

Ville et fonctionnement du bassin de la Seine : matériaux de construction, sol, énergie, alimentation. Contribution à une écologie territoriale

Sabine Barles^{1*}, Gilles Billen^{2*}, Petros Chatzimpiros¹, Eunhye Kim¹, Josette Garnier²,
Marie Silvestre²

¹UMR LATTIS, Université Paris-Est / CNRS.

²²UMR Sisyphe, UPMC/CNRS.

* personnes à contacter. Sabine.barles@univ-paris8.fr, gilles.billen@upmc.fr

1 Introduction

Le métabolisme urbain – avec toute la prudence que requiert cette analogie organiciste – désigne l'ensemble des processus par lesquels les villes importent, consomment, transforment, exportent énergie et matières (Wolman, 1965). Son analyse contribue à caractériser les interactions énergétiques et matérielles entre sociétés et biosphère et vise à dépasser les approches sectorielles classiques. Les flux d'énergie et de matières lient par ailleurs les villes à d'autres territoires qui les approvisionnent ou reçoivent leurs excréta, si bien que leur empreinte environnementale peut se situer très loin de leurs limites : sa caractérisation constitue aussi un enjeu important. L'écologie territoriale quant à elle vise à inscrire le métabolisme urbain dans un cadre spatial et social : les flux de matière et d'énergie mis en jeu résultent de choix ou de configurations politiques, économiques, sociaux et techniques ; ils reflètent non seulement les processus caractéristiques de la biosphère, mais aussi le fonctionnement des sociétés et ne sauraient être analysés sans la prise en compte de celui-ci (Barles, 2010).

Au cours de la phase V, l'équipe « écologie territoriale » du PIREN-Seine a poursuivi ses investigations sur le métabolisme urbain et ses conséquences en termes d'empreintes environnementales. Ces travaux, qui ont en outre contribué à un projet ANR (Confluent, en cours), un projet PIRVE (Empreintes, en cours) et deux projets financés par la Ville de Paris (un achevé un en cours), ont gagné en cohérence quant aux processus analysés, aux méthodes mobilisées, à la conceptualisation théorique qui les sous-tendent. Ils ont en effet permis de préciser la définition de l'écologie territoriale, qui se distingue de l'écologie industrielle par sa volonté d'englober l'ensemble des processus socio-naturels caractéristiques d'un territoire donné (en cela elle se rapproche de l'écologie sociale anglo-saxonne) ; ils ont précisé les notions d'empreinte environnementale, d'empreinte institutionnelle et d'annexes urbaines ; ils ont mis en œuvre des méthodes de quantification du métabolisme urbain et des empreintes alimentaires.

Ces travaux permettent d'avoir une vision synthétique et systémique des interactions entre l'agglomération parisienne et son bassin (et d'autres territoires hors de son bassin), et de la trajectoire suivie par ses interactions au cours des deux voire trois derniers siècles. L'étude d'autres territoires (encore en cours) a permis de donner des premiers éléments de comparaison en termes de consommation urbaine et de pression sur les ressources.

On abordera dans un premier temps le métabolisme urbain dans son intégralité de façon à montrer quels sont les principaux flux de matières mis en jeu par l'agglomération parisienne ; la comparaison avec une autre région, Midi-Pyrénées, permettra de montrer les spécificités du bilan métropolitain (§ 2.1). Compte tenu du rôle des matériaux de construction dans le bilan global, ceux-ci retiendront particulièrement l'attention (§ 2.2), avec deux points de discussion : la comparaison avec d'autres territoires d'une part, le lien avec la consommation d'espace d'autre part. Les grandes tendances de la consommation énergétique seront ensuite discutées (§ 3), avec un accent particulier sur l'énergie dite technique et sur les résultats contrastés obtenus en termes de consommation primaire et finale. Enfin, on reviendra sur la demande alimentaire (§ 4) : on montrera que l'aire principale d'approvisionnement alimentaire de l'agglomération parisienne est constituée par un grand quart Nord-Ouest de la France qui fournit 70% de la consommation de protéines de la capitale, mais que le bilan d'azote du système agricole de ce territoire est largement déficitaire et repose sur des importations massives d'aliments pour le bétail.

2 Métabolisme urbain et bilans de matières brutes¹

La réalisation d'un bilan de matières brutes – parfois désigné sous l'acronyme AFM pour « analyse des flux de matières », en traduction littérale de l'anglais *material flow analysis (MFA)* – à l'échelle d'un territoire a pour objectif de peser au sens strict du terme l'impact matériel du fonctionnement de ce territoire, qu'il s'agisse des flux entrants, des flux sortants ou du stock. Elle permet de donner un ordre de grandeur à ces flux, de les comparer entre eux, de comparer différents territoires ou, si elle est répétée dans le temps, de suivre la trajectoire socio-naturelle d'un territoire particulier, de même que les transitions d'un régime à l'autre. À partir de cette vue d'ensemble du métabolisme territorial, il est possible de désagréger les flux de façon à identifier leurs principales composantes, de mieux comprendre le bilan de matières brutes et les processus socio-naturels qui le sous-tendent, voire d'envisager des cibles d'action dans la perspective d'une meilleure maîtrise des flux énergétiques et matériels mis en jeu par les sociétés humaines, *i. e.* de la dématérialisation.

2.1 Bilans de matières brutes : méthode, sources, études de cas

2.1.1 Méthode

Le bureau européen de la statistique (Eurostat) a développé à partir des années 1990 une méthode destinée à la réalisation de bilans nationaux voire continentaux, la quantification des flux de matières brutes et la détermination d'indicateurs y relatifs apparaissant comme un complément des indicateurs économiques usuels. Publiée en 2001 (Eurostat, 2001), elle a été appliquée à différents pays (voir par exemple Weisz et al., 2006). La pertinence de son utilisation aux échelles infranationales a été discutée par Hammer et al. (2003), qui l'ont appliquée à plusieurs régions urbaines (Hammer et al. 2006). Elle présente en effet plusieurs avantages : sa large diffusion permet la comparaison entre études de cas réalisées ici ou là, et ce à différentes échelles ; elle est basée sur la collecte de données existantes (au moins à l'échelle nationale) et ne nécessite pas a priori la production de données spécifiques ; elle consiste à déterminer les flux entrants dans le et les flux sortants du système étudié sans requérir la description de la circulation des matières au sein de celui-ci (qui peut s'avérer utile dans une seconde étape d'analyse), ce qui en fait un outil relativement simple, élément important si l'on souhaite que ce type d'analyse se développe en appui à l'action. L'alternative consisterait à employer la méthode développée par Baccini et Brunner (1991), précisée par Brunner et Rechberger (2004), qui se base sur une description des principaux flux caractérisant un système donné (correspondant à quatre activités humaines, considérées comme résumant les besoins matériels humains : 1) nourrir, 2) laver, 3) résider et travailler, 4) transporter et communiquer), les flux sortants étant déterminés par des coefficients de transferts caractéristiques des processus sous-jacents. Indépendamment de la préinterprétation implicite qui la fonde², cette méthode s'avère plus complexe à mettre en œuvre et moins propice à la définition d'indicateurs synthétiques, ce qu'autorise la méthode Eurostat.

La figure 2.1 et le tableau 2.1 présentent la méthode retenue, adaptée aux échelles infranationales, ainsi que les principaux indicateurs qui en résultent. L'approche se fonde sur deux principes :

- le système étudié (désigné par « Société » ou « Économie ») est borné dans l'espace par les limites administratives du territoire considéré, il ne contient que la population humaine, ses activités, ses productions et ses artefacts – le système exclut donc les composantes naturelles du territoire étudié (air, eau, sol)³ ;
- les flux étudiés sont très globaux (entrées, sorties, addition au stock, recyclage), sans oublier les flux indirects, il ne s'agit donc pas d'analyser des fonctions, des activités et des processus, mais des échanges entre une société localisée donnée et son environnement (nature d'une part, autres sociétés d'autre part). Par ailleurs, l'eau consommée par les activités humaines n'est pas comptabilisée dans le bilan.

¹ Le rapport d'activité 2006 (Barles, 2007) donnait les premiers éléments des bilans parisien et francilien. La méthode a depuis été précisée, de même que les résultats, si bien que ce sont ceux qui sont présentés ici qui font foi.

² Les quatre activités retenues sont peut-être pertinentes aujourd'hui dans les pays développés, mais résistent mal à l'espace et au temps : l'activité de nettoyage n'a pas toujours eu le rôle qu'on lui attribue aujourd'hui, le travail n'existe tout simplement pas au sein de certaines sociétés, dans d'autres la religion est à l'origine d'intenses consommations matérielles, pour ne citer que quelques exemples.

³ Dans la méthode alternative, les limites verticales du système sont fixées à 500 m au-dessus du niveau du sol et à une profondeur telle que les eaux souterraines y sont incluses (Brunner et Rechberger, 2004).

Souhaitant comprendre le fonctionnement d'un territoire donné, nous avons retenu, pour l'établissement des flux, le principe territorial, qui consiste à comptabiliser les flux à leur lieu de circulation, par opposition au principe résidentiel, qui consiste à les affecter à leurs émetteurs : par exemple la consommation matérielle d'un touriste visitant Paris serait déduite du bilan de matières parisien pour être affectée au lieu de résidence de ce touriste ; a contrario, la consommation matérielle d'un parisien effectuée à l'extérieur de Paris serait incluse dans le bilan parisien.

Bien que basée sur le principe de la conservation de la matière, la méthode Eurostat standardisée ne présente pas un bilan équilibré⁴ parce qu'elle ne prend pas en compte, dans la définition des indicateurs, certains flux « invisibles » engendrés par les activités humaines. Il s'agit en particulier des flux d'oxygène (entrant) et d'eau (sortant) mis en jeu par la combustion (selon le principe (combustible + oxygène) donne (gaz carbonique + eau)), réaction qui fonde les sociétés industrielles et post-industrielles. Ces flux ont été réintroduits dans le bilan régional et urbain de façon à permettre le calcul de l'addition au stock.

En outre, la méthode Eurostat définit quatre flux sortants (figure 2.1) : extraction locale inutilisée, émissions vers la nature (qu'elles soient solides, liquides ou gazeuses), exportations, flux indirects associés aux exportations. Elle ne permet pas de prendre en compte les émissions vers la nature délocalisées (*i. e.* effectuées à l'extérieur du périmètre d'étude), ou bien repose sur l'hypothèse selon laquelle tous les flux vers la nature sont émis localement. Cette hypothèse, rarement vérifiée à l'échelle nationale (voir par exemple les exportations de déchets solides), l'est plus rarement encore à l'échelle urbaine, les équipements de traitement des eaux usées et des déchets solides pouvant se situer à l'extérieur de la ville et constituant ainsi des dépendances urbaines délocalisées (Barles, sous presse). Il a donc été nécessaire 1) de distinguer les émissions locales vers la nature des émissions délocalisées, celles-ci se distinguant des exportations à caractère économique ; 2) de définir un nouvel indicateur pour les flux vers la nature : LEPO (local and exported flows to nature) visant à prendre en compte l'ensemble des émissions vers la nature et complétant l'indicateur DPO (domestic processed output) qui concerne uniquement les émissions locales.

Ceci a aussi une conséquence pour le calcul de la consommation nette (DMC, direct material consumption). Dans la méthode Eurostat :

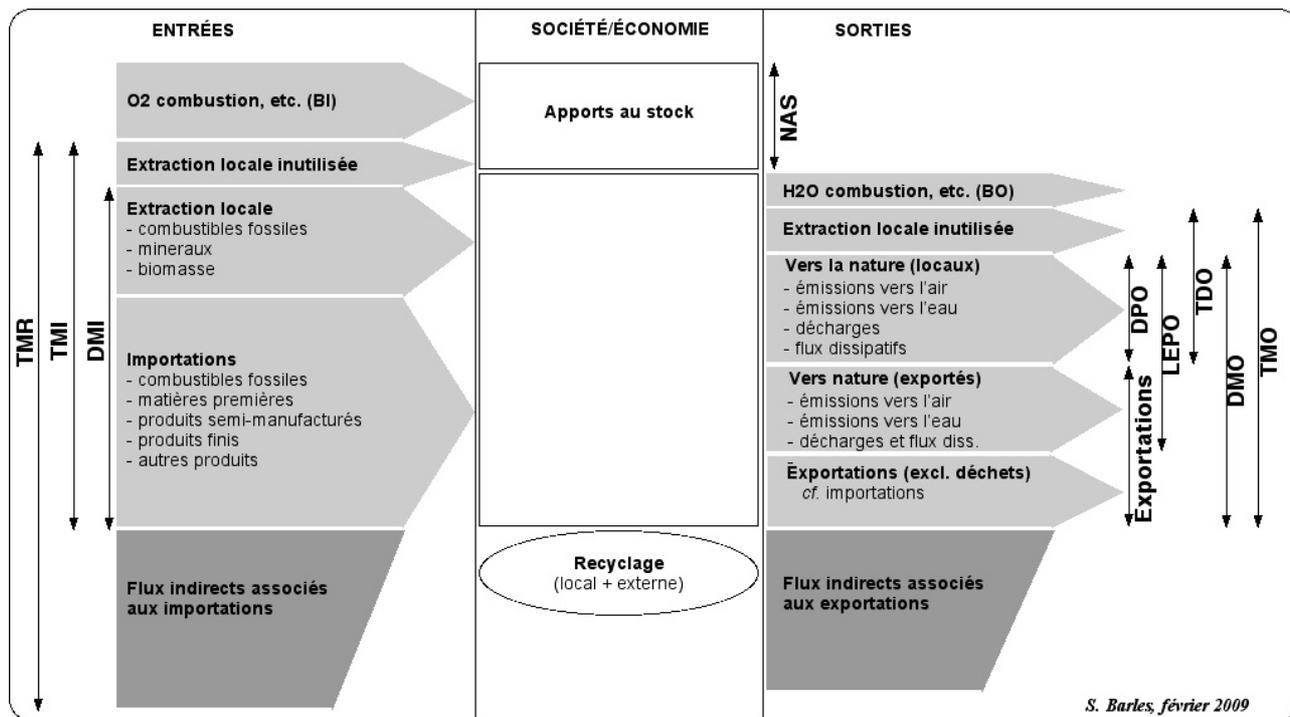
$$\text{DMC} = \text{DMI} - \text{Exportations (totales)}$$

Sachant que les exportations totales comprennent à la fois les exportations à caractère commercial et d'éventuelles émissions vers la nature délocalisées. Appliquée à l'échelle urbaine, cette équation conduit à surestimer les exportations, puisqu'elles contiennent une grande partie des rejets vers la nature induits par les équipements de traitement situés à l'extérieur du périmètre. Il en résulte un nouvel indicateur :

$$\text{DMC}_{\text{corr}} = \text{DMI} - \text{Exportations (totales)} + \text{Émissions vers la nature délocalisées}$$

Dans le cas où seraient importés des déchets solides ou liquides dans le périmètre d'étude, il conviendrait de les soustraire à DMI.

⁴ Elle hésite entre indicateurs conventionnels (flux matériels associés à des flux monétaires) et indicateurs naturalistes (flux matériels effectifs mis en jeu par les sociétés humaines).



NB. Le bilan ne comptabilise pas l'eau consommée par les activités humaines.

Figure 2.1 : Bilan de matières brutes aux échelles infranationales : principaux flux (Barles, 2009a).

Tableau 2.1 : Bilan de matières brutes aux échelles infranationales : principaux indicateurs (Barles, 2009a).

Entrées BI: Balancing Inputs (O ₂ combustion) TMI: Total Material Input	TMR: Total Material Requirement DMI: Direct Material Input
Sorties BO: Balancing Outputs (H ₂ O comb.) TMO: Total Material Output DPO: Domestic Processed Output	DMO: Direct Material Output TDO: Total Domestic Output LEPO: Local and Exported Processed Output = DPO + exported flows to nature
Autres (y compris non mentionnés sur la figure 1) NAS: Net Addition to Stock DMC: Domestic Material Consumption DMC _{corr} : Corrected Domestic Material Consumption	TMI + BI = NAS + TMO + BO DMI + BI = NAS + DMO + BO DMC = DMI – Exports DMC _{corr} = DMI – Imported wastes – Exports except wastes

2.1.2 Sources et études de cas

Le tableau 2.2 présente les principales sources utilisées pour la réalisation des bilans. Ceux-ci ont été établis pour l'Île-de-France et, dans le cadre du projet de recherche Confluent, pour la région Midi-Pyrénées.

Tableau 2.2 : Bilan de matières brutes : principales sources de données.

Flux	Sources de données et remarques
Extraction locale	
Combustibles	Services déconcentrés de l'État
Minéraux	Services déconcentrés de l'État, UNICEM (Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction), autres entreprises d'extraction
Biomasse	AGRESTE (Service statistique du ministère de l'Agriculture). ONCFS (Office national de la chasse et de la faune sauvage)
Importations	
Combustibles	CPDP (Comité professionnel du pétrole) : livraisons de produits pétroliers SITRAM (Système d'information sur les transports de marchandises) : combustibles solides À compléter pour le gaz naturel (services déconcentrés de l'État)
Autres	SITRAM.
Sorties vers la nature	
Air : émissions	CITEPA (Centre interprofessionnel d'études de la pollution atmosphérique) Observatoires locaux
Décharge	ADEME Services déconcentrés de l'État Observatoires locaux
Vers l'eau	Services publics locaux d'enlèvement et de traitement Agences de bassin Services publics locaux d'assainissement
Flux dissipatifs	AGRESTE : engrais et épandage des fumiers et lisiers Services déconcentrés de l'État : sels de déneigement, données sur la voirie et le trafic (pour usure chaussées et pneus)
Exportations	SITRAM.
Recyclage	Idem décharge
BI et BO	Déduits des émissions de CO ₂

En ce qui concerne l'Île-de-France, trois bilans ont été réalisés : Paris (P), Paris et petite couronne (PPC), région tout entière (IdF), de façon à observer d'éventuelles disparités entre la ville centre (P), la zone urbaine dense (PPC) et la zone agricole et d'étalement urbain (GC). Les figures 2.2 et 2.3 donnent les principales caractéristiques de ces zones.

Indépendamment de l'intérêt intrinsèque de la région Midi-Pyrénées⁵, la comparaison avec l'Île-de-France peut s'avérer particulièrement intéressante dans la mesure où les caractéristiques de ces deux territoires les opposent radicalement. La région Midi-Pyrénées est en effet l'une des moins peuplées de France : 60 hab/km² sur 45 500 km², en dessous de la moyenne nationale (110 hab/km²), très loin derrière l'Île-de-France (930 hab/km²) (Panier, Ratte, 2007). La population vivant dans un espace à dominante urbaine y est de l'ordre de 70 %, avec néanmoins de fortes disparités : 93 % en Haute-Garonne, 23 % dans le Gers, 33 % dans le Lot (DIREN Midi-Pyrénées, 2008). Les sols artificialisés couvrent à peine 8 % du territoire essentiellement rural et dans une moindre mesure montagnard, contre 21 % en Île-de-France et 82 % en PPC (figure 2.3).

⁵ Seule le bilan régional est présenté ici, les bilans départementaux étant en cours de réalisation.

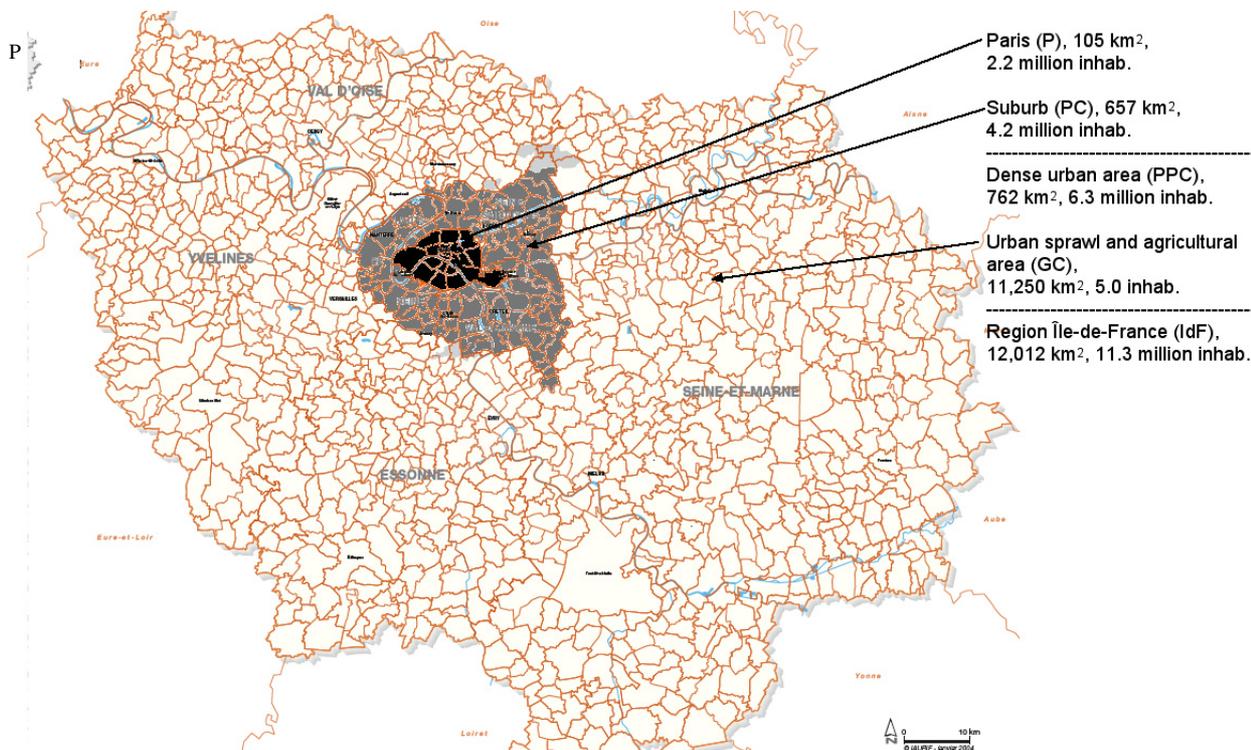


Figure 2.2 : Île-de-France : périmètres d'étude.

