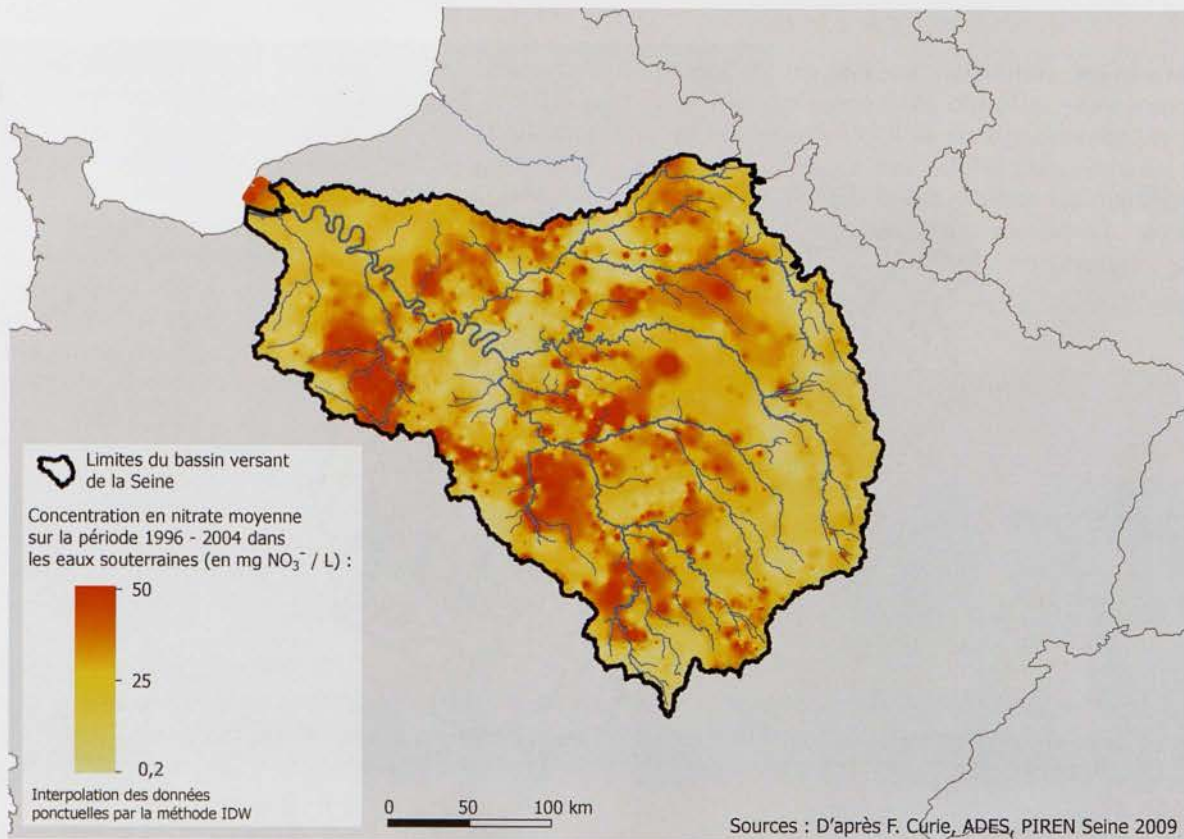


Figure 30 : Contamination nitrique des aquifères.

Les grandes agglomérations, dont Paris, s'alimentent en eau potable, soit par des captages plus lointains qui acheminent alors l'eau par aqueduc, soit en prélevant l'eau des rivières, ce qui implique un traitement de potabilisation beaucoup plus poussé. Ce traitement comprend généralement :

- une étape de clarification par floculation-décantation destinée à éliminer les particules en suspension ;
- une ou plusieurs étapes de filtration sur sable et sur charbon actif, destinées à éliminer les composés organiques dissous (y compris les micropolluants tels que les pesticides) ;
- une étape de désinfection.

Ces filières de traitement sont impuissantes vis-à-vis de la contamination nitrique. Fort heureusement, les teneurs en nitrate des cours d'eau sont significativement inférieures à celles des eaux sous-raciaires et phréatiques qui les alimentent, grâce à la dénitrification, essentiellement bactérienne 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.

