HAL
open science

Les empreintes environnementales de l'approvisionnement alimentaire : Paris, ses viandes et lait, XIXe-XXIe siècles

Petros Chatzimpiros

To cite this version:

Petros Chatzimpiros. Les empreintes environnementales de l'approvisionnement alimentaire : Paris, ses viandes et lait, XIXe-XXIe siècles. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paris-Est, 2011. Français. NNT : 2011PEST1135 . pastel-00834837

HAL Id: pastel-00834837

https://pastel.hal.science/pastel-00834837

Submitted on 17 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Paris-Est

THESE

de doctorat

Présentée par

Petros CHATZIMPIROS

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS-EST

Champ disciplinaire : *aménagement de l'espace et urbanisme*
Ecole doctorale : *Ville, Transports et Territoires*

Les Empreintes Environnementales de l'Approvisionnement Alimentaire :

Paris ses viandes et lait, XIXe – XXIe siècles

Sous la direction de Sabine BARLES

Soutenue publiquement le 24 juin 2011
Devant le jury composé de :

Mme. Sabine BARLES	Professeur des Universités, *directrice de thèse*
M. Francis BEAUCIRE	Professeur à l'Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, *examinateur*
M. Marc BENOÎT	Directeur de recherche à l'INRA, *rapporteur*
M. Gilles BILLEN	Directeur de recherche au CNRS, *examinateur*
M. Olivier COUTARD	Directeur de recherche au CNRS, *examinateur*
M. Suren ERKMAN	Professeur à l'UNIL, Lausanne, *rapporteur*

Remerciements

Ce travail est dédié à Viviane M.R.G.M.d-F dont la contribution et le soutien sont immesurables. Je tiens à remercier tout particulièrement mon fidèle relecteur Kimon H. pour son intérêt et ses conseils de A à Z. Merci encore à Sabine B. pour son aide précieuse avec la mise en forme et à Rémi Y. pour ses cartes en hectares. Et encore merci à Vincent N. de s'être aventuré dans la relecture.

Hommage à toutes les personnes qui ont investi d'une manière ou d'une autre dans l'aboutissement de cette thèse, tout particulièrement à Maria P. et Alexis C.

Résumé

Face aux changements globaux et aux défis du développement soutenable, l'approvisionnement alimentaire urbain doit à la fois être analysé à travers les processus qui le sous-tendent et quantifié en termes de mobilisation des ressources naturelles et d'émission des polluants dans l'environnement. On s'est intéressé dans le cadre de cette thèse à comprendre le mécanisme d'approvisionnement en viande et en lait frais de l'agglomération parisienne sur une période longue de deux siècles et à déterminer, produit par produit, l'*empreinte environnementale* de l'approvisionnement en termes d'emprise spatiale, de mobilisation d'eau et de flux d'azote entre les agro-systèmes et l'environnement au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. On a utilisé des données statistiques nationales et internationales de transport et de production agricole pour déterminer et suivre l'évolution de l'aire géographique d'approvisionnement, évaluer la fraction des subsistances régionales que réclame la capitale pour son approvisionnement, reconstituer à l'aide des modèles de rationnement et des tables d'alimentation les rations des animaux approvisionnant Paris, déterminer, en termes à la fois de biomasse, d'énergie et de protéines, le rendement en viande et en lait du fourrage aux différentes dates et enfin calculer, de manière spatialisée, l'étendue des terres agricoles (empreinte spatiale) et les flux d'azote et d'eau impliqués dans la production. L'empreinte hydrique a pour objectif de mesurer le volume des prélèvements d'eau (pluviale et d'irrigation) et le taux moyen de mobilisation des apports d'origine pluviale. L'empreinte azotée brute désigne le tonnage total d'azote mis en jeu dans la production, dont le partage entre la production d'aliments et les pertes environnementales dépend de la manière dont fonctionnent les agro-systèmes et caractérise la profondeur de l'empreinte urbaine. On propose ainsi d'élargir la notion d'équivalent habitant (Equ/Hab) classiquement considéré comme représentatif des émissions individuelles d'azote dans les eaux usées urbaines et de définir un *équivalent habitant amont* qui englobe en quelque sorte tous les rejets individuels d'azote en amont de la ville, relatifs à la production de la nourriture d'un citadin. Depuis le début du XIXe siècle, l'étendue de production par habitant s'est réduite d'un facteur six (pour une consommation de viande et de lait égale à environ 2 kg N/hab/an au début du XIXe siècle comme actuellement) – la réduction étant pour 30 % environ relative au doublement du rendement en viande et en lait du fourrage - mais l'intensité d'utilisation de l'eau et la profondeur de l'empreinte par hectare ont respectivement doublé et triplé. On estime qu'actuellement, 25 % des pertes d'azote - soit 2,0 kg N/hab/an ou 25 kg N/ha - proviennent des fumures laissées à l'abandon, faute de reconduction partielle à l'agriculture végétale. Étant donné que la somme des importations de viande bovine, porcine et de lait représente 25 % de l'apport protéique total dans l'alimentation du Parisien et sachant que la fraction végétale de l'alimentation est à priori caractérisée par moins de pertes d'azote que la fraction animale, on estime l'*'équivalent habitant amont* de l'ensemble de l'alimentation du Parisien, à environ 5 Equ/Hab.

Abstract

For the sake of sustainable development as a measure against global environmental change, urban consumption needs to be studied through the processes that underlie production and assessed in terms of resource use and pollutant emissions into the environment. This PhD thesis aims at understanding the mechanisms in supplying meat and milk to Paris over two hundred years and at measuring the land requirements, water withdrawals and nitrogen flows between agrosystems and the environment to supply each product in the early 19th, 20th and 21st centuries. We used agricultural and transport statistics from French and international data sources to locate the Paris hinterland at each date, quantify the urban food supply as a proportion of the regional potential for food production, model the diets of the livestock according to the animal productivity and to the feed availability in the regional and global markets at the dawn of each century, compute the nitrogen, energy and feed conversion efficiencies in the meat and milk production and, finally, assess the size of the Paris acreage (spatial imprint) and the nitrogen and water flows in support of the production. The water imprint accounts for the water withdrawals (irrigation and rainwater) in terms of volume and intensity. The N imprint measures on the one hand the total inputs of reactive nitrogen entering the agrosystems by N-source and the partitioning of these inputs between the food production and the environmental losses. The latter are referred to as "the depth" of the urban imprint which provides a measurement of the indirect contribution of urban areas to the alteration of the N cycle. When expressed in "per capita" terms (kg N/cap) the depth of the imprint shows the emissions of reactive nitrogen to supply the diet of one person as opposed to the direct individual N discharge in urban wastewater. When expressed in "per hectare" terms, it shows the intensity of the upstream urban N emissions and can be used as an tool for assessing urban sustainability beyond the city limits. Since the early 19th century, the land requirements for the "per capita" meat and milk consumption in Paris (equaling about 2 kg N/cap/year in both the early 19th and the early 21st centuries) reduced six-fold – with about 30 % of the reduction relating to the doubling of the nutrient conversion efficiencies in the secondary production – but the water use intensity and the "per hectare" depth of the imprint respectively doubled and tripled. We estimate that currently, about 25 % of the N losses - meaning 2.0 kg N/per/year or 25 kg N/ha – stem from abandoned manure. As the beef, pork and fresh milk imports to Paris currently account for about 25 % of the protein intake of the mean Parisian and given that animal production is *a priori* more wasteful that primary production, we estimate that the "per capita" emissions of N for providing the whole diet equal over 5 times the urban N discharges, meaning that a city's wastewater treatment plants handle less than 17 % of the total (direct and indirect) food related N emissions of a citizen.

Table des Matières

Remerciements ..... *i*

Résumé ..... *iii*

Abstract ..... *iii*

Table des Matières ..... *v*

Liste des Tableaux ..... *vii*

Liste des Figures ..... *ix*

Liste des Cartes ..... *xii*

Introduction *1*

Chapitre 1 : Evolution de la structure d'approvisionnement en viande et en lait de la capitale : quelques éléments historiques, XIXe - XXIe siècles. *25*

1.1. La filière « viande » **25**

1.2. La filière « lait » **35**

1.3. Conclusion **40**

Chapitre 2 : Démographie parisienne et consommation de viande et de lait, XIXe - XXIe siècles *41*

2.1. Préalable **41**

2.2. Evolution démographique de Paris, XIXe – XXIe siècles **42**

2.3. Consommation de viande de l'agglomération parisienne **49**

2.4. Consommation de lait de l'agglomération parisienne **69**

2.5. Conclusion **79**

Chapitre 3 : Géographie de l'approvisionnement parisien en viande et en lait et taux d'appropriation des subsistances régionales, XIXe - XXIe siècles. *81*

3.1. Généralités **81**

3.2. Données et méthodes de calcul **82**

3.2.1. Données sur les provenances des importations parisiennes. 82

3.3.2. Données sur la production totale du territoire. Comment comparer les importations au potentiel de production. 89

3.3. Géographie de l'approvisionnement en viande et en lait et taux d'appropriation du potentiel de production **97**

3.3.1 Début XIXe – début XXe siècle 97

3.3.2 Début XXIe siècle 122

3.4. Conclusion **131**

Chapitre 4 : Reconstitution des rations animales *133*

4.1. Généralités **133**

4.2 La notion des besoins **134**

4.3 Méthodes et données pour le calcul des besoins de production, XIXe – XXIe siècles **141**

4.3.1 Viande porcine 141
4.3.2 Viande et lait bovins 149

4.4 Disponibilité fourragère et reconstitution des rations, XIXe-XXIe siècles 160
4.4.1. Généralités 160
4.4.2 Evolution de la disponibilité fourragère, XIXe – XXIe siècles 161
4.4.3 Les rations animales XIXe – XXIe siècles 182

4.5 Conclusion 192

Chapitre 5 : L'empreinte spatiale de l'alimentation parisienne, XIXe -XXIe siècles 193

5.1 Généralités 193

5.2 Méthode de calcul de l'empreinte spatiale 194

5.3 Aliments d'importation et localisation de l'empreinte 199

5.3 L'empreinte spatiale de la consommation parisienne, XIXe – XXIe siècles. 213

5.4 Conclusion 226

Chapitre 6 : L'empreinte azote de l'approvisionnement parisien 228

6.1 Introduction 228

6.2 Les composantes de l'empreinte azote 229

6.3 Empreintes N brute et nette de l'approvisionnement parisien, XIXe – XXIe siècles233
6.3.1 Inputs d'azote dans les surfaces nourricières locales 233
6.3.2 Inputs d'azote dans les surfaces nourricières externes 246
6.3.3 Les empreintes brute et nette de l'approvisionnement parisien 246

6.4 Partage de l'Emp_N-nette locale en empreinte N utile et en profondeur de l'empreinte, XIXe – XXIe siècles 251
6.4.1 Les cheptels approvisionnant Paris comme fraction des cheptels régionaux 252
6.4.2 Calcul de l'azote exporté sous forme de fumure des exploitations d'élevage 254
6.4.3 Profondeur et Empreinte_N-utile de l'approvisionnement parisien, XIXe – XXIe siècles 261

6.5 Conclusion 276

Chapitre 7 : L'empreinte hydrique de l'approvisionnement parisien 277

7.1 Généralités 277

7.2 Méthodes et données 278
7.2.1 L'empreinte hydrique quantitative 278
7.2.2 L'empreinte hydrique qualitative 291

7.3 L'empreinte hydrique de l'approvisionnement parisien, XIXe – XXIe siècles 292

7.4. Conclusion 300

Conclusion générale et perspectives 302

Références Bibliographiques 313

Annexe I 333

Annexe II 334

Annexe III 335

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Croissance démographique mondiale et expansion des terres agricoles entre 1900 et 2000. Sources de données : Smil, 2000, U.S. Census Bureau, Population Division, 2011. 5
Tableau 2.1 : Poids nets de la viande pour les animaux importés à Paris, d'après la taxation de l'octroi (kg). Sources : Husson, 1856, Statistique agricole annuelle, 1885, 1906, 1931.....50
Tableau 2.2 : Consommation de la viande à Paris (kg/hab/an) et parts d'arrivages de la viande « à la main » entre 1801 et 1867. Moyennes décennales. Sources de données: Thomas, 1873, Husson, 1856, Philipp, 2004.....52
Tableau 2.3 : Consommation moyenne décennale de la viande par habitant de l'agglomération (viande bovine, porcine ovine confondues) et écart par rapport à la consommation de Paris intramuros. Sources de données : Thomas, 1873 et cette étude. 54
Tableau 2.4 : Consommation individuelle de la viande à Paris intramuros (kg/hab/an) et parts d'arrivages de la viande à la main au tournant du XXe siècle. Sources de données : Statistique agricole annuelle, 1885, 1892, 1908, 1924, Philipp, 2004. 57
Tableau 2.5 : Disponibilité de la viande par habitant au niveau national (kg/hab/an), moyennes triennales entre 1955 et 2008. Sources: Statistique agricole annuelle 1963-1965 et rétrospective 1930-1964, annuaires de statistiques agricoles, 1972, 1976, 1986, Agreste, 2010.....63
Tableau 2.6 : Consommation de lait frais par habitant et par l'agglomération parisienne et distance maximale de l'approvisionnement entre 1801 et 1936. Sources : Dubuc (1938), Billé (1930), Huard (1939). [1]Estimation. 71
*Tableau 2.7 : Consommation de lait dans l'agglomération parisienne et production du département de la Seine, 1950-2007. Sources : Statistique agricole annuelle, 1950-2007, Agreste, 2010, INSEE, 1999, 2004. [1]y compris du yaourt, [2]estimations à partir des données sur les années avoisinantes : 8,5*10^3 m^3 en 1957, 3,45*10^3 m^3 en 1971, 1,58*103 m^3 en 1979, 0,76*103 m^3 en 1985). 77*
Tableau 3.1 : Production nationale de viande par habitant et par an, nombre d'abattages, nombres des effectifs d'animaux, rapport entre les abattages et les existences par espèce et par date. Sources de données : Block, 1858, Statistique agricole annuelle, 1882, 1885, 2006, Ministère de l'agriculture, 1897.....94
Tableau 3.2 : Production de viande de porc et exportation vers Paris par groupement de départements concourant à l'approvisionnement en 1885 (kg de carcasse/habitant local). Source de données : Statistique agricole annuelle, 1886. 118
Tableau 3.3 : Importations françaises de viande bovine et porcine (tonnes et %) par pays de provenance au début du XXIe siècle. Sources : FAOSTAT, 2004, Agreste, 2004, 2009. 131
Tableau 4.1 : Composition chimique et contenu énergétique (Energie brute - EB) de la biomasse d'un porc de 110 kg. Sources : Lange et al., 2003, NRC, 1998.....142
Tableau 4.2 : Besoins en énergie et en protéines et durée d'engraissement des porcs à GQM de 600 g/jour. Voir dans le texte pour plus de détail. Source : NRC, 1998 et estimations.....144
Tableau 4.3 : Besoins en énergie métabolisable (EM) et en protéines et durée d'engraissement des porcs à GQM de 300 g/jour. Source : Cette étude à partir des données de NRC, 1998 144
Tableau 4.4 : Besoins et teneurs en énergie et en protéines d'un porc de 110 kg aux XIXe et XXI siècles et efficacité de conversion de protéines végétales en protéines animales (NCE). Sources : Nos calculs à partir de données diverses (voir dans le texte).....145
Tableau 4.5 : Nombre des porcs de 110 kg importés à Paris par lieu de provenance au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Pour le début du XXe siècle, les importations comptabilisées s'élèvent à 98 % des importations totales. Sources : Voir chapitre 3 et dans le texte.....148
Tableau 4.6 : Tonnage des importations parisiennes, rendements moyens en lait et poids vif des vaches par région administrative d'approvisionnement en trois dates : milieux XIXe, début XXe et début XXIe siècles. Lactation sur 305 jours. Compilation de plusieurs sources : Cette étude (voir chapitre 2), Dubuc, 1938, Ministère de l'agriculture, 1897, Statistique agricole annuelle, 2006 et estimations.....153
Tableau 4.7 : Composition chimique et contenu énergétique du lait. Sources : CVNA, 2006...154
Tableau 4.8 : Composition chimique et énergétique de la carcasse bovine. Sources : NRC, 2000, Wulf, 1999, Hoch et Agabriel, 2004.....157
Tableau 4.9 : Poids vifs d'abattage, gain moyen quotidien (GMQ) et provenances des importations parisiennes de viande bovine aux débuts des XIXe, XXe et XXIe siècles.