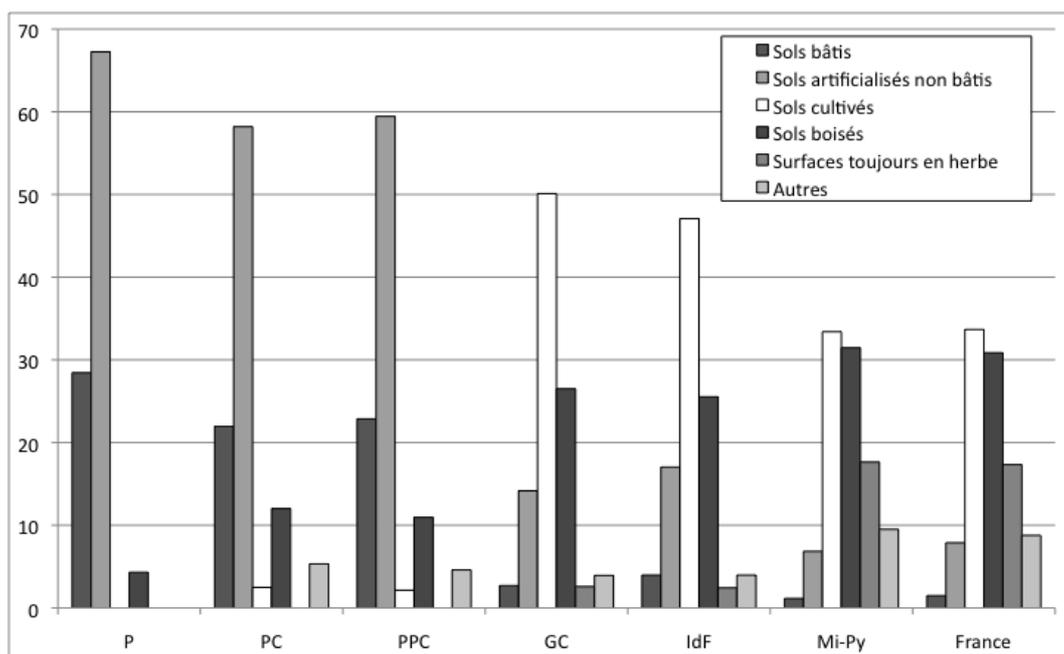


Figure 2.3 : Île-de-France, Midi-Pyrénées, France : Occupation des sols, % (INSEE).

Tableau 2.3 : Population, Midi-Pyrénées, 1990, 1999, nombre d'habitants (DIREN Midi-Pyrénées, 2008).

	1990	1999	Évolution
Pôles urbains	1 168 511	1 255 331	+7,4%
Communes périurbaines et multipolarisées	399 590	443 663	+11,0%
Espace rural	862 562	852 693	-1,1%
Population totale	2 430 663	2 551 687	+5,0%

2.2 Des métabolismes territoriaux

2.2.1 Île-de-France versus Midi-Pyrénées : de l'urbain au rural

La comparaison entre Île-de-France et Midi-Pyrénées permet de tester la sensibilité du bilan de matières brutes aux différences tant socio-économiques que géographiques (figures 2.4 et 2.5, tableau 2.4). Ramenées à l'habitant, les entrées directes de matières (DMI) sont beaucoup plus importantes pour Midi-Pyrénées que pour l'Île-de-France : 25,6 t/hab et 12,3 t/hab respectivement, chiffres se situant de part et d'autre de la valeur nationale (17,3 t/hab). Ce rapport du simple au double n'est pas entièrement expliqué par les exportations qui sont en effet plus importantes en Midi-Pyrénées (7,2 t/hab contre 5,2 t/hab), ni par des activités qui seraient plus « gaspilleuses », *i. e.* qui engendreraient des flux vers la nature plus élevés. Ils le sont certes en Midi-Pyrénées, notamment en raison de l'activité agricole et des flux dissipatifs représentés par les fumiers et lisiers et dans une moindre mesure les engrais épandus, mais là encore, cela ne suffit pas à expliquer cette énorme différence, qui est essentiellement due à l'addition au stock de matériaux (NAS), plus de quatre fois plus importante en Midi-Pyrénées qu'en Île-de-France. Au total, NAS représente 11 % de DMI en Île-de-France contre 45 % en Midi-Pyrénées : ces deux régions représenteraient ainsi deux extrêmes, la première – l'Île-de-France – connaissant une sorte de saturation matérielle, la seconde étant en phase de constitution de son stock.

On note par ailleurs la part très différente de l'extraction locale dans DMI : 17 % en Île-de-France, 65 % en Midi-Pyrénées : le caractère métropolitain de la première s'affirme ici très nettement. Dans les deux cas les rejets vers la nature (DPO) représentent 57 % des sorties directes de matières (DMO), ils dépassent donc les exportations commerciales. DPO ne représente cependant que 37 % de DMI en Midi-Pyrénées (moins que NAS), et 55 % en Île-de-France. La dématérialisation relative de l'Île-de-France ne doit pas masquer le fait que la région importe des produits finis dont l'élaboration a engendré ailleurs des consommations supérieures au contenu matériel des produits finis que la détermination des flux indirects permettrait de prendre en compte.

Tableau 2.4 : Bilan de matières brutes, Île-de-France, 2003 ; Midi-Pyrénées, 2006 (provisoire) ; France, 2006 : principaux indicateurs

	Île-de-France 2003, 11 259 000 hab.		Midi-Pyrénées 2006, 2 777 000 hab.		France 2006, 61 597 000 hab.*	
	kt	t/hab	kt	t/hab	kt	t/hab
Entrées						
Extraction locale	23 500	2,1	46 400	16,7	700 300	11,4
Importations	114 400	10,2	24 700	8,9	364 900	5,9
DMI	138 000	12,3	71 100	25,6	1 065 200	17,3
Sorties						
DPO	76 300	6,8	26 300	9,5	-	-
Exportations	58 600	5,2	20 000	7,2	193 400	3,1
DMO	134 900	12,0	46 300	16,7	-	-
Recyclage	7 300	0,7	4 000	1,5	-	-
DMC = DMC _{corr}	79 500	7,1	51 200	8,9	871 800	14,2
NAS	15 100	1,3	32 200	11,6	-	-

* Données Eurostat. - : données non disponibles

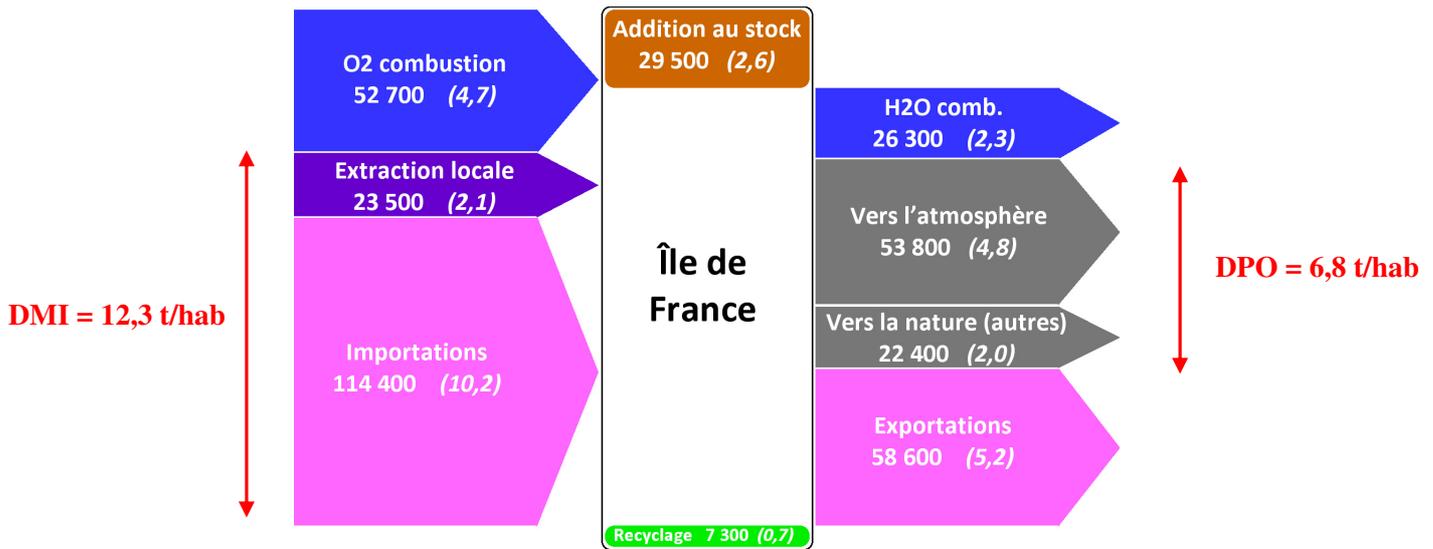


Figure 2.4 : Bilan de matières brutes, Île-de-France, 2003, kt et (t/hab) (Barles, 2009a).

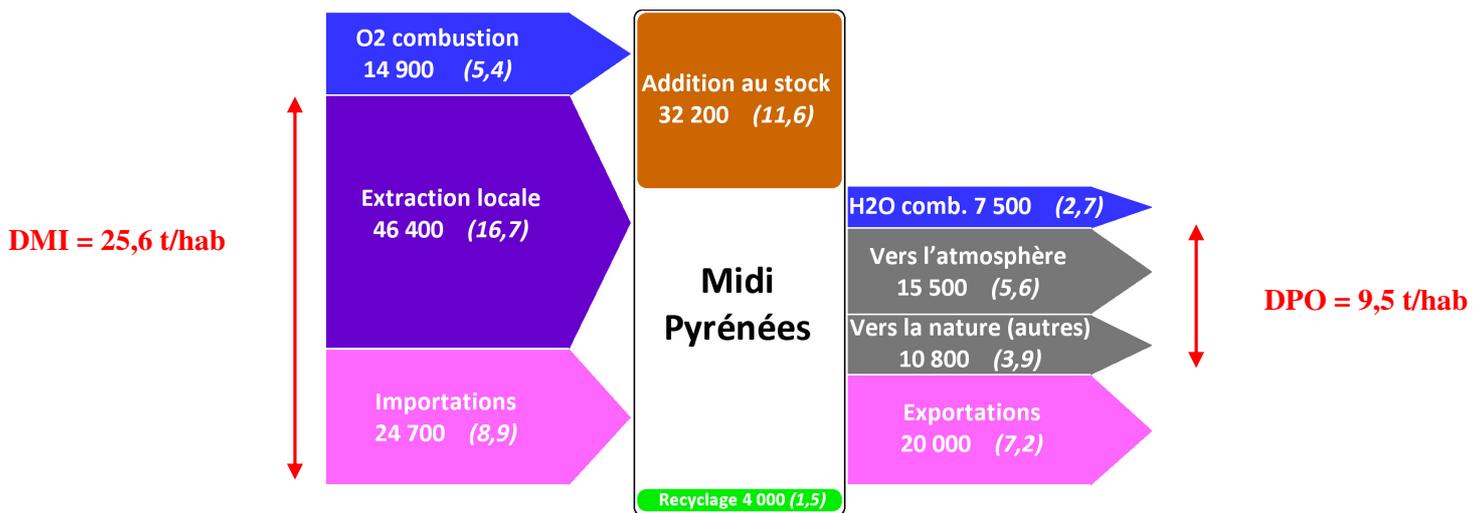


Figure 2.5 : Bilan provisoire de matières brutes, Midi-Pyrénées, 2006, kt et (t/hab) (Barles, en cours).

Si le bilan de matières brutes donne une première série d'indications quant à la matérialité d'un territoire donné, il ne suffit pas à l'analyse du métabolisme urbain. Il est ainsi nécessaire de pouvoir désagréger les flux, ce que rend possible la méthode adoptée. La figure 2.6 décompose la consommation nette (DMC)⁶ des deux régions étudiées en termes de masse totale d'une part (fig. 2.6a), ramenée à l'habitant d'autre part (fig. 2.6b), rapportée à l'hectare enfin (fig. 2.6c).

Pour les deux régions, les matériaux de construction constituent le flux principal : ils représentent 40 % de DMC en Île-de-France contre 60 % en Midi-Pyrénées. La consommation de matériaux de construction est par ailleurs du même ordre de grandeur dans les deux régions soit une consommation par habitant plus de quatre fois (4,25) plus élevée en Midi-Pyrénées qu'en Île-de-France, le rapport s'inversant en consommation surfacique tout en étant légèrement inférieur (3,6).

⁶ Les importations et exportations de déchets solides et liquides étant minimales pour ces deux régions, DMC = DMC_{corr.}

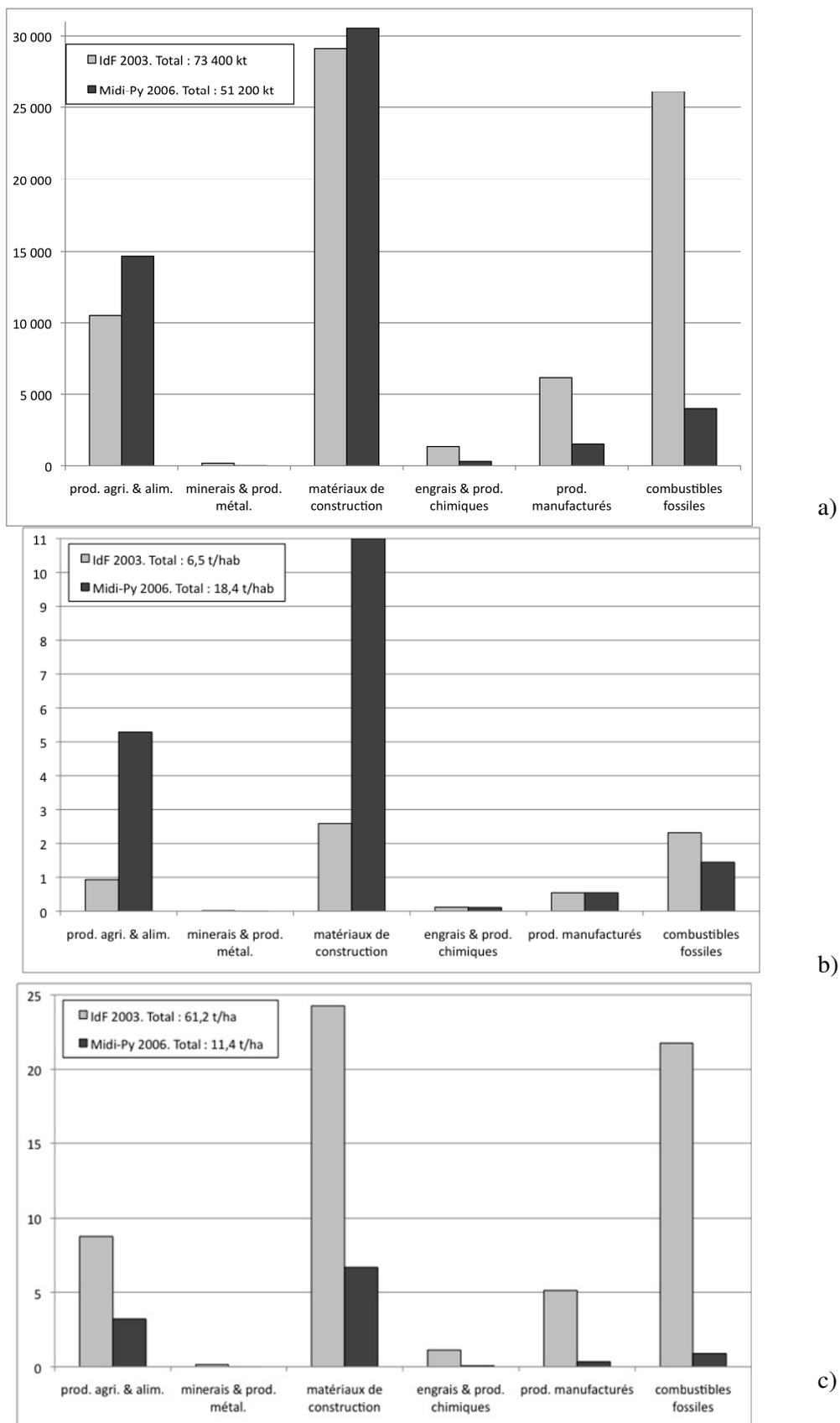


Figure 2.6 : Consommation nette de matières (DMC), Île-de-France, 2003 ; Midi-Pyrénées, 2006. a) kt ; b) t/hab ; c) t/ha (Barles, en cours).

Le deuxième flux le plus important diffère d'une région à l'autre : combustibles fossiles en Île-de-France, produits agricoles et alimentaires en Midi-Pyrénées, ce qui reflète assez fidèlement les vocations différenciées de ces régions. La distinction entre produits agricoles et alimentaires respectivement permettrait probablement de confirmer cette proposition que la comparaison des consommation par habitant et surfacique respectivement semble corroborer.

2.2.2 L'Île-de-France : une approche multiscale

La réalisation des trois bilans de matières emboîtés à l'échelle de l'Île-de-France confirme pour partie les éléments fournis par la comparaison entre celle-ci et Midi-Pyrénées (tableau 2.5). La consommation nette, qui doit ici être corrigée (DMC_{corr} , voir § 2.1.1), décroît entre la région où elle représente 7,1 t/hab comme nous l'avons déjà vu et la zone urbaine dense PPC où elle n'atteint plus que 4,6 t/hab (avec une légère différence entre P et PPC).

Tableau 2.5 : Bilan de matières, Île-de-France, principaux flux, 2003 (Barles, 2009a).

	Paris (2 166 000 hab.)		PPC (6 321 000 hab.)		IdF (11 259 000 hab.)	
	kt	t/cap	kt	t/cap	kt	t/cap
ENTREES						
Extraction locale						
Combustibles fossiles	0	0,0	0	0,0	540	0,0
Minéraux	0	0,0	0	0,0	16990	1,5
Biomasse	0	0,0	30	0,0	6010	0,5
Extraction locale totale	0	0,0	30	0,0	23 540	2,1
Importations						
Combustibles fossiles	3910	1,8	13050	2,1	26100	2,3
Autres	15240	7,0	56450	8,9	88350	7,8
Importations totales	19 160	8,8	69 500	11,0	114 450	10,2
DMI	19 160	8,8	69 530	11,0	137 990	12,3
SORTIES						
Vers la nature						
Émissions vers l'air	6710	3,1	24470	3,9	53840	4,8
Déchets ultimes	0	0,0	2500	0,4	20010	1,8
Émissions vers l'eau	0	0,0	10	0,0	40	0,0
Flux dissipatifs	150	0,1	440	0,1	2400	0,2
DPO	6 860	3,2	27 410	4,3	76 290	6,8
Exportations						
Vers la nature exportés	4100	1,9	9610	1,5	69	0,0
Exportations autres	8380	3,9	40410	6,4	58500	5,2
Exportations totales	12 480	5,8	50 020	7,9	58 570	5,2
DMO	19 340	8,9	77 430	12,2	134 860	12,0
LEPO	10 960	5,1	37 020	5,9	76 360	6,8
Recyclage						
Local	0	0,0	4210	0,7	7320	0,7
Externe	1850	0,9	440	0,1	0	0,0
Recyclage total	1 850	0,9	4 660	0,7	7 320	0,7
Déchets exportés	5950	2,7	10050	1,6	70	0,0
DMC	4 830	2,2	19 070	3,0	79 420	7,1
DMC_{corr}	10 780	5,0	29 120	4,6	79 490	7,1
BI Oxygène (combustion)	6560	3,0	24010	3,8	52650	4,7
BO Eau (combustion)	3280	1,5	12010	1,9	26330	2,3
NAS	3 100	1,4	4 110	0,7	29 460	2,6

De même, les valeurs de NAS sont faibles, et encore plus pour P et PPC que pour la région dont on a vu qu'elle stockait très peu comparativement à Midi-Pyrénées. Ceci confirmerait l'hypothèse de la saturation matérielle, sachant que l'indicateur NAS étant déduit des autres ($NAS = DMI + BI - (DMO + BO)$), il cumule les erreurs associées à chacun d'entre eux.

Quelle que soit la zone d'étude, LEPO dépasse les exportations commerciales et représente plus de la moitié de DMI (respectivement 57%, 53% et 55% de DMI pour Paris, PPC et IdF). La part des émissions vers l'air dans LEPO est très élevée et croît avec la zone d'étude : 61% pour Paris, 66% pour PPC, 71% pour IdF, sachant que ces émissions sont essentiellement constituées de dioxyde de carbone. On mesure ainsi l'enjeu de la décarbonisation, qui dépasse dans une région très urbanisée celui du recyclage, bien que le gisement potentiel en soit sous-exploité, comme le montrent les très faibles quantités recyclées : moins d'une tonne par habitant, soit environ 10 % de DMI à Paris, 7 % pour PPC, 5 % pour IdF.

Poursuivant la comparaison, on constate que tous les flux, à l'exception de DMC_{corr} et du recyclage, augmentent avec la zone d'étude. Cette augmentation reflète à la fois la part croissante des activités extractives et productives de Paris à PPC et surtout de PPC à IdF, qui engendrent des flux matériels importants, et celle des formes urbaines, sur laquelle nous reviendrons.

De plus, le centre de l'agglomération (P) dépend presque entièrement des autres zones, qu'il s'agisse des flux entrants ou des flux sortants. Cette dépendance décroît légèrement dans la zone urbaine dense (PPC), principalement parce que plusieurs incinérateurs d'ordures ménagères et stations d'épuration des eaux usées sont implantés en petite couronne (PC). La région est en revanche autosuffisante pour ce qui concerne les émissions vers la nature – mais pas, bien sûr, pour ses flux entrants : on mesure ainsi la distorsion qui existe entre aires d'approvisionnement et aires d'émissions (figure 2.7).

