



Fascicule #20

Le métabolisme de l'agglomération parisienne

Sous la direction de Sabine Barles



Le **métabolisme** de **l'agglomération** **parisienne**

Sous la direction de :
Sabine Barles^[1]

Co-auteurs :
Gilles Billen^[2], Fabien Esculier^{[2][3]}, Josette Garnier^[2], Xavier Poux^[4]

Avec le concours de :
Vincent Augiseau, Anna Béjanin, Sabine Bognon, Eleonora Bonino, Gabriel Czarnobroda, Aurélien Faysse, Lily Gauthier, Pauline Geneste, Eunhye Kim, Jihoon Lee, Hélène Milet, Jérôme Thibault

[1] Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR 8504 Géographie-Cités – [2] Sorbonne Université/EPHE/CNRS, UMR 7619 METIS
[3] École des Ponts Paris Tech/UPEC, Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU) – [4] ASCA - Applications des Sciences de l'Action



Sommaire

CHAPITRE 1 : Du régime agraire au régime industriel, la trajectoire socio-écologique de l'agglomération parisienne

10

- 1. Le métabolisme parisien au sein du régime socio-écologique agraire 12
- 2. L'industrialisation du régime socio-écologique au XIX^e siècle : un métabolisme urbain hybride 16
- 3. La consolidation du régime socio-écologique industriel au XX^e siècle : ouverture et externalisation 20
- Conclusion : une transition en deux temps 25

CHAPITRE 2 : Le métabolisme parisien au début du XXI^e siècle

28

- 1. Le poids de l'agglomération parisienne 30
- 2. Le système agroalimentaire 35
- 3. L'excrétion, en aval de l'alimentation 38
- Conclusion : un régime socio-écologique linéaire et mondialisé 41

CHAPITRE 3 : Quels futurs pour le métabolisme parisien ?

42

- 1. La construction des scénarios 44
- 2. Paris, le nouveau Londres : métropolisation, mondialisation et confirmation de l'ouverture et de la spécialisation agroalimentaire 46
- 2. Les villes en leur bassin : vers un rééquilibrage territorial et un système agroalimentaire autonome, reconnecté, demitarien 52
- 3. Le système agroalimentaire et son évaluation environnementale 56
- Conclusion : quelle transition pour le métabolisme parisien ? 63

CONCLUSION GÉNÉRALE

64

Références

66

Glossaire

70

Sigles

72



Introduction

Le bassin de la Seine est profondément marqué par la présence d'une métropole dépassant le million d'habitants depuis près de deux siècles, et atteignant aujourd'hui près de 11 millions d'habitants. Le développement de l'agglomération parisienne est indissociable de ce milieu spécifique que constitue le bassin séquanais qui l'a longtemps nourrie et approvisionnée en eau, énergie et matériaux de construction. En retour, la métropole a été à l'origine de transformations majeures du bassin et singulièrement des milieux aquatiques. Aujourd'hui encore, malgré l'affaiblissement, voire la rupture, de certains liens fonctionnels entre Paris et son bassin — en particulier en termes alimentaires et énergétiques —, les relations qui les unissent demeurent déterminantes, en particulier à travers l'eau dont l'agglomération fait une grande consommation et dont la qualité dépend en grande partie des activités urbaines et agricoles : l'eau qui transporte sable, gravier, céréales, l'eau qui constitue parfois une menace pour les citoyens qui la consomment. Demain, en fonction des choix qui seront faits par les sociétés humaines et des modifications subies ou volontaires de l'environnement, Paris pourra renforcer les synergies avec son bassin ou s'en détourner davantage.

L'analyse de la coévolution de la métropole parisienne et du bassin de la Seine est essentielle pour qui veut caractériser et comprendre l'état passé, présent et, plus encore, futur de ces milieux, enjeux majeurs au regard des questions abordées dans le cadre du PIREN-Seine. Une manière de la conduire consiste à mettre l'accent sur les liens physiques qui les unissent, et qui unissent plus généralement la ville à la biosphère dans son sens le plus entier, c'est-à-dire qui inclut la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère, en d'autres termes la zone critique. Le fonctionnement urbain repose en effet sur la mobilisation

de ressources matérielles qui sont extraites, transformées, transportées, utilisées, et in fine restituées aux milieux sous des formes et dans des lieux souvent très différents de ce qu'ils étaient initialement, le tout mettant en jeu des flux d'énergie plus ou moins intenses. L'ensemble de ces flux d'énergie et de matières et des processus qui en régissent la mobilité, le stockage et la transformation représente ce que l'on appelle le métabolisme urbain, par analogie avec le métabolisme physiologique — bien qu'il faille se garder de toute dérive organiciste dès lors que l'analyse des sociétés humaines est en jeu. D'une façon plus générale, on pourra

parler de métabolisme territorial, social, industriel, etc., en fonction de l'échelle ou de l'objet d'analyse (Barles, sous presse). L'écologie territoriale se fixe quant à elle pour ambition d'analyser et de comprendre les déterminants et les effets du métabolisme sur les anthroposystèmes ou socio-écosystèmes (Buclet, 2015).

Le métabolisme social permet ainsi de caractériser, à un moment donné, les relations physiques qui lient une société à la biosphère : son régime socio-écologique. Ce régime suit une trajectoire plus ou moins stable ou monotone dans le temps, et peut parfois connaître des transformations majeures, conduisant à une transition socio-écologique. D'un point de vue macroscopique, on distingue trois régimes à l'échelle de l'humanité : chasseurs-cueilleurs, agraire et industriel (tableau 1). C'est aux deux derniers que se sont essentiellement consacrés les travaux conduits dans le cadre du PIREN-Seine, avec une attention particulière pour la caractérisation de la trajectoire conduisant du régime agraire au régime industriel, qui s'étend *grosso modo* des années 1780 aux années 1970, puis à celle du régime contemporain, et enfin aux possibles mutations de celui-ci.

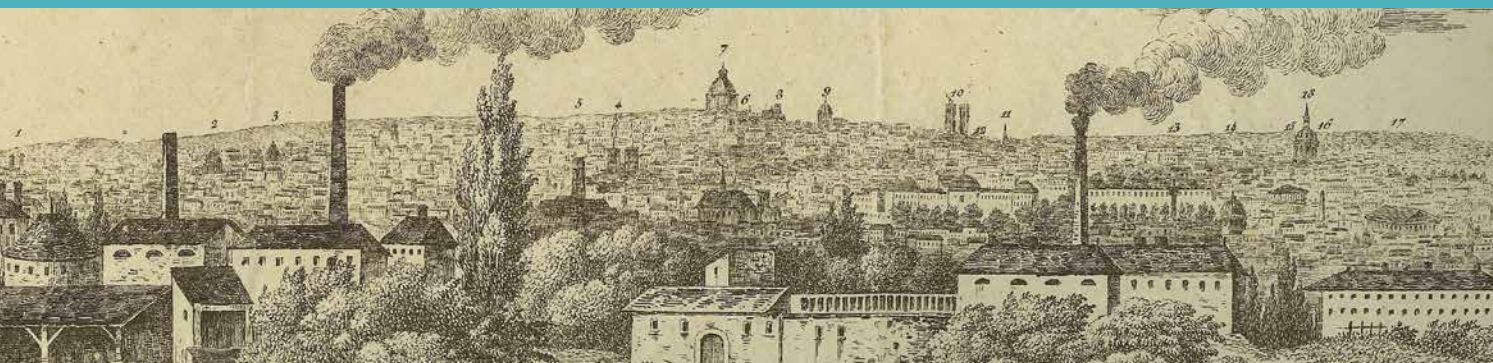
Ces travaux sont par essence interdisciplinaires et s'inscrivent au carrefour de l'histoire (de l'environnement et des techniques) ; de l'urbanisme, du génie urbain et de l'aménagement ; de la biogéochimie et de l'écologie. Ils mobilisent par conséquent des méthodes et des sources extrêmement variées : statistiques historiques et contemporaines, archives, cartes et plans, imprimés publiés entre le XVIII^e et le XXI^e siècles, dires d'experts, bilans de matières et d'énergie, modélisation et scénarisation prospective. C'est grâce à cette abondante documentation et à la combinaison de ces méthodes qu'il a été possible d'établir, au cours des vingt dernières années, les résultats qui seront présentés ici. C'est grâce aussi au cadre de travail fourni par le PIREN-Seine qui non seulement encourage la pluri- et l'interdisciplinarité, mais aussi, par sa durée, permet le cumul des connaissances acquises sur le fonctionnement du système Seine.

Convaincus de la nécessité d'inscrire les recherches socio-écologiques dans le temps long, nous avons donc structuré ce fascicule en trois périodes : hier, aujourd'hui, demain.

	Chasseurs-cueilleurs	Agraire	Industriel
Consommation énergétique (GJ/hab/an)	10-20	40-70	150-400
Consommation matérielle (t/hab/an)	0,5-1	3-6	15-25
Stock matériel (t/hab)	< 0,01	< 10	100-1 000
Densité de population (hab/km ²)	< 0,1	< 40	< 400
Densité de consommation énergétique (GJ/ha/an)	< 0,01	< 30	< 600
Densité de consommation matérielle (t/ha/an)	< 0,001	< 2	< 50
Part de la biomasse dans la consommation énergétique (%)	> 99	> 95	10-30
Part de l'usage non énergétique des matières (%)	< 5	< 20	> 50

Tableau 1. Les trois régimes socio-écologiques (Krausmann, Weisz, Eisenmenger, 2016, p. 67).

Métabolisme urbain : origine et devenir d'une notion



Le terme *métabolisme* est défini pour la première fois en France comme un « changement de nature moléculaire des corps » (Nysten P. H., 1858). L'équivalent en langue allemande « Stoffwechsel » existe au moins depuis les années 1840 sous la plume de Justus von Liebig. Il est très rapidement employé par Karl Marx qui l'utilise pour dépeindre la manière dont les sociétés humaines utilisent les ressources naturelles (Fischer Kowalski, 1998, p. 64). Marx suggère que leur surexploitation conduit à une « rupture métabolique » (Foster, 1999). Plus tard, Patrick Geddes, d'abord biologiste avant d'être, entre autres, urbaniste, défend l'idée d'une comptabilité physique appliquée à la société (Geddes P., 1885). Son attention aux échanges matériels et énergétiques est associée, à l'échelle urbaine, à la nécessité, selon lui, d'inscrire les villes dans leurs bassins versants et dans leurs *hinterlands* (Geddes, 1915).

C'est cependant bien au sein de la biologie que se raffine la notion de métabolisme qui trouvera une nouvelle application dans le champ social dans les années 1960, d'abord sous la plume d'Abel Wolman, ingénieur sanitaire états-unien (Wolman A., 1965). Certains écologues s'en sont par la suite emparés, en particulier Eugen Odum et Paul Duvigneaud, puis d'autres encore, notamment dans le cadre du programme *Man and Biosphere* de l'UNESCO qui fait les beaux jours de l'écologie urbaine. Ces travaux culminent avec la publication de l'étude consacrée à Hong Kong et pilotée par Stephen Boyden, qui non seulement caractérise le métabolisme de cette ville, mais tente aussi de faire de l'énergie la variable explicative du fonctionnement – et des dysfonctionnements – des sociétés urbaines (Boyden et al., 1981). Cette posture déterministe a fait l'objet d'un certain nombre de critiques, alors que parallèlement l'écologie industrielle prenait son (relatif) essor.

L'écologie industrielle est en effet née au même moment que l'écologie urbaine, mais indépendamment de celle-ci. Elle se fonde sur une critique de l'économie néo-classique et fait des externalités environnementales, non pas un effet corrigeable du modèle conventionnel dominant, mais l'une des caractéristiques intrinsèques de celui-ci (Ayres et al., 1970). Dès lors, il est indispensable de prendre en compte la matérialité des sociétés humaines, dépendantes des ressources de la biosphère : le *métabolisme industriel*, initialement contraction de « métabolisme de la société industrielle ». *L'Écosystème Belgique*, ouvrage publié en 1983 par un collectif de chercheurs belges associant chimistes et économistes, s'inscrit dans cette veine (Billen et al., 1983).

Le métabolisme urbain connaît un regain d'intérêt dans les années 2000 où la nécessité de ne pas s'en tenir à la ville tout en proposant des analyses situées dans le temps et dans l'espace conduit à étendre la notion à celle de *métabolisme territorial*. Les travaux de recherche se déploient aujourd'hui dans plusieurs directions :

- 1) le développement et la normalisation des méthodes de quantification et des indicateurs qui en découlent ;
- 2) l'analyse des déterminants, conséquences et enjeux socio-écologiques du métabolisme urbain ou territorial et de sa transformation ;
- 3) la définition du « bon métabolisme » et des moyens d'y parvenir dans une perspective normative parfois inscrite dans le modèle dominant, d'autres fois dans la recherche d'alternatives pour une transition socio-écologique plus radicale ;
- 4) la critique à caractère politique visant à dépasser le caractère descriptif de la quantification classique et l'inféodation d'une partie de la recherche aux injonctions dominantes.

Ces quatre orientations renvoient à l'écologie urbaine, industrielle, territoriale, sociale, comme à l'écologie politique (Barles, sous presse).





CHAPITRE 1



Du régime agraire au régime industriel, la trajectoire socio-écologique de l'agglomération parisienne

La périodisation des régimes socio-écologiques n'est pas chose aisée. Les premières traces de l'agriculture sont identifiables il y a environ 11 000 ans, mais son expansion n'est bien sûr ni homogène dans l'espace, ni linéaire. La révolution industrielle –expression par ailleurs contestée– est généralement attribuée en premier lieu à l'Angleterre du XVIII^e siècle, mais l'industrialisation reste un processus de longue durée, lui aussi inégalement déployé dans l'espace. Si la première transition (du régime des chasseurs-cueilleurs à celui de l'agriculture) n'entre pas dans notre enquête, la seconde (du régime agraire au régime industriel) en est partie intégrante. Notre point de départ se situe au XVIII^e siècle, à la veille de la Révolution française, période qui marque la fin, à Paris en particulier, du régime agraire.

Certaines mutations caractéristiques de l'ère industrielle sont certes déjà sensibles au cours de ce siècle, comme l'augmentation de la consommation unitaire d'énergie (cf. infra), ou le développement de certaines activités productives (Guillerme, 2007), mais le métabolisme présente encore les caractéristiques du régime agraire. Aux siècles suivants au contraire, le métabolisme parisien va connaître des modifications radicales, mais inscrites dans une relativement longue durée (bien que très brève à l'échelle de l'histoire de l'humanité). On verra que la transition vers le régime industriel s'effectue ainsi en deux temps, l'un qui concerne le XIX^e siècle, l'autre le XX^e, sachant que la coupure entre ces deux temps n'est pas nette, loin de là.

1. Le métabolisme parisien au sein du régime socio-écologique agraire

S'il est possible de décrire à grands traits le régime socio-écologique qui caractérise une période donnée, force est de constater qu'il ne se décline pas de façon homogène d'un territoire à l'autre. De nombreuses variables, à la fois physiques et sociales, contribuent en effet à façonner des régimes socio-écologiques locaux d'une grande diversité. Dans cet ensemble, les villes occupent une place singulière puisqu'elles peuvent se définir, en tout temps et en tout lieu, par les particularités de leur métabolisme, elles-mêmes issues de celles du métabolisme agricole analysé par les structures des systèmes alimentaires. On peut ainsi affirmer que les villes sont nées de la capacité de l'agriculture à dégager des surplus qui ont permis à une partie de la population de se libérer de la production de sa subsistance. Elle a ainsi pu développer d'autres activités,

d'échange notamment, nécessitant la proximité des protagonistes (on nous pardonnera ce raccourci, l'objet de ce texte n'étant pas de proposer une théorie de l'origine des villes). Les villes naissent ainsi de la performance du métabolisme agricole et traduisent une spécialisation sociale et spatiale. En termes socio-écologiques, cela signifie que, par définition, le métabolisme urbain est au moins partiellement externalisé, puisque c'est d'ailleurs que les urbains tirent leurs aliments. Il se caractérise aussi par la densité des flux (si l'on rapporte les masses aux surfaces, par exemple en tonnes/hectare) du fait de la concentration de la population ; par l'importance des stocks (infrastructures, bâtiments) ; par celle des consommations finales. Paris ne déroge pas à la règle. Au XVIII^e siècle, qui marque la fin du régime socio-écologique agraire et le début de notre enquête, la capitale reste très ancrée dans un *hinterland* que l'on pourrait presque qualifier de naturel, puisqu'il s'inscrit en grande partie dans le bassin de la Seine (Billen et al., 2012).

	1789	1853
Céréales et pommes de terre		
Pain	461	469
Pâtes	NR	5
Riz	8	8
Pommes de terre	NR	63
Viande		
Bœufs & vaches	64	98
Veaux	11	
Moutons	18	
Porcs	13	
Volaille & gibier	9	25
Viande		
Poisson frais	5	30
Poisson salé	18	
Poissons d'eau douce	8	NR
Fruits et légumes		
Légumes frais	NR	260
Légumes secs	NR	21
Fruits frais	NR	1 039
Fruits secs	NR	10

	1789	1853
Produits laitiers et œufs		
Œufs	20	21
Lait et crème	NR	263
Beurre	13	25
Fromage	6	32
Produits sucrés		
Sucre	15	27
Miel	0	1
Confitures	0	0
Huile	13	NR
Autres produits		
Café	6	9
Cacao	1	3
Boissons		
Vin	307	313
Eau de vie	10	33
Cidre	2	5
Bière	25	34

Tableau 2. Consommation alimentaire en g/hab/j, Paris, 1789 (Lavoisier cité par Philippe, 1961) et 1853 (Husson, 1856).

Il n'existe pas de recensement officiel de la population parisienne au XVIII^e siècle, mais de nombreuses estimations la porteraient à environ 500 000 habitants au début du siècle, 600 000 vers 1780, et 640 000 selon le recensement de l'an II (1793) (Fierro, 1996, p. 278, 283). La ville est déjà très dense, bientôt enceinte par le mur des fermiers généraux (construit entre 1784 et 1787) qui en fixe durablement les limites à 3 370 hectares. Si l'on cultive et élève dans Paris (notamment des poules et des lapins, cf. *infra*), la nourriture provient essentiellement de son vaste arrière-pays : « elle tire ordinairement ses grains

de l'Isle de France, de la Brie, du Hurepoix, de la Beauce, du Vexin, du Valois, de la Picardie, de la Champagne et d'une partie de la Bourgogne qui sont les provinces les plus abondantes du Royaume. » (Mémoire sur la fertilité des Provinces du Royaume..., s. d.). Grâce aux travaux d'historiens tels Steven Kaplan (1988) et Reynald Abad (2002), grâce à l'inventaire des consommations de Lavoisier (1791), il est possible non seulement d'avoir un aperçu de ce que mangeaient les Parisiens (tableau 2), mais aussi de déterminer les aires d'approvisionnement alimentaire de la capitale à la fin de l'Ancien Régime (figure 1).

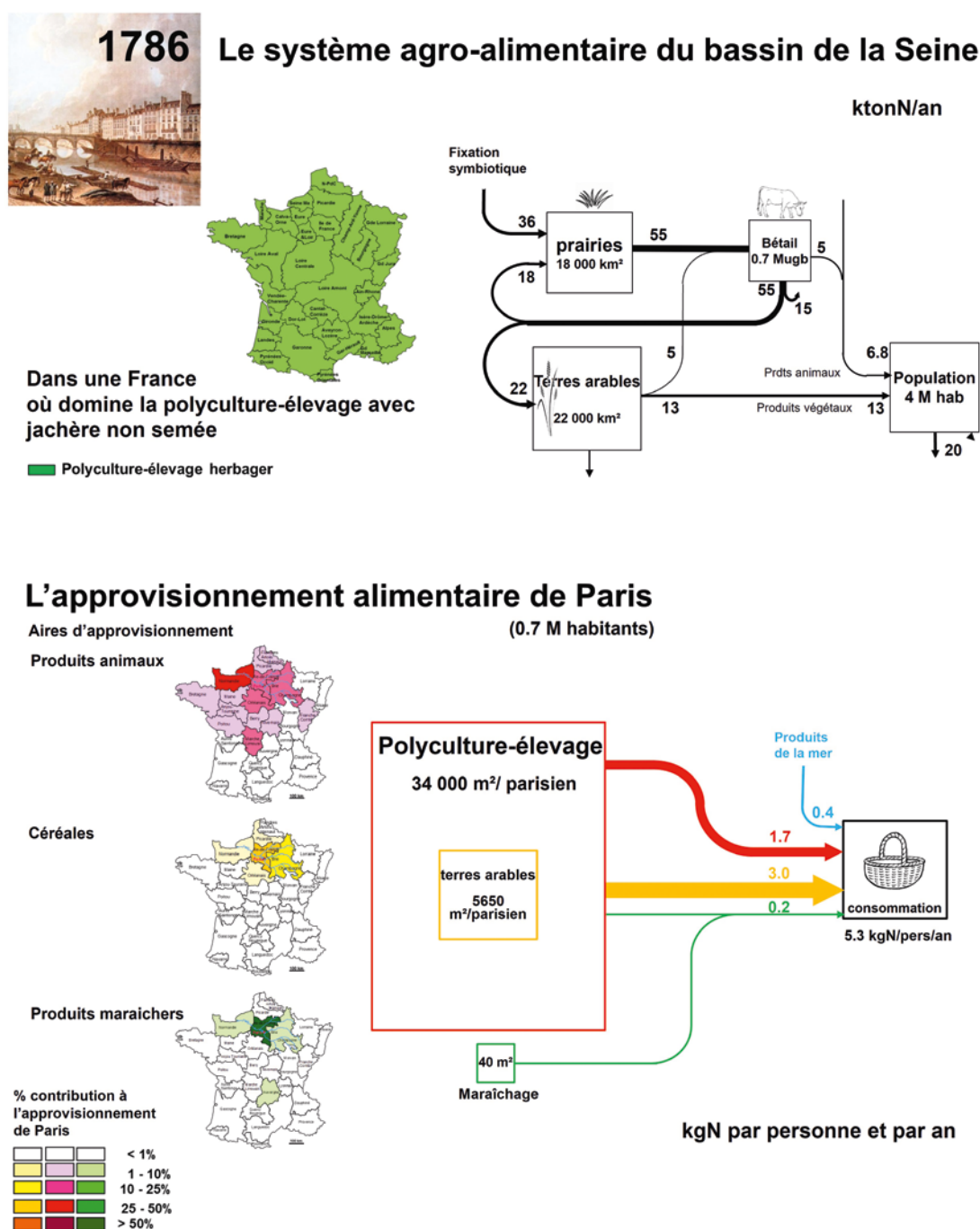


Figure 1. Système agroalimentaire séquanais et approvisionnement alimentaire parisien, 1786, ktn/an et kgN/hab/an.



On note ainsi la relative proximité qui existe entre production et consommation, qui distingue Paris d'autres villes telles que Londres, Gand ou Anvers qui vont chercher plus loin leurs aliments (Van Cruyningen, Thoen, 2012). C'est en effet dans un rayon d'environ 250 km que Paris tire sa nourriture, sous le contrôle étroit de l'État qui veille à son approvisionnement et, partant, à la paix sociale.

Il en va de même de l'approvisionnement énergétique qui est essentiellement constitué de bois et de charbon de bois destinés au chauffage, à la préparation alimentaire et, dans une moindre mesure, à l'industrie. Le bois est fourni par les forêts du bassin de la Seine, et amené par flottage (pour les deux tiers), bateau ou voie de terre (pour une faible part). Le bassin de l'Yonne et le Morvan en sont la principale origine, soit une distance moyenne d'approvisionnement de 200 kilomètres, pouvant à l'extrême aller jusqu'au 400 km ; il faut ainsi deux à trois ans entre la coupe du bois et son arrivée à Paris¹. Le XVIII^e siècle est marqué par une crise énergétique larvée puis, à partir des années 1770, déclarée : les forêts exploitables s'épuisent, la consommation augmente, les événements climatiques aggravent la situation en rendant la circulation du bois difficile. Les contemporains dénoncent le « goût du luxe » qui se développe dans une partie de la population, conduisant à accroître la consommation de biens de toute nature et la demande de confort : plus de cheminées dans les maisons, c'est aussi plus de bois consommé. Entre 1734 et 1782, la consommation primaire passe de 18 GJ à 30 GJ par habitant et par an, elle est multipliée par deux pour la ville tout entière (Kim et Barles, 2012). L'encadrement du commerce du bois est très sévère, entièrement contrôlé par la ville qui dispose ainsi d'une emprise extraterritoriale.

La consommation de matériaux de construction est quantitativement mal connue, mais elle s'inscrit, plus encore, dans le registre de la proximité. Les matériaux minéraux sont extraits des alentours immédiats, quasiment aux portes de Paris : pierres de taille, gypse pour le plâtre, chaux fabriquée sur place à l'aide de pierres calcaires locales. Les buttes Chaumont, réputées pour leur gypse,

témoignent de cette activité intense qui a façonné une partie du paysage parisien².

Mais Paris est aussi une ville productive (Guillerme, 2007) qui tire parti de son métabolisme interne. L'élevage des lapins alimente la fabrication des chapeaux. La collecte (très contrôlée) du salpêtre sur les murs plus ou moins pourris, imbibés de matières organiques et d'urine humaine et animale, permet celle de la poudre à canon ; celle des chiffons d'origine végétale sert à la fabrication du papier (qui était produit à l'extérieur de Paris). De fait, une partie des excréments urbains est valorisée, qu'elle serve de matière première à l'industrie ou d'engrais pour l'agriculture. Dans cette ville, où la plupart des rues ne sont pas revêtues, se forme une boue abondante que les Parisiens balayent chaque jour pour former des tas auxquels sont ajoutées les ordures des maisons. Les chiffonniers y collectent ce qu'ils pourront revendre (les chiffons déjà cités, les os, les morceaux de métal, etc.), puis les entreprises de ramassage des boues les emportent vers les voiries, terrains au sein desquels on laissera confire et mûrir les boues avant qu'elles ne soient enlevées par les cultivateurs des environs qui ont l'obligation de se servir aux voiries. La demande augmentant, dès les années 1760 les entrepreneurs des boues font commerce de celles-ci, ce qui n'est pas sans susciter de vives protestations des cultivateurs, qui devront finalement se résigner à payer pour en disposer. Parallèlement, les urines et les fèces sont recueillies dans les fosses d'aisances (réservoirs placés sous les maisons et connectés aux latrines sèches). Lorsque la fosse est pleine (soit tous les trois à dix ans selon les maisons), elle est vidangée, les matières étant acheminées à la voirie de Montfaucon (voirie à vidange distincte des voiries à boue) où elles sont mises à sécher puis converties en poudrette, engrais commercialisé lui aussi auprès de cultivateurs (Barles, 2005).

Enfin, l'essentiel du cycle urbain de l'eau peut être qualifié d'interne, l'eau consommée provenant des puits (environ 20 000 à la fin du XVIII^e siècle), de la pluie ou de la Seine, la distribution d'une eau importée, tirée des sources de

¹ Après un séchage de plusieurs mois, les bûches sont jetées dans les petits cours d'eau temporairement grossis par le lâcher de l'eau des étangs artificiels situés en tête de bassin. Arrivées aux ports flottables, elles sont tirées de l'eau et mises à sécher pendant plusieurs semaines avant d'être assemblées en trains et acheminées vers Paris. Pour les forêts les plus éloignées, et en fonction des aléas climatiques, l'ensemble peut prendre trois ans, contre deux ans dans le cas le plus courant.

² L'Île-de-France renferme les deux tiers du gisement de gypse national. Son extraction représente aujourd'hui 50 à 60 % de la production nationale (DRIEE Île-de-France, 2016) et les projets de mise en exploitation de nouveaux sites font l'objet de nombreuses controverses environnementales.

Belleville, d'Arcueil et du Pré-Saint-Gervais, étant limitée à quelques riches demeures et palais. La consommation urbaine, tous usages confondus, est de l'ordre de 10 l/hab/jour. La perméabilité relative des espaces publics concourt à l'infiltration locale des eaux pluviales, et l'omniprésence de l'eau à la forte évapotranspiration (Barles, 2001).

En cette fin de régime socio-écologique agraire, le métabolisme parisien reste partiellement interne. Paris dépend néanmoins d'un *hinterland* de proximité en grande partie inscrit dans le bassin de la Seine.

La faneuse (recadré), Julien Dupré (1851-1910)



2. L'industrialisation du régime socio-écologique au XIX^e siècle : un métabolisme urbain hybride

La première révolution industrielle et ses avatars vont amener des transformations importantes et, à première vue, paradoxales dans le métabolisme parisien, dans un contexte de croissance démographique constante. La capitale voit son nombre d'habitants quintupler en un siècle (ses limites administratives s'étendent en 1860, ce qui contribue à gonfler sa population), tandis que l'agglomération s'étend bien au-delà des murs parisiens. La population agglomérée s'élève à 550 000 habitants en 1801 (ce qui correspond à la population parisienne), puis passe à environ 3,5 millions en 1901, dont 2,7 millions de Parisiens —à comparer aux 2,2 millions actuels—, ce qui montre l'ampleur prise par la banlieue (figure 2).

Une première série de transformations touche certains flux et se traduit par leur intensification et leur linéarisation, par plus d'externalisation et par un éloignement plus grand des lieux d'approvisionnement : en somme tout ce qui caractérise le métabolisme urbain tel que nous le connaissons aujourd'hui.

L'eau est emblématique de ce processus : la fonction d'agent de nettoyage universel qui lui a nouvellement été octroyée en requiert de grandes quantités, il faut qu'elle soit courante, abondante et jaillissante. L'amélioration des chaux hydrauliques, la (re)découverte du ciment permettent la réalisation d'ouvrages d'adduction d'ampleur, tandis que la baisse des coûts de production des tuyaux en fonte rend possible la distribution selon un maillage de plus en plus serré. Les eaux de l'Ourcq, un affluent de la Marne canalisé sur environ 100 km, sont ainsi conduites dans la capitale au début du XIX^e siècle (on y a rapidement ajouté celles de la Beuvronne de façon à rendre la navigation possible). Il s'agit alors surtout de nettoyer et d'embellir les rues et d'améliorer la salubrité de l'espace public. À partir du Second Empire, alors que se généralise la distribution d'eau à domicile, plusieurs sources sont captées dans un rayon de 200 km autour de Paris (les dernières dans l'entre-deux-guerres). La capacité de production a ainsi pu être multipliée par 10 et la consommation unitaire par 6 entre 1807 et 1854 (mais cette eau était surtout consommée à l'extérieur de la maison) ; puis par 11 et 4 respectivement entre 1854 et 1914. La consommation a certes poursuivi sa croissance au XX^e siècle, ne serait-ce que par l'extension des réseaux en banlieue, mais le modèle de consommation d'eau est bien constitué au XIX^e siècle.