Compilation des plusieurs sources : Cette étude (cf. chapitre 3), Statistique agricole annuelle, 1906, 2008, Moreau de Jonnès, 1848, Moriceau, 2005, FAOSTAT, 2004. ..... *159*
Tableau 4.10 : Teneurs typiques en matière sèche (MS), en énergie brute (EB), en énergie métabolisable (EM, spécifiques aux porcs) et en protéines (CP) du foin, des légumineuses, de l'orge, du lait, du son de blé et des pommes de terre, aliments des rations bovines et porcines, au cours de la première moitié du XIXe siècle. Source : NRC, 1998, ITAB, 2001, NRC, 2000, 2001, Gerbens-Leenes et Nonhebel, 2004. Voir dans le texte pour plus de détails. *167*
Tableau 4.11 : Valeurs typiques de teneur en MS, en énergie brute (EB), en énergie métabolisable (EM – spécifiques aux porcs) et en protéines (CP) des matières fourragères utilisées dans l'alimentation des bovins et des porcs approvisionnant Paris au début du XXe siècle. Sources : NRC, 1998, 2000, ITAB, 2001, Gerbens-Leenes et Nonhebel, 2004. ..... *173*
Tableau 4.12 : Teneurs en matière sèche (MS), en énergie brute (EB), en énergie métabolisable (EM – spécifiques aux porcs) et en protéines (CP) des aliments utilisés actuellement dans l'alimentation des bovins et des porcs en France. Sources : ITAP, 2001, NRC, 1998, NRC, 2001, Gerbens-Leenes et Nonhebel, 2004. ..... *181*
Tableau 4.13 : FCR et indices d'évolution de la productivité des secteurs bovins, porcins et laitiers aux XIXe, XXe et XXIe siècle. Moyennes pondérées parmi les régions assurant l'approvisionnement parisien. Source : Cette étude *190*
Tableau 4.14 : Efficacités de conversion des protéines (NCE) et de l'énergie (ECE) des rations animales en protéines et en énergie de viande bovine, porcine et de lait au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Source : Cette étude. *191*
Tableau 5.1 : P_f et V_f des sous-produits de transformation des rations animales. Sources : FAO, 2003 et cette étude. *197*
Tableau 5.2 : Répartition en termes d'origines et rendement culturaux correspondants (tonnes de MS/ha) aux importations françaises de soja en 2004. Source : FAOSTAT, 2004. ..... *203*
Tableau 5.3 : Solde et rapport en pourcentage des importations et des exportations françaises de colza (y compris des graines et du tourteau, le tout étant exprimé en équivalent graines) par pays d'origine et de destination. Source : FAOSTAT, 2004. ..... *204*
Tableau 5.4 : Répartition de l'empreinte parisienne relative au colza et rendements culturaux moyen pour les six premières régions de production (assurant ~75 % de la production nationale). Source : Agreste, 2004. Voir dans le texte pour des détails. *206*
Tableau 5.5 : Densités recensées et soutenables des porcs par région française et taux d'autonomie en céréales des exploitations. Source : Agreste, 2007a et cette étude. *208*
Tableau 5.6 : Répartition de l'empreinte parisienne dans les régions céréalières principales. Source : Cette étude. *209*
Tableau 5.7 : Partage de l'alimentation animale (tonnage de N) au début du XXIe siècle par type d'élevage approvisionnant Paris et par domaine de spécialisation dans la production fourragère. Source : Cette étude *210*
Tableau 5.8 : Répartition des besoins en protéines par unité des protéines importées Paris sous forme de viande et de lait. Source : Cette étude. *211*
Tableau 5.9 : Importations parisiennes de viande bovine, porcine et de lait et empreintes spatiales correspondantes, XIXe- XXIe siècles. Sources : Cette étude. *214*
Tableau 5.10 : Rapport des superficies urbaines et extra-urbaines de l'agglomération parisienne pour son ravitaillement en viandes et en lait et emprise au sol par habitant. Source : Merlin, 1967, IAURIF, 2005, et cette étude. *215*
Tableau 5.11 : Empreinte spatiale au début du XXIe siècle, par domaine de spécialisation dans la production fourragère. Source : Cette étude *224*
Tableau 6.1 : Rendement en azote de la luzerne (kg N/ha) au début des XXe et XXIe siècles. Sources : Statistiques agricoles annuelles, 1908, 2004. ..... *236*
Tableau 6.2 : Taux de fixation biologique par culture et par date pour les fourrages des rations animales. Source : Estimations d'après les valeurs de BNF citées dans Smil (1999) et Herridge et Peoples (2008) et les rendements agricoles aux trois dates. *238*
Tableau 6.3 : Bilans d'azote et NUE pour les principales cultures produites au sein des exploitations d'élevage en 2006, d'après les données de l'enquête agricole et les valeurs retenues pour la BNF et la fertilisation organique. (*) = valeurs déduites par extrapolation, car cultures non interrogées. Sources : Voir dans le texte. *239*
Tableau 6.4 : Équivalences en termes d'unité gros bétail (UGB) entre les cheptels français au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Equivalences établies par rapports aux vaches laitières

actuelles sur la base des déjections annuelles d'azote par catégorie animale. Lecture du tableau : 1 UGB = 1 vache laitière actuelle = 6,1 porcs au XIXe siècle etc. Source : Cette étude et Vilain et al., 2008, Agreste, 2007b. 254
Tableau 6.5 : Superficie totale recevant de la fumure organique (10^3 ha) par région française et répartition, en termes d'UGB des cheptels régionaux. Source : Statistique agricole annuelle (2006, 2007), Agreste (2008d) et cette étude. Voir dans le texte pour plus de détails. 256
Tableau 6.6 : Superficies agricoles fumées à raison de 170 kg N/ha par les animaux approvisionnant Paris en viande bovine, porcine et en lait au début du XXIe siècle. Source : Cette étude. 259
Tableau 7.1: Valeurs de Kc par stage végétatif des principales cultures utilisées dans cette étude. Source : Allen et al., 1998. 282
Tableau 7.2 : Transpiration d'eau par unité de production de biomasse (lt/kg MS) de six cultures hypothétiques (H-cultures). Source : Gerbens-Leenes et Nonhebel, 2004. 284
Tableau 7.3: EW par produit (m3/kg N) et empreinte hydrique de l'approvisionnement en viande bovine, porcine et en lait au début des XIXe, XXe et XXIe siècles, par habitant (m^3/hab) et pour l'ensemble de l'agglomération parisienne (10^6 m^3). Source : Cette étude. 293
Tableau 7.4 : Rapport entre la consommation directe et indirecte d'eau de l'agglomération parisienne pour son alimentation respectivement en eau potable et en viande bovine, porcine et en lait, XIXe – XXIe siècles. Source : Cette étude et Barles 2002, 2006. 294
Tableau 7.5 : Taux moyen agrégé d'utilisation de la pluie effective pour approvisionner Paris au début des XIXe, XXe, XXIe siècles. Source : Cette étude. 297
Tableau 7.6 : Durées moyennes pondérées (jours) de production des rations animales par date et par produit. Source : Cette étude. 299
Tableau 7.7: ETo moyennes par produit et par date, pondérées par l'empreinte spatiale de l'approvisionnement. Source : Cette étude. 299
Tableau C.1 : Importations annuelles d'azote par habitant sous forme de viande bovine, porcine et de lait frais au début des XIXe, XXe et XXIe siècles et répartition par produit. 303

Liste des Figures

Figure I.1 : Densité de population soutenable selon le mode de subsistance alimentaire. Source : Smil, 2008. 3
Figure I.2 : Input d'azote réactif d'origine humaine dans la biosphère par source d'introduction (millions de tonnes = 10^{12} g N = Tg). « Natural range » correspond à la fourchette d'inputs d'origine naturelle à l'échelle mondiale. Source : Cowling and Galloway, 2002. 8
Figure I.3 : Evolution à l'échelle mondiale des prélèvements totaux d'eau, de l'étendue irriguée et de la capacité maximale de stockage d'eau des réservoirs artificiels, 1900-2000. Sources : Croquis retracé à partir de Jackson et al, 2001, Vorosmarty et Sahagian, 2000. 11
Figure I.4 : Population mondiale urbaine, rurale et totale, 1800 – 2010. Sources : United Nation Population Division, 2006 entre 1950 et 2010, Goldewijk et al, 2010 pour 1800 et 1900. 12
Figure I.5 : Population urbaine, rurale et totale en France, 1800 – 2010. Sources : Compilation des données : Tugault, 1974 (1811-1926) et INSEE, 2000 (1936 – 2006). 13
Figure 2.1 : Evolution de la population de Paris, de l'agglomération et du département de la Seine entre 1801 et 2004 (voir dans le texte pour plus de précisions). Source des données : Recensements de la population, Dupeux, 1981. 49
Figure 2.2 : Consommation par habitant kg/hab/an (toute viande confondue). Source, Thomas, 1873, Husson, 1856. 53
Figure 2.3 : Déclin des apports de viande assurés par la structure traditionnelle de l'approvisionnement de Paris (kg/hab). Source des données : Statistique agricoles Annuelles, 1920-1971. 60
Figure 2.4 : Consommation de viande bovine, ovine et porcine par habitant de l'agglomération entre 1801 et 2008 (kg/hab). Sources de données : voir dans le texte. 65
Figure 2.5 : Importations de viande bovine, ovine et porcine de l'agglomération parisienne entre 1801 et 2008. Sources de données : voir dans le texte. 65
Figure 2.6 : Fluctuation mensuelle (de janvier - à décembre) de la consommation laitière de l'agglomération parisienne vers la fin des années 1930. Source de données : Huard, 1939. 72

Figure 2.7 : Évolution contrastée des rendements laitiers entre le département de la Seine et la moyenne nationale, XIXe – XXe siècles. Sources de données : Ministère de l'agriculture 1892, Statistique agricole annuelle, 1930, 1957-1985, 1989-1995. ..... *74*
Figure 2.8 : Consommation de lait par habitant de l'agglomération parisienne : 1801-2007. Sources : Dubuc, 1938, INSEE, 1990, 2004 et voir dans le texte. *78*
Figure 2.9 : Consommatino de lait de l'agglomération parisienne : 1801-2007. Sources de données : Dubuc, 1938, INSEE, 1990, 2004. ..... *79*
Figure 3.1 : Nombre des départements concourant à l'approvisionnement parisien en viande bovine et tonnage des importations (milliers de tonnes) entre 1812 et 1850. Source de données : Relevés des marchés de Sceaux et de Poissy dans Philipp (2004). *100*
Figure 3.2 : Production de viande bovine et exportation vers Paris par département concourant à l'approvisionnement en 1839 (kg de carcasse/habitant local). Sources de données : Block (1858), Relevés des marchés de Sceaux et de Poissy dans Philipp (2004) et cette étude. *102*
Figure 3.3 : Production de viande bovine et exportation vers Paris par département concourant à l'approvisionnement en 1906 (kg de carcasse/ habitant local). Sources de données : Statistique agricole annuelle, 1906 et cette étude. *113*
Figure 3.4 : Production de viande de porc et exportation vers Paris par département concourant à l'approvisionnement en 1885 (kg de carcasse/habitant local). Source de données : Statistique agricole annuelle, 1886 et cette étude. *116*
Figure 3.5 : Part des importations parisiennes de lait dans la production laitière des départements d'approvisionnement. Source de donnés : SitraM, 2006, Statistique agricole annuelle, 2006. ..... *123*
Figure 3.6 : Importations parisiennes de laits liquides (millions de tonnes) par lieu de provenance de premier et de deuxième ordre. Voir dans le texte pour plus de détails. Source de données : SitraM 2006. ..... *124*
Figure 3.7 : Concentration spatial du cheptel porcin en France entre 1852 et 2004. Sources de données : Block, 1858, Statistiques agricoles annuelles, 1908, 1964, Agreste, 1989, 2004. ..... *127*
Figure 3.8 : Concentration spatial du cheptel bovin en France entre 1839 et 2004. Sources de données : Block, 1858, Statistiques agricoles annuelles, 1908, 1964, Agreste, 1989, 2004. ..... *128*
Figure 4.1 : Systèmes de mesure de l'énergie dans l'alimentation animale. D'après NRC, 2001. ..... *136*
Figure 4.2 : Schéma d'allocation des ressources fourragères dans l'élevage des porcs. *141*
Figure 4.3 : Rapport des surfaces et de la production totale entre les quatre types d'herbages au soutien de l'élevage dans la première moitié du XIXe siècle. Source : Moreau de Jonnès, 1848. ..... *164*
Figure 4.4 : Superficies des prairies naturelles, prairies artificielles, fourrages annuels et pâture-pâtis au milieu du XIXe et au début du XXe siècle. Millions d'hectares. Sources : Moreau de Jonnès, 1848, Statistique agricole Annuelle, 1908. ..... *168*
Figure 4.5 : Production (MS) des prairies naturelles, prairies artificielles, fourrages annuels et pâture-pâtis au milieu du XIXe et au début du XXe siècle. Millions des tonnes. Sources : Moreau de Jonnès, 1848, Statistique agricole Annuelle, 1908. ..... *169*
Figure 4.6 : Production des prairies artificielles, des prairies temporaires-permanentes et du mais fourrager au milieu du XXe et au début du XXIe siècle. Tonnes de matière sèche (MS). Source : Ministère de l'agriculture, 1966, Agreste, 2004 ..... *175*
Figure 4.7 : Rendements annuels en grain des principales céréales cultivées en France depuis le début des années 1860. Source : Agreste, 2008a. *177*
Figure 4.8 : Tonnage de production d'aliments composés en France, 1948-2006. Sources : Ministère de l'agriculture, 1966, Diry, 1979, Agreste, 2008c. *178*
Figure 4.9 : Part des matières premières utilisées dans la fabrication d'aliments composés en France, 1973-2006. D'après : Agreste, 2008c. *180*
Figure 4.10 : Composition et FCR des rations relatives à la production du lait par région principale d'approvisionnement parisien au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Source : Cette étude. *183*
Figure 4.11 : Composition et FCR des rations relatives à la production de la viande bovine par région d'approvisionnement parisien au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Source : Cette étude. *184*

