

Analyse rétrospective du fonctionnement du système Seine

Sabine Barles¹, Paul Benoit², Karine Berthier², Gilles Billen³, Philippe Boët⁴, François Boyer³, Daniel Brunstein³, Josette Garnier³, André Guillaume⁵, Laurence Lestel⁵, Michel Meybeck³

Rapport coordonné par Sabine Barles.

¹ Laboratoire Théorie des Mutations Urbaines, FRE CNRS 2408 Cité, 4 rue Alfred Nobel, Cité Descartes, 77420 Champs-sur-Marne.

² UMR CNRS 8589 LAMOP, Université de Paris I, 9 rue Mahler, 75004 Paris.

³ UMR CNRS 7619 Sisyphe, Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75005 Paris.

⁴ CEMAGREF, UR QHAN & LISC, Parc de Tourvoie, BP44, 92163 Antony cedex.

⁵ Centre d'Histoire des Techniques, CNAM, 5 rue du Vertbois, 75003 Paris.

1.	Introduction	2
2.	Le fonctionnement urbain : Paris et son agglomération	5
2.1.	Approvisionnement et évacuation des eaux du XIIe au XVIIIe siècle	5
2.2.	Les cycles urbains de l'eau aux XIXe et XXe siècles	10
2.2.1	L'approvisionnement en eau	10
2.2.2	Les rejets	12
2.3.	Le métabolisme urbain : premiers résultats	17
2.3.1	L'azote	17
2.3.2	Le plomb	21
3.	Agriculture et aménagement du paysage hydrographique	26
3.1.	Le système agraire des communes rurales médiévales	27
3.2.	L'approvisionnement alimentaire de Paris : un point de vue biogéochimique.	28
3.3.	Les grands domaines monastiques comme lieu de production d'excédents alimentaires commercialisables	29
3.4.	L'aménagement du paysage hydrologique et son pouvoir de rétention	32
3.5.	L'ouverture du système agricole moderne et la perte de son pouvoir de rétention	34
4.	Le transport et l'aménagement fluvial	37
4.1.	Les prémices	37
4.2.	Les premières modifications physiques	38
4.3.	Flottage du bois	39
4.4.	Premiers canaux	40
4.5.	Les rivières canalisées	41
5.	Conclusion	45
5.1.	Les sources	45
5.2.	Un histoire spécifique ?	45
5.3.	Les héritages	46
5.4.	Le cycle des matières	47
5.5.	Recyclage <i>versus</i> déchets	47
5.6.	Le temps et la durée	48
6.	Références et sources imprimées	50

1. Introduction

La principale spécificité du bassin de la Seine dans son fonctionnement actuel est la présence d'une des plus grandes agglomérations urbaines du monde, au milieu d'un espace rural siège d'une activité agricole parmi les plus intensives. Ce bassin constitue donc un système modèle pour étudier les interactions entre le milieu urbain et le milieu rural.

On peut définir la ville comme un regroupement de populations ne produisant pas elles-mêmes leurs moyens de subsistance alimentaire (Asher, 2001). Le développement et la dynamique des villes sont donc par nature liés au développement des moyens de production de biens alimentaires et autres dans le milieu rural, des moyens de stockage et de transport de ces biens, des moyens de diffusion des informations nécessaires à l'organisation de la division du travail et des échanges entre milieu urbain et rural.

Un des objectifs du PIREN-Seine dans sa troisième phase quadriennale était d'explorer ces interactions, et leur rôle dans le fonctionnement de l'hydrosystème Seine, dans une perspective historique longue. Le caractère extrêmement précoce du **développement démographique** de Paris (voir encadré 1) est à cet égard un phénomène majeur ; nous voudrions montrer ici que ce développement a joué un rôle structurant essentiel pour l'ensemble de l'espace du bassin de la Seine et pour son évolution historique.

Dès le XVII^e siècle, Paris dépasse en effet d'un ordre de grandeur la population des autres grandes villes du bassin. Toujours politiquement considéré comme prioritaire, l'approvisionnement de la capitale en nourriture, en eau potable, en énergie, en matériaux de construction, qui, jusqu'aux époques les plus récentes, puise essentiellement dans les ressources des régions rurales périphériques, constitue un prélèvement biogéochimiquement significatif et une contrainte parfois très sévère pour le reste du bassin.

L'élimination des déchets résultant de la consommation et de l'activité urbaine affecte considérablement le fonctionnement écologique du fleuve en aval de l'agglomération parisienne. La **concentration des équipements** et des usages de certains produits industriels dans la ville conduit à l'établissement de stocks importants et à longue inertie de matériaux potentiellement toxiques (§ 2 : Le fonctionnement urbain : Paris et son agglomération).

La demande alimentaire urbaine oriente la partie rurale du bassin vers les modes de production agricoles les plus susceptibles de produire un **excédent commercialisable**. C'est ainsi que les grands domaines monastiques, dès le XII^e siècle, exportent une part étonnamment élevée pour l'époque de leur production agricole. En revanche, et c'est une condition de durabilité de ce mode de fonctionnement, l'aménagement du paysage hydrologique de ces espaces en a fait longtemps un **système très rétentif** vis-à-vis des éléments entraînés par lessivage et érosion des sols (§ 3 : Agriculture et aménagement du paysage hydrographique).

La nécessité du **transport** vers Paris de matières alimentaires et des matières premières agricoles ou forestières produites dans le bassin amont conduit à un **aménagement des voies navigables** parfois antagoniste avec d'autres fonctions des cours d'eau (§ 4 : Le transport et l'aménagement fluvial).

Tels sont les principaux axes qui sous-tendent les travaux menés par les équipes interdisciplinaires du PIREN-Seine en matière d'analyse historique du fonctionnement du bassin de la Seine. De cette longue histoire étroitement couplée de Paris et du bassin ont résulté des héritages dont le poids est encore aujourd'hui considérable dans le mode de fonctionnement de cet espace, même si l'internationalisation des échanges et l'ouverture des cycles de matière qui en découle ont rendu beaucoup plus lâches qu'ils ne l'étaient les liens d'interdépendance entre la ville et le monde rural.

Encadré 1 : Évolution démographique du bassin de la Seine

Les données des différents recensements disponibles depuis 1876, ainsi que celui de 1806, ont été informatisées par l'équipe de démographie historique de Cl. Motte et intégrées au SIG du PIREN-Seine. Une cartographie complète de la population à la résolution communale est ainsi disponible depuis la fin du XIXe siècle au pas de temps de 10 ans qui est grosso modo celui des recensements nationaux.

Pour les périodes plus anciennes, nous nous en sommes tenus à une compilation des estimations fournies par divers ouvrages de référence classiques concernant la population française (Levasseur, #; Bairoch et al., #; Croze, 1988). La situation du début du XVIIIe siècle est particulièrement bien documentée grâce au dénombrement de 1711, qui nous a permis d'évaluer la densité de population par 'élection', ainsi que la population de toutes les villes de plus de 600 feux (nous avons retenu, pour cette analyse, le chiffre moyen de 4,5 habitants par foyer).

La figure 1 illustre l'évolution à long terme de la population totale du bassin et la part de l'agglomération parisienne dans ce total.

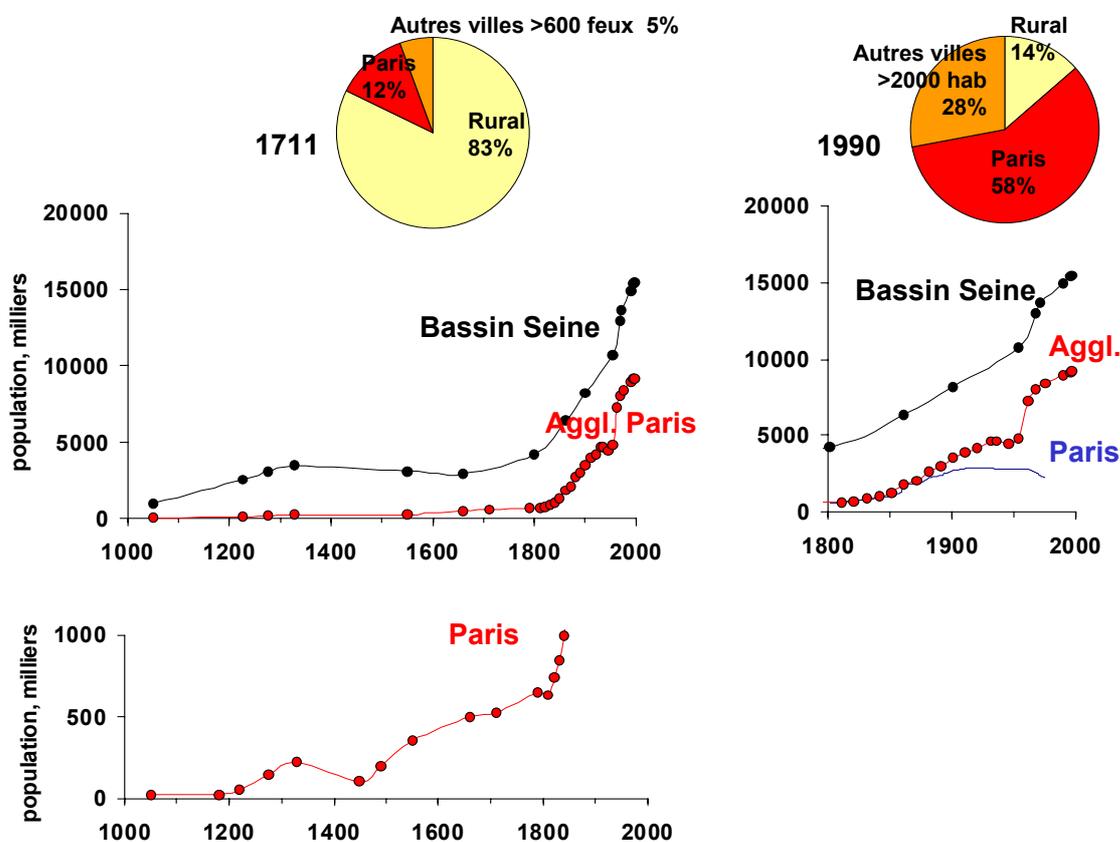
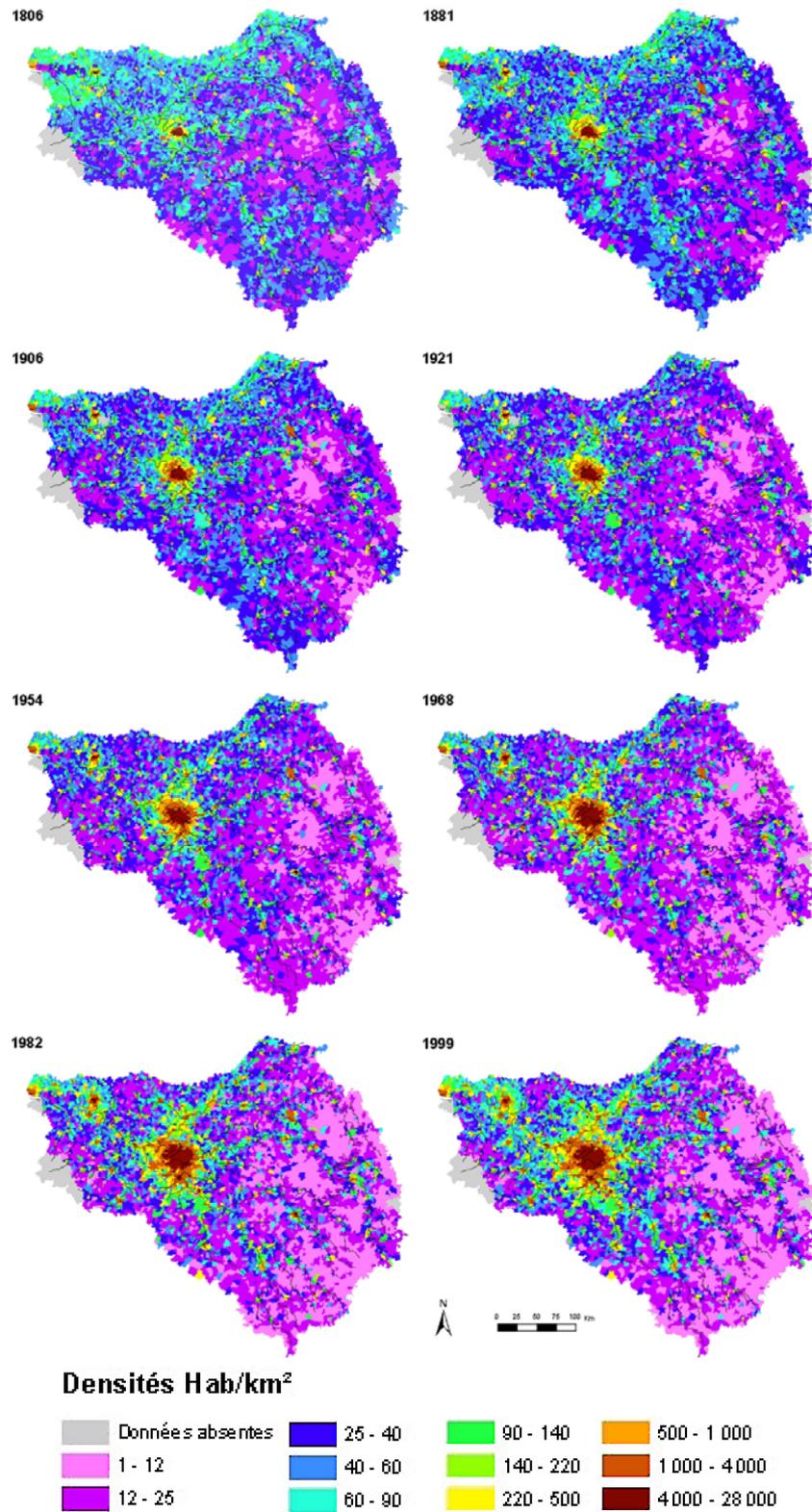


Figure 1 : Évolution de la population du bassin de la Seine et de l'agglomération parisienne.



C. Motte, LDH EHESS - D. Brunstein, LGP CNRS - S. Théry, UMR CNRS Sisyphé - M. Meybeck, UMR CNRS Sisyphé

Figure 2 : Évolution de la distribution de la densité de population dans le bassin de la Seine, 1806-1999. (Données rassemblées par C. Motte, Lab. de démographie historique, et traitées par D. Brunstein et S. Théry).

2. Le fonctionnement urbain : Paris et son agglomération

2.1. Approvisionnement et évacuation des eaux du XIIe au XVIIIe siècle

Du début du XIIe siècle au milieu du XVIe, Paris connaît une croissance exceptionnelle qui voit sa population passer de quelques milliers d'habitants vers 1100 à environ 25 000 vers 1180, 50 000 en 1220 et dépasse 200 000 à la fin du premier quart du XIVe siècle. La très grave crise qui frappe l'Europe au milieu du XIVe siècle avec son cortège de pestes, de guerres et d'effondrement des prix et de la production touche particulièrement Paris, point sensible du conflit franco-anglais, la Guerre de Cent Ans. Au milieu du XVe siècle, on peut estimer que Paris a perdu la moitié de sa population qui retombe 100 000 habitants mais elle remonte vite et à la fin du XVe siècle les habitants sont aussi nombreux qu'en 1225. La croissance continue au cours de la première moitié du XVIe siècle et la population atteint 350 000 habitants au milieu du siècle.

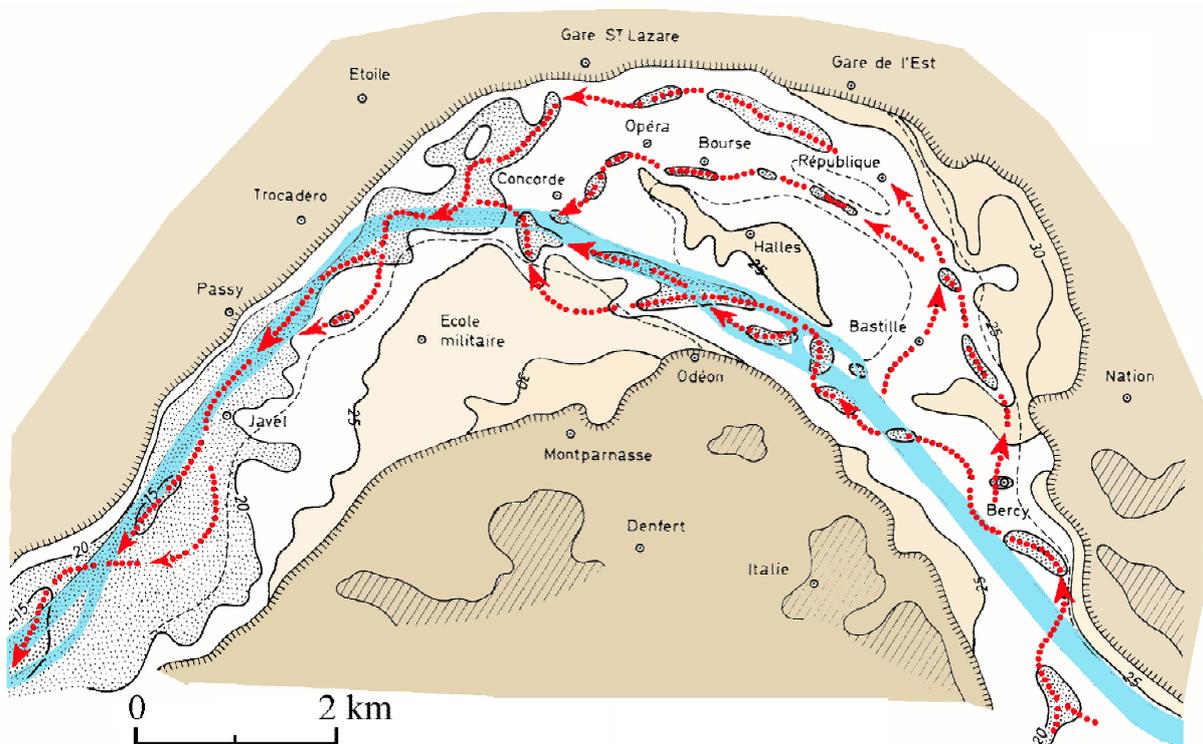


Figure 3 : Le site de Paris (d'après Diffre 1969).

Une telle croissance a posé aux Parisiens, et aux autorités municipales ou royales, des problèmes qui touchent à la fois à l'approvisionnement en eau, aux usages de cette eau et enfin à l'évacuation des eaux usées. Dès le Moyen Âge la question de la qualité de l'eau se pose, elle apparaît avec plus de netteté encore au XVIe siècle. Les sources de cette étude sont nombreuses et varient selon les époques. Dans un premier temps, on peut dire que jusqu'au XIIIe siècle ce sont avant tout les données du terrain, à vrai dire autant géologiques qu'archéologiques. À la fin du Moyen Âge, les documents sont de plus en plus nombreux et précis. La ville romaine implantée sur la rive gauche recevait son eau par un aqueduc qui captait les sources de la nappe du calcaire de Brie à Rungis et à Cachan. L'expansion médiévale s'est essentiellement faite sur la rive droite à partir des *monceaux* alluvionnaires anciens hors d'atteinte des crues qui inondaient l'ancien bras de la Seine au pied de l'arc de collines domine la ville au nord.

Pour s'approvisionner en eau, les Parisiens disposaient au Moyen Âge de trois possibilités : les puits, les sources et l'eau fluviale. La nappe alluviale, qui atteint parfois une épaisseur d'une dizaine de mètres, est facilement accessible. En rive gauche, les puits la rencontraient à 4 ou 5 m de

profondeur et en rive droite, entre 6 et 10 m dans les parties basses de la rive gauche. Paris possédait de très nombreux puits, les uns publics les autres privés. Les recherches actuelles du Centre de topographie parisienne mettent en évidence l'existence de centaines de puits à Paris au Moyen Âge. Ils ont joué un rôle prépondérant dans l'histoire de la ville et de son artisanat puisque des teinturiers et des tanneurs ont possédé parfois des ateliers éloignés de la Seine. Dans son "Discours admirables sur la nature des eaux et des fontaines" Bernard Palissy se plaignait des immondices qui, à travers la terre, arrivaient dans les puits. Au XVIII^e siècle, Delamare, dans son *Traité de police* montrait les réticences des Parisiens à l'égard du contenu des puits. Les analyses effectuées plusieurs siècles plus tard ont donné des taux extrêmement élevés d'ammoniaque et de nitrates dans les puits parisiens : jusqu'à 34 g d'ammoniaque par mètre cube et une teneur moyenne en azote de 103 grammes. La piètre qualité des eaux des puits de Paris s'explique, non seulement par la pénétration des eaux polluées de surface mais aussi par la contamination de la nappe par les fosses d'aisance, les puisards et la décomposition des cadavres dans les cimetières, qui devaient donner à l'eau des puits une très forte teneur en bactéries de toutes sortes.

À côté des puits, Paris possédait un réseau de distribution d'eau alimenté par des sources qui aboutissait à des fontaines. Paris se développant en rive droite, c'est au nord-est que les Parisiens durent chercher les sources indispensables à l'alimentation de fontaines à Belleville et au Pré-Saint-Gervais. Sur les hauteurs qui dominent la ville, au nord et à l'est, les calcaires de Brie contiennent une nappe phréatique qui atteint 5 m d'épaisseur par endroits.

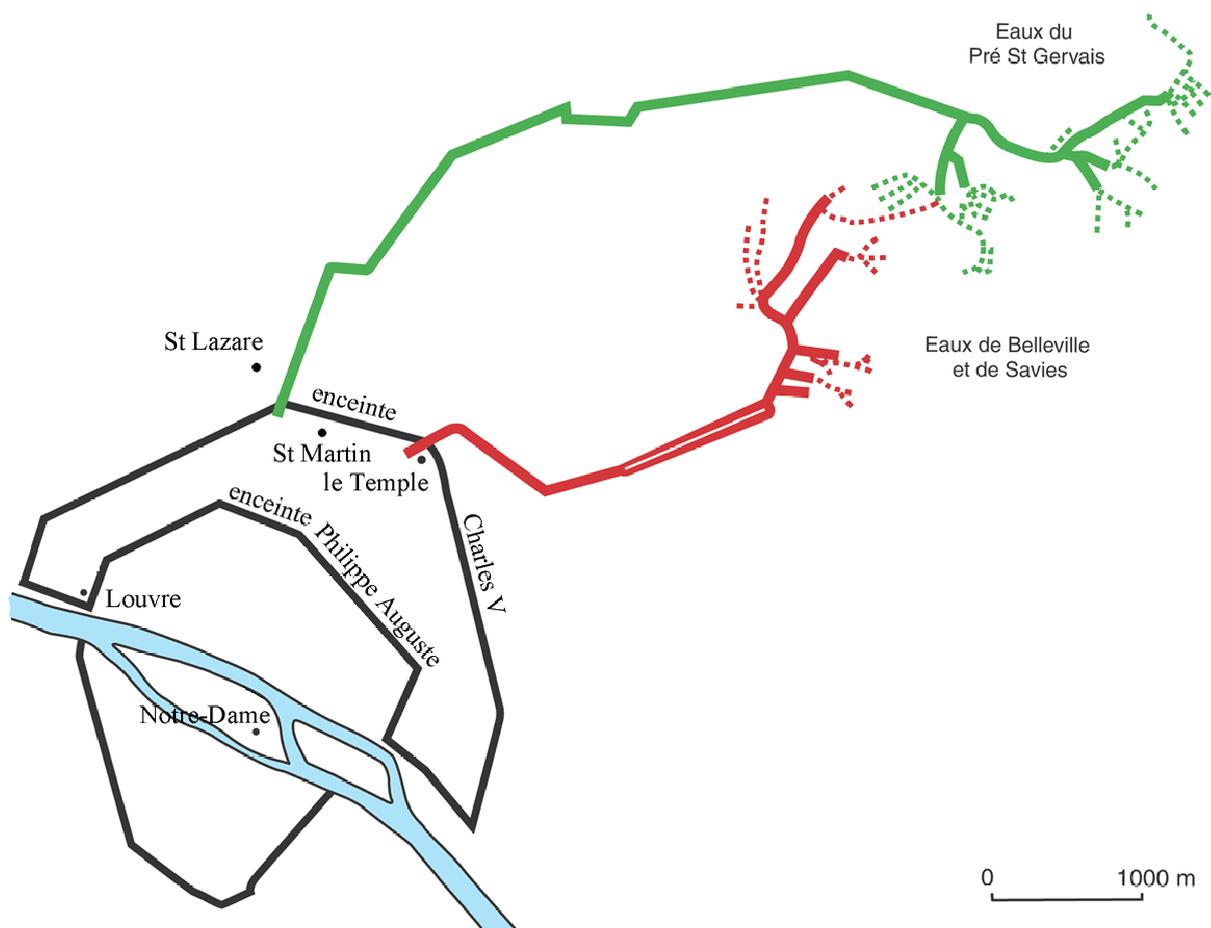


Figure 4 : Alimentation en eau de la rive droite : les aqueducs des sources du nord, Paris.

La croissance de la population parisienne est certainement le fait majeur qui explique le développement d'un réseau d'adduction d'eau au XII^e siècle mais la relation entre le développement de ce réseau et le nombre des hommes passe sans doute par une détérioration de la qualité des eaux. Des établissements religieux sont à l'origine des aqueducs qui ont conduit dans Paris l'eau des sources du nord, selon la terminologie employée jusqu'à nos jours. Le premier texte qui y fasse référence vient de la léproserie Saint-Lazare qui reçoit, en 1179, le droit d'établir un aqueduc à travers leurs vignes.

Les sources captées par Saint-Lazare provenaient du Pré-Saint-Gervais ou du versant nord est de la colline de Belleville. Autre établissement religieux à s’approvisionner aux sources du nord, la grande abbaye Saint-Martin-des-Champs qui possédait des terres et des vignes à Savies sur le flanc sud-ouest des hauteurs de Belleville. Le Temple s’associa à Saint-Martin pour l’utilisation des eaux de Savies et de Belleville à une date qui nous reste inconnue. Quoiqu’il en soit il faut faire remonter au XIIe siècle la mise en place d’aqueducs destinés à approvisionner des établissements religieux au nord de Paris. Un texte royal de 1396 affirme l’antiquité “si longtemps de mémoire d’homme” des “tuyaux et conduits” qui alimentaient alors les fontaines de la ville. L’expansion de la ville vers le nord, la colonisation des marais ont transformé petit à petit le ruisseau en un collecteur qui recevait des canaux affluents en particulier d’un émissaire venu du sud. Ces “Fossés-le-Roi”, nom qui apparaît vers 1260, charriaient à la fois les déjections humaines et animales et des déchets de toutes sortes.

L’eau devient vite un enjeu. Créés par des établissements monastiques, ces réseaux sont passés par étapes en d’autres mains, dont celles du roi et de la ville. Le premier à agir fut Philippe-Auguste qui met la main sur les eaux qui viennent du Pré-Saint-Gervais en 1182. Mais le coup de grâce sera porté par la municipalité parisienne en 1363. Par un coup de force elle s’empare de l’eau des Lazaréens qui, malgré un procès, cèdent et donnent, en 1364, l’eau à la ville à la condition d’en conserver pour eux-mêmes un accès.

On ignore encore la date à laquelle l’eau des sources du nord a pénétré dans l’enceinte urbaine. En 1265, le couvent des Filles-Dieu, situé sur la rue Saint-Denis de l’autre côté du ponceau, reçoit l’autorisation de Louis IX de prendre de l’eau à la fontaine Saint-Lazare en la faisant venir par la chaussée, c’est-à-dire que l’eau franchissait les “Fossés du Roi” dans une canalisation enterrée sous pression.

À partir du XVe siècle, les informations deviennent plus abondantes en particulier grâce aux comptes de la Ville. Héritage du réseau de Saint-Lazare, les eaux de la ville partent du Pré-Saint-Gervais et, recueillant les eaux du versant nord de la colline de Belleville atteignent Paris à la porte Saint-Denis. Elles irriguent plusieurs fontaines à l’ouest et au centre de Paris. Plus à l’est les eaux de Belleville, le captage des eaux du sommet de la colline, sont rassemblées dans des pierrées, tranchées ouvertes dans un sol perméable, maçonnées, sans aucun mortier de manière à laisser passer les eaux, puis recouvertes complètement de terre. Elles rencontraient alors la canalisation venant de Savies, pour se fondre dans un aqueduc qui atteignait la muraille et entraînait dans la ville. Au moins deux réseaux secondaires complètent l’ensemble, d’une part celui qui entre dans la ville par l’Hôtel d’Armoise pour ravitailler l’hôtel Barbette et arriver tout près de la Grève, à la Fontaine Baudoyer, de l’autre celui que possédait Saint-Antoine-des-Champs dont le tracé reste encore inconnu.