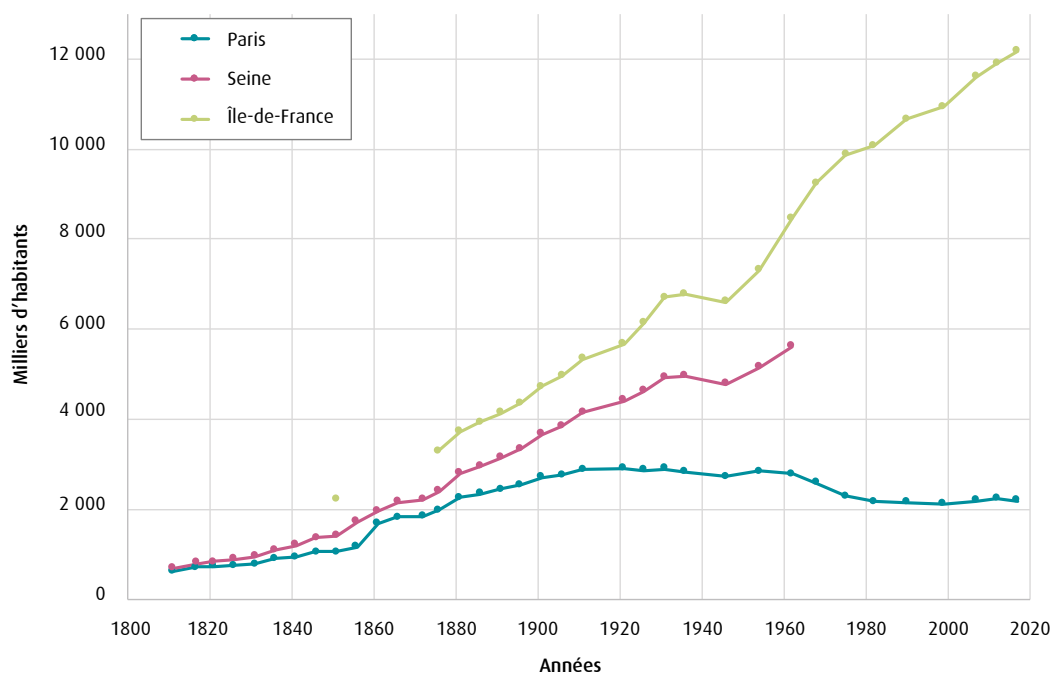


Figure 2. Population Paris, département de la Seine, région Île-de-France, XIX^e-XXI^e siècles, milliers d'habitants. Source : INSEE et recensements.

Ce modèle servira de base à toute l'œuvre réticulaire de l'ère industrielle : satisfaire toute la demande, partout, et en tout temps, quel qu'en soit le prix et quelle que soit la pression qui en résulte sur la ressource.

L'externalisation des rejets a suivi celle de l'approvisionnement. Le premier programme d'égout, mis en œuvre à partir de 1831-1832, comportait une multitude de conduites qui rejetaient toutes leurs eaux dans Paris. Le constat de la dégradation de la qualité de l'eau de la Seine, associé à la nécessité d'évacuer les eaux une fois entrées dans les maisons, a conduit à partir des années 1850 à l'unification du réseau grâce à la « canalisation souterraine de Paris » (Mayer, 1867). L'exutoire a d'abord été implanté à Clichy, après la première boucle de la Seine, puis plus loin, notamment à Achères, à 60 km à l'aval de Paris.

Ce siècle est aussi celui de la transition énergétique vers les combustibles fossiles. La crise de la fin de l'Ancien Régime n'a pas été effacée, loin de là, par la période révolutionnaire. Les réflexions engagées au XVIII^e siècle concernant les ressources alternatives se poursuivent à une forte différence près : alors que plusieurs scientifiques pensaient autrefois qu'elles seraient d'un usage temporaire en attendant la reconstitution de la ressource forestière, ces alternatives apparaissent désormais, et au premier chef le charbon de terre, comme des produits de substitution. Alors que celui-ci n'était quasiment pas consommé à Paris sous l'Ancien Régime (contrairement à Londres, à nouveau), il fournit la moitié de l'énergie primaire parisienne vers 1850. On peut considérer que la transition est alors acquise, après cinquante ans donc. Les forêts du bassin sont ainsi progressivement libérées au profit de l'exploitation de la « forêt souterraine » (Sieferle, 2001) constituée par des combustibles fossiles d'origine végétale. Ils sont d'abord extraits du Sud de la France, puis du Nord et de la Belgique, soit un rayon moyen d'approvisionnement de 300 km à la fin du XIX^e siècle. Mais la consommation énergétique parisienne présente une autre caractéristique notable : elle augmente certes du fait de la croissance de la population, mais ramenée à la consommation par habitant et tous usages confondus, elle reste stable à Paris tout au long du XIX^e siècle, autour de 30 GJ/hab/an en énergie primaire (Kim et Barles, 2012). Ce résultat contre-intuitif s'explique par une caractéristique très importante du régime énergétique au cours de cette période : la recherche

constante d'économies d'énergie par l'amélioration des rendements, donc de la performance énergétique. En d'autres termes, la consommation unitaire d'énergie utile a augmenté, mais la performance accrue des appareils et machines a compensé cette augmentation. Il n'en demeure pas moins que les flux de carbone liés au régime énergétique s'engagent dans la linéarisation : l'usage de carbone fossile pour la combustion marque le début de son accumulation sous forme de CO₂ dans l'atmosphère.

La situation est presque opposée en matière alimentaire. Si le développement des chemins de fer et la croissance de la population entraînent un élargissement du périmètre d'approvisionnement et en porte la distance moyenne à 270 km (Billen et al., 2012), le système alimentaire, et plus généralement le système alimentation-excrétion (Esculier, 2018), reste étroitement inscrit dans les cycles biogéochimiques *per se* et atteint le sommet de son optimisation en termes de fermeture des cycles.

Du côté de la production, le système de polyculture-élevage, qui domine partout en France depuis le XII^e siècle, et dans lequel les excréments animaux constituent l'essentiel de la fertilisation des terres arables, voit ses performances agronomiques augmenter considérablement grâce à une modification des rotations culturales. Jusqu'alors, l'assolement triennal comportait une année de jachère, au cours de laquelle le sol était préparé à la culture de céréales des deux années suivantes par l'apport de fumier de ferme et le recueil des excréments des animaux qui y étaient parqués pendant la nuit. Le remplacement progressif de la jachère par une culture de légumineuses fourragères (trèfle, luzerne, sainfoin, etc.) permet à la fois l'accroissement de la densité de bétail nourri sur la ferme, mais également un apport fertilisant supplémentaire par la fixation symbiotique d'azote atmosphérique que réalisent les légumineuses. Ce changement dans la rotation des cultures est la clé d'une augmentation considérable de la capacité du monde rural à exporter des excédents vers les villes (Duby et Wallon, 1993 ; Le Noé et al. 2018).

Simultanément, la quête des engrais humains et urbains est portée à son paroxysme (Barles, 2005). Les boues de rue sont collectées avec plus de soin tant elles sont recherchées. Que ce soit à la voirie de Montfaucon, qui ferme en 1848, à celle de Bondy³, qui a ouvert en 1818, ou dans les voiries

³ Aujourd'hui située dans la commune des Pavillons-sous-Bois, à l'emplacement de la zone industrielle de la Poudrette qui doit son nom à l'engrais humain qui y était fabriqué.

particulières (i. e. privées, autorisées à partir de 1850), de nouveaux procédés de transformation des vidanges sont testés, visant à optimiser la récupération de l'azote, qui est alors considéré comme le principal élément fertilisant. Le sulfate d'ammoniaque est produit par distillation des urines à Montfaucon dès les années 1840. Des mélanges de vidanges et de divers excréments urbains (boues, sous-produits des boucheries et des abattoirs, fumiers des vacheries et écuries de Paris, etc.) sont réalisés : près de 200 brevets relatifs aux engrais humains ont été recensés au XIX^e siècle en France (Adler, 2020). Les investissements dans le secteur des vidanges sont immenses : banquiers et spéculateurs de tout poil misent sur ces matières qui contribuent à la production alimentaire. Une partie d'entre elles est utilisée dans les environs de Paris et contribue à la prospérité de la ceinture maraîchère, rapportée par plusieurs auteurs (Baudrillart, 1888, Phlipponneau, 1956). Le reste part beaucoup plus loin : la poudrette et les engrais humains les plus pondéreux dans un rayon de deux à trois cents kilomètres autour de Paris ; le sulfate d'ammoniaque, peu prisé en France où l'on préfère les engrais organiques, est commercialisé en Angleterre. Le développement de la distribution d'eau à domicile et des toilettes à chasse d'eau compromet un temps cet équilibre entre ville et campagne. De manière à satisfaire aux exigences hygiéniques et agricoles, l'épandage agricole des eaux d'égout est testé dès la fin des années 1860 à Gennevilliers. Promu par une partie des ingénieurs des ponts et chaussées, il se développe lentement jusqu'aux années 1890. Il doit permettre de substituer la valorisation liquide des urines et excréments à la valorisation solide qui prévalait jusque-là.

La demande alimentaire soutient la récupération des engrais urbains qui, certes, ne sont pas employés sur place, mais sont d'abord destinés aux cultivateurs de la couronne maraîchère : cette externalisation demeure dans l'ordre de la proximité. Bien que l'aire de distribution des engrais urbains se soit étendue tout au long du XIX^e siècle, elle reste inférieure à celle de l'approvisionnement alimentaire.

Les activités de récupération ne se limitent pas au secteur des engrais, la croissance industrielle étant en partie soutenue par les sous-produits urbains (Barles, 2005). Avec l'industrialisation de la papeterie, la demande de chiffons explose. Les os d'animaux, vendus avec la viande et récupérés par les chiffonniers dans les tas d'ordures, voient leurs usages s'intensifier et se multiplier : phosphore (pour les fabriques d'allumettes), charbon animal (pour le raffinage et la clarification des sucres, et comme engrais dès qu'il n'est plus revivifiable), gélatine (pour les préparations alimentaires et plus tard les négatifs photographiques), matière même de l'os (pour les boutons et autres objets). Les chiffons de laine, d'abord utilisés comme engrais, sont effilochés et convertis en laine neuve dite « renaissance ». L'industrie engendre de nouveaux sous-produits qui trouvent à leur tour de nouveaux usages : boîtes de conserve transformées en jouets, papiers usagés qui donnent le carton, etc. Toutes ces matières, à l'exception des chiffons (qui faisaient d'ailleurs l'objet d'un trafic international) toujours transformés à l'extérieur de Paris, notamment à la papeterie de l'Essonne, entretiennent une production industrielle locale en grande partie destinée aux Parisiens.

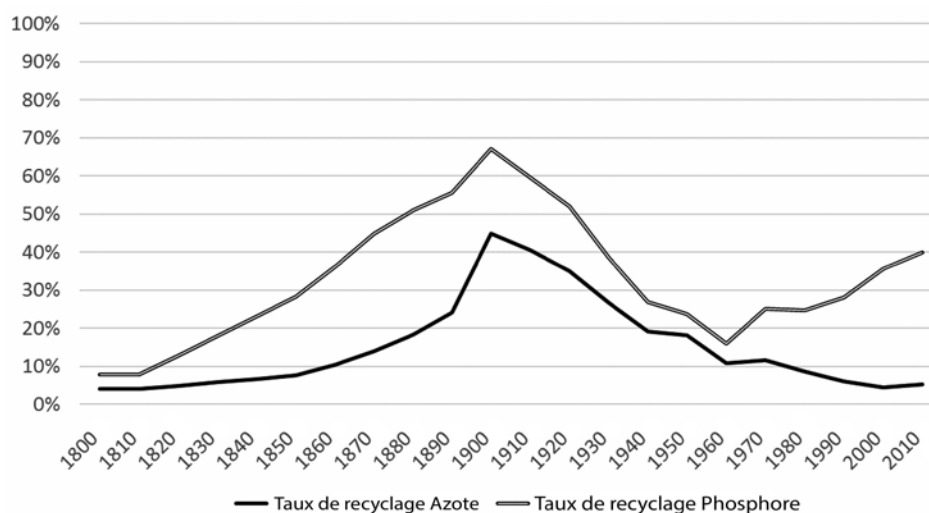
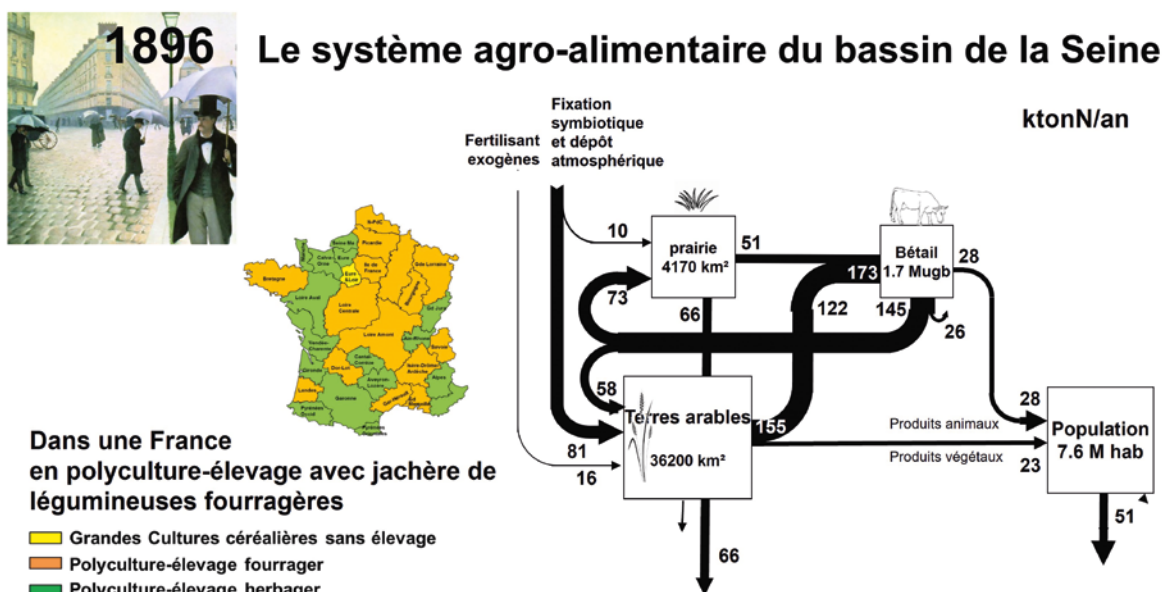


Figure 3. Taux de recyclage de l'azote et du phosphore issu des excréments humains, Paris, années 1800 – années 2010 (Esculier, Barles, 2021).

Le métabolisme parisien est donc hybride (figure 4). Le XIX^e siècle peut être considéré comme le siècle de la valorisation et de la récupération — ce qui ne signifie pas, tant s'en faut, que la pollution était évitée : si les procédés de récupération gagnent généralement en efficacité, ils n'en sont pas moins, la plupart du temps, très dissipatifs.

Simultanément, et en particulier dans les secteurs de l'eau et de l'énergie, le processus de linéarisation est enclenché et la croissance démographique contribue à l'augmentation de tous les flux, quand bien même certains stagnent lorsqu'ils sont rapportés à la population.



L'approvisionnement alimentaire de Paris (3.7 M habitants)

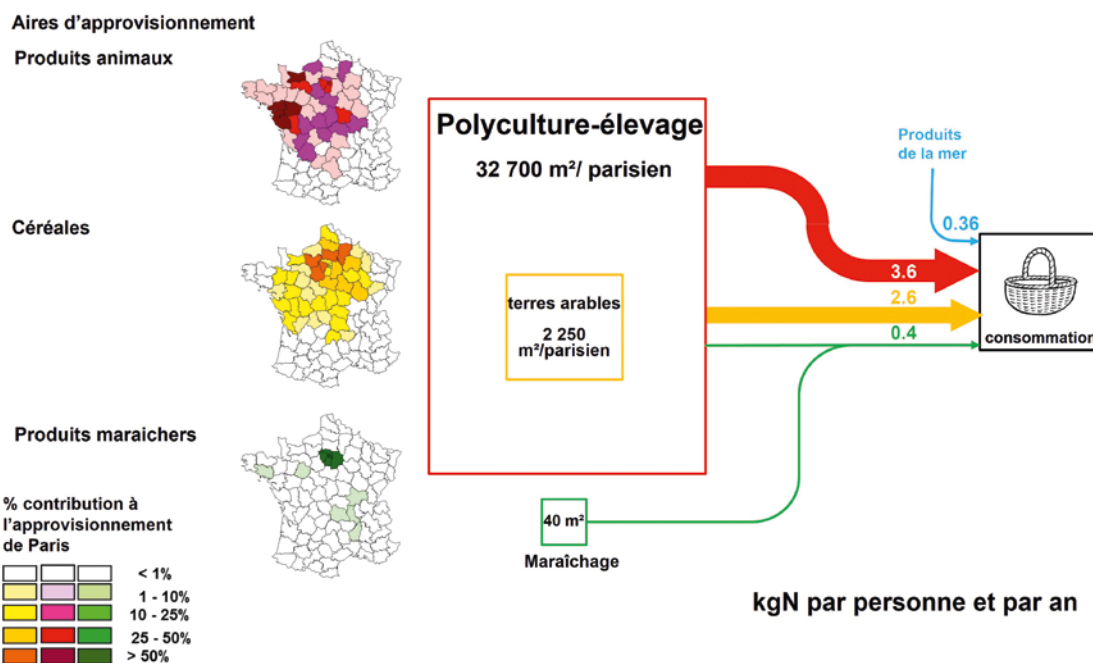


Figure 4. Système agroalimentaire séquanais et approvisionnement alimentaire parisien, 1896, ktN/an et kgN/hab/an.

3. La consolidation du régime socio-écologique industriel au XX^e siècle : ouverture et externalisation

Le XX^e siècle voit la fin des activités de valorisation urbaine (Barles, 2005). Cette fin progressive, qui est actée dans l'entre-deux-guerres, est freinée par la Seconde Guerre mondiale, car la pénurie qu'elle engendre remet au goût du jour certains procédés de récupération, puis hâtée à partir des années 1950 (lesdites Trente Glorieuses). Tous les flux s'intensifient, la linéarisation et l'externalisation se généralisent.

Les sous-produits urbains, qui ont joué un rôle moteur dans l'industrialisation, en deviennent parfois le facteur limitant : pas assez de chiffons, pas assez d'os, trop de contraintes de collecte avec l'introduction des poubelles à partir de 1883-84. Les succédanés du chiffon sont mis au point dans la seconde moitié du XIX^e siècle, tandis que la carbochimie puis la pétrochimie fournissent un nombre apparemment infini de molécules en tous genres aux usages multiples. Il en va de même du côté des engrais : les phosphates fossiles sont découverts au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle, la potasse d'Alsace est localisée en 1904 et exploitée à partir de 1910, le procédé Haber-Bosch permet dès les années 1910 la fabrication industrielle de composés azotés pour les canons et les champs. Tous s'ajoutent dans un premier temps aux engrais urbains, puis les supplantent complètement.

L'effet de cette nouvelle offre de fertilisants a été plus rapide dans les villes, et en particulier à Paris, que dans les campagnes. Les prix de vente des boues, celui des poudrettes et autres engrais urbains, sont à la baisse

au début XX^e siècle ; les produits autrefois si recherchés s'écoulaient plus difficilement. La réaction de l'administration parisienne et séquanais va s'opérer en deux temps. Jusqu'aux années 1920, on va tenter de maintenir les filières de récupération et de valorisation. On cherche des débouchés plus lointains : la négociation des tarifs des chemins de fer permet d'envoyer les boues de Paris dans le Nord à moindres frais. Les champs d'épandage sont étendus à un peu plus de 5 000 hectares au tout début du XX^e siècle, mais sont confrontés à l'augmentation de la production d'eau d'égout et à la rareté foncière : un projet (non réalisé) est élaboré au début des années 1920 qui vise à les acheminer vers la Champagne sèche, dévastée par les tranchées, et à y irriguer et fertiliser 28 000 ha à 38 000 ha (Védry, 1992, p. 88). Une autre voie consiste à améliorer les procédés : industrialisation du chiffonnage dans des usines de trituration, élaboration de nouvelles formules pour les engrais urbains : par exemple le poudro ou poudreau, « poudre fine, noirâtre, bien homogène, atteignant un poids de 1 200 kilogrammes au mètre cube, alors que la gadoue avant traitement pèse 600 kilogrammes au mètre cube. » (Pluvillage, 1912, p. 450-451).

Malheureusement, ces tentatives échouent et, dès les années 1930, les excréments urbains sont considérés comme « une charge inéluctable » (Joulot, 1946, p. 175). Ce renversement conduit à la recherche non plus de l'optimisation de la récupération, mais de l'élimination à moindre coût. La décharge contrôlée en est le symbole pour les déchets solides et le rejet direct à la rivière pour les eaux usées. Le schéma général d'assainissement de la Seine, adopté en 1929, fait cependant le choix de l'épuration biologique, compte tenu de l'ampleur des volumes en jeu. La station d'épuration d'Achères est mise en service en 1942 ; malgré ses extensions successives, on note le sous-équipement chronique en épuration de l'agglomération jusqu'à la fin du XX^e siècle (figure 5).

Vue d'ensemble des usines de l'Office National Industriel de l'Azote à Toulouse, 1935



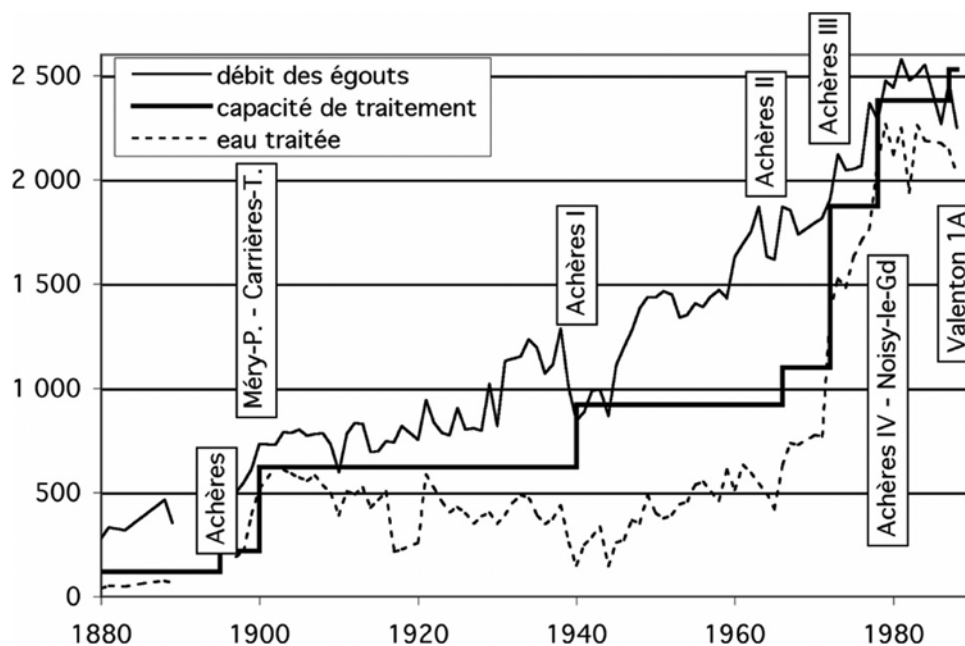


Figure 5. Débit des égouts, capacité de traitement, eau traitée, Paris, 1880-1990 (Barles, 2005).

Conséquence de la dévalorisation des excréments humains, la qualité de l'eau de la Seine se dégrade très rapidement. De plus, les installations de traitement, lorsqu'elles existent, ont été implantées à l'extérieur de la ville qu'elles servent : usine de trituration puis d'incinération des ordures ménagères à Ivry, Romainville, Saint-Ouen, Issy ; décharges dans un rayon de soixante kilomètres autour de Paris ; station d'épuration à Achères. Dès lors, l'externalisation du métabolisme est complète, bien que les aires d'émission soient restées inférieures aux aires d'approvisionnement. Si l'on considère la mobilité des rejets, par exemple dans la Seine, on voit que la qualité de son eau est sous emprise urbaine sur plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres au début du XX^e siècle, puis jusqu'à son estuaire fluvial dans les années 1970 à 2000 (Romero et al., 2016). La mise en service des champs d'épandage (recevant les eaux d'égouts) à partir de 1868 et dont l'apogée se situe entre 1900 et 1940 a même conduit à une forme inédite d'externalisation du cycle urbain de l'eau : dans une ville de plus en plus imperméable, l'évapotranspiration s'est progressivement réduite, tandis qu'elle était intense dans

les 5 000 ha de champs d'épandage – ce déplacement du cycle de l'eau a duré tant qu'ils ont été utilisés.

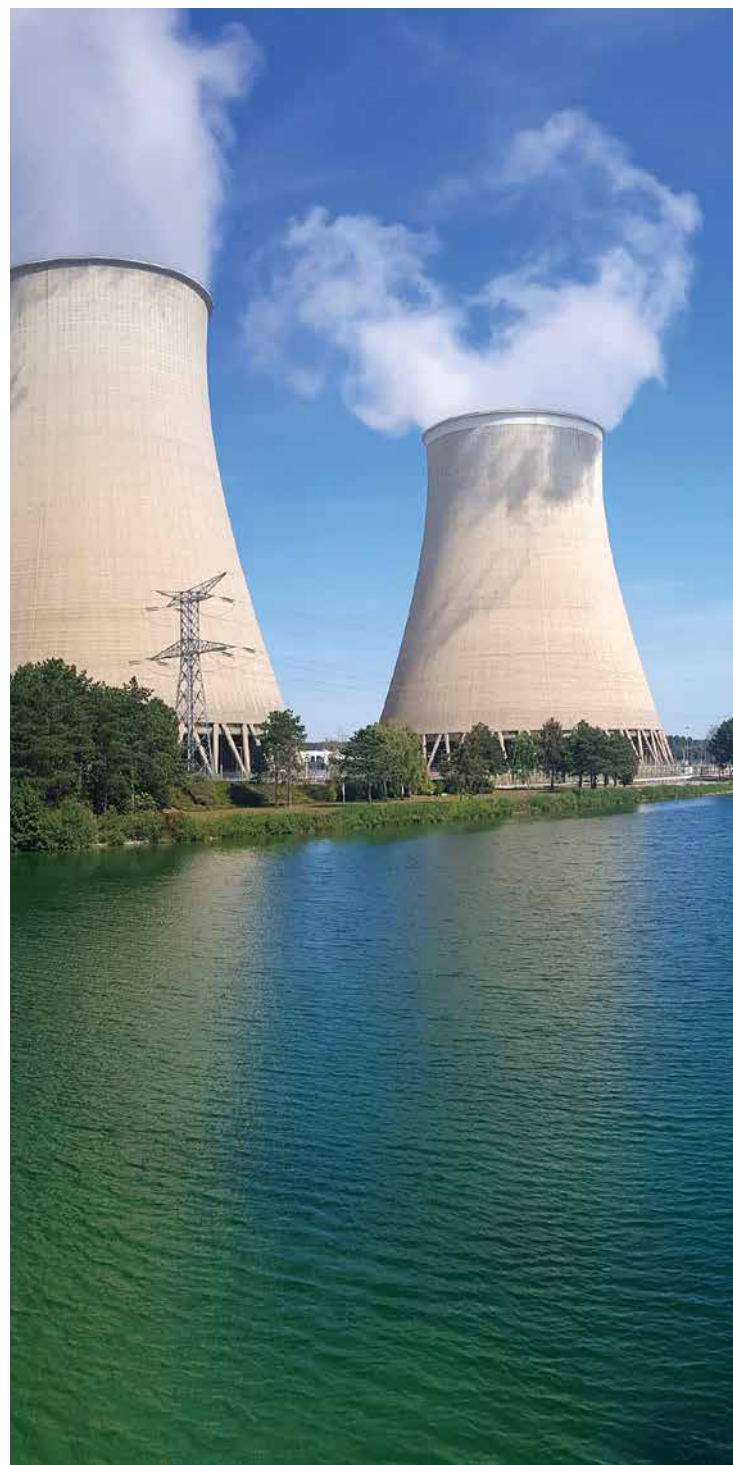
Les engrais industriels et fossiles ont donc un effet très rapide sur l'aval du métabolisme urbain, qui se traduit notamment par l'effondrement du taux de recyclage des nutriments humains (figure 3 plus haut). Ils pénètrent pourtant assez lentement dans les campagnes, dont la mutation est engagée après la Seconde Guerre mondiale et avec la politique agricole commune (PAC). Entrée en vigueur en juillet 1962, la PAC marque l'extrême volontarisme d'État dans la mutation du système agricole. Si elle a depuis beaucoup évolué (bien que le second pilier du développement rural n'ait été créé qu'en 1999), le rôle initial de la PAC, qui domine encore, a été le soutien des marchés et des revenus agricoles, avec un système d'aides aux agriculteurs conditionné par l'adoption de certaines orientations productives. L'accroissement de la productivité voulue par la PAC, pour garantir la sécurité des approvisionnements à des prix raisonnables, a été réalisé à travers une spécialisation de l'agriculture et une

déconnexion des grandes cultures et de l'élevage. Le centre du bassin parisien se tourne ainsi vers les grandes cultures céréalières sans élevage, tandis que la Bretagne et la Haute-Normandie se spécialisent dans l'élevage intensif, une tendance qui préexistait déjà à la fin du XIX^e siècle. Il en résulte que, dès le milieu du XX^e siècle, la production céréalière est excédentaire par rapport aux besoins de la population du bassin de la Seine et de l'agglomération parisienne, et est donc exportée, alors que les produits animaux sont acheminés vers Paris, depuis la Bretagne entre autres, pour y être consommés. La part des protéines animales augmente en effet dans le même temps dans le régime alimentaire (figure 6).