Figure 4.12 : Composition et FCR des rations relatives à la production de la viande porcine par région d'approvisionnement parisien au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Source : Cette étude. *185*
Figure 4.13 : Répartition de l'apport en protéines des rations par catégorie fourragère et par date moyennée parmi les régions d'approvisionnement. Source : Cette étude. *189*
Figure 5.1 : Circuit d'approvisionnement de la France en soja. Importations nettes exprimées en kilotonnes (kt) équivalent tourteau. Source des données : FAOSTAT, 2004. ..... *202*
Figure 5.2 : Exportations et importations françaises de colza sous forme respectivement de graines et de tourteaux. D'après : FAOSTAT, 2004. Voir dans le texte pour les détails. *205*
Figure 5.3 : Part des protéines locales (produites au sein des exploitations d'élevage) et importées pour la production de la viande porcine au début du XXIe siècle par région française d'élevage (% N). Source : Cette étude *212*
Figure 5.4 : Part des protéines locales (produites au sein des exploitations d'élevage) et importées pour la production laitière au début du XXIe siècle par région française d'élevage (% N). Source : Cette étude *212*
Figure 5.5 : Part des protéines locales (produites au sein des exploitations d'élevage) et importées pour la production de la viande bovine au début du XXIe siècle par région française d'élevage (% N). Source : Cette étude *213*
Figure 6.1 : Schéma générique des flux d'azote relatifs à l'approvisionnement parisien. Source : Cette étude. *229*
Figure 6.2 : Schématisation des composantes des empreintes azote de l'approvisionnement parisien. Source : Cette étude. *231*
Figure 6.3 : Input d'azote dans les exploitations d'élevage approvisionnant Paris au début du XXIe siècle par source d'introduction et par région d'élevage. Moyennes pondérées pour la viande bovine, porcine et le lait. Source : Cette étude. *242*
Figure 6.4 : Input d'azote dans les exploitations d'élevage approvisionnant Paris en viande bovine au début du XXIe siècle par source d'introduction et par région d'élevage. Source : Cette étude. *243*
Figure 6.5 : Input d'azote dans les exploitations d'élevage approvisionnant Paris en viande porcine au début du XXIe siècle par source d'introduction et par région d'élevage. Source : Cette étude. *244*
Figure 6.6 : Input d'azote dans les exploitations d'élevage approvisionnant Paris en lait au début du XXIe siècle par source d'introduction et par région d'élevage. Source : Cette étude. *245*
Figure 6.7 : Empreinte azote brute (Emp_N-brute) et nette (Emp_N-nette) de l'approvisionnement parisien de viande bovine aux XIXe, XXe, XXIe siècles, exprimée par rapport aux importations (kg N/ kg N_Imp), à la population (kg N/hab) et à la surface productrice totale (kg N/ha). Source : Cette étude. *247*
Figure 6.8 : Empreinte azote brute (Emp_N-brute) et nette (Emp_N-nette) de l'approvisionnement parisien de viande porcine aux XIXe, XXe, XXIe siècles, exprimée par rapport aux importations (kg N/ kg N_Imp), à la population (kg N/hab) et à la surface productrice totale (kg N/ha). Source : Cette étude. *247*
Figure 6.9 : Empreinte azote brute (Emp_N-brute) et nette (Emp_N-nette) de l'approvisionnement parisien en lait aux XIXe, XXe, XXIe siècles, exprimée par rapport aux importations (kg N/ kg N_Imp), à la population (kg N/hab) et à la surface productrice totale (kg N/ha). Source : Cette étude. *248*
Figure 6.10 : Empreinte azote brute (Emp_N-brute) et nette (Emp_N-nette) de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait ensemble aux XIXe, XXe, XXIe siècles, exprimée par rapport aux importations (kg N/ kg N_Imp), à la population (kg N/hab) et à la surface productrice totale (kg N/ha). Source : Cette étude. *248*
Figure 6.11 : Empreinte N nette (Emp_N-nette) de l'approvisionnement en viande bovine, porcine, en lait et pour les trois produits ensemble au début du XXIe siècle, par hectare de surface nourricière locale et externe. *251*
Figure 6.12 : Empreinte N utile (Emp_N-utile) et profondeur de l'empreinte de l'approvisionnement parisien (viande bovine, porcine et lait confondus) au début des XIXe, XXe et XXIe siècles par région d'approvisionnement, kg N/ha. Source : Cette étude. *262*
Figure 6.13 : Emp_N-utile, profondeur_fourrages et profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien en viande bovine, par région d'élevage au début du XXIe siècle. Source : Cette étude. *266*

Figure 6.14 : Emp_N-utile, profondeur_fourrages et profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien en viande porcine, par région d'élevage au début du XXIe siècle. Source : Cette étude. *267*
Figure 6.15 : Emp_N-utile, profondeur_fourrages et profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien en lait par région d'élevage au début du XXIe siècle. Source : Cette étude. *268*
Figure 6.16 : Emp_N-utile, profondeur_fourrages et profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien en viande bovine et en lait ensemble, par région. Source : Cette étude. *269*
Figure 6.17 : Emp_N-utile, profondeur_fourrages et profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait ensemble par région d'élevage au début du XXIe siècle. Source : Cette étude. *270*
Figure 6.18 : Récapitulation de l'empreinte par habitant au début du XXIe siècle. Flux d'azote (kg N), étendue de production (ha) et superficie fumée externe aux exploitations d'élevage (ha) pour l'approvisionnement en viande bovine, porcine et en lait. Source : Cette étude. *274*
Figure 7.1: Schéma indicatif des coefficients culturaux K_c par stade végétatif. Source : www.fao.org. *282*
Figure 7.2 : Répartition de l'empreinte hydrique et spatiale de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait par région française. Source : Cette étude. *295*
Figure 7.3 : Volumes d'eau d'irrigation par région française de production des fourrages. Source : Cette étude. *296*
Figure 7.4 : Taux agrégé d'utilisation de la pluie effective au sein des exploitations d'élevage et pour la production d'aliments composés par région administrative française au début du XXIe siècle. Source : Cette étude. *298*
Figure 7.5 : Augmentation de l'intensité des prélèvements par rapport au début du XIXe siècle pour la production des rations animales approvisionnant Paris. Source : Cette étude. *300*
Figure C.1 : Récapitulation de l'empreinte de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait au début du XIXe siècle : flux annuels d'azote (kg N), d'eau (mm) et étendue de production (ha) par habitant de l'agglomération. Source : Cette étude *306*
Figure C.2 : Récapitulation de l'empreinte de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait au début du XXe siècle : flux annuels d'azote (kg N), d'eau (mm) et étendue de production (ha) par habitant de l'agglomération. Source : Cette étude. *306*
Figure C.3 : Récapitulation de l'empreinte de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait au début du XXIe siècle : flux annuels d'azote (kg N), d'eau (mm) et étendue de production (ha) par habitant de l'agglomération. Source : Cette étude. *307*

Liste des Cartes

Carte 2.1 : Etat d'urbanisation du département de la Seine en 1906. Source : Pinon, 2004. ..... *44*
Carte 3.1 : Importations parisiennes de viande bovine (tonnes de carcasse) par lieu de provenance en 1812. Source : Relevés des marchés aux bestiaux de Sceaux et de Poissy dans Philipp (2004). *98*
Carte 3.2 : Importations parisiennes de viande bovine (tonnes de carcasse) par lieu de provenance en 1850. Source des données : Relevés des marchés aux bestiaux de Sceaux et de Poissy, dans Philipp (2004). *104*
Carte 3.3 : Géographie des marchés approvisionnant Paris en viande de boucherie et de porc à partir de 1802. Source : Philipp, 2004. ..... *106*
Carte 3.4: Aire géographique de l'approvisionnement parisien en porcs au début du XIXe siècle. *107*
Carte 3.5 : Répartition du cheptel porcin dans l'aire principale d'approvisionnement de Paris en porcs en 1852. Sources de données : Husson (1856), Block (1858). *108*
Carte 3.6 : Importations parisiennes de viande bovine (tonnes de carcasse) par lieu de provenance en 1885. Source de données : Statistique agricole annuelle (1886) *110*
Carte 3.7 : Importations parisiennes de viande bovine (tonnes de carcasse) par lieu de provenance en 1906. Source de données : Statistique agricole annuelle, 1906. ..... *111*

Carte 3.8 : Importations parisiennes de viande porcine (tonnes de carcasse) par lieu de provenance en 1885 et répartition du cheptel porcin (%) par département français à la même date. Source de données : Statistique agricole annuelle, 1886. ..... *115*
Carte 3.9 : Importations de lait et de porcs (tonnage de produit) par lieu de provenance en 1906. Source de données : Statistique agricole annuelle, 1906, Dubuc, 1938. ..... *120*
Carte 3.10 : Le bassin laitier de Paris en 1936. Source : Dubuc, 1938. ..... *121*
Carte 3.11 : Importations parisiennes de lait en 2006 (tonnes) par lieu de provenance de premier ordre. Le tonnage minimal de deuxième ordre n'y apparaît pas. Sources de données : SitraM, 2006, Statistique agricole annuelle, 2006. ..... *125*
Carte 3.12 : Répartition géographique des importations parisiennes de viande bovine (rouge) et porcine (violet) en 2006 au prorata des productions régionales. Source de données, Statistique agricole annuelle, 2006. ..... *130*
Carte 5.1 : L'empreinte spatiale (ha) de l'approvisionnement parisien de viande bovine au début du XXIe siècle par type de fourrage utilisé pour l'élevage. Source : Cette étude. *220*
Carte 5.2 : L'empreinte spatiale (ha) de l'approvisionnement parisien de viande porcine au début du XXIe siècle, par type de fourrage utilisé pour l'élevage. Source : Cette étude. *221*
Carte 5.3 : L'empreinte spatiale (ha) de l'approvisionnement parisien en lait au début du XXIe siècle, par type de fourrage utilisé pour l'élevage. Source : Cette étude *222*

Introduction

Le terme Anthropocène a récemment été proposé comme qualificatif de la période en cours depuis la fin du XVIIIe siècle, caractérisée par des altérations d'origine humaine de la structure et du fonctionnement biophysique du système terrestre à l'échelle planétaire (Crutzen, 2002). Résultant majoritairement de l'altération des cycles biogéochimiques globaux de carbone, d'azote et d'eau, l'influence des activités humaines porte à la fois sur le climat, la biodiversité et la structure des écosystèmes et conduit à des changements globaux irréversibles ou susceptibles de persister sur plusieurs millénaires (McNeill, 2001, Hansen et al., 2005, Steffen et al., 2007).

L'Anthropocène fait partie de l'ère géologique de l'Holocène qui englobe l'époque postglaciaire des derniers dix à douze milliers d'années, caractérisée par l'élévation d'origine non-anthropique des concentrations atmosphériques de CO_2, des températures moyennes, et par la naissance, vers le début de l'Holocène, de l'agriculture qui représente un mode de subsistance inédit dans l'histoire naturelle. La production des subsistances et les pratiques qui l'accompagnent se sont progressivement substituées au mode de vie, non-sédentaire, des groupements de chasseurs-cueilleurs qui, comme toute autre espèce animale, dépendaient de la productivité des écosystèmes naturels. Accordant un pouvoir considérable aux sociétés qui l'adoptaient, l'agriculture a longtemps constitué un facteur déterminant du rapport de force entre différents groupes de populations (Diamond, 1997) et a constitué l'instrument de la domination humaine sur la nature : l'homme transforme les écosystèmes naturels en agro-systèmes abritant les espèces de son choix et entre en compétition directe avec toutes les autres espèces végétales et les animaux qui dépendent de celles-ci pour leur alimentation et leur habitat.

Le pouvoir de l'agriculture réside dans le contrôle qu'elle induit sur la production primaire des écosystèmes (Vitousek et al., 1986). Par unité de surface cultivée, plus de 90 % de la biomasse produite est potentiellement métabolisable par les hommes et le bétail contre environ 0,1 % par unité de surface d'écosystème naturel (Diamond, 1997). L'essor de la production agricole est tel qu'à la fin du XXe siècle, l'homme et

son bétail étaient estimés représenter environ 97 % de la biomasse de l'ensemble des vertébrés terrestres (Smil, 1992).