Tableau 1 : Analyse des eaux du Pré-Saint-Gervais.

	g/15 l	g/l
Sulfate de chaux	6,665	0,4426
Carbonate de chaux	3,450	0,236
Sels déliquescents	6,647	0,4131
Sel marin	0,439	0,02926
Eau retenue par les sels	4,000	0,226
Poids total du résidu	21,281	1,4187

Dans la ville l’eau circulait dans des tuyaux eux aussi en plomb enterrés et desservait au XVe siècle une quinzaine de fontaines publiques mais l’eau qu’elles distribuaient étaient loin de suffire à la population. Le débit des aqueducs les plus importants, Belleville et le Pré-Saint-Gervais, en excluant les eaux de Savies, fournissaient en 1669, 346 m³/jour, soit pour 200 000 habitants 1,73 litre par jour et par Parisien, quantité dérisoire quant on sait les besoins mais aussi qu’en certaines périodes de sécheresse le débit pouvait tomber à 200 m³/jour. Enfin, approvisionnées en série, les fontaines possédaient un débit très inégal. Celles qui se trouvaient en fin de réseau ne pouvaient souvent que distribuer que de maigres quantités d’eau. De plus, des privilèges concédant le droit de prendre de l’eau sur le réseau sont accordés à plusieurs maisons religieuses et à la haute aristocratie laïque.

Puisée par les plus pauvres, l'eau de la Seine parvenait dans les foyers des personnes plus aisées grâce à l'intervention de porteurs d'eau. Les analyses du siècle montrent que l'eau de la Seine valait mieux que celle de sources du nord. L'ordonnance de 1392, émise par Charles VI, pour mettre fin aux abus que représentaient les fontaines particulières prises sur les aqueducs de la ville mettait en avant la nécessité pour les parisiens "qui sont loing de la riviere de Saine et d'autres eaux convenables à boire et à user pour vivre". La Seine, comme les autres rivières, partageait son rôle de distribution d'eau pour les ménages avec d'autres fonctions : voie, navigable, source d'énergie, réserve en cas d'incendie mais aussi moyen d'évacuer les déchets produits par une immense agglomération. Les premières traces d'un souci de défendre la qualité de l'eau repérée au cours de cette enquête remontent au XIII^e siècle et ne concernent pas la Seine mais le ruisseau de Ménilmontant et les drains qui y affluaient. Les deux hommes qui y prenaient une terre à bail ne devaient non seulement pas rouir du chanvre ou de lin mais aussi ne pas déposer des immondices dans les fossés. En fait, la Seine avec un flux incomparablement supérieur à celui des ruisseaux pouvait évacuer des pollutions. C'est dans la Seine que les foulons puis les tanneurs, les teinturiers et les bouchers versaient déchets et eaux usées. La Bièvre apportait également dans la Seine son lot de pollutions dans la partie amont de l'agglomération. Il est certain que l'abondance du flot, son oxygénation par les moulins, la relativement faible nocivité des produits utilisés dans le traitement des draps, pouvaient limiter les effets de la pollution mais les plaintes attestent du danger que ressentaient les Parisiens. Ce danger était ressenti, en 1404 lorsque Charles VII, considérant le "grant orrur et abominacion" que constituait les "boës, fiens, gravois, ordures, putrefactions et immondices nuisibles et moult préjudiciables à corps humains", interdisait de jeter dans le fleuve toutes ordures et déjections (Tableau 2).

Tableau 2 : Déjections humaines à Paris.

Production journalière par individu			
		Matières fécales	145 g
		Urine	1,3 l
Paris en 1300	200 000 habitants		
		Matières fécales	29 t/j
		Urine	260 t/j
			10 585 t/an
			94 900 t/an
Paris en 1550	350 000 habitants		
		Matières fécales	50 t/j
		Urine	455 t/j
			18 250 t/an
			166 075 t/an

Après la prise de Paris par Henri IV, la monarchie va prendre des dispositions pour alimenter de manière plus efficace la capitale. Deux grands chantiers sont lancés avant l'assassinat du roi, celui de la pompe dite de la Samaritaine et celui de l'aqueduc connu sous le nom d'aqueduc Médicis qui, reprenant en gros le tracé de l'aqueduc antique, captait à Rungis les eaux de la nappe du calcaire de Brie. Le projet initial fût suspendu en 1610 et ne fut repris, que lorsque Marie de Médicis décida la construction du palais du Luxembourg. Les eaux de sources abondantes et d'excellente qualité, qui avaient été découvertes à Rungis et dans la plaine dite de Long-Boyau, alimentaient le palais du Luxembourg, le Jardin des Plantes et les bâtiments royaux de la rive droite, en empruntant le Pont-Neuf. L'aqueduc desservait aussi diverses fontaines publiques, des quartiers parisiens de la rive gauche et de la rive droite de la Seine. La construction de l'aqueduc d'Arcueil permit d'approvisionner en eau une rive gauche jusqu'ici pauvre en ressources hydrauliques, et d'y développer un premier réseau de distribution.

Parallèlement, à ce projet d'aqueduc, le roi travailla, dès le début du XVII^e siècle, à l'élaboration et à la réalisation du projet d'une grande pompe hydraulique accolée au Pont-Neuf, la Samaritaine. L'appareil sera achevé en 1608. La roue, pendante, c'est-à-dire réglable en hauteur selon le niveau du fleuve, actionnait deux pompes immergées qui refoulaient l'eau dans un réservoir situé en haut de la construction. Il approvisionnait la résidence royale et les jardins des Tuileries. Elle fut entièrement refaite au début du XVIII^e siècle mais à ce moment une autre pompe approvisionnait déjà la ville.

L'expérience, sans doute réussie de la Samaritaine, conduisit la Ville de Paris à lancer le projet d'un autre appareil du même type mais à l'usage des parisiens. Il s'agit de la pompe dite du pont

Notre-Dame, endroit où elle fut installée. En fait, la machine se composait de deux appareils côte à côte. Plus puissante que la pompe de la Samaritaine, même après sa réfection, elle alimentait une quinzaine de fontaines publiques.

De la fin du XIII^e à la fin du XV^e siècle, Paris se dota d'un système d'égouts, le plus souvent à ciel ouvert, organisé en fonction d'un collecteur, le Gand Égout, qui prit la place des Fossés du Roi, terme qui tombe en désuétude dès la fin du XIII^e siècle. Deux égouts principaux rejoignaient le grand collecteur. Le plus important partait du versant nord-est du monceau Saint-Gervais et se dirigeait vers l'est, il prenait ensuite une direction nord pour franchir la muraille de Charles V et son fossé à la porte du Temple. L'autre, de direction sud-nord, arrivait à la porte Montmartre où il franchissait le fossé de la ville pour rejoindre le grand collecteur quelques centaines de mètres plus loin. La topographie se prêtait à une telle disposition qui expédiait les eaux usées des Parisiens dans la Seine en aval de Paris, à Chaillot.

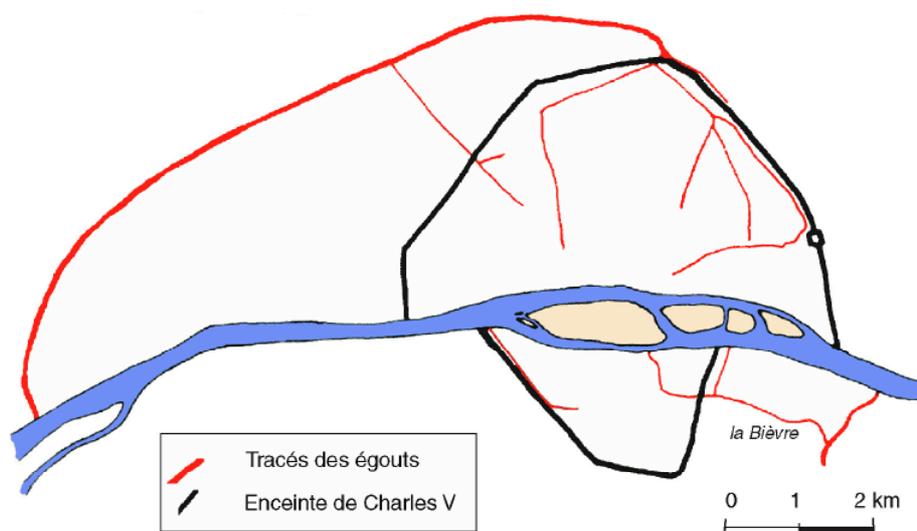


Figure 5 : Égouts, Paris, Moyen Âge.

Mais le système n'était pas sans défaut. D'une part le débit des eaux qui le parcouraient s'est avéré nettement insuffisant, il fallait compter sur les précipitations et les apports des Parisiens pour qu'une eau suffisante coule dans ces égouts. Au débit insuffisant s'ajoutait la faiblesse des pentes et le moindre obstacle pouvait ralentir ou obstruer complètement la circulation. Évacuant en fait des déjections et des déchets organiques de toute sorte, ces égouts le plus souvent à ciel ouvert exhalaient des odeurs nauséabondes. Or l'égout occidental traversait les beaux quartiers de la ville, là où les résidences nobles s'étaient multipliées depuis l'installation de Charles V dans l'hôtel Saint-Paul. Une controverse éclata au XVI^e siècle, le roi voulant préserver la qualité de l'air en envoyant directement les égouts dans la Seine, la ville défendant la qualité de l'eau. Ce dernier point de vue l'emporta.

À partir du XII^e siècle, moment d'essor urbain généralisé en Europe occidentale mais renforcé à Paris par l'installation de la monarchie, la ville s'est dotée d'un système de distribution de l'eau. La multiplication très rapide du nombre des hommes, l'impossibilité de contrôler la pollution des eaux de la nappe de la Seine, ont conduit, malgré la multiplication des puits à rechercher de l'eau potable ailleurs. Elle est venue des sources du nord mais en quantité insuffisante et en qualité incertaine. Les Parisiens ont dû continuer à boire l'eau de la Seine et pour cela lutter contre sa pollution née de l'expansion elle-même. Ils le firent par des mesures coercitives peu efficaces et surtout en créant un système d'égouts qui aboutissait en aval de la ville. Le système mis en place garantissait une relative qualité de l'eau à la Seine mais a suscité bien des oppositions de la part de ceux qui souhaitaient avant tout la qualité de l'air, c'est-à-dire l'absence d'odeurs.

2.2. Les cycles urbains de l'eau aux XIXe et XXe siècles

2.2.1 L'approvisionnement en eau

1800-1914 : L'essor de la consommation parisienne

De la fin de l'Ancien régime au Consulat, la distribution d'eau publique repose sur la Seine, appuyée par quelques sources (Belleville, Pré-Saint-Gervais, Arcueil). Cependant, depuis de nombreuses années, scientifiques, médecins, ingénieurs et architectes dénoncent la malpropreté de la capitale et insistent sur la nécessité d'utiliser de puissants courants d'eau (et d'air) pour la nettoyer et l'assainir. Le canal de l'Ourcq, dont la construction est entreprise dès 1802 sous la direction de l'ingénieur des Ponts et Chaussées Pierre-Simon Girard, est destiné à satisfaire ces objectifs. Se met ainsi en place un service doublement public : d'une part, parce qu'il est géré par les *services techniques* mis en place et pérennisés dès le Premier Empire, d'autre part parce qu'il est destiné au nettoyage et à l'embellissement de l'espace public. La Monarchie de Juillet et la préfecture de Rambuteau sont essentiellement consacrées à l'extension du réseau, accessoirement au forage du puits artésien de Grenelle (qui, pour spectaculaire qu'il soit, ne contribue guère à l'alimentation de Paris), toujours dans la même optique, les abonnements privés — encore rares — n'étant conçus que comme un moyen de financer le réseau, et non comme une fin. Les tentatives d'entrée des opérateurs privés dans la capitale se soldent par des échecs, en grande partie en raison de l'opposition des ingénieurs des Ponts et Chaussées exerçant dans la capitale, qui dénoncent le modèle anglais de gestion privée comme contraire à l'intérêt public et notamment à la salubrité (Emmery, 1840 ; Cebron de Lisle, 1991). Cette période est marquée, déjà, par un essor considérable de la capacité de production — qui passe de 8 070 m³/j en 1800 à 20 000 m³/j en 1823, puis 150 000 m³/j en 1854 (*Recherches...*, 1823 ; Cebron de Lisle, 1991) — et, partant, de la consommation (Figure 6). Les apports pluviaux, qui représentaient 90 % des apports totaux d'eau dans la capitale en 1807, sont dépassés par les apports anthropiques dès les années 1840.

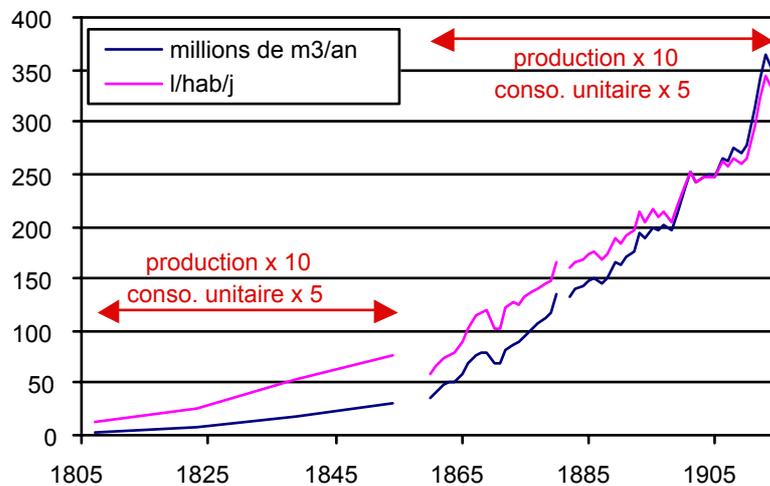


Figure 6 : Consommation d'eau, Paris, 1807-1914.

Les données changent dès le Second Empire. Paris s'agrandit et voit sa superficie passer de 3 400 ha à 7 800 ha ; sa population augmente ; la demande de confort s'affirme dans la bourgeoisie ; le trafic incessant des porteurs d'eau et de bains à domicile est, de plus, en plus, considéré comme une gêne. La capacité de production s'avère ainsi rapidement insuffisante : il faut chercher de l'eau ailleurs. De là la dérivation des sources lointaines engagée à partir des années 1860 et l'installation de nouvelles usines de prélèvement en Seine et en Marne, de là aussi le double réseau dont bénéficie aujourd'hui encore la capitale : l'Ourcq pour l'eau brute destinée au nettoyage et à l'arrosage ; les sources et les rivières pour les autres usages. De là l'essor de la consommation domestique, de là encore l'entrée de la Compagnie Générale des Eaux dans la capitale pour la commercialisation de l'eau, les services techniques conservant la production, la distribution, les infrastructures. À la veille de la première guerre mondiale, l'essentiel de la structure actuelle du réseau d'adduction en eau est en

place (Figure 7) et la consommation s'élève à 300 à 350 l/hab/j (dont environ un tiers d'eaux de sources, Figure 6).

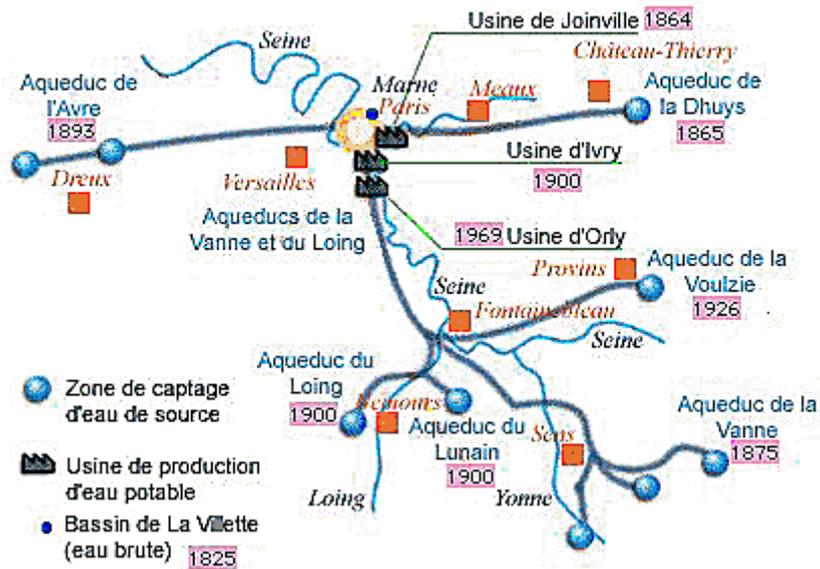


Figure 7 : Le réseau actuel d'adduction en eau de Paris : des infrastructures séculaires (schéma adapté d'après SAGEP et sources diverses pour les dates de mise en service).

1918- : Le changement d'échelle

Dès le Second Empire, quelques communes de banlieue ont commencé à s'équiper, principalement sur la base de captages en Seine et en Marne. Dans l'entre-deux-guerres, elles s'organisent et donnent naissance, en 1922, au Syndicat des Communes de la Banlieue de Paris pour les Eaux (SCBE), qui concède l'exploitation des réseaux à la Compagnie Générale des Eaux et regroupe l'essentiel des communes du département (68 sur 80 en 1942, auxquelles il faut ajouter 67 communes de Seine-et-Oise et 4 du Val-de-Marne ; le Syndicat de la presqu'île de Gennevilliers couvre 9 autres communes du département de la Seine, les 3 communes restantes disposant de réseaux indépendants, dont deux concédés à la Société Lyonnaise des Eaux en 1942) (*Annuaire statistique...* ; Sentenac, 1934 ; Koch, 1949). La consommation d'eau n'est plus le seul apanage de la capitale (d'autant plus que sa population stagne à partir des années 1920 puis diminue à partir des années 1950) et prend rapidement une dimension départementale puis régionale (Figure 8), d'autant plus qu'à la demande urbaine s'ajoute la consommation industrielle.

Deux graves problèmes en résultent. D'une part, celui de l'épuisement de la ressource, et notamment de la Seine, question sensible à partir de la sécheresse de 1911. Dans l'entre-deux-guerres et avant la construction des barrages-réservoirs, les prélèvements s'élèvent à 28 m³/s (et encore faudrait-il y ajouter les centrales thermiques), quand le débit d'étiage du fleuve atteint à peine 35 m³/s, si bien que l'État est amené à refuser à la ville de Paris l'augmentation de ses prélèvements. D'autre part, la qualité des eaux se dégrade : qui dit augmentation de la consommation dit augmentation des rejets tant urbains qu'industriels, rejets dont le faible débit du fleuve dû à cette même augmentation ne permet plus la dilution tandis que ceux des centrales thermiques entraînent une augmentation préoccupante de la température (Sentenac, 1928 ; Gilbert, 1958). Le système parisien montre ainsi ses limites.

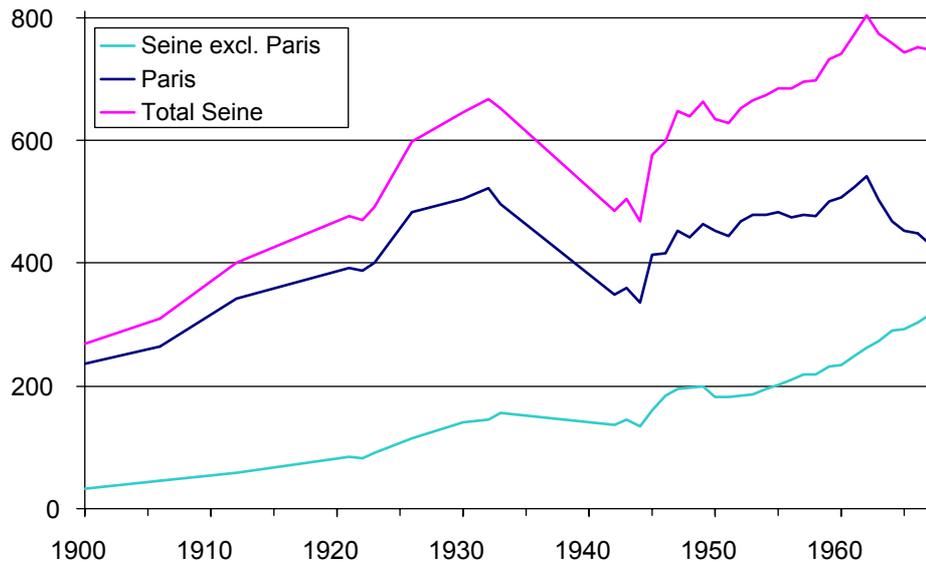


Figure 8 : Consommation urbaine d'eau potable et brute, Paris et département de la Seine, 1900-1967 (10⁶ m³/an).

Les premiers projets de l'administration parisienne traduisent la continuité du point de vue de ses ingénieurs, pour lesquels la ressource est conçue comme illimitée et la capitale jugée prioritaire. Puisque les sources ne sont plus mobilisables (la dernière dérivation est réalisée en 1926), il suffit d'aller chercher de l'eau ailleurs, dans un autre bassin, d'où les projets des années 1920 et 1930 d'utilisation des eaux du lac Léman et des vals de Loire (Sentenac, 1928 ; Koch, 1949). Cependant, resurgit une ancienne crainte : la crue de 1910 a montré la vulnérabilité de la capitale. La construction de barrages-réservoirs à l'amont, déjà envisagée cinquante ans plus tôt, apparaît comme la solution pour préserver la ville (et éviter la dérivation de la Marne). Mais la capacité requise conduirait à d'énormes investissements ; le projet est ainsi réorienté et les premiers barrages, en service dans les années 1930, sont principalement destinés à soutenir le débit d'étiage afin d'autoriser tant la navigation que les prélèvements estivaux (le soutien d'étiage nécessite une capacité de stockage moindre que l'écrêtage des crues) (Gilbert, 1958).

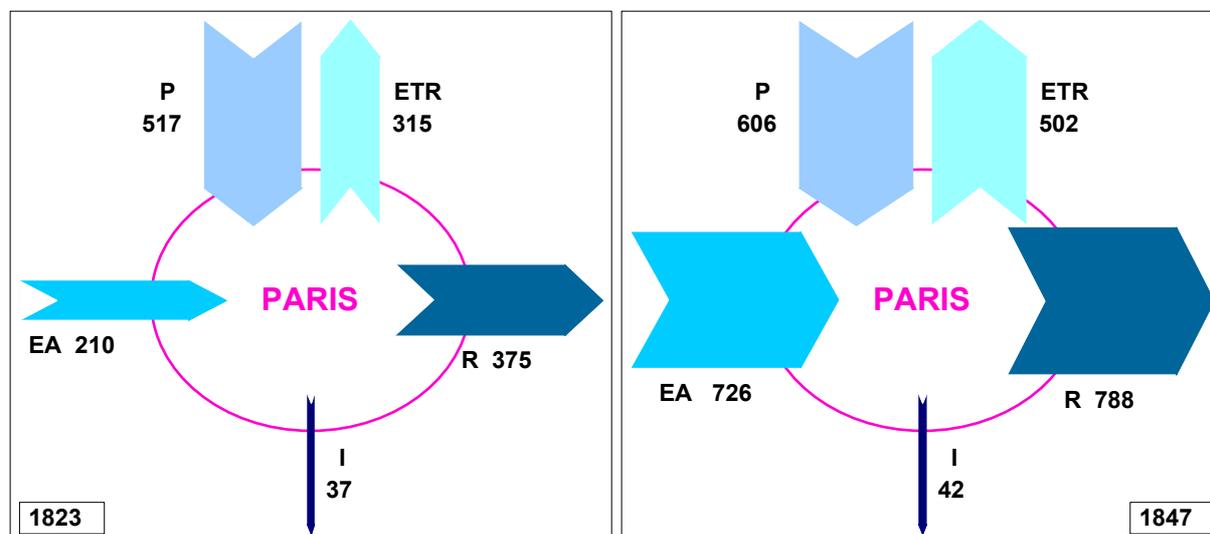
Production et consommation poursuivent ainsi leur croissance (et ce jusqu'au début des années 1990), toujours jugée positive car synonyme de salubrité, de confort et de dynamisme urbain et industriel. La période de l'entre-deux-guerres est ainsi capitale dans la constitution du système régional d'alimentation en eau, au même titre que le Second Empire pour le système parisien. La capitale garde son autonomie par rapport à la banlieue et à son acteur majeur, le SCBE plus tard rebaptisé Syndicat des Eaux d'Île-de-France (SEDIF, regroupant aujourd'hui 144 communes soit 4 millions d'habitants, dont la gestion est toujours déléguée à la Compagnie Générale des Eaux) ; malgré des efforts de coordination dès 1931, les infrastructures demeurent indépendantes (contrairement à ce qui se passe pour les eaux usées). En outre, la pression de la capitale s'étend bien au-delà des captages de sources et usines de prélèvement hérités du XIXe siècle, le régime du fleuve lui étant en grande partie soumis et les barrages participant de son empreinte écologique.

2.2.2 Les rejets

1800-1860 : La ville mouillée

La distribution de l'eau n'est pas, dans un premier temps, assortie de sa collecte. Jusqu'aux années 1830, on construit peu d'égouts, et les eaux pluviales et anthropiques coulent à la surface du sol, dans les ruisseaux centraux des rues aux chaussées fendues, puis se jettent dans la Seine *intra muros*. La mise au point de procédés de construction moins coûteux (utilisation de la chaux hydraulique, plus tard du ciment), le choléra de 1832, la recherche de profils de chaussée plus adaptés à la circulation grandissante conduisent à la mise en œuvre d'un premier programme de construction d'égouts, programme qui reste néanmoins relativement limité jusqu'au Second Empire (Figure 10). Ce

réseau ne collecte pas d'eaux usées : celles-ci n'existent ni dans les faits, ni dans les esprits et jusqu'en 1852 le raccordement des maisons est interdit en raison de son insalubrité, la consommation domestique demeurant par ailleurs très faible, comme nous l'avons vu. Les excréta urbains sont alors solides — boues de rue, vidanges de fosses d'aisances — et valorisés (en particulier sous forme d'engrais, cf. *infra*, § 2.3.1), si bien que la notion de déchet n'existe pas plus que celle d'eau usée.



EA : apports anthropiques ; P : apports pluviaux ;
 ETR : évapotranspiration ; R : ruissellement ; I : infiltration

Figure 9 : Cycle de l'eau, 1823, 1847 (mm).

La conséquence de l'essor de la consommation conjugué à la faible collecte est paradoxale et le cycle urbain de l'eau en quelque sorte hybride (Figure 9). L'anthropisation est déjà déterminante : elle s'exprime non seulement dans les apports, mais aussi dans la nature des surfaces. Bien que les sols soient de natures encore très variées, les surfaces imperméables dominent (les toitures couvrent près de 60 % de Paris en 1817, 65 % en 1847) et les surfaces imperméabilisées gagnent (pavage, plus tard bitumage des rues). Cependant, le fonctionnement "naturel" domine encore, puisque les eaux séjournent principalement en surface. Cette combinaison conduit à une situation qui traduit bien la complexité de la pression anthropique et de son évolution : alors que la ville préindustrielle est vilipendée pour son humidité et sa boue, que celle du XXe siècle finissant est caractérisée par sa sécheresse, il n'y a probablement jamais eu autant d'eau à la surface du sol de Paris qu'au cours de la Monarchie de Juillet : le passage de l'humide au sec n'est pas progressif (Barles, 2002a).

1860-1914 : La canalisation souterraine de Paris

Les principes de l'assainissement et la structure du réseau d'égouts prennent au Second Empire un nouveau tour. D'une part, le réseau conçu par Henry-Charles Emmerly dans les années 1830 visait à réduire les linéaires : seule la moitié des rues devait être équipée. L'obligation de raccordement des eaux ménagères en 1852 (rendue nécessaire par l'augmentation relative de la consommation domestique) imposait au contraire la desserte de toutes les rues, programme mis au point par Eugène Belgrand et engagé au milieu des années 1850 (Figure 10). D'autre part, le réseau est unifié et les eaux conduites à l'aval de Paris, à Clichy, afin de limiter l'infection de la Seine et les risques d'inondation *intra muros* : le collecteur d'Asnières est mis en service en 1858, les autres collecteurs parisiens lui sont progressivement rattachés ; il draine 84 % de la capitale en 1895, le reste étant desservi par le collecteur du Nord qui rejoint le fleuve à Saint-Denis.