L'ouverture des cycles biogéochimiques s'accompagne d'une intensification de tous les flux. La consommation énergétique s'envole. À Paris, la consommation finale est ainsi passée de 24 GJ/hab/an au début du XX^e siècle à environ 70 GJ/hab/an un siècle plus tard ; ces chiffres atteignent respectivement 30 GJ/hab/an et 130 GJ/hab/an pour la consommation primaire (Kim, 2013). Les sources se diversifient : au charbon s'ajoutent l'hydroélectricité et, surtout, les produits pétroliers, puis le gaz naturel dès les années 1950 (avec le gaz de Lacq) et, à partir des années 1960, l'énergie nucléaire. L'approvisionnement énergétique s'inscrit dans un marché mondial. Les réseaux de distribution se complexifient et s'internationalisent, si bien qu'il devient très ardu de localiser précisément les aires d'approvisionnement d'une ville ou d'un territoire donné. La distance moyenne d'approvisionnement énergétique s'élève, à la toute fin du XX^e siècle, à près de 4 000 km.

L'eau consommée dans l'agglomération parisienne reste cependant issue du bassin de la Seine, contrairement à de nombreuses métropoles qui vont chercher parfois très loin la ressource telles qu'Athènes (Stergiouli, Hadjibiros, 2021) ou New York (Swaney et al., 2021). Mais les besoins sont devenus tels qu'ils ont occasionné dès le début du XX^e siècle de graves dysfonctionnements, en particulier en période estivale où les prélèvements privaient la rivière de son eau, conduisant à la dégradation accélérée des milieux (en raison du manque de dilution des rejets urbains) et rendant la navigation difficile, voire impossible. Plusieurs solutions sont alors envisagées, qui avaient d'ailleurs déjà été évoquées au siècle précédent : utilisation des eaux du bassin du Rhône (en particulier du lac Léman), transfert des eaux des vals

de Loire, construction de barrages-réservoirs, hypothèse envisagée aussi suite à la crue de 1910. Les trois options sont étudiées jusque dans l'entre-deux-guerres, où c'est finalement la troisième qui l'emporte. La construction de trois premiers ouvrages est entreprise : ceux du Crescent et de Chauménçon dans le Morvan, celui de Champaubert-aux-Bois dans la Marne. La construction du quatrième, Pannecière-Chaumard (plus tard rebaptisé « Pannecière »), est déclarée d'utilité publique en 1929, mais engagée seulement en 1938 à la suite de difficiles négociations avec les riverains et propriétaires fonciers (74 maisons noyées, 540 ha à acquérir), et achevée en 1950 après une longue interruption due à la guerre (Langlois, 2003).



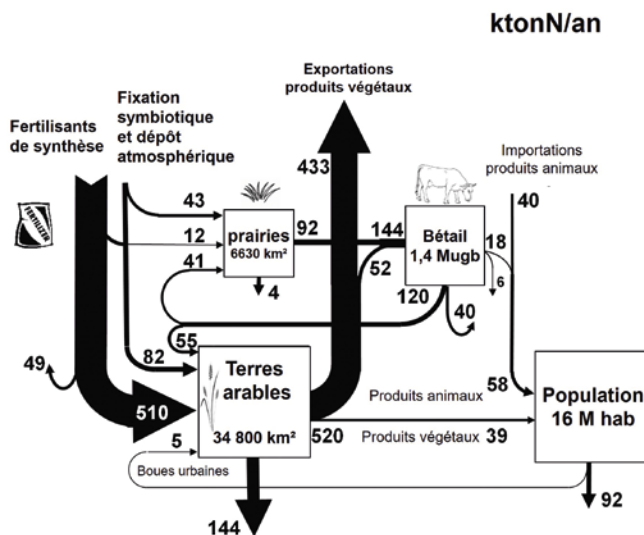


2016

Le système agro-alimentaire du bassin de la Seine

Dans une France aux territoires hyper-spécialisés

- Grandes Cultures céréalières sans élevage
- Polyculture-élevage fourrager
- Polyculture-élevage herbager
- Elevage spécialisé intensif avec importation d'aliment



L'approvisionnement alimentaire de Paris (12 M habitants)

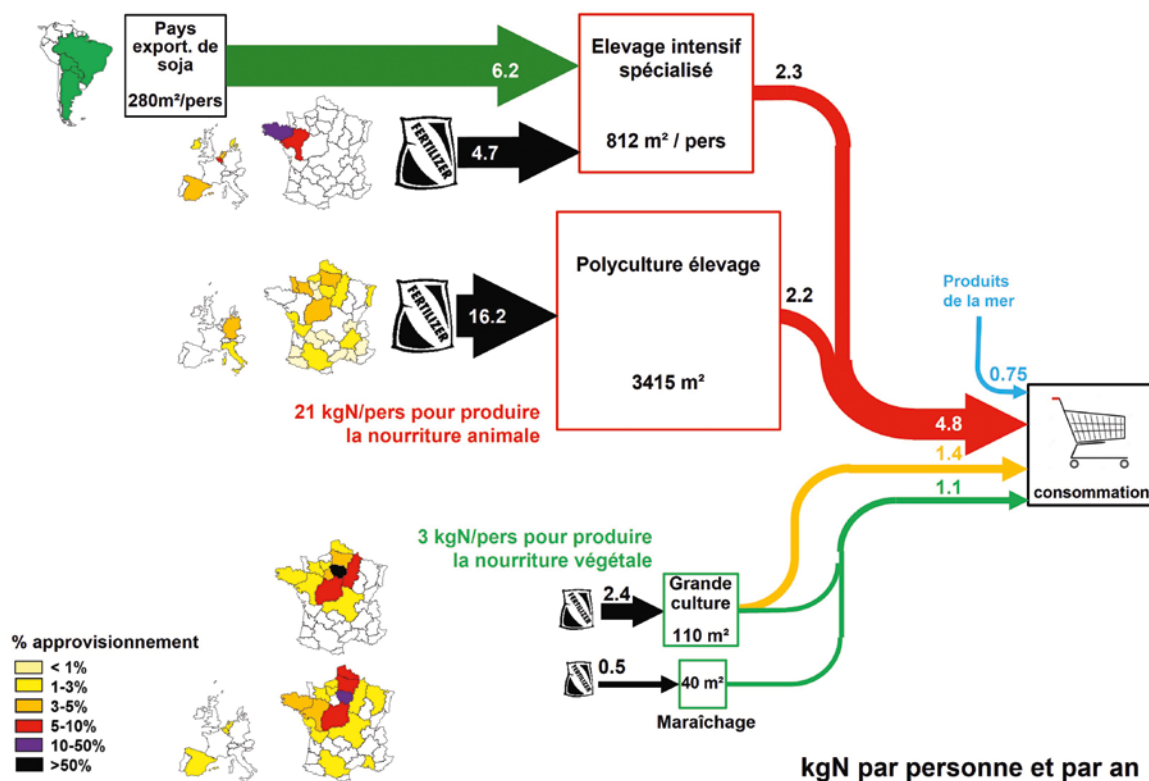


Figure 6. Système agroalimentaire séquanais et approvisionnement alimentaire parisien, 2016, ktN/an et kgN/hab/an.

Ces quatre barrages stockent jusqu'à 140 millions de mètres cubes, soit un apport moyen de 12 m³/s réparti sur les quatre mois d'étiage. Au lendemain de la guerre —et après les inondations de 1944, 1945 puis 1955, cette dernière étant suivie d'une importante sécheresse estivale—, la question revient à l'ordre du jour, avec un objectif général de faire passer la capacité de stockage à un milliard de mètres cubes grâce à la réalisation d'une deuxième génération d'ouvrages de capacité très supérieure aux précédents (tableau 3). Plusieurs sites sont envisagés, engendrant de nombreux conflits locaux, et finalement trois nouveaux ouvrages sont mis en service. L'apport estival potentiel moyen atteint 80 m³/s réparti sur quatre à cinq mois (juillet-novembre) à partir de 1989. Ces infrastructures témoignent une nouvelle fois de l'emprise parisienne sur le bassin (Barles, 2012).

Enfin, une autre ressource est particulièrement sollicitée au cours du XX^e siècle : il s'agit du sol. La croissance des banlieues est certes déjà une réalité au XIX^e siècle (Merriman, 1994), mais c'est au siècle suivant que

l'étalement urbain — qui se traduit par une croissance spatiale supérieure à la croissance démographique — devient une réalité. Dans l'entre-deux-guerres, il prend la forme des lotissements défectueux (Fourcault, 2000). Selon Jean Bastié (1964), les 200 000 pavillons construits alors — dans ou hors lotissements — couvrent environ 16 000 hectares pour quelque 700 000 habitants. Paris, dont la surface est deux fois moindre⁴, verra sa population culminer à trois millions d'habitants. Après la guerre, cette tendance se poursuit, avec l'extension de la banlieue pavillonnaire, celle des bidonvilles et des grands ensembles. Si les villes nouvelles que l'État décide d'implanter dans les années 1960, à distance de Paris, ont notamment pour objet de canaliser l'extension urbaine, elles ne parviennent pas à endiguer le processus d'étalement. La surface urbanisée passe ainsi de 67 m²/hab en 1906 (chiffre quasiment identique à celui de 1801) à 266 m²/hab en 2015 pour l'agglomération parisienne (tableau 4). La multiplication des infrastructures s'ajoute à l'étalement du bâti pour contribuer à l'artificialisation des sols et à la dégradation de cette ressource non renouvelable.

Nom	Rivière	Capacité (10 ⁶ m ³)	Superficie (ha)	Mise en service (année)
Première génération : soutien d'étiage				
Crescent	Cure	15	115	1931
Chaumeçon	Chaloux	20	145	1934
Champaubert-aux-Bois (partie de Der-Chantecoq)	Croye et Blaise	23	558	1938
Pannecière	Yonne	82	520	1950
Seconde génération : soutien d'étiage et protection contre les crues				
Orient	Seine	205	2 400	1966
Der-Chantecoq	Marne et Blaise	350	4 800	1974
Amance et Temple	Aube	170	2 500	1990
Total*		842	10 480	

Le lac de Der-Chantecoq de la deuxième génération incluant l'ancien lac Champaubert-aux-Bois, ce dernier n'est pas compté dans le calcul du total.
D'après : sources historiques diverses et <http://www.iibrbs.fr>.

Tableau 3. Barrages-réservoirs réalisés dans le bassin de la Seine, 1931-1990.

⁴ L'annexion des communes périphériques en 1860 l'a portée à 7 802 hectares. Celle de la zone en 1925 à 8 622 hectares, auxquels s'ajoutent en 1929 les bois de Boulogne et de Vincennes soit au total 10 516 hectares. Puis en 1954 le terrain de manœuvre d'Issy-les-Moulineaux soit une superficie totale de 10 540 hectares.

		1801	1906	2015
Population		547 756	4 370 000	10 706 072
Surface urbanisée	km ²	37	293	2 845
	m ² /habitant	68	67	266
Consommation d'eau	Mm ³ /an	3	328	1 016
	l/hab/j	14	206	260
Consommation d'énergie primaire	PJ/an	16	131	1 392
	GJ/hab/an	30	30	130
Consommation d'énergie finale	PJ/an	13	105	749
	GJ/hab/an	24	24	70
Combustibles fossiles et fissiles dans la consommation d'énergie primaire	%	0	84	93
Émissions de carbone	ktC/an	0,2	-	9 557
	kgC/hab/an	0,4	-	893

Tableau 4. Consommation d'espace, d'eau, d'énergie dans l'agglomération parisienne, XIX^e-XXI^e siècles (Barles, 2020).

Conclusion : une transition en deux temps

La transition socio-écologique du régime agraire au régime industriel est un processus de longue durée qui s'opère, comme nous l'indiquions plus haut, en deux temps. Le premier correspond peu ou prou au XIX^e siècle et est marqué par la croissance de l'agglomération, croissance démographique plus que spatiale, bien que la tâche urbaine s'étende déjà. Elle s'accompagne d'une transition énergétique — du bois au charbon de terre, qui représente la moitié de la consommation d'énergie primaire vers 1850 — et d'une pression accrue sur les ressources liée à l'augmentation de la demande totale et de la demande unitaire pour l'eau, ressource toujours plus sollicitée. Si l'augmentation des flux énergétiques et matériels et la linéarisation du métabolisme sont bien réels, cette

dernière n'est que partielle. Le système alimentaire s'inscrit encore dans une optimisation des cycles biogéochimiques naturels, tandis que les sous-produits urbains font l'objet d'une valorisation agricole et industrielle sans précédent : le régime socio-écologique est à la fois plus linéaire et plus circulaire. Il ne résiste pas à l'essor de la carbochimie, de la pétrochimie et de l'industrie des engrais qui semblent offrir des possibilités quasiment infinies de production et disqualifient les techniques d'optimisation des cycles biogéochimiques et de valorisation des sous-produits urbains. Le XX^e siècle se traduit ainsi par la linéarisation et l'externalisation intégrales du métabolisme parisien, par une augmentation de toutes les consommations unitaires et totales en lien avec la croissance de la population, toujours plus étalée, par un éloignement accru des aires d'approvisionnement. Cette transition en deux temps traduit la non-monotonie du changement.

Ouverture, fermeture et perturbation des cycles, circularité et linéarité des systèmes : définitions

Les notions d'ouverture, de fermeture ou de perturbation des cycles biogéochimiques et de circularité ou linéarité des systèmes sont régulièrement mobilisées lorsqu'il s'agit d'explicitier le métabolisme d'un territoire et son interrelation avec les flux de matières à l'échelle régionale ou planétaire. Que recouvre cette terminologie ? Nous proposons de nous appuyer ici sur le cas des flux d'azote pour expliciter ces notions⁵.

L'azote est l'objet d'un cycle biogéochimique planétaire c'est-à-dire qu'il connaît des processus de transport et de transformation qui le font circuler entre les principaux compartiments de la Terre (lithosphère, atmosphère, hydrosphère et biosphère) et changer d'état entre des formes minérales (nitrates, ammonium, etc.) ou organiques (acides aminés, acides nucléiques, etc.), inertes (diazote) ou réactives (toutes les autres formes). À l'échelle planétaire, ce cycle biogéochimique peut être résumé par des échanges entre ces grands compartiments : de l'atmosphère aux terres ou aux océans par la fixation d'azote dans un sens et la dénitrification dans l'autre sens ; des terres aux océans par l'export des rivières vers les océans ; vers les puits des sols terrestres ou des planchers océaniques par l'enrichissement des sols ou la sédimentation (Gruber & Galloway, 2008). À l'échelle planétaire, ce cycle est considéré comme très perturbé ou profondément modifié, principalement par la synthèse pétrochimique d'azote réactif à partir d'azote atmosphérique (synthèse d'engrais azotés), qui double la quantité d'azote réactif en circulation dans les écosystèmes terrestres et amplifie d'environ 100 % les échanges atmosphère-terre d'azote à l'échelle mondiale. Par comparaison, le changement climatique, lié principalement à la perturbation des échanges atmosphère-terre de carbone, est induit par une amplification d'environ 10 % (seulement !) par rapport au cycle préindustriel.

À l'échelle locale des écosystèmes, la circulation de l'azote présente un tableau très différent (figure 7). Les processus d'échanges entre l'atmosphère et la terre ou la biosphère sont très minoritaires par rapport aux échanges entre terre et biosphère et au sein de la biosphère. Ainsi, si un atome d'azote est fixé par une bactérie sous forme d'azote réactif dans un écosystème terrestre, son temps de résidence sous forme réactive, avant retour à l'atmosphère, est d'environ 500 ans (Gruber & Galloway, 2008). La circulation de l'azote à l'échelle d'un écosystème correspond donc essentiellement à un cycle fermé : l'azote est échangé entre organismes, autotrophes vis-à-vis de l'azote, qui prélèvent de l'azote minéral dans leur environnement et le convertissent en azote organique (typiquement les plantes) et organismes hétérotrophes — vis-à-vis de l'azote — qui consomment l'azote organique produit par les autotrophes et l'excrètent sous forme d'azote minéral (typiquement les animaux). Seul 0,2 % du total d'azote réactif participe à l'ouverture du cycle, c'est-à-dire la perte de l'azote pour cet écosystème et le déclenchement de la cascade de l'azote par son export (lessivage sous forme de nitrates, volatilisation ammoniacale, etc.) avant, *in fine*, son retour à l'atmosphère sous forme inerte.

La perturbation du cycle biogéochimique global de l'azote est due au fait que les anthroposystèmes industriels — contrairement à la majorité des écosystèmes non anthropisés — fonctionnent aujourd'hui de manière essentiellement ouverte. C'est en particulier le cas des systèmes alimentation/excrétion des sociétés industrielles. Ainsi, pour permettre l'approvisionnement alimentaire d'un Parisien d'environ 5 kgN/an, plus de trois fois plus d'azote réactif (environ 17 kgN/an) sont émis en amont par les agrosystèmes dans l'environnement (Esculier et al. 2019). En outre, ce système alimentation/excrétion est majoritairement linéaire : alors que la quantité

totale d'azote excrétée par un individu est la même que la quantité totale d'azote ingérée, le taux de valorisation de cet azote réactif n'est que de 5 % dans le cas de Paris. La dénitrification, opérée en station de traitement des eaux usées, envoie l'azote réactif excrété par les humains sous forme majoritairement inerte dans l'atmosphère. Elle participe donc d'un

cycle de l'azote ouvert, certes moins dommageable que si l'azote était rejeté sous forme réactive dans l'environnement, comme c'est malheureusement le cas dans la majorité des villes du monde, mais très loin d'un cycle fermé et d'un système alimentation/excrétion circulaire dans lequel la majorité de l'azote réactif est retourné aux sols agricoles.

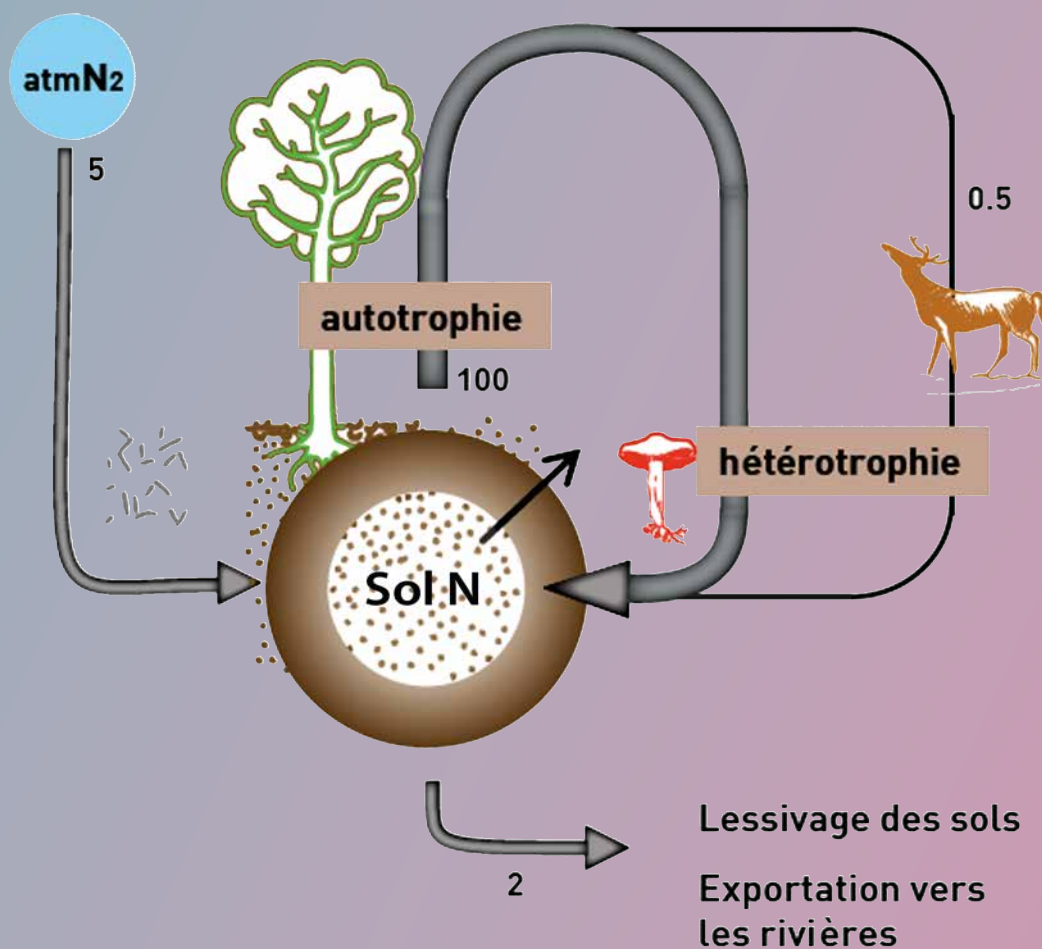


Figure 7. Le cycle de l'azote dans une forêt tempérée (flux d'azote associés au métabolisme des principaux groupes fonctionnels, en kgN/ha/an) (Billen et al. 2011).



CHAPITRE 2



Le métabolisme parisien au début du XXI^e siècle

La fin du XX^e siècle peut être considérée comme l'apogée du régime socio-écologique industriel. Au même moment, les lois de protection de l'environnement se multiplient à l'échelle nationale comme à l'échelle européenne : loi sur l'eau de 1964, qui instaure les agences de bassin et le principe de pollueur-payeur, puis loi sur l'eau de 1992, qui accélère le processus enclenché en 1964, directive eaux résiduaires urbaines et directive nitrates en 1991, lois sur les déchets de 1975, qui met l'accent sur la nécessité du recyclage avec bien peu d'effets, et de 1992, cette dernière instaurant la notion de déchets ultimes, seuls à pouvoir être mis en décharge à l'horizon 2002, loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie de 1996, etc.

Le début du XXI^e siècle voit les textes se multiplier : directive cadre sur l'eau en 2000, loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006, loi sur les déchets de 2008, auxquelles s'ajoutent les deux lois Grenelle et enfin la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte de 2015, les accords de Paris de la COP21 pour le climat

en 2017, la loi sur le gaspillage et l'économie circulaire en 2020, la loi climat et résilience en 2021. À l'échelle de l'agglomération parisienne, les collectivités — ville de Paris, Métropole du Grand Paris, intercommunalités, région — ne sont pas en reste et de nombreux dispositifs se revendiquent d'une nécessaire transition énergétique ou écologique selon le cas.

Cette liste non exhaustive traduit une sorte d'emballlement dont les effets restent ténus au regard de l'accélération des changements environnementaux et de leurs effets sur la biosphère et les sociétés humaines. L'analyse du métabolisme urbain contemporain traduit bien ce décalage existant entre les intentions affichées des politiques publiques et l'insoutenabilité des pressions exercées sur la biosphère, que l'on considère le métabolisme dans son ensemble ou des flux spécifiques, ici ceux qui sont associés au système alimentation/excrétion, qui comprend un volet amont (agroalimentaire) et un volet aval (excrétats).

1. Le poids de l'agglomération parisienne

Si la caractérisation du métabolisme urbain dans toutes ses dimensions, en particulier quantitatives, est difficile pour les périodes passées, certaines données faisant défaut, elle est envisageable aujourd'hui, malgré le manque d'exhaustivité et l'imprécision des sources dont nous pouvons disposer. La déclinaison à l'échelle de la région Île-de-France de la méthode mise au point par le Service européen de la statistique (dite méthode Eurostat) donne une image de ce que pèse, au sens littéral du terme, le fonctionnement de la Région. La figure 8 illustre ainsi son bilan de matières brutes pour l'année 2015 (Augiseau, Barles, 2018). On note ainsi :

- la très forte dépendance de la région vis-à-vis de l'extérieur, les importations représentant 73 % des entrées directes de matières, ce qui confirme le principe d'externalisation évoqué dans le premier chapitre ;
- l'importance des consommations finales, qui s'élèvent à 5,1 t/hab/an, soit un peu plus de 60 % des entrées directes de matières (somme de l'extraction locale et des importations), qui ne doit pas cacher le rôle d'échangeur de matières joué par la région puisque le reste est exporté vers d'autres régions et pays ;
- la part considérable des émissions vers la nature, qui illustre la linéarisation du métabolisme urbain (et social en général), soit un peu plus de 70 % des entrées directes de matières, ces émissions étant composées à 76 % d'émissions atmosphériques, dont 90 % de dioxyde de carbone, ce qui relativise l'accent mis sur le recyclage dans la quête de la circularité ;
- le rôle mineur du recyclage (0,8 t/hab/an), qui évite actuellement moins de 10 % de consommation de matières et produits neufs ;
- la croissance notable du stock : l'agglomération parisienne est considérée, au regard de son développement et de son niveau d'équipement, comme une agglomération mature, dont la croissance est aujourd'hui limitée (sans être pour autant nulle) et qui est dotée de l'essentiel des infrastructures jugées nécessaires à son fonctionnement. Pourtant, le stock augmente encore de 2 t/hab/an, alors qu'il s'élève, pour les seuls bâtiments et infrastructures, à un peu plus de 200 t/hab (Augiseau, Barles, 2018), soit une croissance de 1 % par an ;

- le poids considérable des flux indirects (près de 31 t/hab/an pour les seules importations), autre traduction de l'externalisation du métabolisme urbain : ils sont cinq fois plus élevés que les importations directes, ce qui montre que l'impact environnemental de la région est plus important à l'extérieur de ses limites qu'à l'intérieur de celles-ci.

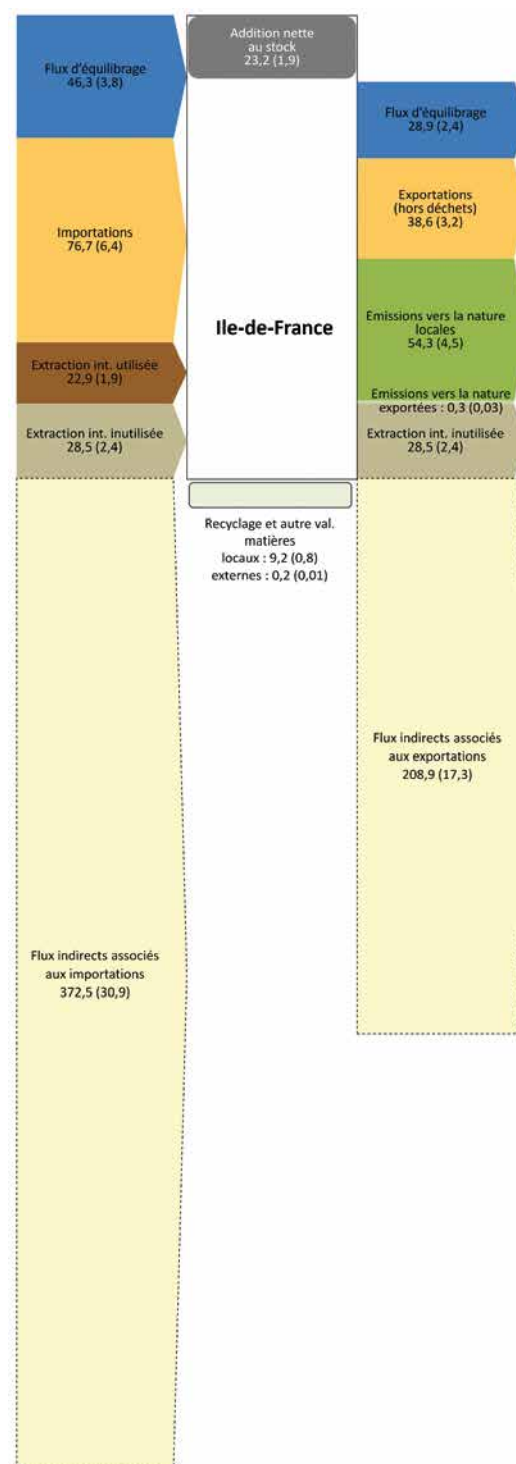


Figure 8. Bilan de matières brutes, Île-de-France, 2015, Mt/an et, entre parenthèses, t/hab/an (Augiseau, Barles, 2018).

En complément, plusieurs indicateurs peuvent être établis afin d'estimer la pression exercée par l'Île-de-France sur les ressources et de comparer sa consommation apparente à sa consommation réelle de matières (tableau 5). La première constitue un indicateur très usité qui permet en apparence (en effet) de rendre compte de la consommation matérielle effectuée au sein d'un territoire donné. Cet indicateur est néanmoins biaisé, car il ne prend pas en compte certaines consommations non économiques qui pourtant pèsent dans le bilan. Il s'agit principalement, en entrée, de l'oxygène consommé par la respiration humaine et animale et par la combustion, de l'azote de l'air mobilisé par les usines de production de composés azotés (dont les engrais, en grande partie) et, en sortie, du dioxyde de carbone et de l'eau émis par la respiration humaine et animale et de l'eau produite par la combustion (le dioxyde de carbone étant déjà comptabilisé dans les émissions atmosphériques). Il est essentiel de prendre en compte ces

flux pour équilibrer le bilan car, sans eux, il est impossible d'appliquer la loi de conservation de la masse. Au total, la consommation physique au sein de la région est supérieure de 28 % à la consommation apparente. En d'autres termes, l'indicateur classique de consommation intérieure (ou apparente) conduit à minimiser la consommation matérielle des territoires. En outre, la prise en compte des flux indirects permet de convertir la consommation physique en équivalent matières premières : il faut ainsi multiplier par quatre la consommation apparente et par trois la consommation physique pour obtenir cet équivalent qui s'élève à 20 t/hab/an. Ces chiffres peuvent être comparés aux données mondiales concernant l'extraction de matières premières : 12,1 t/hab en 2015 (Krausmann et al., 2018). La consommation francilienne par habitant est donc supérieure de 65 % à la consommation moyenne mondiale.