L'agriculture permet de dégager des surplus alimentaires suffisants pour nourrir, à plein temps, des populations non-agricoles et constitue l'une des conditions de possibilité de la diversification des activités sociales et de l'accélération des changements techniques et culturels. La taille des populations pouvant être libérées de la quête alimentaire dépend de la productivité agricole : plus il y a de calories dégagées par hectare cultivé et plus les populations sont susceptibles d'être denses et le potentiel de transformations sociales et environnementales élevé. La figure I.1 montre d'après Smil (2008) des fourchettes de densités des populations soutenables par mode de subsistance alimentaire. « Foraging » et « pastoralism » correspondent à des modes de subsistance itinérants, le premier se limitant à la chasse et à la cueillette tandis que le deuxième prend également appui sur l'élevage de troupeaux et de cheptels partiellement ou entièrement domestiqués, nourris dans des écosystèmes naturels. De l'autre côté, « shifting », « traditional » et « modern » farming correspondent à des modes de production caractéristiques des sociétés sédentaires, prenant appui sur des cultures sélectionnées sur la base des critères nutritionnels, permettant à la fois la constitution des stocks alimentaires et l'accumulation de la propriété foncière et matérielle.

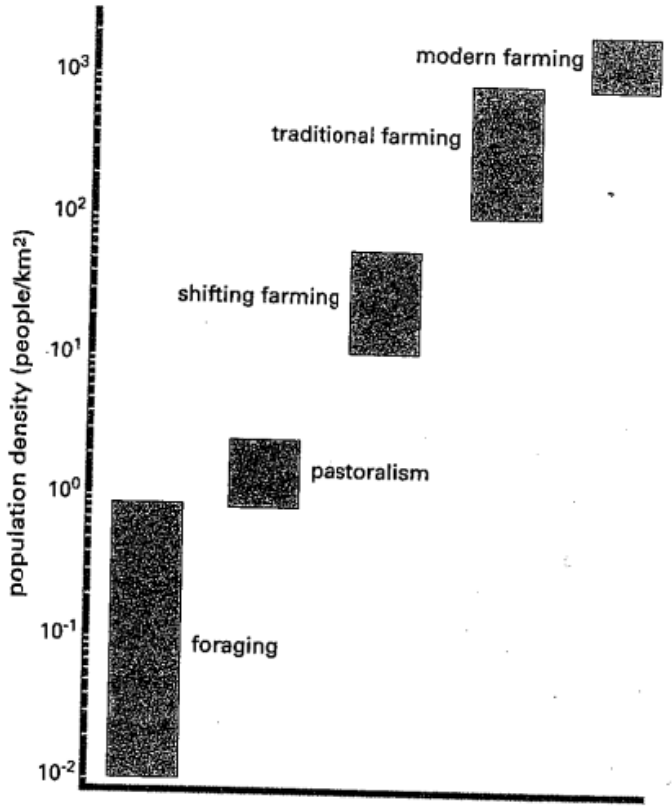


Figure I.1 : Densité de population soutenable selon le mode de subsistance alimentaire.
Source : Smil, 2008.

Les écarts de densités entre d'un côté les trois modes d'exploitation agricole (shifting, traditional et modern farming) et de l'autre les modes de subsistance non-agricoles (foraging, pastoralism) sont énormes et s'expliquent à la fois par des écarts nets de productivité (tonnes de biomasse produite par unité de surface) et par le fait que dans les systèmes non-agricoles, la part métabolisable de la production primaire n'est pas réservée à la consommation humaine mais se partage entre les différentes espèces animales en présence. En revanche, les écarts de près de deux ordres de grandeur entre l'agriculture itinérante sur brûlis (shifting farming) et l'agriculture industrielle (modern farming) sont dus à des différences de productivité, liées notamment aux différents niveaux d'intrants, tels les nutriments, l'eau et l'énergie associée au labour, qui déterminent, pour une culture et un climat donné, l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en biomasse végétale.

La transition entre l'agriculture itinérante et industrielle est loin d'avoir suivi un cours linéaire (Mazoyer et Roudart, 1998). Elle a dans sa première forme persisté sur

plusieurs millénaires avant d'évoluer vers le moyen-âge (du moins en Europe) en une agriculture basée sur l'assolement triennal et la polyculture-élevage avec ou sans jachère (Mazoyer et Roudart, 1998, Billen et al., 2009). Ensuite, le système de production fondé sur la complémentarité entre l'agriculture et l'élevage a dominé le paysage agricole jusqu'à l'arrivée, dans la première moitié du XXe siècle, des engrais de synthèse qui ont permis la simplification radicale du fonctionnement biogéochimique de l'agriculture (Smil, 2008, Billen et al, 2009). La temporalité des changements est inhérente à l'histoire des civilisations et indéniablement influencée par les transitions énergétiques en termes de sources et de disponibilité au sein des sociétés. L'utilisation par exemple, à partir notamment de la fin du XIXe siècle, de l'énergie stockée dans le carbone fossile, équivalente à plusieurs millénaires de photosynthèse, a permis de lever les contraintes énergétiques des sociétés préindustrielles qui s'alimentaient en énergie sous forme de biomasse végétale, de bois de chauffe et d'énergies hydraulique et éolienne, toutes correspondant à des transformations immédiates - ou presque - de l'énergie solaire et présentes de façon discontinue dans le temps et dans l'espace, sous réserve de concordance des facteurs climatiques, météorologiques et géomorphologiques favorables, en quantités relativement limitées et parfois difficilement mobilisables. Leur disponibilité était contrainte par des difficultés de récupération (antérieurement à la multiplication des barrages hydrauliques et des éoliennes, produits à l'aide des énergies fossiles et d'une économie mondialisée, le potentiel énergétique des fluides était très peu exploité) et soumise aux inefficacités biologiques inhérentes au processus de production de la biomasse : la valeur énergétique de la biomasse végétale varie typiquement entre 0,1 et 1 % de l'énergie solaire réceptionnée par les plantes ; si ces plantes sont par ailleurs utilisées comme fourrages, l'énergie mise à disposition sous forme de viande, de lait ou de travail animal représente de l'ordre de 10 % de l'énergie ingérée, soit un rendement total compris *grosso modo* entre 0,1 et 1 ‰ (Odum, 1953, Smil, 2008).

Pourtant, que l'on considère les systèmes agraires traditionnels et extensifs ou l'agriculture industrielle et intensive, la comptabilité énergétique n'est pas une grille d'analyse pertinente des impacts environnementaux, relatifs notamment aux transformations écosystèmiques et à l'altération des grands cycles biogéochimiques

qui assurent la production. L'expansion des terres agricoles au détriment des écosystèmes naturels constitue le moteur principal de dégradation environnementale dans le cas des systèmes extensifs tandis que la perturbation des grands cycles biogéochimiques représente le fardeau environnemental principal de l'agriculture industrielle du XXe et début de XXIe siècle. Sans particulièrement alourdir le bilan énergétique des sociétés, cette agriculture a conduit à soutenir, à travers l'élévation des rendements culturaux, deux phases distinctes de croissance exponentielle de la démographie humaine depuis l'aube du XXe siècle, tout en réduisant le rythme d'expansion de l'étendue de production. Le tableau I.1 montre la croissance démographique mondiale et l'expansion des terres cultivées entre 1900 et 2000 avec un découpage en sous-périodes caractérisées par des taux de croissance différents.

Tableau I.1 : Croissance démographique mondiale et expansion des terres agricoles entre 1900 et 2000. Sources de données : Smil, 2000, U.S. Census Bureau, Population Division, 2011.

Date	Population mondiale (millions)	Périodes	Taux de croissance par période	
			Population totale	Expansion des Terres Cultivées
1900	1 656	1900-1950	50%	35%
1950	2 535	1950-1970	50%	25%
1970	3 700	1970-2000	65%	5%
2000	6 124	1900-2000	270%	80%

Actuellement, la somme des dépenses énergétiques agricoles directes et indirectes[1] représente moins de 15 % de l'énergie primaire totale mise en jeu dans les pays non-industrialisées (FAO, 2000) et environ 2 % dans les pays industrialisées (USDA, 2010). La moyenne mondiale est donc de l'ordre de 5 à 10 % dont moins de 50 % concerne les dépenses relatives à la fabrication industrielle d'intrants chimiques. Pourtant, bien qu'étant très minoritaires, ces dépenses sont responsables de l'altération à l'échelle planétaire des cycles biogéochimiques de l'azote et de l'eau pour ne citer qu'eux, engendrant des conséquences biophysiques immenses qui placent l'agriculture en tête parmi les facteurs de changements globaux et de

[1] Les dépenses directes concernent l'opération de l'ensemble des équipements motorisés mobiles (ex : tracteurs, engin d'application d'engrais etc.) et immobiles (ex : chauffage des bâtiments d'élevage, systèmes d'irrigation etc.) utilisés dans la production. Les dépenses indirectes concernent la consommation « hors champs », relative notamment à la fabrication industrielle d'intrants chimiques (surtout des engrais azotés et des pesticides).

progression de l'Anthropocène. L'éventail des impacts dérivés est difficile à cerner mais son ampleur est à priori fonction positive de l'extraction de ressources primaires et des émissions de déchets dans l'environnement. La perturbation des cycles biogéochimiques pourrait finir par pousser la Terre dans un autre état thermodynamique qui n'offrirait plus les conditions nécessaires à l'existence des organismes supérieurs (Erkman, 1998).

L'azote est l'élément chimique structurant des protéines alimentaires et est indispensable à toute forme de vie. Il compose, sous sa forme moléculaire de bi-azote (N_2), environ 78 % de la masse de la troposphère ; il est pourtant biologiquement indisponible sous cette forme pour 99 % des organismes vivants (Galloway et al., 2003). Le contrôle par l'homme des mécanismes de fixation d'azote atmosphérique inerte en azote biologiquement réactif (Nr) a permis l'envolée d'un facteur sept depuis 1800 de la population humaine mondiale. Ce contrôle a pourtant été acquis progressivement et de façon très hétérogène sur cette période.

Au temps des systèmes agraires préindustriels, le processus de fixation était régi par la rareté : les éclairs et quelques microbes fixateurs vivant en symbiose avec les plantes dites légumineuses assuraient l'essentiel des apports de Nr dans l'agriculture. Le processus de fixation par voie biologique, abrégé en BNF[1], était empiriquement connu par les agriculteurs et agronomes au début du XIXe siècle (ex : Block, 1858) et instrumentalisé, à travers notamment l'expansion de la culture de légumineuses fourragères. Prairies naturelles et artificielles assuraient jusque dans la première moitié du XXe siècle l'essentiel de la production d'engrais. Brouté notamment par les herbivores, l'azote des prairies parvenait à l'alimentation humaine d'un côté sous forme de viande, de lait et de produits dérivés et de l'autre sous forme des graines de céréales, des racines et d'autres cultures non-fixatrices d'azote, fertilisées par les fumures. Élevage et agriculture végétale étaient alors deux activités nouées par une forte complémentarité biogéochimique et contribuaient modestement à l'enrichissement en azote de la biosphère. Les apports d'origine anthropique s'équilibraient plus ou moins à l'échelle de la planète par le processus de

[1] Abréviation anglaise de Biological Nitrogen Fixation (BNF)

dénitrification du Nr en N_2 atmosphérique, de sorte que le stock de Nr restait pratiquement constant (Galloway et al., 2003).

Avec l'exploitation des énergies fossiles, la fixation de Nr s'est intensifiée, d'abord accidentellement - à travers les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) qui constituent des sous-produits de combustion - puis intentionnellement depuis les années 1910 – sans pour autant insinuer un lien direct de causalité - avec la mise au point du procédé industriel de synthèse d'ammoniac (NH_3) à partir du bi-azote atmosphérique (procédé nommé Haber-Bosch du nom du chimiste Fritz Haber et de l'industriel Carl Bosch) utilisé dans des procédés industriels y compris la fabrication d'explosifs et d'engrais azotés de synthèse. La production d'engrais constitue actuellement, et de loin, le débouché principal de la fixation industrielle.

La figure I.2 montre l'évolution depuis 1850 des inputs de Nr dans la biosphère d'origine anthropique (en 10^{12} g N = millions de tonnes de N) par source d'introduction et par comparaison aux apports de Nr d'origine naturelle (natural range) (Cowling et Galloway, 2002). Depuis les années 1950, la fixation par le procédé Haber-Bosch a contribué au triplement de la population humaine mondiale, et, depuis le début des années 1980, les inputs d'origine anthropique dépassent les apports de l'ensemble des processus de fixation dans les écosystèmes naturels. Smil (2001) estimait qu'en 2000, 40 % de la population mondiale devait son existence au procédé Haber-Bosch ; une étude récente actualise ce chiffre, pour le début du XXIe siècle, à 48 % (Erisman et al, 2006).

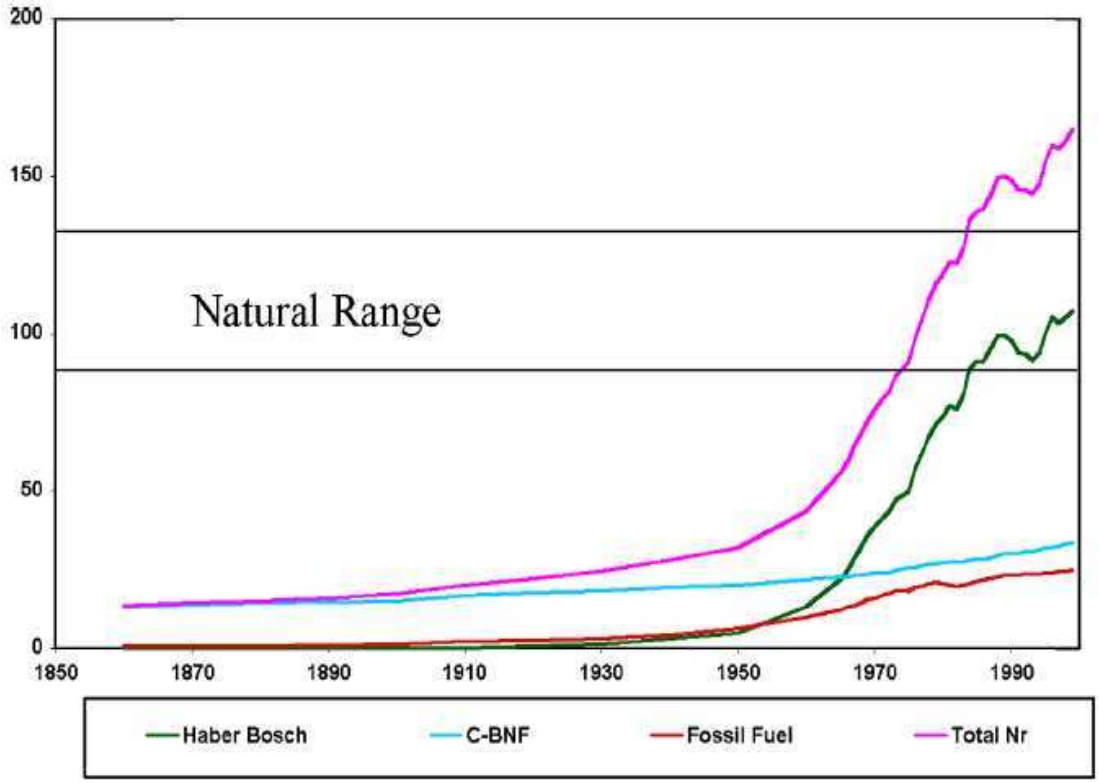


Figure I.2 : Input d'azote réactif d'origine humaine dans la biosphère par source d'introduction (millions de tonnes = 10^{12} g N = Tg). « Natural range » correspond à la fourchette d'inputs d'origine naturelle à l'échelle mondiale. Source : Cowling and Galloway, 2002.