Cependant, deux questions intimement liées sont longuement débattues : d'une part, celle de la *réforme de la vidange*, d'autre part celle du devenir des eaux d'égouts. Les vidanges sont en effet de plus en plus diluées par les eaux domestiques, leur traitement est difficile ; toujours plus nombreuses, elles motivent un trafic gênant et insalubre dans une ville déjà congestionnée par l'essor de la circulation. Par ailleurs, le débit des égouts ne cesse d'augmenter : l'infection de la Seine croît à partir de Clichy ; les grandes quantités de sables et de matières en suspension (en grande partie dues à

l'usure des revêtements de chaussée, macadam notamment) qu'ils transportent provoquent des atterrissements dans le fleuve qui entravent la navigation.

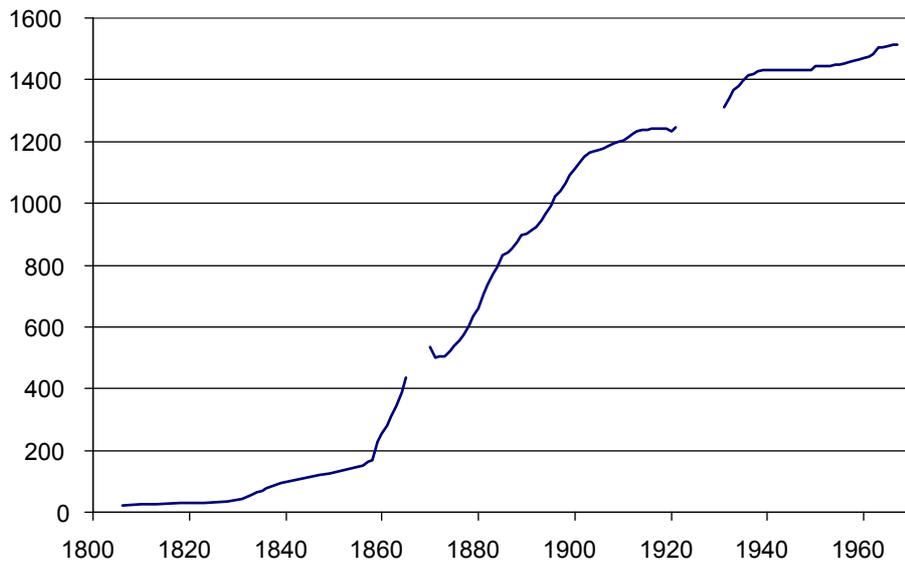


Figure 10 : Longueur des égouts, Paris, 1806-1967 (km).

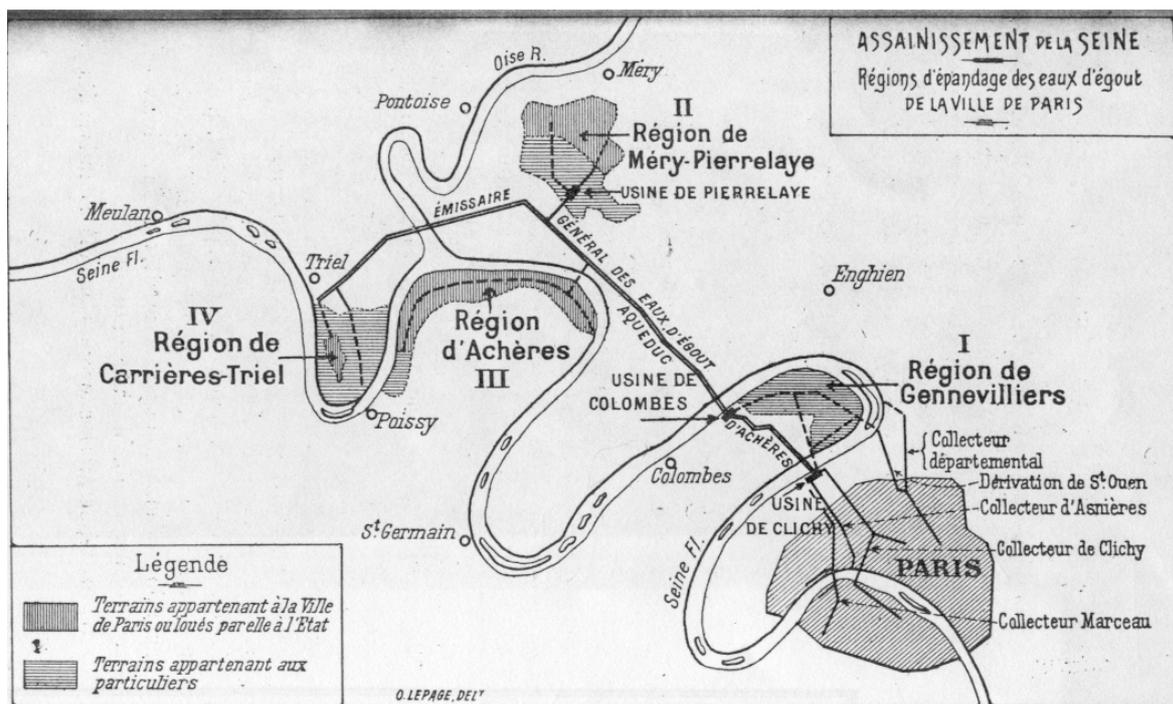


Figure 11 : Collecteurs parisiens et champs d'épandage, 1910 (Vincey, 1910).

Dès les années 1860, certains ingénieurs parisiens sont ainsi convaincus de la nécessité du tout-à-l'égout, *i. e.* du raccordement des eaux-vannes, en sus des eaux ménagères, et de l'épandage agricole des eaux, qui permettrait tant leur valorisation que l'amélioration de la qualité des eaux du fleuve. Belgrand se rallie à cette solution en 1870, bientôt suivi par l'administration parisienne. Cependant, le projet suscite de nombreuses oppositions, de la part des médecins, des producteurs d'engrais, des propriétaires d'immeubles, des communes touchées par les projets d'épandage. Le tout-à-l'égout est facultatif à partir de 1885, obligatoire en 1897, véritablement réalisé dans les années 1930 ; les sites d'épandage se multiplient (Gennevilliers d'abord, puis en 1895 Achères, et Carrières-Triel et Méry-Pierrelaye en 1898) ; ils culminent à 5 100 ha au début du XXe siècle (Figure 11).

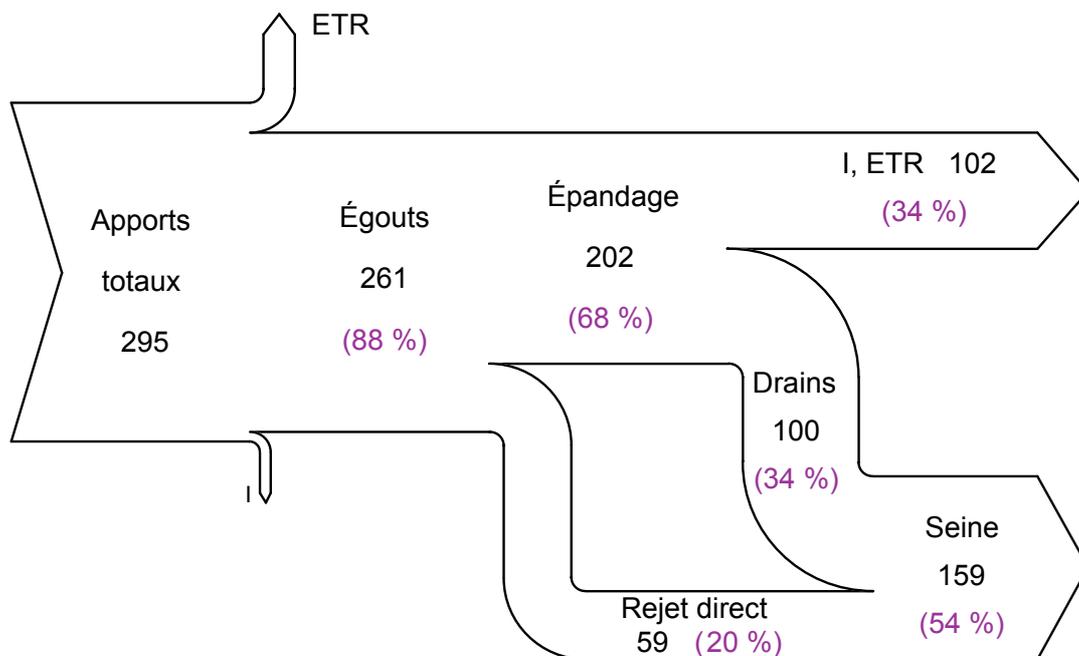


Figure 12 : Cycle de l'eau, Paris, 1903 (10⁶ m³/an).

Le cycle urbain de l'eau en est profondément modifié : les égouts permettent progressivement la collecte de la majorité des eaux pluviales et anthropiques — bien qu'ils peinent à absorber l'augmentation des apports —, au détriment de l'infiltration (d'autant plus que les revêtements noirs se multiplient) et de l'évapotranspiration. Ce volet du cycle de l'eau se déplace en quelque sorte vers les champs d'épandage, qui soustraient ainsi 34 % des eaux à la Seine en 1903 (Figure 12), mais plus que 16 % en 1913.

1918- : Le retard constant des équipements

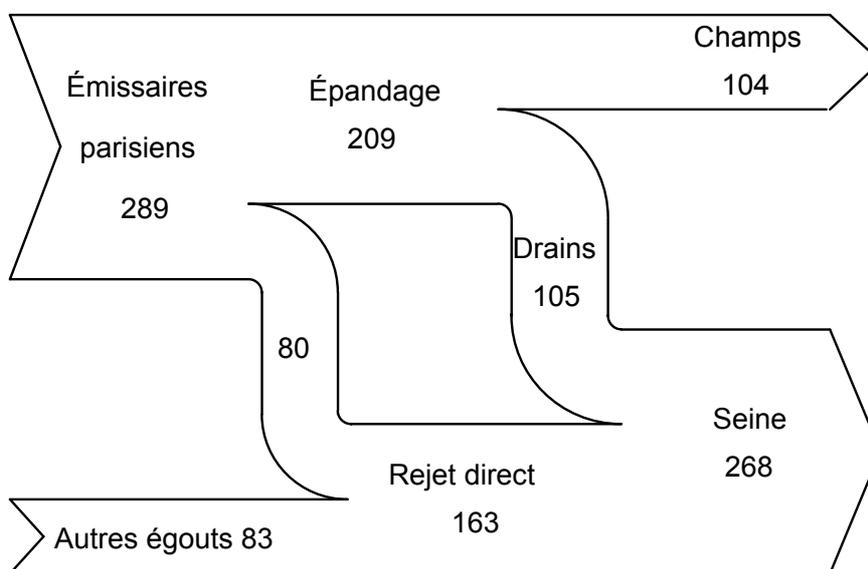


Figure 13 : Rejets de l'agglomération parisienne, 1905 (10⁶ m³/an).

Dès le début du XXe siècle, si la performance du réseau parisien ne fait pas de doute, se pose le problème de l'assainissement de la banlieue, qui ne se réduit pas aux dysfonctionnements de l'approvisionnement que nous avons évoqués plus haut. En 1905, ses rejets directs sont équivalents aux rejets directs de la ville de Paris (Figure 13). Le conseil général du département de la Seine souligne, dès 1911, la nécessité d'un programme d'assainissement de la banlieue (Kerboriou, 2001), programme élaboré une fois la guerre passée. Le schéma général d'assainissement de la Seine (qui

concerne aussi une partie de la Seine-et-Oise) est approuvé en 1929, déclaré d'utilité publique en 1935 et doit permettre de répondre aux besoins jusqu'en 1970 (Olivesi, 1966). Basé sur un réseau de collecteurs en éventail dont les branches se rejoignent à Achères, il reprend le principe du réseau parisien, mais à une tout autre échelle.

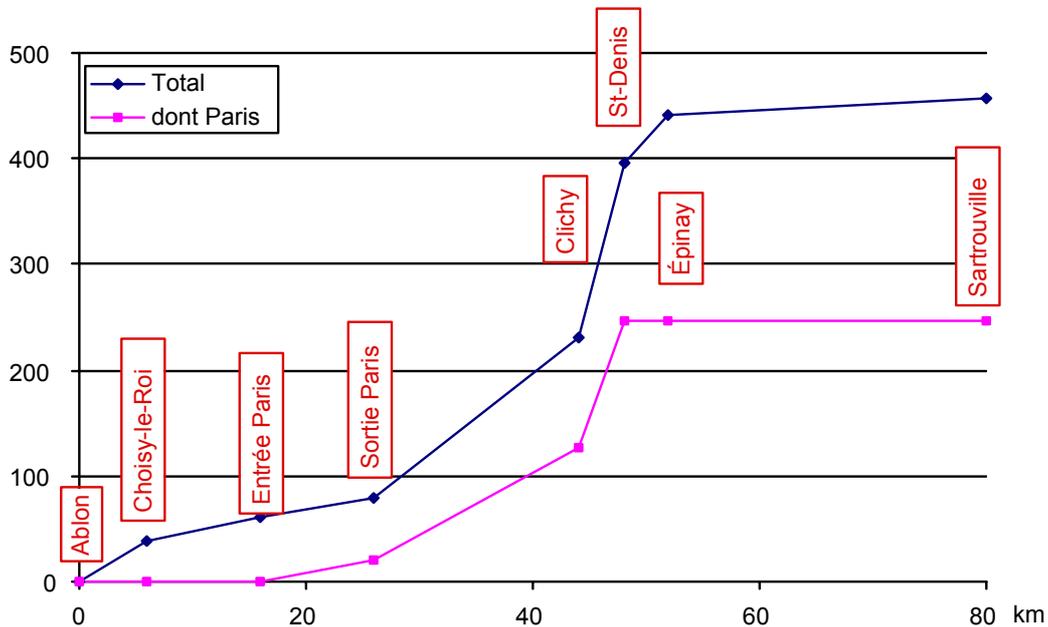


Figure 14 : Rejets cumulés d'eaux usées non traitées en Seine, d'Ablon à Sartrouville, 1905 ($10^3 \text{ m}^3/\text{j}$).

Malgré l'ambition du programme, l'assainissement départemental connaît un constant retard. D'une part, il suppose que les immeubles soient connectés aux réseaux communaux : en 1955 encore, la moitié des communes de banlieue présente un taux de raccordement inférieur à 50 % (Koch, 1958) ; mais il suppose aussi que les communes s'équipent et se branchent sur le réseau : l'évaluation du taux de collecte (rapport entre les apports totaux et le débit des collecteurs), qui ne dépasse pas les 20 % entre 1900 et 1960, montre qu'on en est loin (Figure 15).

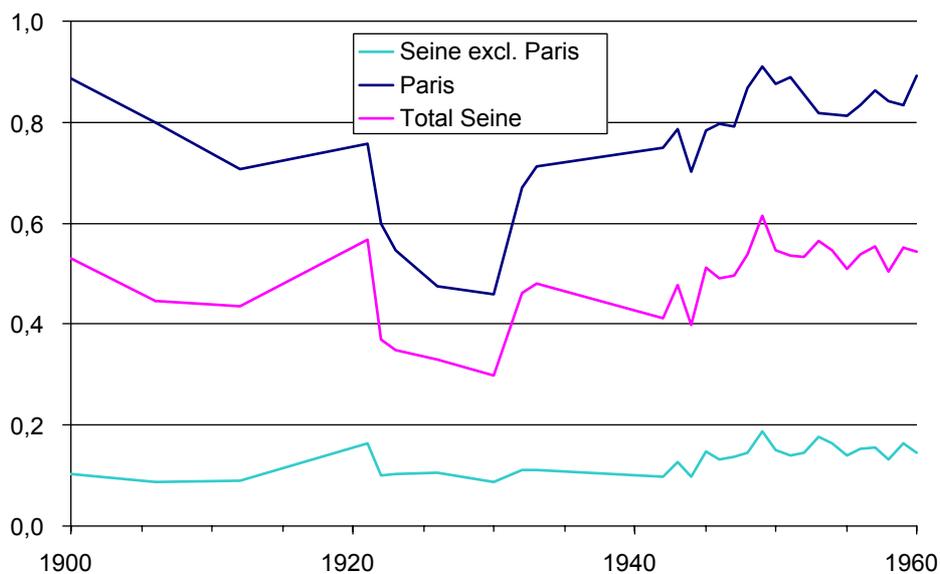


Figure 15 : Taux de collecte des eaux urbaines (pluviales et anthropiques) par le réseau départemental, Paris et département de la Seine, 1900-1967.

D'autre part, et malgré ce taux très faible, les équipements d'épuration ne suivent pas. Les champs d'épandage montrent leurs limites dès l'entre-deux-guerres : les surfaces sont insuffisantes, les

perspectives d'extension limitées du fait de l'urbanisation et des enjeux fonciers ; s'ils reçoivent près de 90 % des eaux en 1902, ce chiffre tombe à 18 % en 1940. Malgré la mise en service de la station d'épuration d'Achères cette année-là, puis ses extensions successives, chaque augmentation de la capacité de traitement est immédiatement dépassée par les volumes à traiter, qu'elle ne rattrape qu'à la fin des années 1980. De ce fait, les rejets directs demeurent très longtemps supérieurs aux rejets d'eau traitée (23 % en 1946, 43 % en 1971), avec des conséquences non négligeables pour la qualité des eaux du fleuve (Figure 16).

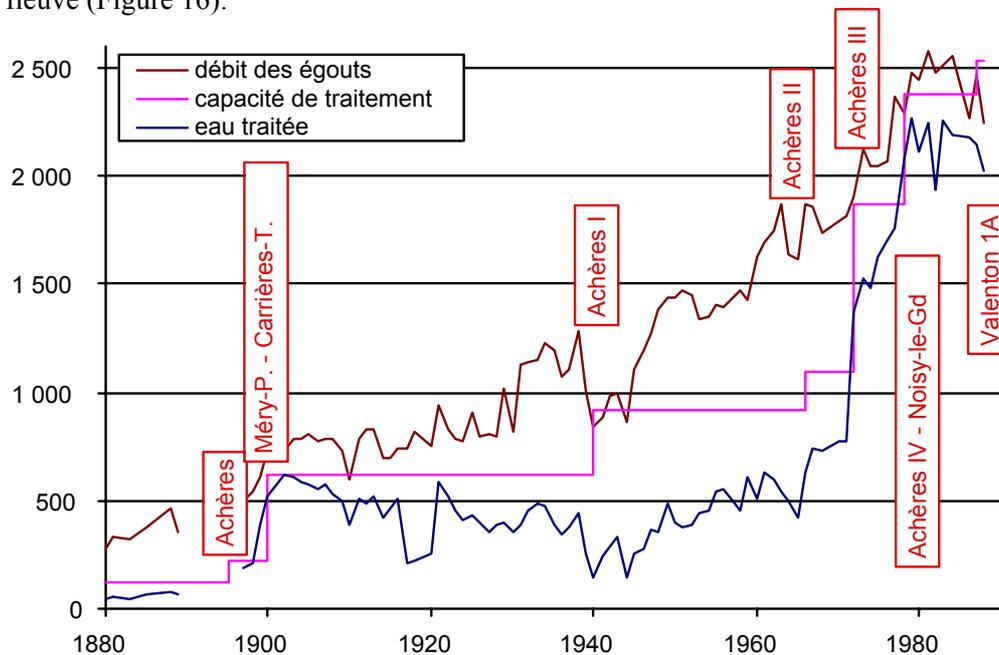


Figure 16 : Débit des collecteurs, capacité de traitement et eaux traitées, 1880-1988 ($10^3 \text{ m}^3/\text{j}$).

2.3. Le métabolisme urbain : premiers résultats

Si la ville affecte profondément le cycle de l'eau, elle se caractérise aussi par l'importation, la transformation, le recyclage, l'exportation voire le rejet de matières abondantes et diverses, qu'elles soient liées aux activités domestiques (alimentation, consommation de biens) ou aux activités artisanales et industrielles. L'étude du métabolisme urbain permet alors non seulement de caractériser les flux de matières qui sont mis en jeu dans la ville, mais aussi d'évaluer l'impact de cette dernière en termes de pression anthropique et d'éventuelle contamination des différents compartiments de l'environnement.

2.3.1 L'azote

L'étude du cycle de l'azote a été retenue pour plusieurs raisons : d'une part, son rôle dans le fonctionnement — et le dysfonctionnement — des écosystèmes ; d'autre part, son rôle urbain : la ville en importe en effet de grandes quantités (denrées alimentaires, matières destinées aux activités artisanales et industrielles), qu'elle transforme, exporte, stocke ou rejette. À ces raisons s'en ajoute une autre, plus pratique : comme nous le verrons, la ville apparaît, au XIX^e siècle, comme une véritable mine d'azote, et l'intérêt porté à cet élément a motivé de nombreux travaux, nous fournissant autant de sources d'information qui, sans être exhaustives ni d'un emploi aisé, sont beaucoup plus abondantes que pour d'autres matières dont l'étude s'avérerait probablement tout aussi intéressante (phosphore par exemple). Pour cette première phase, nous nous sommes essentiellement intéressée aux excréta humains et aux rejets urbains. Nous présentons ici quelques évaluations quantitatives que le lecteur considérera avec circonspection compte tenu des nombreuses incertitudes qui les caractérisent¹.

¹ Pour le détail des sources, on se reportera à (Barles, 2002a).

Des engrais

Comme nous l'avons vu, les excréta humains ne sont pas, jusque tard dans le XIXe siècle, rejetés à l'égout, mais collectés dans les fosses d'aisances implantées sous les maisons ; celles-ci sont périodiquement vidangées et les matières transportées dans les voiries, établissements dans lesquelles elles sont transformées en engrais vendu aux cultivateurs. Cette activité économique connaît un essor sans précédent dans les deux premiers tiers du XIXe siècle. En effet, l'agriculture demande toujours plus d'engrais pour nourrir les villes ; la chimie de l'azote est en plein essor, et les industriels cherchent, bien avant que le cycle de cet élément ne soit établi et que son rôle dans la fertilisation des terres ne soit scientifiquement admis, à améliorer les procédés de fabrication des engrais, comme en témoignent les nombreux brevets déposés au cours de cette période (Figure 17) ; les excréta urbains constituent alors une matière première prisée, qu'il s'agisse des vidanges ou, dans une moindre mesure, des boues de rues (Barles, 2002b). Au début du XIXe siècle, les vidanges sont transformées en poudrette, engrais sec et pulvérulent dont la préparation nécessite plusieurs années. Cependant, confrontés au problème de la liquéfaction des vidanges due à l'augmentation relative de la consommation d'eau domestique, les industriels cherchent aussi à valoriser les liquides : le sulfate d'ammoniaque, produit à partir des années 1830, est en plein essor à partir des années 1860. On comprend mieux dans ces conditions l'intérêt des investisseurs pour l'*engrais humain* et la bataille de l'azote qui a lieu à Paris à partir des années 1860, au cours de laquelle les industriels luttent d'influence pour prendre les vidanges parisiennes et s'opposent à l'administration qui concocte le tout-à-l'égout.

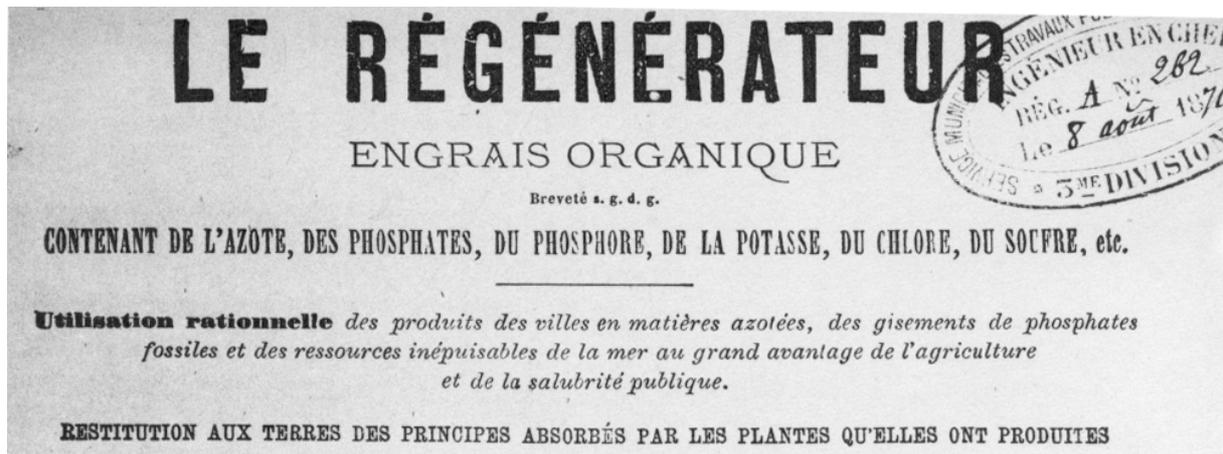


Figure 17 : Le régénérateur, engrais organique (source : Archives de Paris, VO3 163).

Dès lors, se pose la question de l'efficacité du système, que nous avons tenté d'établir pour trois années choisies en fonction de la disponibilité des sources (Figure 18, Tableau 3). Bien qu'augmentant d'une année à l'autre, le taux de collecte reste faible : les pertes dans les fosses d'aisances sont considérables puisqu'elles représentent plus de la moitié de l'azote rejeté par les Parisiens. Elles sont dues aux pertes atmosphériques, mais aussi et surtout aux infiltrations dans le sous-sol ; autant dire que les mesures réglementaires concernant la construction des fosses d'aisances (ordonnances de 1809 et 1819), qui visaient à les rendre étanches, n'ont guère eu d'effet sur l'infection du sol. Les analyses menées par Jean-Baptiste Boussingault en 1858 sur l'eau des puits en attestent, avec des teneurs en azote pouvant atteindre 300 mg/l, si bien que le sous-sol parisien est "comparable à une nitrière" (Boussingault, 1858).

Tableau 3 : Excréta humains : taux de collecte, taux de transformation, rendement total, 1815, 1852, 1864 (%).

	1815	1852	1864
Taux de collecte	36	43	47
Taux de transformation	13	30	35
Rendement total	5	13	16

Le taux de transformation quant à lui traduit l'efficacité des procédés industriels. Il est très faible en 1815, où l'on ne produit que la poudrette — les “graves défauts de cette méthode, qui fait perdre dans l'atmosphère la plus grande partie des produits utiles à la végétation” (Paulet, 1853) sont d'ailleurs dénoncés dès les années 1850 — ; il triple presque entre 1815 et 1864 : le sulfate d'ammoniaque, bien que produit en petites quantités (1 000 t contre 60 000 m³ de poudrette en 1864) concentre beaucoup plus d'azote que la poudrette et minimise les pertes atmosphériques ; il n'empêche pas le rejet à l'égout des eaux en excès, très chargées en azote (Figure 20). Malgré cette amélioration des procédés, le rendement total demeure très faible et n'atteint pas les 20 % en 1864 : la ville rend finalement peu à la campagne, malgré la nécessité sans cesse réaffirmée de la restitution de ces “matières dont les villes doivent compte à la terre” (Dumas, 1866).

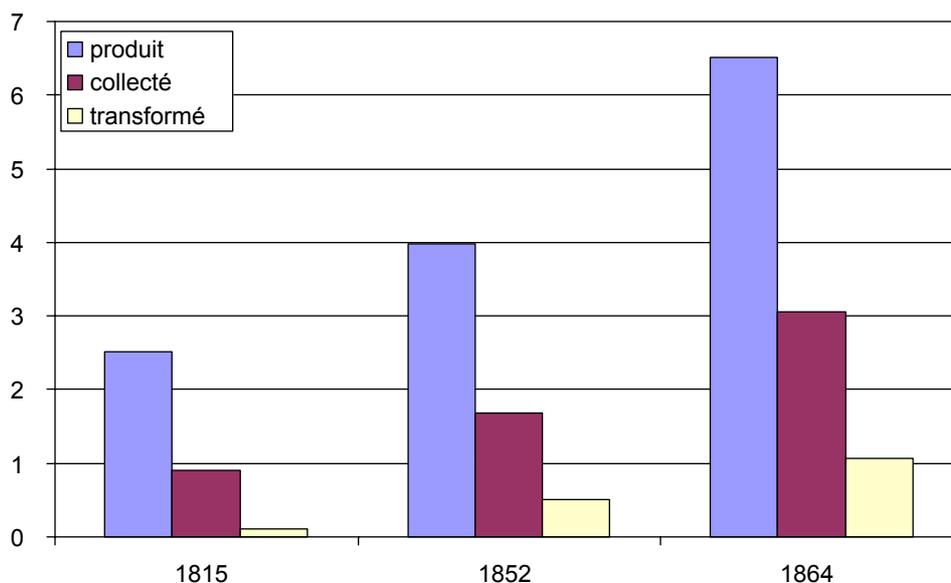


Figure 18 : Azote produit par les parisiens (10 gN/hab/j), azote collecté (vidanges), azote valorisé (engrais), 1815, 1852, 1864 (10³ tN).