	Mt	t/hab
Consommation apparente = Extraction locale + importations – exportations	60,7	5,1
Consommation physique = Extraction locale + importations + flux d'équilibrage entrant – exportations – flux d'équilibrage sortant	78,2	6,5
Consommation physique en équivalent matières premières = Extraction locale + flux d'équilibrage entrant + flux indirects associés aux importations – exportations – flux d'équilibrage sortant – flux indirects associés aux exportations	241,8	20,0
Consommation totale = Consommation physique en équivalent matières premières + extraction locale inutilisée	270,3	22,4
Addition nette au stock = Extraction locale + importations + flux d'équilibrage entrant – exportations – flux d'équilibrage sortant – émissions vers la nature	23,2	1,9

Tableau 5. Consommation matérielle, Ile-de-France, 2015, Mt et t/hab (Augiseau, Barles, 2018).

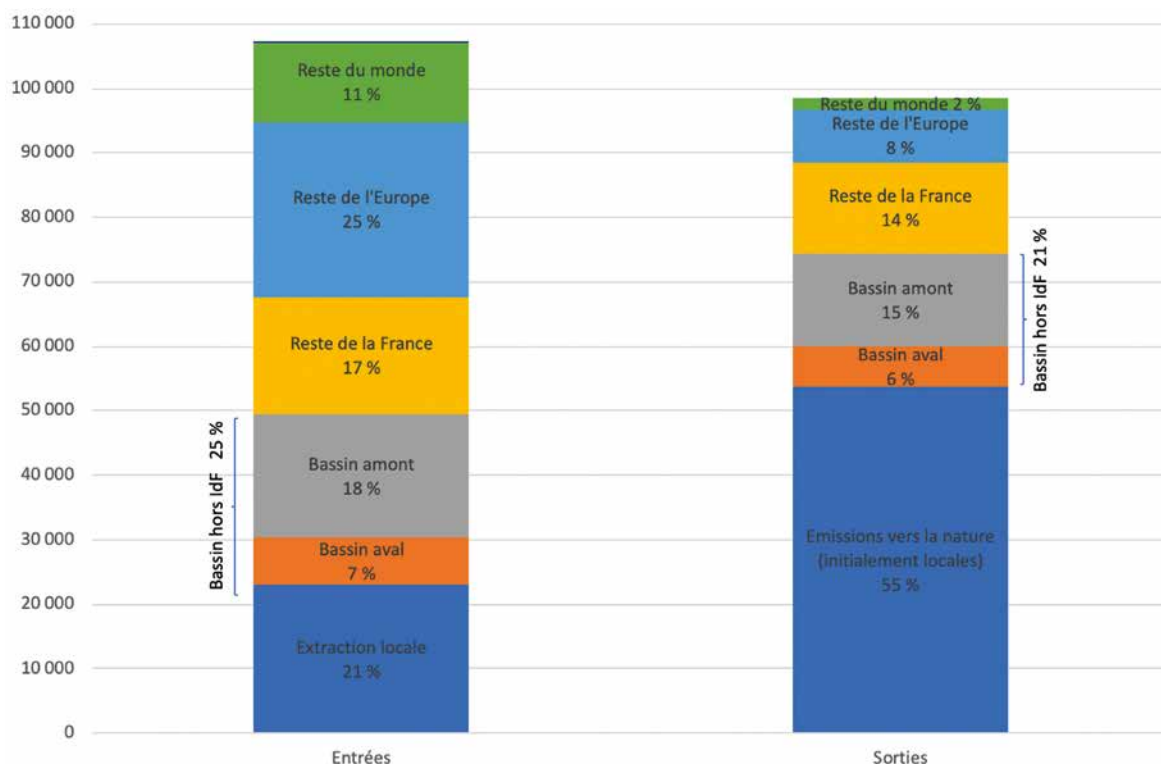


Figure 9. Origine et destination des flux de matières, Île-de-France, 2015, kt/an.

Cette approche peut être complétée par une analyse spatialisée de l'origine et de la destination des flux de matières qui permet de localiser les flux indirects (figure 9). Si les importations extra-européennes restent limitées (11 %), la région s'avère très dépendante de l'Europe (25 % des importations, France exclue), mais reste inscrite dans le bassin séquanais (46 % des entrées, extraction locale comprise). Elle joue par ailleurs un rôle concentrateur puisque les flux qu'elle émet sont pour la plus grande part situés au sein de la Région (émissions vers la nature, à leur point d'émission), et pour les trois quarts dans le bassin de la Seine.

Ce bilan reflète bien les particularités du métabolisme urbain en général, et pour la période industrielle en particulier. Il montre aussi l'ampleur de la tâche à accomplir pour transformer le régime socio-écologique et l'engager dans une transition vers plus de circularité, plus de sobriété et plus de proximité. La prise en compte de l'énergie, que nous avons abordée au chapitre précédent, renforce ce constat.

Il est possible d'aller plus loin en déterminant les matières et produits constitutifs des flux qui composent le bilan (figure 10). Les trois flux majoritaires dans la consommation

apparente sont ainsi, par ordre d'importance, les matériaux de construction non métalliques, les combustibles fossiles et la biomasse. La conversion en équivalent matières premières fait en revanche passer la biomasse en tête des ressources consommées ce qui montre toute l'importance d'une meilleure gestion de ce flux et par conséquent du système agroalimentaire sur lequel nous reviendrons bientôt. En outre, si la consommation apparente de minéraux métalliques (et d'autres produits) est faible, elle devient significative dès lors que l'on raisonne en équivalent matières premières, de même que pour les autres produits : ceci résulte de l'externalisation des activités d'extraction et de production qui engendrent, ailleurs, de grandes quantités de déchets.

L'impact de l'extraction des matériaux de construction sur les systèmes aquatiques, celui de l'activité de construction et de l'urbanisation sur le cycle de l'eau méritent que l'on s'arrête sur ce flux spécifique qui est aujourd'hui à plus de 50 % importé dans la région et qui traduit bien les enjeux de la transition socio-écologique. Bien que l'agglomération parisienne soit considérée comme mature en termes métaboliques (*cf. supra*), et qu'elle soit engagée dans un processus important de renouvellement urbain (que l'on désigne dans le langage courant par l'expression « refaire

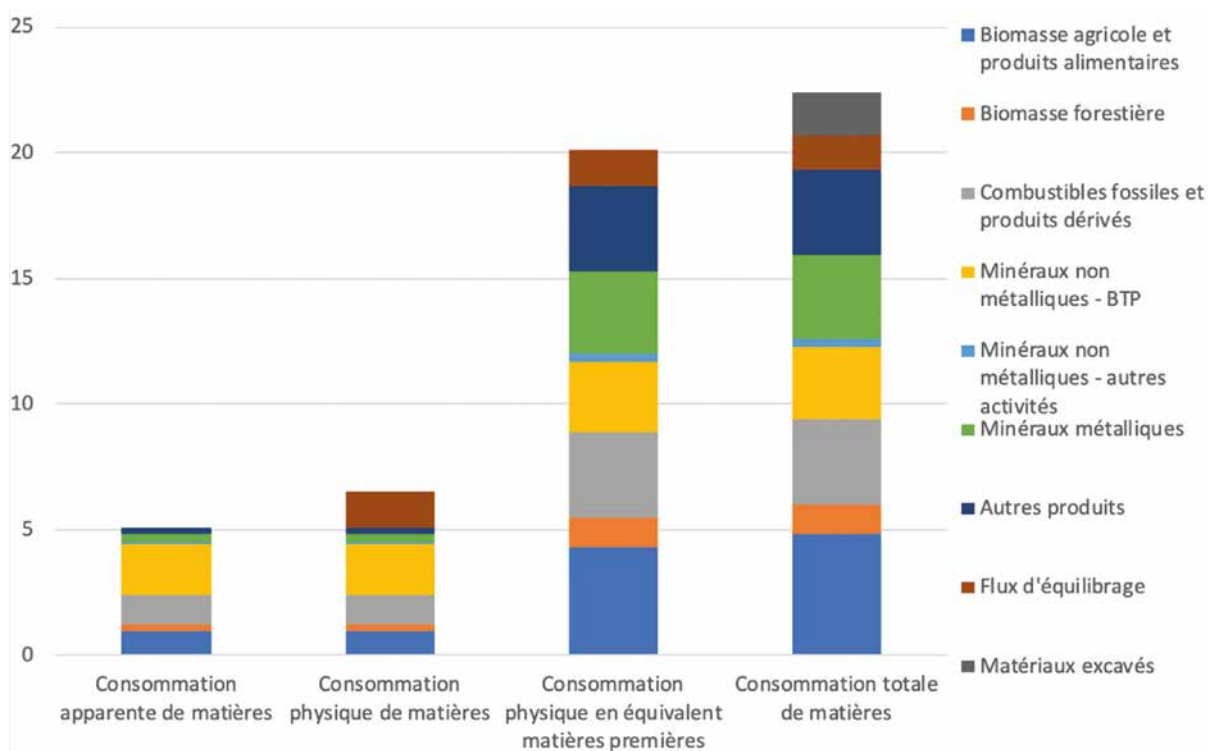


Figure 10. Indicateurs de consommation de matières par catégorie de ressources, Ile-de-France, 2015, t/hab (Augiseau, Barles, 2018).

la ville sur la ville »), la croissance du stock ne s'interrompt pas (figure 11) et les opérations de démolition ne mettent sur le marché « que » 0,7 t/hab/an de déchets. Un recyclage (très optimiste) de 50 % ne contribuerait ainsi qu'à 22 % de l'addition nette au stock. Ceci montre la limite du principe porté par l'écologie industrielle et repris par l'économie circulaire selon lequel la sobriété matérielle (ou dématérialisation, c'est-à-dire la diminution des prélèvements de ressources neuves) pourra être obtenue

grâce au développement du recyclage : celui-ci est certes nécessaire, mais très loin d'être suffisant. Dans le domaine des matériaux de construction, la sobriété passe donc par une réflexion de fond sur l'urbanisme, les formes et la morphologie urbaine, notamment en vue d'une réduction des consommations dues aux infrastructures linéaires. Elle nécessite aussi un travail sur la nature des matériaux consommés, dont les impacts directs et indirects sont très variables.

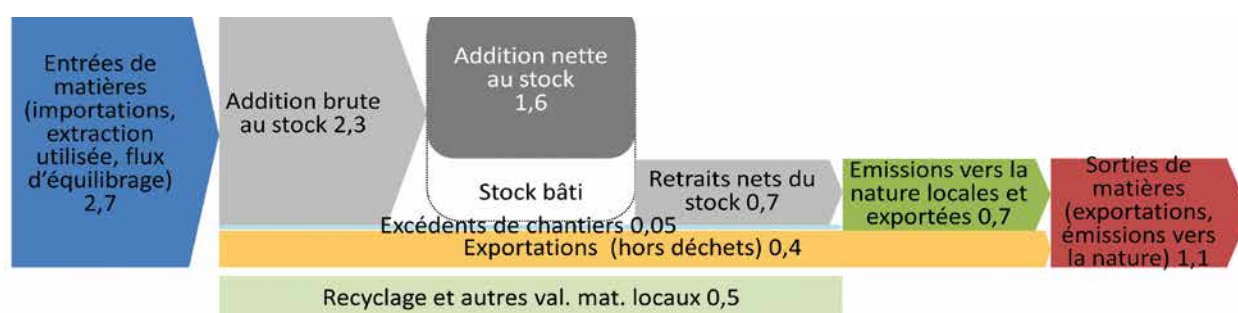


Figure 11. Flux de matériaux de construction et sorties vers la nature associées, par Francilien et pour l'année 2015, exprimé en t/hab/an (Augiseau, Barles, 2018).



Le bilan de matières tel qu'établi selon la méthode Eurostat ne prend pas en compte les consommations directes ou indirectes d'eau. On peut le compléter par une estimation de celles-ci, réduite ici aux consommations directes (tableau 6). Malgré la décroissance récente des prélèvements d'eau dédiée à la potabilisation observée à l'échelle nationale (– 15 % entre 2003 et 2013, et – 20 % par habitant (SOEs, 2017)) comme à l'échelle de l'agglomération parisienne, l'empreinte hydrique, qui

représente la surface de ruissellement correspondant aux volumes prélevés, reste significative et dépasse 600 m²/hab en 2018. Elle dépasse ainsi largement les limites de l'agglomération (ici entendue comme l'unité urbaine de Paris au sens de l'INSEE⁶). Malgré la diminution de la consommation d'eau, cette empreinte est appelée à s'étendre du fait de l'effet combiné de l'augmentation de la population et de la baisse de la pluviométrie.

		1801	1896	2018	2050
Agglomération parisienne	Population (milliers)	548	3 340	10 785	15 000
	Surface (km ²)	34	473	2 845	3 401
Prélèvements d'eau	(Mm ³ /an)	3	268	1 000	1 391
	(l/hab/j)	14	220	254	254
Empreinte hydrique urbaine	(km ²)	19	1 788	6 667	11 590
	(m ² /hab)	34	535	618	773
	(% surface agglo)	55	378	234	341
	(% surface bassin versant)	0,02	2,3	8	15

Tableau 6. Empreinte hydrique directe de l'agglomération parisienne, 1801-2050
(Barles, 2019, révisé pour le présent fascicule).

NB. On se base sur une pluviométrie annuelle moyenne de 750 mm/an et un ruissellement de 20 %. Pour 2050, la pluviométrie est ramenée à 600 mm/an et l'on considère que la consommation unitaire reste constante. Ces chiffres sont tirés des travaux pilotés par Agnès Ducharne et al. (2003) et de ceux du PIREN-Seine. Les prélèvements sont connus pour 1801 et 1896 grâce à diverses sources historiques. Pour 2018, les prélèvements unitaires sont estimés sur la base des chiffres d'Eau de Paris et du SEDIF (moyenne pondérée des prélèvements, y compris l'eau non potable pour la ville de Paris), et appliqués à l'ensemble de l'unité urbaine de Paris. On suppose qu'en 1801 l'agglomération parisienne est contenue dans Paris et dans le département de la Seine en 1896. Pour 2018 on retient l'unité urbaine de Paris. La prévision de population est celle du Grand Paris, et l'on suppose un rythme de croissance spatiale deux fois moindre que celui de la population (combinaison de densification et d'expansion spatiale).

⁶ Commune ou ensemble de communes présentant une zone de bâti continu (pas de coupure de plus de 200 m entre deux constructions) qui compte au moins 2 000 habitants.

2. Le système agroalimentaire

Nous avons vu que les politiques de modernisation de l'agriculture menées durant les trente années d'après-guerre ont entraîné une spécialisation régionale extrême de l'agriculture française (Müller, 1984) qui a conduit mécaniquement à un éclatement de l'approvisionnement alimentaire de l'agglomération parisienne. On peut distinguer aujourd'hui cinq grandes zones d'approvisionnement caractérisées par différents types de systèmes agricoles (figure 6, chap.1). Les protéines végétales consommées à Paris proviennent pour plus de 80 % du centre du Bassin parisien, devenu une région de grandes cultures céréalières, sans élevage, utilisant massivement les engrais de synthèse et les pesticides ; Paris ne représente plus qu'un débouché mineur pour la production agricole de cette région, tournée principalement vers l'exportation (Le Noë et al., 2016). L'approvisionnement en protéines animales est beaucoup plus éparé ; la moitié provient du Grand-Ouest français (Bretagne, Pays de la Loire) et de quelques pays limitrophes (Espagne, Belgique, Pays-Bas). Ces régions se sont tournées vers un élevage intensif, largement dépendant de l'importation de soja en provenance d'Amérique du Sud, et constituent la première aire d'approvisionnement en protéines animales de l'Ile-de-France. Les pays exportateurs de soja, étroitement impliqués dans le fonctionnement du système agro-alimentaire de cette aire, en font ainsi partie intégrante. Le reste des protéines animales consommées en Ile-de-France est importé depuis des régions (Bourgogne, Loire amont) qui sont restées dans le système de polyculture-élevage ; ces régions ont pour caractéristique commune d'être relativement autonomes pour l'alimentation du bétail. Néanmoins, on différencie les régions de polyculture-élevage herbagère dans lesquelles les animaux tirent plus de 60 % de leur alimentation du pâturage de l'herbe, des régions de polyculture-élevage fourragères dans lesquelles les animaux sont nourris à plus de 40 % par la production des terres arables locales (souvent cependant avec un complément de protéagineux importés).

L'analyse du fonctionnement du système agricole permet d'établir le bilan des surfaces, des ressources consommées et des pertes environnementales engendrées dans chaque région pourvoyeuse de denrées agricoles pour la population francilienne. L'empreinte alimentaire des Franciliens est alors définie comme la part de ces consommations de

ressources et de ces pertes environnementales imputables à leur approvisionnement (figure 6, chap.1).

Le régime alimentaire des habitants de l'agglomération parisienne est aujourd'hui constitué pour deux tiers d'azote protéique d'origine animale, malgré la très grande variété des pratiques alimentaires (encadré 3). Or, les systèmes agricoles de production de nourriture d'origine animale alimentant Paris ont beaucoup plus d'impacts environnementaux que les systèmes de production végétale. Ainsi, le tiers du régime alimentaire, constitué de produits végétaux, provient majoritairement de 150 m² de cultures céréalières du bassin parisien tandis que les systèmes de production animale sont constitués de 500 m² de cultures de soja en Amérique du Sud, 2 000 m² de prairies (principalement dans le Grand-Est) et 2 000 m² de cultures fourragères (principalement dans le Grand-Ouest et le Grand-Est). La représentation graphique comparée de ces empreintes spatiales est particulièrement frappante (figure 6, chap.1).

L'utilisation majoritaire d'engrais azotés de synthèse induit une consommation totale d'une vingtaine de kilogrammes d'azote par personne et par an, dont 90 % sont destinés à la production animale. Finalement, seuls 5 kg d'azote sont réellement ingérés par habitant. L'empreinte environnementale mesurée en termes de flux polluants d'azote dans les milieux aquatiques est également très contrastée : 0,4 kg d'azote par personne et par an pour les systèmes de production végétale (principalement sous forme de nitrates lixiviés vers l'hydrosystème, avec quelques pour cent émis en protoxyde d'azote (N₂O), un puissant gaz à effet de serre), contre plus de 17 kg d'azote par personne et par an pour les systèmes de production animale (principalement sous forme de nitrates et d'émissions gazeuses d'ammoniac (NH₃)). Ces impacts sont désormais presque tous externalisés, c'est-à-dire que les impacts environnementaux de l'empreinte biogéochimique du métabolisme des Parisiens ont des retombées directes très faibles sur le territoire même de l'agglomération parisienne et se situent à d'autres échelles que celle du territoire urbain (export de nutriments vers les nappes ou vers les rivières et la mer, volatilisation de NH₃ sur les territoires agricoles, émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial, etc.). Cette externalisation rend difficile l'appréhension, par le citoyen, de son empreinte environnementale.



Pourtant, les dommages environnementaux du système agroalimentaire actuel sont criants dans de nombreux domaines. La contamination des eaux souterraines et de surface a conduit à la fermeture de plus de 400 captages d'eau potable en France entre 1998 et 2008 (ADES eaufrance Référentiel AEP : <https://ades.eaufrance.fr/Recherche>) et est aujourd'hui la principale cause de dégradation de la qualité des eaux pour la potabilisation. Des voix de plus en plus nombreuses s'élèvent contre l'usage des pesticides en raison des risques sanitaires, trop souvent avérés, qu'ils font courir aux agriculteurs et à la population, et des dommages qu'ils causent aux insectes pollinisateurs et à la biodiversité en général. En matière de changement climatique, l'agriculture est aujourd'hui responsable de plus de 20 % des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle du bassin de la Seine (Marescaux et al., 2018).

L'agriculture biologique a pour principe de ne pas recourir aux engrais et aux pesticides de synthèse. Ce système agricole alternatif est basé sur des rotations culturales longues (huit à onze ans) dans lesquelles les légumineuses (fourragères et à graines) occupent une place importante (deux à quatre ans) et constituent une source d'azote suffisante pour l'ensemble des cultures. La diversité de celles-ci suffit pour se passer des pesticides, sans perte majeure de productivité à l'échelle du cycle cultural tout entier. L'agriculture biologique n'intéresse aujourd'hui que 4 % de la surface agricole du bassin de la Seine, mais est en plein essor, tirée par des consommateurs de plus en plus demandeurs. À l'autre bout de la chaîne, la transformation des régimes alimentaires semble être l'une des clefs de la transition vers un système agroalimentaire soutenable.

Les pratiques alimentaires et leurs enjeux métaboliques

Le fait que l'alimentation soit un enjeu environnemental s'est imposé au cours des dernières décennies. La consommation de viande est ainsi devenue un thème emblématique du changement climatique qui conduit à questionner les pratiques alimentaires. Au-delà de cet exemple, les études sur les comportements alimentaires montrent a) que les considérants qualitatifs —dont l'environnement, mais pas uniquement— deviennent de plus en plus prégnants dans les choix des consommateurs ; b) que ces derniers, selon leur profil, mobilisent des critères différents alors que tous pourront se réclamer d'une alimentation durable ; c) que ces différentes attentes alimentaires renvoient à une logique de segmentation de l'offre par les acteurs agroindustriels et de la distribution.

La figure 12 propose une analyse de la manière dont les attentes des consommateurs s'expriment et met en regard une offre plus ou moins qualifiée face à cette demande. Elle se lit de la manière suivante : en colonnes, diverses catégories de consommateurs telles que définies par les travaux du CREDOC (Blézat consulting et al., 2017) ; en lignes, les niveaux géographiques d'où peuvent être originaires les produits ; le code couleur, gradient entre le vert et le rouge, indique un impact environnemental estimé, à comprendre sur un plan qualitatif. L'analyse suggérée est que la certification en

agriculture biologique et, de manière plus ambivalente, la proximité géographique sont seules susceptibles d'avoir une exigence environnementale spécifique.

Un lien entre cette figure et une problématique de métabolisme agricole se fait à travers l'analyse de l'impact environnemental. Ce dernier dépend en grande partie de l'intensité de flux d'intrants mobilisés pour obtenir un produit selon une logique ou une autre. Mais ce qui ressort mal de cette approche par filière, c'est que la capacité de fermeture des cycles de nutriments dépend aussi de la diversité et de la nature des aliments consommés. Pour réduire l'intensité des intrants importés nécessaires à la production agricole, il faut combiner productions végétales et animales, et notamment pour ces dernières celles nourries sur des prairies et des légumineuses fourragères. Cette complémentarité agronomique doit se refléter, à un niveau ou un autre, dans l'assiette des consommateurs, ce que les approches « verticales » par filières de produits spécialisées intègrent difficilement. Dans cette optique, il devient nécessaire de comprendre les enjeux agronomiques et environnementaux associés à chacune des familles d'aliments, mais aussi dans l'ensemble des paniers d'aliments.



	BIO	Locavore	Proximité appartenance	Hédoniste label	Hédoniste marque	Désinvesti
Local/Régional	Agriculture biologique	Environnement sans label Qualité label Qualité marque (locale)	Environnement sans label Qualité label origine Qualité marque locale	Qualité label (tradition)	Qualité marque Certif. environnement privée	Commodité
France	Agriculture biologique		Environnement sans label Qualité label France Qualité marque France	Qualité label (tradition)	Qualité marque Certif. environnement privée	Commodité
Europe/Monde	Agriculture biologique		Environnement sans label Qualité label Qualité marque	Qualité label (tradition)	Qualité marque Certif. environnement privée	Commodité


Positif **Négatif** Impact environnemental estimé

Figure 12. Aujourd'hui : diversité des pratiques et segmentation de l'offre alimentaire.

3. L'excrétion, en aval de l'alimentation

Dans la plupart des cas, la notion de système alimentaire concerne les ressources mobilisées pour la production agricole, cette production en elle-même puis les transports et transformations jusqu'à l'alimentation des êtres humains auxquels ce système doit son existence. La notion de système alimentation/excrétion vise à expliciter que le système se prolonge au-delà de l'alimentation par l'excrétion. Depuis plus d'un siècle que l'évacuation des urines et matières fécales humaines par la toilette à chasse d'eau et le tout-à-l'égout est entrée dans les mœurs, l'excrétion humaine n'est souvent plus perçue que comme un enjeu d'hygiène urbaine, occultant son autre caractéristique qui est sa participation — potentielle ! — aux systèmes alimentaires et à la fermeture des cycles biogéochimiques.

En ce qui concerne le carbone, les échanges atmosphériques permettent une assez bonne fermeture du cycle : les plantes cultivées fixent le dioxyde de carbone atmosphérique grâce à la photosynthèse et émettent le dioxygène ; les humains inspirent de l'oxygène et brûlent le carbone alimentaire ingéré en expirant du dioxyde de carbone. La boucle est majoritairement bouclée sans difficulté. Pour tous les autres nutriments, les excréments humains sont principalement liquides (urines) ou solides (féces). Le potentiel de circularité est proche de 100 %, car le corps humain ne stocke pas de nutriments⁷ et les substances excrétées peuvent être facilement assimilées par les plantes. Bien que cela ne soit souvent pas intuitif, la majorité des matières sont excrétées via les urines, dont le potentiel de transmission de pathogènes est en outre beaucoup plus faible que celui des féces (figure 13).

Si la valorisation effective des urines et matières fécales humaines a augmenté au cours du XIX^e siècle puis décliné tout au long du XX^e siècle (cf. figure 3, chap. 1), les modalités de gestion ont été très fortement marquées par la mise en place des toilettes à chasse d'eau. En effet, à partir du moment où l'eau courante est distribuée dans les logements, les particuliers trouvent que l'évacuation des urines et matières fécales par la toilette à chasse d'eau

est pratique : inodore, incolore, indolore⁸. Les champs d'épandage des eaux d'égout permettent finalement de concilier cette praticité plébiscitée par l'utilisateur avec la recherche de valorisation des excréments. Mais lorsque ce retour au sol n'est plus prioritaire, la toilette à chasse d'eau et le tout-à-l'égout — désormais institués et adoptés progressivement comme mode exclusif de gestion dans toutes les zones urbaines — condamnent pour un siècle la Seine à un mauvais état écologique et sanitaire, tout en faisant sortir les excréments humains de la conscience collective.

Les eaux d'égout devenant une charge, la mise en œuvre des traitements en stations d'épuration a été constamment retardée et principalement considérée sous un angle curatif et linéaire. Sur la fraction des eaux qui vont en station, seul le carbone fait l'objet d'un traitement dans toutes les stations jusqu'aux années 2000. La valorisation par méthanisation d'une fraction de ce carbone est même effective depuis les années 1940. Mais la boue activée, par principe, envoie une grande partie de ce carbone sous forme de dioxyde de carbone dans l'atmosphère avec une valorisation limitée. Seules les obligations européennes de la directive eaux résiduaires urbaines de 1991, appliquées dans l'agglomération parisienne avec près de quinze ans de retard et après de nombreux contentieux en justice, semblent avoir réellement permis la mise en place du système d'assainissement très poussé que nous connaissons actuellement.

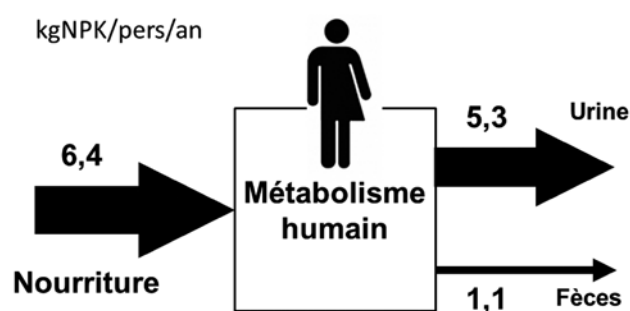


Figure 13. Flux d'azote (N), de phosphore (P) et de potassium (K) de l'alimentation et de l'excrétion d'un adulte (régime alimentaire moyen français).

⁷ Il y a un peu de stockage de nutriments dans le corps pendant la période de croissance (enfance et adolescence) mais même durant celle-ci, les flux d'alimentation et d'excrétion surpassent très largement les flux de stockage corporel (Esculier, 2018 – p. 56).

⁸ Blocage des odeurs de l'égout par le siphon hydraulique (inodore), chasse qui nettoie la cuvette (incolore) en plus de permettre le transport au lieu d'un transport manuel (indolore).

Le système de gestion des urines et matières fécales humaines de l'agglomération parisienne respecte en effet désormais les obligations réglementaires minimales. Le taux de déversements directs en rivière par les égouts est estimé inférieur à 5 %, les taux de traitement de l'azote et du phosphore respectent les seuils respectifs de 70 % et 80 %. Ces traitements permettent presque aujourd'hui de respecter les critères du bon état physico-chimique de la Seine. L'amélioration de la qualité de l'eau des milieux récepteurs se fait toutefois au détriment du recyclage des nutriments et des émissions de gaz à effet de serre.

Le devenir de l'azote des excréments — principalement urinaires — des habitants de l'agglomération parisienne illustre bien ce paradoxe par au moins trois aspects :

➤ Cet azote est principalement retourné à l'atmosphère sous forme de diazote (N_2). Seuls 5 % de l'azote réactif des excréments est valorisé par l'épandage des boues, alors même que les usines de synthèse d'engrais azotés effectuent la réaction inverse des stations de traitement de nos excréments en fixant, à grand renfort d'hydrocarbures fossiles, ce diazote atmosphérique en azote réactif similaire à celui de nos excréments (Esculier, 2018) ;

➤ Les seuils réglementaires relatifs à l'azote sont peu exigeants dans les déclinaisons françaises de la directive eaux résiduaires urbaines de 1991 et de la directive cadre sur l'eau de 2000. À partir de 10 000 habitants, les agglomérations doivent retirer 70 % de l'azote avant rejet des eaux usées. Pour une agglomération de plus de 10 000 000 d'habitants comme l'agglomération parisienne, il est donc réglementairement possible de déverser en Seine — sous forme de nitrates — l'azote réactif des excréments de l'équivalent de plus de trois millions d'habitants. Et le seuil du bon état physico-chimique pour le nitrate, fixé à 50 mg/l — alors qu'un seuil entre 2,5 et 10 mg/l semble davantage correspondre à l'esprit de la directive cadre sur l'eau de 2000 et au choix d'autres pays (Meybeck, 2005) — rend réglementairement possible ces transferts d'azote vers les hydrosystèmes ;

➤ La nitrification/dénitrification opérée en station d'épuration émet d'importantes quantités de N_2O : environ 2 % de tout l'azote entrant (Bollon et al., 2016). Pour un opérateur d'assainissement comme le SIAAP, la prise en compte de ce gaz triple le bilan des gaz à effet de serre, exprimé en CO_2 équivalent comprenant tous les autres postes d'émission.