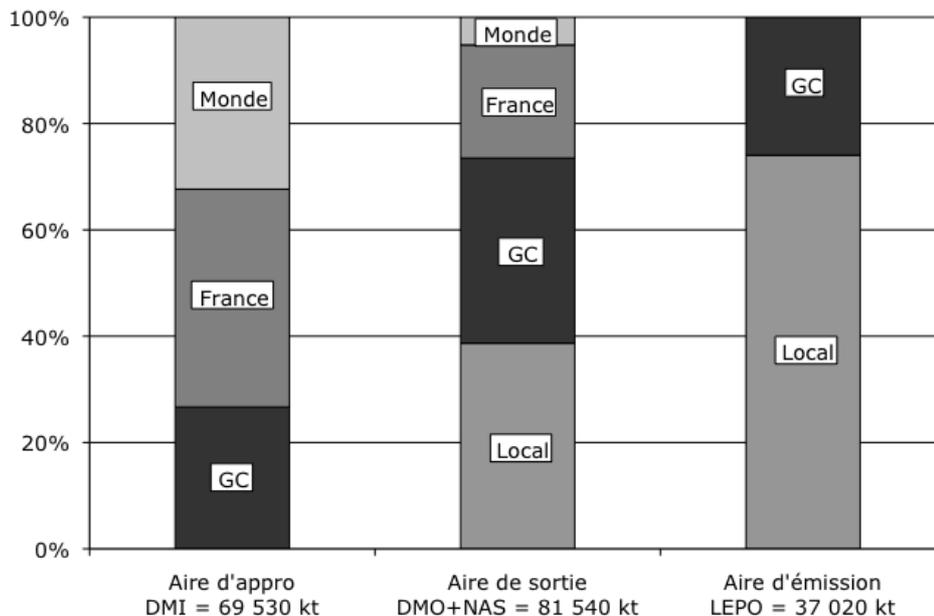


Figure 2.7 : Aires d'approvisionnement, de sortie, d'émissions vers la nature, Paris et petite couronne (PPC), 2003, % des flux indiqués en abscisse.

La décomposition de la consommation nette par grandes catégories de matières permet de mieux comprendre les différences observées d'une zone à l'autre. Celle-ci a été possible non seulement pour les trois aires emboîtées, mais aussi pour la petite couronne et la grande couronne, ce qui permet d'aller plus loin dans l'analyse (figure 2.8).

Ramenée à l'habitant, la consommation alimentaire est plus importante à Paris que partout ailleurs : la ville centre concentre de nombreux emplois et attire de nombreux touristes, elle a donc plus de bouches à nourrir que d'habitants. La consommation nette de produits agricoles et alimentaires (essentiellement alimentaires à Paris) atteint 10 600 t/j, soit 4,9 kg/hab/j si l'on utilise pour le ratio la population parisienne (ce qui est le cas

figure 2.8). En majorant de 50 % la population résidente (ce qui est très probablement une surestimation du nombre de bouches à nourrir donc conduit à une sous-estimation de leur consommation unitaire), on obtient encore 3,3 kg/hab/j : beaucoup plus que ce qu'une personne peut manger en un jour, même en prenant en compte les boissons manufacturées. En d'autres termes, une grande partie de la nourriture qui entre dans Paris doit en ressortir sous forme de déchet organique, sachant que la valorisation spécifique de ce type de déchet ne fait pas partie de la politique parisienne, et qu'ils sont pour la plus grande partie d'entre eux incinérés. À l'échelle régionale, l'extraction locale représente par ailleurs 0,5 t/hab, pour un flux entrant total de 2,2 t/hab, une consommation nette de 0,9 t/hab et des exportations de 1,3 t/hab : on note ainsi la déconnexion quasi totale entre agriculture et consommation régionales (voir aussi § 4 et Billen et al., 2009).

La consommation de produits manufacturés décroît du centre vers la périphérie, ce qui peut être une conséquence de la différence de niveau de vie. Au contraire, la consommation de combustibles fossiles augmente du centre vers la périphérie, illustrant l'inégale répartition des activités entre les différentes zones d'étude (en particulier en ce qui concerne les activités industrielles) et l'étalement urbain caractéristique de la grande couronne. Ce point mériterait d'être étudié en profondeur (voir par exemple Newman et Kenworthy, 1999 ;VandeWeghe et Kennedy, 2007).

Enfin, on note l'extrême variation de la consommation de matériaux de construction entre les zones centrales (P, PC, PPC) et la grande couronne (GC). Une des raisons en est que la figure 2.8 exclut le transport ferré⁷, qui occupe une place non négligeable pour ces matériaux. Si l'on fait l'hypothèse que tous les matériaux de construction arrivant et partant par rail dans/de la région sont destinés à PPC⁸, la consommation nette pour cette zone est portée de 0,3 t/hab à 0,9 t/hab, encore très peu par rapport aux 4,8 t/hab de GC (tableau 2.6).

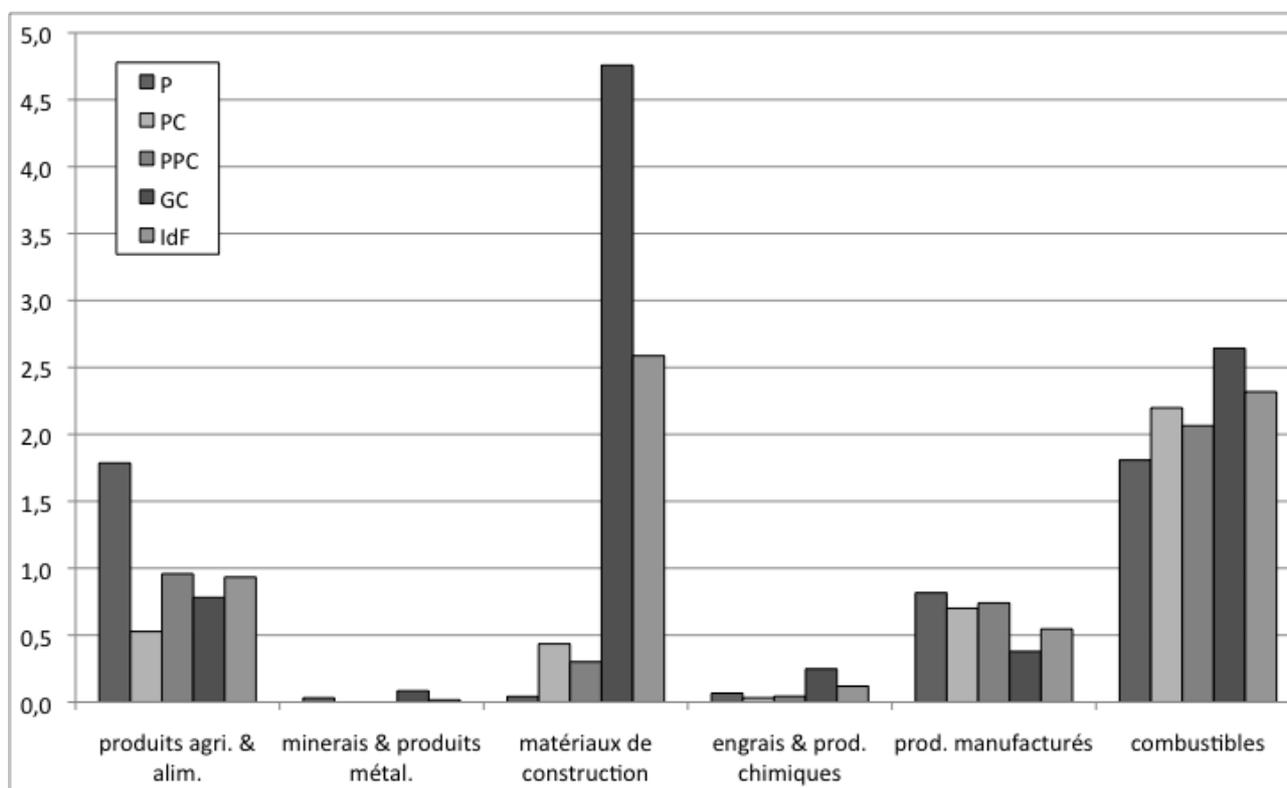


Figure 2.8 : Consommation nette (DMC), Paris (P), petite couronne (PC), Paris et petite couronne (PPC), grande couronne (GC), Île-de-France, 2003, t/hab. Transport ferré excepté (Barles, 2009a).

⁷ Les données du fret ferroviaire ne sont pas accessibles à l'échelle départementale, mais connues à l'échelle régionale.

⁸ Hypothèse maintenue dans la suite du présent document.

Tableau 2.6 : Consommation nette de matériaux de construction, Île-de-France, 1) sans le transport ferré, 2) en supposant que tout le transport ferré concerne PPC

	1)		2)	
	kt	t/cap	kt	t/cap
PPC	1,897	0.3	5,754	0.9
GC	23,492	4.8	23,492	4.8
IdF	25,389	2.3	29,122	2.6

2.3 Matériaux de construction

L'importance des flux de matériaux de construction, associée aux enjeux que représente ces flux – épuisement des ressources, coût environnemental et économique de leur transport, gestion des déchets, etc. – justifie une attention particulière.

2.3.1 Augmentation des stocks versus renouvellement

Les figures 2.9 et 2.10 relatives à la circulation des matériaux de construction dans les deux régions permettent de mieux appréhender leurs spécificités respectives.

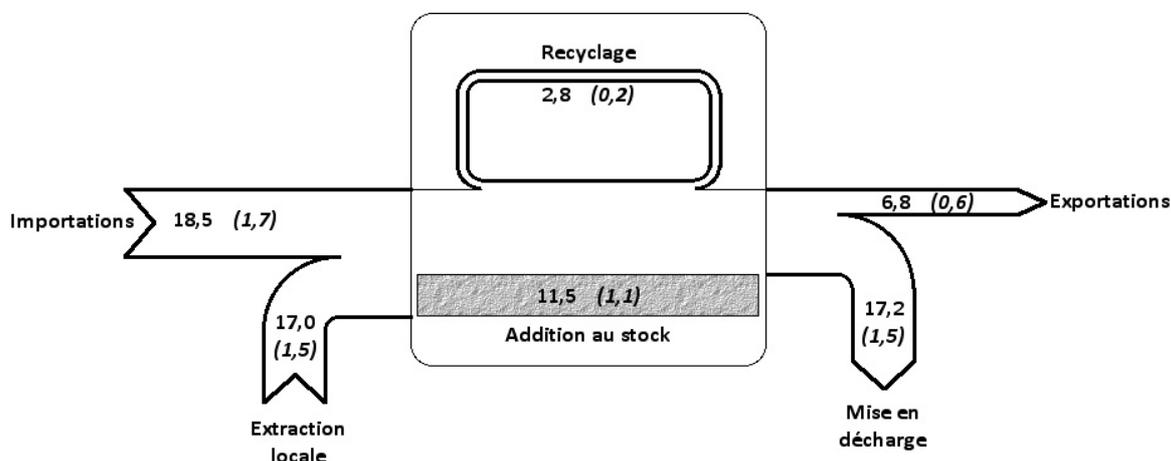


Figure 2.9 : Circulation des matériaux de construction, Île-de-France, 2003, Mt et (t/hab) (Barles, 2009a).

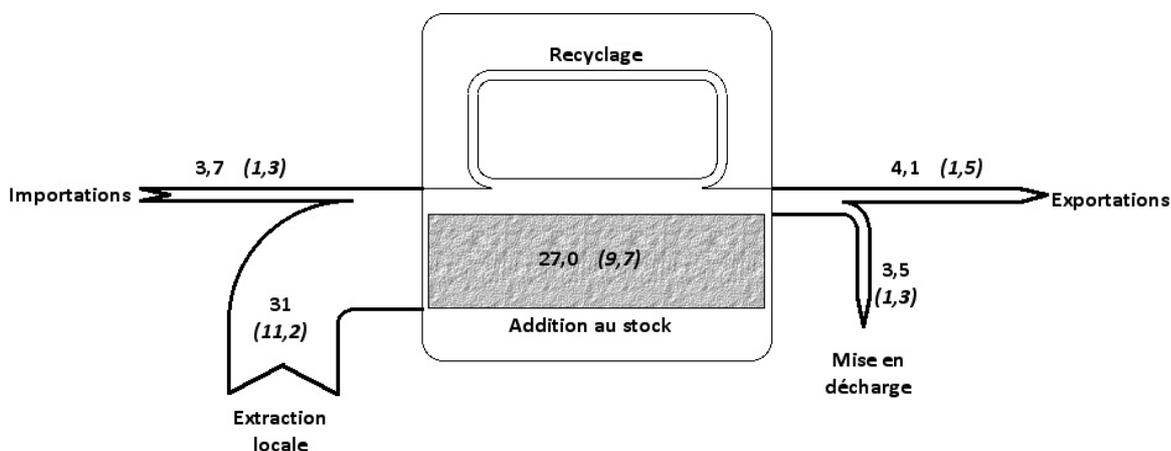


Figure 2.10 : Circulation des matériaux de construction Midi-Pyrénées, 2006, Mt et (t/hab) (Barles, en cours).

Dans le cas de l'Île-de-France, l'addition au stock représente environ un tiers des flux entrants, la mise en décharge la moitié : on démolit beaucoup, et la consommation de matériaux de construction est probablement autant une consommation de renouvellement urbain qu'une consommation d'urbanisation nouvelle. La comparaison du cœur de la région (Paris et petite couronne) à la grande couronne confirme cette hypothèse : renouvellement en zone urbaine dense, accroissement du stock en zone périurbaine. Par ailleurs, les quantités mises en décharge sont quasiment équivalentes aux quantités importées : on mesure ainsi l'enjeu du recyclage, aujourd'hui très limité, qui permettrait non seulement d'éviter une partie des prélèvements de ressources, mais aussi d'en limiter le transport donc les impacts qui lui sont associés. On retrouve ici l'un des *leitmotiv* de l'écologie industrielle – considérer les déchets comme des matières premières de façon à limiter non seulement la production desdits déchets mais aussi la pression sur les ressources.

L'analyse du cas Midi-Pyrénéen traduit une réalité tout autre. L'addition au stock y représente près de 80 % des flux entrants, la mise en décharge seulement 10 % : c'est ici l'urbanisation nouvelle qui domine. Si la région est quasiment autonome (l'extraction locale représente près de 90 % des flux entrants), elle ne peut guère compter sur le recyclage pour réduire l'apport de ressources primaires. En d'autres termes, en phase de croissance de consommation matérielle (et ici urbaine), recycler ne suffit pas et il convient de maîtriser la consommation de matières elle-même, donc d'en comprendre les ressorts. C'est l'un des objets de l'écologie territoriale.

2.3.2 Construction, urbanisation, artificialisation des sols

Afin de mieux comprendre les importantes variations observées, deux séries de variables ont été analysées, l'une concernant l'activité du bâtiment, l'autre l'artificialisation des sols.

On pourrait en effet faire l'hypothèse qu'une plus grande consommation de matériaux de construction n'est que le résultat d'une activité de construction de logements et autres locaux plus soutenue au sein d'un territoire que d'un autre – on l'imagine intuitivement pour la grande couronne francilienne par comparaison à la zone urbaine dense, par exemple. Afin de vérifier cette supposition, nous avons utilisé le fichier des locaux et logements commencés, établi par le ministère de l'Écologie. Celui-ci permet de connaître, aux échelles départementales notamment, les constructions commencées pour une année donnée, ainsi que leur nature et le nombre de mètres carrés attendus à terme, exprimés en surface hors œuvre nette (SHON), c'est-à-dire en surface de plancher utile. Considérant qu'un chantier peut commencer à tout moment de l'année, et durer plus d'une année, nous avons considéré, pour l'année d'étude *a*, la moyenne des mètres carrés commencés aux années *a-2*, *a-1* et *a* pour approcher le nombre de mètres carrés de SHON bâtis au cours de l'année *a* (soit 2001, 2002 et 2003 pour l'Île-de-France et ses sous-secteurs, et 2004, 2005 et 2006 pour les autres territoires). Nous avons par ailleurs ajouté un nouveau territoire d'étude, le département de l'Aube, qui fait partie des terrains d'investigation du projet Confluent et du bassin de la Seine. Les résultats sont présentés figure 2.11 a et b.

La figure 2.11a montre que la variation de SHON d'un territoire à l'autre n'explique pas celle de consommation de matériaux de construction. Pour ne citer qu'un exemple, la grande couronne attire plus de 80 % des matériaux consommés en IdF, alors qu'elle ne reçoit que 60 % des mètres carrés bâtis. La figure 2.11b rapporte cette consommation à la SHON bâtie et montre des variations allant de 2 t/m² (PPC) à près de 8 t/m² (Aube). La répartition entre type de bâtiments construits n'est certes pas la même entre les zones étudiées, mais ne peut expliquer ces variations. En outre, on estime que la consommation moyenne de matériaux de construction par m² de plancher est d'environ 2 t/m²⁹. Les variations observées tiendraient donc majoritairement à autre chose et plus précisément aux infrastructures accompagnant la réalisation des bâtiments. Ceci expliquerait pourquoi on ne dépasse pas les 2 t/m² en PPC, les infrastructures y existant déjà, et pourquoi on les dépasse de beaucoup en GC, dans l'Aube, en Midi-Pyrénées : l'étalement urbain caractéristique de ces secteurs y provoquerait la construction d'infrastructures linéaires engendrant une consommation matérielle importante : voiries et réseaux. Dans certains cas, pourraient s'y ajouter la réalisation d'infrastructures non spécifiquement urbaines (autoroute à vocation régionale et interrégionale, ligne de chemin de fer, etc.), ou d'infrastructures de rattrapage pour des secteurs peu équipés (assainissement, transports publics, etc.).

⁹ Stefan Bringezu, communication personnelle, nov. 2010.

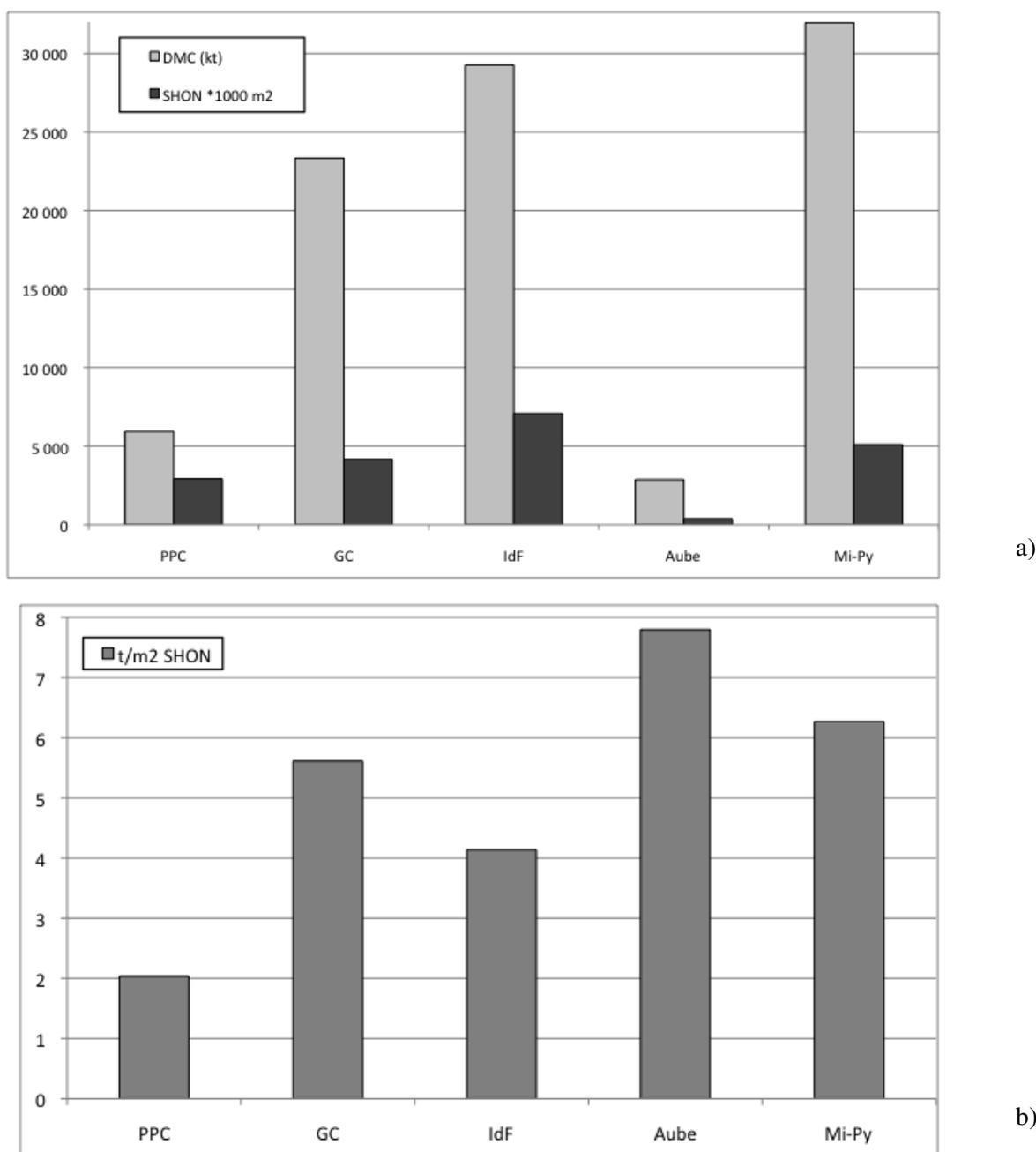


Figure 2.11 : Consommation de matériaux de construction et construction de bâtiments, Paris et petite couronne (PPC), grande couronne (GC), Île-de-France (IdF), 2003, Aube, Midi-Pyrénées (Mi-Py), 2006. (Barles, en cours).

L'analyse de l'artificialisation des sols peut aider à vérifier le lien entre consommation de matériaux de construction et étalement urbain. Ceci est rendu possible par l'utilisation de la base de données Corinne Land Cover, qui permet en outre d'analyser la variation de l'affectation des sols entre 2000 et 2006 (avec une résolution de 5 ha). Le tableau 2.7, dans lequel les territoires d'étude ont été classés par ordre croissant de consommation de matériaux de construction par m² de SHON (cf. figure 2.11b), résume les principaux résultats obtenus. On observe ainsi que tous les indicateurs croissent simultanément, qu'il s'agisse des tonnes de matériaux de construction par habitant nouveau (pour l'année d'étude, et avec toute la prudence requise en l'absence de recensement annuel), des m² de SHON par habitant nouveau, ou des surfaces artificialisées exprimées en m²/habitant nouveau (en moyenne 2000-2006). Ces analyses devraient être affinées à l'avenir, et étendues à d'autres territoires.

Tableau 2.7 : Consommation de matériaux de construction, construction de bâtiments, artificialisation des sols, Paris et petite couronne (PPC), grande couronne (GC), Île-de-France (IdF), 2003, Aube, Midi-Pyrénées (Mi-Py), 2006. (Barles, en cours).