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 par rapport à ce qu'il pouvait être dans le paysage rural traditionnel, marqué par la présence d'innombrables étangs augmentant 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 intermédiaires, à limiter les périodes de sol nu), elles ne seront malheureusement suivies d'effets visibles sur la concentration des nappes phréatiques qu'après plusieurs décennies. Parallèlement, des mesures d'aménagement du paysage destinées à préserver ou à restaurer la fonction de rétention 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 : systématiquement les eaux contaminées en nitrates le sont aussi en pesticides. La rémanence dans les aquifères des pesticides ou de leurs produits de dégradation est considérable.

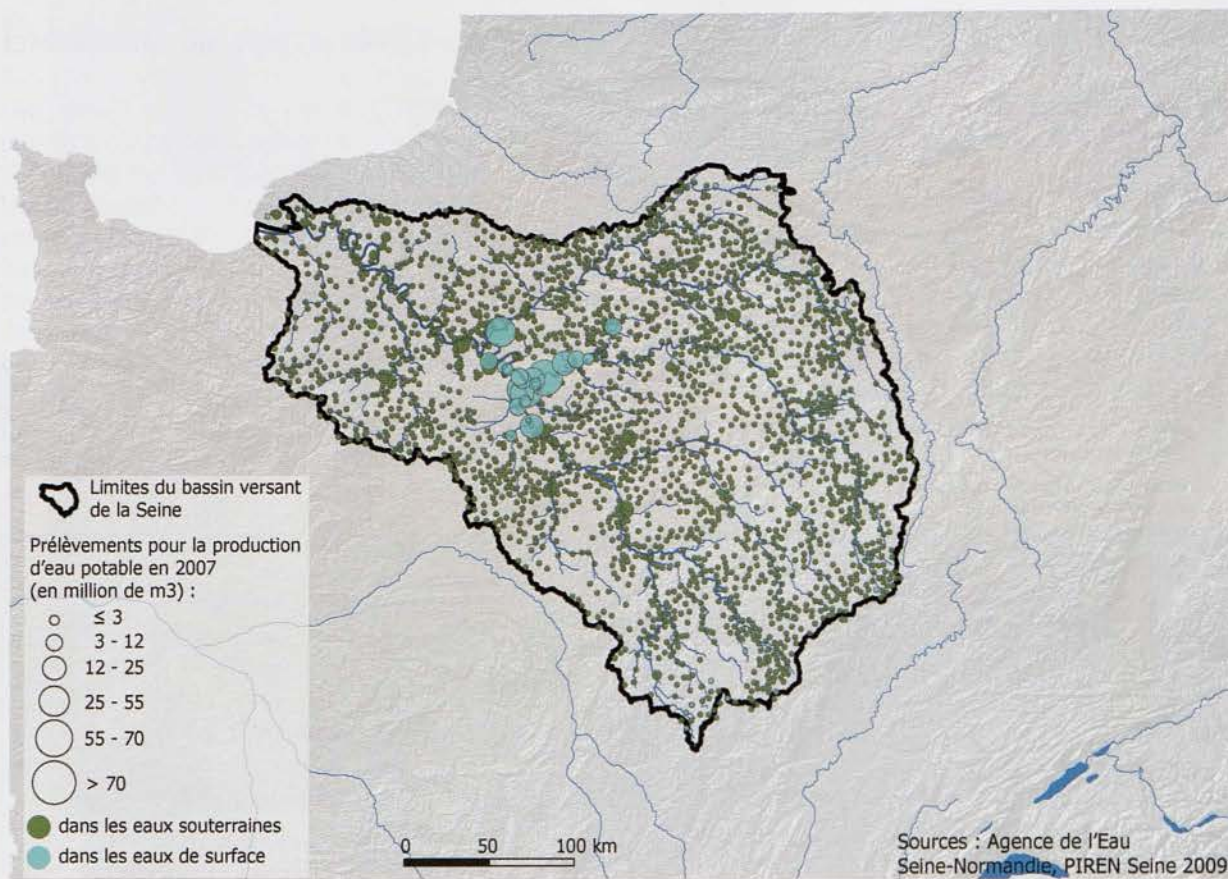


Figure 31 : Prélèvements d'eau de rivière et d'eau souterraine pour l'approvisionnement en eau potable.

Biodiversité

On sait aujourd'hui que la richesse en espèces des milieux représente à la fois un indicateur de leur qualité et un garant de leur capacité à résister aux perturbations. La biodiversité d'un territoire, outre un caractère de richesse patrimoniale, offrent ainsi d'inestimables services en régulant la faune et la flore du milieu rural.