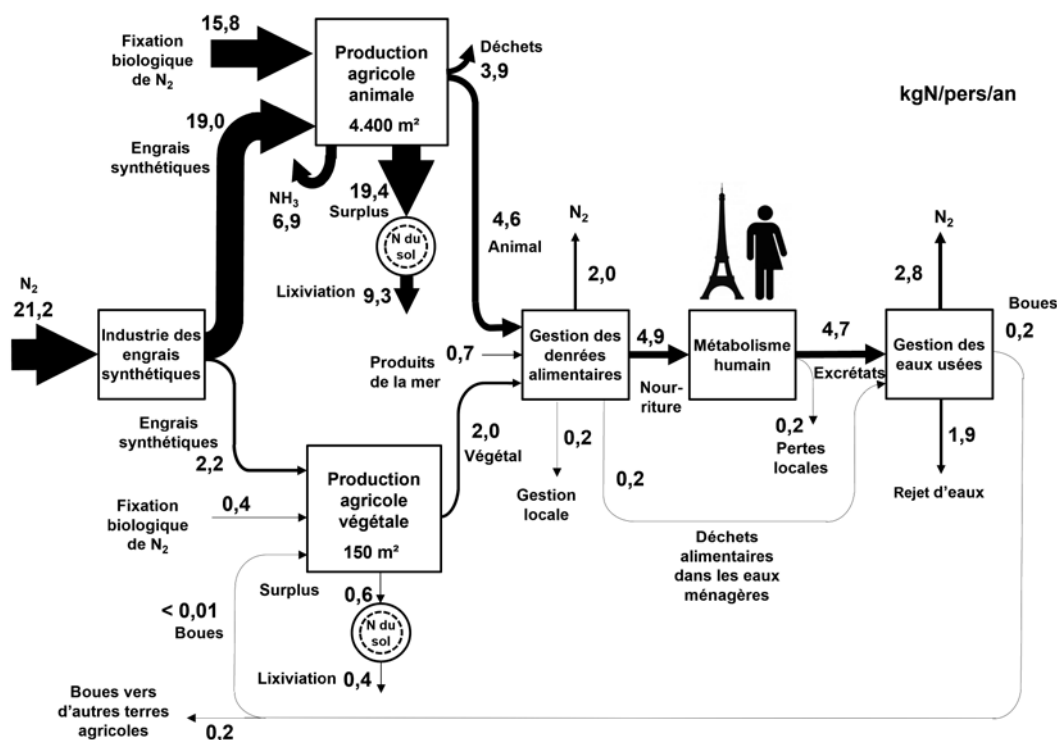


Figure 14a. Le système alimentation-excrétion de l'agglomération parisienne, 2013, kgN/pers/an (Esculier et al., 2019).

La limitation des rejets phosphorés en rivière est davantage congruente avec le retour au sol de ce nutriment. Piégé dans les boues par précipitation, le phosphore est retourné au sol à proportion de l'épandage des boues. Or l'incinération des boues s'est beaucoup développée à partir des années 1970 et, si le phosphore est traité à 82 %, son taux de recyclage n'est que de 41 % (Esculier et al., 2018). Quant aux autres nutriments d'intérêt présents dans nos excréments (potassium, iode, sélénium, etc.), ils sont presque totalement occultés, en particulier du fait de l'absence d'impact constaté sur les milieux aquatiques. Ainsi, alors que le potassium est massivement extrait de mines fossiles pour fertiliser les champs, le taux de recyclage du potassium des excréments humains n'excède pas 2 % (Esculier, 2019).

Les autres excréments urbains du système alimentation/excrétion sont constitués par l'ensemble des restes alimentaires non consommés⁹. La fin du mutualisme entre Paris et son *hinterland* a abouti à la généralisation de leur incinération à partir des années 1970, en mélange avec la majorité des autres ordures ménagères, désormais non valorisables en agriculture (plastiques, piles, etc.). Au début du XXI^e siècle, la gestion des déchets alimentaires

urbains est essentiellement linéaire. La quasi-totalité des déchets alimentaires est incinérée, ce qui ne permet aucun recyclage de nutriments : le carbone et l'azote sont volatilisés, les autres nutriments se retrouvent dans les mâchefers et les cendres, en mélange avec de nombreux éléments indésirables en agriculture, qui sont par exemple utilisés en sous-couche routière (Esculier et al. 2018). Les années 2010 voient l'amorce d'un retour au sol des biodéchets urbains. La loi Grenelle II¹⁰ institue la collecte sélective et la valorisation des biodéchets pour les gros producteurs et la loi relative à la transition énergétique pour une croissance verte¹¹ l'étend à tous les citoyens (en théorie à partir de 2023 d'après la directive européenne biodéchets de 2018). La mise en œuvre de ces réglementations reste toutefois très progressive et aucun objectif de valorisation effective des nutriments des biodéchets n'est fixé. Compostage et méthanisation sont les deux principales filières de valorisation, mais la circularité dans la gestion des biodéchets dépend du soin qui est porté à correctement valoriser les nutriments (pertes azotées par volatilisation du compost ou des digestats, filières effectives de valorisation, etc.).

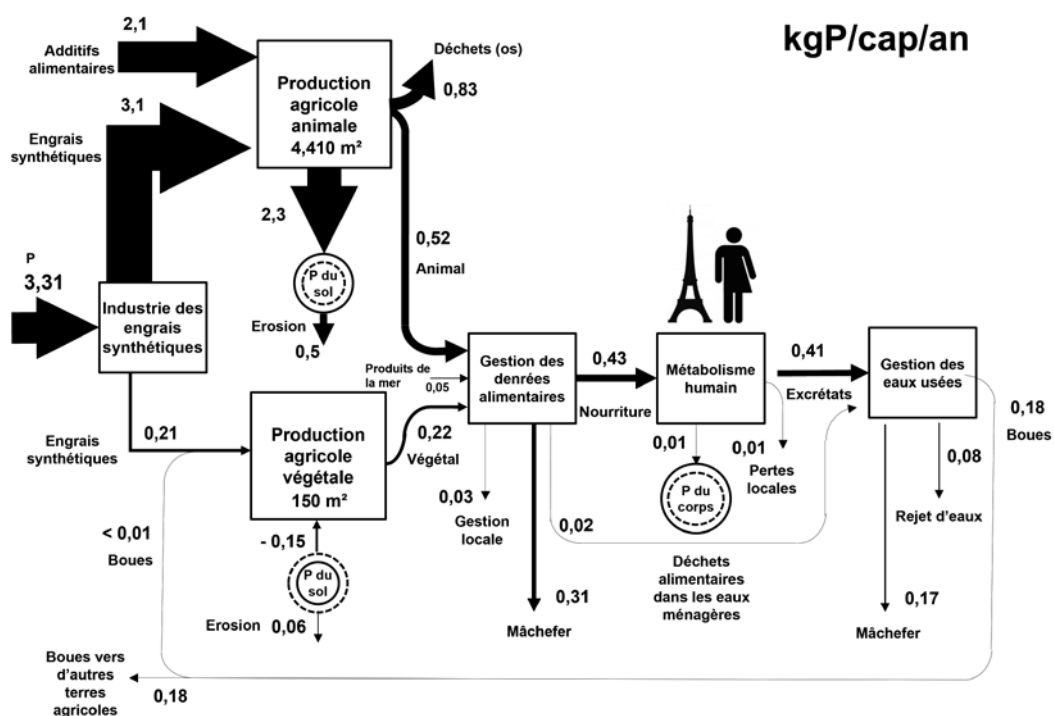


Figure 14b. Le système alimentation-excrétion de l'agglomération parisienne, 2013, kgP/pers/an (Esculier et al., 2019).

⁹ Les autres déchets organiques urbains sont principalement les déchets verts (majoritairement compostés) et les déchets de bois (valorisés en chaufferies ou dans l'industrie panneautière) (www.ordif.com).

¹⁰ Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010.

¹¹ Loi n° 2015-992 du 17 août 2015.

Conclusion : un régime socio-écologique linéaire et mondialisé

Alors que de nombreux discours évoquent la virtualité voire la dématérialisation de nos sociétés — monnaie virtuelle, réalité virtuelle, échanges dématérialisés, dématérialisation des procédures, autant d'expressions couramment employées —, celles-ci ne semblent jamais avoir été aussi matérielles au sens de la masse de ressources qu'elles mobilisent et de l'énergie considérable qui est nécessaire à cette fin. L'agglomération parisienne est emblématique de cette situation par sa taille, par le niveau de vie moyen de ses habitants, par l'importance des activités qui s'y déploient. Haut lieu des consommations finales, son métabolisme est à la fois linéaire et mondialisé.

Cette situation a des conséquences non négligeables en termes d'empreintes environnementales urbaines : plus morcelées, elles ne sont pas toujours plus grandes en étendue (empreinte spatiale), mais souvent plus profondes — au sens où leur impact est, lui, plus important, parce que plus dense. C'est particulièrement le cas de l'approvisionnement alimentaire : la surface nécessaire pour nourrir un Parisien est moins grande aujourd'hui qu'il y a deux cents ans ; cependant, elle concentre des intrants — engrais, pesticides — en quantités autrement plus importantes. L'empreinte en est plus profonde. Elle est partiellement mobile au gré de l'écoulement des fluides. En ce qui concerne les rejets, on peut affirmer que la dévalorisation

des excréments urbains ayant conduit à l'abandon de leur réutilisation a provoqué l'extension et la densification de l'empreinte environnementale aval des villes.

Il existe donc un écart très grand entre la recherche de circularité, qui revient comme une antienne dans les débats relatifs à la transition écologique, et l'absence constatée de celle-ci, et un écart tout aussi grand entre la recherche de proximité métabolique, de développement endogène, voire d'autonomie en matière d'approvisionnement et la déterritorialisation du métabolisme parisien. Bien sûr, des circuits courts se mettent en place, des projets alimentaires territoriaux, des schémas d'économie circulaire, mais le métabolisme de l'agglomération échappe en grande partie aux acteurs locaux, des citoyens aux collectivités.

Dans la gestion des excréments humains, comme dans celle des biodéchets, la valorisation énergétique par méthanisation est encouragée par la mise en place de subventions publiques. Si cette valorisation a sa pertinence¹², la valorisation des nutriments reste le parent pauvre de la gestion des excréments, alors que la France est totalement dépendante d'importations pour sa fertilisation azotée et phosphorée. Alors que le carbone alimentaire est principalement brûlé par notre corps pour nous permettre de vivre, les excréments du métabolisme humain — et donc du métabolisme urbain — contiennent *a contrario* l'intégralité des nutriments de l'approvisionnement et offrent un potentiel immense de création d'un mutualisme entre l'agglomération parisienne et les zones agricoles de son bassin.



¹² Elle reste néanmoins limitée. À titre d'exemple, le contenu énergétique du biogaz issu de la méthanisation de l'ensemble des biodéchets des ménages parisiens représenterait à peine 0,21 % de la consommation énergétique parisienne totale (Barles, 2019).



CHAPITRE 3



Quels futurs pour le métabolisme parisien ?

La trajectoire socio-écologique de l'agglomération parisienne telle qu'elle se dessine depuis deux à trois siècles aboutit à un régime industriel dont l'insoutenabilité peut difficilement être discutée et qui n'est pas propre à la région-capitale française, loin de là. Il est donc tentant d'aller plus loin et de se demander quelle(s) direction(s) pourrait prendre cette trajectoire. Un tel travail s'inscrit dans une démarche de prospective dont l'objectif n'est pas de prédire l'avenir, mais de contribuer aux réflexions présentes, ici sur le devenir du métabolisme urbain et

des relations que l'agglomération parisienne entretient avec son bassin. Cet exercice d'imagination sérieuse se nourrit non seulement de la connaissance de la trajectoire passée et de l'observation des tendances qu'elle permet d'identifier, mais aussi d'un dialogue avec les chercheurs et acteurs du bassin, et enfin de la compilation des éléments contextuels qui permettent d'inscrire l'objet de la prospective — le régime socio-écologique de l'agglomération parisienne — dans un ensemble plus vaste dont il est indissociable.

1. La construction des scénarios

Les travaux prospectifs du PIREN-Seine se sont, dans un premier temps, focalisés sur le système agroalimentaire compte tenu de son importance vis-à-vis de la qualité de l'eau dans le bassin séquanais. Cependant, quel que soit le scénario envisagé pour celui-ci, il sera dépendant et résultera en grande partie de choix ou d'événements qui lui sont en partie extérieurs ; il aura par ailleurs des conséquences qui dépassent le périmètre du régime agroalimentaire. De plus, si l'on se focalise sur la question de l'eau qui est au cœur des préoccupations du programme, force est de constater que le système agroalimentaire n'explique pas à lui seul l'état des milieux aquatiques et du réseau hydrographique. La demande urbaine joue elle aussi un rôle déterminant, de même que les choix en matière de transport (fluvial en particulier), les formes et la morphologie urbaine, les modes de consommation (autres qu'alimentaires), etc. Le choix a donc été fait d'inscrire la prospective agroalimentaire dans une démarche plus territorialisée permettant d'imaginer les

futurs de l'agglomération parisienne et du bassin de la Seine associés à ces scénarios¹³. Ces derniers reposent ainsi sur la prise en compte de sept composantes clefs : démographie, économie et social, gouvernance, aménagement, gestion de l'eau, énergie, modes de vie et pratiques alimentaires.

Deux scénarios ont jusqu'ici été élaborés à l'horizon 2050. Le premier s'inscrit dans un modèle libéral amplifiant le processus de métropolisation et l'ouverture et la spécialisation du système agroalimentaire. Sans être tout à fait tendanciel, il traduit une poursuite de la trajectoire socio-écologique décrite précédemment, caractérisée par un métabolisme intense, linéaire et mondialisé. Le second repose sur une écologie politique conduisant à une réorganisation territoriale au profit des villes petites et moyennes et promouvant un régime agroalimentaire demitarien biogéochimiquement autonome et ancré dans la proximité. Il suppose l'amplification de certains signaux faibles identifiables aujourd'hui et se traduit par un métabolisme sobre, territorialisé et circulaire.



¹³ L'axe territorial de la scénarisation a été développé lors de deux ateliers de M2 Urbanisme et Aménagement de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne en 2016-2017 et 2017-2018, conduits sous la direction de Sabine Barles et Xavier Poux et associant les étudiants Anna Béjanin, Eleonora Bonino, Gabriel Czarnobroda, Aurélien Faysse, Lily Gauthier, Pauline Geneste, Jihoon Lee, Hélène Milet et Jérôme Thibault.

2. Paris, le nouveau Londres : métropolisation, mondialisation et confirmation de l'ouverture et de la spécialisation agroalimentaire

Dans le premier scénario (figure 17), en 2020, la sortie de la Grande-Bretagne de l'Union européenne implique de lourdes conséquences économiques pour la ville de Londres. Paris et son agglomération récupèrent alors la première place boursière européenne et accueillent une grande partie des activités financières de la City. Parallèlement, la France voit son PIB croître très fortement en 2022, et d'importants investissements sont effectués dans le transport fluvial et maritime. Cette période est également le théâtre d'une baisse généralisée du chômage dans le pays qui n'empêche pas la précarisation d'une partie de la société. La bonne situation de la France lui permet d'accueillir les Jeux olympiques de 2024 dans des conditions optimales, avec d'importantes répercussions à l'international. Les catastrophes de 2028-2029 sont vécues comme un véritable traumatisme par le pays et le gouvernement en place tente de mettre en place des solutions rapides. Ainsi, en 2031, un vaste programme national de rénovation est lancé afin de rendre résilients les logements situés en zones inondables, programme qui ne couvre cependant pas l'ensemble de ces zones. Le développement progressif de l'agriculture biologique, notamment dans l'objectif de protéger les champs d'alimentation de captage d'eau potable et de satisfaire une demande croissante (mais loin d'être générale) de produits biologiques, a permis d'atteindre la barre symbolique des 20 % en France en 2038, et s'accompagne de la généralisation des rayons bios dans les supermarchés. L'agriculture conventionnelle reste néanmoins dominante et la tendance majeure est simultanément à la poursuite du mouvement de spécialisation et de déconnexion de l'élevage d'avec l'agriculture, et à celle de la mondialisation du système alimentaire, l'alimentation jouant un rôle de marqueur social très puissant. L'été 2043, le pays connaît une sécheresse intense avec de lourdes conséquences sur l'approvisionnement en eau. Les conflits d'usages entre habitants et agriculteurs génèrent des tensions, et s'accompagnent d'une dégradation globale de la qualité des cours d'eau français. Le gouvernement met alors en place

des mesures portant principalement sur les restrictions d'usages. En 2050, la fonte de la calotte glaciaire a permis l'ouverture de nouvelles voies navigables internationales au Pôle Nord, déplaçant le commerce maritime vers le nord de l'Europe et le Pacifique, rendant le port du Havre peu compétitif et mettant en question la place de l'Europe sur l'échiquier mondial.

L'Île-de-France est ainsi devenue la première technométropole d'Europe. Les quartiers d'affaires sont largement connectés aux aéroports internationaux ce qui fait de l'agglomération parisienne un véritable centre d'affaires international. Le reste du territoire, à l'écart de la *success-story* francilienne, est mis au service de la région-capitale qui attire une population plus nombreuse, au détriment des villes petites et moyennes dont certaines connaissent une

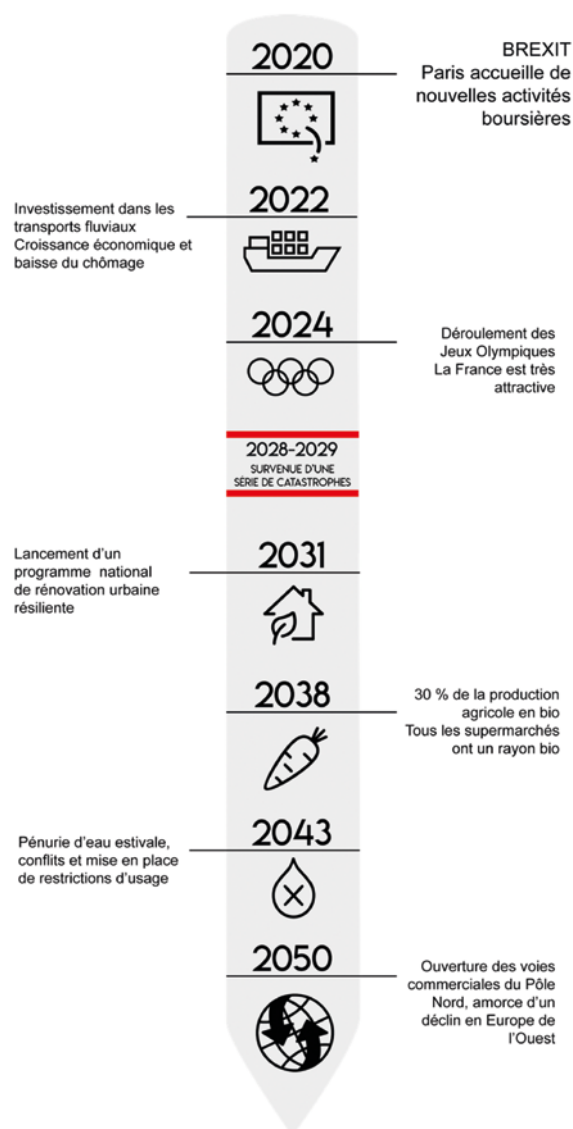


Figure 17. Chronologie du scénario 1.

Source : Atelier M2 Urbanisme Université Paris 1, 2018.

décroissance accélérée (figure 18). Le recours au transport fluvial sert un discours environnemental essentiellement tourné vers la réduction des émissions de CO₂, sans prendre en considération la qualité des cours d'eau. Les caprices du fleuve ont fait augmenter les prix dans les zones élevées (en altitude) et des logements adaptés au risque d'inondation, si bien que le territoire du bassin présente une mosaïque de quartiers résilients et de zones sinistrées. La recherche de bien-être matériel et individuel repose sur l'acquisition d'un grand nombre d'appareils *high-tech* et de produits au *packaging* environnementalement déculpabilisant.

La situation en 2050 est le produit d'une série de choix politiques et économiques favorables à une croissance (dite) verte sans limites. Les entreprises et institutions, principales actrices du changement, ont construit un modèle socio-économique reposant sur une confiance pleine dans les nouvelles technologies. Les cultes collectifs voués à l'hypermobilité et à l'hyperconnectivité conduisent à une consommation toujours plus grande de ressources, malgré une volonté politique affichée de réduction des empreintes environnementales. Les réseaux (voirie, électricité, eau, télécommunication) sont donc devenus un secteur très concurrentiel où les logiques de coûts et d'investissements remplacent peu à peu la notion de service public. Malgré la situation sociale tendue, certains

indicateurs, notamment environnementaux, connaissent une amélioration : c'est le cas des émissions de GES qui baissent de manière significative en Europe. Il ne semble cependant pas possible, compte tenu du contexte mondial, de s'éloigner de la trajectoire du + 4 °C à l'horizon 2100 (scénario du GIEC). Les effets du changement climatique global sont donc de plus en plus visibles.

En termes de métabolisme territorial, ce scénario s'appuie sur un report massif des consommations énergétiques vers l'électricité, dans un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le passage à une mobilité de plus en plus électrique et à une généralisation du *high-tech* rend la société très dépendante de la production d'électricité. Le défi est d'autant plus grand que la moitié de l'électricité est produite à partir de sources renouvelables et donc intermittentes. Cette pression accrue est en partie compensée par une baisse de la consommation finale d'énergie pour l'habitat, liée au renforcement des normes environnementales. Les 15 % les plus démunis ont cependant plus de mal que les autres à accéder au confort thermique du fait d'une augmentation du prix. Pour l'énergie comme pour l'eau, les comportements des consommateurs évoluent peu. Les baisses de consommation sont essentiellement dues à un recours massif aux *high-tech* et aux réseaux dits intelligents.

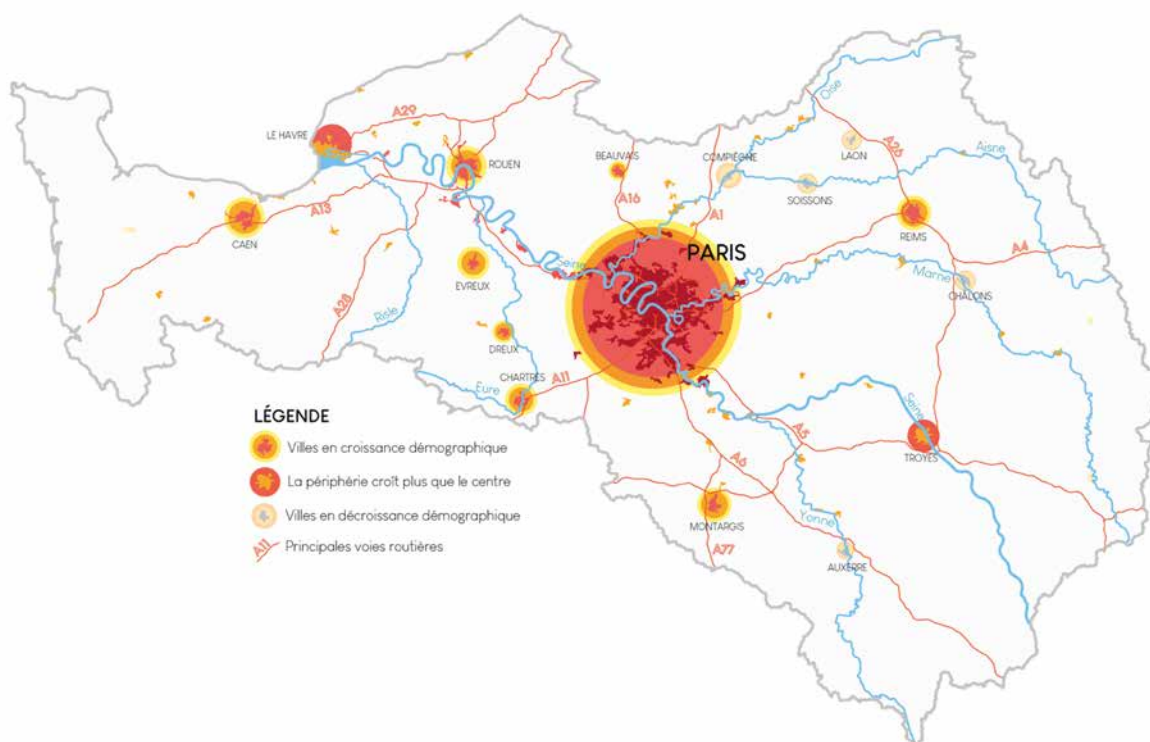


Figure 18. Scénario 1, *Croissance et décroissance urbaine*. Source : Atelier M2 Urbanisme Université Paris 1, 2018.



La baisse de la consommation d'eau est plus marquée que celle de l'électricité, mais très variable. Un individu consomme en moyenne 100 à 120 litres d'eau par jour contre 150 à 200 l/j dans les années 2000. Du fait de l'augmentation de la population, le service est tout de même resté sur le même modèle, de l'eau potable à volonté partout et à tout moment. Le secteur est devenu très concurrentiel et est en cours de reprivatisation. Pour pouvoir assumer les coûts des nouvelles infrastructures et des nouveaux traitements nécessaires (micropolluants) et s'assurer des marges importantes, les gestionnaires ont fait fortement croître le prix du mètre cube. L'accès à l'eau est beaucoup plus inégalitaire. La consommation agricole croît. L'imperméabilisation du bassin a fortement progressé. Paris, grande championne de l'artificialisation des sols, voit son taux d'imperméabilisation atteindre 90 %.

Le changement climatique fait de l'eau une ressource de plus en plus rare. Les milieux naturels sont soumis à des pressions de plus en plus fortes. Les cours d'eau et milieux humides se sont dégradés, le réchauffement, la baisse des débits et du niveau des nappes, la concentration forte en polluants agricoles et la diversification des usages conduisent à accroître encore leur vulnérabilité. Les zones humides voient aussi la qualité de leurs eaux se dégrader, essentiellement du fait de la pollution agricole. Quelques zones surprotégées sont épargnées, mais ne compensent pas la dégradation générale des milieux aquatiques. Faute d'habitats, de nombreuses espèces aquatiques ont disparu des petits cours d'eau du bassin. Le développement des transports fluviaux et maritimes a engendré des dégâts irréversibles sur le lit de la Seine.



PORTRAITS D'HABITANTS : PARIS, LE NOUVEAU LONDRES

Harry, 39 ans, Rueil-Malmaison

Issu d'une famille bourgeoise anglaise, Harry n'a que six ans lors du referendum sur le Brexit de 2016. Ses parents regrettent amèrement ce jour, ayant entraîné selon eux le déclin du Royaume-Uni. Depuis 2040, Harry travaille à La Défense.

7h00, Rueil-Malmaison, France

En se réveillant ce matin du jeudi 10 mars 2050 dans sa belle demeure Lady Kate à Rueil-Malmaison, Harry se saisit de son portable pour activer le mode Réveil en douceur de sa maison ultra-connectée. Une musique douce emplit paisiblement l'air. La voix de Katie, son intelligence artificielle, le salue : « *Good morning Harry! I hope you had a good night. Désirez-vous revenir sur le programme de cette journée ? — Yes Katie, please* » lui répond-il. La voix déroule son emploi du temps pendant qu'il se prépare.

9h15, Greenage Tour de La Défense

Harry vient de garer sa électrique Tesla (à option autonome) dans le garage souterrain de la tour. Il s'empresse de retrouver les bureaux de son entreprise, la multinationale GreenAge, spécialisée dans le développement des énergies renouvelables. Il est agacé : les embouteillages entre Rueil-Malmaison et La Défense lui ont fait perdre quinze minutes de travail et il a une réunion à 9h30 avec Monsieur Wang, le directeur de la branche implantée en Chine, pour revenir sur la stratégie de développement de l'entreprise en Asie. Il aurait pu prendre la L18 du Grand Paris Express mais il préfère le confort de sa voiture à la foule des passagers. La conférence débute à 9h30 : l'hologramme de Monsieur Wang apparaît dans la salle de réunion.

13h00, Restaurant BoBio, La Défense

Harry avait le choix entre la cantine de GreenAge, proposant plusieurs plats élaborés à partir de produits de l'agriculture biologique ou l'un des nombreux restaurants de La Défense. Il a choisi de déjeuner à BoBio, qui propose des plats contenant des produits issus de l'agriculture urbaine développée à La Défense, et a effectué sa réservation de table et sa commande

via sa *smartwatch*. Malgré tout, il doit attendre que sa table se libère. Il profite de ce moment pour commander une *smartwatch* nouvelle génération : il s'agit d'un cadeau pour Ben, son fils vivant à Londres avec son ex-femme, qui aura dix ans dans deux semaines. Il passe également commande à un traiteur bio pour recevoir le plat préféré de Jana, sa compagne allemande, qu'il retrouvera chez lui le soir même, et confirme d'un tapotement de doigt sur sa montre sa présence au club de golf Blue Green Rueil-Malmaison le samedi matin.

20h11, back in Rueil-Malmaison

Harry est arrivé juste à temps chez lui pour recevoir la livraison du dîner acheminé par bicyclette. Il a sorti la bouteille de vin blanc biologique et a préparé la table. Il compte profiter du retour de Jana après son voyage d'affaires de quatre jours à Londres et lui proposer un voyage à Rome. Il a juste le temps de prendre une rapide douche avant son arrivée. Il consulte son compteur intelligent : il est dans le vert pour l'eau. Il file sous la douche.