L'agriculture est actuellement responsable de 75 % des inputs d'azote réactif d'origine anthropique à l'échelle mondiale (Galloway et Cowling, 2002), dont seulement 30 % remplit sa fonction d'être retenu sous forme des protéines végétales destinées à nourrir l'homme et le bétail (Smil, 2001) ; le reste se disperse dans l'environnement par voie hydrique et atmosphérique et est à l'origine des perturbations de fonctionnement des écosystèmes (Vitousek et al., 1997a,b, Howarth et al., 1996), des pertes de biodiversité (Pimm et al., 1995, Vitousek et al., 1997a,b, Tilman et al., 2001, 2002), du changement climatique (Smith, 2010) et d'impacts directs et indirects sur la santé humaine (Townsend et al., 2003, Wyne and Wolfe, 2003).

Les impacts liés à l'azote se produisent en cascade de manière séquentielle et au fur à mesure des transformations d'une forme réactive à l'autre et du transfert et/ou du stockage temporaire des molécules azotées réactives dans les différents compartiments de la biosphère (Galloway, 1998, Galloway et al, 2003). Le processus de fixation l'emporte sur la dénitrification en azote non-réactif et conduit à une

accumulation croissante d'azote qui contribue à accélérer la cascade, tissant un réseau grandissant de problèmes environnementaux qui sous-tend aujourd'hui l'ensemble des enjeux de développement soutenable (ENA, 2011).

La quantité d'azote réactif introduit dans la biosphère à des fins alimentaires est actuellement de l'ordre de dix fois supérieure à la quantité effectivement consommée par la population mondiale. Ceci est en partie lié au fait que la fixation par voie industrielle a permis de rendre l'agriculture indépendante de l'élevage en simplifiant radicalement le fonctionnement biogéochimique des systèmes agraires. Selon une logique de spécialisation d'inspiration industrielle, des systèmes de production spécialisés et intensifs se sont imposés, en l'espace de quelques décennies, dans le paysage agricole des pays industrialisés (Cowling et Galloway, 2002, Naylor et al, 2005, Tilman et al, 2002). Le secteur actuel de l'élevage consomme environ 70 % de la production de protéines végétales à l'échelle mondiale (Smil, 2001) dont une fraction considérable, projetée à la hausse, est assurée par le commerce international de fourrages (Naylor et al, 2005, Galloway et al, 2007). En raison d'un côté du découplage entre l'agriculture et l'élevage, et de l'autre de l'abondance et du faible coût de production des engrais azotés de synthèse, peu d'azote des déjections animales – qui contiennent la fraction majoritaire de l'azote des protéines ingérées par le bétail - est recyclé dans la production culturale. Le reste contribue à la cascade, en même temps que la fertilisation des cultures repose sur une nouvelle fixation sous forme d'engrais de synthèse dont la fraction majoritaire sera également perdue dans la cascade.

Au même titre que l'altération du cycle d'azote, l'altération du cycle de l'eau fait actuellement partie des préoccupations majeures au sein des interactions homme-nature. L'eau est habituellement le facteur limitant de la production agricole au sein des agrosystèmes, notamment lorsque l'azote ne l'est plus.

L'appropriation par l'homme de l'évapotranspiration terrestre totale était estimée à plus de 26 % dans les années 1990 et la part concernant l'agriculture est majoritaire dans cette appropriation (Postel et al. 1996). Les dépenses hydriques de l'agriculture correspondent généralement à la somme de l'évapotranspiration d'eau d'origine

pluviale des terres cultivées et des surfaces herbagères et des prélèvements d'eau d'irrigation. La consommation des terres cultivées est estimée à environ 6 800 km^3 dont 1 800 km^3 correspondent aux prélèvements d'eau d'irrigation (Falkenmark et Rockström, 2006). L'évapotranspiration annuelle des prairies est par ailleurs estimée à 5 800 km^3 (Postel et al, 1996) et provient très majoritairement d'eau pluviale. Ainsi, sur une consommation agricole totale de plus de 12 500 km3, la part de l'eau d'irrigation est de l'ordre de 15 %, mais ces prélèvements représentent environ 75 % des prélèvements totaux de l'ensemble des usages humains y compris énergétiques, industriels, municipaux et du volume de pertes par évapotranspiration à partir des réservoirs de stockage (Postel et al, 1996, Shiklomanov, 1997). L'irrigation est donc à l'origine de la majorité des déviations d'eau du cycle hydrologique naturel et, par définition, le volume des apports correspond à l'écart entre d'un côté le besoin hydrique de la production alimentaire selon sa distribution spatiotemporelle et de l'autre le volume naturellement présent par les apports des précipitations.

La figure I.3 montre l'évolution au XXe siècle des prélèvements totaux d'eau des activités humaines (water use, km3), de la capacité maximale de stockage des réservoirs artificiels (reservoir maximum storage, km3) et de l'étendue de surfaces irriguées (irrigated area, Gha) à l'échelle mondiale (Jackson et al. 2001, Vorosmarty et Sahagian, 2000).

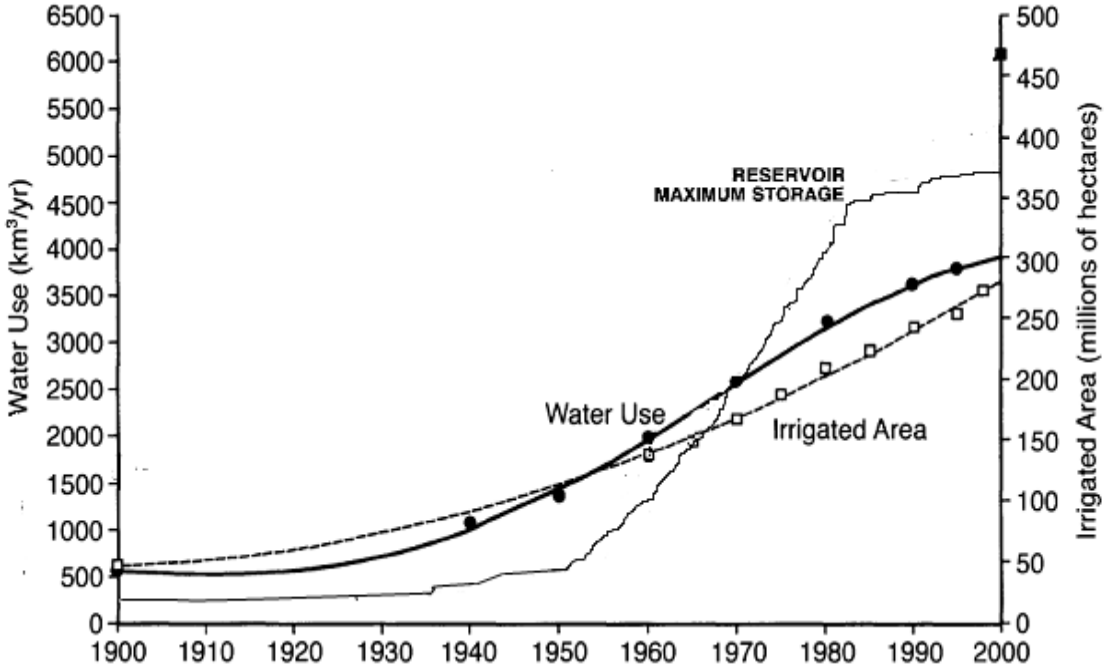


Figure I.3 : Evolution à l'échelle mondiale des prélèvements totaux d'eau, de l'étendue irriguée et de la capacité maximale de stockage d'eau des réservoirs artificiels, 1900-2000. Sources : Croquis retracé à partir de Jackson et al, 2001, Vorosmarty et Sahagian, 2000.

Le triplement de la démographie mondiale depuis les années 1950 est étroitement lié aux déviations des volumes d'eau vers l'agriculture, sachant que 40 % de la production agricole provient des terres irriguées, qui représentent elles-mêmes 16 % des terres cultivées (Postel, 1996). Ces apports contribuent à l'altération à échelle planétaire du cycle hydrologique terrestre avec des implications environnementales multiples et difficilement mesurables (Vorosmarty et Sahagian, 2000, Jackson et al., 2001). Elles incluent des effets concernant la biodiversité terrestre et aquatique, la modification des régimes hydriques et climatiques des zones affectées, l'altération des cycles et du régime de transfert des nutriments dans les zones estuariennes, la disparition des ressources forestières et des patrimoines culturels des versants inondés, la dégradation esthétique des paysages en temps d'abaissement du niveau d'eau des réservoirs, la nécessité de déplacer les populations humaines en dehors des zones inondées etc. (Vorosmarty et Sahagian, 2000, Sahagian, 2000, James et Marcus, 2006, Hadjibiros, 2005, Sargentis et al., 2005).

La progression de l'Anthropocène relative aux processus biophysiques d'origine agricole localisés par définition en milieu rural est de plus en plus alimentée de façon indirecte par les besoins alimentaires des populations urbaines. A partir notamment de

la deuxième moitié du XXe siècle, les mutations agricoles et l'essor de l'urbanisation sont deux phénomènes synchrones et interdépendants. L'intensification et la mécanisation de la production agricole conduisent à la fois à augmenter le potentiel d'exportation alimentaire en milieu urbain et à réduire le besoin en main d'œuvre en milieu rural, permettant à la fois la transition urbaine, l'essor démographique et l'industrialisation des sociétés. De cette façon, la croissance, depuis notamment les années 1950, de la productivité agricole au niveau mondial a généralement conduit à modérer l'expansion des surfaces nourricières des villes et à en augmenter, par unité de surface vivrière, la pression exercée sur l'environnement.

Le processus d'urbanisation est actuellement en pleine expansion mais très différemment accompli entre les différentes régions du monde en fonction des caractéristiques socio-technico-économiques des pays (United Nation Population Division, 2006). A l'échelle mondiale, la population urbaine a surpassé en nombre la population rurale à la fin des années 2000 (figure I.4), ce renversement s'étant par exemple accompli en France dans les années 1930 (Figure I.5).

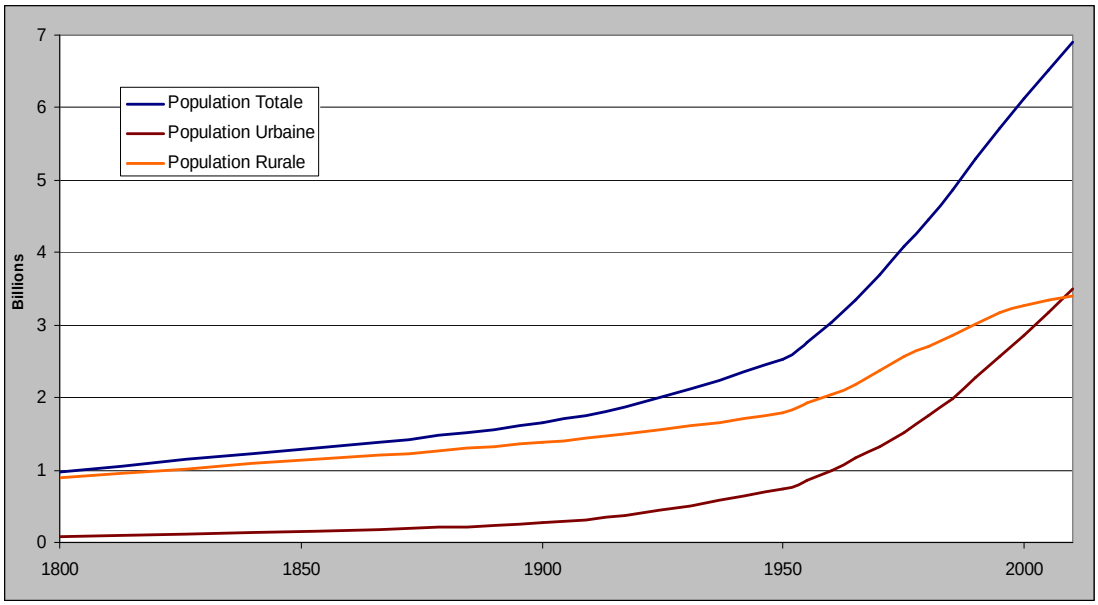


Figure I.4 : Population mondiale urbaine, rurale et totale, 1800 – 2010. Sources : United Nation Population Division, 2006 entre 1950 et 2010, Goldewijk et al, 2010 pour 1800 et 1900.