L'intensification de l'agriculture et sa spécialisation régionale a conduit à une profonde banalisation du paysage et à la suppression ou la fragmentation des habitats, réduisant drastiquement le nombre des espèces sauvages associées au paysage rural. Parallèlement, la biodiversité des espèces cultivées, suite à la standardisation des semences et des variétés homologuées, s'est elle aussi considérablement réduite, accroissant les risques d'invasion de parasites ou de ravageurs, qui doivent se traiter par le recours aux pesticides chimiques.



Usine d'eau potable de Méry sur Oise.

Un enjeu majeur pour le maintien de la biodiversité dans un territoire aussi anthropisé que le bassin de la Seine consiste à assurer la connectivité des habitats potentiels pour les espèces sauvages. Cela est vrai par exemple des massifs forestiers, pour assurer la circulation des grands mammifères en dépit des réseaux routiers et ferroviaires ; un réseau plus ou moins connexe de zones humides est aussi une condition de survie pour les batraciens, de même qu'une trame herbacée continue est nécessaire au maintien de nombreux insectes et reptiles.

Dans le milieu aquatique, le peuplement de poisson représente l'indicateur biologique* de qualité par excellence. 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.

En dépit des multiples modifications de la morphologie et de la qualité des cours d'eau, la plupart des espèces de poissons vivant dans nos cours d'eau avant la révolution industrielle sont encore présentes, à l'exception des espèces migratrices, qui ont disparu ou, qui comme l'anguille sont en voie d'extinction. Un total de 46 espèces de poissons est ainsi dénombré aujourd'hui sur l'ensemble du réseau hydrographique de la Seine. Mais leurs peuplements traduisent une dégradation très nette, 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. Certaines espèces, comme la lotte ou le brochet, sont menacées de disparaître, parce que leur habitat est dangereusement fragmenté et que les conditions indispensables à leur reproduction sont de moins en moins souvent satisfaites.

Les petits cours d'eau en tête de bassin souffrent des pollutions diffuses ou de l'érosion des sols, responsables du colmatage des fonds. Ces phénomènes pénalisent la reproduction et le développement de nombreuses espèces comme la lamproie de planer, la vandoise, la bouvière ou la loche.

Sur les grands axes fluviaux navigués en amont de Paris, maintenant que les efforts en matière de qualité physico-chimique de l'eau ont conduit à une amélioration sensible, ce sont 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. Il faut aujourd'hui œuvrer à leur réhabilitation par des mesures d'ingénierie écologique : réaménagement de berges, restauration de sites de pont, reconnexion de bras-morts ou de zones humides rivulaires. Dans la Seine à l'aval de l'agglomération parisienne où se

concentrent les pressions extrêmes, les conditions de survie des poissons (très difficiles, voire impossibles dans les années 1970) se sont maintenant largement améliorées ; grâce aux efforts consentis en matière d'épuration, un total de 28 espèces est maintenant dénombré dans l'agglomération parisienne, la présence de certaines restant cependant encore rare.



Le brochet, une espèce menacée de disparition.



L'anguille, une espèce menacée de disparition.

CONCLUSION

Le bassin de la Seine constitue à l'évidence un territoire plurirégional, structuré par son réseau hydrographique ainsi que par la présence en son centre, au point de confluence des trois grands tributaires (Seine, Marne et Oise), d'une grande agglomération urbaine. Historiquement, le bassin de la Seine a constitué l'hinterland naturel de Paris et son milieu rural s'est développé en très étroite liaison avec l'accroissement démographique de l'agglomération parisienne et des autres villes du bassin. Ce territoire a donc assuré pendant des siècles les principales fonctions nécessaires à la vie de ses habitants, leur procurant nourriture, ressources en eau, énergie, matériaux de construction, assimilant les déchets de leur consommation, tout en assurant la présence d'une flore et d'une faune sauvage riche et diversifiée, dans une mosaïque paysagère pourtant créée par l'action humaine.

Qu'en est-il aujourd'hui, alors que depuis la seconde moitié du XX^e siècle, le recours accru aux énergies fossiles, la généralisation de l'agriculture industrielle et l'accroissement des distances de transports de marchandises ont profondément modifié le mode de fonctionnement de ce « Système Seine » ? Peut-on envisager un fonctionnement harmonieux et durable ?