Latika, 55 ans, Paris

9h27 - Ce matin, Latika va être en retard au travail. Son réveil n'a pas sonné parce que son téléphone n'avait plus de batterie. Sa montre connectée a bien vibré, mais ça ne la réveille jamais. Elle descend les escaliers de son immeuble quatre à quatre et enfourche son vélo. Son oreillette lui donne les différents rendez-vous du jour : 10h00, réunion de travail sur les relations aux entreprises avec la Métropole. « *Oh non, non, non ! Je ne peux pas être en retard* ». Elle accélère. Double une grande file de cyclistes. Un concert de sonnettes éclate : « *Ehh ! On est tous pressés, respectez la queue !* », lui lance l'un d'entre eux. Elle l'ignore. Depuis que la ville a priorisé les transports doux, les relations entre cyclistes se sont durcies. Ils sont de plus en plus nombreux et les voies sont encombrées de vélos. Il y a souvent des accidents entre les cyclistes. « *Quelle plaie ! On se croirait au tour de France soupire-t-elle. J'aurais peut-être dû prendre le métro, ou un autobus autonome ?... Non* ». En effet, les réseaux sont saturés aux heures

de pointe et souvent remplis de touristes perdus. Elle arrive en bas du siège de la Métropole, un immense mur végétalisé lui fait face. Il y en a de plus en plus dans le paysage parisien. Elle s'aperçoit que certaines plantes se portent un peu mal... « *Ils les ont plantées il y a deux mois et ils vont déjà devoir en remplacer, mhh...* » grommelle-t-elle.

11h34 - Malgré son petit retard, la réunion s'est bien passée. Les entreprises ont - comme souvent - obtenu satisfaction, de nouveaux bureaux vont être développés dans l'Ouest parisien. Latika tique, c'est encore des logements de perdus pour les habitants. Les bureaux remplacent de plus en plus d'appartements. Les prix de l'immobilier sont devenus infernaux. À l'intérieur de Paris, les appartements sont loués la plupart du temps à des touristes. Et même pas la peine de penser à investir, à part si on veut s'endetter sur plusieurs générations. Latika a un jeune collègue qui lui a raconté qu'il mettait son appartement en location un soir sur deux. Un soir il dort chez sa petite amie, l'autre c'est elle qui vient chez lui et loue son appartement. Ils s'en sortent comme

ça. Dans les cages d'immeuble, de petits boîtiers se sont multipliés : ce sont des systèmes sécurisés qui délivrent les clefs d'appartements aux touristes qui passent par la plateforme AirDnD. Latika a de plus en plus de mal à vivre dans cet univers. La dernière fois, elle a découvert avec effarement qu'on lui avait subtilisé le basilic qu'elle avait planté dans le mini-jardin partagé de sa cour d'immeuble. De toute façon, elle était la dernière à l'entretenir, tous ses voisins sont partis et la copropriété n'est pas très active. Elle aussi songe de plus en plus souvent à s'installer en banlieue. Au moins, elle aura accès à des magasins alimentaires plus abordables que dans le centre de la capitale. Mince ! Avec le retard de ce matin, elle a oublié son déjeuner dans sa kitchenette. Ce midi, elle commande donc un plat via une application de livraison. Elle hésite un moment entre des sushis bio et un chili sin carne. Ces petits plats lui rappellent ses derniers voyages à l'autre bout du monde.

Weilin, 63 ans, Ivry-sur-Seine

En arrivant dans sa rue, Weilin est toujours pris d'un pincement au cœur. Tout ici, depuis les fenêtres barricadées des rez-de-chaussée jusqu'aux arbres qui poussent dans les cours de manière anarchique, lui rappelle la crue de février 2029. Il avait acheté ce pavillon d'Ivry-sur-Seine avec sa femme, en 2021. Toutes leurs économies y étaient passées et ils s'étaient endettés sur trente ans. Lorsque l'eau avait commencé à monter, les autorités leur avaient dit de ne pas s'inquiéter. Pendant des semaines, ils avaient vu l'eau envahir la ville rue par rue avant d'être à leur tour inondés. Évacués d'urgence, ils avaient trouvé refuge chez des membres de leur famille. De retour dans leur quartier, ils avaient alors découvert les dégâts causés par l'inondation. Situé hors zone prioritaire, leur quartier n'a pas bénéficié d'aides du gouvernement pour réhabiliter et adapter les bâtiments. Avec l'argent de l'assurance, Weilin et sa femme ont choisi de sécuriser l'étage de leur maison. Ils y ont créé une cuisine de secours et changé les fenêtres. Après le départ de leurs enfants, ils ont décidé de s'installer à plein temps au premier, cela les tranquillise. Au rez-de-chaussée de sa maison, maintenant condamné, Weilin fait pousser des champignons et tente toutes sortes



d'expériences agricoles. Sa femme se moque souvent de lui et préfère cultiver des légumes en pleine terre, même si leur petit jardin est beaucoup moins ensoleillé depuis que les voisins ont vendu des morceaux de leurs terrains pour permettre la construction de nouvelles maisons. Laura profite aussi de sa retraite pour élever des lapins. Elle les échange avec d'autres habitants de son quartier qui n'ont pas les moyens d'acheter de la viande contre des œufs ou d'autres aliments. Laura et Weilin sont donc abonnés au régime pommes de terre et champignons, qu'ils agrémentent parfois de viande de lapin. Pour compléter le menu, Weilin va parfois faire la fin du marché et récupère les invendus. Plusieurs de ses voisins, dans la même situation que lui, l'accompagnent. S'ils font chou blanc, ils poussent jusqu'au supermarché, mais les prix sont souvent trop élevés, ils achètent parfois en gros et se distribuent les produits. Depuis quelques mois, Weilin est en pourparlers avec l'administration du collège dans lequel il travaille. Les associations de défense des droits des salariés le soutiennent dans sa requête : un cantinier ne peut pas se retrouver sans nourriture ! L'administration du collège hésite même si les volumes de nourriture jetée quotidiennement pourraient facilement nourrir plusieurs familles. En attendant qu'ils se décident, Weilin part parfois se promener avec ses voisins et amis dans le quartier Ivry-Confluence. Là, les investissements ont été nombreux, les bâtiments ont été rénovés et les maisons sinistrées rasées. Weilin frissonne en pensant que la sienne aurait pu l'être aussi, qu'il pourrait vivre dans l'un de ces appartements, sans jardin et sans connaître ses voisins. « *Et puis, ces bâtiments ressemblent bien trop à mes cages à lapins !* », se dit-il en rentrant chez lui.

Rosie, 13 ans, Marolles-en-Brie

Samedi 24 septembre 2050

Rosie, 13 ans, habite avec sa famille à Marolles-en-Brie. La commune a connu une densification. Désormais, les maisons individuelles des années 1970 côtoient de petits immeubles. Malgré cette légère croissance de la population, la commune conserve une ambiance de village. Rosie a du mal à s'habituer à cette nouvelle vie depuis son déménagement il y a deux ans, suite au poste

d'institutrice obtenu par sa mère à l'école élémentaire Les Buissons. La famille a alors quitté son logement social de l'avenue d'Italie à Paris pour un grand appartement dont elle est propriétaire. Elle apprécie d'avoir une chambre pour elle seule, mais elle regrette ses amies et la fameuse piscine de la Butte-aux-Cailles, chauffée par un *data center*, située alors à deux pas de chez elle et où elle se rendait deux fois par semaine.

Ce matin-là, Rosie est enthousiaste : elle va avec sa famille passer la journée du dimanche à faire de la tyrolienne au parc Tarzan & co qui vient d'ouvrir dans la forêt domaniale Notre-Dame juste à côté de Marolles-en-Brie. Avec sa mère, elle est allée faire les courses au Carrefour City du coin pour la semaine et pour préparer le pique-nique du lendemain. Sa mère lui a promis de lui faire son sandwich-burger au bacon préféré. Elle a réussi en plus à lui faire acheter ses pains au lait favoris, fourrés au chocolat, elle s'en réjouit d'avance.

Mais à midi, elle s'inquiète : son père remet en cause leur escapade du dimanche. Il est énervé car il vient de recevoir la facture d'eau trimestrielle. Le prix de l'eau est devenu plus élevé depuis quelques années et le montant lié à l'assainissement ne cesse d'augmenter pour pouvoir payer la construction de nouvelles stations d'épuration. Son père s'exclame : « *Et en plus de ça, je dois régler le malus écologique pour la voiture !* ». Ses parents possèdent en effet une voiture thermique achetée d'occasion il y a quinze ans, en 2035. Avec la nouvelle législation, ils sont obligés de payer un malus écologique de quelques dizaines d'euros par mois. « *Ça, c'est encore un coup du gouvernement pour que l'on achète une voiture électrique produite par ces entreprises dont les patrons sont ses amis, j'en ai assez ! On va l'acheter cette nouvelle voiture ! Ça m'évitera de m'énerver tous les mois et de payer les pleins d'essence à prix exorbitant ! En attendant, la sortie du dimanche commence à faire cher, ça nous revient à 80 € la journée !* » s'exclame son père. Sa mère finit par calmer son père : ils iront bien au nouveau parc, mais pour une demi-journée seulement. Rosie essaye de se consoler : au moins, elle aura son sandwich et son dessert préférés...

3. Les villes en leur bassin : vers un rééquilibrage territorial et un système agroalimentaire autonome, reconnecté, demitarien

Le second scénario (figure 19) s'inspire des thèses de l'écologie politique, et prolonge des tendances qui apparaissent à travers nombre de mouvements relevant de l'économie sociale et solidaire et de l'économie circulaire. Suite au Brexit, la ville de Francfort devient la première place boursière européenne en 2020, devançant Paris et son agglomération. Deux années plus tard, les multiples scandales commerciaux, sanitaires ou encore liés à la corruption ont conduit des collectifs citoyens à assigner en justice de grandes entreprises. Certains procès, souvent très médiatisés, sont remportés par la société civile, remettant en question le caractère intouchable de ces firmes d'envergure internationale. Dans l'optique des Jeux olympiques de 2024, la France met l'accent sur la qualité de ses cours d'eau, en particulier en Île-de-France. La forte médiatisation de la démarche reste cependant disproportionnée par rapport aux évolutions réelles de qualité de l'eau. Les catastrophes que connaît le monde en 2028 et 2029 ont provoqué un très grand traumatisme dans l'esprit des Français. La prise de conscience nationale est réelle et la volonté de changement se traduit sur la scène politique. Ainsi, en 2032, un gouvernement écosocialiste est élu sur un programme basé sur la décroissance et la résilience. Une transition politique, économique, énergétique et sociale est amorcée, basée sur l'engagement des citoyens et des corps intermédiaires. Les politiques volontaristes menées et les nombreuses affaires portant sur les prix de l'eau pratiqués par les concessionnaires privés poussent un grand nombre de municipalités à avoir recours à un retour en régie publique des services de l'eau, avec comme fait marquant la fusion entre le SEDIF, le SIAAP et Eau de Paris. Parallèlement, une réorganisation profonde du système agroalimentaire français est engagée. Elle vise à accroître l'autonomie en intrants des exploitations et des territoires, et à reconnecter la production agricole avec une consommation alimentaire moins riche qu'actuellement en protéines animales. La production agricole est marquée par la généralisation des pratiques de l'agroécologie et de l'agriculture biologique qui concerne 95 % de la production

en 2045. La valorisation de la matière des excréments urbains permet de réduire considérablement la production de déchets et contribue à la circularité du système alimentaire et plus généralement du métabolisme territorial. Ces transformations sont accompagnées par une redistribution de la population et des activités marquée par le renouveau des villes petites et moyennes, en particulier dans le bassin de la Seine, et un retrait de la périurbanisation.

En 2050, la population francilienne s'est ainsi desserrée et a réinvesti les villes moyennes du bassin de la Seine qui accueillent de nouveau des sources d'emplois (figure 20). Les villes fonctionnent en un réseau auquel est intégrée chaque zone urbaine. Cet esprit se retrouve dans la gestion de la ressource en eau et se caractérise par une solidarité interbassins. La qualité de l'eau de la Seine

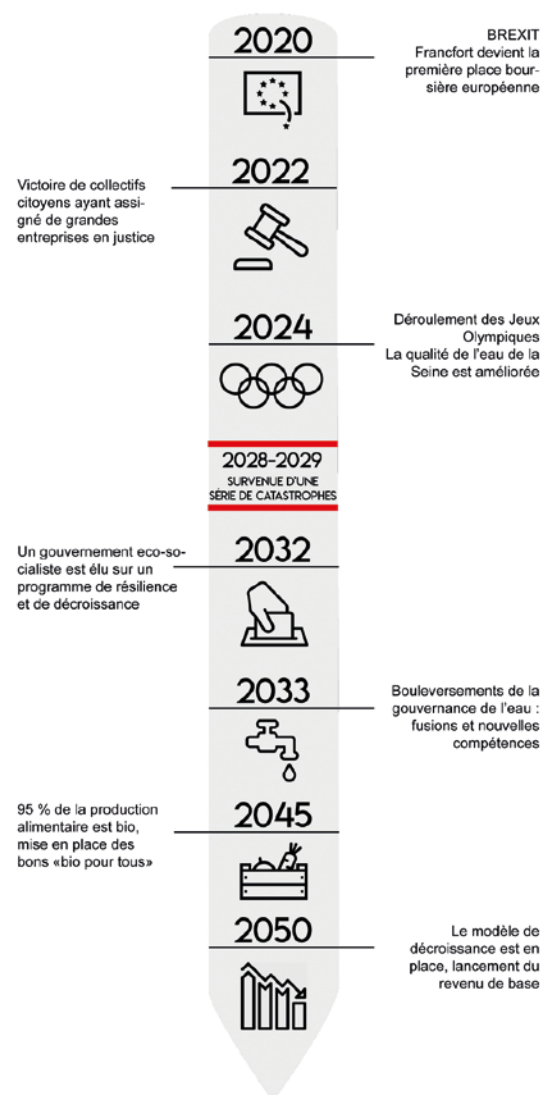


Figure 19. Chronologie du scénario 2.

Source : Atelier M2 Urbanisme Université Paris 1, 2018.

s'est améliorée, permettant la restauration écologique du fleuve. Le transport de marchandises se fait désormais majoritairement par voie ferrée. Les relations sociales sont moins marquées par une compétitivité excessive et la recherche d'un bien-être individualiste. La solidarité, le partage ainsi que le respect d'autrui sont les valeurs portées par les corps associatifs et par le gouvernement et qui se diffusent progressivement à l'ensemble de la société civile. La créativité et l'ingénierie sont mises à profit de la recherche de la sobriété énergétique, du moindre impact environnemental des activités humaines et de la durabilité, fondées sur une mise en valeur des ressources territoriales.

Le monde de 2050 est en transition vers un modèle sobre, voire décroissant, et intrinsèquement circulaire dans son fonctionnement. Les liens entre les sociétés humaines et leurs milieux renaissent et se renforcent. La trajectoire présentée est finalement à l'intersection de plusieurs scénarios existants (Afterres, Negawatt), qui proposent une vision nouvelle des futurs souhaitables et possibles. Du point de vue environnemental et métabolique, il semble possible, du fait d'une prise de conscience collective qui doit bien sûr s'étendre au-delà du bassin de la Seine, de contenir la hausse des températures à 2°C à l'horizon 2100. Certains effets du changement climatique sont tout de même déjà visibles, mais dans des proportions moindres. Le tournant pris par les sociétés humaines leur offre une capacité d'adaptation renouvelée. La recherche globale de sobriété et d'efficacité dans les consommations a profondément bouleversé les modèles de réseaux.

Les ménages ont fortement réduit leur consommation énergétique et une part croissante de l'énergie consommée est autoproduite. La mobilité devient l'un des postes de consommation les plus importants, bien que les déplacements individuels soient réduits. La décentralisation des réseaux se manifeste aussi au niveau de la gestion urbaine de l'eau. Les initiatives en matière d'accès à l'eau et d'épuration fleurissent dans le bassin. D'un côté, les collectivités remunicipalisent les services, mettent en place une tarification forfaitaire et développent les usages de l'eau non potable. D'un autre côté, les citoyens s'impliquent davantage dans cette dérégulation et se lancent dans des projets comme la phytoépuration. Les plus engagés vont jusqu'à se déconnecter totalement, notamment grâce à la mise en voie sèche de leurs excréments domestiques. La consommation domestique moyenne baisse de manière drastique et atteint 50 litres d'eau par personne et par jour. La baisse des consommations, la limitation de la hausse des températures et le recul du transport maritime et fluvial permettent d'alléger la pression sur les ressources et les milieux. Des mesures de protection et de renaturation des cours d'eau sont prises par les collectivités et soutenues par les collectifs d'habitants. Les activités humaines se réadaptent aux rythmes naturels. Enfin, la perméabilisation des sols, l'arrêt total de l'utilisation des pesticides ou encore l'intense développement des énergies renouvelables a permis une amélioration considérable de la qualité des cours d'eau français ainsi que la réapparition d'une biodiversité dense et protégée.

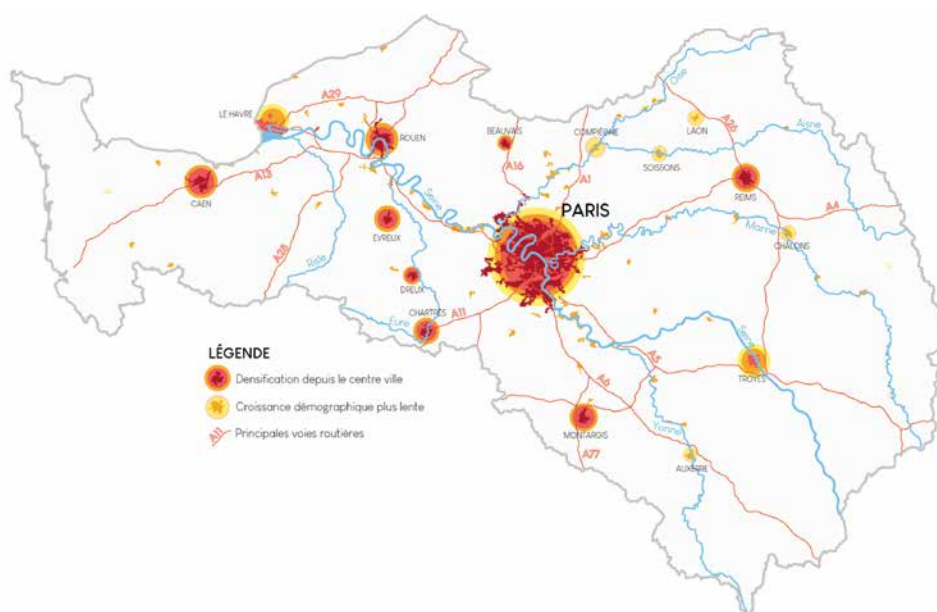


Figure 20. Scénario 2, Croissance et décroissance urbaine. Source : Atelier M2 Urbanisme Université Paris 1, 2018.



PORTRAITS D'HABITANTS : LES VILLES EN LEUR BASSIN

Harry, 39 ans, Francfort

Dans ce scénario, Harry ne travaille pas à La Défense mais à Francfort, en Allemagne, où ont migré les grandes entreprises de la finance et du *high-tech* à la suite du Brexit. Il quitte donc l'agglomération parisienne et nos récits de vie.

Latika, 55 ans, Paris

Il est 8h00, Latika rentre de son footing matinal. Elle est ravie de pouvoir courir sans risquer de s'intoxiquer avec la pollution qui empoisonnait quotidiennement la ville il y a encore une trentaine d'années. Elle a moins de problèmes de santé qu'à l'époque, alors qu'elle n'avait que la vingtaine et terminait à peine ses études en sciences politiques. À présent, elle travaille pour la Métropole du Grand Paris, la structure qui rassemble les grandes intercommunalités franciliennes. Elle y tient un rôle important : elle travaille les liens entre les différentes échelles institutionnelles. Elle veille à équilibrer les dynamiques territoriales et à ne laisser aucun territoire de côté. Ils ont plusieurs outils pour cela, comme la péréquation, l'obligation légale pour les propriétaires de mettre en location leurs logements laissés vacants, l'encadrement des loyers, la coproduction de projets directement avec les habitants. D'ailleurs, aujourd'hui, elle a une réunion au sujet des multiples projets votés par les citoyens dans le cadre des budgets participatifs qui sont mis en place dans les différents quartiers. Un projet ambitieux a attiré l'attention de Latika : une serre urbaine participative sur l'ancien tracé du boulevard périphérique. Cette ancienne barrière physique qui séparait Paris de sa banlieue a été transformée, à l'instar de la petite ceinture ferroviaire, en immense parc circulaire où poussent différents projets qui viennent reconnecter les espaces métropolitains. Les habitants du quartier pourront se réunir, faire pousser leurs propres légumes et partager leurs expériences. « Bonjour Léon ! » lance-t-elle à son voisin de palier qui descend son bio-seau afin de mettre ses déchets dans le composteur de la cour d'immeuble. « Salut Latika ! Ça va ? Tu as vu, on nous a refait l'installation en eau non potable, ils ont été super efficaces à la régie ! En une semaine, ils ont réparé le distributeur. Je vais pouvoir passer un petit coup d'eau à la cour de l'immeuble », lui répond-il.

Tous les immeubles ont un accès à l'eau non potable et de nombreuses copropriétés ont réalisé des travaux afin d'utiliser le réseau pour les sanitaires. D'autres ont engagé des travaux pour installer des toilettes sèches. « Top ! Oui, ils bossent vraiment bien. Je vois que tu vas au compost, tu jetteras un coup d'œil à mon basilic, il a bien poussé. Il est juste à côté de ton plant de tomates. Faudra qu'on se fasse un repas entre voisins avec tous nos produits ! Bon, je dois vraiment filer, à plus tard ! » De retour chez elle, elle a pour habitude de procéder à une douche sèche rapide en utilisant son tawashi, ce qui lui fait économiser du temps et de l'eau. Un petit peu de déodorant fait maison aux huiles essentielles de thym, de lavande et de pin et c'est parti pour une journée de boulot ! Sur son chemin, elle ira se chercher quelques fruits à la coopérative de quartier. Tous les quartiers en ont une à présent. Elles rassemblent des produits de producteurs locaux avec des légumes, des fruits de saison et des petits produits artisanaux. La semaine passée, il y avait eu une conférence sur la phytoépuration et ce soir, elle portera sur les ruches en ville. Tout un programme. Elle ira sûrement y faire un tour avec un groupe d'amis. Ça promet d'être intéressant, elle aimerait que la copropriété en mette une sur le toit de l'immeuble et qu'ils produisent leur propre miel ! Bzz bzz

Weilin, 63 ans, Ivry-sur-Seine

Weilin est un peu débordé, aujourd'hui il doit rencontrer un nouveau producteur pour la cantine, discuter avec les autres chefs de cantine pour se décider sur les menus du mois à venir et aller retourner le compost. S'il lui reste du temps, il devra faire quelques recherches, il est en manque d'inspiration pour les plats végétariens. Depuis que le collègue Georges Politzer s'est engagé dans la démarche 100 % bio, son travail a profondément changé. Il ne travaille que deux jours par semaine aux cuisines. Le reste du temps, il remplit des missions sociales liées à la cantine : il livre le compost et distribue les restes des repas. Comme il partage son poste avec deux autres chefs, ses journées de travail sont plus courtes, il peut rentrer chez lui en début d'après-midi. Mais le temps lui paraît long, dans cet appartement. Son épouse, Laura, ne s'y sentant pas chez elle, elle multiplie les activités associatives

au-dehors. Cet après-midi, par exemple, elle emmène de jeunes étudiants étrangers visiter la capitale avec l'association Mamies du Monde. Weilin et elle regrettent toujours leur pavillon, qu'ils ont été forcés de quitter en 2030, à la suite des grandes inondations. Ils ont été relogés dans cet immeuble moderne résilient dans un quartier proche du leur. Mais le couple n'y trouve pas son compte : l'appartement est trop petit, l'immeuble est trop grand et surtout, ils n'ont pas de jardin. Pour passer le temps, Weilin retourne dans le quartier de la Révolution, où se trouvait sa maison. Il essaie de retrouver l'emplacement de son pavillon dans la vaste plaine inondable qui a été aménagée suite aux démolitions. Quelques bâtiments sur pilotis reliés par des passerelles ont été construits, mais le paysage n'a plus rien à voir avec ce qu'il était. Dans un coin, à côté des petits étangs, des jardins familiaux ont été installés. Weilin sourit : l'esprit de son quartier n'a pas disparu avec les maisons. Il en a une nouvelle fois la preuve lorsqu'il pénètre dans la maison des associations, située à quelques rues de là. Il y retrouve certains de ses anciens voisins. Ceux-ci sont en train de réparer un vieux vélo. Weilin leur propose son aide. Une fois le vélo fonctionnel, ils se lancent dans une petite partie de tarot. L'heure tourne et Weilin les quitte précipitamment pour se rendre au relais alimentaire le plus proche. Là, il peut dépenser ses bons « Bon pour tous », fournis par la commune aux ménages les plus précaires afin qu'ils puissent accéder plus facilement aux produits les plus chers, comme la viande ou les produits laitiers. Au rayon légumes, il tombe sur de jolis potimarrons et des pommes abîmées. Son menu est tout trouvé : il fera un soufflé de potimarron et de la compote. En passant par le rayon boissons, il attrape une bouteille de cidre mis en bouteille par le producteur : « *Ça fera plaisir à Laura, se dit-il, ça lui rappellera nos dernières vacances en Bretagne, la pluie en moins* ».

Rosie, 13 ans, Troyes

Samedi 24 septembre 2050

Rosie, 13 ans, vit à Troyes, où la famille a déménagé quand elle avait trois ans. Sa mère, institutrice, y a trouvé un poste à l'école primaire Jacques de Letin tandis que l'entreprise de son père, anciennement à Créteil, s'est implantée à Troyes il y a dix ans. Elle fréquente le collège Pierre Rabhi. Ce matin-là, elle est très enthousiaste. La Semaine de l'environnement

et de la sobriété commence le lundi suivant et elle a hâte d'y être. Durant cette semaine, les classes de CP, CM1, sixième et quatrième élaborent des projets environnementaux. Elle garde un super souvenir des anciennes expériences et le programme remis par sa prof principale a l'air vraiment génial.

Rosie ne peut s'empêcher d'en parler pendant qu'elle cuisine avec ses parents et son frère le repas du midi, un gratin de carotte à la tomme, à base de légumes de saison. « *Vous avez vu le flyer ? Mardi, nous allons visiter l'exploitation agricole de Léo pour faire un atelier sur l'agriculture, c'est drôle vous ne trouvez pas ?* », déclare-t-elle. Léo est un agriculteur que la famille connaît bien pour être adhérente à l'AMAP L'Aube des légumes. Elle le voit toutes les semaines et depuis dix ans, ils ont fini par devenir amis. Ils sont d'ailleurs en train d'éplucher et de couper ses carottes bio. Elle continue : « *Et jeudi, nous allons au Parc naturel régional de la forêt d'Orient ! J'ai pas tout compris, mais la prof a parlé d'une conférence donnée par quelqu'un de l'ETPB ou EPTB, quelque chose du style, sur la solidarité interbassin* ». Ce parc abrite de grands lacs-réservoirs permettant de réguler le débit de la Seine. Une grande partie du parc a été fermée au public en 2040 afin d'en faire un havre de paix pour les animaux et préserver la flore.

Rosie se tourne vers son frère : « *On doit faire un exposé de groupe en classe. J'ai proposé la filière bois à Lila, Nadia, Sabine et Paul en leur disant que tu nous aiderais, tu le feras, hein ?* », demande-t-elle à son frère Arnold. Ce dernier souhaite en effet effectuer le BTS Développement et réalisation bois du GRETA Sud Champagne et être embauché à Troyes où il possède son réseau d'amis d'enfance. « *Ça marche sœurlette, à condition que tu arrêtes de massacrer cette pauvre carotte* », plaisante-t-il. Elle ignore sa remarque narquoise et continue « *On commencera aussi notre projet interclasse. J'espère que je serai avec Lila !* ». Les collégiens ont l'opportunité de monter un projet sur trois mois. Les groupes sont composés d'élèves des différentes classes de quatrième et deux demi-journées par semaine seront consacrées au montage du projet jusqu'à la date de présentation aux parents et aux autres groupes le samedi 17 décembre. « *J'avais bien aimé la danse en sixième, mais j'aimerais bien faire de la vidéo cette année. Je vais motiver le groupe !* ».

4. Le système agroalimentaire et son évaluation environnementale

Les deux scénarios dont le narratif vient d'être exposé peuvent être traduits quantitativement en ce qui concerne la structure du système agroalimentaire qui leur correspond. Le premier scénario « Paris, le nouveau Londres », qualifié d'« ouvert et spécialisé » (O/S) dans sa déclinaison agroalimentaire, verrait la poursuite du mouvement d'ouverture de l'agriculture sur les marchés internationaux, de spécialisation des productions agricoles dans chaque territoire et de déconnexion de l'élevage d'avec l'agriculture. Il est dans la droite ligne des objectifs de croissance et de mondialisation de l'agriculture affirmés par la plupart des politiques publiques nationales et européennes.

Le second scénario « Les villes en leur bassin » correspondrait au contraire à une réorganisation profonde du système agroalimentaire français visant à accroître l'autonomie en intrants des exploitations et des territoires, et à reconnecter la production agricole avec une consommation alimentaire moins riche qu'actuellement en protéines animales. Il suppose la généralisation des pratiques de l'agroécologie et de l'agriculture biologique. Il a été qualifié d'« autonome, reconnecté, demitarien » (A/R/D) (Billen et al., 2018).

Les dynamiques qui s'opposent entre ces deux scénarios concernent essentiellement trois aspects du système agroalimentaire : la distribution spatiale de la population et sa demande alimentaire ; les systèmes de culture et leur

mode de fertilisation ; l'élevage et son degré de connexion avec les systèmes de culture.

La population et son régime alimentaire

L'INSEE prévoit en 2040 (hypothèse haute) une population française de 75 millions d'habitants (www.insee.fr/fr/statistiques/2529884). Si les prévisions d'accroissement sont assez élevées pour les régions de l'ouest et du sud de la France, elles le sont beaucoup moins pour la partie nord-est. Pour la région parisienne, l'INSEE prévoit un accroissement de 1,7 million d'habitants. Dans le scénario « Les villes en leur bassin » (A/R/D), l'hypothèse est celle d'une redistribution de cet accroissement sur les régions périphériques nord-est du bassin parisien.