	PPC	IdF	GC	Mi-Py	Aube
DMC Matériaux de construction, kt	5 934	29 269	23 335	31 964	2 865
Bâtiments construits, *1 000 m ² SHON	2 916	7 076	4 160	5 101	368
Surfaces artificialisées, ha/an	0	801	801	130	1 100
DMC, t/m ² SHON	2,0	4,1	5,6	6,3	7,8
DMC, t/habitant nouveau	125	361	692	956	2 620
Bâtiments, m ² SHON/hab nv	62	87	123	153	336
Surfaces artificialiséesm ² /hab nv	0	101	244	341	1 028

3 Énergie

Les bilans de matières brutes ne permettent pas de prendre en compte de façon exhaustive la consommation énergétique dans la mesure où ils ne considèrent que les flux entrants et sortants matériels. Rendre compte de la consommation énergétique d'un territoire donné nécessite donc de réaliser un bilan spécifique. Un tel travail a été engagé dans le cadre du projet ANR Confluent, et fait l'objet de la thèse d'Eunhye Kim qui abordera l'ensemble de la consommation énergétique parisienne et son évolution depuis le XVIII^e siècle. On présente ici les premiers résultats concernant l'énergie technique (par opposition à l'énergie métabolique, *i. e.* alimentaire, qui sera abordée plus tard).

3.1 Méthode, sources, périmètre d'étude¹⁰

3.1.1 Méthode

Au cours des dernières années, de nombreuses méthodes de bilan énergétique ont été proposées. Deux principes ont guidé notre choix :

- la recherche d'une méthode permettant de comptabiliser l'ensemble de la consommation énergétique – technique et métabolique. En effet, la plupart des bilans qui sont effectués aujourd'hui, en particulier aux échelles urbaines, s'en tiennent à l'énergie technique. Ce choix peut paraître pertinent aujourd'hui dans la mesure où l'énergie métabolique ne pèse plus grand chose dans la consommation totale (au moins finale), mais l'est beaucoup moins pour qui veut analyser celle-ci dans la longue durée.
- le choix d'une méthode autant que possible compatible avec celle du bilan de matières brutes, de façon à accroître la cohérence de l'ensemble et à permettre l'établissement de passerelles de l'une à l'autre.

Le choix s'est porté sur la méthode développée par l'Institut d'Écologie Sociale viennois (Haberl 2001 ; Krausmann et Haberl, 2002), qui satisfait aux deux exigences. La figure 3.1 et le tableau 3.1 en présentent les principes et les principaux indicateurs. La figure 3.2 montre les correspondances entre bilans matériel et énergétique respectivement.

¹⁰ Pour plus de précision, voir (Kim et Barles, 2010).

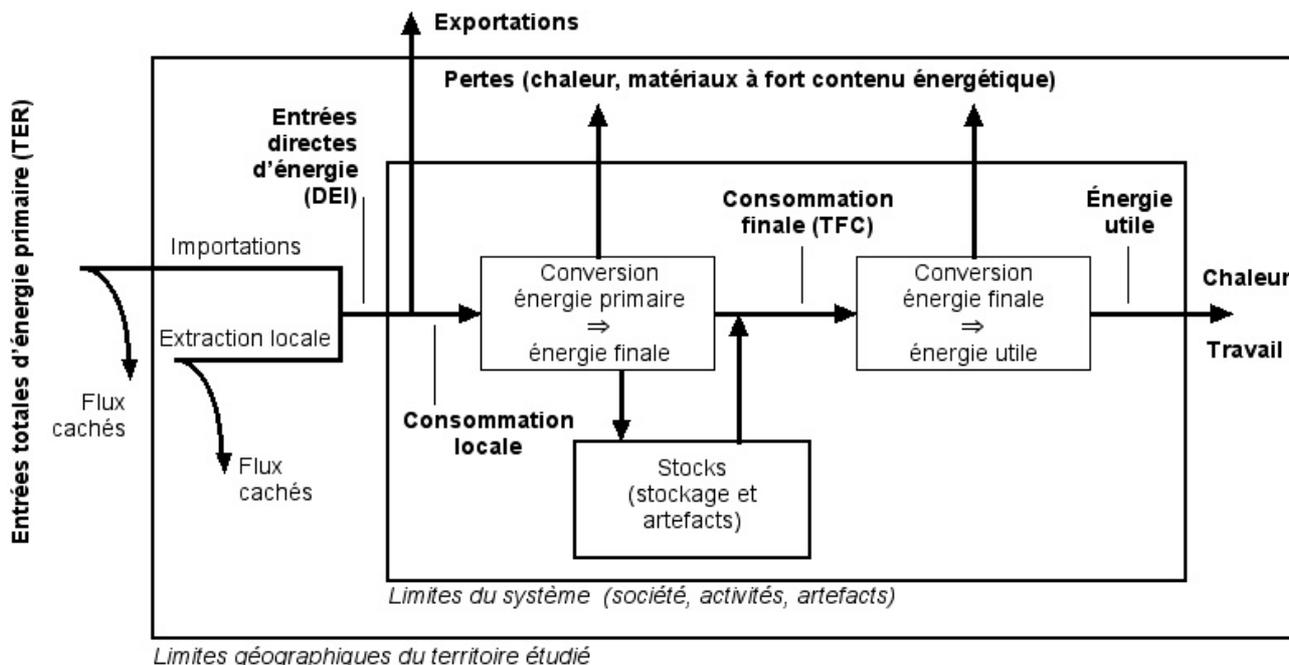
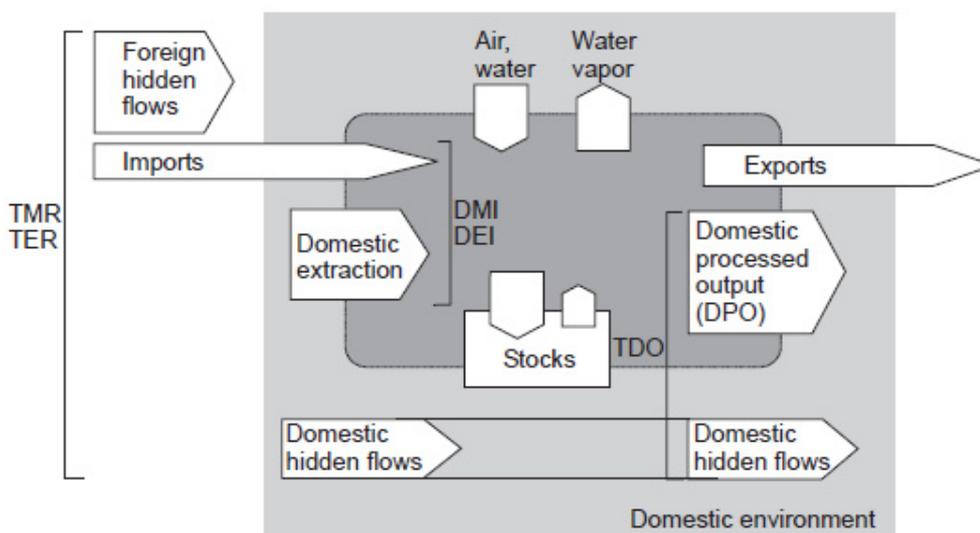


Figure 3.1 : Schéma de principe du bilan énergétique (adapté d'après Haberl, 2001 ; Krausmann et Haberl, 2002).

Tableau 3.1 : Bilan énergétique : principaux indicateurs (Haberl, 2001)

TER	Total Energy Requirement	Consommation totale d'énergie primaire, flux indirects inclus
DEI	Direct Energy Input	Extraction locale + importations (primaire ou finale)
TFC	Total Final Consumption	Énergie distribuée aux consommateurs finaux
DEC	Domestic Energy Consumption	Consommation locale = DEI - Exportations



TMR/TER ... Total Material (Energy) Requirement = DMI (DEI) + Domestic Hidden Flow + Foreign Hidden Flow
 DMI/DEI ... Direct Material (Energy) Input = Domestic Extraction + Imports
 DMC/DEC ... Domestic Material (Energy) Consumption = DMI(DEI) - Exports
 TDO ... Total Domestic Output = DPO + Domestic Hidden Flows (only useful for material flows)
 NAS ... Net Addition to Stocks = DMI - DPO - Exports
 DPO ... Domestic Processed Output (to air, land, and water) = DMI - Net Addition to Stocks - Exports

Figure 3.2 : Bilan de matières brutes et bilan énergétique(Haberl, 2001).

3.1.2 Sources et périmètre d'étude

En raison de la disponibilité des données, le périmètre d'étude a été restreint à Paris dans ses limites administratives. La conséquence en est que la surface (et la population vivant sur cette surface) concernée varie dans le temps (tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Paris : superficie et population, XVIIIe-XXIe siècles (recensements et Fierro, 1996)

	Superficie (ha)	Population (milliers)	Remarque
Vers 1730	3 370	520	
Vers 1780	3 370	600	
1801	3 370	550	
1818	3 402	719	+ Village d'Austerlitz
1856	3 402	1 174	
1861	7 802	1 696	+ Communes périphériques
1921	7 802	2 906	Population maximale
1926	8 622	2 871	+ Zone des fortifications
1946	10 516	2 725	+ Bois de Vincennes et Boulogne
1954	10 540	2 850	+ Terrain de manœuvre d'Issy
2006	10 540	2 209	

La quantification de la consommation énergétique est basée pour le XVIIIe siècle sur la littérature (Bourquin-Simonin, 2006) et des sources d'archives et sur les données de l'octroi pour la période 1800-1943. Des statistiques régionales sont par ailleurs disponibles depuis 1950 avec une périodicité de deux à trois ans. Jusqu'en 1945, les facteurs de conversion sont déduits des rendements des compagnies parisiennes de gaz et d'électricité. Par la suite, les statistiques régionales et nationales (base de données PEGASE) ont été utilisées pour définir les facteurs de conversion entre énergie primaire et finale.

L'origine de l'énergie est déterminée, du XVIIIe au XXe siècles, grâce à la littérature, ce pour les périodes 1778-1810, 1870-1880, 1960-1965, et pour l'année 2006, caractéristiques des régimes énergétiques successifs. Pour 1778-1810, les informations sont fournies par Magin (1789) pour le bois et Chevalier (1830) pour le charbon, et complétées grâce à Pecllet (1844). Pour 1870-1880, les données proviennent de la compagnie parisienne du gaz (INSEE, 1966a ; Willot, 1999) et des chiffres de production nationale (INSEE, 1966a). Pour 1960-1965, l'approvisionnement énergétique est connu grâce aux travaux de Beaujeu-Garnier et Bastié (1967) et Musset (1959, 1962) et aux statistiques officielles (INSEE, 1966a ; INSEE, 1966b). Enfin pour 2006, la base de données du transport de marchandises (SITRAM) a été mobilisée, complétée par Eurostat (2008) pour estimer l'origine réelle de certains flux.

3.2 Trois siècles de consommation énergétique

Les figures 3.3 a et b montrent l'évolution de la consommation unitaire d'énergie finale (fig. 3.3a) et primaire (fig. 3.3b). Elles permettent d'identifier les différents régimes énergétiques et les transitions de l'un à l'autre.

Le XVIIIe siècle est ainsi marqué par une augmentation de la consommation unitaire jusqu'aux années 1780 – qui, ajoutée à la croissance démographique, provoquera une crise importante (voir par exemple Bourquin-Simonin, 2006 ; Barles, 2009b). Le bois constitue alors le combustible urbain par excellence, le charbon, de bois ou de terre, ayant un usage très restreint. La production de charbon de bois est très contrôlée, le charbon de terre méprisé – insalubre, malodorant, salissant.

Au XIXe siècle, la consommation unitaire reste remarquablement stable autour de 25 GJ/hab/an en énergie finale et de 30 GJ/hab/an en énergie primaire. L'augmentation de la consommation est donc essentiellement due à celle de la population parisienne qui quintuple entre 1801 et 1906. La transition du bois vers le charbon de terre ou houille est très progressive, et ce n'est que vers 1850 que le second domine le premier. Le gaz,

produit par distillation de la houille, occupe une place relativement modeste malgré son rôle majeur dans la vie urbaine notamment à travers l'éclairage de l'espace public et malgré son omniprésence dans le paysage urbain en raison des infrastructures qu'il nécessite –ponctuelles pour la production, linéaires pour la distribution).

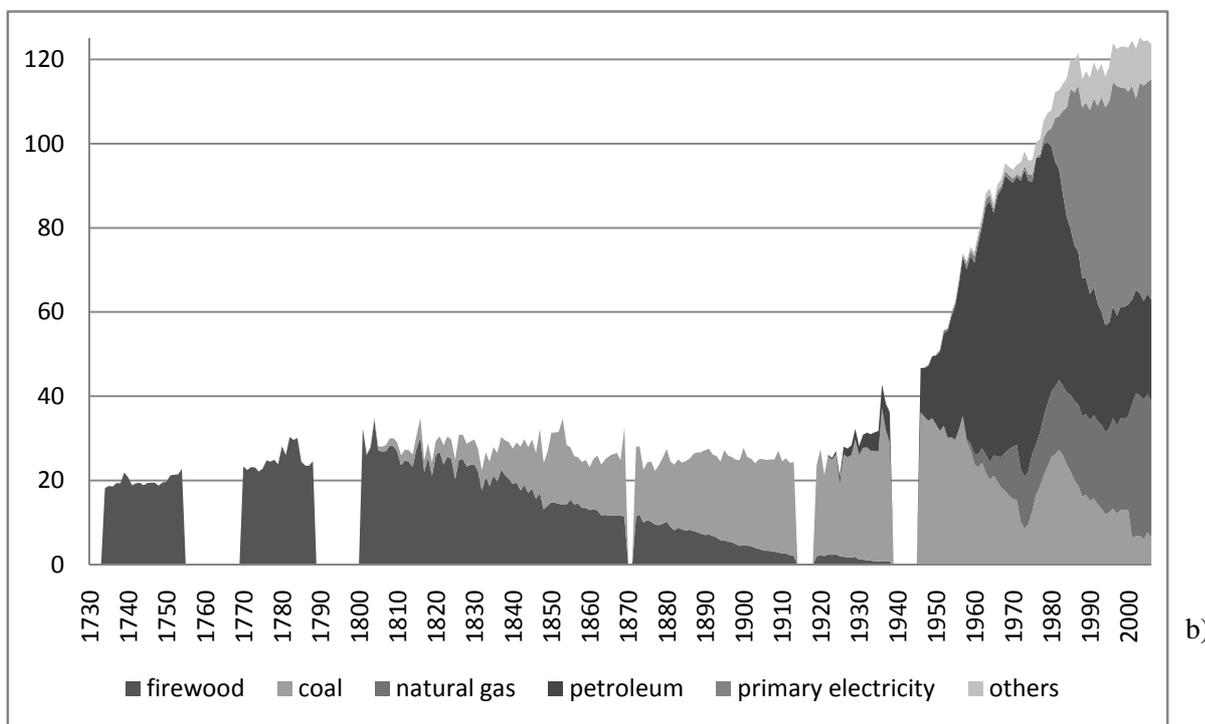
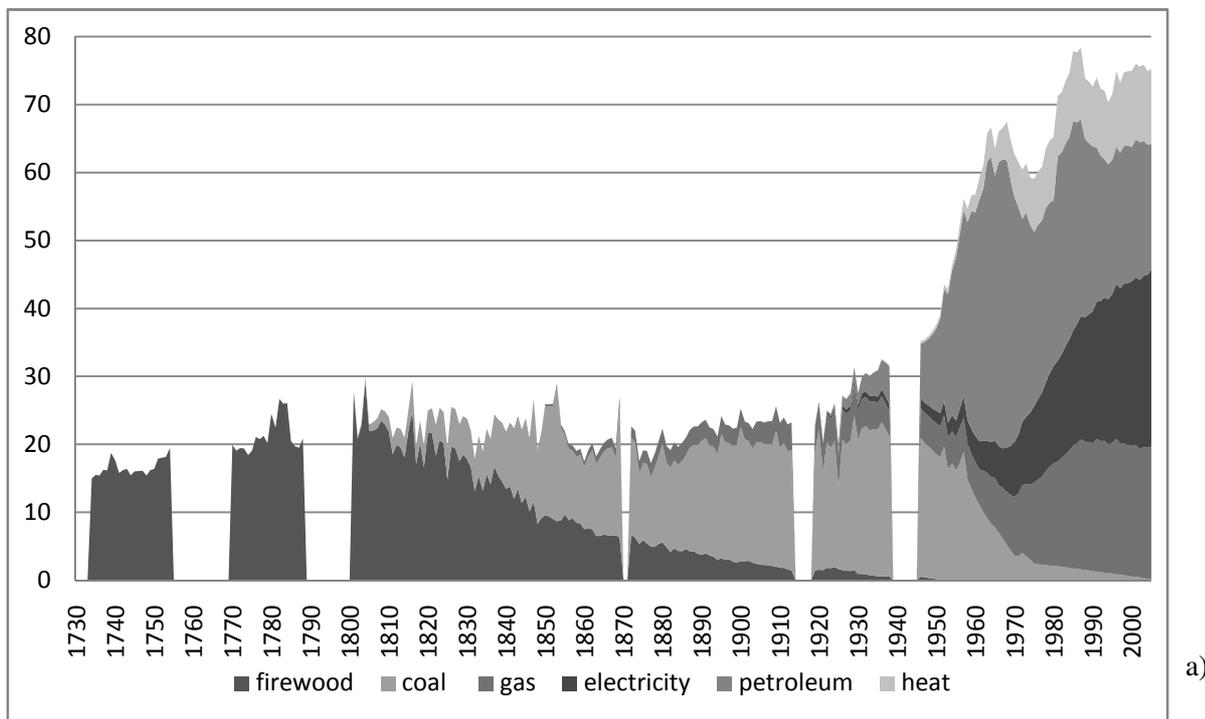


Figure 3.3 : Consommation d'énergie, Paris, 1730-2000, GJ/hab, a) finale (TFC), b) primaire (TER). (Kim et Barles, 2010).

Au XXe siècle, c'est la consommation unitaire qui s'envole, en particulier après la Seconde Guerre Mondiale, en liaison avec l'essor du trafic automobile et l'augmentation du confort thermique des logements¹¹. La consommation finale atteint près de 80 GJ/hab/an dans les années 1980, soit 120 GJ/hab/an en termes d'énergie primaire. Si la consommation finale diminue légèrement au cours des années suivantes, la consommation primaire poursuit son ascension, malgré un net ralentissement, et atteint près de 130 GJ/hab au début des années 2000. Cette période est aussi marquée par une diversification des sources énergétiques et de l'énergie délivrée, qui s'opère en deux temps. Jusqu'aux années 1970, on note, en énergie primaire, l'essor du pétrole, et en énergie finale, celui, timide, de l'électricité et celui, plus affirmé, des produits pétroliers. La crise pétrolière, qui se traduit temporairement par une diminution de la consommation unitaire, a des répercussions importantes en termes de mix énergétique : diminution des produits pétroliers au profit du gaz naturel et de l'électricité nucléaire en énergie primaire ; du gaz naturel, de l'électricité et de la chaleur en énergie finale.

La comparaison des deux diagrammes montre aussi que l'efficacité énergétique a fortement décliné depuis un siècle : il faut plus d'énergie primaire aujourd'hui pour produire autant d'énergie finale. Ceci montre la nécessité qu'il y a à ne pas limiter la comptabilité énergétique à l'énergie finale (ce qui est souvent le cas en contexte urbain) et à porter la réflexion sur l'efficacité énergétique. Il serait en outre important de pouvoir évaluer l'énergie utile (voir figure 3.1), et l'efficacité de la conversion entre énergie finale et énergie utile – elle pourrait compenser la perte d'efficacité dans la conversion primaire/finale. Le tableau 3.3 donne un aperçu des distances d'approvisionnement énergétique moyennes (D_{avg}) et maximales (D_{max}) et la figure 3.4 montre les aires d'approvisionnement et leur évolution depuis deux siècles. Au XIXe siècle, se sont surtout les lieux d'approvisionnement qui se déplacent : du Morvan dont la plus grande partie du bois consommé à Paris était issu au bassin houiller de Saint-Étienne, puis de celui-ci au bassin houiller du Nord. L'introduction des produits pétroliers, du gaz naturel et de l'électricité nucléaire entraîne au XXe siècle un accroissement sans précédent des distances d'approvisionnement : dix fois plus importantes en moyenne en 1965 qu'en 1880, 1,5 fois plus importantes en moyenne en 2006 qu'en 1965. Entre 1800 et 2006, la distance moyenne d'approvisionnement a été multipliée par 20, la distance maximale par plus de 40.

Tableau 3.3 : Distances d'approvisionnement énergétique, Paris, XIXe-XXIe siècles (Kimet Barles, en prép.).

		1800	1880	1965	2006
Sources d'énergie (%) de la consommation primaire totale)	Bois	97	42	0	0
	Charbon	3	58	25	5
	Pétrole	-	-	67	19
	Gaz naturel	-	-	6	24
	Nucléaire	-	-	0	44
	Hydraulique	-	-	1	2
	Autres	-	-	2	6
	Total	100	100	100	100
Distance (km)	D_{avg_bois}	190	190	-	-
	$D_{avg_charbon}$	340	330	300	6110
	$D_{avg_pétrole}$			3850	3970
	$D_{avg_gaz\ naturel}$			590	2540
	$D_{avg_nucléaire}$			400	4910
	$D_{avg_hydraulique}$			460	460
	D_{avg_autres}			50	50
	$D_{avg\ Total}$	190	270	2690	3 850
	$D_{max\ Total}$	370	790	7350	15330

¹¹ À l'échelle nationale, à peine 10 % de logement sont équipés du chauffage central (permettant de chauffer toutes les pièces) en 1954, 35 % en 1968 (art. « Chauffage » in : Merlin, Choay, 2010).



Figure 3.4 : Aires d'approvisionnement énergétique de Paris, XIXe-XXIe siècles (Kim et Barles, en prép.)