Paris vu du ciel.

L'empreinte écologique du bassin de la Seine

Le concept d'empreinte écologique (Wackernagel & Rees, 1996) a rejoint aujourd'hui la batterie des indicateurs de développement durable très utilisés dans les programmes de sensibilisation et de communication menés tant par les associations citoyennes que par les pouvoirs publics. L'empreinte écologique d'une population est définie par le décompte des surfaces productives de la biosphère nécessaires pour assurer le flux de consommation

matérielle et énergétique de son économie. Mesuré en hectare global de superficie de productivité moyenne mondiale (hag), cet indicateur permet d'analyser le partage international des ressources mondiales, ou la durabilité du mode de vie d'une ville, d'une population, d'un habitant (WWF, 2002). Récemment, l'IAURIF (2005) a publié une évaluation de l'empreinte écologique de l'Île-de-France, estimée à 5,59 hag par habitant (voir tableau 7).

	énergie	terres arables	prairies	forêts	sols dégradés	mers	total
alimentation	0,20	0,89	0,18	-	-	0,38	1,66
logement	0,43	-	-	0,01	0,05	-	0,49
mobilité	0,67	-	-	-	0,03	-	0,70
biens	1,75	0,13	0,02	0,57	0,02	0,001	2,49
services	0,25	-	-	-	-	-	0,25
total	3,30	1,02	0,20	0,58	0,10	0,39	5,59

Tableau 7 : Empreinte écologique du francilien moyen, selon IAURIF, 2005. En hectare global (hag) par habitant.

Si l'on extrapole cette estimation à l'ensemble de la population du bassin (16 millions d'habitants), son emprise spatiale serait de 900 000 km², soit plus de dix fois la surface effective qu'elle occupe (76 000 km²) !

On peut critiquer cette approche, notamment en ce qui concerne la manière dont sont comptabilisés les besoins énergétiques (en surface forestière nécessaire pour absorber le CO₂ produit par la combustion des combustibles fossiles ou pour produire une énergie de biomasse équivalente). On peut aussi arguer du fait que la productivité moyenne mondiale des terres agricoles est utilisée dans les calculs sans tenir compte de ce que les terres du bassin de la Seine sont beaucoup plus productives. Il n'empêche que ces chiffres montrent la très grande dépendance de notre société vis-à-vis de ressources situées hors de son territoire. L'approvisionnement énergétique en est un exemple évident ; le cas du coton que nous avons décrit plus haut en offre en autre. La délocalisation d'un certain nombre de fonctions hors du territoire est une caractéristique lourde de l'évolution récente du bassin de la Seine.

La pluri-fonctionnalité des espaces : un enjeu pour l'aménagement durable du territoire

Une autre tendance générale que révèle notre analyse est la spécialisation progressive des espaces. Ainsi, la spécialisation du paysage qu'a amenée l'agriculture industrielle s'est accompagnée de la perte d'une grande part des fonctions qu'assurait le paysage de l'agriculture traditionnelle. Quand la mosaïque des champs, des prairies et des bosquets fait place à l'uniformité de la monoculture céréalière, le territoire ne peut plus assurer sa fonction de réservoir d'une faune et d'une flore sauvage diversifiée. Quand les étangs sont comblés, les cours d'eau recalibrés et les zones humides riveraines drainées, le territoire perd son pouvoir tampon contre les crues et sa capacité de rétention vis-à-vis des nutriments issus du lessivage des terres arables.

Enfin et surtout, quand les zones d'agriculture industrielle intensive perdent leur capacité à produire une eau de qualité conforme aux exigences de l'alimentation en eau potable, le dernier lien nourricier qui subsistait encore entre les habitants et leur territoire, par l'intermédiaire de l'« eau du robinet », est menacé de rupture. L'eau de distribution deviendra-t-elle un sim-

ple produit sanitaire, tandis que nous achèterons en bouteille dans les supermarchés l'eau-aliment destinée à la boisson et à la cuisine, comme nous achetons, par exemple, les tomates d'Israël et des haricots verts du Kenya ? C'est déjà ce qui se met en place via la stratégie commerciale de certaines firmes agro-alimentaires. Il est aussi très sérieusement envisagé de créer çà et là des « Parcs Naturels Hydro-géologiques », zones-sanctuaires dont l'agriculture serait bannie pour garantir la production d'une eau potable de qualité, cependant que le reste du territoire serait laissé à une production agricole sans entraves environnementales. On franchirait alors un pas de plus dans la spécialisation des espaces.