La question du régime alimentaire humain, et en particulier de la place des produits animaux, est centrale dans ces scénarios. Pour des raisons d'impact sur l'environnement, comme de santé publique, un groupe de scientifiques, à travers la déclaration de Barsac (www.nine-esf.org), préconise, tout comme l'association Solagro dans son scénario « Afterres 2050 », une réduction de moitié de la consommation de protéines animales (régime demitarien). C'est l'hypothèse reprise par le scénario « Les villes en leur bassin », qui revient à un régime proche de celui qui avait cours en France dans les années 1950 (figure 21). Dans le scénario « Paris, le nouveau Londres » (O/S), on a retenu le régime prévu par un scénario de croissance économique forte de la Chambre d'agriculture de Normandie (Le Nechet et al., 2006), prévoyant une poursuite de l'accroissement de la proportion de protéines animales.

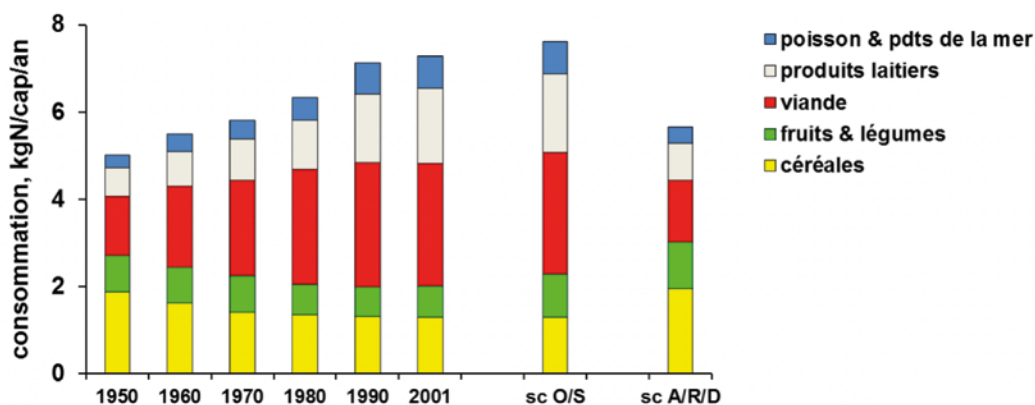


Figure 21. Evolution de la composition du régime alimentaire français depuis 1950 (données de disponibilité alimentaire INSEE, 2010). Régime prospectif dans les scénarios Ouverture et Spécialisation (Chambre d'agriculture de Normandie, Le Nechet et al., 2006) et Autonome, Reconnecté et Demitarien (Afterres 2050).

Notons que les chiffres indiqués dans la figure 21 représentent la consommation apparente de la population et non la quantité effectivement ingérée, qui lui est inférieure en raison des pertes générées à tous les stades de la chaîne de distribution et de consommation domestique. Ces pertes et parfois gaspillages alimentaires sont actuellement estimés à environ 30 % (Grizzetti et al., 2013), mais différent selon les types d'aliments. Le scénario « Les villes en leur bassin » (A/R/D) fait l'hypothèse qu'ils sont réduits de moitié.

Les systèmes de culture et leur fertilisation

Les statistiques agricoles permettent d'évaluer la production végétale de l'ensemble de l'assolement de chaque région, ainsi que les apports totaux d'azote aux sols arables par la fertilisation synthétique, le dépôt atmosphérique, la fixation symbiotique et les déjections animales. Une relation robuste de type hyperbolique existe entre ces apports et le rendement exprimé en azote, avec un seul paramètre,

Ymax (figure 22a), qui caractérise les performances agricoles d'un système pédoclimatique donné (Lassaletta et al., 2014), ainsi que les risques de pertes environnementales d'azote (différence entre les apports et la production exportée). Cette relation vaut pour toutes les rotations, quelle que soit la nature de leur mode d'apport d'azote au sol. Ainsi, la même relation rendement-fertilisation totale s'applique pour les rotations conventionnelles comme pour les rotations biologiques (figure 22b). Cette relation permet de calculer la production des terres arables à partir des apports au sol dans les deux scénarios. Dans le scénario « Paris, le nouveau Londres » (O/S), les mêmes rotations conventionnelles qu'actuellement sont considérées ; les apports d'engrais chimiques sont raisonnés pour éviter un surplus supérieur à 50 kgN/ha/an. Dans le scénario « Les villes en leur bassin » (A/R/D), il n'y a plus de fertilisation chimique (ni de pesticides), et les rotations longues et diversifiées typiques de l'agriculture biologique sont considérées dans chaque région, avec une proportion de légumineuses fourragères allant de 25 à 40 %.

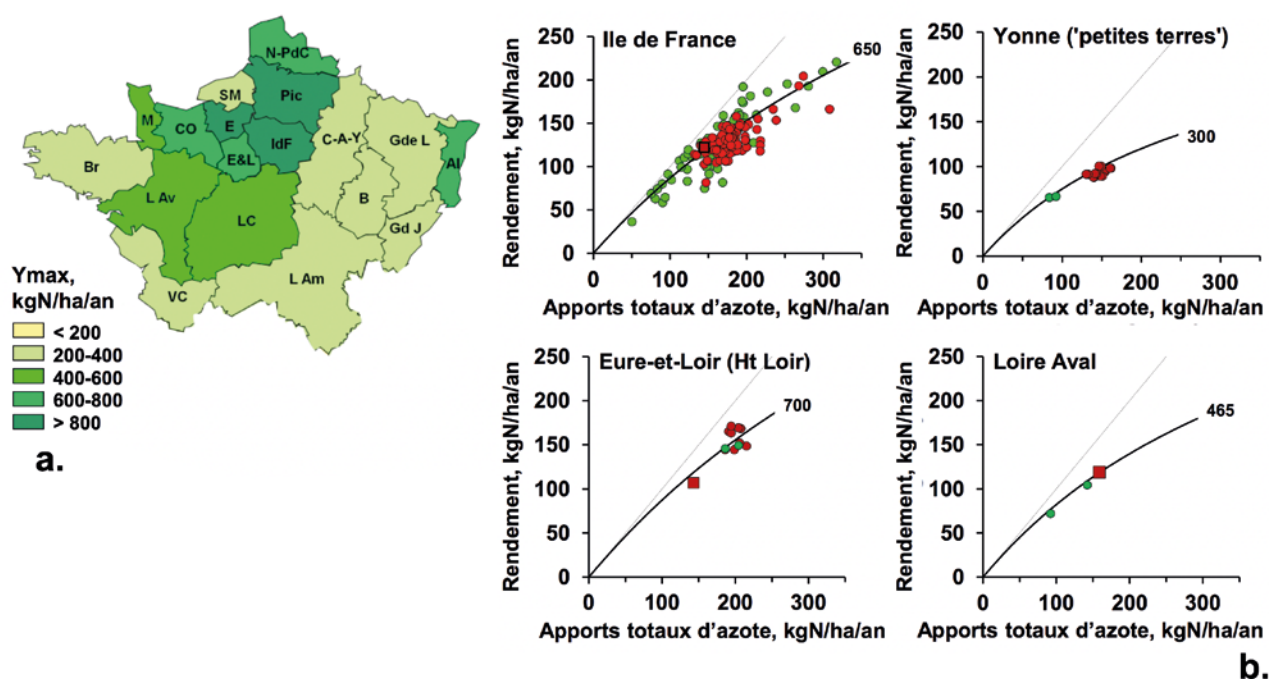


Figure 22. a. Distribution du paramètre Ymax caractérisant la relation entre rendement et total des apports fertilisants d'azote au sol, calculés à partir des données Agreste pour chaque région agricole. b. Données relatives à des rotations bio (points verts) et conventionnelles (points rouges) dans diverses régions, montrant qu'un même paramètre Ymax vaut pour les deux systèmes, dans un même contexte pédoclimatique (données issues d'ITAB, 2011 et Anglade et al., 2015 ; 2017).



Les systèmes d'élevage et leur connexion aux systèmes de culture

Le scénario « Paris, le nouveau Londres » (O/S) prolonge à l'extrême la spécialisation actuelle des régions françaises, c'est-à-dire que l'élevage (qu'il s'agisse de ruminants ou de monogastriques) est totalement exclu des régions de grandes cultures du centre du bassin parisien, de l'Alsace et du Nord-Pas-de-Calais (figure 23). Ailleurs, la densité d'animaux est portée au maximum de ce qui est permis par les directives européennes. Dans l'autre scénario (« Les villes en leur bassin », A/R/D), au contraire, le cheptel est fortement réduit en raison de la diminution de la demande de viande et de lait par la population locale, et est réparti de manière beaucoup plus homogène sur le territoire : le cheptel est dimensionné dans chaque région en respectant la contrainte d'une alimentation exclusivement locale.

La traduction du récit des deux scénarios en contraintes quantitatives pour le modèle GRAFS du système agroalimentaire permet en retour d'en quantifier les effets sur les performances (i) agronomiques (productions, structure des systèmes, échanges commerciaux, etc.) et (ii) environnementales (contaminations aquatiques, émissions de gaz à effet de serre, etc.).

Production agricole et échanges commerciaux

La figure 24 montre la structure du système agroalimentaire du bassin de la Seine en termes de flux d'azote dans les deux scénarios, comparés à sa structure actuelle.

Référence 2004-2014

Ouvert/Spécialisé

Autonome/Rec/Demitarien

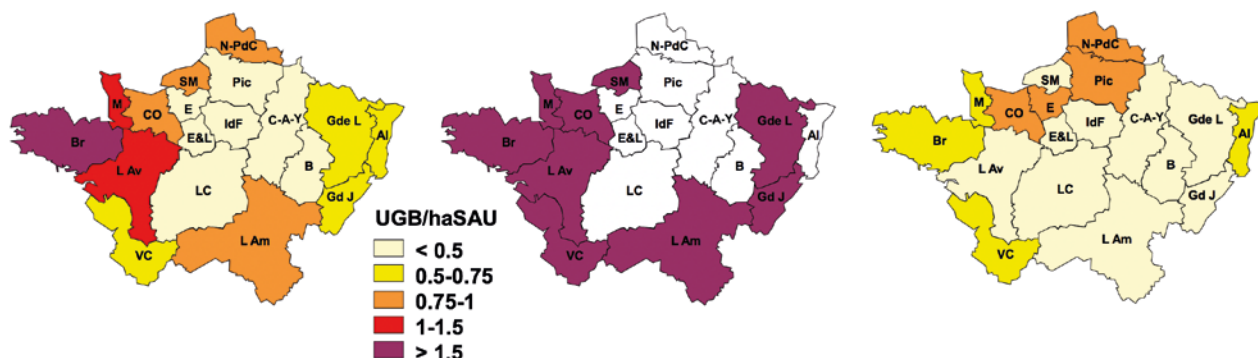


Figure 23. Distribution de la densité de cheptel (UGB par ha de SAU) pour la situation de référence actuelle et les deux scénarios.



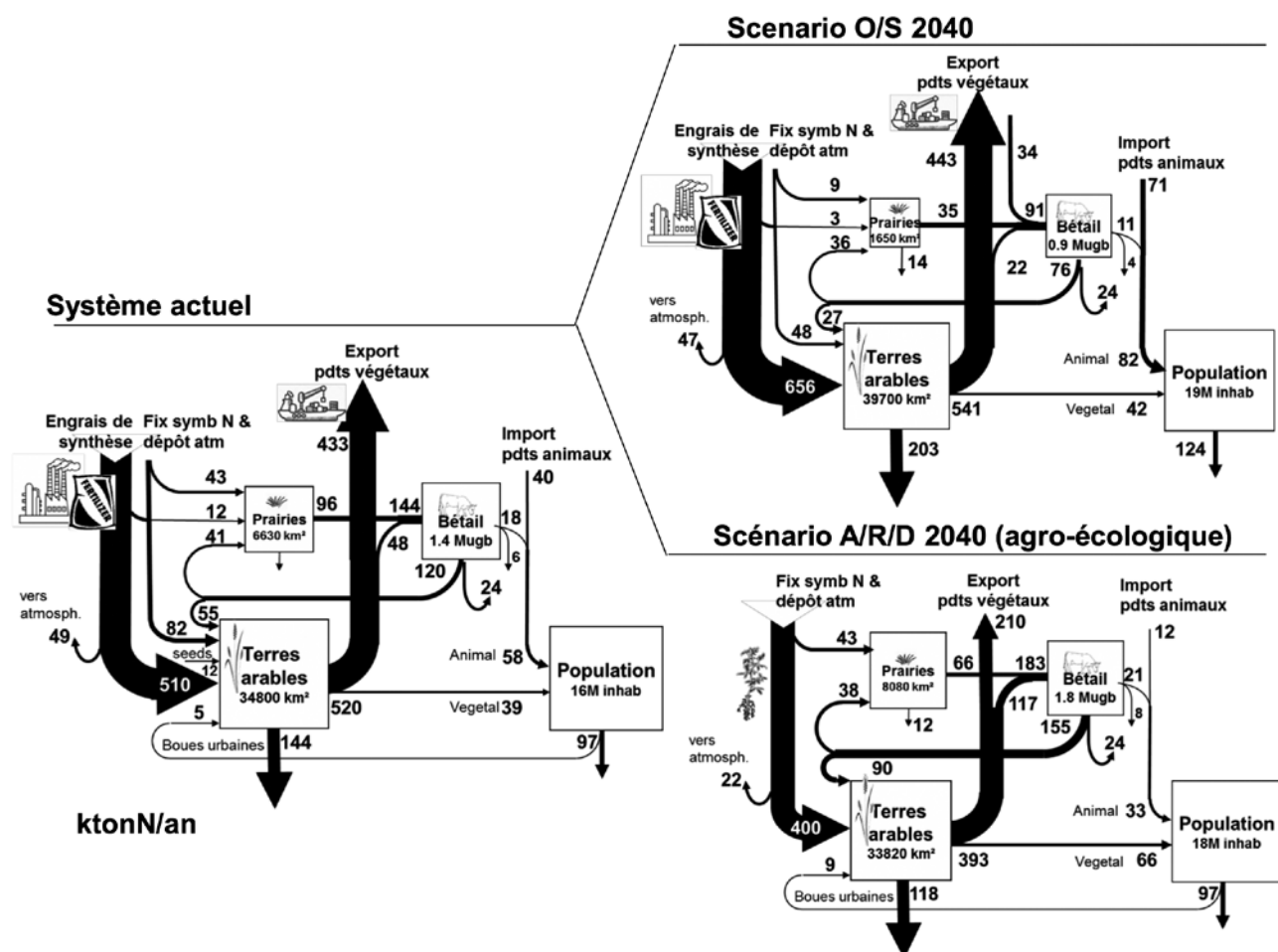


Figure 24. Représentation synthétique des flux d'azote dans le système agroalimentaire du bassin de la Seine pour la situation de référence actuelle et les deux scénarios prospectifs à l'horizon 2050.

Dans le scénario « Paris, le nouveau Londres » (O/S), conformément à la logique de ses objectifs, la production agricole végétale s'accroît légèrement au total, mais se concentre surtout sur les grandes cultures de rente, rendant possible un doublement des exportations de céréales à l'échelle nationale, moins perceptible à l'échelle du bassin de la Seine, déjà aujourd'hui très largement spécialisé dans ce type de production. La spécialisation accrue entre zones de grande culture et zones d'élevage renforce la dépendance du bassin de la Seine aux importations de produits animaux, tandis qu'à l'échelle nationale s'opère une progression très importante des exportations de produits animaux. Mais la part d'herbe et de production fourragères locales dans l'alimentation du bétail diminue très fortement, au profit des aliments importés, ce qui conduit à des importations de soja quatre fois plus élevées qu'actuellement. La France passe ainsi du statut d'exportatrice nette (-100 ktN/an) à celui d'importatrice nette (+600 ktN/an) de produits agricoles.

Dans le scénario agroécologique (« Les villes en leur bassin », A/R/D), malgré l'abandon du recours aux engrais de synthèse et aux pesticides, la production protéique des terres arables ne diminue que de 20 à 25 %. Le cheptel, réduit de moitié, suffit à couvrir les besoins en viande et lait de la population nationale de 75 millions d'habitants, demitariens. La France n'exporte plus de poudre de lait, mais peut encore fournir le marché international en fromages AOC. L'alimentation animale est basée sur 45 % d'herbe et 55 % de production fourragère locale ; aucune importation de protéagineux n'est nécessaire. Chaque région n'est pourtant pas autosuffisante en protéines animales, pas plus que dans la situation actuelle. Mais à l'échelle du bassin de la Seine, l'importation intranationale de viande et de lait vers l'Île-de-France est réduite de 40 à 12 ktN/an.

Besoins et pertes d'azote

Les besoins en intrants industriels et les pertes environnementales constituent un aspect important des performances des systèmes agricoles. En ce qui concerne les engrais synthétiques azotés, ces besoins sont actuellement de 510 ktN/an à l'échelle du bassin de la Seine. Ils s'élèvent à 656 ktN/an dans le scénario « Paris, le nouveau Londres » (O/S), en dépit d'un raisonnement rigoureux de la fertilisation ; ils sont nuls par hypothèse dans le scénario « Les villes en leur bassin » (A/R/D), comme l'est l'usage des pesticides. Le tableau 7 récapitule les caractéristiques productives des deux scénarios par rapport à la situation actuelle, pour le bassin de la Seine et la France entière.

L'approche GRAFS permet de calculer la composition des eaux sous la profondeur d'exploration racinaire des terres arables (qui constitue la concentration de recharge des aquifères, et caractérise les apports diffus aux cours d'eau) à partir de la valeur du bilan d'azote des sols, de leur couverture automnale en lien avec la fréquence des cultures de printemps, et de la valeur annuelle moyenne

de la lame d'eau infiltrée (Anglade et al., 2015 ; 2017) (figure 25a). Dans le scénario « Paris, le nouveau Londres », malgré la condition de respect des normes réglementaires actuellement en cours en matière de raisonnement de la fertilisation minérale, la contamination nitrique se dégrade sensiblement par rapport à la situation actuelle, en raison de l'accroissement des rendements et des pertes d'azote qui en découlent mécaniquement. Le scénario « Les villes en leur bassin » montre au contraire une amélioration générale. En outre, la plus grande proportion de surfaces en prairies permanentes dans ce scénario est favorable à la qualité des eaux.

Le couplage du modèle GRAFS avec le modèle Riverstrahler permet de calculer la contamination des eaux de surface dans l'ensemble du réseau hydrographique de la Seine pour les deux scénarios dans des conditions hydrologiques standard (figure 25b). La qualité d'eau obtenue dans le scénario agroécologique est très largement meilleure que celle du scénario « Paris, le nouveau Londres » et de la référence actuelle.

		2004-2014 Référence	2050 Paris, le nouveau Londres (O/S)	2050 Les villes en leur bassin (A/R/D)
Population	M hab	16 (62)	19 (75)	18 (75)
Consommation en protéines végétales	ktN/an	39 (145)	42 (169)	66 (273)
Consommation en protéines animales ¹	ktN/an	58 (232)	82 (330)	33 (135)
Surface agricole utile	M ha	4.2 (28)	4.1 (27)	4.2 (28)
% prairies permanentes	%	16 (34)	4 (29)	19 (36)
Utilisation d'engrais azotés	ktN/an	521 (1955)	656 (1942)	0 (0)
Production des prairies permanentes	ktN/an	96 (829)	35 (1093)	69 (633)
Production des terres arables	ktN/an	520 (2192)	541 (2508)	393 (1770)
Import (+) / export (-) de céréales	ktN/an	-367 (-540)	-443 (-1089)	-213 (-222)
Cheptel	M ugb ²	1.3 (19)	0.9 (37)	1.8 (12)
Production de viande et lait	ktN/an	18 (261)	11 (383)	21 (138)
Import (+)/ export (-) viande et lait	ktN/an	40 (-29)	+71 (-53)	+11 (-3)
Ingestion du bétail	ktN/an	144 (1955)	91 (3731)	183 (1224)
Pâturage sur prairies	%	64 (42)	38 (29)	36 (45)
Ingestion de cultures locales	%	36 (35)	24 (26)	64 (55)
Ingestion de fourrage importé	%	0 (23)	38 (45)	0 (0)
Import (+) / export (-) de fourrage	ktN/an	0 (+438)	+34 (+1687)	0 (0)

¹ hors poissons et produits de la mer ; ² ugb : unité gros bétail, ruminants et monogastriques

Tableau 7. Caractéristiques et flux de production du système agroalimentaire du bassin de la Seine (en gras) et de la France entière (en italique) pour la situation actuelle et dans les deux scénarios à l'horizon 2050.

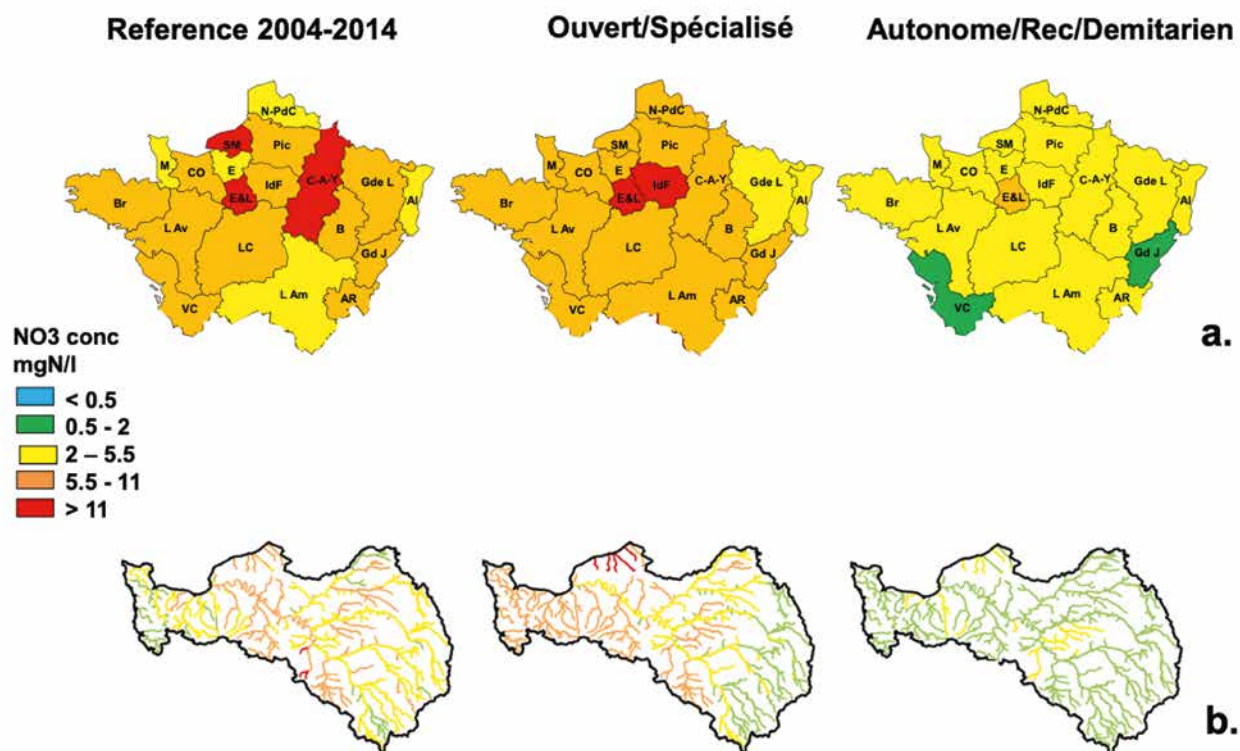


Figure 25 : a. Distribution spatiale de la concentration en nitrates des eaux d'infiltration sous terres arables dans la situation actuelle et dans les deux scénarios prospectifs à l'horizon 2040. b. Concentrations moyennes annuelles en nitrates correspondantes dans le réseau hydrographique de la Seine calculée par le modèle Riverstrahler.





Les émissions de N_2O peuvent être estimées selon la relation empirique de Garnier et al. (2019) à partir des apports d'azote aux sols, de la pluviométrie et de la température (figure 26).

Dans le scénario « Paris, le nouveau Londres » (O/S), les émissions de N_2O (figure 26a) à l'échelle de la France s'accroîtraient de plus de 20 % par rapport au niveau actuel à l'horizon 2050, non en raison d'un accroissement de la fertilisation synthétique, qui augmente peu dans ce scénario en raison des réglementations environnementales, mais à cause des apports accrus aux terres agricoles de déjections d'un cheptel plus abondant. A l'échelle du bassin de la Seine, pour les mêmes raisons, les émissions de N_2O restent globalement inchangées (autour de 11 ktN- N_2O /an). Dans le scénario « Les villes en leur bassin » (A/R/D), les émissions de N_2O diminuent au contraire considérablement, tant au niveau national qu'à l'échelle du bassin de la Seine (2.4 ktN- N_2O /an) grâce à l'arrêt du recours aux fertilisants de synthèse.

Les émissions de CH_4 (figure 26b) dépendent essentiellement de l'importance du cheptel ruminant. Dans le scénario « Paris, le nouveau Londres », les émissions du bassin de la Seine diminuent donc sensiblement (de 110 ktC- CH_4 /an actuellement à 83 ktC- CH_4 /an). Dans le scénario agro-écologique, le cheptel est réparti de façon beaucoup plus homogène entre les différentes régions, ce qui entraîne un accroissement des émissions de CH_4 dans le bassin de la Seine (183 ktC- CH_4 /an).

Les émissions de CO_2 liées à l'agriculture (figure 26c) sont estimées selon la méthode CLIMAGRI (Doublet, 2011). Pour le scénario « Paris, le nouveau Londres », elles restent sensiblement identiques à celles observées actuellement (4 000 kt CO_2 /an). En revanche, dans le scénario agro-écologique, l'abandon du recours aux fertilisants de synthèse et des importations de fourrage conduit à une diminution drastique des émissions directes de CO_2 (1 514 kt CO_2 /an dans le bassin de la Seine) (figure 26c).



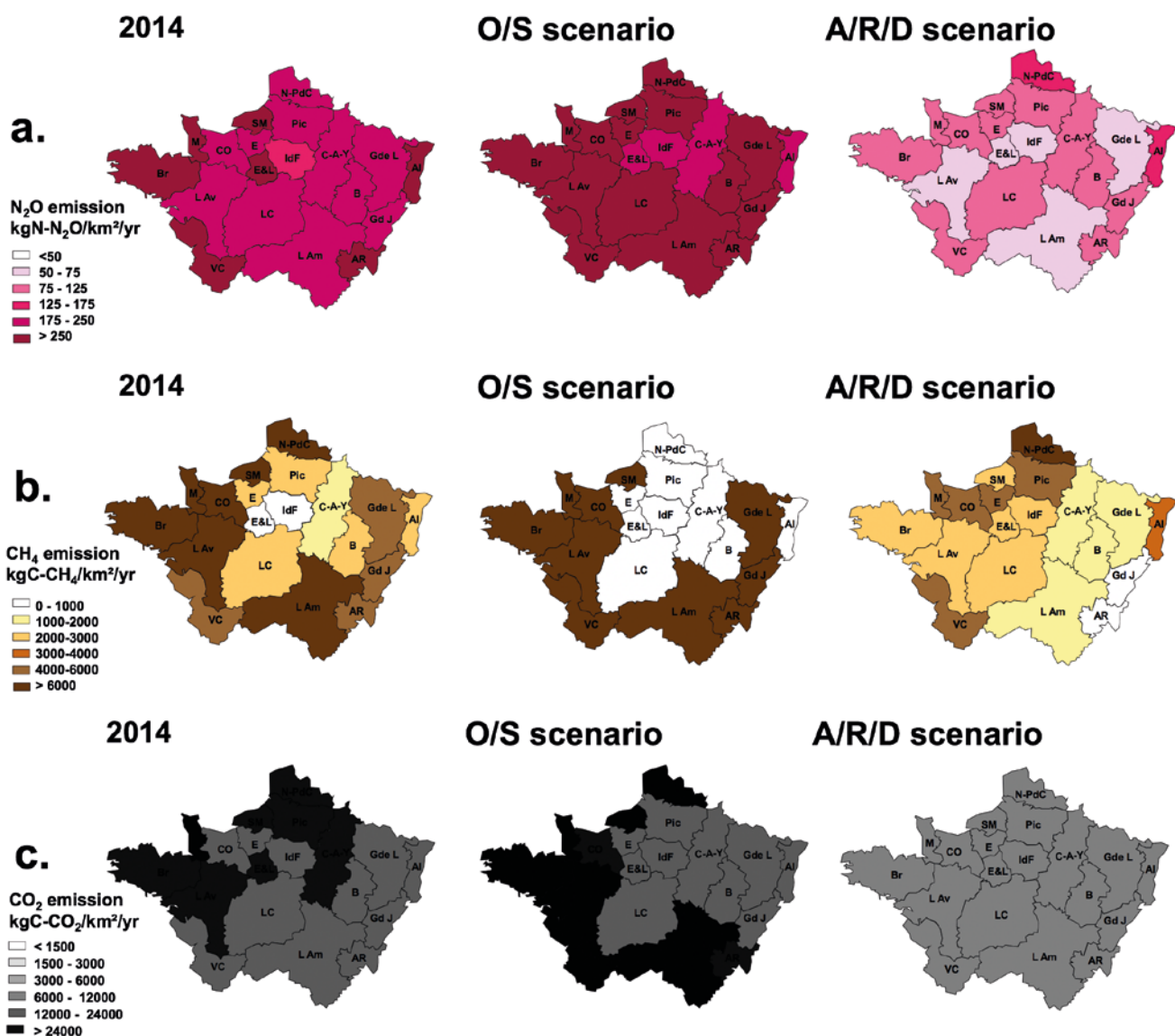


Figure 26. Distribution régionale des émissions de GES actuelles (2014) et pour les deux scénarios prospectifs à l'horizon 2050 (O/S : Ouverture et spécialisation ; A/R/D : Autonomie, Reconnexion, régime Demitarien) (a) : N₂O ; (b) : CH₄ ; (c) : CO₂. (cf. Garnier et al., 2019).

Conclusion : quelle transition pour le métabolisme parisien ?