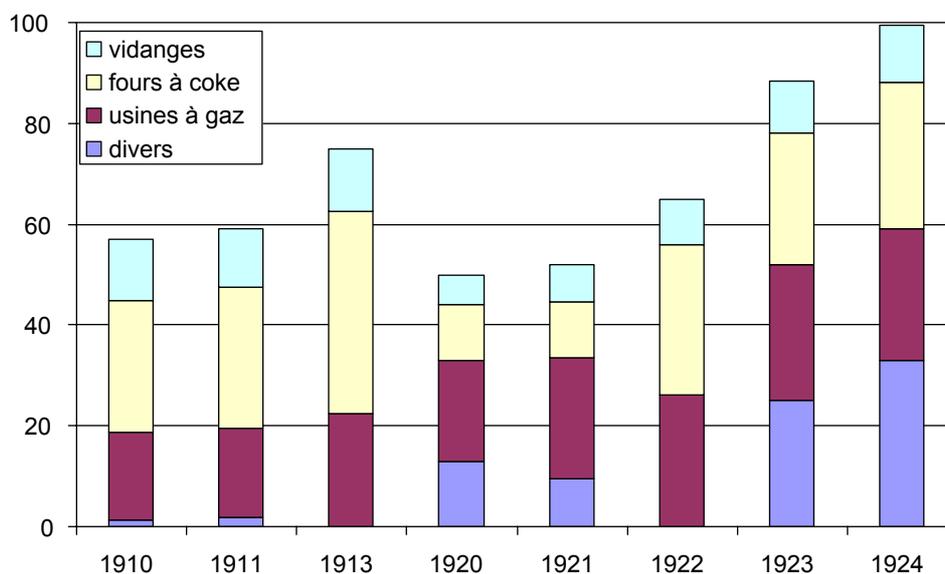


Figure 19 : Production nationale de sulfate d'ammoniaque, 1910-1924 (10³ t).

Si ce système permet une relative préservation de la Seine, épargnée par les rejets domestiques, il se traduit par une dégradation locale du milieu, avec des conséquences probablement non négligeables en termes de santé publique : on compte 25 000 à 30 000 puits particuliers en service dans les années 1830 (Girard & Parent-Duchâtelet, 1833), encore 10 000 vers 1870 (Gerards, 1907). Si les industriels semblent placer de grands espoirs dans la fabrication du sulfate d'ammoniaque, ils se

détourneront progressivement de la matière première que constituent les vidanges au profit des eaux ammoniacales résultant de la fabrication du gaz de ville (distillation de la houille, qui fournit un autre sous-produit essentiel à l'équipement urbain, le goudron) ou produites dans les fours à coke (Figure 19).

Des eaux

Comme nous l'avons vu, la canalisation souterraine de Paris, entreprise au Second Empire, entraîne une augmentation du débit des égouts. Ceux-ci collectent dès les années 1860 des matières organiques en abondance, qu'elles proviennent des maisons (eaux ménagères) ou des rues. Jusqu'à l'avènement de la *poubelle* en 1884, boues et immondices sont en effet déposées en tas sur la chaussée, et imparfaitement collectés ; s'y ajoutent les crottins (bien qu'ils soient en partie ramassés et très prisés pour les *cultures spéciales*) et autres déjections d'une multitude d'animaux qui sillonnent les rues de la capitale : on y compte 80 000 chevaux en 1880 (Bouchet, 1993). En outre, si le tout-à-l'égout n'est pas encore d'actualité, les liquides de certaines fosses d'aisances sont rejetés à l'égout depuis 1850 où le déversement de la phase liquide au moment de la vidange est toléré sous réserve de désinfection préalable — mais les quantités mises en jeu sont, il est vrai, insignifiantes (174 000 m³ en 1858) — et 1867 où l'écoulement des eaux-vannes dans les égouts publics par voie directe, en continu et sans désinfection est autorisé (Belgrand, 1887) — cette possibilité est dans un premier temps peu utilisée. Le rôle des égouts dans le cycle aval de l'azote devient ainsi de plus en plus important ; comme le montre la Figure 20, en 1869, ils collectent un peu plus d'azote que les boues et les vidanges respectivement ; déjà, les rejets en Seine dépassent les apports aux cultures.

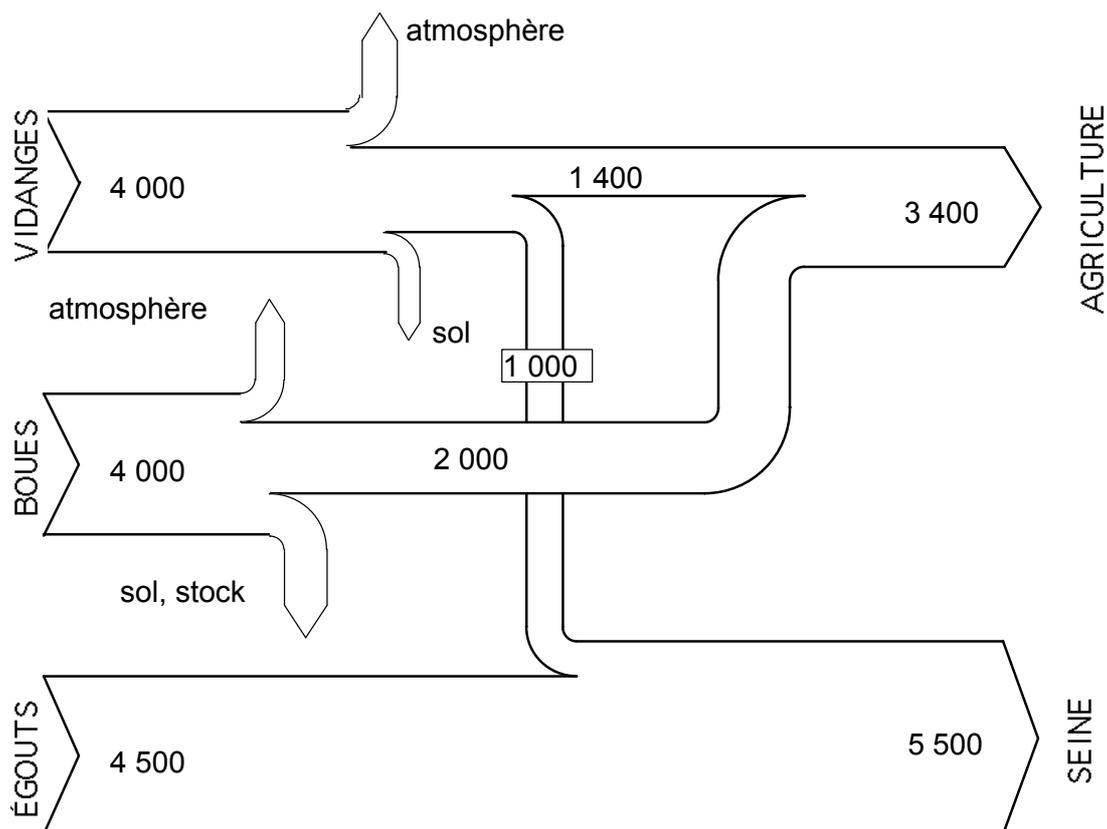


Figure 20 : Azote des excréta urbains, Paris, 1869 (tN).

On mesure ainsi l'enjeu de l'épandage agricole, et peut-être les raisons du choix de cette technique alors que l'épuration par voie chimique était aussi envisagée : "une tonne d'eau d'égout vaut 0f.10, ou si l'on veut, coûterait 0f.10 à fabriquer, rien qu'en achat de matière première", soulignent les ingénieurs des Ponts et Chaussées Mille et Durand-Claye, grands zélateurs de l'épandage (Mille, Durand-Claye, 1869). Reste à mesurer l'effet de l'irrigation agricole en termes de cycle de l'azote. La Figure 21, relative à l'année 1906, montre que si un quart de l'azote contenu dans les eaux d'égouts est directement rejeté en Seine à Clichy, le reste se répartit dans les quatre régions d'épandage. Là, un

tiers gagne la Seine, tandis que finalement les champs en “retiennent” 40 %, dont une partie est métabolisée par la végétation. Le rôle de l'épandage est ainsi triple : d'une part, il permet de soustraire au fleuve une partie non négligeable de l'azote transporté par les égouts ; d'autre part, il permet l'étalement des rejets dans le fleuve : l'effet sur la qualité de l'eau des 4 200 tN finalement rejetés serait probablement très différent si ce rejet avait lieu aux seuls exutoires de Clichy et Saint-Denis, très proches l'un de l'autre (cette hypothèse serait néanmoins à vérifier, vérification difficile dans la mesure où, comme nous l'avons vu, les rejets de la banlieue s'ajoutent aux rejets parisiens) ; enfin, l'azote est rejeté à Clichy et Saint-Denis principalement sous forme ammoniacale, tandis que les drains transportent des nitrates : là encore, l'impact sur la qualité du milieu aquatique en est modifié. Ces résultats exploratoires devraient être mis en relation avec les travaux portant sur les chroniques de qualité du fleuve (Cun, Vilagines, 1997 ; Cun, Billen, Garnier, 2001) afin d'analyser avec précision la réponse du milieu.

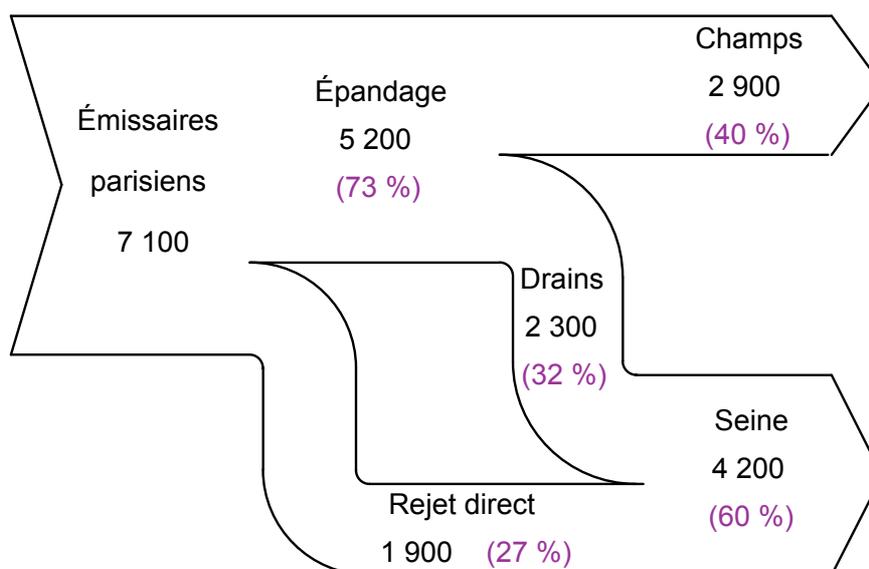


Figure 21 : Devenir de l'azote des égouts parisiens, 1906 (tN).

2.3.2 Le plomb

Comprendre la circulation des éléments traces dans le bassin de la Seine s'inscrit dans un courant de recherche bien reconnu en Europe d'une histoire de l'impact écologique des flux de matières générés par l'urbanisation et l'industrialisation croissantes des XIXe et XXe siècles (Berbäck, 1992 ; Stigliani, 1993 ; Ayres, 1994).

Méthodologie

Nous passerons ici en revue les informations nécessaires à l'établissement du métabolisme du plomb, c'est-à-dire la circulation du plomb entre les sociétés humaines et leur environnement naturel, dans le bassin de la Seine.

- Choix d'une échelle spatiale

Le territoire étudié est géographiquement cohérent, le bassin de la Seine, mais ne correspond ni à un découpage administratif, ni à une entité économique définie. Cela implique donc de retranscrire des données établies au niveau national ou départemental à l'échelle du bassin. Deux grilles de transcription ont été retenues : le rapport de population pour les usages et rejets urbains du plomb, la connaissance de l'activité industrielle pour les rejets industriels.

- Les sources de données

La pertinence des métabolismes de matière dépend de la qualité des sources disponibles. Elles sont de deux types : les sources statistiques pour déterminer l'importance des flux de plomb et les inventaires industriels nécessaires à la spatialisation des données.

Dans l'état actuel des recherches, les flux de plomb métal (du minerai à la métallurgie 1^{ère} et 2^e fusion) sont connus, mais les statistiques de transformation du plomb en "demi-produits" (feuilles, plaques et canalisations) ou dérivés chimiques du plomb (carbonate, oxydes, etc.) sont lacunaires. Il conviendra de les compléter en dépouillant les archives de chambres syndicales et de la Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (DGEMP) du Ministère de l'Industrie.

Les inventaires industriels sont constitués à partir des archives départementales, voire communales, relatives aux établissements classés, complétés par quelques inventaires nationaux. Les inventaires réalisés à ce jour concernent essentiellement l'ancien département de la Seine. Il sera étendu à l'Oise, centre de production du minium français, et à des zones pilotes de la prochaine phase du PIREN Seine, comme les bassins-ateliers. Outre le fait que les archives n'ont pas toujours été conservées, les entreprises recensées ne sont que celles qui ont été classées (dans le cadre du décret-loi de 1810, de 1917, enfin de 1976) : nous ne connaissons pas la proportion d'établissements ayant échappé à ce classement (petits établissements, établissements de durée de vie éphémère, etc.).

Sources statistiques :

- *Administration des douanes - Tableau des marchandises étrangères importées en France et des Marchandises françaises exportées à l'étranger* : consulté entre 1818 et 1848² ;
- *Statistique de l'Industrie Minérale, Résumé des travaux statistiques de l'administration des Mines*, Paris, 1847- : statistiques annuelles de production française, consultées entre 1847 et 1925 ;
- *Minerais et Métaux, Statistiques* : annuaire statistique du groupe Minerais et Métaux, puis Imetal et MetalEurop, 1926- : production minière, métallurgique, importations, exportations, et consommation apparente de la France, statistiques annuelles ; consultées entre 1926 et 1992³.

Inventaires industriels :

- Fonderies de plomb : *liste des Établissements classés autorisés dans les communes du Département Seine*, 1885 (BAVP) et 1912 (Archives Nationales AN F¹² 7610) ; *Cartes industrielles* éditées aux Éditions géographiques professionnelles, 1945⁴ ; *Inventaire des sites à surveiller pour leurs rejets en plomb* (Circulaire du 12 juillet 2000 du MATE) (BO n° 2000-10, annonce n° 24) ;
- Fonderies et laminage de plomb, cuivre et zinc : *Enquête nationale* (par département) de 1908 (AN F¹² 7610 et AN F¹² 7611).

Autres inventaires :

- Inventaire d'Aubervilliers et Saint-Denis 1790-1996⁵ ;
- Inventaire BASOL des sites et sols pollués (polluant Plomb) (version 2001) ;
- Rapports du Réseau National des Données sur l'Eau (RDNE) 1995-1998 ;
- Recensement 1885 de la population du Bassin par commune⁶.

- Les flux entrants de plomb en France

Établir la quantité totale de plomb susceptible d'être trouvée en France, quel qu'en a été l'usage, revient à effectuer la somme des apports annuels en plomb neuf (hors recyclage). Ces apports annuels correspondent à la somme de la production française de plomb (appelée également production métallurgique puis production de plomb affiné) et des valeurs connues d'importation et d'exportation de plomb métal. Le nombre obtenu, souvent appelé "consommation apparente" en plomb, est sous-

² par André Guillerme.

³ Je remercie MetalEurop de m'avoir donné accès à la collection complète.

⁴ Série de 39 cartes comportant à leur dos la liste des entreprises recensées (environ 14 000). La saisie de ces cartes a été réalisée par Solène Le Metayer.

⁵ Inventaire réalisé par l'Association Ogé pour le compte de la SEM Plaine Développement et complété par la Division de l'Eau et des Réseaux Urbains (DERU) de la DREIF et moi-même, ce qui a permis de retracer l'historique d'environ 2 000 entreprises.

⁶ Données du Laboratoire de Démographie Historique de l'EHESS. Je remercie Madame Motte de m'avoir donné accès à ces données.

évalué par rapport aux apports réels en plomb car il ne prend pas en compte la part de plomb perdue lors du traitement du plomb d'œuvre, dont le rendement était de 86 % en 1971. Faute d'avoir établi l'évolution du rendement de fusion entre le XIXe et le XXe siècle, nous avons arbitrairement rehaussé le chiffre de la production métallurgique de 15 %.

Il est à noter que les chiffres de production métallurgique fournis par les *Statistiques de l'Industrie Minérale*, et *Minerais et Métaux* jusqu'en 1952 concernent bien les apports en plomb neuf. De 1952 à 1970, il faut déduire de ces chiffres les tonnages concernant le traitement du plomb contenu dans les déchets par la filière dite de deuxième fusion.

Pour les apports antérieurs à 1850, nous avons retenu le chiffre mondial d'apport en plomb neuf de 55 millions de tonnes proposé par Nriagu (Nriagu, 1979). L'apport pour la France a alors été estimé à 5,5 millions de tonnes, soit 10 % de ce chiffre mondial.

Tableau 4 : Apport en plomb neuf, France, -1996.

Période	Flux annuel moyen (t/an)	Période	Flux cumulé (10 ⁶ t)
1818-1848	15 000	Avant 1850	5,5
1850-1870	30 000	1850-1870	0,6
1871-1914	70 000	1871-1914	3,0
1919-1942	105 000	1915-1945	2,7
1946-1976	125 000	1946-1976	3,8
1977-1996	120 000	1977-1996	2,5
		Total	18,1

Les flux cumulés sont reportés dans le Tableau 4. Pour chaque période, le flux annuel moyen est rappelé afin de montrer l'importance de ces flux selon les époques. Le chiffre cumulé de 18,1 millions de tonnes reflète les apports totaux de plomb anthropique en France, à l'exclusion du plomb naturellement présent dans le sous-sol, du plomb présent en concentration localement non négligeable dans les anciennes mines françaises, du plomb rejeté lors de la combustion de charbon en contenant un faible pourcentage, à l'exclusion également des apports naturels de plomb par érosion éolienne des roches et sols ou provenant d'émissions de volcans. Ces derniers, estimés à partir de la quantité de plomb retrouvée dans les glaces en Arctique ont de tout temps été négligeables par rapport aux apports anthropiques (Nriagu 1979). On constate qu'un tiers de ces apports a eu lieu avant 1850, un deuxième tiers correspond à la période de forte industrialisation de la France (1850-1945), un tiers simplement de ces apports correspond à la période récente, période de forte augmentation de la consommation mais aussi d'efforts, manifestes depuis les années 1970, d'économies de matières premières, par recyclage et par réduction des pertes lors des traitements industriels.

- Les rejets industriels : les métiers concernés et leur spatialisation

Nous avons fixé une première liste des lieux de transformation du plomb :

- métallurgie des métaux non-ferreux : fonderies de plomb, fabrique et recyclage des accumulateurs, fabrique de câbles ;
- industrie chimique : fabrication de la céruse pour le XIXe siècle, du minium, d'autres dérivés comme les acétates, chromates, le plomb tétraéthyle, etc. ; pour ce dernier, il convient de repérer également les raffineries et les entreprises de conditionnement de produits pétroliers ;
- cristalleries et fabriques de verres spéciaux.

L'importance relative de ces divers secteurs économiques a été établie de 1827 à nos jours (*cf.* pour la période contemporaine le rapport "Métaux lourds : des bilans en mutation").

- Généralités sur les rejets de plomb

Rejets atmosphériques

Les rejets atmosphériques de plomb ont été dominés pendant la période 1945-2000 par les rejets de plomb tétraéthyle liés à la consommation d'essence "au plomb". Grâce au Centre Interprofessionnel Technique de la Pollution Atmosphérique (CITEPA), des données chiffrées sont

connues depuis 1990. Pour le secteur de l'«industrie manufacturière» des périodes antérieures, nous avons utilisé les facteurs d'émission établis par Tarr et Ayres, qui définissent la part de plomb qui est mobilisée par l'environnement à l'échelle d'une décennie (Tarr et Ayres, 1990) (Tableau 5).

Tableau 5 : Facteurs d'émission du plomb (Tarr & Ayres, 1990).

Usage	Facteur d'émission
Usage métallique	0,005
Oxydes de plomb	0,1
Autres produits chimiques	0,5
Accumulateurs	0,01
Câbles	0,01
Autres usages	0,01

Rejets d'eaux résiduaires

La première source de rejets dans le système hydrique est la retombée atmosphérique de plomb (liée à la consommation d'essence «au plomb»), suivie des rejets de l'industrie manufacturière (Nriagu, 1979).

Sols

Au niveau du bassin de la Seine, le plomb peut provenir :

- du plomb tétraéthyle émis par le transport routier estimé à un cinquième du transport français (rapport de population) entre 1945 et 2000 ;
- de l'incinération de déchets (Villejust et Mitry-Mory) ;
- de la métallurgie des métaux non ferreux : si la métallurgie première fusion n'existe plus dans le bassin depuis le début du XXe siècle, le recyclage du plomb par deuxième fusion est, lui bien présent (fabrique et recyclage de batteries et de câbles électriques) ;
- par des sources ponctuelles propres à l'industrie locale (produits chimiques, cristalleries, traitement de surface, etc.).

Résultats préliminaires : la situation en 1885

La plus grande part de la métallurgie de première fusion du plomb se situe hors bassin, à Couëron, près de Nantes, et Marseille, mais il existe aussi un petit centre au Havre, qui s'occupe de désargentation de plomb argentifère provenant d'Espagne.

Le premier inventaire national que l'on ait pu utiliser est celui de 1908 qui indique le nombre d'établissements classés en «fonderie et laminage du plomb, zinc et cuivre» pour chaque département. Sur les 220 établissements répertoriés sous cette rubrique en France, 176 se trouvent dans les 25 départements concernés par le bassin de la Seine, dont 158 dans l'ancien département de la Seine (Paris et 79 communes limitrophes). Parmi ces dernières, 79 sont des fonderies de plomb, d'après l'inventaire départemental du département de la Seine de 1912. La majorité du plomb est donc transformée à Paris.

Le plomb rejeté dans les terres non anthropisées, ici symbolisées comme des terres agricoles, correspond aux plombs de chasse.

La transformation (fusion) du plomb induit des rejets vers l'atmosphère (estimés ici à 5 %). Même si le gros des terrils est stocké dans les mines de plomb (extérieures au bassin, ou lors de la première métallurgie du plomb), on ne peut négliger la constitution de stock de plomb dans des sols industriels dont on garde la mémoire aujourd'hui. Vu le type d'usage du plomb, fabrique de canalisations, peintures, cristallerie, etc., chaque année voit le stock de plomb dans la ville grandir. Le plomb métal est partiellement recyclé, les tonnages sont difficiles à quantifier, mais ce recyclage se situe en ville, toujours à Paris.

On peut identifier et évaluer des fuites, pouvant aller jusqu'à 50 % pour les pigments (Tableau 5), mais beaucoup plus faibles pour les usages du plomb sous forme métallique (usure des

canalisations, par exemple). Le Tableau 6 regroupe les données ayant permis l'établissement du métabolisme pour l'année 1885.

Tableau 6 : Flux de plomb, bassin de la Seine, 1885.

Sigle	Description	Flux (t/an)	Méthode d'évaluation
A Flux atmosphériques			
A2T	Émission liée à la transformation du plomb	1 800	Estimée à 5 % du plomb transformé dans le bassin
I Intrants			
I1	Plomb de chasse	1 000	Estimés depuis les données sur la France par rapport de la population
I2B	Plomb métal (canalisations, plaques...)	7 700	
I2C	PbOx	2 100	
N Plomb neuf			
P	Exportation de plomb	32 000	N moins usages dans le bassin
U Déplacement vers stocks			
U3A	Vers stock urbain	8 750	100 % du plomb métal + 50 % de PbOx
U3C	Vers terrils et sols industriels	460	1 % du plomb transformé

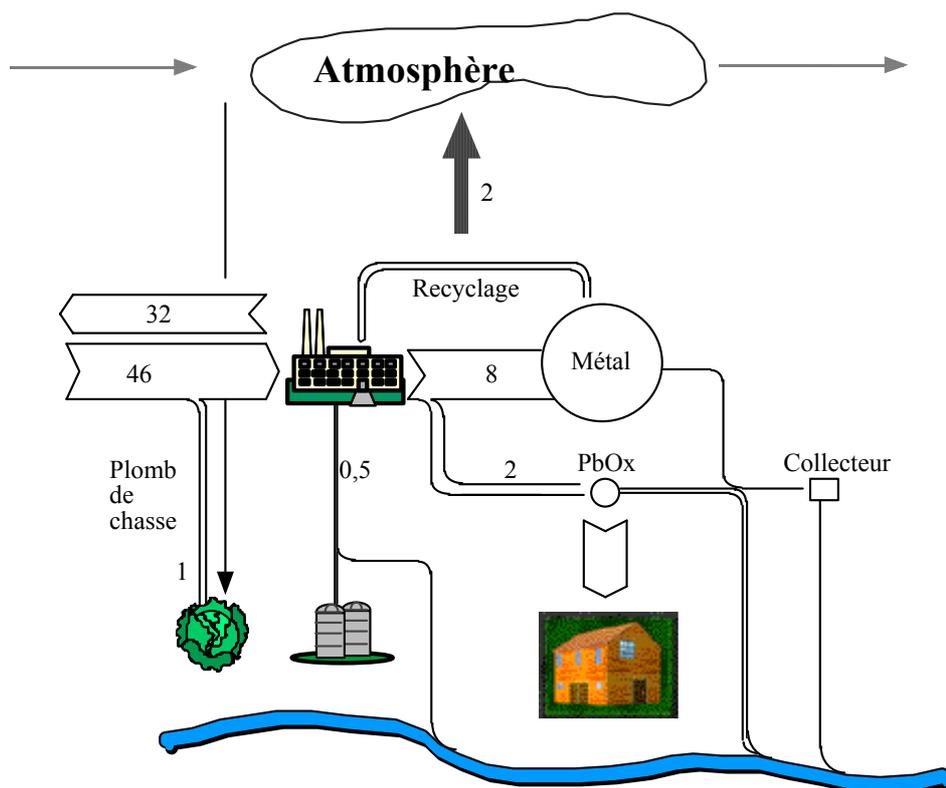


Figure 22 : Cycle du plomb, bassin de la Seine, 1885 (10³ t).

3. Agriculture et aménagement du paysage hydrographique

Du XIII^e au XVII^e siècle, la population du bassin de la Seine fluctue autour d'une densité de 50 habitants/km². Ce chiffre correspond à la densité de population soutenable des systèmes agraires issus de la première révolution agricole du Moyen Âge, basés sur l'association entre agriculture en assolement triennal et élevage à forte charge animale (voir encadré 2). Durant cette période d'apparente stabilité démographique, le poids de la population urbaine, et plus particulièrement de la population parisienne évolue énormément, de moins de 5 % au XIII^e siècle jusqu'à près de 20 % au XVIII^e siècle. À partir de ce moment, la croissance de la population du bassin de la Seine sera essentiellement celle de l'agglomération parisienne (Figure 1). Le propos est ici d'examiner comment (et où) sont produits dans le milieu rural les excédents alimentaires nécessaires pour répondre à la demande de la Ville, et comment la gestion du paysage contribue à rendre soutenable, du point de vue biogéochimique, l'exportation de ces excédents.

Encadré 2 : Les grandes lignes du développement des systèmes agraires en Europe occidentale

Après le Néolithique caractérisé par des systèmes de cultures sur abattis-brûlis forestier (dont certaines formes perdurent d'ailleurs très longtemps dans certaines régions), on peut distinguer en Europe occidentale, selon Mazoyer et Roudart (1999), quatre grands types de systèmes agraires successifs dont les caractéristiques et les performances sont résumées dans le Tableau 7. À l'exception des systèmes les plus récents, tous utilisent l'association étroite des cultures et de l'élevage comme moyen de restitution aux sols cultivés des éléments fertilisants exportés avec la récolte.