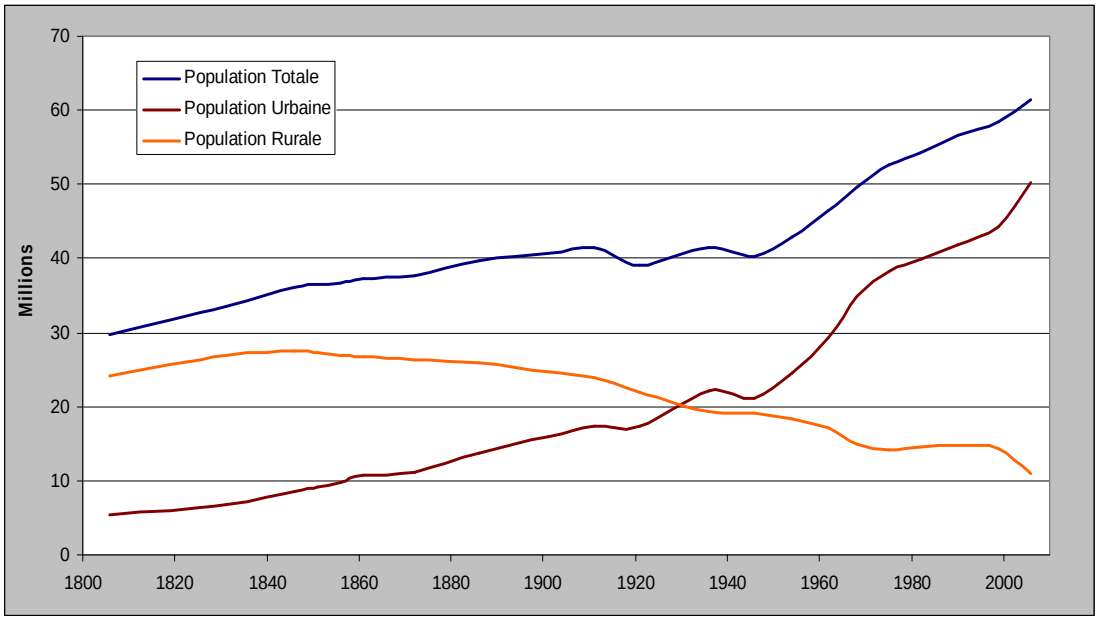


Figure I.5 : Population urbaine, rurale et totale en France, 1800 – 2010. Sources : Compilation des données : Tugault, 1974 (1811-1926) et INSEE, 2000 (1936 – 2006).

La population agricole active de la France représente actuellement moins de 2 % de la population totale, ce qui implique que le travail d'un paysan suffit pour nourrir plus de 60 personnes[1]. Pour comparaison, le rapport arithmétique entre la population agricole active et la population française totale était de 21 % en 1896 contre 18 % en 1946, 12 % en 1954, 6,2 % en 1968 et 4,4 % en 1974 (Coutin, 1949, Duby et Wallon, 1976). D'après ces chiffres, le pouvoir individuel de production alimentaire aurait augmenté d'environ 20 % dans la première moitié du XXe siècle et d'un facteur onze dans la seconde moitié, suite notamment à la substitution des animaux de trait par des engins mécanisés et aux transitions vers l'intensification des apports notamment d'eau et de nutriments par unité de surface de production.

Constituant le débouché principal de la production agricole dans le contexte actuel d'urbanisation, l'approvisionnement alimentaire urbain – terme englobant l'ensemble des flux de nutriments et d'énergie destinés à une ville sous forme d'aliments - s'offre comme une entrée essentielle à l'étude des impacts indirects des sociétés humaines -

[1] Le chiffre est indicatif puisqu'il ne prend pas en compte le commerce extérieur des denrées. Etant donné le solde positif de la France dans le commerce extérieur agroalimentaire (Agreste, 2005a), le nombre des consommateurs par producteur de vivres est à priori plus élevé.

concentrées en villes - sur les milieux ruraux, anthropiques et naturels, proches et lointains, qui les entourent et en assurent la subsistance. Cependant, l'analyse des liens intrinsèques entre les villes et l'agriculture est restée peu explorée au cours des dernières décennies, villes et agriculture appartenant à des sphères scientifiques non seulement différentes, mais aussi quasiment étanches, étanchéité résultant elle-même en grande partie de l'hétérogénéité des milieux et des mutations connues par l'agriculture, les systèmes de transport et les villes.

La relation emblématique de complémentarité symbiotique entre les milieux de production et de consommation a perdu beaucoup de son éclat avec le développement des technologies de transport qui autorisent l'allongement des distances d'approvisionnement. Antérieurement à ces technologies, l'agriculture se développait préférentiellement au voisinage relatif des grandes villes dont la taille et la prospérité assuraient un débouché à la majorité des produits, de même qu'un transfert en retour de savoirs techniques et des richesses issues de l'industrie et du commerce extérieur urbain (Royer, 1843). Mais les liens intrinsèques entre villes et campagnes sont avant tout de nature biogéochimique. En l'absence d'autres sources d'engrais en temps préindustriels et étant donné l'importance des animaux de labour dans l'économie rurale[1], la consommation de viande et de lait des citadins représentait à travers l'épandage des fumures et le travail animal des terres un véritable soutien à l'agriculture paysanne. Elle constitue à contrario un agent potentiel de dégradation environnementale lorsqu'elle provient des systèmes spécialisés irrespectueux du principe de transfert des nutriments dans l'agriculture végétale. Par conséquent, selon la structure et la façon dont fonctionnent les agro-systèmes, l'influence agro-environnementale de la consommation alimentaire urbaine peut varier radicalement et mérite d'être mise en lumière. Face aux changements globaux et aux défis du développement soutenable, l'approvisionnement alimentaire urbain doit à la fois être analysé à travers les processus qui le sous-tendent et quantifié en termes de mobilisation des ressources naturelles et d'émission des polluants dans l'environnement.

[1] Par exemple, selon les résultats de la grande enquête agricole de la France de 1852, plus de 85 % des bœufs étaient utilisés comme animaux de trait (Demonet, 1990).

Mais de quelle façon s'approvisionnent-elles les villes et comment le processus de ravitaillement a-t-il évolué sur la période des deux derniers siècles, caractérisée par des mutations multiples urbaines, agricoles et de transport des marchandises ?

Pour aborder cette question, il s'agit d'examiner et de suivre l'évolution d'une part de l'aire géographique de l'approvisionnement urbain et de l'autre des mécanismes permettant à la fois de dégager des surplus alimentaires au sein des territoires producteurs et d'attirer en ville ces subsistances. Tributaires des denrées dont l'importation est fonction des technologies disponibles de transport et des propriétés physicochimiques spécifiques aux produits, les villes, surtout les plus grandes, ont a rôle structurant pour les territoires qui les environnent. En localisant les origines des importations, l'étude de l'approvisionnement urbain entend franchir une étape supplémentaire dans la compréhension de la configuration spatiale des paysages agraires à différentes époques et de la manière dont les villes contribuent à les façonner.

Une deuxième question émerge de la première : Quelle est l'influence agro-environnementale qu'exerce la ville sur les lieux spécifiques qui l'approvisionnent et de quelle façon peut-on à la fois mesurer cette influence et l'affecter à la consommation urbaine ? Cette interrogation relève du concept d'empreinte urbaine sur une ressource (Rees, 1992, Folke et al., 1997) et constitue un prolongement du concept de métabolisme urbain et des écologies urbaines (Coutard et Lévy, 2010) puisqu'il s'interroge sur les implications amont et aval des villes (amont en ce qui nous concerne dans ce travail).

Le métabolisme urbain – fragment du métabolisme territorial – vise à mesurer et à comprendre les flux de matières et d'énergie échangés entre une ville et le reste de la biosphère (Barles, 2007a). La ville – en tant que composante de la société industrielle – se caractérise par l'importation, la transformation et le stockage temporaire des flux de matières et d'énergie, puis par la restitution de ces flux, tôt ou tard et souvent sous forme dégradée en termes thermodynamiques, dans les processus biogéochimiques de la biosphère (Erkman, 1998). Après un début controversé dans les années 1980 (Beaucire, 1985), les travaux de métabolisme urbain ont progressivement gagné

beaucoup en importance. Le métabolisme de différentes villes a récemment été étudié de manière systémique surtout pour des dates de la deuxième moitié du XXe siècle (voir par exemple Decker et al (2000) pour une revue des flux de matières et d'énergie des 25 plus grandes cités du monde dans les années 1990, Forkes (2007) pour la ville de Toronto entre 1990 et 2004, Warren-Rhodes et Koenig (2001) pour la ville de Hong Kong entre 1971 et 1997), plus rarement pour des périodes plus longues (Schmid-Neset et al. (2006, 2010) pour l'azote et le phosphore à Linköping, Suède entre 1870 et 2000, Kraussmann (2011) pour l'énergie totale de Vienne entre 1800 et 2006, Barles (2005a, 2007a,b) pour l'azote et le métabolisme total de l'agglomération parisienne depuis le XIXe siècle[1]). Or, la production des flux et en particulier des flux alimentaires qui, à leur arrivée en ville peuvent être comptabilisés en termes de tonnage, d'énergie, de protéines ou de tout autre constituant nutritif essentiel dans l'alimentation, engendre, comme on l'a vu, des flux de matières et d'énergie (azote, eau, labour etc.) en amont de la ville qui constituent des *flux indirects* du point de vue de la consommation. La caractérisation de ces flux permet d'évaluer les effets indirects de la consommation urbaine sur les systèmes agraires et naturels environnants et s'inscrit dans le champ de recherche de l'écologie territoriale dont la volonté est d'englober l'ensemble des processus socio-naturels caractéristiques d'un système de territoires (Barles, 2010).

Dans ce cadre, le concept d'empreinte humaine sur la biosphère [2] a pour vocation d'établir des liens entre la consommation d'énergie et de biens des sociétés et la mobilisation des ressources naturelles à travers les flux des biens de consommation et de génération des rejets qui l'accompagne. L'empreinte peut être exprimée soit en termes d'émissions de polluants (ex. : concentration du gaz carbonique dans la biosphère, qui a été récemment utilisé comme indicateur simple de mesure de la progression de l'Athropocène (Steffen et al., 2007)) ou de quantification des ressources impliquées dans les processus de production et d'assimilation des rejets (Rees, 1992). Wackernagel et Rees (1996) ont ainsi construit l'empreinte écologique

[1] Voir également la thèse de Eunhye Kim sous la direction de Sabine Barles, sur le métabolisme énergétique de la ville de Paris depuis la fin du XVIIIe siècle.

[2] Footprint ou Imprint en anglais

(ecological footprint) comme un indicateur de la pression humaine sur la biosphère en exprimant d'un côté la consommation alimentaire, énergétique et matérielle d'une population et de l'autre ses émissions de gaz carbonique, en termes des surfaces fictives (hectares globaux) de productivité en biomasse égale à la moyenne mondiale, nécessaires à régénérer les ressources consommées et à séquestrer les émissions de CO_2[1] (Wackernagel et Rees, 1996). Sur la base des taux de séquestration de CO_2 relatifs aux différents types de forêts de la planète, la somme des émissions - qui représente la consommation énergétique d'origine non-renouvelable des sociétés - est ensuite convertie en « hectares globaux » et additionnée aux « hectares globaux » relatifs à la consommation alimentaire, à la consommation des produits d'origine forestière (bois, pâte à papiers, etc.) et à la consommation d'espaces bâtis et artificialisés occupés par les infrastructures humaines. A travers la comptabilité des substrats de production en unités surfaciques de productivité identique, l'empreinte écologique fournit un indicateur agrégé de l'étendue de surfaces bio-productives nécessaires au fonctionnement des sociétés et permet, en comparant ce besoin aux surfaces bio-productives réellement présentes sur la planète, d'évaluer une sorte de « dette » écologique, également exprimée en surfaces (hectares globaux ou nombre de planètes terre). Suivant ce décompte, la dette écologique de l'humanité a récemment été estimée à environ 1,25 planètes terre (WWF, 2006) mais n'exprime évidemment que l'accumulation de gaz carbonique dans la biosphère relative à la consommation d'énergie. En revanche, la pression exercée sur la biodiversité, les cycles biogéochimiques de l'eau et de l'azote, la qualité des eaux, des sols et de l'air etc. n'est par définition pas prise en compte dans la méthode de l'empreinte écologique qui ne constitue en effet guère un indicateur du développement soutenable. Pour ces raisons et pour d'autres encore, relatives à la non-localisation des surfaces de production, à l'hypothèse de leur mono-fonctionnalité, à l'absence de distinction entre différentes pratiques de production, au caractère agrégatif de la méthode, aux biais de calculs liés au commerce des marchandises, à l'affectation aux terrains bâtis d'une bio-productivité égale à celle des terres agricoles (!) etc., l'empreinte écologique a fait l'objet des nombreuses critiques, si bien que son utilisation est d'intérêt limité voir

[1] Dans cette méthode, la consommation énergétique d'origine nucléaire est exprimée en équivalent émissions de CO_2 et additionnée aux émissions réelles de CO_2 provenant de la combustion des carburants fossiles

déconseillée (van den Bergh et Verbruggen, 1999, Piguet et al., 2007). Utilisée comme outil d'aide à la décision l'empreinte écologique peut conduire à des évaluations biaisées et à la définition de politiques environnementales nuisibles pour l'environnement (van den Bergh et Verbruggen, 1999). Notons cependant que malgré ces limitations et biais, l'empreinte écologique a, depuis son apparition, suscité un grand intérêt scientifique, faisant l'objet des nombreuses publications, de même qu'elle a contribué à la sensibilisation du grand public envers les problèmes environnementaux actuels, nomment vis-à-vis des dépenses énergétiques. Quant à l'influence au sein de la communauté scientifique, on note tout particulièrement le développement - par analogie à l'empreinte écologique - de l'empreinte hydrique (Hoekstra et Hung, 2002, 2005) introduite comme un indicateur de l'utilisation de l'eau par les sociétés qu'il s'agisse de l'eau consommée ou de celle présumée nécessaire à la neutralisation des émissions de polluants par voie de dilution (Chapagain et al, 2006b, Hoekstra, 2009, Gerbens-Leenes et al, 2009). Le développement de l'empreinte hydrique montre la tendance à élargir la notion d'empreinte dans la prise en compte d'autres ressources impliquées dans la production.