Est-ce un tel partage de notre territoire que nous souhaitons ? Ne devrions nous pas plutôt cesser de considérer la campagne seulement comme une usine de production agricole à exporter sur le marché mondial, considérer les multiples services que le territoire rural rendait et étudier ceux qu'il peut encore rendre à ses habitants et ceux des villes proches. L'exigence citoyenne d'une eau de distribution de bonne qualité devient alors un incitant puissant pour une gestion plus équilibrée du territoire.

L'estuaire de la Seine offre un autre exemple de débat sur la plurifonctionnalité des espaces. Les aménagements lourds de la voie maritime tendent depuis un demi-siècle à faire de l'estuaire un simple espace de navigation pour gros cargos. Mais la prise de conscience récente et tardive du rôle essentiel de l'estuaire comme nourricerie de poissons, comme site d'hivernage pour les oiseaux migrateurs et comme dernier filtre potentiel pour les nutriments eutrophisants et les polluants apportés par le fleuve à la mer, a conduit à imposer le réaménagement de surfaces de vasières intra-tidales* et la création d'îlots repatoires pour les oiseaux marins, comme mesures compensatoires à l'installation des nouvelles infrastructures du port du Havre.

La pluri-fonctionnalité des espaces est un enjeu majeur en matière d'aménagement du territoire. Il s'agit, à travers un dialogue démocratique entre usagers citoyens et avec une forte volonté politique, de ne pas permettre à l'usager le plus puissant d'imposer la fonction unique qu'il attend de la Nature, mais de laisser coexister les multiples services que la Nature peut offrir au bénéfice de tous.

Glossaire

Autotrophie : l'autotrophie est la fonction par laquelle les plantes sont capables de produire de la matière organique vivante à partir de ses éléments sous forme minérale. L'autotrophie d'un territoire anthropisé représente la production de matière végétale par l'ensemble des surfaces agricoles.

Bassin versant : le bassin versant d'un fleuve est la surface terrestre drainée par ce fleuve et qui collecte vers lui toute la partie non évaporée des précipitations.

Barrage réservoir : un barrage réservoir est un ouvrage hydraulique de régulation créé pour stocker une partie de l'eau d'une rivière en période de haut débit afin de la restituer en période d'étiage.

Cinétique : la cinétique d'un processus est la relation qui relie la vitesse ou l'intensité de ce processus aux variables qui le contrôlent, comme la température ou la disponibilité de certaines substances sur lesquelles agit ce processus.

Connexe : connecté. Se dit par exemple des milieux aquatiques en liaison directe avec le cours principal d'un fleuve.

Continuité : la continuité écologique est une condition permettant à une population animale ou végétale de se déplacer sans entraves dans un espace suffisamment vaste pour assurer l'ensemble de son cycle de vie, assurer un mélange de gènes suffisant pour éviter la dégénérescence génétique, et éventuellement migrer en fonction des changements de conditions bioclimatiques.

Continuum aquatique : l'ensemble du réseau hydrographique d'un fleuve, des plus petits ruisseaux de tête de bassin jusqu'à l'estuaire et le milieu marin côtier, en passant par les annexes hydrauliques en connexion, représente un ensemble de milieux étroitement dépendants les uns des autres.

Empreinte hydrique : décompte des consommations d'eau associées de façon directe ou indirecte, à l'intérieur ou à l'extérieur de son territoire, des activités d'une population, d'une ville ou d'un pays.

Eutrophisation : fonctionnement altéré d'un écosystème aquatique suite à un enrichissement excessif en nutriments.

Hinterland : mot allemand signifiant « Arrière Pays ». Il s'agit, pour une ville, des territoires dont elle dépend pour son approvisionnement.

Hétérotrophie : l'hétérotrophie est la fonction par laquelle les animaux s'approvisionnent en énergie et élaborent leur matière organique constitutive à partir d'une autre matière organique animale ou végétale. L'hétérotrophie d'un territoire anthropisé représente la consommation de produits agricoles par l'homme et ses animaux domestiques.

Indicateur biologique : espèce vivante ou ensemble d'espèces vivantes sensibles, dont la présence atteste d'une certaine qualité écologique du milieu.