- Le système à jachère à faible charge animale domine dans l'Antiquité. Il est caractérisé par un pâturage très extensif avec un assez faible rendement de transferts des excréments animaux vers les terres arables, exploité selon un cycle de rotation biennal alternant jachère et culture céréalière.
- La première révolution agricole du Moyen Âge consiste dans une amélioration des techniques de gestion du fourrage rendant possible un accroissement de la charge animale et une meilleure fertilisation des terres arables désormais exploitées en assolement triennal avec alternance d'une jachère et de deux cultures céréalières.
- Le remplacement de la jachère par une culture fourragère fixatrice d'azote intervient dès l'époque moderne et se généralise au XIX^e siècle. Il permet un nouvel accroissement de la charge animale et des ressources d'éléments fertilisants des terres arables.
- La mise en œuvre des techniques de fertilisation minérale, rendue possible par le développement de la fixation industrielle de l'azote atmosphérique (procédé Haber-Bosch, 1914) se généralise à partir du milieu du XX^e siècle, supprimant progressivement la nécessité de l'association culture-élevage qui a représenté l'essence même de l'activité agricole d'Europe occidentale pendant deux millénaires, et conduisant à l'ouverture complète des cycles de matière dans le monde rural.

Tableau 7 : Performances moyennes des principaux types historiques de systèmes agraires d'Europe occidentale.

Système agricole	rdt céréalière q/ha	charge animale par ha pâturé UGB/ha	production par ha exploité q/ha	densité de population soutenable hab/km ²	surf cultivée par actif agricole ha/actif	habitants par actif agricole hab/actif
Chasse cueillette forestière	-	-	-	1-2	-	-
Culture sur abattis-brûlis	10	-	0,2	10	1	5
Cult./élevage à faible charge (assmt biennal)	3	0,125	0,33	16	6,5	5
Cult./élevage à forte charge (assmt triennal)	5	0,5	1,1	55	6	10
Culture/élevage sans jachère	10	1	3,3	166	6	30
Cult. mécanisée à fertilisation minérale	50-100	-	50-100	3 500	100	
Élevage laitier intensif	-	2	-	-	50	

3.1. Le système agraire des communes rurales médiévales

Le système agraire qui caractérise le monde rural médiéval de l'Europe occidentale, du XIIe au XVIIIe siècle, et qui en a largement modelé le paysage, est basé sur l'association de l'élevage et de la céréaliculture (Figure 23). Les céréales occupent les terres labourables exploitées en rotation triennale avec une période de jachère au cours de laquelle les terres sont fumées par les déjections des animaux qui y sont parqués et par le fumier récolté dans les étables. Pâturages semi-naturels et prés de fauche permettent de soutenir une charge animale de l'ordre de 1 UGB (Unité Gros Bétail) pour 2 ha, avec quatre à six mois de stabulation hivernale. 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 (un actif agricole et ses quatre aides familiaux), permettent de dégager un surplus exportable de l'ordre de 40 % de la production. Ce surplus, consommé dans la communauté rurale ou commercialisé en dehors d'elle, ne représente guère plus d'1 kgN/ha.an pour l'ensemble du paysage rural.

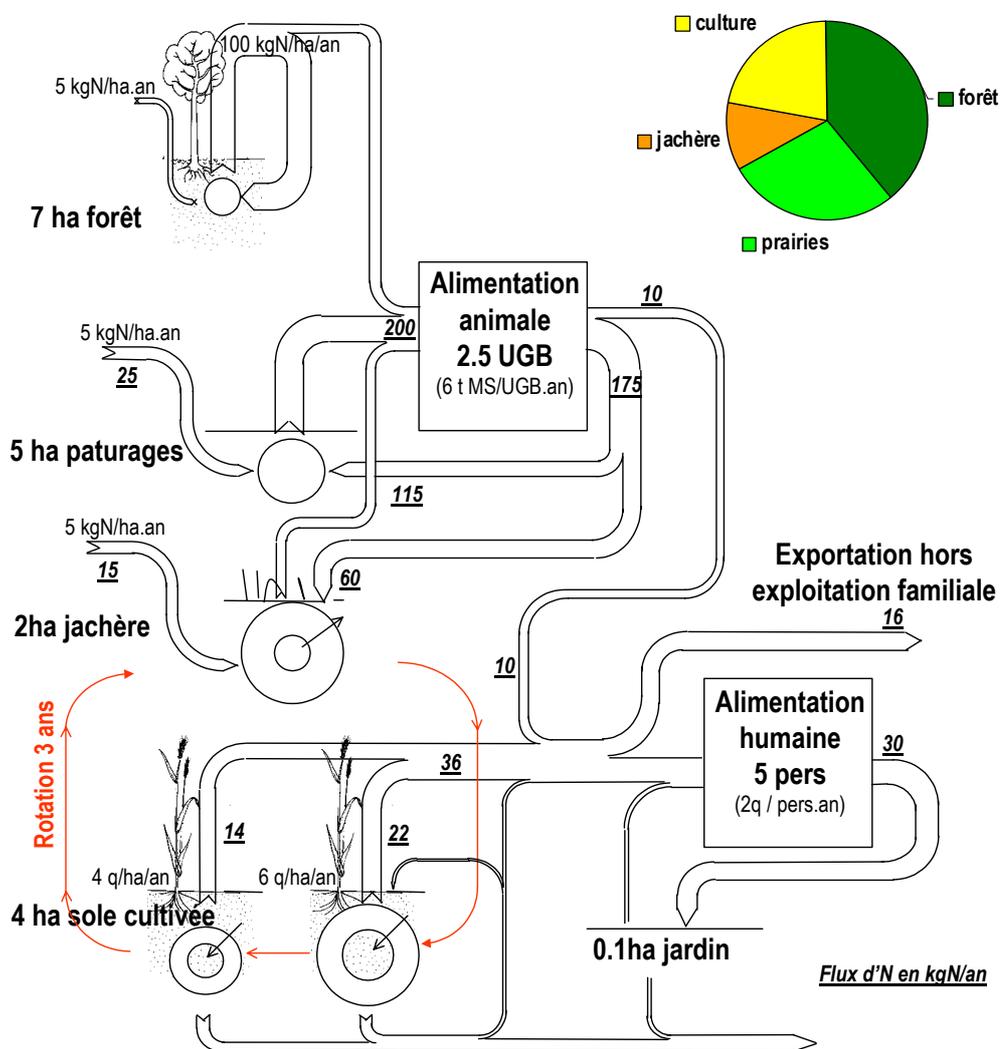


Figure 23 : Représentation schématique du fonctionnement du système agricole à assolement triennal des communautés rurales médiévales d'Europe occidentale, en termes de flux d'azote entre les différentes parties du paysage. Les grandeurs sont ramenées aux surfaces exploitables par une famille paysanne de cinq personnes.

3.2. L’approvisionnement alimentaire de Paris : un point de vue biogéochimique.

Le relevé des *marchandises et denrées de toute espèce qui se consomment annuellement à Paris*, établi par Lavoisier dans la seconde moitié du XVIII^e siècle, alors que la capitale comptait près de 600 000 habitants, a permis à R. Philippe (1961) de définir avec une certaine précision le régime alimentaire moyen du Parisien à cette époque : environ 2 000 Kcal/pers.jour, dont 57 % de produits céréaliers (l’équivalent de 2 qx/personne/an), 13 % de viande, 2 % de poisson, 8 % d’œufs, beurre et fromage. En étonnante concordance avec les chiffres actuels, le tout représente un contenu en azote de 14 gN/hab/jour (Tableau 8).

Tableau 8 : État des marchandises et denrées de toute espèce qui se consomment annuellement à Paris, inventaire établi par Lavoisier pour une année précédant la Révolution (Philippe, 1961).

Denrées	kg/an	% N	kgN/an	gN/hab/jour
Pain	100 940 000	1,8	1 816 920	8,3
Riz	1 715 000	1,8	30 870	0,1
Bœufs & vaches	13 994 720	3,4	475 820	2,2
Veaux	2 463 500	3,4	83 759	0,4
Moutons	3 993 890	3,4	135 792	0,6
Porcs	2 743 020	3,4	93 263	0,4
Poisson frais	1 200 000	3,4	40 800	0,2
Poisson salé	3 900 000	3,4	132 600	0,6
Carpes	1 600 000	3,4	54 400	0,2
Brochets & poissons d’eau douce	79 750	3,4	2 712	0,0
Œufs	4 290 000	2,1	90 090	0,4
Beurre	2 866 500	0,14	4 013	0,0
Fromage	1 380 125	3,7	51 065	0,2
Sucre	3 185 000	0	0	0,0
Huile	2 940 000	0	0	0,0
Café	1 225 000	0,17	2 083	0,0
Cacao	122 500	0,17	208	0,0
Pruneaux	233 240	0,17	397	0,0
Vin	67 267 000	0,034	22 871	0,1
Eau de vie	2 144 000	0	0	0,0
Cidre	538 000	0,05	269	0,0
Bière	5 380 000	0,05	2 690	0,0
Total			3 040 621	13,9

Paris, au XVIII^e siècle, importe donc annuellement plus de 3 000 tonnes d’azote sous forme de produits alimentaires essentiellement exportés des terres agricoles de son bassin versant. Dès le XIII^e siècle, ce prélèvement est déjà de 1 000 tonnes par an. Si l’on se souvient que le degré maximum d’ouverture des systèmes agricoles de l’époque, en l’absence de fertilisation minérale, est entièrement déterminé par la capacité naturelle de fixation d’azote des sols, et ne dépasse pas en bilan, dans le système rural traditionnel, 1 kgN/ha.an, on conçoit que la demande alimentaire de Paris draine les

possibilités de production agricole exportable d'une aire géographique considérable, et dépasse en fait très vite la capacité de production d'excédents alimentaires des petites communautés rurales.

3.3. Les grands domaines monastiques comme lieu de production d'excédents alimentaires commercialisables

C'est dans ce contexte qu'il est intéressant d'examiner le fonctionnement des grands domaines monastiques installés en grand nombre dès les XIIe-XIIIe siècles dans le bassin de la Seine (Figure 24).

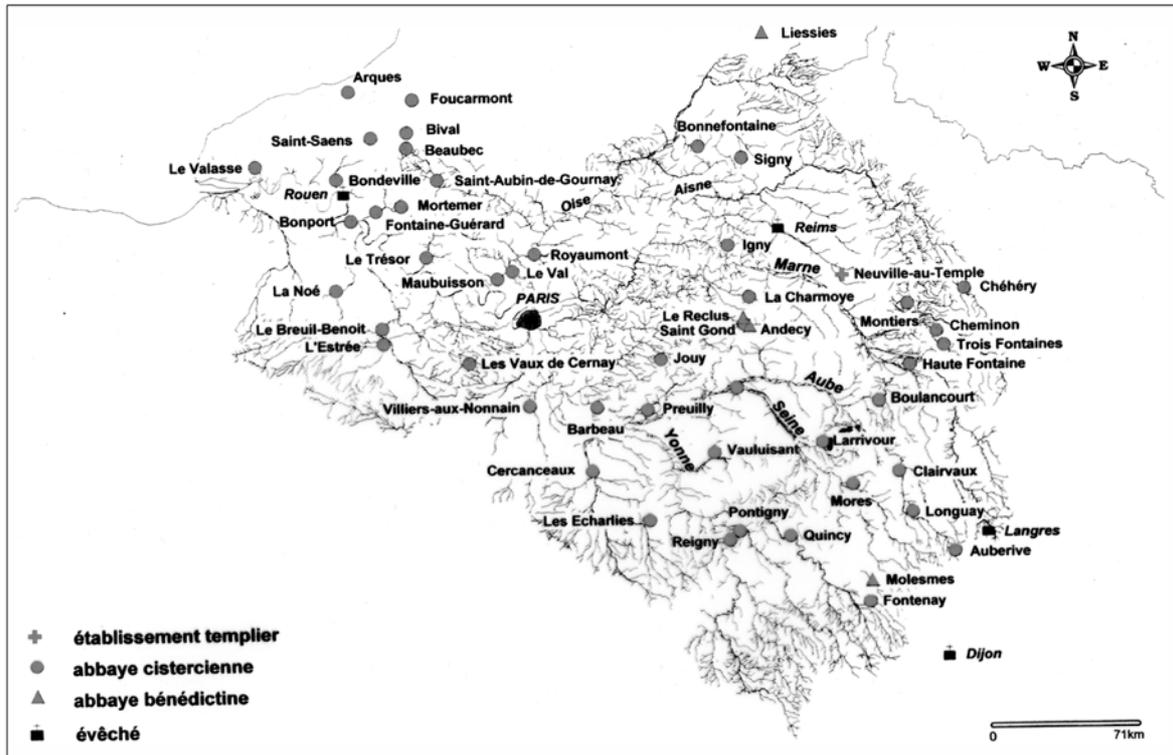


Figure 24 : Implantation des domaines monastiques dans le bassin de la Seine du XIIIe au XVIIIe siècle.

L'analyse des registres de comptes et des baux d'un certain nombre d'abbayes cisterciennes des XIIIe-XIVe siècles (Cîteaux, Bordesley...) a permis de reconstituer leur activité économique. La majeure partie des informations non publiées, dépouillées pour les besoins de la présente étude, provient du fonds de l'abbaye de Cîteaux (Côte-d'Or), monastère proche de ceux du bassin de la Seine par sa localisation et son type de fonctionnement. La mise en place de son économie, à travers son réseau de granges, a fait l'objet de plusieurs études, tout comme la construction et la gestion de son patrimoine hydraulique.

À partir de ces sources diverses, un modèle d'abbaye-type a été construit. Le territoire de cette communauté cistercienne type, comprend, outre l'abbaye elle-même (100 moines et convers), un réseau de 3 villages (300 habitants), de 5 granges (170 habitants), spécialisées dans des productions particulières, et de 10 moulins (30 habitants). Il se compose au total d'un domaine boisé de 4 000 hectares, de 650 ha de pâtures, de 2 700 ha de terres arables et de 200 ha d'étangs. La densité de population de ces domaines, établis le plus souvent dans les régions de tête de bassin, ne dépasse donc pas 8 habitants par km², soit une densité beaucoup plus faible que la moyenne des autres régions rurales du bassin.

Les livres de comptes permettent d'estimer approximativement les productions du domaine (céréales, fèves, viande, fromage, laine, poissons...), la part auto-consommée et la part commercialisée

(Tableau 10). Très clairement, l'économie de ces grands domaines est essentiellement tournée vers l'exportation commerciale de produits agricoles.

Tableau 9 : Superficie, population et cheptel d'un domaine cistercien type aux XIII-XIVe siècles.

	Abbaye	Granges (5)	Moulins	Villages (3)	Total	
Superficie (ha)						
Forêt	2500			1 500	4 000	53 %
Terres arables		1 150	50	1 500	2 700	36 %
Jardins et vignes	10		2	20	32	0,4 %
Prés		350		300	650	9 %
Étangs (10)	200				200	2 %
Total	2 710				7 582	76 km²
Population (hab)						
	100	170	30	300	600	8hab/km²
Cheptel animal (têtes)						
Chevaux (= 1UGB)	20	40	5	35	100	
Bovins (= 1UGB)		360	10	30	400	
Porcins (= 0,15 UGB)		300	10	60	370	
Ovins(= 0,15 UGB)		600			600	
Total (UGB)	20	535	16	74	645	

Tableau 10 : Production et exportation commerciale de produits agricoles par le domaine cistercien type aux XIII-XIVe siècles.

	Surface concernée	Production	Autoconsommation	Commercialisation
Productions agricoles				
Blé (q)	} 2 700 ha	5 000	1 500	3 500
Avoine (q)		2 800	1 000	1 800
Orge (q)		2 500	300	2 200
Fève et pois (q)		250	150	100
		4 q/ha/an		
Productions animales				
Viande (UGB sur pied)		60	10	50
Fromage (kg)		1 200	1 200	-
Laine (kg)		1 200	200	1 000
Cuir, peaux, parchemin		600	100	500
Carpes (nb)	200 ha étangs	25 000	6 000	19 000

Le fonctionnement du domaine type est schématisé, en termes de circulation d'azote, dans la Figure 25. Le système se distingue nettement du fonctionnement de la commune rurale (Figure 23) par sa plus forte charge animale, et sa plus faible densité de population humaine. Les rendements agricoles restent moyens malgré l'épandage d'une quantité plus importante de déjections animales, et le recours fréquent aux cultures de protéagineux comme le pois et la fève, qui préfigurent les rotations sans jachères de l'époque moderne. L'organisation du système agraire de ces grands domaines semble donc relativement extensive, tout en leur permettant une exportation commercialisable de produits agricoles atteignant 2 kgN/ha.an, soit plus du double des communautés rurales traditionnelles.

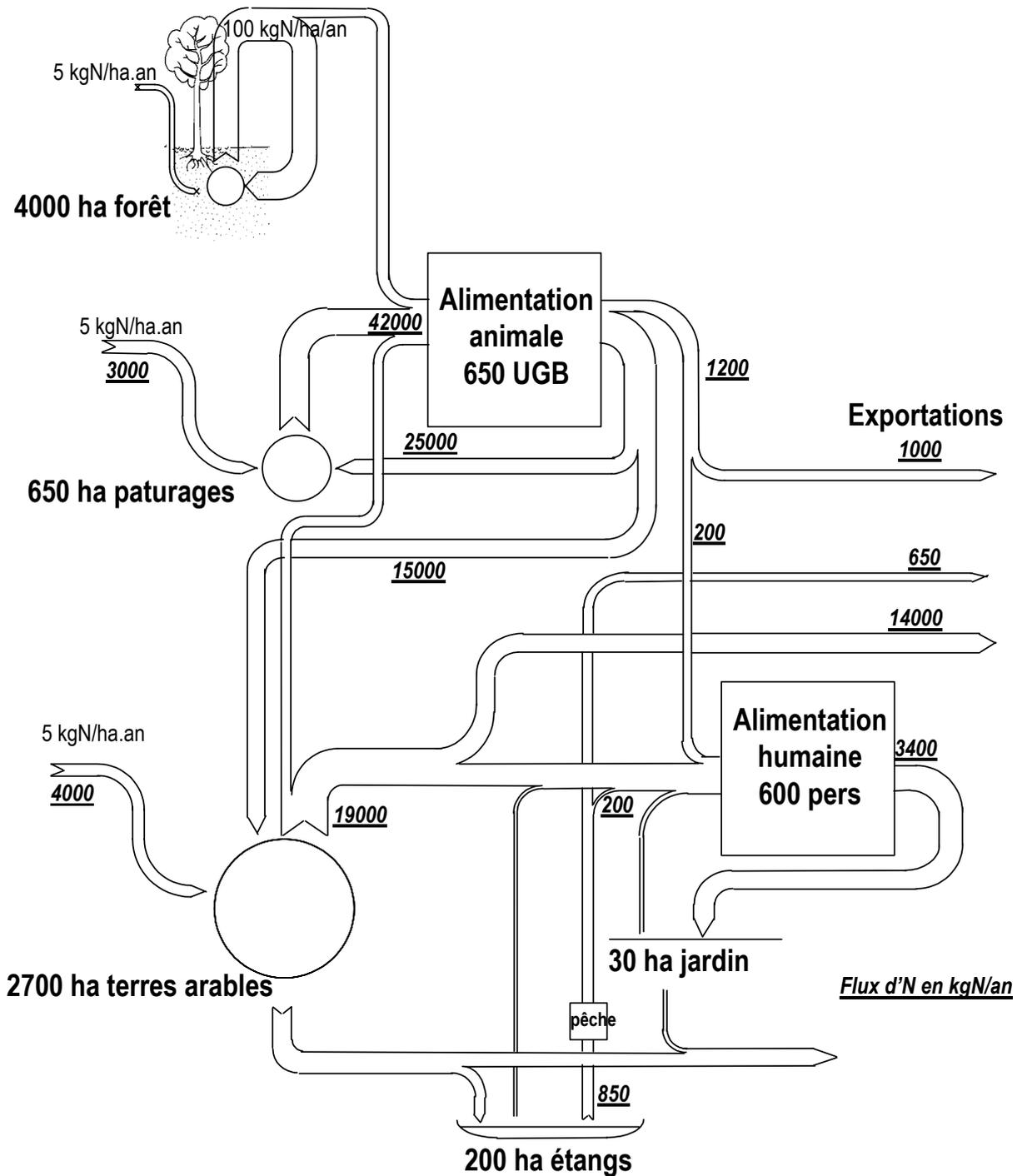


Figure 25 : Représentation schématique du fonctionnement du système agricole d'un domaine cistercien type aux XIII-XIVe siècles. La superficie totale du domaine est de 75 km².

3.4. L'aménagement du paysage hydrologique et son pouvoir de rétention

Les domaines cisterciens sont le plus souvent implantés dans les têtes de vallées des cours d'eau d'ordre 1 à 3 qui constituent le bassin de la Seine. Ainsi en est-il des abbayes de Fontenay (Côte-d'Or), de Trois-Fontaines (Marne), de Larrivour (Aube) pour ne citer que quelques exemples (Figure 26).

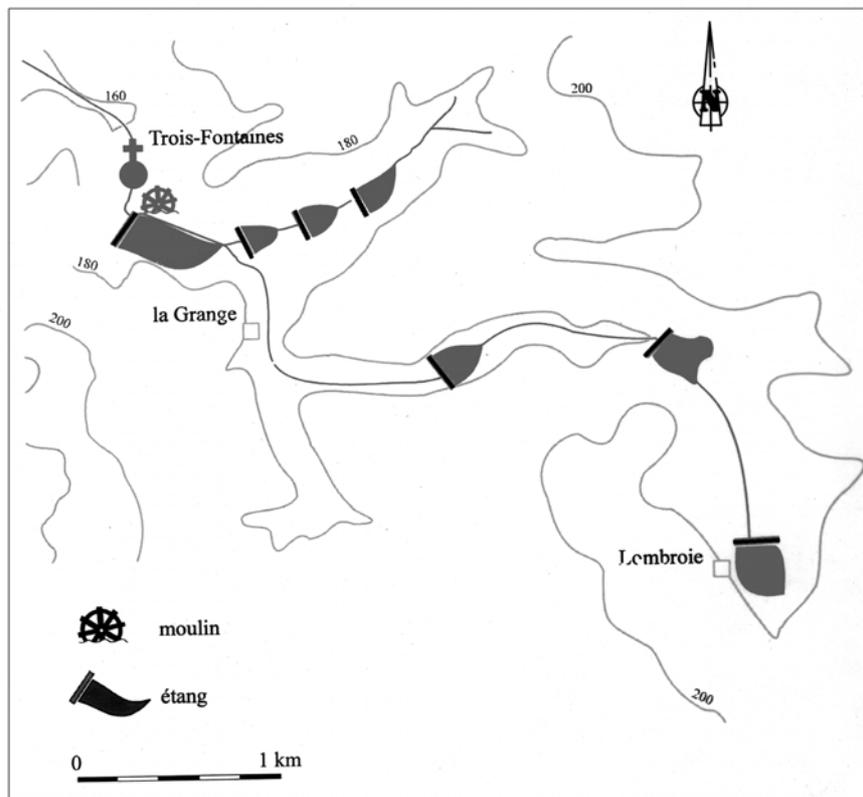


Figure 26 : Aménagement du site de l'abbaye de Trois-Fontaines.

Ces têtes de vallée se présentent le plus souvent dans des régions où alternent des couches calcaires perméables avec des couches de marnes et d'argiles imperméables, lieux d'émergence de sources, parfois très nombreuses comme à Fontenay, et de vallons marécageux. Lors de l'installation des monastères, il a fallu aménager ces fonds de vallée, protéger les sites en créant des digues formant ainsi des étangs. L'accumulation de l'eau dans ces réservoirs permettait d'alimenter le monastère en toute saison, et fournissait l'énergie hydraulique aux moulins. Aux marécages se substituaient des terres plus ou moins bien drainées et irrigables, et des étendues d'eau exploitables pour la pisciculture. On sait qu'au XIIe siècle, la carpe apparaît en Europe occidentale, d'abord comme poisson de pisciculture avant que des individus échappés des étangs commencent à peupler les rivières. Une végétation aquophile de saules, d'osiers et de joncs est entretenue aux bords des étangs, fournissant aux moines, comme aux villageois, les produits nécessaires à la vannerie et parfois à la couverture des habitations. La mise en valeur, et la modification, des milieux humides ne s'est pas limitée aux seuls sites des abbayes : les moines blancs ont implanté ailleurs bien des étangs. Il a pu s'agir d'implantations relativement modestes comme les viviers de l'abbaye de Signy (Ardennes), sites forestiers destinés semble-t-il à l'alevinage, créés dans une petite vallée marécageuse qui a été transformée en étangs. Ailleurs les aménagements ont pris une tout autre ampleur, ainsi dans les environs de Cîteaux (Côte-d'Or) ou près de Maizières (Saône-et-Loire) où le milieu a été entièrement modifié par l'implantation de retenues d'eau d'importance notable. Avant que les Dombes ou la Sologne ne se couvrent d'étangs, certaines régions, en amont du bassin de la Seine avaient connu l'installation de nombreuses retenues d'eau qui en avaient considérablement transformé l'environnement local. À la différence de ce qui s'est produit pour le défrichement des forêts, le

mouvement ne s'est pas arrêté au XIII^e siècle. Au cours des deux derniers siècles du Moyen Âge, de nouveaux étangs ont été créés pour subvenir à une demande accrue de poisson d'eau douce, demande qui est sans doute à mettre en rapport avec les difficultés d'approvisionnement en poisson de mer dues à l'insécurité, et à des modifications du régime alimentaire mieux connues pour ce qui touche à la viande de boucherie.

S'il apparaît donc que l'aménagement hydraulique du paysage joue un rôle important dans la production alimentaire et artisanale des domaines monastiques, les modifications apportées dans la morphologie des têtes de bassin sont aussi susceptibles d'affecter tout le fonctionnement biogéochimique du réseau hydrographique.

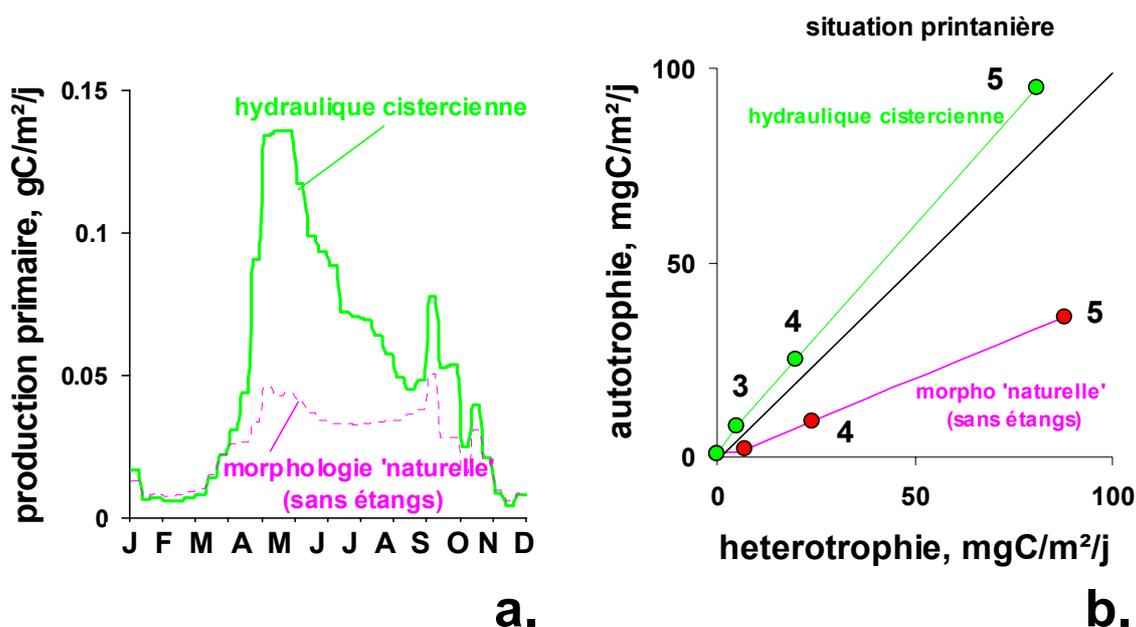


Figure 27 : Simulation par le modèle SENEQUE de l'effet des aménagements hydrauliques cisterciens sur le fonctionnement biogéochimique des têtes de bassin. **a.** Production primaire à l'ordre 5 avec et sans étangs. **b.** Autotrophie/hétérotrophie des cours d'eau d'ordre 3 à 5 en situation printanière, avec et sans étangs.