En outre, les infrastructures (et superstructures) dédiées à la transformation énergétique ont un impact non négligeable sur les paysages et laissent des traces durables dans les milieux. Au XVIII^e siècle et encore au XIX^e, le bois était omniprésent dans Paris, en particulier à proximité de la Seine et sur le fleuve ; le commerce du charbon était effectué dans des marchés spécifiques et engendrait un trafic lourd et lent. L'essor du gaz de houille s'est d'abord manifesté par la construction d'usines de distillation dans Paris, puis à ses portes au XIX^e siècle, enfin beaucoup plus loin, notamment dans le bassin sidérurgique lorrain, à la fin du XIX^e siècle et au début du suivant (le gaz était alors un sous-produit du coke élaboré à partir de la houille pour les fonderies et autres usines sidérurgiques). S'y ajoutent les centrales de production électriques, qui constituent elles aussi des dépendances urbaines externalisées. Les raffineries pétrolières sont plus distantes, à proximité des ports, en particulier Le Havre pour l'approvisionnement de Paris. On constate ainsi un éloignement des installations de transformation, légèrement contrebalancé par le développement du chauffage urbain dont les usines sont franciliennes. Ces dépendances font aussi partie de l'empreinte environnementale des villes (Barles, sous presse).

4 Nourrir la Ville

L'approvisionnement alimentaire est un autre aspect, essentiel, des relations entre la Ville et les territoires qui l'entourent. Nous avons cherché à mesurer, sur une période longue de deux siècles, l'évolution de l'empreinte alimentaire de l'agglomération parisienne. Il s'agit tout d'abord de définir les aires d'approvisionnement des différentes denrées alimentaires consommées à Paris (céréales, viande et produits laitiers, fruits et légumes), qui caractérisent l'étendue de l'empreinte alimentaire. Il s'agit ensuite d'analyser dans ces aires géographiques comment fonctionne le système agro-alimentaire en relation avec sa fonction d'approvisionnement de la ville: c'est ce qui caractérise la profondeur de l'empreinte urbaine sur ces territoires. Enfin, nous nous interrogerons sur la manière dont l'empreinte alimentaire pourrait être réduite, en étendue comme en profondeur, ce qui nous amènera à questionner la viabilité biogéochimique d'un système agro-alimentaire basé sur le cahier des charges de l'agriculture biologique et sur une réduction de la consommation de protéines animales dans le régime alimentaire humain.

4.1 Délimitation des aires d'approvisionnement alimentaire de Paris

Quelle est l'étendue du territoire rural qui alimente effectivement Paris ? Au cours des deux siècles passés, alors que la capitale a vu sa population multipliée de près d'un facteur 20, cette étendue s'est-elle accrue en proportion, à la faveur du développement du transport des marchandises ? Partant de la situation à la fin du XVIII^e siècle, décrite en détail par Abad (2002), nous avons combiné les données des statistiques de transport et celles des statistiques de production agricole pour reconstituer l'aire d'approvisionnement de Paris en 1896 et en 2006.

4.1.1 Paris en 1786

À partir de l'analyse des statistiques de l'octroi et d'une étude minutieuse de l'origine de l'approvisionnement de Paris en denrées alimentaires, Abad (2002) a fourni les chiffres, qui convertis en contenu en azote protéique (la part essentielle de l'alimentation), permettent d'établir l'aire d'approvisionnement parisien en céréales, en viande et produits laitiers, et en fruits et légumes (Figure 4.1). Le régime alimentaire de l'époque, estimé à 5.4 kgN/habitant/an faisait la part belle aux céréales (57%) avec 32% de produits animaux (hors poissons) et seulement 4% de fruits et légumes. Les distances moyennes d'approvisionnement étaient de 110 km pour les céréales, provenant essentiellement du centre du bassin parisien (dans l'acception géologique du terme), et un peu plus longues (225 km) pour les produits animaux, fromage et viande (sur pied) pouvant facilement être transportés sur de longues distances. Pour les fruits et légumes la distance moyenne d'approvisionnement ne dépassait pas 87 km.

Au total, l'essentiel de l'approvisionnement alimentaire parisien provenait du territoire constitué par le bassin de la Seine, avec une distance moyenne d'approvisionnement de 170 km. Ceci est parfaitement compatible avec l'estimation d'un potentiel d'exportation commerciale du système agricole de l'époque de quelque 50 kgN/km²/an (Billen et al. 2009) qui implique qu'un territoire de 75 500 km² pouvait subvenir aux besoins d'une ville de 700 000 habitants.

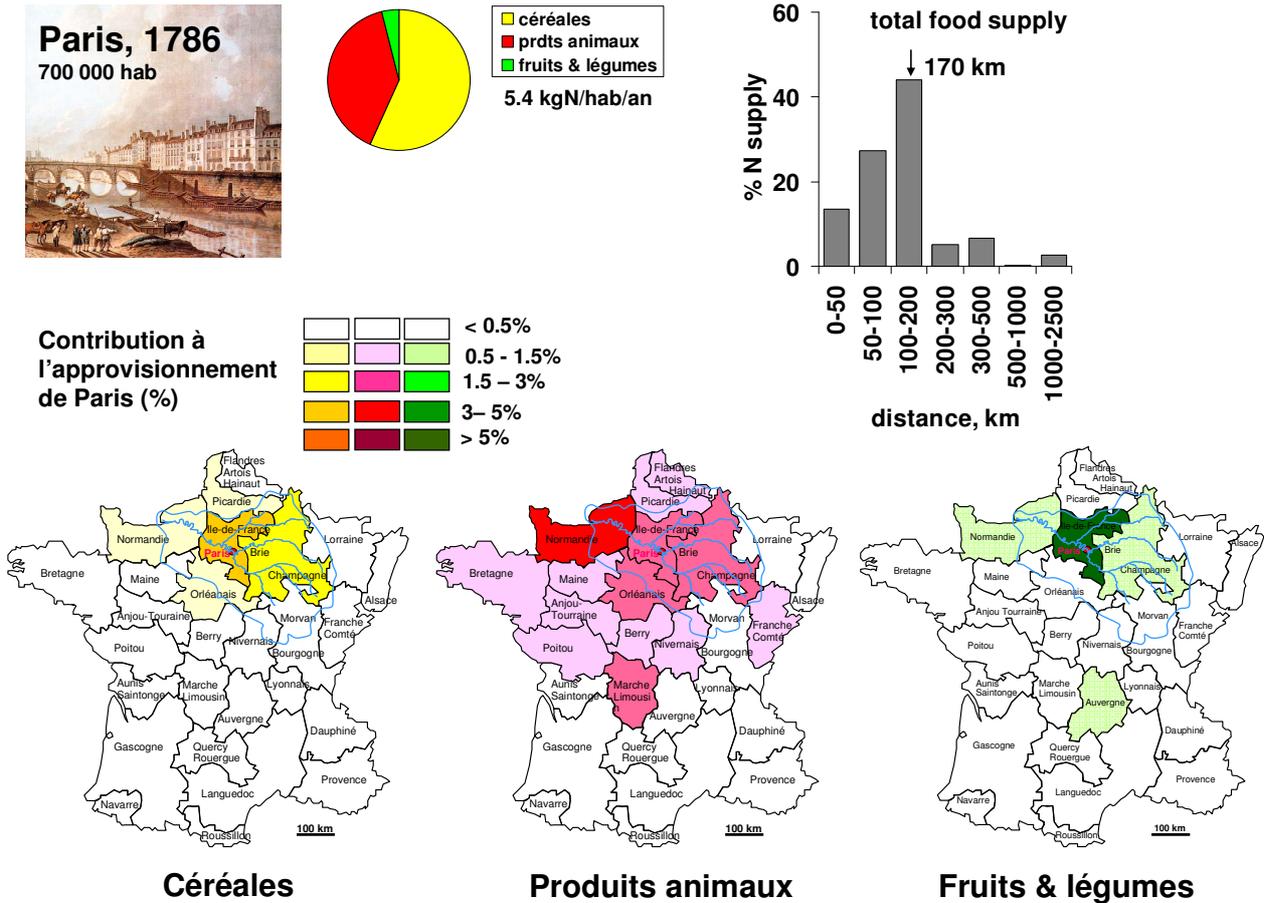


Figure 4.1 : Aires et distances d'approvisionnement de Paris en céréales, produits animaux et fruits et légumes en 1886.
(sources : données de Abad (2002) converties en kgN).

4.1.2 Paris en 1896

A la fin du XIXe siècle, l'agglomération parisienne atteint quelques 3 715 000 habitants, multipliant donc la demande alimentaire urbaine d'un facteur cinq par rapport à la fin du siècle précédent. Cela d'autant plus que la consommation par tête a augmenté jusqu'à 7 kgN/an, avec une progression importante de la consommation de produits animaux (52% de l'apport total en protéines). Mais le XIXe siècle est aussi celui d'un développement considérable des infrastructures de transport. Avec le creusement de canaux et l'aménagement de barrages éclusés sur les grandes rivières pour les rendre accessibles à la navigation toute l'année, Paris se voit ainsi relié par voie d'eau aux bassins de l'Escaut au Nord, du Rhin à l'Est, du Rhône au Sud. Le développement des chemins de fer ne débute qu'au milieu du siècle, selon un plan en étoile autour de Paris ; dès la fin du siècle, le maillage de l'ensemble du territoire est achevé (Figure 4.2), et six compagnies se partagent des secteurs de territoire national centrés sur la capitale (Compagnie du Nord, de l'Est, de l'Ouest, d'Orléans, Paris-Lyon-Méditerranée, Compagnie de l'Etat).

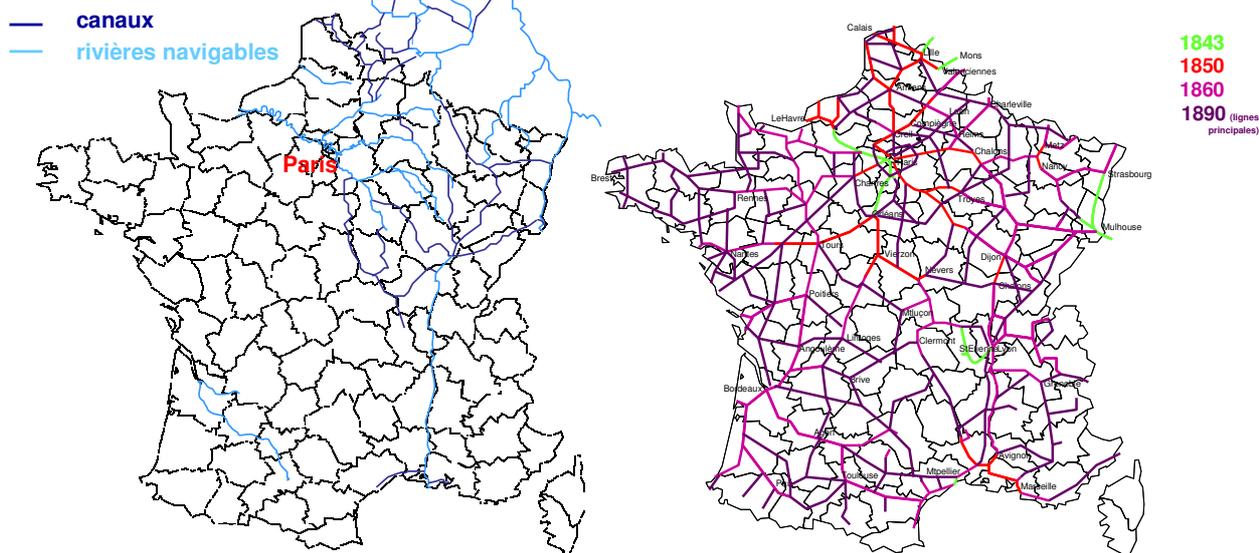


Figure 4.2 : Voies navigables accessibles depuis Paris (Mouchel et al., 1998) et réseau ferré national (Jouanne 1859) entre 1843 et 1896.

Le XIXe siècle se caractérise aussi en France, et tout particulièrement dans les régions du bassin parisien, par une profonde modification des techniques agricoles, avec le remplacement progressif de la jachère triennale par une sole de légumineuse fourragère qui permet l'accroissement du cheptel et, par là, une meilleure fertilisation des terres céréalières. A la fin du siècle la capacité productive de l'agriculture française (c'est-à-dire sa production céréalière en surplus des besoins de la consommation humaine locale) est devenue supérieure à 500 kgN/km²/an dans les régions qui entourent la capitale (Figure 4.3).

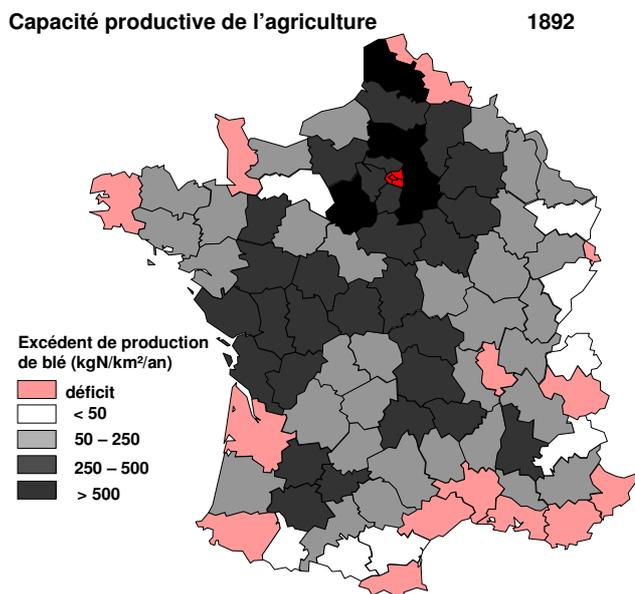


Figure 4.3 : Capacité d'exportation de blé des départements en 1892 (= surplus de production annuelle par rapport à la consommation de la population locale).

En combinant la répartition potentielle des exportations céréalières françaises avec les quantités de céréales amenées à Paris par les principales compagnies de chemin de fer existant à la fin du XIXe (chiffres fournis par les statistiques du transport), il est possible d'estimer la contribution des départements français à l'approvisionnement en céréales de Paris à cette époque, le rail assurant l'essentiel des livraisons alimentaires (Figure 4.4). Le même type de données permet de reconstituer les aires d'approvisionnement en viande et en lait, et en fruits et légumes. Il apparaît alors, par rapport à la situation de 1786, un certain étalement du territoire d'approvisionnement, même si c'est toujours le bassin parisien qui assure la plus grande partie l'approvisionnement alimentaire de la capitale, sur une distance moyenne de l'ordre de 260 km.

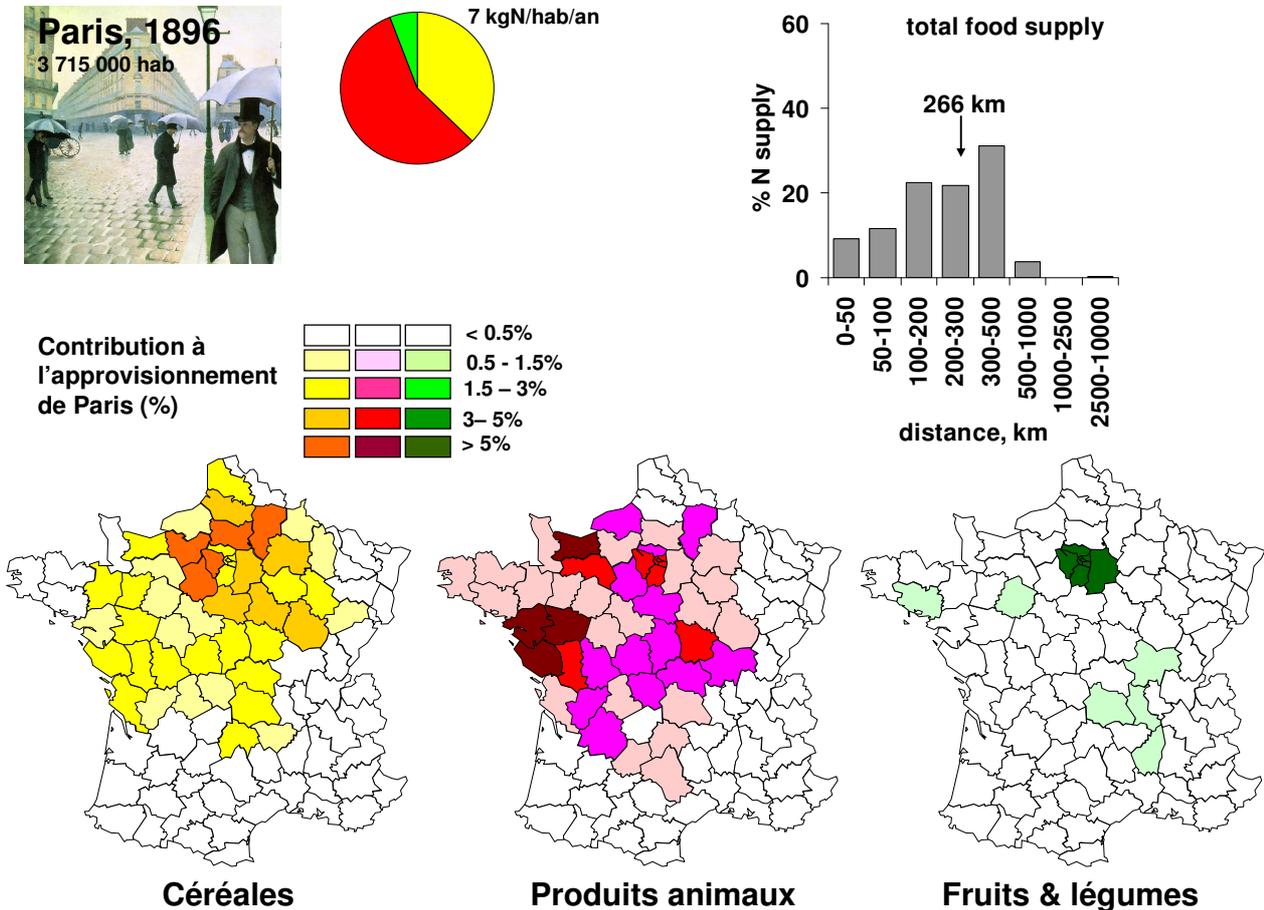


Figure 4.4 : Aires et distances d'approvisionnement de Paris en céréales, produits animaux et fruits et légumes en 1886.

(sources : statistiques de la production agricole départementale et du transport).

4.1.3 Paris en 2006

Qu'en est-il aujourd'hui d'une agglomération parisienne comptant plus de 11 millions d'habitants, dont la consommation par tête a encore progressé (8 kgN/hab/an dont 60% de viande et produits laitiers)? Depuis une cinquantaine d'années, le monde rural a totalement modifié son système agraire. Le remplacement de la fertilisation animale par le recours aux engrais de synthèse a conduit à l'abandon de la complémentarité millénaire entre agriculture et élevage, ouvrant la voie à une spécialisation inédite des territoires, soit vers la céréaliculture, soit vers l'élevage, multipliant aussi par un nouveau facteur 10 le potentiel d'exportation commerciale des territoires agricoles (Figure 4.5). La production des régions qui constituaient traditionnellement l'arrière-pensée nourricier de Paris dépasse maintenant de beaucoup la demande urbaine locale, qui ne s'est accrue dans le même temps 'que' d'un facteur 3. L'agriculture s'ouvre sur un commerce de plus en plus internationalisé.

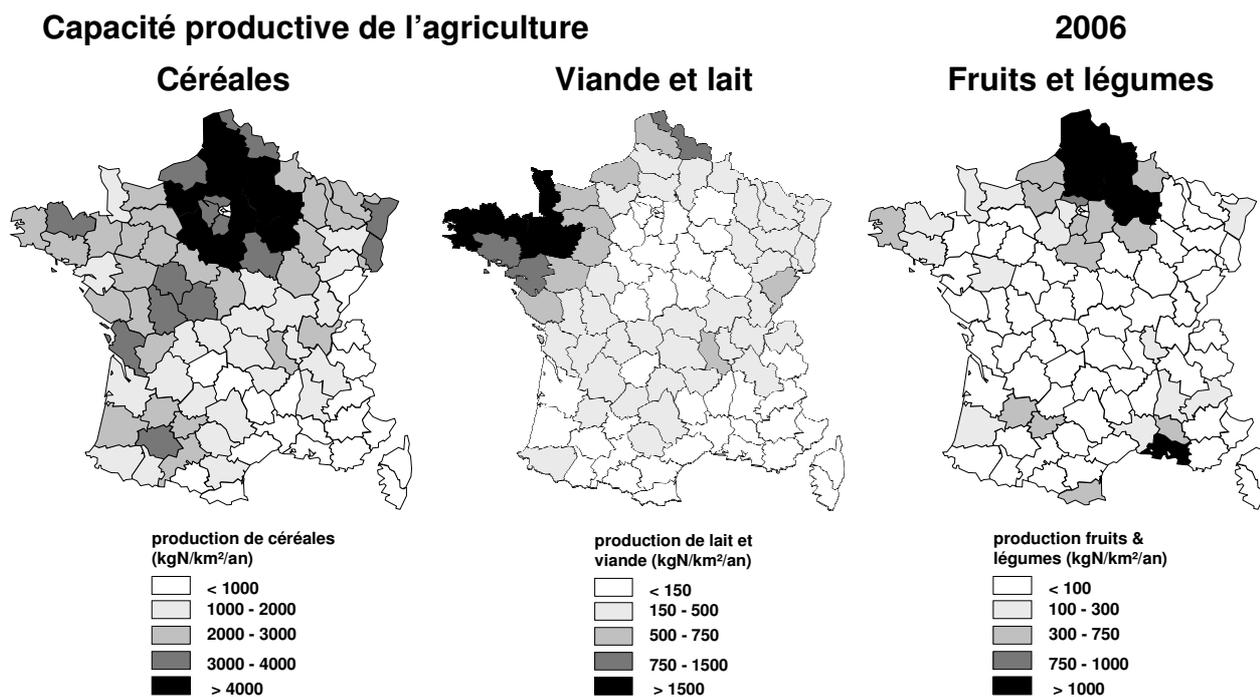


Figure 4.5 : Capacité productive et spécialisation des territoires départementaux en France en 2006 (sources : Agreste, 2006).

Les infrastructures de transport aussi ont connu au cours du XXe siècle une profonde mutation, la route assurant maintenant 75% de l'approvisionnement alimentaire de Paris, quand le rail et la voie d'eau n'en couvrent plus que 18% et 2% respectivement.

L'analyse de la base données SitraM ('Système d'information des transports de marchandises', (Ministère de l'Economie, www.statistiques.equipement.gouv.fr/) qui fournit une matrice des transports de marchandise (selon une nomenclature de 176 postes dont 47 produits alimentaires) par destination (départements) et par origine (départements et pays étrangers) permet de déterminer la contribution de chaque département et chaque pays du monde à l'approvisionnement de l'Île-de-France, si l'on fait l'hypothèse que la répartition par origine de la consommation locale est identique à celle de la somme des importations et de la production locale (hypothèse du 'mélange parfait'). Les résultats de cette analyse sont représentés dans la Figure 4.6.