Intra-tidale : se dit des vasières situées entre le niveau des marées, et qui sont donc découvertes à marée basse et recouvertes à marée haute.

Métabolisme industriel : on désigne par métabolisme industriel l'ensemble des flux de matière et d'énergie associés à l'activité humaine dans un territoire industrialisé.

Modèle : un modèle est une représentation simplifiée d'un système réel, destinée à mettre en lumière, à expliquer ou à prévoir certains aspects de son fonctionnement.

Nutriments : substances chimiques inorganiques que les plantes utilisent pour élaborer la matière organique dont elles sont constituées. Il s'agit en particulier des formes minérales de l'azote (ammonium, nitrates) et du phosphore (phosphates).

Ordre de drainage : numérotation conventionnelle des tronçons de cours d'eau d'un réseau hydrographique dans laquelle les ruisseaux de tête de bassin sans affluents sont l'ordre 1, ceux issus de la confluence de deux ordres 1 ont l'ordre 2 et ainsi de suite. La Seine à son embouchure est ainsi d'ordre 8.

Poses : commune en bord de Seine où est installé le dernier barrage de navigation avant l'entrée de l'estuaire, Poses marque la fin du tronçon purement fluvial de la Basse Seine.

Planctonique : se dit des organismes aquatiques qui, dépourvus de mouvements propres, se déplacent en suspension dans les masses d'eau.

Rejets urbains de temps de pluie : par temps d'orage les eaux pluviales ruisselant sur les surfaces urbaines imperméabilisées s'écoulent directement vers les cours d'eau ou sont collectées dans les réseaux de collecte des eaux résiduaires, donnant souvent lieu au débordement de ceux-ci. Les rejets ainsi occasionnés de manière très irrégulière sont difficiles à maîtriser.

Zone non-saturée : se dit des profondeurs du sous-sol situées au-dessus de la nappe phréatique et dont la porosité n'est donc pas entièrement occupée par l'eau.

Zones riveraines : milieux humides bordant les cours d'eau et jouant fréquemment un rôle de tampon vis-à-vis des apports d'eau et de polluants en provenance des milieux terrestres du bassin versant.

Bibliographie

ABAD, R.(2002). Le Grand Marché : l'approvisionnement de Paris sous l'Ancien Régime. Fayard, Paris, 2002, 1030 pp.

ASCHER, F (2001). Les nouveaux principes de l'Urbanisme. La fin des villes n'est pas à l'ordre du jour. Editions de l'Aube, 2001, 104 pp.

BARLES, S. (2005). L'invention des déchets urbains, France : 1790-1970. Collection milieux, Champ Vallon, Paris, 296 pp.

BENOIT, P., BERTHIER, K., BILLEN, G., GARNIER, J.(2002). Agriculture et aménagement du paysage hydrologique dans le bassin de la Seine au XIV-XV^e siècle. In Burnouff J. & Leveau Ph. (eds) « Les fleuves aussi ont une histoire, (Fleuves 2), actes du colloque PEVS-SEDD, Aix-en-Provence, 8-10 avril 2002.

BEAUJEU-GARNIER, J (1977). Paris et la région Île-de-France. Paris, Flammarion, 2 vol.

BILLEN, G., GARNIER, J., MOUCHEL J.M. & SILVESTRE M. (2007). The Seine System: introduction to a multidisciplinary approach of the functioning of a regional river system. *The Science of the Total Environment*, 375:1-12

BILLEN G., BARLES B., GARNIER G. , ROUILLARD J., BENOIT P. (2009). The Food-Print of Paris: Long-term Reconstruction of the Nitrogen Flows Imported into the City from its Rural Hinterland. *Regional Environmental Change*. DOI 10.1007/s10113-008-0051-y

DUCHARNE,A., C. BAUBION, M. BENOIT, G. BILLEN, N. BRISSON, J. GARNIER, H. KIEKEN, S. LEBONVALLET, E. LEDOUX, B. MARY, C. MIGNOLET, X. POUX, E. SAUBOUA, C. SCHOTT, S. THERY, P. VIENNOT (2007) Long term prospective of the Seine river system: confronting climatic and direct anthropogenic changes. *The Science of the Total Environment*, 375: 292-311

GARNIER J., LAROCHE L., PINAULT S. (2006). Determining the domestic specific loads of two wastewater plants of the Paris conurbation (France) with contrasted treatments: a step for exploring the effects of the application of the European Directive. *Water Res.* 40:3257 – 3266.