Les deux images du métabolisme parisien qui émanent des scénarios sont volontairement contrastées et n'ont pas vocation, rappelons-le, à prédire l'avenir. Elles

montrent cependant à la fois les conséquences socio-écologiques d'un certain nombre de choix de société et le champ des possibles en matière de transition. Cette démarche prospective devra être poursuivie afin de mieux caractériser les différentes voies de la transition, ainsi que les différentes formes que pourrait prendre le métabolisme urbain.



Conclusion générale



Une recherche sur le métabolisme n'est pas anodine. Dans l'agglomération parisienne comme ailleurs, elle interroge les sociétés sur leur rapport matériel à leur environnement et réciproquement, à ce que cette intensité matérielle révèle comme, finalement, modèle de société. Si nous avons voulu donner chair à cette idée, à travers une approche temporelle qui embrasse le passé, le présent et le futur, ce dernier mérite une mention spéciale quand il s'agit de conclure ce fascicule. En effet, la réflexion prospective engagée sur l'agglomération s'inscrit dans une problématique plus large, celle de l'anthropocène.

L'anthropocène, qui désigne pour certains chercheurs l'ère géologique présente (et future), est marqué par la présence d'une nouvelle force géologique, celle des humains, qui agit sur tout le fonctionnement terrestre et sur l'ensemble de la biosphère¹⁴. Il constitue en quelque sorte l'aboutissement, à de multiples égards insoutenables, de la trajectoire socio-écologique dont nous avons exploré quelques caractéristiques tout au long de ce texte. Dans cette perspective, il convient d'insister sur deux caractéristiques fondamentales de l'anthropocène.

La première est celle d'une rupture. Jusqu'à présent, il semblait acquis que l'organisation sociale définissait, commandait et gérât son métabolisme matériel et énergétique en fonction de ses besoins et que l'environnement — aquatique, terrestre et aérien — suivrait. Force est de constater que la relation à sens unique allant des sociétés humaines vers un environnement finalement « passif », susceptible non seulement de fournir des ressources (amont du métabolisme) et de recevoir des rejets (aval du métabolisme) en quantités toujours plus importantes d'un côté comme de l'autre, n'est plus tenable. L'approche métabolique, charnière

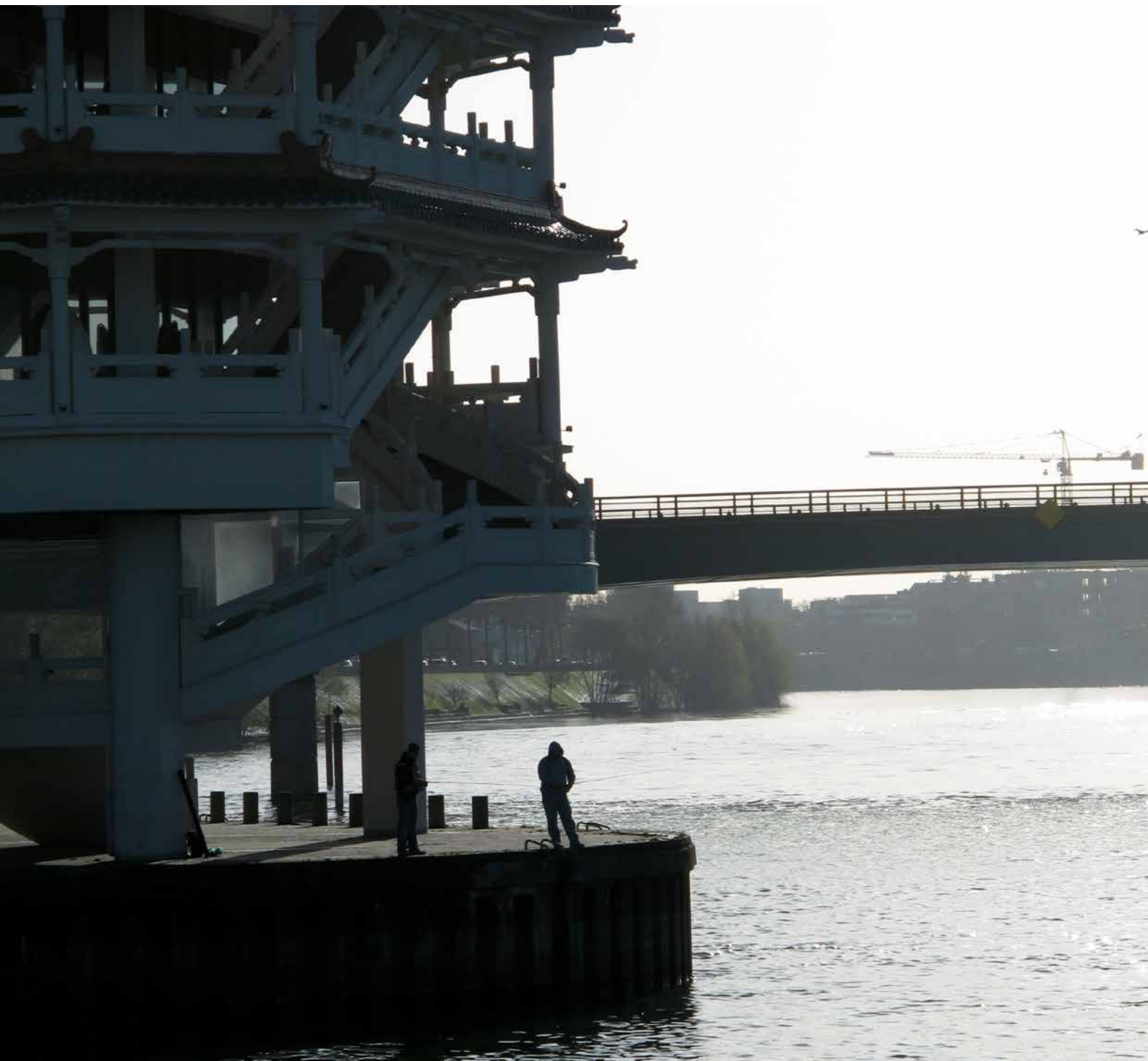
entre une organisation sociale et son environnement, montre ici toute son importance, ne serait-ce que pour aider à la compréhension de ce qui est en jeu. Il s'agirait alors de renverser la perspective et de prendre pour base de réflexion les besoins de notre environnement — et il faudra inclure dans ce dernier les autres organismes vivants, donc enrichir l'approche métabolique somme toute anthropocentrée que nous avons adoptée —, et d'en tirer les conclusions qui s'imposent en termes d'organisation sociale et plus simplement de société, en concevant un système métabolique adapté. C'est une révolution copernicienne, mais c'est bien celle à laquelle nous sommes confrontés, dans l'agglomération parisienne, le bassin de la Seine et ailleurs.

La deuxième caractéristique renvoie aux échelles à convoquer. On l'a vu tout au long de ces pages, le socio-écosystème du bassin de la Seine n'a cessé de s'inscrire dans des systèmes économiques, politiques et physiques de plus en plus larges. Du point de vue métabolique, cela se traduit par l'inscription de la métropole dans une mondialisation matérielle et énergétique, avec une multitude de flux entrants et sortants, transférant des nuisances dans des

tiers lieux qu'on a du mal à se représenter, depuis la toute proche mer du Nord, mais aussi de beaucoup plus loin, jusqu'aux pays qui « accueillent » les déchets de toute nature. Or, dans l'anthropocène, il n'est plus possible d'ignorer ces ailleurs : il n'y a plus de place sur terre pour réguler notre métabolisme. C'est donc les métabolismes reliés de tout un réseau de lieux qu'il faut transformer pour rester dans les limites de la planète — ou du moins ne pas trop en sortir — sans perdre de vue la question de l'équité intergénérationnelle.

Cette perspective donne un certain vertige, et ce fascicule ne prétend pas, loin de là, résoudre ces questions qui convoquent autant les sciences de la matière et de la vie que les sciences sociales. Mais il se veut une contribution à un chantier à la fois

scientifique — celui de renforcer l'analyse métabolique — et, disons-le, politique dans la mesure où il ne s'agit pas de se contenter de caractériser un socio-écosystème à la seule fin de constater qu'il est non durable. Il faut en effet donner des prises pour en changer le cours. Penser ces enjeux à l'échelle d'une métropole comme celle de Paris a un double intérêt à nos yeux : celui de circonscrire les problèmes à une échelle d'analyse plus petite que le monde entier, mais néanmoins cohérente dans son organisation sociale et politique. Mais étudier l'agglomération parisienne renvoie aussi à des problématiques qui dépassent son seul cas, qui concernent d'autres villes-mondes en lien avec les territoires dont elles dépendent pour soutenir leur métabolisme.



Références



- Abad R., 2002. Le Grand Marché : L'approvisionnement alimentaire de Paris sous l'Ancien Régime, Paris, Fayard.
- Adler E., 2020. La gestion des déjections humaines : un défi urbain. Le cas de la ville de Lyon, de la fin du 18^e au début du 20^e siècle. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est.
- Anglade J., Billen G., Makridis T., Garnier J., Puech T., Tittel C., 2015. Nitrogen soil surface balance of organic vs conventional cash crop farming in the Seine watershed. *Agricultural Systems* 139:82-92.
- Anglade J., Billen G., Garnier J., 2017. Reconquérir la qualité de l'eau en régions de grande culture : agriculture biologique et reconnexion avec l'élevage. *Fourrages*, 231, p. 257-268.
- Anonyme, 2020. Dictionnaire critique de l'anthropocène. Paris, CNRS éditions.
- Augiseau V., Barles S., 2018. Bilan de flux de matières de la région Île-de-France en 2015. Rapport pour le compte de la région Île-de-France. Paris : UMR Géographie-Cités.
- Barles S., 2005. L'invention des déchets urbains, France, 1790-1970. Seyssel : Champ Vallon (coll. « Milieux »).
- Barles S., 2019. « L'autonomie métabolique urbaine, un oxymore, une gageure ? », in : Lopez F., Pellegrino M., Coutard O. (dir.), p. 357-375. Les territoires de l'autonomie énergétique, Espaces, échelles et politiques, ISTEE éditions.
- Barles S., 2020. « Urban Metabolism », in : Haumann S., Knoll M., Mares D. (dir.). *Concepts of Urban-Environmental History*. Bielefeld : Transcript Verlag, p. 111-128.
- Barles S., 2001. « Pression urbaine et cycle de l'eau : Paris, XIX^e-XX^e siècles », *Milieux poreux et transferts hydriques* (46) [actes des 25^e journées du Groupe Francophone d'Humidimétrie et des traNsferTs en Milieux Poreux, Hydrogéologie et hydrologie : histoire et prospective, Meudon, 28-29 nov. 2000], p. 117-122.
- Barles S., 2012 « The Seine and Parisian Metabolism: Growth of Capital Dependencies in the 19th and 20th Centuries », p. 94-112, in : CASTONGUAY, S., EVENDEN, M. D. (éds.). *Urban Waters: Rivers, Cities and the Production of Space in Europe and North America*. Pittsburgh : Pittsburgh University Press, 302 p.
- Barles S. (sous presse) « Le métabolisme urbain : une perspective historique (titre provisoire) », in : Salomon-Calvin, J., Granjou, C. (dir.). *Quand l'écologie entre en ville*. Grenoble : éd. de l'Université de Grenoble.
- Bastié J., 1964. La croissance de la banlieue parisienne, Paris : PUF.
- Baudrillart H., 1888. Les populations agricoles de la France. vol. 2, Maine, Anjou, Touraine, Poitou, Flandre, Artois, Picardie, Île de-France, passé et présent, Paris.
- Billen G., Barles S., Chatzimpiros P., Garnier J., 2012. « Grain, meat and vegetables to feed Paris: where did and do they come from? Localising Paris food supply areas from the eighteenth to the twenty-first century », *Regional Environmental Change*, 12(2), p. 325-335.

- Billen G., Toussaint F., Peeters P., Sapir M., Steenhout A. et Vanderborght J. P., 1983. L'écosystème Belgique. Essai d'écologie industrielle. Bruxelles : Centre de recherche et d'information socio-politique.
- Billen G., Garnier J., Thieu V., Passy P., Riousset P., Silvestre M., Théry S., Vilain G., Billy C., 2011. La cascade de l'azote dans le bassin de la Seine: comprendre les processus pour inverser les tendances. Agence de l'eau Seine-Normandie, Nanterre.
- Billen G., Le Noë J., Garnier J., 2018. Two contrasted future scenario for the French agro-food system. *Sci Tot. Environ.* 637-638: 695-705. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.043.
- Blézat consulting, CREDOC, Deloitte Développement Durable, 2017. Étude prospective sur les comportements alimentaires de demain et élaboration d'un dispositif de suivi des principales tendances de consommation à destination des entreprises de la filière alimentaire. Rapport au Ministère de l'agriculture.
- Boyden S., Millar S., Newcombe K. et O'Neill B., 1981. *The Ecology of a City and its People : The Case of Hong Kong*. Canberra : Australian National University Press.
- Buclet N., 2016. *Essai d'écologie territoriale : L'exemple d'Aussois en Savoie*. Paris : Presses du CNRS.
- Doublet S., 2011. CLIMAGRI : bilan énergies et GES des territoires ruraux, la ferme France en 2006 et 4 scénarios pour 2030. Rapport ADEME. Disponible sur : <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/climagri-la-ferme-france-en-2006-et-4-scenarios-pour-2030.pdf>.
- DRIEE Île-de-France, 2016. « Les ressources du sol et du sous-sol », <http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/les-chiffres-cles-des-carrieres-en-activite-a2671.html>, consulté le 17 août 2020.
- Duby G., Wallon A., 1993. *Histoire de la France rurale, tome III, De 1789 à 1914*. Seuil, Paris.
- Ducharne A., Thery S., Viennot P., Ledoux E., Gomez E., Deque M., 2003. « Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine », *Vertigo*, 4(3).
- Esculier F., Barles S., 2021. « Past and future trajectories of human excreta management systems: Paris in the nineteenth to twenty-first centuries », p. 117-140, in : Flipo N., Labadie P., Lestel L. (dir.). *The Seine river basin*. Heidelberg : Springer Verlag.
- Esculier F., Le Noë J., Barles S., Billen G., Créno B., Garnier J., Lesavre J., Petit L., Tabuchi J.-P., 2019. The biogeochemical imprint of human metabolism in Paris Megacity: a regionalized analysis of a water-agro-food system. *Journal of Hydrology* 573: 1028-1045. DOI 10.1016/j.jhydrol.2018.02.043.
- Fierro A., 1996. *Histoire et dictionnaire de Paris*. Paris : Robert Laffont (coll. « Bouquins »).
- Fischer-Kowalski M., 1998. « Society's Metabolism : the Intellectual History of Material Flow Analysis Part I, 1860-1970 », *Journal of Industrial Ecology*, vol. 2, n° 1, p. 61-78.
- Foster J. B., 1999. « Marx's theory of metabolic rift: Classical foundations for environmental sociology », *American Journal of Sociology*, vol. 105, n° 2, p. 366-405.
- Fourcaut A., 2000. *La banlieue en morceaux. La crise des lotissements défectueux en France dans l'entre-deux-guerres*, Grâne, Créaphis.
- Garnier J., Le Noë J., Marescaux A., Sanz-Cobena A., Lassaletta L., Silvestre M., Thieu V., Billen G., 2019. Long term changes in greenhouse gas emissions of French agriculture (1852-2014): from traditional agriculture to conventional intensive systems". *Sci. Tot. Environ.* 10.1016/j.scitotenv.2019.01.048
- Geddes P., 1885. *An analysis of the principles of economics*. London: Williams & Norgate.

- Geddes P., 1915. Cities in evolution. An Introduction to the Town Planning Movement and to the Study of Civics. London: Williams & Norgate.
- Grizzetti B., Pretabo U., Lassaletta L., Billen G., Garnier J., 2013. The contribution of food waste to global and European nitrogen pollution. Environm. Sci. & Policy 33, p. 186-195.
- Gruber N. & Galloway J.N., 2008. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. Nature, 451, p.293-296. <https://doi.org/10.1038/nature06592>.
- Guillerme A., 2007. La naissance de l'industrie à Paris, entre sueurs et vapeurs, 1780-1830. Seyssel, Champ Vallon.
- Husson, A., 1856. Les consommations de Paris. Paris, Guillaumin.
- ITAB, 2011. Rotations en grandes cultures biologiques sans élevage. Réseau expérimental RotAB. www.itab.asso.fr/downloads/rotab/rotab-broch-fertilite.pdf.
- Joulot A., 1946. Les ordures ménagères : Composition, collecte, évacuation, traitement, Paris.
- Kaplan S. L., 1988. Les ventres de Paris. Pouvoir et approvisionnement dans la France d'Ancien Régime. Paris : Fayard.
- Kim E., 2013. Les transitions énergétiques urbaines du XIX^e au XXI^e siècle : de la biomasse aux combustibles fossiles et fissiles à Paris (France). Thèse de doctorat, Université Paris 1.
- Kime E, Barles S., 2012. « The energy consumption of Paris and its supply areas from 18th century to present », Regional Environmental Change, 12(2), p. 295-310.
- Kneese A. V., Ayres R. U. et D'Arge R. C., 1970. Economics and the environment. A Material balance approach. Washington D.C.: Resources for the Future.
- Krausmann F., Lauk C., Haas W., Wiedenhofer D., 2018. From resource extraction to outflows of wastes and emissions: Thesocioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015, Global Environmental Change, 52, p. 131-140.
- Krausmann, Weisz, Eisenmenger, 2016. « Transitions in sociometabolic regimes throughout human history », in: Haberl H., Fischer-Kowalski M., Krausmann F et, Winiwarter, V. (éd.). Social ecology. Society-nature relations across time and space. Springer. p. 65-92.
- Langlois G. A., 2003. Pannecière, Paris, Somogy/IIBRBS.
- Lassaletta L., Billen G., Grizzetti B., Anglade J., Garnier J., 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. Environ. Res. Lett. 9. DOI:10.1088/1748-9326/9/10/105011.
- Lavoisier A. J. B., 1791. « Essai sur la richesse territoriale de la France » in Schelle G, Grimaux E (1894), Lavoisier : statistique agricole et projets de réforme. Paris, Guillaumin. p. 130-184.
- Le Nechet R., Michaud M., Legrain P., Hirschler J., Pas N., Chauvin S., Lafont M., 2006. 2020 : Que mangerons-nous ? Enjeux pour les productions agricoles Normandes. Chambre d'Agriculture de Normandie. www.normandie.chambagri.fr.
- Le Noë J., Billen G., Esculier F., Garnier J., 2018. Long term socio-ecological trajectories of agro-food systems revealed by N and P flows: the case of French regions from 1852 to 2014. Agriculture, Ecosystems and Environment 265: 132-143. doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.006.
- Le Noë J., Billen G., Lassaletta L., Silvestre M., Garnier J., 2016. La place du transport de denrées agricoles dans le cycle biogéochimique de l'azote en France : un aspect de la spécialisation des territoires. Cahier agri., 25, 15004, DOI: 10.1051/cagri/2016002.

- Marescaux A., Thieu V., Garnier J., 2018. Carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions from the human-impacted Seine watershed in France. *Science of the Total Environment*. 643: 247–259. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.151.
- Mayer A., 1867. La canalisation souterraine de Paris. in: *Paris-guide*, Paris.
- Mémoire sur la fertilité des Provinces du Royaume, pour ce qui concerne les grains, les services qu'elles peuvent se procurer mutuellement, et particulièrement la ville de Paris. Sans date [178.], Archives Nationales, F11 261-262.
- Merriman J. M., 1994. Aux marges de la ville : Faubourgs et banlieues en France, 1815-1870, Paris : Seuil. Trad. de l'éd. états-uniennes de 1991, *The Margins of City Life: Explorations on the French Urban Frontier*.
- Nysten P. H., 1858. Dictionnaire de médecine. Paris : Baillière.
- Philippe, R., 1961. « Une opération pilote : L'étude du ravitaillement de Paris au temps de Lavoisier ». *Annales Économie Société Civilisation*, vol. 16, p. 564-568.
- Philipponneau M., 1956. La vie rurale de la banlieue parisienne. *Etude de géographie humaine*. A. Colin. Paris. 593 p.
- Pluvinage C., 1912. Industrie et commerce des engrais et des anticryptogamiques et insecticides, 1^{ère} éd., Paris.
- Romero E., Le Gendre R., Garnier J., Billen G., Fisson C., Silvestre M., Riou Ph., 2016. Long-term water quality in the lower Seine: lessons learned over 4 decades of monitoring. *Environmental Science and Policy*, 58: 141–154. doi.org/10.1016/j.envsci.2016.01.016.
- Sieferle R. P., 2001. *The Subterranean Forest : Energy Systems and the Industrial Revolution*. Cambridge, The White Horse Press. 242 p.
- SOeS, 2017. Les prélèvements d'eau douce en France : les grands usages en 2013 et leur évolution depuis 20 ans, Ministère de l'Environnement (SOeS). En ligne, consulté le 18 août 2020, <https://www.eaufrance.fr/publications/les-prelevements-deau-douce-en-france-les-grands-usages-en-2013-et-leur-evolution>.
- Stergiouli M. L., Hadjibiros K., 2012. The growing water imprint of Athens (Greece) throughout history. *Regional Environmental Change*, 12(2), p. 337-345.
- Swaney D. P., Santoro R. L., Howarth R. W., Hong B., Donaghy K. P., 2012. Historical changes in the food and water supply systems of the New York City Metropolitan Area, *Regional Environmental Change*, 12(2), p. 363-380.
- Van Cruyningen P., Thoen E., 2012. Food supply, demand and trade. Aspects of the economic relationship between town and countryside (Middle Ages – 19th century). Turnhout: Brepols.
- Védry B., 1992. Contribution à l'histoire des procédés d'épuration biologique des eaux résiduaires, mémoire de DEA, Universités de Paris IV et de Paris VIII, CNAM, EHESS.
- Wolman A., 1965. « The metabolism of cities », *Scientific American*, vol. 213, n° 3, p. 179-190.

Glossaire



- **Agraire (régime)** : qui concerne l'agriculture.
- **Anthroposystème** : caractérise un système plus ou moins complexe dans lequel interagissent un ou des socio-écosystèmes et un ou des écosystèmes plus ou moins artificialisés.
- **Assolement** : correspond à la répartition annuelle des cultures entre les différentes parcelles d'une exploitation agricole. On parle également de rotation culturale.
- **Autotrophe** : organisme capable de synthétiser sa propre matière organique à partir d'éléments minéraux. On retrouve par exemple les végétaux chlorophylliens qui synthétisent des sucres à partir du dioxyde de carbone (CO_2).
- **Biogéochimique (cycle)** : désigne un ensemble de mécanismes de transport et de transformation d'un élément ou d'un composé chimique entre les différents compartiments terrestres.
- **Carbochimie** : branche de la chimie qui s'intéresse aux techniques de transformation du charbon en nouvelles molécules utilisables.
- **Chaux hydrauliques** : matériau issu de la cuisson de calcaire et d'argile, servant à l'isolation et à la protection des murs.
- **Directive-cadre sur l'eau** : directive de l'Union européenne du Parlement européen et du Conseil adoptée le 23 octobre 2000. Elle établit un cadre pour une politique globale communautaire dans le domaine de l'eau.
- **Endogène** : caractérise ce qui provient et fabriqué de l'intérieur d'un système. À l'inverse d'exogène qui correspond à ce qui vient de l'extérieur d'un système.
- **Etiage (niveau d')** : il s'agit du niveau moyen le plus bas d'un cours d'eau.
- **Evapotranspiration** : est un phénomène qui correspond à la somme de la transpiration du couvert végétal (via le feuillage) et de l'évaporation des sols et des surfaces d'eau.
- **Exutoire** : cours d'eau ou conduit permettant l'évacuation d'un trop plein d'eau (usée, polluée ou de pluie).
- **Haber-Bosch (procédé)** : permet la synthèse d'ammoniac (NH_3) à partir du diazote (N_2) de l'air et du dihydrogène (H_2) en présence d'un catalyseur (à base de fer). Ce procédé révolutionna la production d'engrais azotés à bas coûts.
- **Hétérotrophe** : organisme qui ne peut produire sa propre matière organique (à l'inverse des organismes autotrophes) dont il se nourrit. Par exemple, l'être humain est un organisme hétérotrophe.
- **Hinterland** : mot d'origine allemande qui désigne l'arrière-pays, la zone continentale derrière une côte ou à un fleuve par opposition au littoral.
- **Intrants (agricoles)** : terme qui englobe l'ensemble des produits qui sont utilisés sur les terres agricoles afin d'en améliorer le rendement.

- **Mâchefer** : désigne les résidus solides issus de l'incinération de déchets ménagers dans des fours industriels.
- **Pédoclimat** : climat interne du sol, c'est-à-dire son taux d'humidité, sa température, etc.
- **Pétrochimie** : correspond la branche de la chimie qui étudie les dérivés du pétrole pour produire de nouveaux composés chimiques.
- **Phytoépuration** : système d'épuration des eaux par les plantes.
- **Potabilisation** : fait de rendre potable, en général s'applique à l'eau.
- **Potasse (d'Alsace)** : désigne des roches sédimentaires à base de chlorure de potassium. Elles sont utilisées notamment pour la production d'engrais.
- **Poudrette** : engrais fabriqué à partir de matières fécales humaines desséchées et pulvérisées.
- **Sainfouin** : il s'agit d'une plante annuelle ou bisannuelle utilisée pour le fourrage du bétail.
- **Salpêtre** : dérivé du latin *salpetrae* signifiant « sel de pierre », il s'agit de petits cristaux blanchâtres de nitrate de potassium qui apparaissent sur les parois humides (murs, roches, sols). Il est notamment utilisé comme engrais.
- **Séquanais (bassin)** : désigne le bassin de la Seine. Les termes « séquanais » ou « séquanien » sont issus du nom d'un peuple gaulois qui habitait la région voisine des sources de la Seine.
- **Symbiotique** : caractérise l'état de symbiose, c'est-à-dire une association exclusive, durable et profitable entre deux organismes.
- **Trituration** : est une action de broyage par friction et une forte pression. On retrouve ce mécanisme lorsque nous mâchons avec nos molaires.
- **Terre arable** : se dit d'une terre qui peut être cultivée ou labourée, dont la vocation est la culture.

Sigles



- **DCE** : Directive-cadre sur l'eau
- **INSEE** : Institut national de la statistique et des études économiques
- **COP** : Conference of the Parties (Conférence des parties)
- **SEDIF** : Syndicat des eaux d'Île-de-France
- **CREDOC** : Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie
- **SIAAP** : Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne
- **GES** : Gaz à effet de serre
- **GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- **UGB** : Unité gros bétail
- **SAU** : Surface agricole utile
- **AOC** : Appellation d'origine contrôlée
- **UNESCO** : Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture

Pour citer cet ouvrage :

S. Barles, G. Billen, F. Esculier, J. Garnier, X. Poux (2021), Le métabolisme de l'agglomération parisienne, Fascicule #20 du PIREN-Seine, ISBN : 978-2-490463-12-1, ARCEAU-IdF, 76 p.

Cet ouvrage est édité par la cellule transfert des connaissances du PIREN-Seine, et son contenu est issu des recherches menées au sein du programme. Sauf mention contraire, les productions du PIREN-Seine sont régies par licence Creative Commons CC-BY-NC-SA v4.0 ou ultérieure (pas d'utilisation commerciale, partage des conditions initiales à l'identique).



Editeur :

ARCEAU-IdF 2021
www.arceau-idf.fr

Création graphique et impression :

 www.idbleue.com

Crédits photos :

Photo de couverture, p.4 : rglinsky/Depositphotos.com • p.6 : shovag/Depositphotos.com • p.9 : razvanphoto/Depositphotos.com • p.42/43 : StevanZZ/Depositphotos.com • p.58 : pascalegueret/Depositphotos.com • p.10/11, p.15, p.20, p.34, p.48, p.62, p.64 : Domaine public • p.8, p.22, p.41, p.61, p.65 : PIREN-Seine • p.28/29 : Yann Caradec • p.37 : Myrabella • p.44, p.50 : Photomontages Pauline Geneste



Le **PIREN-Seine** est un programme de recherche interdisciplinaire en environnement dont l'objectif est de développer une vision d'ensemble du fonctionnement du bassin versant de la Seine et de la société humaine qui l'investit, pour permettre une meilleure gestion qualitative et quantitative de la ressource en eau. Il est l'un des programmes composant la Zone Atelier Seine du CNRS.

La *cellule transfert des connaissances* a pour but de valoriser les productions de savoirs scientifiques issues des recherches du **PIREN-Seine**, et de favoriser la mise à disposition de ces informations à un large public, des professionnels de la gestion de l'eau aux élus en passant par les usagers. Soutenue par l'Agence de l'eau Seine-Normandie et l'EPTB Seine Grands Lacs, et animée depuis octobre 2016 par l'association ARCEAU-IdF, cette cellule répond à une forte volonté de la part des chercheurs de participer au transfert des savoirs scientifiques et techniques vers la société civile. Elle est ainsi chargée de la rédaction et de l'édition de documents thématiques, de la mise en ligne de contenus scientifiques adaptés à la fois aux professionnels et au grand public, et de la mise en place d'ateliers de co-réflexion du programme.

La collection des fascicules du **PIREN-Seine** analyse différents aspects du fonctionnement du bassin de la Seine, correspondant aux multiples domaines de recherche du programme. Ils s'adressent à tous les publics concernés par l'analyse et la gestion du bassin versant de la Seine et des problématiques environnementales et humaines qui y sont liées. Tous ces fascicules sont disponibles en téléchargement gratuit au format PDF sur le site du programme. Une première série de neuf fascicules a été publiée en 2009. En 2011, six nouveaux titres sont venus enrichir la collection. En 2017, la production des fascicules reprend avec une nouvelle collection, pour permettre aux acteurs du domaine de l'eau et de l'environnement de rester informés des dernières recherches scientifiques menées par le **PIREN-Seine**.

Ce fascicule est exceptionnellement édité dans le cadre du colloque 2021 du PIREN-Seine

Pour plus d'informations,
retrouvez-nous sur :
www.piren-seine.fr

ISBN 978-2-490463-12-1



Les partenaires opérationnels de la phase 8 du PIREN-Seine



Les partenaires scientifiques de la phase 8 du PIREN-Seine