Pour les céréales, mises à part quelques importations de pâtes alimentaires italiennes et de riz asiatique, la zone d'approvisionnement de Paris reste locale, même si la demande parisienne ne représente plus qu'un quart de la production de l'Île-de-France. La distance moyenne d'approvisionnement reste inférieure à 500 km. L'hinterland traditionnel joue aussi toujours un rôle majeur dans l'approvisionnement en fruits et légumes de la capitale, même si de nombreux produits sont importés d'Italie, d'Espagne et d'Afrique ; leur distance pondérée d'approvisionnement est de 790 km. Par contre le centre du bassin parisien, dont l'élevage a été considérablement réduit, ne contribue plus que très peu à l'approvisionnement en produits animaux : c'est le Grand Ouest et le Nord de la France qui y pourvoit majoritairement. La distance moyenne d'approvisionnement pour ces produits est de 660 km. Dans tous les cas on est loin des « Food-Miles » de plusieurs milliers de km qui caractérisent l'approvisionnement des villes anglaises (Smith et al. 2005), et on a plutôt l'impression que l'étalement des zones d'approvisionnement de Paris résulte moins d'un choix d'approvisionnement sur des marchés distants que de la spécialisation territoriale de l'agriculture et de l'offre alimentaire, ou du poids de quelques produits exotiques contribuant de façon toutefois mineure au bilan alimentaire.

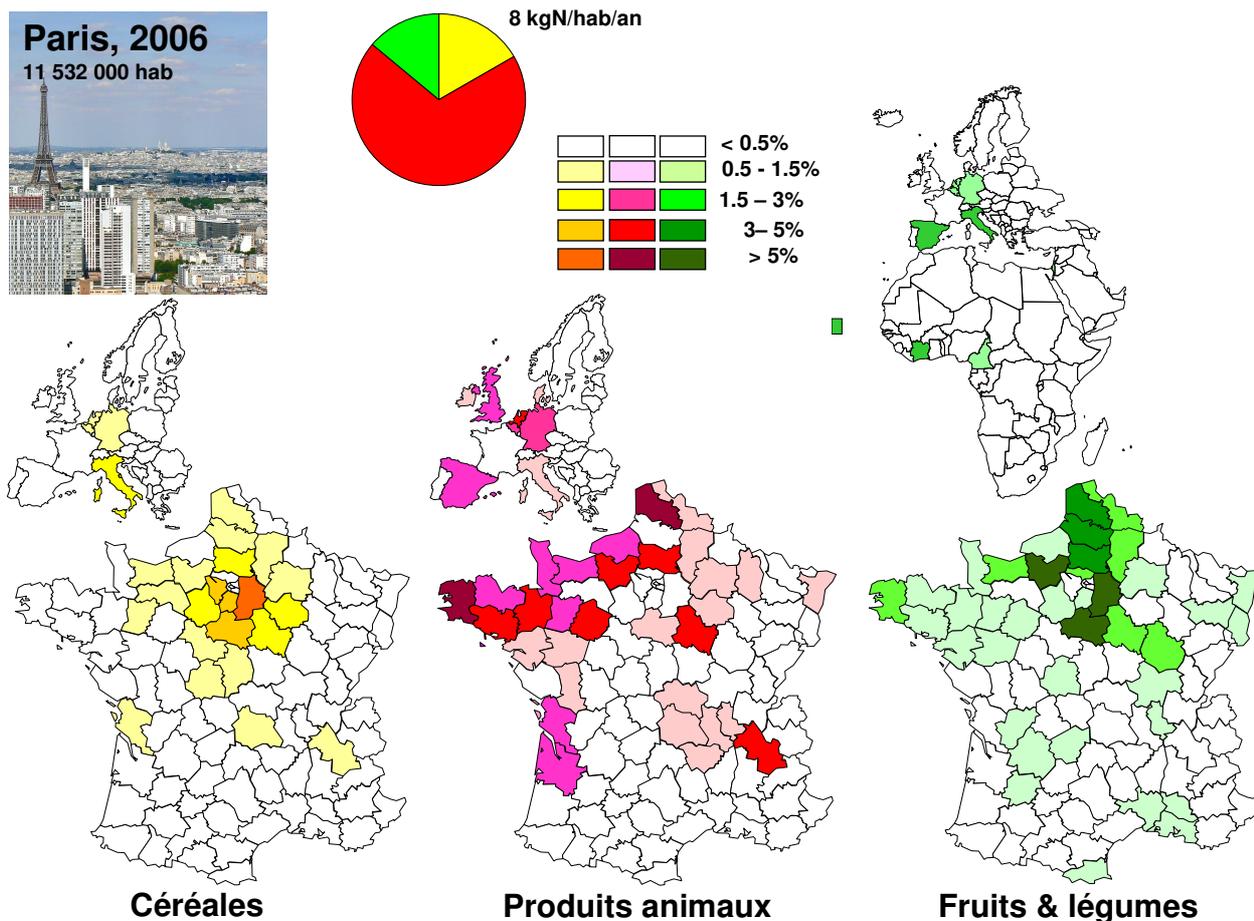


Figure 4.6 : Aires d'approvisionnement de Paris en céréales, produits animaux et fruits et légumes en 2006. (sources : combinaison des données de la base SITraM (Système d'information sur le transport des Marchandises, MEEDDAT) et des statistiques de production agricoles (Agreste)).

Au total, la distance moyenne pondérée de l'approvisionnement alimentaire de Paris est maintenant de 662 km. Le territoire du bassin de la Seine couvre encore à lui seul 54% de la consommation en protéines de l'agglomération parisienne et 63% de sa consommation en produits végétaux. Par contre, c'est le territoire contigu de la Bretagne, Normandie et Nord-Pas-de-Calais qui assure la plus grande partie des besoins de la capitale en produits animaux (figure 4.7). Il est donc possible de délimiter un espace, celui d'un grand quart Nord-Ouest de la France, qui assure 70% de l'approvisionnement alimentaire parisien. Les 30% restant se distribuent de façon égale entre les autres départements français et l'étranger.

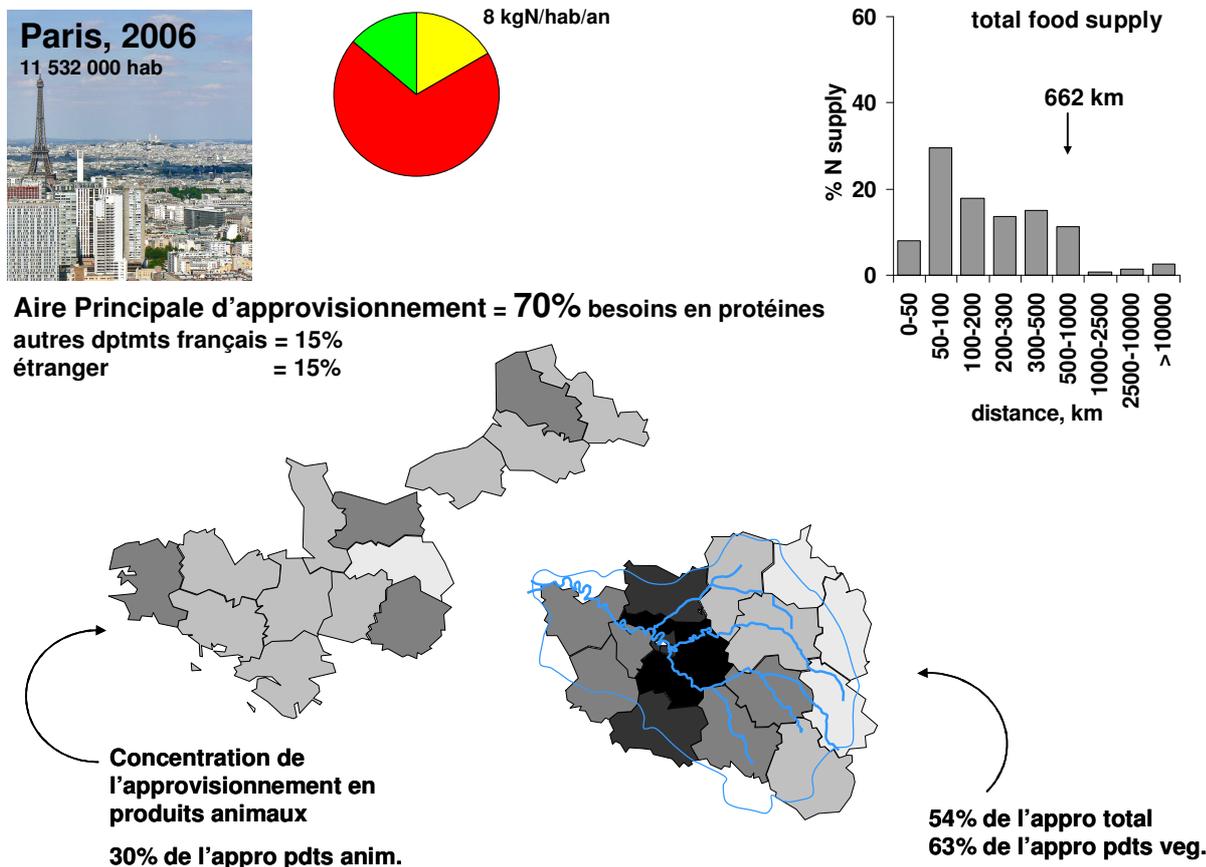


Figure 4.7. : Distribution des distances d'approvisionnement de Paris en 2006 et délimitation de son Aire Principale d'Approvisionnement : il s'agit d'un territoire constitué d'une part du bassin de la Seine (Hinterland nourricier traditionnel) et de la Bretagne-Normandie-Pas de Calais qui assurent la plus grande partie de l'approvisionnement en produits animaux.

4.2 Fonctionnement biogéochimique des territoires d'approvisionnement de Paris

L'analyse du cycle de l'azote dans les diverses composantes territoriales de l'aire principale d'approvisionnement de l'agglomération parisienne peut nous renseigner sur la manière dont est actuellement organisée la production agricole de ces territoires. Nous replacerons brièvement cette organisation dans le contexte de l'approvisionnement alimentaire de l'ensemble de l'Europe. Cette analyse nous permettra aussi de mettre en lumière l'impact de cette organisation de la production agricole sur la qualité des ressources en eau de ces territoires.

4.2.1 Le cycle de l'azote dans l'aire principale d'approvisionnement alimentaire

En ce qui concerne son cycle de l'azote, le système agraire du bassin de la Seine se caractérise par une dominance des grandes cultures, avec un recours massifs aux engrais azotés de synthèse, un élevage peu développé (sauf dans ses franges périphériques Est et Ouest) et un recours très limité à la fixation symbiotique d'azote par les légumineuses (Figure 4.8). Ce territoire, on l'a vu, exporte plus de 80% de sa production végétale, mais n'assure que moins de 20% des besoins en produits animaux de sa population.

**BV Seine, 2006 (92 000 km²)
kgN/km²/an**

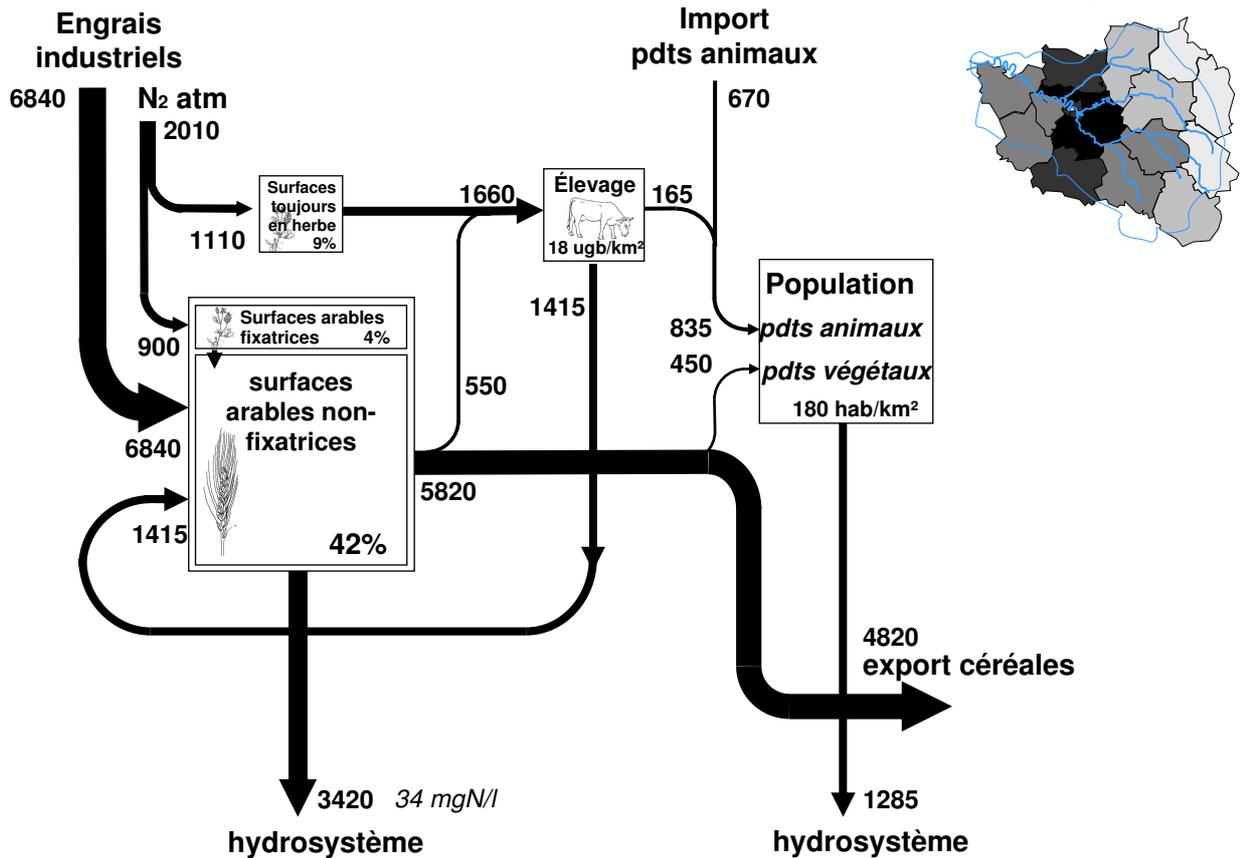


Figure 4.8 : Flux d'azote entre terres agricoles, élevage, consommation domestique et hydrosystème dans l'agro-système du bassin de la Seine en 2006 (Flux en kgN/km²/an). (sources : Agreste, 2006 : données par départements, et SitraM, 2006)

Le système agricole de l'autre composante de l'aire principale d'approvisionnement parisien (Bretagne-Normandie-Pas de Calais) est caractérisé au contraire par un très grand développement de l'élevage (81 UGB/km², plus de 4 fois la densité de bétail du bassin de la Seine) (Figure 4.9). Son cycle de l'azote est ainsi dominé par les flux d'alimentation et d'excrétion du bétail. Une part importante de l'alimentation du bétail provient de denrées importées, pour l'essentiel des tourteaux de soja en provenance du Brésil et d'Argentine. La base de données SitraM conduit à estimer les importations de tourteaux vers les départements constitutifs de cette région à 300 ktonN/an. Sur base des tables de rationnement des animaux d'élevage, on arrive à un chiffre moitié moindre (160 ktonN/an) mais qui reste considérable en terme de part des protéines importées par rapport à la production locale. Ce territoire exporte une quantité considérable de produits animaux (viande et produits laitiers). S'il exporte également des produits végétaux, leur contenu protéique ne représente guère plus que celui des aliments pour bétail importés. Compte tenu du rendement de la culture du soja en Amérique latine (env 25 qx/ha/an, soit 88 kgN/ha/an) les importations vers notre agro-système représentent une surface agricole utile de quelque 20000 à 35000 km², soit un territoire de taille comparable à celui considéré ici.

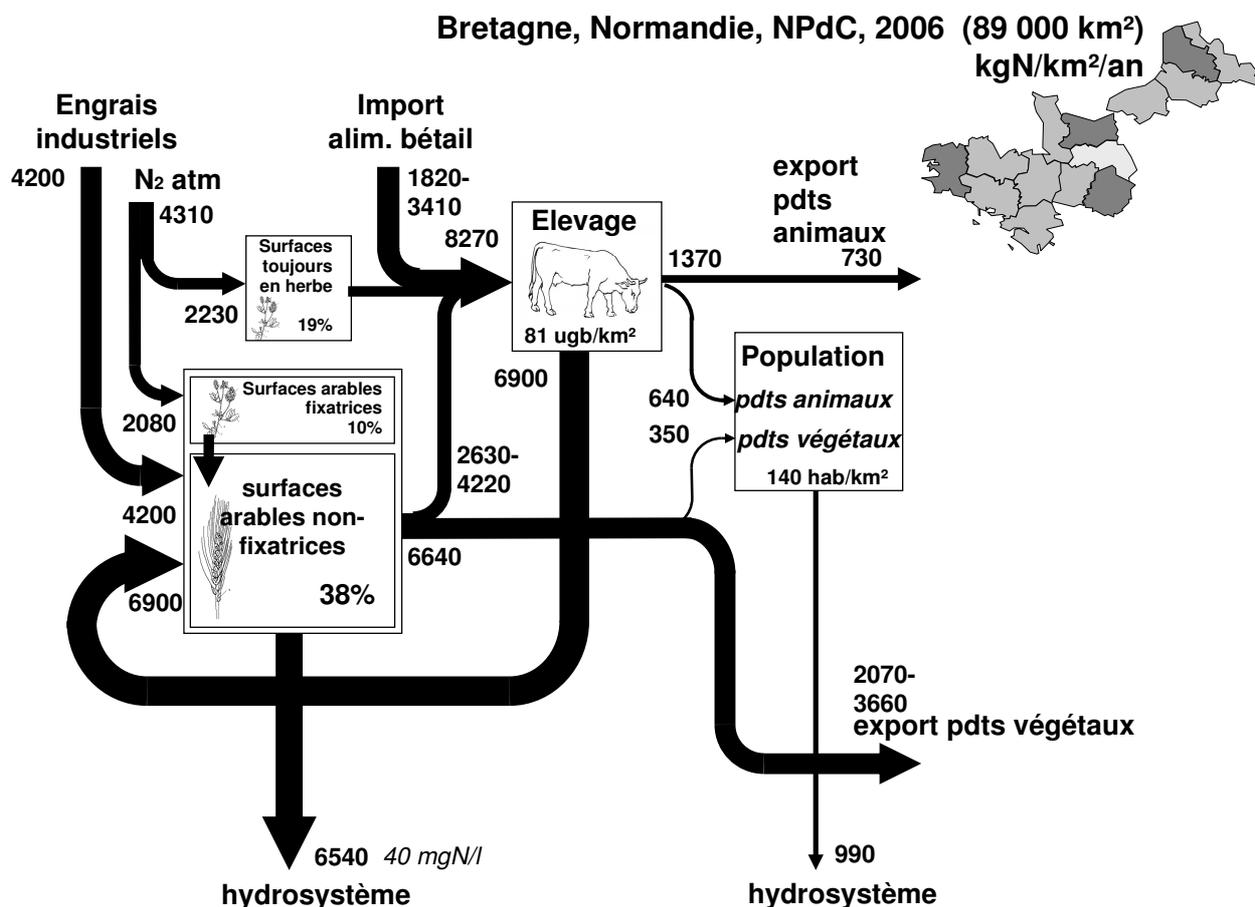


Figure 4.9 : Flux d'azote entre terres agricoles, élevage, consommation domestique et hydrosystème dans l'agro-système du territoire Bretagne-Normandie-Pas de Calais en 2006 (Flux en kgN/km²/an).

(sources : Agreste, 2006 : données par départements, et SitraM, 2006)

On voit ainsi comment la consommation alimentaire de la région parisienne dépend actuellement pour l'essentiel de trois territoires de taille sensiblement identique mais au fonctionnement radicalement différent (Figure 4.10):

* Le bassin de la Seine, après avoir longtemps assuré le rôle d'hinterland nourricier traditionnel de la région parisienne, est maintenant principalement tourné vers la production céréalière écoulee à 80% sur des marchés extérieurs.

* Les territoires de la Bretagne, de la Normandie et du Nord Pas de Calais assurent une large part des besoins en produits animaux de la région parisienne tout en important massivement des aliments pour bétail.

* Des régions d'Amérique latine spécialisées dans la production de soja assurent l'essentiel de ces dernières importations.