GARNIER, J., G. BILLEN, K. BUTTERBACH-BAHL, A. MARTINEZ , E. MOUNIER, M.SILVESTRE, G. VILAIN, F.TOCHE, C. WERNER. (2009) Nitrous oxide (N₂O) in the Seine river and basin: observations and budgets. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. In press

GROMAIRE M. C., WAITROP N.; CHEBBO G.; CONSTANT A. (2001). Importance of zinc roofs in Paris and their impact on urban runoff pollutant loads NOVATECH 2001 : Nouvelles technologies en assainissement pluvial. Conference internationale No4, Villeurbanne , FRANCE (25/06/2001) pp. 937-944

IAURIF (2005). L'empreinte écologique des habitants de la région d'Ile-de-France. Note rapide sur le développement durable. N° 403. Décembre 2005.

MAZOYER, M. & ROUDART, L. (1998). Histoire des agricultures du monde. Du Néolithique à la crise contemporaine. Seuil, Paris, 531 p.

MALIGNE, MC, MONTAGNANI, M., WEYL, M. (2008) Combien d'eau dans mon T-shirt ? Flux de matière et de ressources mis en œuvre par la production, la transformation et la consommation du coton dans le monde. Mémoire de LT 103 : Géosciences, ressources, Environnement. Mai 2008, UPMC.

PHILIPPE, R. (1961). Une opération pilote : l'étude du ravitaillement de Paris au temps de Lavoisier. *Annales. Economies, Sociétés, Civilisations*. 16 (3), 564-568.

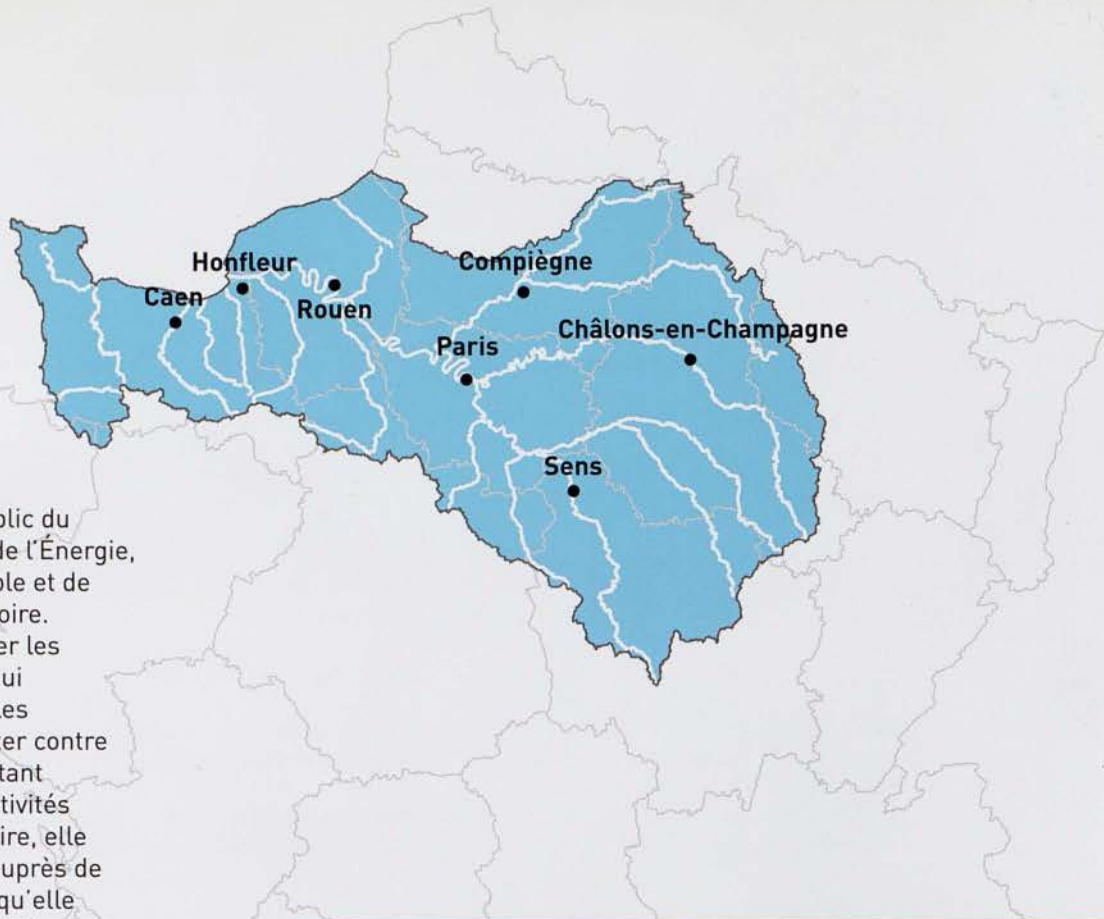
REZE CH. (2002) Les aménagements du réseau hydrographique du Morvan pour le flottage du bois, du XVI^e au XVIII^e siècle. Mémoire de maîtrise d'archéologie ; Université Paris I-Panthéon-Sorbonne, 2002, 61 pp.