Pour s'en convaincre, une simulation du fonctionnement biogéochimique d'un cours d'eau d'ordre 5 typique du bassin de la Seine a été effectuée à l'aide du modèle SENEQUE, en comparant la morphologie "naturelle", sans étangs en tête de bassin, avec celle qui résulte des aménagements hydrauliques typiques des domaines cisterciens (Figure 27). La production primaire phytoplanctonique est largement stimulée par la présence d'étangs, rendant le milieu autotrophe dès le printemps, et réduisant de 10 % les exportations d'éléments nutritifs. Du point de vue du transfert vers l'aval des éléments fertilisants, les moines, grands bâtisseurs de digues, jouaient au Moyen Âge le même rôle biogéochimique que les castors dans les écosystèmes forestiers d'Amérique du Nord ! Un travail récent a montré en effet que les étangs établis par les castors sur les rivières d'ordre 2 conduisent à une rétention de 18 % de l'azote, 21 % du phosphore et 32 % de la silice normalement exportée par ces cours d'eau (Correll et al., 2000).

L'entretien des étangs, indispensable pour éviter leur atterrissement progressif, consiste en leur mise à sec pour une saison, au cours de laquelle la terre est louée (amodiation) contre une redevance en céréales à prélever sur la récolte, particulièrement abondante sur ce type de terrain. Cette pratique concourt à remettre dans le circuit de production les éléments nutritifs (N, P) retenus par les étangs. Les pratiques agricoles médiévales, et surtout l'aménagement hydraulique du réseau hydrographique qui les accompagnent, permettent ainsi de réduire les pertes d'azote par lessivage à quelque 1-2 kgN/ha/an.

3.5. L'ouverture du système agricole moderne et la perte de son pouvoir de rétention

L'image qu'on peut retenir du système agricole du bassin de la Seine sous l'Ancien Régime est donc celle d'une demande alimentaire très pressante de l'agglomération parisienne, assurée pour une large part par de grandes exploitations tournées vers la commercialisation de leur production, tandis que de petites communautés rurales fonctionnent sur un mode plus autarcique. L'ouverture commerciale des grandes exploitations est compensée par un aménagement du paysage hydrologique qui lui confère une forte rétention vis-à-vis des pertes de nutriments par lessivage.

Sans pouvoir examiner ici la chronologie des transformations du système agricole, il nous semble intéressant de confronter cette image à celle de l'agriculture actuelle dans le bassin de la Seine.

Le facteur principal de la transformation récente du fonctionnement de l'agriculture réside dans la généralisation du recours aux engrais minéraux, qui a affranchi totalement l'agriculteur de sa dépendance vis-à-vis des mécanismes naturels de restitution au sol des éléments exportés par la récolte, et a permis par là même un accroissement sans précédent des rendements, et une rupture radicale de la complémentarité agriculture-élevage.

Les besoins alimentaires directs de l'agglomération parisienne et des autres grandes villes du bassin qui ont plus que décuplé par rapport au XVIII^e siècle ne représentent pourtant plus qu'un débouché marginal pour la production agricole des grandes zones céréalières du bassin, qui exportent à l'étranger ou vers d'autres régions françaises (notamment les régions d'élevage) la plus grande partie de leur production. À l'échelle du bassin, la demande urbaine a donc cessé d'être un élément structurant pour le monde agricole qui obéit aujourd'hui à la logique des marchés internationaux.

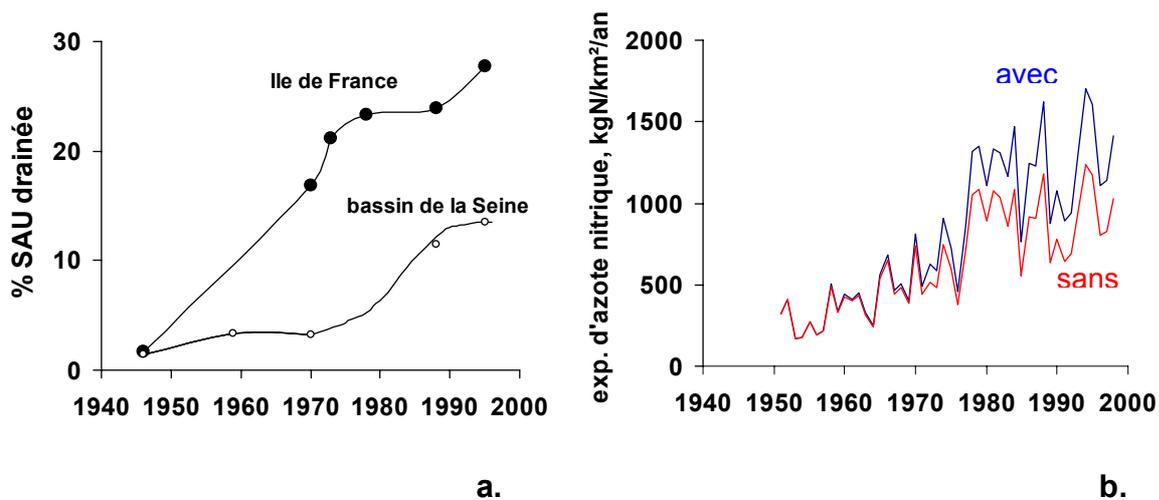
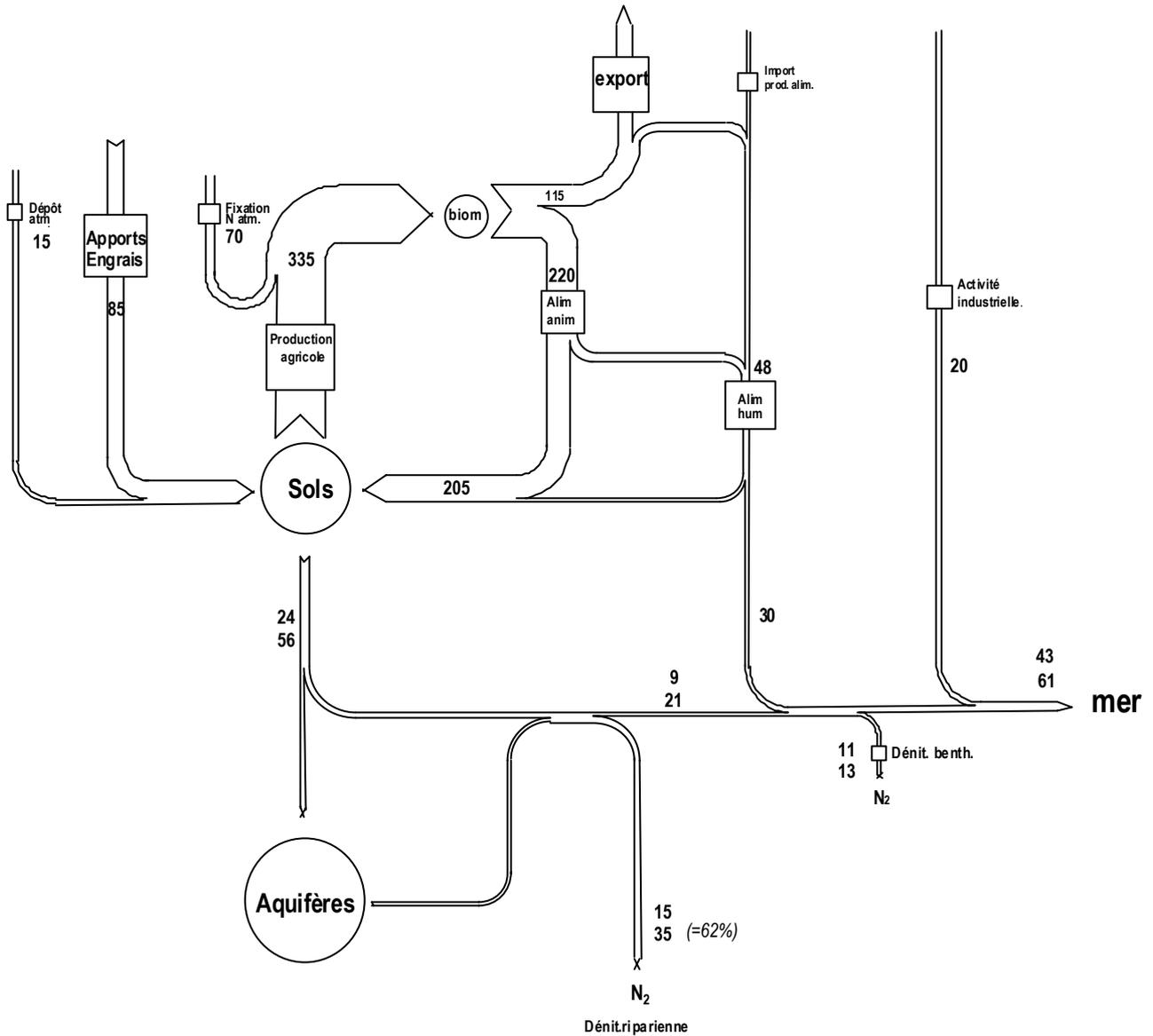


Figure 28 : **a.** Extension du drainage agricole (en % de la surface agricole utile) dans le bassin de la Seine et l'Île-de-France. **b.** Exportations diffuses de nitrates au cours des 50 dernières années, calculées d'une part en tenant compte de l'évolution des zones humides riveraines (avec drainage), et d'autre part en maintenant constant leur pouvoir de rétention (sans drainage).

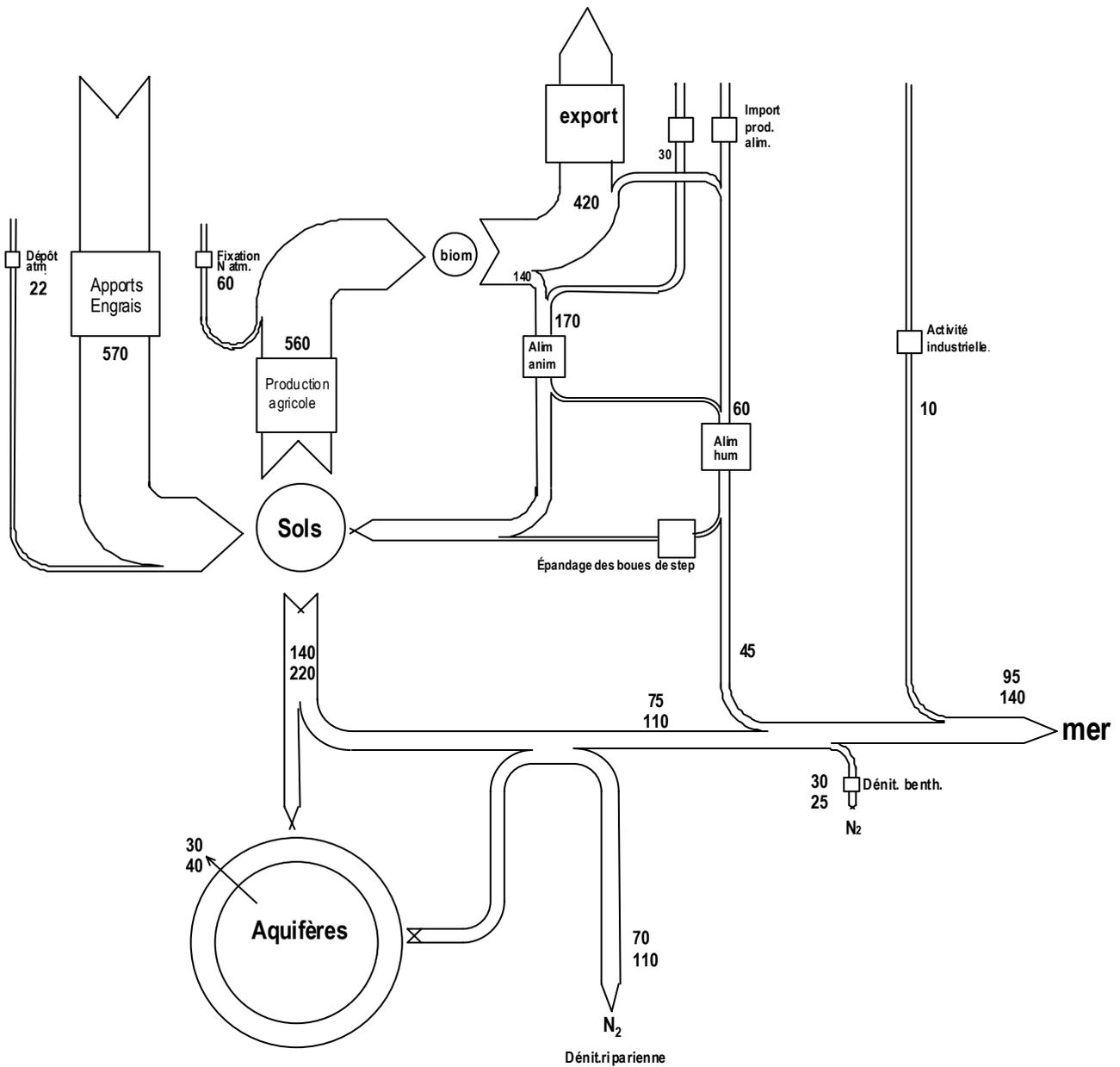
Parallèlement à cette ouverture des débouchés de l'agriculture, le paysage hydrologique s'est profondément modifié, perdant progressivement une partie des caractéristiques acquises durant le Moyen Âge qui lui avait conféré un important pouvoir de rétention vis-à-vis des pertes par lessivage des éléments nutritifs. Si la plupart des étangs ont disparu dès le remplacement des moulins hydrauliques par la machine à vapeur, c'est au cours des trente dernières années que le drainage des zones humides riveraines a conduit à une réduction sensible du pouvoir de rétention du réseau hydrographique (Figure 28). L'exportation diffuse d'azote est ainsi passée de 1-2 kgN/ha/an à 10-15 kgN/ha/an.

Les Figure 29 et Figure 30, schématisant le cycle de l'azote à l'échelle du bassin de la Seine dans les années 1950 et 1990, illustrent l'ouverture progressive des cycles de matière qui a accompagné le développement de l'agriculture moderne.



Bilan d'azote du bassin de la Seine (1953-1955) 1000 tonnes N / an

Figure 29 : Représentation schématique des transferts d'azote dans le bassin de la Seine en 1953-1955.



Bilan d'azote du bassin de la Seine (1988-1994) 1000 tonnes N / an

Figure 30 : Représentation schématique des transferts d'azote dans le bassin de la Seine en 1988-1994.

4. Le transport et l'aménagement fluvial

D'abord limité pendant la préhistoire, l'impact des hommes s'est progressivement accentué, tandis qu'augmentaient leurs capacités d'intervention sur le milieu naturel. En particulier, les aménagements croissants pour les besoins de la navigation, corollaires au développement du transport par la voie d'eau, sont progressivement devenus l'un des éléments majeurs structurant l'écosystème fluvial.

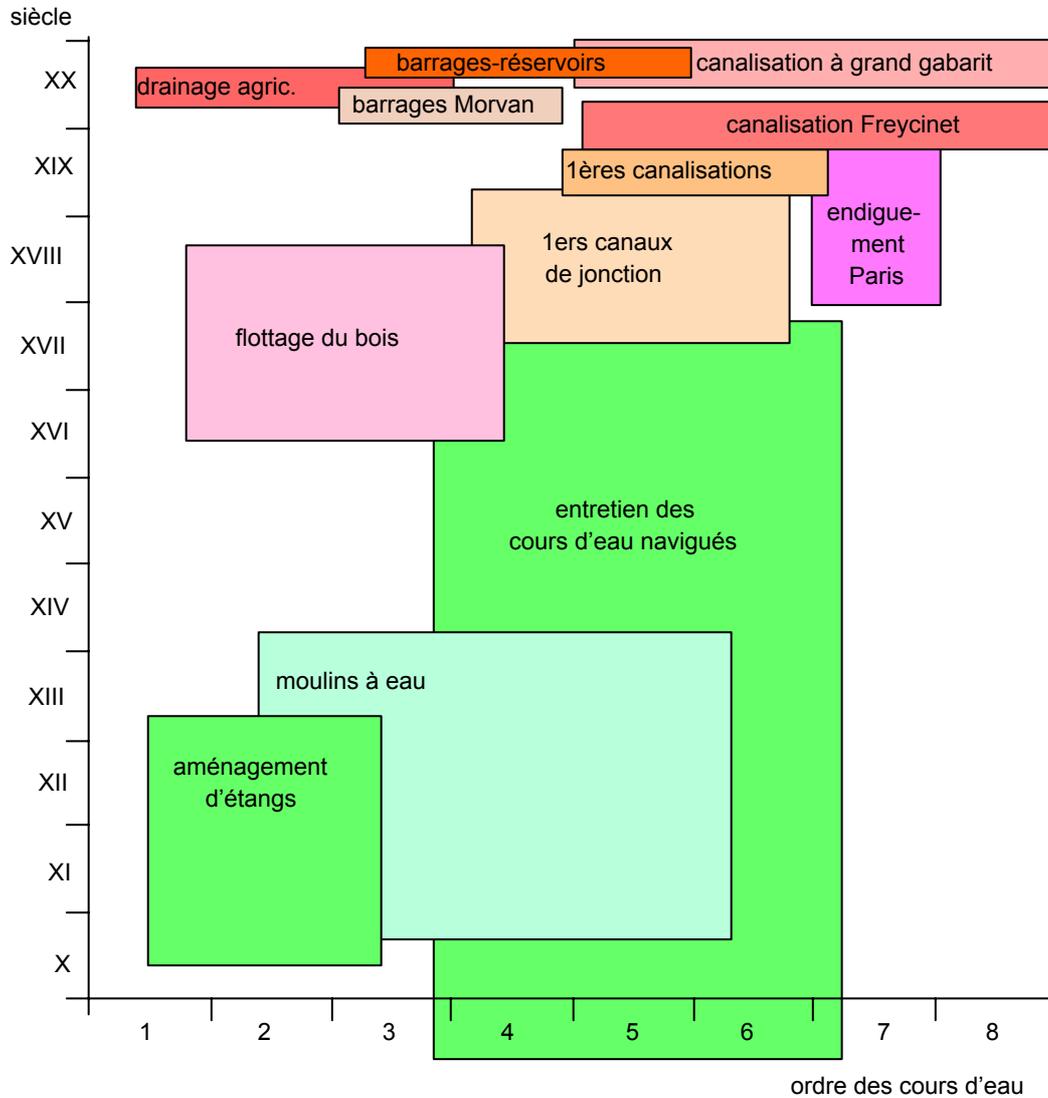


Figure 31 : Évolution des aménagements en fonction de l'ordre des cours d'eau.

4.1. Les prémices

Très tôt, l'homme eut en effet l'idée et le désir de se laisser porter et transporter par les eaux, comme les bois qu'il voyait flotter au fil du courant. Le tronc d'arbre fut ainsi vraisemblablement le premier véhicule nautique, tandis que l'outre gonflée, utilisée comme flotteur, constitue certainement le plus rudimentaire des moyens de navigation. Puis, le radeau, assemblage d'éléments flottants eux-mêmes, figure parmi les embarcations les plus primitives, avec le bateau de peau cousue et la pirogue monoxyle – creusée dans une seule pièce de bois –, d'abord évidée par brûlage et plus tard par les outils de pierre ou de métal.

On construisit ensuite des embarcations faites de plusieurs pièces de bois rapprochées, le colmatage étant opéré avec des éléments naturels comme la mousse. Cette nouvelle technique permettait surtout d'obtenir un tonnage plus conséquent. Il s'agit là d'un des traits permanent de ce

processus de domestication des eaux par l'homme : la conquête d'un tonnage toujours plus important, ambition qu'il fallut d'abord accommoder aux dimensions et aux propriétés des cours d'eau empruntés – avant d'en venir à les modifier eux-mêmes (Barrier 1989).

Cette capacité des hommes à construire des bateaux depuis une époque très reculée apparaît aujourd'hui comme un fait d'une grande portée historique. La sédentarisation et le développement des cités rassemblant les hommes en nombre important supposent en effet le transport de grandes quantités de produits qui ne sont réalisables qu'à l'aide du bateau, jusqu'à l'avènement des moyens modernes de transports terrestres (Beaudouin 1987).

Dès la fin du II^e siècle av. J.-C., les *Parisi*, tribu gauloise de Celtes pêcheurs-mariniers témoignent d'une remarquable prospérité économique, liée étroitement au commerce fluvial et au diverses activités des bateliers de la Seine (Velay 1992). La Seine, lien nécessaire entre les régions de l'est du pays et le littoral de la Manche, a en effet favorisé très tôt, depuis sans doute plus d'un demi-millénaire avant J.-C., un important courant d'échanges commerciaux entre le sud de la Gaule et l'Outre-Manche. Un certain nombre de denrées dont le commerce était alors très important comme le sel, les tissus de lin et de laine, ainsi que des armes, des bijoux et du vin d'Italie, remontaient le Rhône et la Saône avant d'être portés par charrois de Chalon à la Seine. Ils descendaient ensuite le fleuve jusqu'à l'estuaire avant de traverser la Manche. À cette époque, Strabon parle de Rouen comme d'un grand centre de relations commerciales avec les îles Britanniques, tandis que Lutèce, à l'emplacement d'un gué, est le point de passage des cavaliers, piétons et colporteurs, ou des rares chariots, ainsi que surtout dépôt de marchandises fluviales (Velay 1992).

Sous la domination romaine, la prééminence de la voie d'eau sur la voie de terre, malaisée et incertaine, s'affirme encore. C'est ainsi que les "marchands d'eau" négociant blé, vin et bois développent leur puissance. Sous le règne de l'empereur Tibère, les Nautes parisiens constituent une communauté très active jouissant d'un statut privilégié. Au cours des I^{er} et II^e siècles après J.-C., la ville se construisant progressivement, les activités économiques et commerciales se développent. Le rôle de la Seine s'accroît avec le va-et-vient quotidien des bateaux remplis de biens de consommation, de produits manufacturés et de matériaux de construction. La prépondérance de la corporation des nautes devient incontestable et leur puissance économique s'affirme jusqu'au Haut Moyen-Âge. La corporation a la mainmise sur les activités liées au trafic fluvial à Lutèce et dans toute sa région.

4.2. Les premières modifications physiques

La corporation des Nautes assure l'entretien permanent de la rivière et des ports. La Seine n'est en effet idéale que six mois par an. Par beau temps, à la descente, les bateaux peuvent se laisser porter, les mariniers se contentant de maintenir l'embarcation dans le courant au moyen de gaffes et de gouvernail. À la montée, le halage est la règle et il faut pour cela que le chemin de berge soit maintenu en bon état, sans éboulement ni obstacles. Ainsi, au cours du temps, les ports et les berges sont aménagés, confortés, murillés, et le cours du fleuve désencombré, dragué et dessiné de telle sorte qu'il reste navigable le plus longtemps possible (Manéglier 1992).

À partir du Bas Moyen-Âge, principalement sous l'impulsion des communautés religieuses et des seigneurs, les travaux hydrauliques s'intensifient. Dès le Xe siècle, les zones humides sont drainées et de nombreux étangs créés, pour y développer des piscicultures extensives. Ceci modifie le fonctionnement hydrologique et écologique des cours d'eau et entraîne des changements de structure de la flore et de la faune.

Parallèlement et jusqu'au XIII^e siècle, l'utilisation de la force hydraulique des cours d'eau se développe et de nombreux moulins sont implantés, équipés de barrages à pertuis destinés à réguler les apports d'eau. Les rivières sont ainsi transformées en une succession de biefs qui perturbent les déplacements devenus alors difficiles des espèces migratrices. Puis, à partir du XIII^e, la mise en place d'épis de bordage, la plantation d'arbres et l'ancrage en rive d'îles flottantes destinées à accélérer le courant d'étiage ou à chasser les alluvions, donne lieu à une véritable "architecture hydraulique" (Guillaume 1990).

4.3. Flottage du bois

Un point majeur dans l'aménagement du fleuve et de toutes les petites rivières du haut bassin est lié au transport du bois (Manéglier 1992). Développé sous la Renaissance, le chauffage domestique entraîna une consommation de bois qui ravagea rapidement les forêts proches de la capitale. Face à la pénurie, il fallut reculer l'aire d'approvisionnement jusqu'au massif du Morvan.

La technique du flottage du bois (imaginée en 1545 par Gilles Desfroissiz) rendit nécessaires de nombreux aménagements hydrauliques qui contribuèrent à modifier le cours des écoulements (Manéglier 1992). Des étangs-réservoirs furent creusés à l'amont des petits ruisseaux pour créer des effets de chasse importants — le "petit flot" — et accentuer l'entraînement d'un courant ordinairement modeste. De très nombreuses retenues furent ainsi créées dans tout le Morvan. Quant aux ruisseaux, on s'efforça d'en supprimer les cascades et d'en rescinder les courbes pour éviter les atterrissements, les rives furent aménagées pour que l'accès soit aisé et qu'aucune végétation arbustive ne fasse obstacle à la descente des bûches perdues jusqu'au confluent de la rivière principale. Le "grand flot" se déroulait une fois l'an et seul le courant de la rivière était utilisé qu'il fallait choisir avec beaucoup de discernement afin de jouir d'une hydraulicité convenable. Une fois rendues au port amont, les bûches étaient rassemblées en "train de bois", grands radeaux de 75 mètres de long pour 5 de large, qui descendaient jusqu'à Paris menés par deux hommes seulement (Manéglier 1992).

Au rythme de l'urbanisation, la consommation de bois augmentait toujours et au XVIII^e siècle on commença à s'inquiéter de régulariser son acheminement. C'est ainsi que furent établis toute une série de pertuis à l'amont de la capitale, simples barrages à portes, provoquant une petite retenue derrière laquelle se rassemblaient les bateaux qui profitaient ensuite du courant créé par son ouverture pour descendre jusqu'au pertuis suivant. Ce système avait toutefois l'inconvénient majeur de rendre la navigation de remontée très difficile (Manéglier 1992).

Si la technique du flottage du bois est un fait relativement récent et de courte durée si on se place dans l'optique d'une histoire générale de Paris — il a fallu attendre la fin du premier tiers du XVI^e siècle pour que le premier train de bois atteigne la capitale alors que le dernier est arrivé, il y a moins de 80 ans, en 1923 —, il n'en demeure pas moins que pendant un peu plus de deux siècles, le courant de la Seine et de ses affluents a été le principal fournisseur en combustible de la ville. Les transformations apportées au milieu fluvial ont été très importantes aussi bien dans le domaine économique et social que dans celui de l'hydraulique.

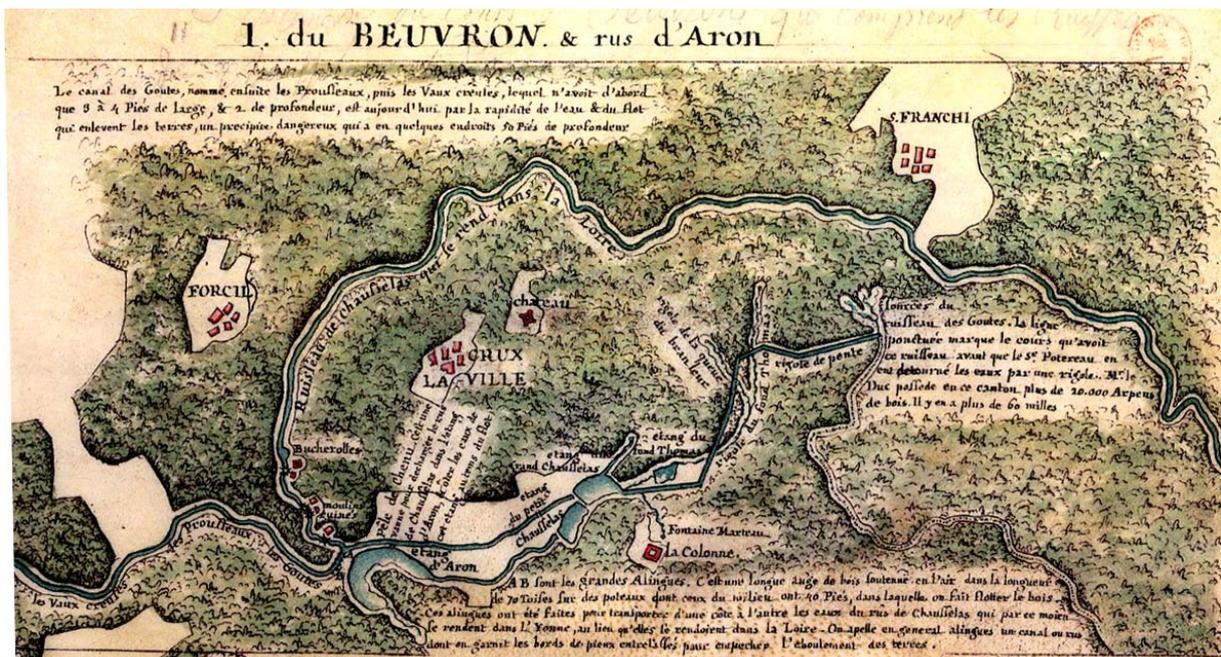


Figure 32 : Les aménagements hydrauliques du flottage du bois aux étangs d'Aron, Nièvre (d'après les plans de l'abbé Delagrive, 1738).