2006, ktonN/an

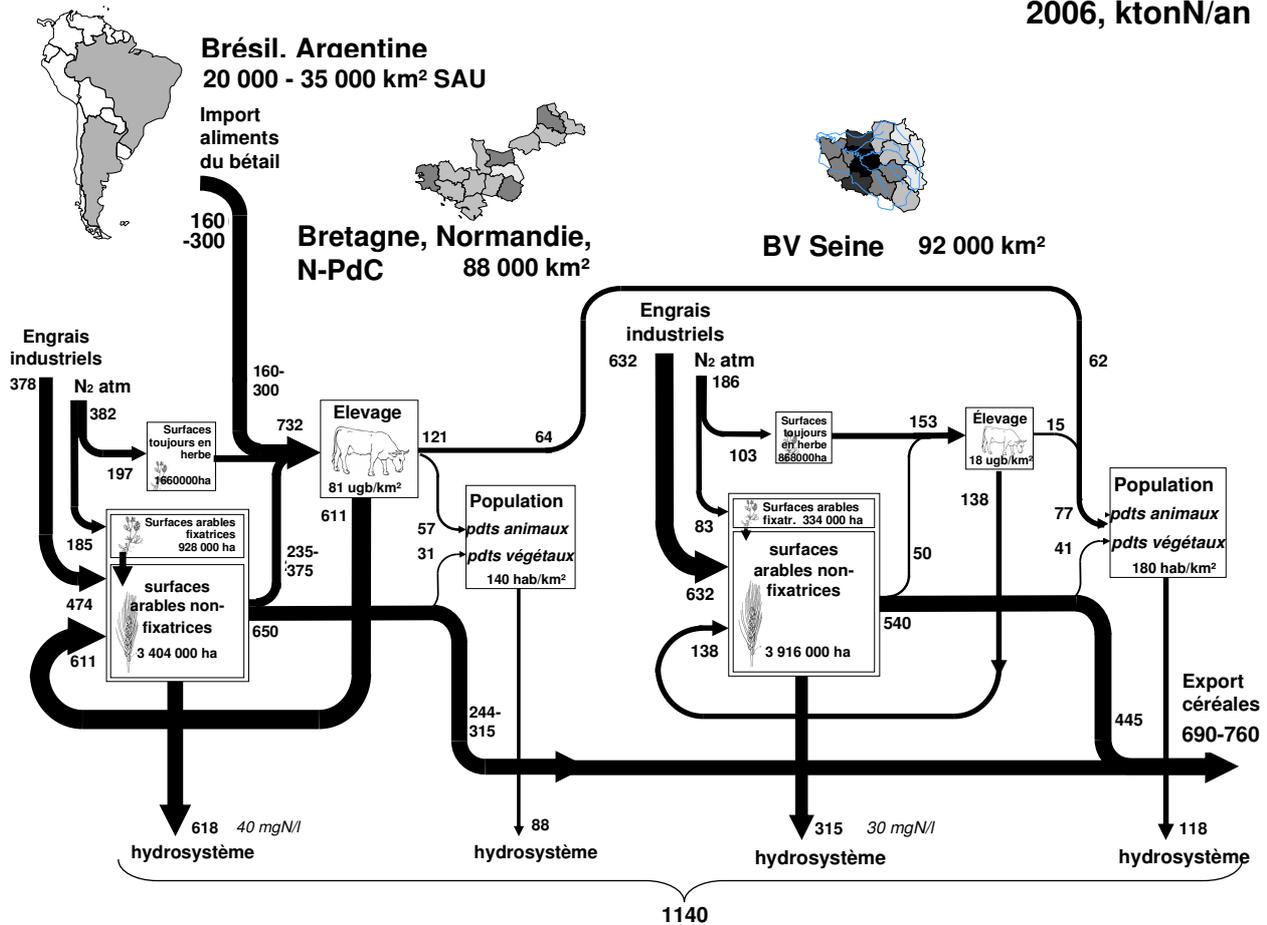


Figure 4.10 : Flux d'azote dans l'agro-système des trois territoires impliqués principalement dans l'approvisionnement alimentaire de l'agglomération parisienne en 2006 (Flux en ktonN/an). (sources : Agreste, 200 ; SitraM, 2006, FAOstat, 2006)

En ramenant par habitant les chiffres de la figure 4.10, il est possible de décomposer l'empreinte alimentaire azotée individuelle du francilien moyen, et de définir en quelque sorte un équivalent habitant généralisé qui représente les flux d'azote générés à tous les stades de la chaîne agro-alimentaire par l'alimentation d'une personne habitant la région parisienne (Figure 4.11). L'équivalent habitant classiquement considéré comme représentatif de la charge azotée individuelle dans les eaux usées urbaines est de 15 gN/hab/jour ou 5.4 kgN/hab/an. La différence avec le chiffre de la consommation brute totale de 8 kgN/hab/an est une estimation de la production de déchets solides générés entre l'approvisionnement en produits agricoles bruts et la consommation finale effective. Des pertes de l'ordre de 20-30% sont en effet citées par plusieurs études qui se sont intéressées à cette question (WRAP, 2009 ; ADEME, 2010). Pour simplifier le diagramme, nous avons considéré, comme nous y invite l'analyse des aires d'approvisionnement, que l'essentiel de la consommation francilienne de produits végétaux est issue d'agrosystèmes similaires à celui du bassin de la Seine, tandis que l'essentiel de la consommation de produits animaux provient d'agrosystèmes du type Bretagne-Normandie-Pas de Calais. La consommation de produits de la mer (poissons, mollusques, crustacés, soit env 0.7 kgN/hab/an) est exclue de l'analyse.

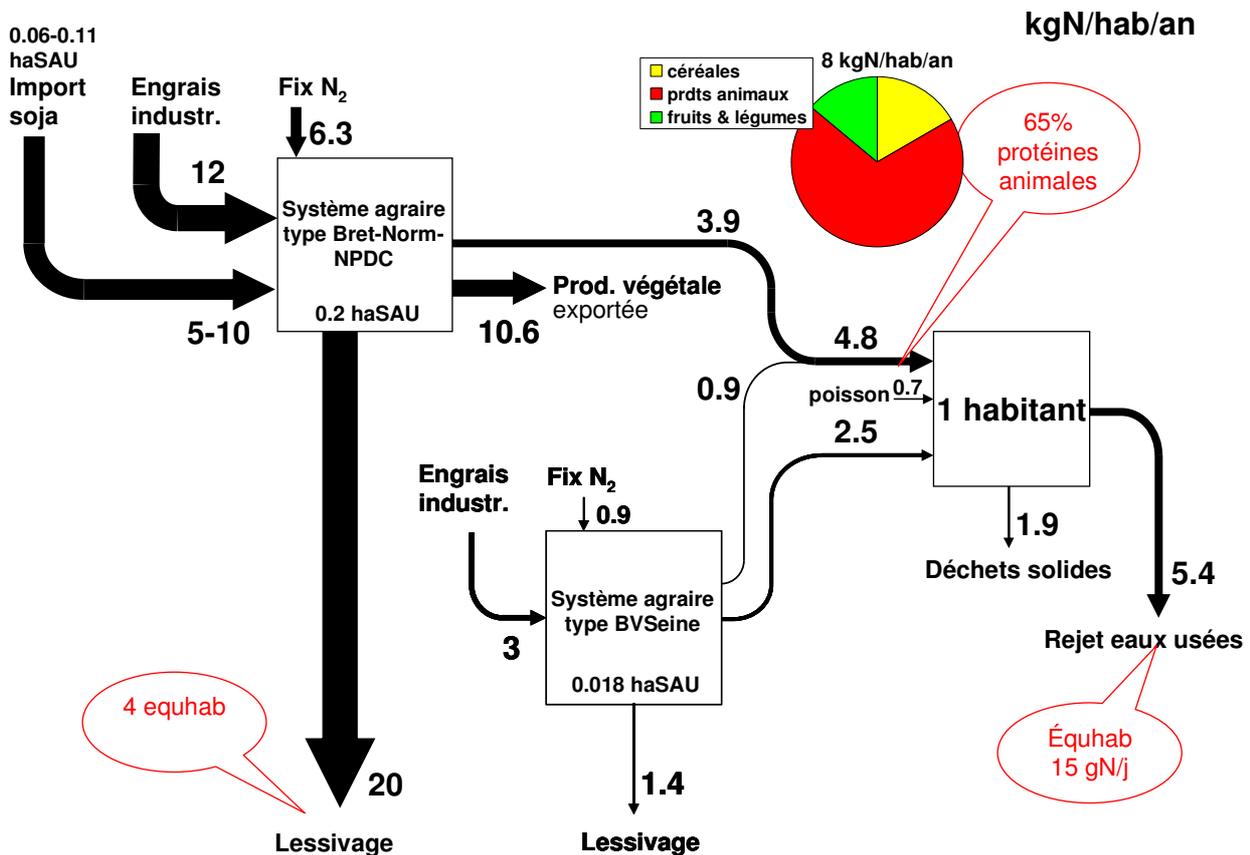


Figure 4.11. : L’empreinte azote du Francilien moyen en 2006 (généralisation de la notion d’équivalent habitant) (Flux en kgN/habitant/an).

Cette analyse montre que la fourniture de l’alimentation d’un habitant ne requiert que 0.018 ha de surface agricole utile, fertilisée à raison de 3 kgN/an plus 0.9 kgN/an issus de la fixation symbiotique par les légumineuses, et donnant lieu à une perte vers l’hydrosystème de l’ordre de 1.4 kgN/an. Cette même surface agricole ne produit cependant que moins de 20% de la consommation de protéines animales de notre habitant. Pour produire le complément, une surface agricole dix fois plus importante (0.2 ha) est nécessaire, et met en œuvre des flux d’azote beaucoup plus considérables, incluant l’importation de 10 kgN/an de soja latino-américain (produit sur 0.11 ha), l’utilisation de 12 kgN/an de fertilisant industriels et de 6.3 kgN/an fixés symbiotiquement. Cette surface produit également un surplus de production végétale exporté de 10.6 kgN/an. Elle donne lieu à des pertes environnementales d’azote potentiellement polluantes pour l’hydrosystème de l’ordre de 20 kgN/an, soit 5 fois l’équivalent habitant classique. A l’évidence, la production des protéines animales, au dessus de la fraction qui peut être produite par un système de polyculture élevage équilibré, est responsable de la plus grande part de l’empreinte alimentaire.

4.2.2 L’approvisionnement alimentaire à l’échelle européenne

Les chiffres de la figure 4.10 montrent que le territoire principal d’approvisionnement de l’agglomération parisienne présente un bilan net d’exportation de produits alimentaires, même en considérant les importations de protéines destinées à l’alimentation du bétail. Si l’on définit le caractère *autotrophe* ou *hétérotrophe* d’un territoire par la différence entre le contenu en azote de la récolte de plantes cultivées et les besoins en azote protéique des hommes et de ses animaux domestiques (ANAH : Anthropogenic Nitrogen Autotrophy and Heterotrophy, Billen et al., 2010), ce territoire est donc nettement autotrophe.

La distribution des zones autotrophes et hétérotrophes de l’Europe (Figure 4.12), étudiée en détail dans le cadre de l’European Nitrogen Assessment (Sutton et al, 2011 ; Billen, Leip et al, in prep), montre en effet que le Nord de la France compte parmi les régions d’Europe les plus autotrophes. Des zones très

hétérotrophes, importatrices de protéines existent par contre de la Belgique au Danemark, dans la vallée du Pô, en Espagne et au Portugal. Des zones plus équilibrées dominent en Europe de l'Est et du Nord.

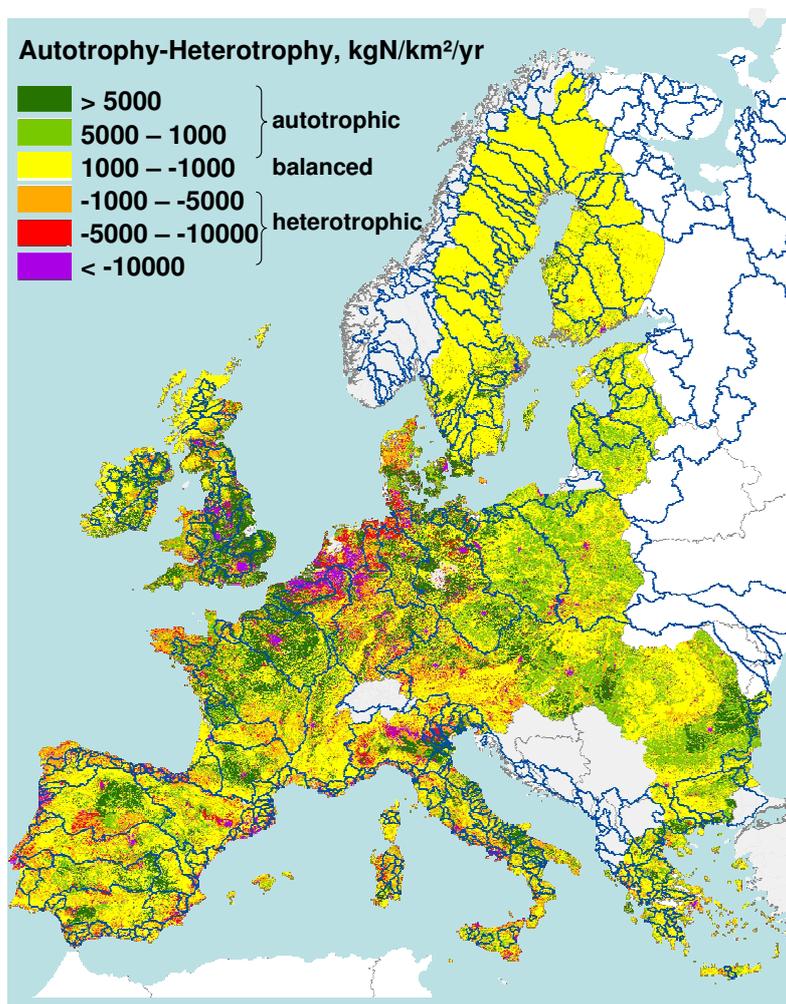


Figure 4.12 : Du fait de la spécialisation des territoires entre grandes cultures et élevage intensif, l'Europe apparaît aujourd'hui comme une mosaïque de territoires autotrophes et hétérotrophes, c'est-à-dire respectivement exportateurs ou importateurs de protéines. (source : ENA, Sutton et al, 2011 ; Billen, Leip et al. in prep)

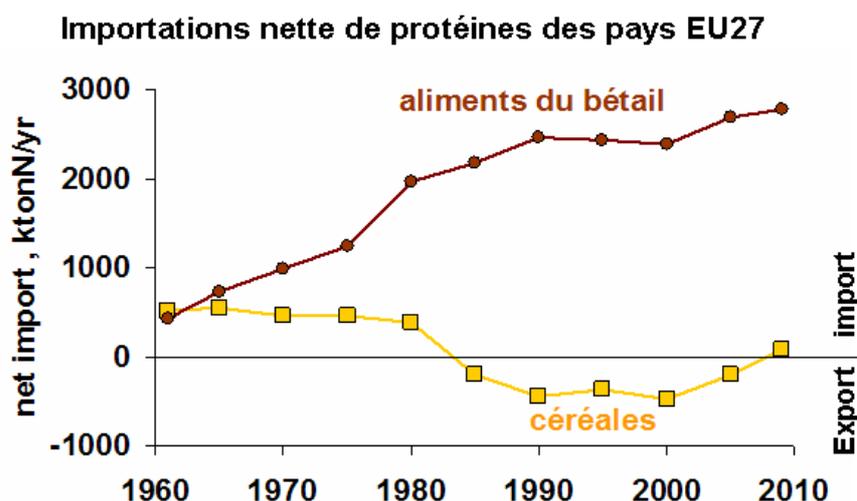


Figure 4.13 : Balance du commerce extérieur de l'Europe des 27 en termes de céréales et de protéines destinées à l'alimentation du bétail. (source : FAOstat)

Dans son ensemble cependant, l'Europe est déficitaire en protéines. Si elle a montré une balance positive en matière d'exportations de céréales durant les années 1990, le solde est aujourd'hui nul. En revanche, ses importations de protéines végétales destinées à l'alimentation animale ne cessent de croître (Figure 4.13). Au contraire d'une affirmation fréquemment entendue, l'agriculture très productive de l'Europe ne contribue donc en rien à « nourrir le monde » au-delà de ses frontières.

4.2.3 Approvisionnement alimentaire et qualité des eaux

Pour les différents départements constitutifs de l'aire principale d'approvisionnement alimentaire de l'agglomération parisienne, nous avons étudié la relation entre rendement et fertilisation totale des terres arables (Figure 4.14 a). La fertilisation totale comprend celle liée aux épandages d'engrais de synthèse et de déjections animales, aussi bien que la fixation d'azote atmosphérique par les légumineuses. L'ensemble des données montre une relation hyperbolique assez classique ('loi des rendements décroissants') où l'écart à la diagonale mesure le 'surplus' de fertilisation par rapport à ce que la récolte en utilise. Ce surplus s'accroît avec le niveau de fertilisation, indiquant une efficacité décroissante de l'utilisation d'azote (Fig 4.14 b). On considérera ici que le surplus est potentiellement entièrement générateur de pollution de l'hydrosystème après dilution dans la lame d'eau infiltrée, ce qui revient à considérer que l'ensemble des pertes atmosphérique d'azote par dénitrification ou volatilisation ont lieu après transfert dans l'hydrosystème ; on néglige aussi, à l'échelle territoriale où l'on se place ici, les variations de stock d'azote total dans le sol. Dans le cadre de ces hypothèses simplificatrices, il est alors possible de calculer la concentration nitrique moyenne de l'eau sous-racinaire produite par les terres arables de l'agro-système. On voit qu'au delà d'une fertilisation totale de 150 kgN/ha/an (quelle soit organique ou minérale), il est très difficile de produire une eau satisfaisant aux normes de concentration en nitrates de l'eau potable. Certes, des marges de progrès existent : l'efficacité de l'utilisation d'azote par les plantes peut être améliorée, et la relation entre rendement et fertilisation se rapprocher de la diagonale, par des pratiques telles que l'usage de cultures intermédiaires piège à azote ou une meilleure précision (dans le temps et dans l'espace) de l'application des fertilisants pour mieux coller aux besoins des plantes. Il n'en reste pas moins que dans la pratique, des systèmes moins intensifs, à bas niveau d'intrants, tels que les systèmes d'agriculture biologique, génèrent beaucoup moins de pertes environnementales d'azote que les systèmes plus intensifs (Figure 4.14).

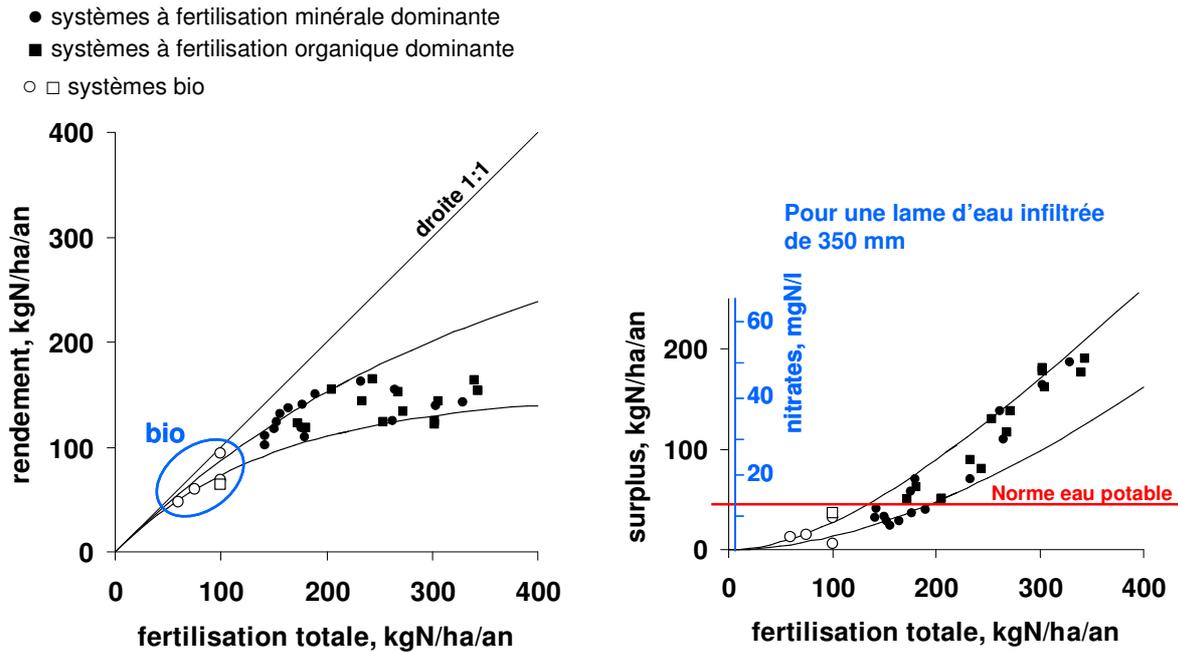


Figure 4.14 : Analyse de la balance azotée des territoires agricoles des départements constitutifs de l'aire principale d'approvisionnement de l'agglomération parisienne.
 a. (à gauche) relation entre le rendement et la fertilisation totale des terres arables.
 b. (à droite) relation entre le surplus azoté et la fertilisation totale. En bleu, concentration équivalente en considérant que l'ensemble du surplus annuel rejoint l'hydrosystème après dilution dans une lame d'eau de 350 mm/an.
 (source des données : Agreste, 2006)

4.3 Réduire l’empreinte alimentaire et préserver les ressources en eau ?

Le système agricole dont dépend notre alimentation est générateur, ne serait ce que par la manière dont il perturbe le cycle de l’azote, d’une dégradation inquiétante de la qualité des ressources en eau, compromettant même en maints endroits l’approvisionnement en eau potable. La question qui est posée est donc bien celle de la compatibilité, dans le système agro-alimentaire actuel, entre production alimentaire et production d’eau de qualité. Nous explorons ici quelques pistes susceptibles de réconcilier ces deux fonctions des territoires ruraux.

4.3.1 Réduire la part des protéines animales

Il résulte de ce qui précède que l’empreinte alimentaire du francilien, que ce soit en termes de surface agricole nécessaire, ou en termes de pollution azotée environnementale, est très fortement liée à l’importance de la part de protéines animales dans son régime alimentaire, part qui est passée de 32 % en 1786 à 50 % à la fin du XIXe siècle, pour atteindre aujourd’hui 65%. L’accroissement de la consommation de produits animaux est constaté à l’échelle mondiale : une liaison statistique avec le PIB apparaît lorsque sont comparées les données relatives aux différents pays du monde où la consommation de protéines animales varie de moins de 10% à près de 70% (Figure 4.15). Le niveau de ‘richesse’ économique n’explique cependant pas toute la variabilité de ces données, qui montrent aussi des différences culturelles importantes à niveau de développement identique.