On s'intéresse dans le cadre de cette thèse à l'empreinte environnementale de l'approvisionnement alimentaire urbain (ou empreinte alimentaire urbaine, ou *food-print* (Billen et al. 2009)), conçue comme un indicateur composite de l'influence de la ville sur les agro-écosystèmes naturels et anthropiques qui l'entourent et en assurent la subsistance. Telle qu'on la définit, l'empreinte alimentaire est à la confluence des notions d'empreinte et de métabolisme territorial et à cheval entre plusieurs disciplines. Elle se distingue de l'empreinte écologique canonique de Wackernagel et Rees (1996) par sa volonté de caractériser le fonctionnement biogéochimique des territoires produisant les aliments des citadins à travers l'analyse des flux indirects d'azote et d'eau engendrés par la production. L'empreinte alimentaire est approchée par un jeu de trois empreintes, spatialisées et distinctes : l'empreinte spatiale, l'empreinte hydrique et l'empreinte azotée (ou empreinte N) selon les trois ressources principales mobilisées dans la production alimentaire. Les deux premières empreintes ont pour objectif de mesurer respectivement la consommation d'espace et les prélèvements d'eau (pluviale et d'irrigation) qu'implique le ravitaillement alimentaire

urbain. L'empreinte azotée est en revanche développée de façon à suivre les transformations de l'azote dans la chaîne de production et à déterminer la contribution de l'approvisionnement urbain à la fois à la cascade d'azote réactif et à la productivité agricole de l'aire d'approvisionnement. L'empreinte spatiale constitue donc le support physique des flux d'eau et d'azote dont la circulation, les origines et l'intensité d'utilisation caractérisent l'étendue de production et les conditions de soutenabilité de l'approvisionnement urbain. L'empreinte azote s'articule autour des notions suivantes : l'empreinte N brute désigne le tonnage total d'azote réactif mis en jeu dans la production, dont le partage entre la production d'aliments, la production d'engrais organique en vue d'une valorisation agricole et les pertes environnementales dépend de la manière dont fonctionnent les agro-systèmes et caractérise la profondeur de l'empreinte urbaine. La notion de profondeur vient élargir le concept de l'empreinte surfacique. Elle permet de mesurer, de manière spatialisée, les rejets urbains indirects et diffus relatifs à la production de la nourriture des citadins, en fonction de l'efficacité environnementale spécifique au fonctionnement biogéochimique des agro-systèmes. Il est ainsi possible d'élargir la notion d'équivalent habitant (Equ/Hab) classiquement considéré comme représentatif des émissions individuelles d'azote dans les eaux usées urbaines (Equ/Hab = 15 g N/jour, soit 5,4 kg N/an) et de définir un *équivalent habitant amont* qui englobe en quelque sorte tous les rejets individuels d'azote en amont de la ville, relatifs à la production de la nourriture d'un citadin. On entend ainsi déterminer à travers les différentes composantes de l'empreinte azotée, les flux échangés entre les territoires de production, la ville et les milieux naturels afin de caractériser les pertes et d'identifier la part de l'empreinte possible de réduire dans la production culturale.

On met au point ce travail à travers l'étude de l'approvisionnement alimentaire de l'agglomération parisienne, en particulier en viande et en lait, sur une période longue de deux siècles et à travers une démarche multidisciplinaire. Il s'agit d'une analyse basée d'un côté sur l'exploitation des données statistiques, historiques et contemporaines, relatives à la production et au transport des aliments vers Paris, et de l'autre sur la reconstitution des rations animales aux différentes époques, en fonction du niveau de production des animaux et de la disponibilité dans les marchés des fourrages pour l'élevage, dont les provenances et les propriétés agronomiques sont

déterminantes de la géographie et de l'ampleur des différentes composantes de l'empreinte urbaine.

Plusieurs raisons expliquent le choix de la viande et du lait frais. D'une part, la place centrale que ces aliments occupent dans les régimes des citadins Français. La consommation des produits carnés – notamment de la viande bovine - était une caractéristique urbaine en France au XIXe et début du XXe siècle. L'approvisionnement en lait frais, dont la consommation culmine au début du XXe siècle à un niveau double de celui d'aujourd'hui, exerce par ailleurs une influence structurante sur la géographie et le fonctionnement du bassin d'approvisionnent. En outre, pour ce qui concerne la période actuelle, la consommation de viande demeure élevée et celle des produits laitiers – dont l'empreinte n'est pas évaluée dans le présent travail mais constitue une application directe des résultats obtenus pour le lait frais – assure 15 à 20 % de l'apport protéique total des Parisiens. D'autre part, les mutations agricoles et technologiques caractéristiques de la période ont contribué à transformer l'élevage qui, autrefois pierre angulaire du fonctionnement des systèmes agraires préindustriels, s'est vu réduit à sa finalité alimentaire, tout en étant désormais reconnu pour sa contribution majeure aux changements environnementaux multiscalaires, à l'épuisement de certaines ressources et aux inégalités environnementales entre populations et écosystèmes de différentes contrées du globe (Steinfeld et al, 2006). S'ajoute à cet argumentaire le fait que la quantification de l'empreinte de la consommation de viande et de lait est méthodologiquement plus complexe par rapport à celle de l'approvisionnement en produits primaires (céréales, légumes, fruits etc.) car elle comporte l'étape supplémentaire de la transformation de matières fourragères en produits d'élevage d'un niveau trophique supérieur. Ainsi, si l'empreinte de l'ensemble de l'alimentation parisienne n'a pas pu être évaluée dans la limite du temps disponible pour cette thèse, cet élargissement constitue une perspective qui pourra pour l'essentiel reposer sur les acquis méthodologiques du présent travail.

On a sélectionné Paris comme terrain d'étude et l'aube du XIXe siècle comme date de début de l'analyse, en raison des mutations urbaines et agricoles caractéristiques de cette période et de la disponibilité de données. Paris se trouve déjà en tête de

l'urbanisation française et sa population croît rapidement et nettement plus vite - au cours du XIXe siècle - que la productivité des agro-systèmes : la population de l'agglomération fait plus que quadrupler en même temps que le rendement agricole moyen de la culture de blé, qui constitue une sorte de symbole de l'alimentation humaine au XIXe siècle comme actuellement, n'augmente que de quelques pourcents sur la même période (Ministère de l'Agriculture, 1878, Statistique agricole annuelle, 1908). Par son urbanisation relativement précoce par rapport à la fois à la productivité agricole et au développement des technologies de transport[1], Paris relève des défis organisationnels et techniques importants et longuement préoccupants pour l'administration vis-à-vis de son approvisionnement qui mobilise, dès le XVIIIe siècle, des ressources alimentaires issues d'une grande partie du territoire du pays (Abad, 2002). Ce n'est pas un hasard si la capitale est qualifiée de « monstre » au XIXe siècle au vu des quantités d'aliments que ses marchés « avalent » quotidiennement (Coffignon, non daté). Parmi d'autres villes françaises qui pourraient constituer des cas d'études intéressants, Paris, ville capitale, présente la particularité d'être très tôt confrontée à un processus d'urbanisation massive et suscite des investissements importants de la part des pouvoirs publics en matière des dispositifs d'approvisionnement. Au même titre que quelques autres grandes métropoles, comme par exemple Londres et New York avec lesquelles il serait particulièrement intéressant de mener des comparaisons, Paris s'offre pleinement, depuis Lavoisier (1791), Benoiston de Châteauneuf (1820-1821) et Husson (1856), à l'étude des mécanismes et des stratégies d'approvisionnement[2] qui apparaissent a posteriori comme des mesures de soutien à l'urbanisation et sous-tendent l'externalisation de l'influence environnementale urbaine. L'intérêt de fond de cette période est renforcé par la disponibilité relativement satisfaisante des données. Les

[1] Sur l'histoire du chemin de fer de cette période, voir le livre de François Caron (1997) : *L'histoire des chemins de fer en France*, Tome I : 1740 - 1883.

[2] Cette analyse a été engagée depuis longtemps à travers différents points de vue. Voir par exemple Stanhill (1977) sur la production alimentaire de Paris intramuros au XIXe siècle, Philipp (2004) sur l'histoire des abattoirs parisiens entre la révolution et 1970, Barles (2007) sur la circulation d'azote dans Paris entre 1801 et 1914 en relation avec l'alimentation humaine et animale, Billen et al (2009) sur l'évolution historique des flux alimentaires d'azote importés à Paris depuis son hinterland.

données de l'octroi et des statistiques de transport assurant aux siècles précédents le suivi des opérations et du bon fonctionnement des marchés constituent actuellement une base précieuse (et rare) de données urbaines permettant d'analyser la trajectoire socio-naturelle de l'approvisionnement alimentaire et de comprendre la genèse et la dynamique d'évolution de l'empreinte alimentaire.

Quant à la période qui débute avec le XXe siècle, la population parisienne a encore marqué plus d'un doublement, en passant de moins de quatre millions d'habitants au début du XXe à plus de dix millions aujourd'hui. Cette période est pourtant très différente de la précédente, du fait des multiples améliorations progressives dans le domaine des transports et de la productivité agricole des territoires qui ont permis le regain d'une certaine aisance dans le processus de ravitaillement urbain. Cette période est aussi marquée par le développement progressif des circuits de distribution assurés par des entreprises privées, amorcé dans les années 1910-1920 et remplaçant progressivement les structures d'approvisionnement portées jusqu'alors par les pouvoir publics, pour se transformer à partir des années 1970, en ce qu'on appelle aujourd'hui « la grande distribution », qui fournit actuellement une partie majoritaire du marché alimentaire parisien[1]. Ces mutations de la chaine de distribution ont entrainé la disparition progressive des données sur les importations en même temps que l'intérêt du point de vue statistique migre du domaine des importations urbaines vers celui de production des animaux d'élevage.

La thèse se divise en sept chapitres, chacun étant structuré dans l'ordre chronologique. On évoque très succinctement ici les éléments principaux traités dans chacun.

Le 1er chapitre donne un aperçu historique succinct et qualitatif de l'évolution, entre le début des XIXe et XXIe siècles, des structures assurant l'approvisionnement parisien en viande et en lait, au fur et à mesure de l'urbanisation de la capitale. Il s'agit des transitions dans le domaine notamment des transports extra-urbains et vis-

[1] Voir la thèse de Sabine Bognon sous la direction de Sabine Barles, concernant la logistique et l'organisation des circuits de distribution alimentaire pour l'agglomération parisienne, notamment dans la deuxième moitié du XXe siècle.

à-vis des dispositifs, au sein de la ville, d'importation, de transformation et de distribution des produits auprès des consommateurs.

Dans le 2ème chapitre, on s'intéresse à la quantification, depuis le début du XIXe siècle, de la consommation de viande et de lait du Parisien et de l'ensemble de l'agglomération parisienne. On a retenu des données démographiques qui satisfont au critère de l'uniformité alimentaire au sein de la population que l'on appelle parisienne. La complexité principale inhérente à cette démarche provient de la progression asymétrique en termes géographiques entre l'urbanisation et la portée de la desserte alimentaire des structures d'approvisionnement.

On retrace dans le 3ème chapitre l'évolution géographique de l'aire d'approvisionnement parisien en viande et en lait dans la mesure des données disponibles et on confronte le tonnage des importations parisiennes au potentiel de production des territoires qui l'approvisionnent. Ceci permet d'examiner quantitativement et de façon spatialisée l'influence exercée par le ravitaillement parisien sur à la fois la constitution des stocks alimentaires dans les régions approvisionnant Paris et la part de la production demeurant disponible pour la population locale.

Le 4ème chapitre établit les liens entre la consommation urbaine des produits animaux et leurs équivalents en matières fourragères. Les rations animales sont reconstituées par date et par région sur la base d'un côté des besoins protéiques et énergétiques des animaux, calculés en fonction du niveau de production de biomasse, et de l'autre des caractéristiques nutritionnelles des fourrages disponibles dans les marchés locaux et mondiaux aux différentes époques. Le rendement en viande et en lait du fourrage est ainsi déterminé par ration animale en termes de biomasse, d'énergie et de protéines.

Les trois derniers chapitres sont consacrés à l'évaluation de l'empreinte environnementale de l'approvisionnement alimentaire, dont la géographie est le résultat de l'imbrication géographique entre d'un côté les origines des importations urbaines et de l'autre l'aire d'approvisionnement des exploitations d'élevage. Le calcul de l'empreinte est donc précédé par l'évaluation préalable de l'autonomie fourragère des exploitations d'élevage par secteur et par région approvisionnant Paris

et par la détermination des provenances géographiques des aliments importés. Cette démarche est suivie dans le chapitre 5 préalablement au calcul de l'empreinte spatiale. Le chapitre 6 est consacré à l'évaluation de l'empreinte azotée, selon les différentes composantes qu'on a énumérées plus haut. Enfin, le chapitre 7 est consacré à l'évaluation de l'empreinte hydrique de l'approvisionnement parisien que l'on mesure en termes à la fois des volumes d'eau (pluviale et d'irrigation) mobilisés dans la production et de l'intensité de cette mobilisation par rapport à la disponibilité d'eau d'origine pluviale par région de production de fourrages.

Chapitre 1 : Evolution de la structure d'approvisionnement en viande et en lait de la capitale : quelques éléments historiques, XIXe - XXIe siècles.

La croissance démographique va de pair avec l'accroissement de la demande alimentaire[1]. Toute ville, du fait de regrouper des populations qui ne produisent pas elles-mêmes leurs moyens de subsistance alimentaire (Ascher, 2001), dépend largement pour son alimentation des territoires environnants, prochains ou lointains. La formation du milieu urbain est permise par un surplus alimentaire généré en milieu rural permettant aux agriculteurs de commercialiser une partie de leur production. Quant à la ville, elle doit être munie des dispositifs techniques et institutionnels afin d'attirer les surplus d'aliments, y apporter des éventuelles transformations et le livrer à la consommation.

1.1. La filière « viande »

Par opposition à l'élevage faisant l'objet d'une autoconsommation, l'approvisionnement en viande d'une ville fait appel à une filière plus ou moins complexe, nécessitant plusieurs manipulations entre la production à la ferme et l'achat par les consommateurs. L'abattage des animaux peut survenir soit proche de la ville dans des tueries ou des abattoirs - ce qui présuppose le transport du bétail vivant - soit proche des lieux d'élevage, ce qui présuppose des moyens de transport munis des technologies de conservation. Jusqu'au début du XXe siècle, l'approvisionnement des villes françaises s'effectue majoritairement sous forme d'animaux vivants, qui s'y rendent (quasi-) exclusivement à pied jusqu'au début des années 1850 puis, à partir de la deuxième moitié du XIXe siècle, de plus en plus en chemin de fer. On peut distinguer quatre étapes incontournables dans l'approvisionnement d'une ville en animaux vivants : la production chez l'éleveur, le transport, la présentation des bestiaux aux marchés de vif et la transformation en viande par les bouchers chez qui s'approvisionne le public. Toutefois, plus le milieu desservi est peuplé, plus le nombre des intermédiaires est important et leur

[1] Pour des éléments quantitatifs, se reporter au chapitre 2, section 2.2.

spécialisation poussée. Par exemple, dans le cas des grandes villes munies des abattoirs, la chaine d'approvisionnement comporte une étape supplémentaire qui témoigne d'une structure davantage spécialisée : des bouchers de gros achètent des bêtes dans les marchés aux bestiaux, les découpent et les dépècent, avant qu'elles soient apprêtées par le boucher détaillant chez qui s'approvisionne le public (Fouéré, 1939). En revanche, lorsque l'approvisionnement s'effectue au moyen des envois de viande morte, abattue proche des lieux d'élevage, la chaine de l'approvisionnement s'inverse : les bouchers sont décentralisés, le transport s'effectue sous conditionnement et les viandes introduites aux marchés alimentaires sont prêtes à consommer.