THEVENOT, D. , MOILLERON, R., LESTEL, L., GROMAIRE, MC, ROCHER, V., CAMBIER, PH., BONTE, PH., COLIN, JL, DE PONTEVES, C., MEYBECK, M. (2007) Critical budget of metal sources and pathways in the Seine River basin (1994-2003) for Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn. *Science of the total Environment*, 375: 180-203.

WAKERNAGEL, M, REES, W.(1996). Our ecological footprint: reducing human impact on earth. New Society Publishers, Gabriola Island, BC



**eau
seine**
NORMANDIE



L'Agence de l'eau Seine-Normandie

est un établissement public du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. Sa mission est de financer les ouvrages et les actions qui contribuent à préserver les ressources en eau et lutter contre les pollutions, en respectant le développement des activités économiques. Pour ce faire, elle perçoit des redevances auprès de l'ensemble des usagers qu'elle redistribue sous forme d'aides financières aux collectivités locales, aux industriels, aux artisans, aux agriculteurs et aux associations qui entreprennent des actions de protection du milieu naturel. Ses actions s'expriment à travers un programme pluriannuel. Les études et recherches pilotées par l'Agence contribuent à la gestion équilibrée de la ressource en eau et de tous les milieux aquatiques.

Siège

51, rue Salvador Allende
92027 Nanterre Cedex
Tél. 01 41 20 16 00
Fax 01 41 20 16 09

www.eau-seine-normandie.fr

Programme PIREN-Seine

Direction et secrétariat :
UMR CNRS 7619 Sisyphe
Université Pierre et Marie Curie (Paris VI)
4, place Jussieu 75005 Paris
Tél. 01 44 27 74 24
Fax 01 44 27 45 88

www.piren-seine.fr

Les PARTENAIRES du PIREN-Seine

AGENCE DE L'EAU SEINE-
NORMANDIE (AESN)
www.eau-seine-normandie.fr

CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS)
www.cnrs.fr

DIRECTION RÉGIONALE DE
L'ENVIRONNEMENT
(DIREN ÎLE-DE-FRANCE)
www.ile-de-france.ecologie.gouv.fr

EAU DE PARIS
www.eaudeparis.fr

INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION
(IZA)
www.iza.com

LYONNAISE DES EAUX
www.lyonnaise-des-eaux.fr

LES GRANDS LACS DE SEINE :
INSTITUTION INTERDÉPARTEMENTALE
DES BARRAGES-RÉSERVOIRS DU
BASSIN DE LA SEINE (IIBRBS)
www.iibrbs.fr

SYNDICAT DES EAUX
D'ÎLE-DE-FRANCE (SEDIF)
www.sedif.com

SYNDICAT INTERDÉPARTEMENTAL
POUR L'ASSAINISSEMENT DE
L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE
(SIAAP)
www.siaap.fr

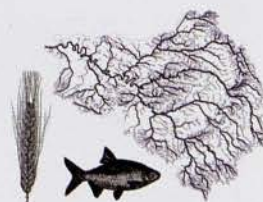
UNION NATIONALE DES PRODUCTEURS
DE GRANULATS (UNPG)
www.unicem.fr

VOIES NAVIGABLES DE FRANCE
(VNF)
www.vnf.fr

ENSEMBLE
DONNONS
VIE À L'EAU

Agence de l'eau

Numéro ISBN : 978-2-918251-00-2
Numéro ISSN : 1968-5734
Dépôt légal : juin 2009



Programme PIREN-Seine