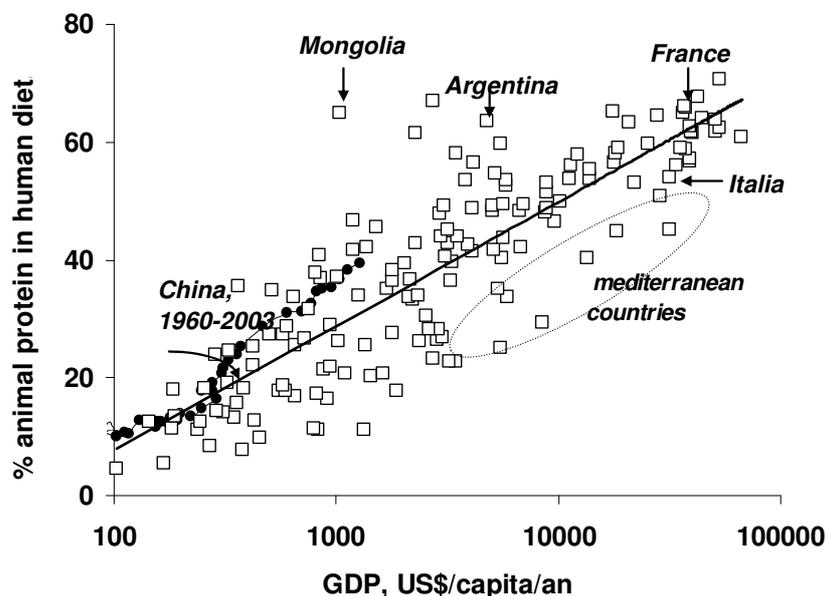


Figure 4.15 :Part des protéines animales dans le régime alimentaire humain des différents pays du monde en 2003 (et évolution 1960-2003 pour la Chine) en fonction

S'il est souhaitable de voir s'accroître la consommation de protéines animales par habitant dans beaucoup de pays en voie de développement qui souffrent de problèmes de malnutrition et de carence en acides aminés essentiels, la part des protéines animales dans les pays du Nord est souvent très largement excessive. Récemment, un groupe de scientifiques liés au programme NinE (Nitrogen in Europe, ESF), constatant les problèmes que pose pour la santé publique et pour l'environnement, l'accroissement de la consommation de viande et de produits laitiers dans les pays développés, ont lancé un appel à une réduction drastique la part de viande dans l'alimentation humaine et à sa substitution par des protéines végétales (<http://www.nine-esf.org/barsac-declaration>). Ils prônent ainsi pour les pays développés un régime 'demi-tarien' qui loin de proscrire la consommation de viande, profondément ancrée dans nos racines culturelles, vise plutôt à en limiter la quantité au profit de la qualité. La part des protéines animales dans notre consommation totale pourrait sans inconvénient être réduite à 40%.

4.3.2 Une agriculture à bas niveau d'intrants industriels

La logique des systèmes agricoles à bas intrants tels que les systèmes d'agriculture biologique vise à limiter autant que possible la fertilisation azotée des terres arables à ce que peut produire la fixation symbiotique des légumineuses sur le territoire. Une part de la surface agricole est ainsi destinée à produire la fertilisation des autres terres arables, soit sous forme d'engrais vert, soit par le biais de l'alimentation du bétail. La figure 4.16 montre deux exemples de l'agencement du cycle de l'azote réalisé dans des systèmes d'agriculture biologique avec ou sans élevage. Dans ces systèmes l'autonomie en matière de fertilisation azotée se paye par une diminution globale de la production. Mais la moindre intensification de ces systèmes leur permet de produire une eau de qualité conforme aux normes de potabilité.

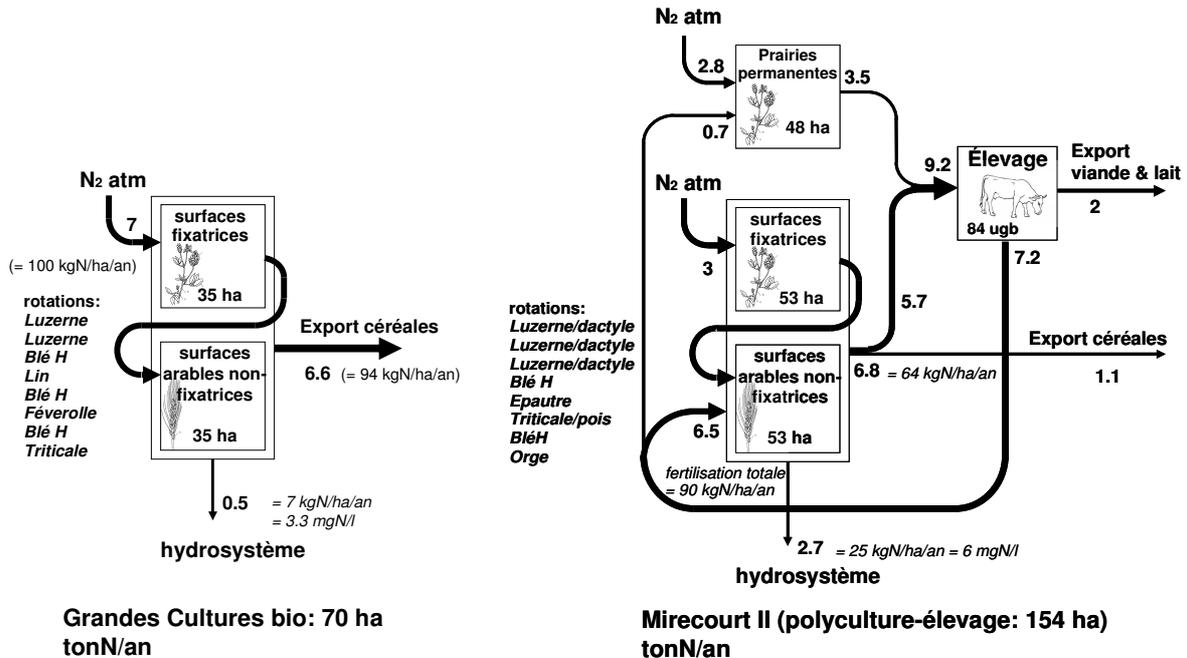


Figure 4.16 : Fonctionnement biogéochimique de deux exploitations types d'agriculture biologique. A gauche : une exploitation de grandes cultures sans élevage en Brie. A droite une exploitation de polyculture-élevage en Lorraine. (Source : enquêtes directes).

De tels systèmes, qui ne représentent actuellement qu'une fraction très marginale de la surface agricole du Nord de la France, sont-ils généralisables ? En particulier sont-ils capables de nourrir localement la population du bassin de la Seine y compris celle de l'agglomération parisienne ?

A partir du schéma de la figure 4.8, et en utilisant la relation rendement-fertilisation totale de la figure 4.14a, nous avons tenté de construire un système agro-alimentaire capable de subvenir aux besoins de la population du bassin de la Seine en ré-affectant les surfaces agricoles et la taille de cheptel animal de manière à se passer du recours à la fertilisation industrielle et en s'interdisant l'importation d'aliments pour le bétail. S'il est assez facile d'assurer les besoins en protéines végétales de la population dans un tel cadre, il n'est cependant pas possible de subvenir aux besoins actuels en protéines animales du bassin tout en respectant les normes de qualité d'eau sans importation de produits animaux de l'extérieur. Par contre, dans le cadre d'un régime demi-tarien, un système agricole basé sur le cahier des charges de l'agriculture biologique étendu à l'ensemble du territoire du bassin de la Seine pourrait parfaitement subvenir aux besoins alimentaires de l'agglomération parisienne tout en exportant une partie de sa production céréalière et en assurant la production d'une eau d'excellente qualité (figure 4.17). L'empreinte alimentaire par habitant d'un tel système est représentée dans la figure 4.18. Son contraste avec la figure correspondant à la situation actuelle (Fig. 4.11) est particulièrement frappant, moins en termes de surface agricole totale nécessaire (0.3 ha/hab contre 0.33 ha/hab actuellement) qu'en termes de pollution azotée générée par le système agricole (3.5 kgN/hab/an contre 21.5 kgN/an).

**BV Seine, scénario bio-local-demitarien (92 000 km²)
kgN/km²/an**

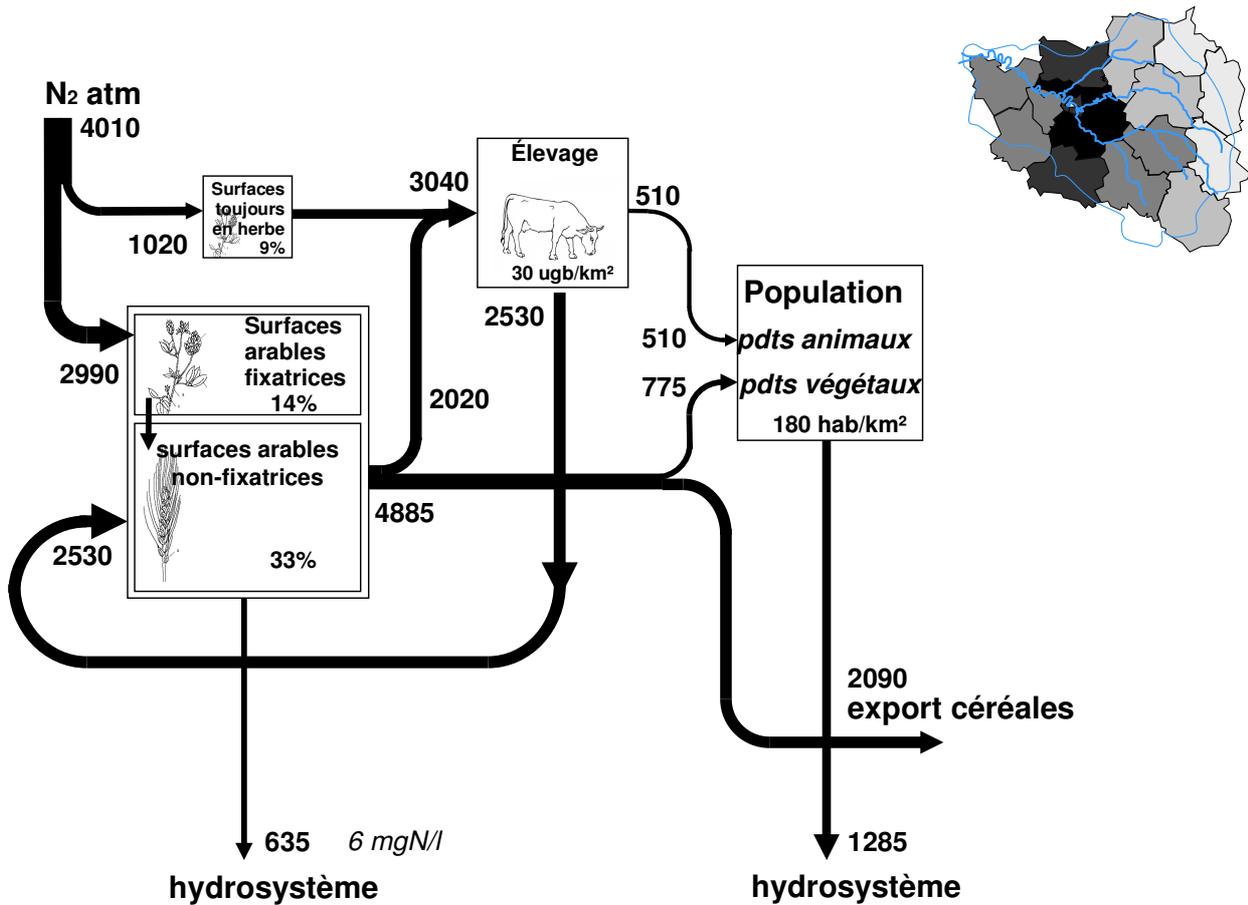


Figure 4.17 : Flux d'azote entre terres agricoles, élevage, consommation domestique et hydrosystème dans un système hypothétique basé sur la généralisation à tout le bassin de la Seine des pratiques de l'agriculture biologique, et d'un régime alimentaire demitarien (Flux en kgN/km²/an).

Même si un tel scénario garde un caractère utopique dans les conditions socio-économiques actuelles du monde agricole français, il montre cependant qu'il est possible d'imaginer pour le territoire du bassin de la Seine, qui constitue à la fois l'aire traditionnelle d'approvisionnement alimentaire de l'agglomération parisienne et son aire actuelle d'approvisionnement en eau potable, un système agro-alimentaire qui, tout en nourrissant sa population, produit une eau de qualité.

kgN/hab/an

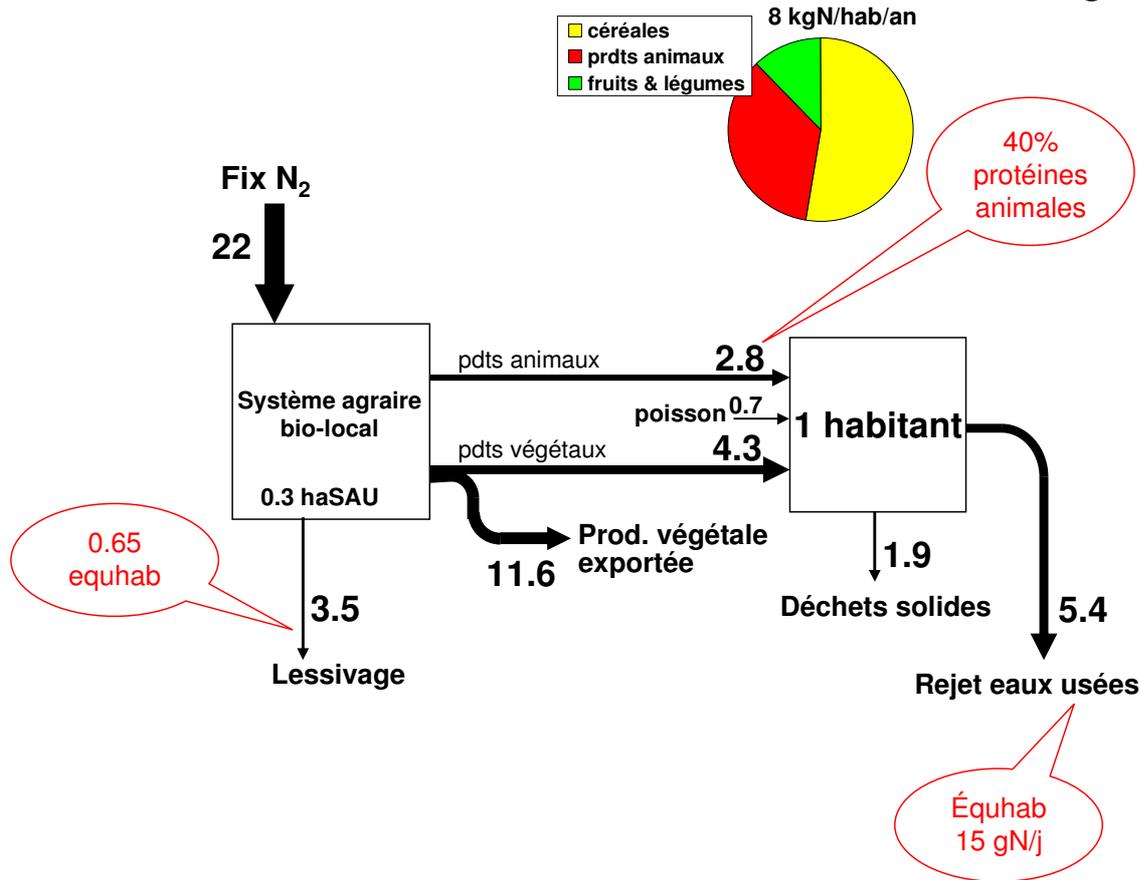


Figure 4.18 : L’empreinte azote du Francilien moyen dans un scénario hypothétique de généralisation à tout le bassin de la Seine d’un système agricole basé sur le cahier des charges de l’agriculture biologique et sur un régime alimentaire demi-tarien.

5 Références

- Abad, R. 2002. *Le Grand Marché: l’approvisionnement de Paris sous l’Ancien Régime*. Fayard, Paris.
- ADEME. 2010. Dossier de Presse. Le gaspillage alimentaire au cœur de lacampagne nationale grand public sur la réduction des déchets. 15 Novembre 2010.
- Baccini, P. et Brunner, P. 1991. *Metabolism of the Anthroposphere*. Berlin, Springer Verlag.
- Barles, S. 2007. Le métabolisme de Paris et de l’Île-de-France : un premier bilan, p. 1-19, in : Programme PIREN-Seine, rapport d’activité 2006. Paris : UMR CNRS 7619 Sisyphé. Pag. mult. Disponible sur la toile, [réf. du 20 février 2011], format PDF, <http://www.sisyphé.upmc.fr/piren/?q=book/87>
- Barles, S. 2009a. Urban Metabolism of Paris and its Region. *Journal of Industrial Ecology* 13(6), p. 898-913. Disponible sur la toile, format PDF, [réf. du 10 oct. 2010], <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.2009.13.issue-6/issuetoc>>.
- Barles, S. 2009b. Wood crisis and urban supply: Paris, 18th-19th centuries, communication à la conférence internationale *Cities and energy transitions: past, present, future* organisée par le LATTIS (CNRS), Autun, 1-4 juin 2009.
- Barles, S. 2010. Society, Energy and Materials: What are the Contributions of Industrial Ecology, Territorial Ecology and Urban Metabolism to Sustainable Urban Development Issues? *Journal of Environmental Planning and Management* 53(4), p. 439-455.
- Barles, S. Sous presse. The Seine and Parisian Metabolism: Growth of Capital Dependencies in the 19th and 20th Centuries, in : Castonguay, S., Evenden, M. D. (eds.). *Urban Waters: Rivers, Cities and the Production of Space in Europe and North America*. Pittsburgh, Pittsburgh University Press.
- Beaujeu-Garnier, J. et Bastié, J. 1967. *Atlas de Paris et de la région parisienne*. Association universitaire de recherches géographiques et cartographiques. Paris, Berger-Levrault.
- Billen, G., A. Beusen, L. Bouwman, and J. Garnier. 2010. Anthropogenic nitrogen autotrophy and heterotrophy of the world's watersheds: Past, present, and future trends, *Global Biogeochem. Cycles*, 24, GB0A11, doi:10.1029/2009GB003702.
- Billen, G., Barles S, Garnier J, Rouillard J., Benoit P. 2009. The Food-Print of Paris: Long term Reconstruction of the Nitrogen Flows imported to the City from its Rural Hinterland. *Regional Environmental Change* 9(1): 13-24 .
- Brunner, P. H., and H. Rechberger. 2004. *Practical handbook of material flow analysis*. Boca Raton, Lewis Publishers.
- Chevalier, M. 1830. *Observations sur les mines de Mons, et sur les autres mines de charbon, qui approvisionnent Paris*. (extrait des Annales de l’industrie française et étrangère). Paris, impr. de H. Fournier.
- DIREN Midi-Pyrénées, 2008. *Profil environnemental de Midi-Pyrénées. Tableau de bord*. Toulouse, DIREN Midi-Pyrénées.
- Eurostat. 2001. *Economy wide material flow accounts and balances with derived resource use indicators. A methodological guide*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Fierro, A. 1996. *Histoire et dictionnaire de Paris*. Robert, Laffont Paris.
- Haberl, H., 2001. The energetic metabolism of societies, Part I: accounting concepts. *Journal of Industrial Ecology* 5 (1), 11–33.
- Hammer, M., S. Giljum, F. Luks, and M. Winkler. 2006. Die ökologische Nachhaltigkeit regionaler Metabolismen: Materialflussanalysen der Regionen Hamburg, Wien und Leipzig. *Natur und Kultur* 7(2): 62–78.
- Hammer, M., S. Giljum, S. Bargigli, and F. Hinterberger. 2003. *Material flow analysis on the regional level: Questions, problems, solutions*. NEDS Working Paper 2, Hamburg. www.seri.at/index.php?option=com_docman&task=search_result&search_mode=phrase&search_phrase=C.OWP&Itemid=39 . Accessed 14 July 2008.

- INSEE 1966a. Annuaire statistique de la France 1966. Résumé rétrospectif. Paris, INSEE.
- INSEE 1966b. Bulletin statistique de la région parisienne. Direction de la région parisienne. Paris, INSEE.
- Jouanne, A. 1859. Atlas historique et statistique des chemins de fer français. Hachette, Paris.
- Kim et Barles, 2010. The Long Term Energetic metabolism of Paris (France) : first quantitative results, 18th-20th century, communication à la 11^e conférence biennale de l'International Society for Ecological Economics (ISEE), *Advancing sustainability in a time of crisis*, Oldenburg & Bremen, 22-25 août 2010.
- Krausmann, F. et Haberl, H. 2002. The process of industrialization from the perspective of energetic metabolism : Socioeconomic energy flows in Austria 1830-1995. *Ecological Economics* 41(2), p. 177-201.
- Bourquin-Simonin, M. H. 2006. L'approvisionnement de Paris en bois de la Régence à la Révolution (1715-1789). Thèse de doctorat, Paris, 1969. Clamecy, Confrérie Saint-Nicolas de Clamecy.
- Merlin, P., Choay, C. (eds.). 2010. Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement. 3^e éd. [1^{ère} éd. 1988]. Paris : PUF.
- Morley, N.D.G. 1996. Metropolis and Hinterland. The city of Rome and the Italian economy, 200 B.C.-A.D. 200. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Musset, R. 1959. Le pétrole dans la Basse-Seine, *Annales de Géographie*. 68 (369), p. 409-423.
- Musset, R. 1962. Le pipe-line du Havre à Paris : son trafic, son doublement. *Annales de Géographie*, 71(385), p. 325.
- Newman, P. et J. Kenworthy. 1999. Sustainability and cities: Overcoming automobile dependence. Washington, DC: Island Press.
- Panier, I., Ratte, C. 2007. Le développement durable en Midi-Pyrénées : 46 indicateurs. Paris, INSEE.
- Pecllet, E. 1844. Traité de la chaleur, considérée dans ses applications. 3^{ème} édition. Liège, D. Avanzo et Cie Editeur.
- Smith, A., Watkiss, P., Tweddle, G., McKinnon, A., Browne, M., Hunt, A., Treleven, C., Nash, C., Cross, S. (2005). The Validity of Food Miles as an Indicator of Sustainable Development: Final report. DEFRA ED50254.
- Thieu, V., Billen, G., Garnier, J., Benoît, M. 2010. Nitrogen cycling in a hypothetical scenario of generalised organic agriculture in the Seine, Somme and Scheldt watersheds. *Regional Environmental Change*. 2010. DOI 10.1007/s10113-010-0142-4
- VandeWeghe, J. R. and C. Kennedy. 2007. A spatial analysis of residential greenhouse gas emissions in the Toronto census metropolitan area. *Journal of Industrial Ecology* 11(2): 133-144.
- Weisz, H., F. Krausmann, C. Amann, N. Eisenmenger, K.-H. Erb, K. Hubacek, and M. Fischer-Kowalski. 2006. The physical economy of the European Union: Cross-country comparison and determinants of material consumption. *Ecological Economics* 58(4): 676–698.
- Wolman, A. 1965. The Metabolism of Cities. *Scientific American* 213(3): 179–188, 190.
- WRAP, 2009. Household Food and Drink Waste in the UK. Final report. ISBN: 1-84405-430-6
- WRAP, 2009. The food we waste in Scotland. Final Report. ISBN: 1-84405-420-9