Dès le XVI^e siècle, des étangs sont créés en tête de bassin en Haute vallée de l'Yonne afin de stocker l'eau. Au cours du XVII^e siècle, la Haute vallée de l'Yonne fait l'objet de nombreux réaménagements : des retenues d'eau sont agrandies et l'eau de ruisseaux appartenant au bassin de la Loire est captée vers les affluents de l'Yonne au prix de gros travaux. En 1628, François Damas de Crux a l'idée d'utiliser l'eau des étangs de Chausselage et d'Aron, situés à la tête de l'Aron, affluent de la Loire, pour conduire vers le Beuvron, affluent de l'Yonne, les bois de ses forêts. Il fit donc construire un grand aqueduc en bois d'une longueur d'environ 136 mètres permettant le franchissement de la vallée de la Vaucreuse. L'approvisionnement en bois de Paris nécessite de constants aménagements. Dans la seconde moitié du XVIII^e siècle, la réalisation du canal du Touron a nécessité le déplacement de plus de 70 mille tonnes de terre.

Le flottage du bois causa de nombreuses transformations du milieu naturel. L'établissement d'étangs, la rectification des cours d'eau, la destruction de la végétation riparienne entraîna une diminution de la faune piscicole tant en ce qui concerne le nombre des espèces que la quantité de poissons.

La création du canal du Nivernais puis le développement des houillères et du chemin de fer ont conduit à la disparition du flottage, mais aussi bien le paysage que le circuit hydraulique sont encore fortement marqués par cette histoire.

L'étude, en cours, du flottage du bois et des aménagements hydrauliques qu'il implique met en évidence le poids que faisait déjà peser la ville de Paris sur son bassin. Les rectifications des cours d'eau, la création d'étangs, ont en effet touché jusqu'aux petites rivières de rang 1, transformant ainsi les cours, modifiant les conditions d'érosion et de dépôt, détruisant la flore ripicole et par là même la faune aquatique, remplaçant le régime par une alternance de stockage et de lâcher d'eau, sans compter tout ce que l'abattage des arbres dans des régions jusque-là peu exploitées a pu modifier en termes d'érosion des versants.

4.4. Premiers canaux

C'est aussi pour permettre l'arrivée régulière à Paris des céréales de la Brie et des bois de chauffage ou de construction de la forêt de Retz, qu'entre 1526 et 1636 la rivière de l'Ourq est transformée en canal depuis Silly-la-Poterie jusqu'à sa confluence avec la Marne.

L'aménagement de voies navigables ne commence cependant réellement qu'au XVII^e siècle avec le canal de Briare, achevé en 1642, joignant la Loire et la Seine, toujours afin de permettre un meilleur ravitaillement de Paris pendant les périodes de disette. La réalisation de ce canal implique la mise en communication des deux bassins versants de la Seine et de la Loire. Techniquement, les problèmes sont de franchir des pentes plus fortes que celles de thalweg de rivières et d'alimenter en eau le seuil de partage. Le premier est résolu par la construction de véritables échelles d'écluses et le second par l'établissement de retenues d'eau ou le captage de rivières.

De la fin du XVII^e siècle à la première moitié du XVIII^e, les voies navigables occupent une position privilégiée dans le système de réseaux de circulation. La navigation fluviale est aussi en première place des préoccupations de l'administration. Elle permet de pallier l'insuffisance des routes, elle a une grande influence sur l'économie urbaine et la concentration de villes, des bourgs et des villages autour et le long des rivières navigables, ainsi que sur le commerce. Les fleuves sont d'importants axes de pénétration, ils ont une fonction commerciale et de communication. La construction de réseaux de canaux est ainsi conçue pour permettre la communication entre des bassins différents et dépasser les frontières naturelles que représentent les limites des bassins versants.

Les canaux de Briare, d'Orléans et du Loing représentent ainsi un ensemble de mesures adoptées non seulement pour faciliter la circulation des denrées, mais aussi pour mettre en contact les mers et les océans, tel que le canal du Midi reliant la Méditerranée et l'Atlantique, ouvert à la navigation en 1681.

4.5. Les rivières canalisées

Avec l'État napoléonien, les rivières sont fonctionnalisées (Guillaume 1990). En raison des difficultés croissantes de circulation sur la Seine et du manque d'eau potable dans Paris, la construction de trois canaux est décidée. Le canal de l'Ourq (1802-1839) amène les eaux de plusieurs rivières affluentes à la Marne, tirées à une trentaine de kilomètres au nord-est jusqu'au port artificiel de La Villette. Là, le cours d'eau est divisé en deux : une énorme conduite dirigée vers Chaillot et un canal pour suppléer l'étiage des bassins de l'Arsenal.

En 1821, le canal Saint-Denis relie le fleuve à la ville abbatiale par un cours rectiligne de 7 km pour éviter la boucle entre Asnières et Issy, puis en 1825, le canal Saint-Martin évite la traversée très dangereuse des îles Saint-Louis et de la Cité. On projette de connecter la ville avec les riches régions minières du Nord et de l'Est par la Sambre, l'Aisne, la Marne, l'Oise.

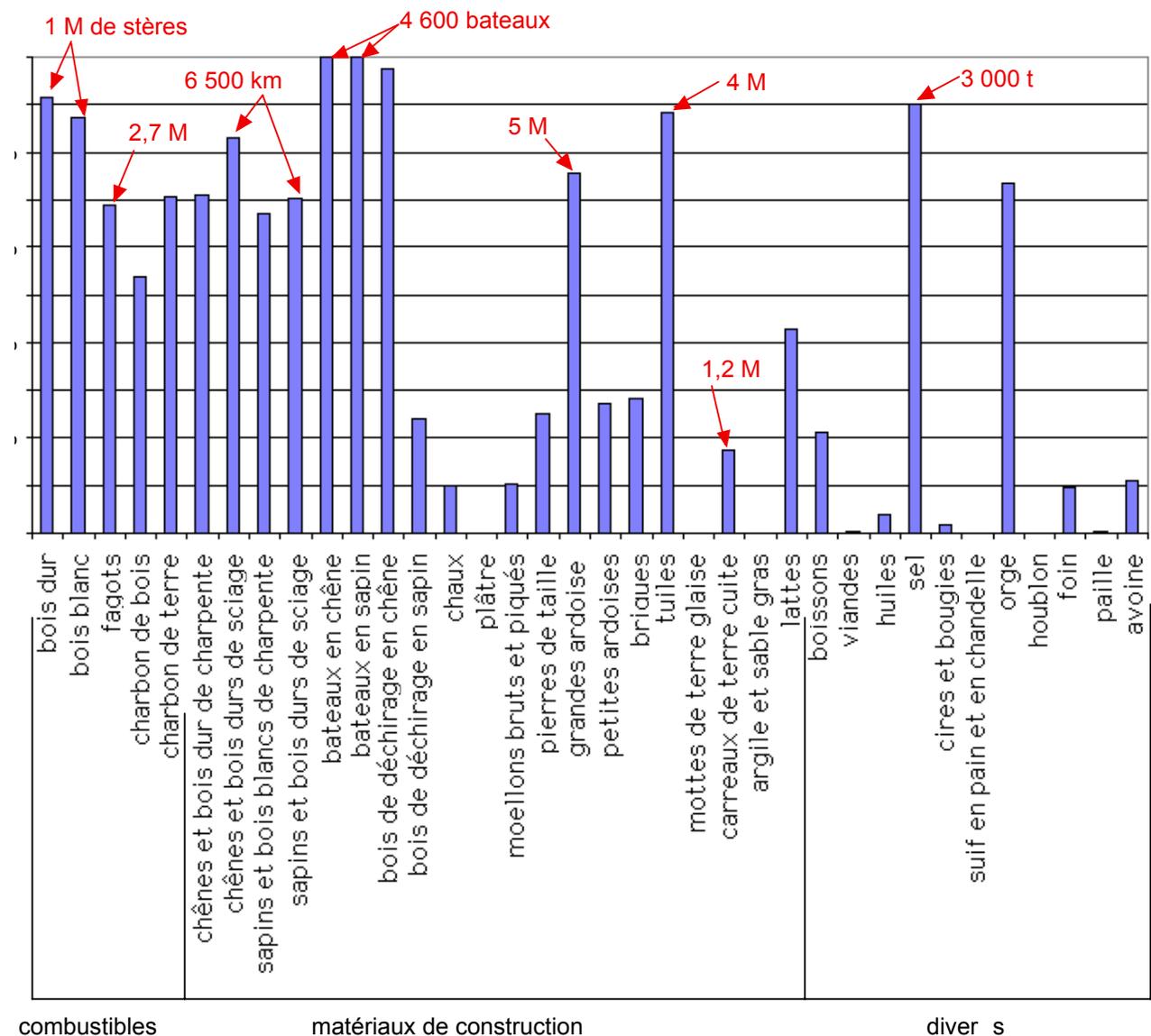


Figure 33 : Part des produits soumis à l'octroi arrivant par voie d'eau, Paris, 1826 (M : millions d'unités).

De 1821 à 1830, le Service extraordinaire des Ponts et Chaussées se charge de rendre navigables les rivières domaniales. 800 km de canaux sont exécutés, 1 000 commencés et 10 000 programmés lorsqu'éclate la révolution de 1830 (Guillaume 1990).

Jusqu'au début du XIXe siècle, les aménagements liés à la navigation ne concernent pas directement les cours d'eau. La navigation est délicate à cause des caractéristiques naturelles du fleuve. Il faut en permanence lutter contre les phénomènes naturels de transformation du cours d'eau, éviter la formation d'îlots dans le lit de navigation en orientant la force du courant, protéger les berges et y aménager des chemins de halage. Pendant longtemps la navigation s'est adaptée aux contraintes imposées par le fleuve ; puis c'est le fleuve que l'on a ensuite progressivement adapté aux besoins de la navigation.

Au cours du XIXe siècle, on commence en effet à canaliser les fleuves eux-mêmes qui apparaissent comme des goulets d'étranglement du trafic, la navigation y étant parfois difficile en période d'étiage. Débute alors la phase de modernisation des voies navigables, c'est-à-dire d'interventions directes sur les grands axes fluviaux, telles la canalisation et la construction de grands barrages-écluses, dans le but de permettre la régularité de la navigation quelle que soit la saison sur l'ensemble des réseaux. À partir des années 1830, les barrages à pertuis sont ainsi remplacés par des systèmes de barrages mobiles éclusés, à la suite de l'invention par Poiré de barrages à fermettes mobiles et à aiguilles dont l'application permet d'assurer sur la rivière un mouillage (profondeur) constant de 1,60 m (Beaudouin 1979, de Guibert 1997).

La première canalisation de la Seine aval remonte à 1840 ; cinq biefs sont construits : Bezon-Bouguival (1840), Andrésy-Denouval (1846), Les Mureaux (1853), Notre-Dame de la Garenne (1847) et Poses (1850). Ces premiers travaux à peine terminés, le mouillage est très vite porté à 2 mètres par l'exhaussement des barrages existants et la création de trois nouveaux, Martot, Villez et Suresnes (1859 et 1866). Tous sont du type à fermettes et comportent une écluse accolée longue de 113 m, large de 12 m (de Guibert 1997). Au cours de cette période, de nombreux travaux sont aussi conduits dans le bassin, comme le canal de la Marne au Rhin en 1855, le canal de l'Aisne à la Marne en 1866, soit 600 km de travaux neufs exécutés entre 1850 et 1870.

Puis en 1879, le "programme Freycinet", du nom du ministre des travaux publics, est adopté. Il consiste à créer de nouvelles voies navigables et à mettre au gabarit moderne des canaux anciens, le gabarit "Freycinet" ; les écluses sont adaptées aux péniches de 38,5 m de longueur et le mouillage est porté à 3,20 m pour permettre le passage de convois de 250 à 400 tonnes. De très gros investissements sont alors mobilisés pour augmenter la charge des chalands. Des barrages mobiles sont installés, qui s'ouvrent partiellement ou complètement selon les débits ; la Seine et ses affluents, la Marne et l'Oise, sont transformés en plans d'eau à niveau quasi constant.

La canalisation de la rivière achevée à la fin du siècle donne accès aux bateaux à hélice qui remplacent ceux à vapeur et fait basculer le trafic de l'amont à l'aval : avant 1850, plus de 90 % des dépôts à Paris viennent de l'amont de la Seine ; après 1880, plus de 75 % viennent des avant ports de Rouen et du Havre (Guillaume 1990). En 1920, la navigation assure les deux tiers des approvisionnements de l'Île-de-France (la production portuaire avoisine les 30 millions de tonnes) (Guillaume 1990).

Le trafic fluvial augmente constamment. En Seine aval, de 3,5 millions de tonnes en 1900, il passe à 7 millions en 1950, puis à 12 millions en 1960. Les perspectives – 22 millions de tonnes en 1968, à son apogée en Seine aval – ainsi que le développement de la navigation par convois poussés, conduisent en 1960 à engager un nouveau programme d'amélioration afin d'augmenter encore les capacités de transport. De 1964 à 1984, dix-sept écluses de plus de 180 mètres de long sont implantées sur la Seine et la Marne, le mouillage du chenal est porté à 4 mètres et plus de 80 millions de m³ de dragage sont effectués pour les liaisons Seine-Moselle et Seine-canaux du Nord. La canalisation du fleuve achevée en 1984, dégrade le milieu aquatique. Aux abords de la capitale, la Seine est coffrée entre deux murs de palplanches bétonnées (Guillaume 1990).

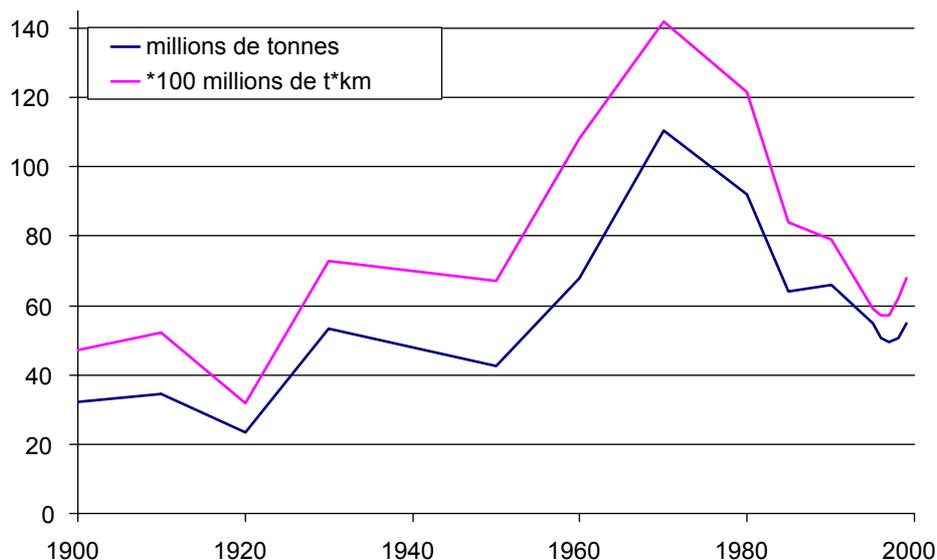


Figure 34 :Trafic fluvial, France, 1900-1999 (données VNF et divers).

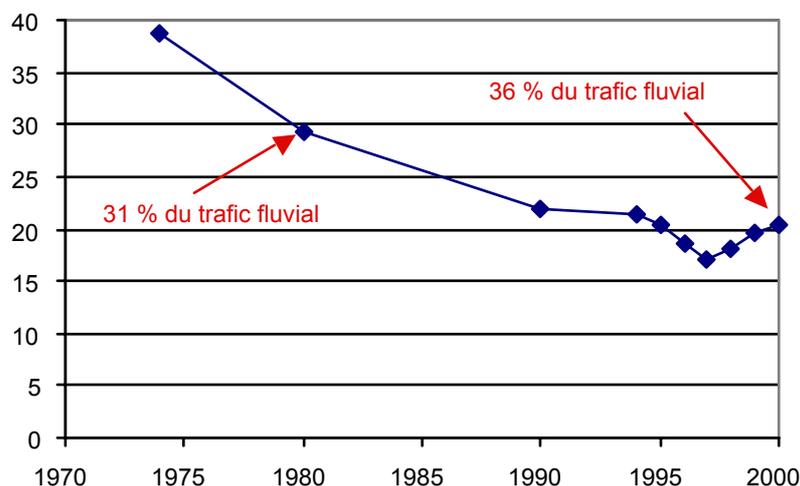


Figure 35 : Trafic du Port autonome de Paris, 1974-2000 (millions de tonnes) (données PAP et divers).

À présent, le bassin de la Seine compte 1 427 km de voies navigables dont 550 à grand ou moyen gabarit et le trafic y est de plus de 3,2 milliards de tonnes.km ; ceci représente 25 % en longueur et plus de 50 % en trafic du réseau fluvial français. Le gabarit européen (3 000 tonnes) s'étend sur la Seine de son embouchure jusqu'à Bray, en amont de Montereau, et sur l'Oise, jusqu'à Compiègne. Accessible à la navigation maritime jusqu'à Rouen, la Seine est la deuxième voie naviguée européenne après le Rhin. Le trafic du port autonome de Paris de 25 millions de tonnes en fait le deuxième port fluvial européen.

Toutefois, la physionomie du réseau, qui était à la fin du siècle dernier le plus moderne d'Europe, apparaît aujourd'hui dépassée. Le bassin est concerné par les liaisons fluviales à grand gabarit Seine-Nord (Seine-Escaut) et Seine-Est (Seine-Moselle) inscrites au schéma directeur des voies navigables publié en 1985, afin d'assurer une double jonction de la Seine avec le Nord d'une part, et la Moselle et le Rhin d'autre part. À la suite des études préalables au choix des tracés possibles, conduites en 1995-96, le projet de liaison Seine-Nord, classé prioritaire au schéma directeur et d'intérêt communautaire, pourrait voir le jour avant 2010. D'autres projets sont également en cours : l'extension du grand gabarit entre Bray et Nogent-sur-Seine, l'aménagement de la Marne jusqu'à la Ferté-sous-Jouarre.

Tableau 11 : Date de construction des canaux du bassin de la Seine (Pinon, 1990, et divers).

Localisation sur la Figure 36	Date	Nom
1	1604-1642	Canal de Briare (Loing-Loire)
2	1676-1691	Canal d'Orléans (Loing-Loire)
3	1719-1723	Canal du Loing
4	1724-1738	Canal de Picardie (Oise-Somme)
5	1769-1810	Canal de Saint-Quentin
6	1779-1832	Canal de Bourgogne (Saône-Yonne)
7	1784-1834	Canal du Nivernais (Loire-Yonne)
8	1795-1839	Canal de l'Oise à la Sambre
9	1804-1839	Canal de l'Ourcq
10	1806-1851	Canal de la haute Seine
-	1821	Canal Saint-Denis
11	1809-1825	Canal Saint-Martin (Paris)
12	1821-1827	Canal des Ardennes
13	1838-1853	Canal de la Marne au Rhin
14	1879-1907	Canal de la Marne à la Saône
15	1880-1890	Canal de l'Aisne à l'Oise
16	1887	Canal de Tancarville
17	(Vers 2010 ?)	Liaison Seine-Nord
-	(XXIe)	Liaison Seine-Est

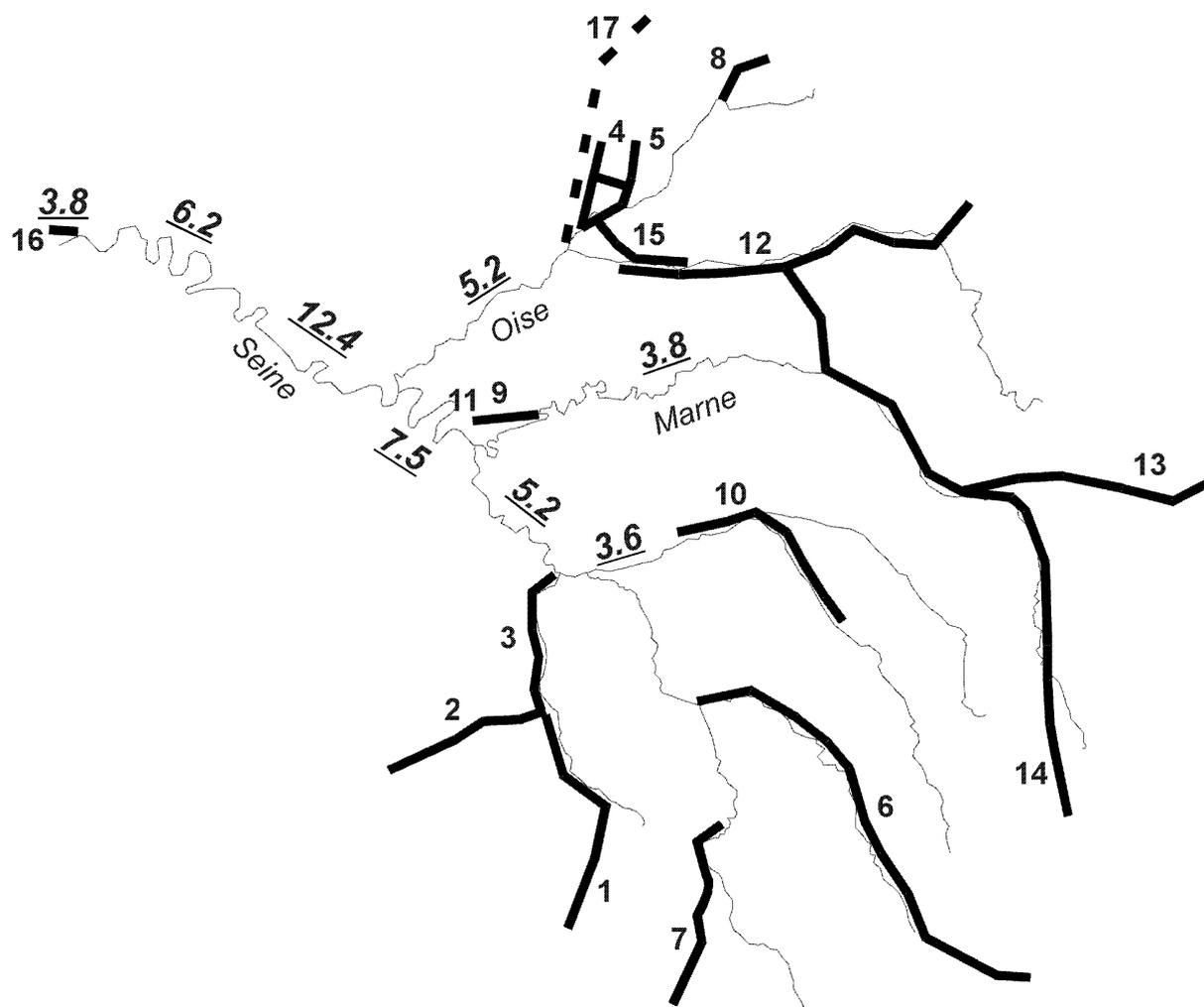


Figure 36 : Les canaux du bassin de la Seine. Les chiffres soulignés et en italiques indiquent les tonnages annuels (10^6 t) pour 1990-95 (données SDAGE, 1995). Les autres chiffres renvoient au tableau ci-dessus.

5. Conclusion

5.1. Les sources

Disposer de sources d'informations nombreuses, fiables et couvrant l'ensemble des aspects traités dans le cadre de ces recherches sur le bassin de la Seine est une utopie à laquelle nous ne croyons pas. Il est cependant intéressant d'esquisser la typologie des sources auxquelles nous avons eu recours, ainsi que de celles qui nous ont manqué.

Les sources ont tout d'abord été écrites : inventaires, livres de comptes, statistiques depuis le début du XIXe siècle. Nous les avons sélectionnées pour leur représentativité, leur caractère exceptionnel et, le plus souvent, pour leur abondance. Les sources de terrain ont par ailleurs été largement utilisées pour les périodes les plus anciennes, au travers de fouilles archéologiques. Mais nous n'avons pas exploité toutes les pistes pouvant nous donner accès à de véritables "archives environnementales" susceptibles de nous éclairer sur l'impact réel des activités.

Ces sources ont permis d'établir des chroniques longues pour un lieu géographique donné (une abbaye, un site d'analyse de l'eau, Paris, l'ancien département de la Seine, ...). Ainsi, le cycle de l'eau à Paris a été établi grâce à des statistiques de l'administration parisienne démarrant en 1817 ; les statistiques sur le plomb ont pu être rassemblées depuis 1818 ; les mesures régulières de la qualité de l'eau de la Seine commencent à Ivry-sur-Seine en 1884. Mais ces statistiques doivent être travaillées, consolidées afin d'en vérifier la fiabilité car elles peuvent être lacunaires (lacune entre 1856 et 1865 pour Paris) ou correspondre à des objets dont la définition varie dans le temps (les statistiques de plomb affiné détrônent celles du plomb métallurgique en 1952 ; les méthodes d'analyses de l'eau ont considérablement évolué en un siècle).

Ces sources nous ont permis enfin de décrire des années types, représentatives de l'activité humaine et industrielle de leur époque, et permettant de rendre compte de l'évolution de la pression anthropique sur le bassin de la Seine. Cette approche, satisfaisante pour l'esprit, a ses limites qu'il faut garder à l'esprit. Pour le Moyen Âge, le modèle sur le fonctionnement des territoires organisés par les abbayes cisterciennes n'a pu être constitué, et validé, que pour une "abbaye-type", reconstruite à partir de données provenant de plusieurs sites ; pour les périodes plus contemporaines, nous avons bénéficié d'états des lieux divers établis à une date donnée à diverses échelles : les recensements de population à l'échelle communale depuis le Premier Empire ; le linéaire des égouts de la ville de Paris au XIXe siècle ; des listes d'établissements classés du département de la Seine ou de France, par arrondissement ou par département aux XIXe et XXe siècles. Mais quelques sondages nous ont permis de vérifier combien ces inventaires, supposés exhaustifs, étaient incomplets : ainsi une seule fonderie de plomb est officiellement répertoriée à Saint-Denis en 1912, alors qu'un inventaire réalisé pour cette seule ville grâce à des sources multiples a permis d'en dénombrer six dont deux au moins produisaient du plomb laminé ou en plaque à grande échelle.

5.2. Un histoire spécifique ?

La limite des sources, les problèmes de compatibilité, d'exhaustivité, de représentativité, etc. constituent le lot quotidien de l'historien. Ils sont peut-être plus marqués dans le cas de l'histoire de l'environnement, et ce pour deux raisons.

La première est liée à l'objet de recherche lui-même : l'environnement est une invention relativement récente en tant que catégorie de pensée ou de gestion (*cf.* par exemple Robic, 1992). On ne pense pas l'environnement au XVIIIe siècle, mais la nature ou la salubrité, comme au XIXe siècle l'hygiène. On ne gère pas non plus l'environnement *per se*. Non pas que l'on ignore les transformations de la nature — on trouve, dès le Moyen Âge, des textes déplorant ici ou là la disparition de certains poissons dans les rivières, ou leur moindre abondance ; l'état de la Seine inquiète de longue date édiles, hygiénistes et ingénieurs — mais on ne trouvera pas pour autant une entrée "environnement" dans les sources antérieures au XXe siècle, et le chercheur devra toujours employer des chemins détournés et sinueux pour approcher son objet.

La seconde tient à la relative jeunesse de ce champ de recherche en France, en particulier pour les périodes historiques et les espaces géographiques très marqués par l’anthropisation, l’urbanisation et l’industrialisation, tel le bassin de la Seine, dans lesquels l’exigence d’interdisciplinarité est d’autant plus forte que les relations sociétés-milieux sont complexes. Des méthodes de recherche sont probablement encore à inventer, à l’interface des disciplines humanistes et naturalistes, et les bases posées au cours de cette phase du PIREN-Seine à consolider.

5.3. Les héritages

L’histoire des rapports sociétés-milieux est marquée par l’importance des héritages, qui prend différentes expressions et qui montre l’importance de la perspective historique dans la recherche environnementale contemporaine. Ces héritages sont d’abord matériels, qu’il s’agisse des contaminations ou des infrastructures. Dans le premier cas, force est de constater l’importante capacité de stockage des espaces anthropisés, et en particulier des villes : nous avons vu (§ 2.3.2. : Le plomb) que Paris et sa banlieue constituent une mine de plomb, dont plus de la moitié a été importée avant la seconde guerre mondiale, et dont une grande partie est encore en place, dans les produits finis, ceux qui ont été mis au rebut, dans les différents compartiments de l’environnement. Dès lors, deux questions essentielles se posent : où est-il ? où ira-t-il ? Sa quantification, sa localisation, la détermination de la forme sous laquelle il est stocké (métal ou oxyde), sont autant d’éléments que peut apporter l’histoire — des techniques notamment — à la compréhension du métabolisme actuel de cette matière et de ce “présent invisible” (Lévêque, 2001).

Les infrastructures — que l’on pourrait considérer comme l’un des *media* entre la ville et son environnement — pèsent très lourd dans les rapports sociétés-milieux, et limitent considérablement la marge de manœuvre des gestionnaires : la notion de *path dependence* semble particulièrement adaptée ici (Melosi, 2000). À Paris, le système d’égouts médiévaux paraît, au premier abord, anecdotique si on le compare au développement pris par le réseau à partir du XIXe siècle. Il est pourtant structuré, rive droite, par le Grand-Égout, qui joue encore un rôle primordial au XIXe siècle. Par la suite, les choix techniques n’ont pas remis en cause l’existence des infrastructures héritées, et le réseau a été constitué par greffes successives sur le réseau existant, en en conservant la structure. De même, les aménagements lourds du réseau hydrographique sont-ils durablement et probablement pour certains presque irréversiblement inscrits dans l’espace et contribuent-ils à la création de milieux spécifiques — voir par exemple les barrages-réservoirs pour lesquels la notion de “bon état écologique” montre toute son ambiguïté.

La pérennité de ces infrastructures tient tant à leur nature d’équipements lourds (donc coûteux, et dans une certaine mesure indestructibles à court terme, en particulier dans leur composante souterraine) qu’aux institutions qui les ont portées : la *path dependence* n’est pas uniquement technique et l’héritage est aussi institutionnel. Toujours dans le cas de l’assainissement parisien, les structures de gestion sont pour l’essentiel mises en place au XIXe siècle, avec la constitution et la structuration progressives des services techniques (dont la forme aboutie est due au baron Haussmann, mais celui-ci a déjà bénéficié des rapprochements entrepris au cours du premier XIXe siècle). Les transformations ultérieures n’ont consisté qu’à procéder, comme dans le cas du réseau lui-même, à un changement d’échelle (Schéma général d’assainissement de la Seine, 1929 ; Syndicat interdépartemental d’assainissement de l’agglomération parisienne, 1971) sans véritable remise en cause des principes ni des acteurs, si bien que la structure du réseau reflète celle de l’institution. Dans le cas de la distribution d’eau, force est de constater que la répartition des compétences entre public et privé mise en place à Paris à la fin des années 1860 a perduré jusqu’aux années 1980, soit plus d’un siècle ; en banlieue, le Syndicat des eaux d’Île-de-France (SEDIF) hérite du Syndicat des communes de la banlieue de Paris pour les eaux, créé en 1922, qui n’a pas changé de concessionnaire depuis. Le cas parisien est évidemment singulier compte tenu du rôle de cette ville. Cependant, les services urbains français et notamment de l’eau et de l’assainissement, sont très généralement marqués par la longue durée (*cf.* pour Lyon (Scherrer, 1995)).

5.4. Le cycle des matières

La nature “n’est pas moins merveilleuse dans la décomposition des mixtes, des animaux & des végétaux. Si elle cause une fermentation délétère & putride, & altère l’air environnant même à une très-grande distance, si les émanations de ces corpuscules infects sont perverses en raison de leur intensité, & très-nuisibles à tout être qui les respire, n’accusez pas la nature, ne la traitez pas d’aveugle, d’incohérence dans ses principes ; ses opérations sont immuables, sa marche est régulière, j’ose dire efficace. L’état fermentescible désunit les principes constitutifs des corps, pour les faire rentrer dans la masse des élémens dont ils sont émanés.” (Janin, 1782) La boucle est ainsi bouclée et à l’horreur de la putréfaction sont associés ses bienfaits.

Dans ces conditions, on comprend mieux l’angoisse du XIXe siècle quant à la rupture des cycles trophiques induite par l’essor urbain, cette idée, exprimée notamment par Victor Hugo, selon laquelle faute de rendre à la campagne ce qu’elle lui a pris, la ville en provoquera l’appauvrissement, puis le déclin de la nation tout entière. Il ne s’agit pas que d’une déclaration d’intention et l’exigence du mutualisme ville-campagne est aussi une contrainte imposée à l’assainissement urbain, qui ne se réduit pas, au XIXe siècle, à une question de salubrité et d’hygiène : le titre de l’article publié en 1872 par l’ingénieur des Ponts et Chaussées Alfred Durand-Claye — “Assainissement municipal : quantité de matière azotée expulsée chaque jour de Paris” (Durand-Claye, 1872) — est à ce titre révélateur. Au-delà de la description, Durand-Claye se demande comment boucler le cycle de l’azote ; l’enjeu est de taille, puisque de ce bouclage dépend la capacité de nourrir une population en pleine croissance. La démarche paraît étonnamment contemporaine, bien que les enjeux diffèrent aujourd’hui : que fait-il sinon résister au déchet, approcher le métabolisme tel que le définissent l’écologie urbaine et l’écologie industrielle et s’interroger sur l’ouverture des cycles, dont on a vu qu’elle intervient finalement au XXe siècle, avec les conséquences que l’on sait sur le milieu (§ 3) ?

5.5. Recyclage *versus* déchets

La résistance de la société à la production de déchets est en effet longue, et ceux-ci ne sont perçus comme tels que très tardivement, dans la première moitié du XXe siècle. En effet, nous avons vu le rôle joué par les boues et les vidanges, matières qui ont une valeur, dans la production artisanale puis industrielle. Cette situation n’est pas caractéristique du XIXe siècle, mais bien antérieure, et n’est pas propre à ces excreta. Au XVIIIe siècle, on préfère les tuiles anciennes aux neuves, parce qu’elles ont fait leurs preuves (Guillermé, 1995). Les matières organiques font l’objet d’un trafic intense : le salpêtre est encore récolté au XIXe siècle dans les caves, les étables, les fossés ; additionné de cendres et de gravats, il permet la fabrication de la poudre noire (Barles, 1999), matière recherchée et stratégique s’il en est ; on pourrait ainsi multiplier les exemples qui traduisent l’importance du recyclage.

Avec la croissance urbaine, la recherche de la salubrité, l’évolution des modes de vie, la mise au point de procédés concurrents plus rentables, la discordance toujours plus grande entre rythmes urbains et rythmes ruraux, le rejet des excreta en tant que matières de valeur et valorisables, il a bien fallu se résoudre aux déchets et autres eaux usées. Pourtant, le passage du recyclage au déchet n’est pas progressif : le XIXe siècle est au contraire marqué par une intensification des pratiques de valorisation, manifeste dans le secteur industriel, et les dysfonctionnements des techniques héritées (boues, vidanges) ont d’abord conduit les institutions gestionnaires à rechercher des solutions qui ne remettent pas en question l’utilisation des matières concernées : les transformations successives de la vidange, que nous n’avons fait qu’évoquer, l’épandage agricole des eaux d’égouts en sont la preuve. La rupture intervient plus tard, elle est symbolisée par l’ouverture des décharges d’ordures ménagères, pour Paris et sa banlieue en 1938, et pour ce qui nous concerne plus directement ici par la mise en service d’Achères (et encore les boues ont-elles pendant longtemps trouvé preneur) en 1940 : la coïncidence des dates n’est pas fortuite. Le règne des déchets aura donc duré cinquante à soixante ans, si l’on considère que la loi de 1992 en marque le terme (dans le texte sinon dans les faits), et il est frappant de constater qu’elle incite à un renouveau de la valorisation, sans cependant jamais s’interroger sur les conditions de son succès antérieur ni de sa disparition.

5.6. Le temps et la durée

Ceci amène directement à s'interroger sur les pas de temps mis en jeu dans les rapports sociétés-milieux. Le temps de réponse peut être compris comme celui de l'écosystème et force est de constater qu'il peut être très bref comme très long. Ce phénomène est bien connu des biogéochimistes et a été étudié dans le cas particulier du bassin de la Seine par les équipes du PIREN-Seine.

Mais le temps de réponse peut-être aussi être compris comme l'intégration de différents temps, ceux de l'environnement étant étroitement imbriqués dans celui éventuellement mis par une société ou un groupe social pour prendre en compte un problème donné et identifié (ce qui signifie le préalable de l'identification, ce qui n'est pas toujours le cas), et, tout aussi éventuellement, le résoudre (Meybeck, 2001).

À titre d'exemple, l'effondrement du pont de Tours en 1978 a mis l'accent sur le risque lié à l'exploitation du lit mineur du fleuve par les gravières, et la réglementation a très vite suivi, comme son application : en quelques années, le problème était réglé dans le bassin de la Seine. Nous sommes ici dans un cas où l'événement déclenchant n'est pas un problème environnemental mais un risque pour les populations humaines et où sa prise en compte conduit à une solution rapide et dont la portée environnementale est grande.

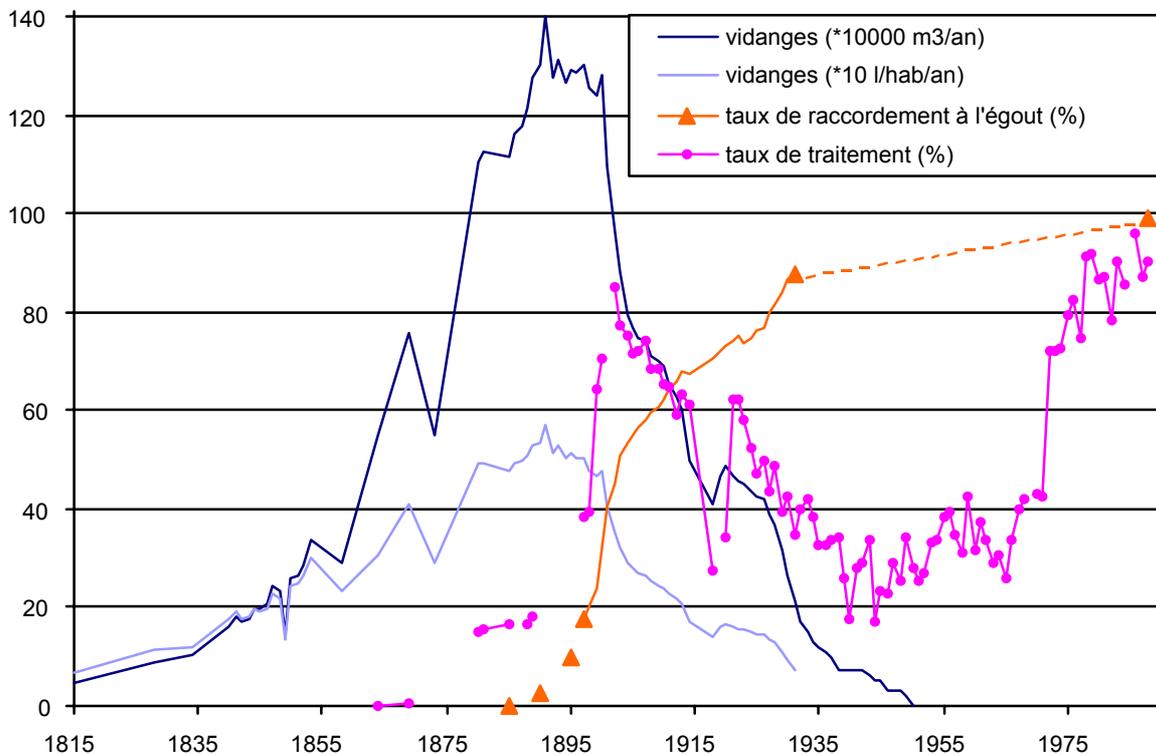


Figure 37 : Temps de réponse de la société : des vidanges à l'égout, Paris, XIXe-XXe siècle.

Dans d'autres cas, la prise en compte est en quelque sorte cyclique. La question de la contamination de l'eau par le plomb, est aujourd'hui largement débattue et entrée, en France, dans le champ réglementaire. Elle l'a été une première fois brièvement mais intensément en 1873-74 à l'Académie de Médecine comme à l'Académie des Sciences, alors que plusieurs cas de saturnisme avaient été identifiés et attribués à la consommation d'une eau contenue dans des vaisseaux de plomb (cas observés lors de voyages au long cours et en Cochinchine). L'inquiétude portait alors sur le possible danger d'une eau distribuée par canalisations en plomb, et a donné lieu à de nombreuses analyses portant sur les différentes eaux parisiennes. La conclusion quasi unanime fut négative et confirmait un fait connu depuis le début du siècle : la contamination n'est réelle que si l'eau est douce, ce qui n'est pas le cas des eaux parisiennes. La question ne semblait donc plus pertinente, d'autant plus que les découvertes pastoriennes permettaient l'identification d'un nouvel ennemi, le microgerme : l'étude de la qualité de l'eau est alors et durablement centrée sur celui-ci, et le débat

n'émerge à nouveau que dans les dernières décennies du XXe siècle. Dans ce cas, il nous semble que le nouveau regard porté sur l'eau (bactériologie) est aussi important que la question initiale dans l'abandon d'une hypothèse de travail : le risque de plombémie.

Dans de nombreux autres cas enfin, le temps de réponse de la société est long et peut s'étendre sur plusieurs générations, si bien qu'il est indispensable de pouvoir situer l'instant t dans cette dynamique : c'est par exemple le cas dans le domaine de l'assainissement urbain, où, en se limitant à la seule ville de Paris, on compte 100 à 130 ans entre la dénonciation du problème (insalubrité urbaine, corruption de l'air, du sol et des puits, par les *excreta* humains et urbains, surmortalité urbaine qui leur est en partie imputée, problème déjà identifié au XVIIIe siècle mais qui prend un tour nouveau au XIXe en raison de l'urbanisation, de l'évolution des modes de vie et de l'industrialisation qui pour cette dernière non seulement l'aggrave mais aussi permet une réponse technique à un problème *mésologique*) et l'aboutissement de la mise en œuvre de sa solution, le tout-à-l'égout (90 % d'immeubles raccordés à Paris en 1931), délai en partie imputable à des causes extérieures au débat hygiéniste (Figure 37). Il faudrait en outre y ajouter le temps de mise en place des équipements de traitement des eaux et enfin le temps de réponse du milieu. Ici encore, les travaux de recherche à l'interface des disciplines humanistes et naturalistes montrent toute leur pertinence et l'inscription dans le temps son apport aux problématiques contemporaines.

6. Références et sources imprimées

- Ascher F. (2001). *Les nouveaux principes de l'urbanisme. La fin des villes n'est pas à l'ordre du jour*. Éditions de l'Aube, La Tour d'Aigues.
- Ayres R. U., Simonis Udo E., eds. (1994). *Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development*. United Nations Univ. Press, Tokyo.
- Babelon J. P. (1986). *Paris au XVIe siècle*. Nouvelle histoire de Paris, Hachette, Paris.
- Bairoch, P., Batou, J. Chevre, P. (1988). La population des villes européennes de 800 à 1850. Genève.
- Barles S. (1999). *La ville délétère : médecins et ingénieurs dans l'espace urbain, XVIIIe-XIXe siècle*. Champ Vallon, Seyssel.
- Barles S. (2002a). L'invention des eaux usées : L'assainissement de Paris de la fin de l'Ancien Régime à la Seconde guerre mondiale. In : Bernhardt, C. & Massard-Guilbaud, G., eds. *Le Démon moderne. La pollution dans les sociétés urbaines et industrielles d'Europe / The Modern Demon. Pollution in Urban and Industrial European Societies*. Presses de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand (sous presse).
- Barles S. (2002b). Entre artisanat et industrie : l'engrais humain à Paris au XIXe siècle. Actes du colloque *Artisanat et industrie, nouvelles révolutions du Moyen Âge à nos jours*. Sous presse.
- Barrier P. (1989). *La mémoire des fleuves de France*. Coll. Terre de France, Plon, Paris.
- Beaudouin F. (1979). *Paris et la Batellerie du XVIIe au XXe siècle*. Musée de la Batellerie, Centre George Pompidou, Bibliothèque publique d'information, Éditions Maritimes et d'Outre-Mer, Paris.
- Beaudouin F. (1987). L'homme et l'eau ou petite encyclopédie des techniques de l'eau. *Les cahiers du Musée de la Batellerie*, **23**.
- Belgrand E. (1872-1887). *Les travaux souterrains de Paris*. Paris. 5 vol.
- Benoit P., Berthier K. (2001). L'alimentation en eau des villes. In : *L'Île-de-France au Moyen Âge*. Catalogue d'exposition. Tome 2, pp. 201-205.
- Benoit P., Berthier K. (2001). L'énergie hydraulique au Moyen Âge. In : *L'Île-de-France au Moyen Âge*. Catalogue d'exposition. Tome 1, pp. 208-210.
- Benoit P., Berthier K., Bourgès Ph. (2001). Aménagements hydrauliques des villes du Bassin Parisien au Moyen Âge : les cas de Paris et de Beauvais. In : Cosandey C., ed. *Hydrogéologie et hydrologie : histoire et prospective*, actes des 25e journées du GFHN du 28 au 29 novembre 2000. *Bulletin du Groupe Francophone Humidité et Transferts en Milieux Poreux*, **46**:99-103.
- Benoit P., Rouillard J. (1996). L'hydraulique cistercienne en Bourgogne et en Champagne. *Hydraulica monástica medieval et moderna*. Fundação Oriente, Lisbonne. pp. 157-186.
- Benoit P., Rouillard J. (2000). Medieval Hydraulics in France. In : Squatriti P., ed. *Working with Water in Medieval Europe, Technology and Resource Use*. Brill. vol. 3, pp. 161-215.
- Bergbäck B., Anderberg S., Lohm U. (1992). Lead load: historical pattern of lead use. *Ambio*, **21**(2):159-165.
- Berthier K. (2000). Teinturiers et drapiers dans le bourg Saint-Marcel aux XVe et XVIIe siècles. Actes du colloque Artisanat, industrialisation, désindustrialisation à Paris et en Île-de-France. *Mémoires de la Fédération des Sociétés historiques et archéologiques de Paris et d'Île-de-France*, **51**:77-84.
- Berthier K., Rouillard J. (1999). Nouvelles recherches sur l'hydraulique cistercienne en Bourgogne, Champagne et Franche-Comté. *Archéologie Médiévale*, **XXVIII**:121-147.
- Billen G., Garnier J. (1996). Les modifications historiques du cycle de l'azote aux échelles régionale et globale. *Nature, Science et Technique*, **14**(4):129-140.
- Bouchet G. (1993). *Le cheval à Paris de 1850 à 1914*. Librairie Droz, Paris.
- Boussingault J. B. (1858). Note relative à l'emploi industriel et domestique des eaux de puits de Paris. *Gazette hebdomadaire de médecine et de chirurgie*, **5**(29):507.
- Cebron de Lisle P. (1991). *L'eau à Paris au XIXe siècle*. Thèse, Université de Paris IV.

- Correll D. L., Jordan T.E. & Weller D. E. (2000). Beaver pond biogeochemical effects in the Maryland Coastal Plain. *Biogeochemistry* 49: 217-239.
- Comet G. (1992). *Le paysan et son outil. Essai d'histoire technique des céréales (France, VIIIe-XVe siècle)*. École française de Rome, Perugia.
- Croze, M. (1988). Tableaux démographiques. La population en France. *Histoire et Géographie*. Paris.
- Cun C, Billen G, Garnier J. (2001). Modélisation rétrospective de la qualité de l'eau à l'aval de Paris (1950-2000). In : *Programme PIREN-Seine : Rapport d'activité 2000*. UMR Sisyphe, Paris. pp. A-33-A-41.
- Cun C., Vilagines R. (1997). Time Series Analysis on Chlorides, Nitrates, Ammonium and Dissolved Oxygen Concentrations in the Seine River near Paris. *The Science of the Total Environment*, 208:59-69.
- De Guibert P. (1997). Impact des aménagements pour la navigation sur les niveaux d'eau de la Seine en aval de Paris. *La Houille Blanche*, 8:48-50.
- Diffre Ph., Pomerol Ch. (1979). *Paris et environs. Les roches, l'eau et les hommes*. Guides géologiques régionaux, Masson, Paris.
- Dumas J. B. (1865-1866). *Enquête sur les engrais industriels*. Paris.
- Dupaquier, J. (1969). Essai de cartographie historique. La population du Bassin parisien en 1711. In *Annales Economie, Société, Civilisation*. 1969, 976 et sqq.
- Durand-Claye A. (1872) Assainissement municipal : quantité des matière azotée expulsée chaque jour de Paris. *Annales des ponts et chaussées*, 1er sem.:410-412.
- Emmery H. C. (1840). Statistique des eaux de la ville de Paris (année 1840). *Annales des ponts et chaussées* 1^{er} sem.:145-270.
- Favier J. (1997). *Paris. Deux mille ans d'histoire*. Fayard, Paris.
- Fossier R. (1983). L'économie cistercienne dans les plaines du Nord-Ouest de l'Europe. *L'économie cistercienne. Géographie, mutations du Moyen Âge aux Temps moderne*. Actes du colloque de Flaran. Auch. pp. 51-73.
- Garnier J. (1876). *La recherche des feux en Bourgogne aux XIVe et XVe siècles*. Dijon.
- Gerards É. (1907). *Paris souterrain*. Paris.
- Gilbert H. (1958). La direction technique du port de Paris. *Travaux hors série (Direction générale des services techniques de la ville de Paris)*, 219-256.
- Girard P. S., Parent-Duchâtelet A. J. B. (1833). Des puits forés ou artésiens employés à l'évacuation des eaux sales et infectes et à l'assainissement de quelques fabriques. *Annales d'hygiène publique et de médecine légale*, 10:317-366.
- Guillaume A. (1990). Le testament de la Seine. *Revue de Géographie de Lyon*, 65(4):240-250.
- Guillaume A. (1990). *Les temps de l'eau. La cité, l'eau et les techniques*. (2e éd.) Collection milieux, Champ Vallon, Seyssel.
- Guillaume A. (1995). *Bâtir la ville : Révolutions industrielles dans les matériaux de construction, France, Grande-Bretagne, 1760-1840*. Champ Vallon, Seyssel.
- Higounet Ch. (1983). Essai sur les granges cisterciennes. *L'économie cistercienne. Géographie, mutations du Moyen Âge aux Temps moderne*. Actes du colloque de Flaran. Auch. pp. 156-179.
- Janin (1782). *L'antiméphitique (...)*. 2e éd. Paris.
- Kerboriou J. (2001). *L'extension du réseau d'assainissement de l'agglomération parisienne de 1919 à 1940*. Mémoire de DEA, Histoire des techniques (dir. Barles, S.), CNAM.
- Kliendienst Th. (1964). La topographie et l'exploitation des " marais de Paris " au XIIIe au XVIIe siècle. *Paris et Île-de-France. Mémoires*, XIV.
- Koch P. (1949). Direction technique des eaux et de l'assainissement. *Travaux hors série (Direction générale des services techniques de la ville de Paris)*, 79-156.
- Koch P. (1958). Direction technique des eaux et de l'assainissement. *Travaux hors série (Direction générale des services techniques de la ville de Paris)*, 101-218.

- Lafay P. (1991). *Fontaines et aqueducs parisiens à la fin du Moyen Âge*. Mémoire de maîtrise d'Histoire, Université Paris 1.
- Leguay J. P. (1996). *La pollution au Moyen Âge*. Jean-Paul Gisserot, Paris.
- Levasseur, E. (1889). *La population française*. 4 vol. Paris.
- Lévêque C. (2001). Les temps de l'environnement : de l'analyse rétrospective à la prospective. *En petit comité, bulletin du Comité pour l'histoire du CNRS*, 7:10-12.
- Manéglier H. (1992). Une grande ville et un bassin, Paris et la Seine. *Revue de Géographie de Lyon*, 67(4):299-303.
- Mazoyer M., Roudart L. (1998). *Histoire des agricultures du monde. Du Néolithique à la crise contemporaine*. Seuil, Paris.
- Melosi M. V. (2000). *The Sanitary City : Urban Infrastructure in America from Colonial Times to the Present*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore / Londres.
- Meybeck M. (2001). Introduction générale : Analyse rétrospective de l'évolution du bassin de la Seine. In : *Programme PIREN-Seine : Rapport d'activité 2000*. UMR Sisyphe, Paris. pp. A-1-A-4.
- Mille A. A., Durand-Claye A. (1869). *Compte rendu des essais d'utilisation et d'épuration*. Paris.
- Nriagu J. O. (1979). Global Inventory of Natural and Anthropogenic Emissions of Trace Metals to the Atmosphere. *Nature*, 279:409-411.
- Olivesi J. (1966). Les services d'assainissement. *Travaux hors série* (Direction générale des services techniques de la ville de Paris), 1-3.
- Palissy B. (1581). *Discours admirable sur la nature des eaux et fontaines*. Paris.
- Paulet M. (1853). *L'engrais humain*. Paris.
- Philippe, R. (1961). Une opération pilote : l'étude du ravitaillement de Paris au temps de Lavoisier. *Annales Économies, Sociétés, Civilisations*, 16(3):564-568.
- Pinon P. (1990). Canaux, histoire et architecture. *Encyclopedia universalis* 4, pp. 870-880.
- Poloni J. (1981). *Les granges de l'abbaye Notre-Dame de Cîteaux (vers 1250-vers 1480)*. Mémoire de maîtrise d'Histoire, Université de Dijon.
- Poloni J. (1983). Les granges de l'abbaye de Cîteaux (v. 1250-v. 1480). *L'économie cistercienne. Géographie, mutations du Moyen Âge aux Temps moderne*. Actes du colloque de Flaran. Auch. pp. 184-187.
- Robic M. C., ed. (1992). *Du milieu à l'environnement : Pratiques et représentation du rapport homme/nature depuis la Renaissance*. Economica, Paris.
- Scherrer F. (1995) Lyon : une histoire séculaire entre gestion publique et privée. In : Lorrain D., ed.. *Gestions urbaines de l'eau*. Economica, Paris. pp. 43-56.
- Sentenac F. (1928). Service technique des eaux et de l'assainissement. *Science et industrie hors série* (Services de la direction générale des travaux de Paris), 47-82.
- Sentenac F. (1934). Service technique des eaux et de l'assainissement. *Science et industrie hors série* (Services de la direction générale des travaux de Paris), 67-128.
- Stigliani W. M., Jaffé P. R. (1993). *Industrial metabolism and river basin studies: a new approach for the analysis of chemical pollution*. Princeton University, International Institute for Applied Systems Analysis.
- Tarr J. A., Ayres R. U. (1990) In : B. L. Turner et al., eds. *The Earth as Transformed by Human Action*. Cambridge Univ. Press, New York. p. 623.
- Velay P. (1992). *De Lutèce à Paris - L'île et les deux rives*. Coll. Patrimoine au présent, Caisse Nationale des Monuments Historiques et des Sites - Presses du CNRS, Paris.
- Vincey P. (1910). *L'assainissement de la Seine et les champs d'épandage de la ville de Paris*. Paris.