Se trouvant en tête de l'urbanisation française, la ville de Paris a été ravitaillée dans l'histoire récente à travers des structures en voie d'exploration, non pas sans susciter des inquiétudes de la part de l'administration. C'est ce qui a conduit les gouvernants sous le règne de Louis XIV d'exprimer l'espoir «que le trop grand accroissement de la capitale ne devint pas le principe de sa perte » (cité dans Husson, 1856). L'histoire récente de l'approvisionnement parisien en viande, illustre les évolutions de la filière sous la pression de l'urbanisation et en fonction du développement des technologiques de transport et de conservation.

Au début du XIXe siècle, six marchés situés à l'intérieur ou aux alentours de Paris en assuraient l'essentiel de l'approvisionnement en viande : Sceaux, Poissy, Bernardins, Maison Blanche, la Chapelle et Saint-Germain. Situés dans les communes homonymes, les marchés de Sceaux et de Poissy, actifs depuis au moins XVIIe siècle (Abad, 2002), se spécialisaient en bovins et en moutons et en assuraient la majorité des apports. Le marché de la commune de Saint-Germain assurait l'essentiel de l'approvisionnement en porcs alors que les marchés des Bernardins, situé intramuros, et ceux de La Chapelle et de la Maison Blanche, situés en périphérie, se partageaient entre les bœufs et les porcs mais leur apports étaient d'une importance secondaire (Coffignon, non daté).

Nécessaires pour rassembler des crédits, centraliser les importations de bestiaux depuis les régions d'élevage, réguler les prix et faciliter les inspections hygiéniques,

les marchés aux bestiaux se sont institués bien avant les abattoirs publics (Philipp, 2004). Au début du XIXe siècle, ils constituaient des points exclusifs pour l'approvisionnement des bouchers parisiens (Leteux, 2005), qui conduisaient ensuite les animaux dont ils étaient devenus propriétaires à l'intérieur des fortifications pour les abattre. Jusqu'au début du XIXe siècle, la situation des abattages était beaucoup plus floue que celle des marchés et dans une certaine mesure contradictoire avec la salubrité recherchée par les inspections vétérinaires au sein de ces derniers. Alors qu'à l'origine les bêtes ne devaient être abattues que sur les bords de la Seine afin de faciliter l'évacuation des déchets et le lavage des carcasses, les bouchers se sont affranchis de cette obligation et ont pris l'habitude de tuer les animaux dans leurs boutiques ou en pleine rue, malgré les nuisances liées aux abats et sang qui pourrissaient, donnant lieux à des protestations des citadins. Les boucheries se sont ainsi mises à remplir la double fonction de tuer et de vendre de la viande faisant de la ville une vaste tuerie (Coffignon, non daté). Le cartier du Châtelet, bien qu'étant le cœur géographique et le ventre de Paris, était nommé l'endroit le plus puant du monde entier[1], résultant du pourrissement lent des restes des abattages exhalant une puanteur insoutenable (Chemla, 1994).

Les boucheries se sont rapidement proliférées dans la ville sous la demande croissance en viande et le nombre grandissant des bouchers. Le métier du boucher était héréditaire sous l'ancien régime et le droit de créer des nouveaux postes était réservé au Roi[2]. Le nombre des bouchers s'élevaient à 230 en 1789 et suite à la libération du métier avec la révolution il s'est envolé à 1100 en 1791 (Philipp, 2004). Toutefois, cette augmentation démesurée ne s'est pas maintenue longtemps, aussi bien en raison du déséquilibre qu'elle a du induire entre la demande et l'offre, et à l'instauration d'un arrêté consulaire en 1802 visant à réglementer et à réorganiser le métier. Le nombre des bouchers est ainsi retombé à 800 en 1801, à 600 en 1802 puis il a stabilisé autour de 480 dans la première moitié du XIXe siècle (Philipp, 2004).

[1] Louis-Sébastien Mercier, fin XVIIIe siècle, début XIXe siècle

[2] Pour plus d'information sur la structure du corps socioprofessionnel des bouchers Parisiens, voir la thèse de S. Leteux, 2005

Malgré la diminution progressive du nombre des bouchers, le modèle de production de viande dans des tueries particulières s'était mis à l'épreuve, et semblait inadapté dans un contexte d'urbanisation et de densification de la ville. En effet, cette configuration spatiale des tueries particulières au voisinage des zones densément peuplés, se mettait à l'épreuve pour la première fois en France et probablement en Europe. Paris était la première ville Européenne à établir des abattoirs publics (Brantz, 2006) sous le double poids de l'augmentation de la population et de la précarisation des conditions d'hygiène, ces dernières se répercutant à la fois sur la population et sur la qualité des viandes produites.

Commencés en 1808, les bâtiments des cinq premiers abattoirs publics ont été achevés et livrés au commerce de la boucherie en 1818, marquant ainsi la suppression définitive des tueries particulières déjà engagée depuis 1810 par une ordonnance de Napoléon (Coffignon, non daté). En 1850, le nombre d'abattoirs s'élevait à dix, partagés entre l'intérieur de la ville et sa proche périphérie. Paris était ainsi divisé en cinq circonscriptions ayant chacune un abattoir dit général – trois sur la rive droite et deux sur la rive gauche. Lieux exclusifs d'abattages, ils se partageaient les animaux vendus dans les différents marchés et assuraient leur transformation en viande sous le seuil des consommateurs et en bonnes conditions hygiéniques. Toutefois, des mutations urbaines et technologiques des années suivantes appelleront à revisiter la question de l'approvisionnement en termes d'emplacement des abattoirs et des marchés.

L'élargissement du périmètre administratif de Paris en 1860 par l'annexion des communes périphériques a également embrassé les abattoirs de ces communes. Leur nouvelle position à l'intérieur de la ville se prouvait de plus en plus gênante sous la demande croissante de logements et la raréfaction du foncier disponible. En dépit, la capacité de production des abattoirs Napoléoniens ne suffirait plus à la demande alimentaire croissante de la ville. Un troisième inconvénient par rapport à leur position vient du fait qu'ils se situaient à la fois au centre ville et loin des marchés aux bestiaux qui les alimentaient. Leur fonctionnement ne peut alors se passer de faire circuler des bêtes dans Paris, dont la présence est nuisible. En effet, la circulation animale est cause de congestion du trafic des hippomobiles et d'accidents de route

ainsi que source supplémentaire de déchets organiques (Barles, 2007c). S'ajoute à ces problèmes que la traversé de la ville jusqu'aux abattoirs est soumise à des règlements qui sont susceptibles de compromettre la productivité des abattoirs. « Le bétail, acheté au marché de Sceaux ou de Poissy, traverse la capitale se fait convois qui ne doivent pas être composés de plus de quarante bêtes. Au cours du premier XIXe siècle, ce sont ainsi 12 à 15 convois de bovins qui sillonnent les rues de Paris chaque jour, auxquels s'ajoutent 10 à 16 convois de moutons » (Barles, 2007c).

La question de la maitrise des flux des importations se pose également. Alors que les abattoirs sont municipaux les principaux marchés qui les alimentent ne les sont pas. Etant propriété des communes de Sceaux et de Poissy, les deux principaux marchés d'approvisionnement ne sont pas directement exploités pour le compte de la ville qui doit, par conséquent, conclure des accords pour s'y garantir un ravitaillement pérenne (Philipp, 2004). Ceci est un problème de sécurité pour l'approvisionnement, d'autant plus que les besoins alimentaires sont en croissance.

Enfin, un autre facteur décisif est que le chemin de fer est déjà à l'actualité et que les marchés aux bestiaux devaient en tirer profit. Cette nouvelle technologie – très prometteuse vis-à-vis de sa capacité de transport - inaugure un nouveau déterminisme spatial et appelle à repenser l'organisation spatiale des activités liées à l'approvisionnement.

Ces cinq facteurs ont fondé une base de réflexion afin de regrouper l'ensemble des installations relatives à la filière viande dans un même complexe à grande capacité, suffisamment excentré du périmètre urbain et aménagé de façon à tirer profit du service ferroviaire. Cette idée revenait à unifier l'ensemble des activités sous le contrôle de la ville.

Après négociations entre la ville et le département de la Seine, il a été décidé d'installer cet ensemble à la Villette. La ville de Paris a acheté des terrains aux anciennes communes de la Villette et de Pantin et a entreprit elle-même la construction et l'exploitation des nouvelles installations qui regroupaient marché aux bestiaux et abattoirs. D'abattoirs auxiliaires ont été maintenus sur la rive gauche, ce qui contribuait à préserver le principe, en vigueur à cette date, de l'autonomie

alimentaire des deux rives. Le complexe de la Villette a ouvert ses portes en 1867, et son marché s'alimentait directement par la gare de Paris-Bestiaux, embranchée au chemin de fer de la petite ceinture. Sur la rive gauche, l'abattoir de Vaugirard s'est substitué en 1896 à ceux de Grenelle et d'Ivry qui présentaient jusqu'alors l'inconvénient de ne pas être reliés aux voies ferrés qui amènent les bestiaux. Ainsi, Vaugirard a été établi dans le voisinage de la gare Montparnasse, le long de la ligne de Bretagne dans une perspective de communication avec les pays d'élevage au moyen du chemin de fer de la petite ceinture (Coffignon, non daté).

Les pouvoirs publics municipaux ont ainsi fait preuve d'une politique d'investissement dans la gestion de l'approvisionnement en viande de la capitale. Cette démarche reflète la tendance dominante dans l'administration nationale et municipale lors du XIXe siècle de ne pas laisser dans les mains des compagnies privées - contrairement au modèle états-unien - la responsabilité de l'approvisionnement en produits de base (Philipp, 2004).

Avec l'ouverture du complexe de la Villette, une source régulière de viande était garantie pour Paris et a vite pris des proportions régionales. L'afflux en bestiaux se partageait entre la demande de Paris et celle des milieux extérieurs[1]. En effet, d'un côté le marché aux bestiaux de la Villette absorbait l'activité de tout autre marché de vif existant auparavant aux alentours, et de l'autre sa création a coïncidé avec une forte transition urbaine régionale. Un premier lot d'arrivages alimentait les abattoirs de la Villette et de Vaugirard et se livrait à la consommation des habitants de Paris par trois voies possibles : la criée ou marchés de rassortiment installés à côté de chacun des abattoirs (Villette et Vaugirard), les Halles Centrales au centre de Paris et les bouchers détaillants s'approvisionnant de leur part aux abattoirs (Fouéré, 1939). D'autre part, la fraction des animaux présentés au marché et réexpédiés, vivants ou après transformation, vers l'extérieur (à d'autres destinations que Paris *intramuros*) n'a cessé de croître suivant la progression de l'urbanisation des alentours (Philipp, 2004).

[1] On y reviendra dans le paragraphe 2.2.

Bien que source principale d'animaux vivants, le marché aux bestiaux de la Villette ne fournissait pas la totalité des animaux abattus. En effet, depuis 1858 les bouchers de gros s'étaient affranchis de l'obligation de s'approvisionner exclusivement sur les marchés officiels et introduisaient aux abattoirs des animaux qu'ils avaient acheté soit directement auprès des éleveurs, ou récupérés dans la gare Paris-Bestiaux lors du déchargement de trains, en contournant – tout à fait légalement - le marché (Baudier, 1914, Leteux, 2009). Ces introductions, dites directes, se faisaient dans le premier cas par les portes de Paris et dans le deuxième par la « quatrième rampe », lien direct entre la gare de Paris-Bestiaux et l'abattoir. Elles sont toutefois faibles par rapport au nombre de bestiaux transitant par le marché et concernaient particulièrement les porcs à partir des années 1910 (Statistique agricole annuelle, 1885-1889, 1891, 1906, 1931, Philipp, 2004).

En parallèle avec les apports d'animaux vivants, des progrès dans le domaine des transports et des technologies de réfrigération ont concourus à l'ouverture progressive d'une nouvelle voie d'approvisionnement pour Paris : des envois directs de viande abattue dans les lieux d'élevage, aussi appelée « viande à la main ». Ces envois ont commencé à monter en importance dès les années 1870 quand ils étaient encore acheminés par le chemin de fer, mais ils se sont envolés au moyen du trafic routier à partir des années 1930.

Avant le développement des technologies mécanisées de réfrigération, les wagons qui transportent ces viandes étaient aménagés d'une manière toute particulière pour en assurer la réfrigération. Comme le témoigne Coffignon (non daté), ils possédaient une double enveloppe percée par endroits de volets à claire-voie. Pendant la marche du train, l'air s'engouffrait dans le wagon et circulait autour d'un réservoir rempli de glace. Les températures y étaient très basses et la viande arrivait dans un parfait état de conservation. Cette viande abattue provenant de l'extérieur était envoyée aux Halles centrales pour être vendue à la criée. La majeure partie de ces envois provenait des bouchers de province qui, n'étant pas susceptibles de vendre l'animal entier qu'ils venaient d'abattre, envoyaient les meilleurs morceaux à la criée des Halles (Coffignon, non daté). Ces dernières étaient largement alimentées par le chemin de fer et, selon les annuaires statistiques de la ville de Paris, la part de la viande foraine

sur la totalité de la viande commercialisée y était dominante dès le début du XXe siècle (Annuaire statistique de la ville de Paris, 1905). Les apports en viande des abattoirs de la ville sont alors en diminution par rapport à la demande totale sous la concurrence des abattages dans les zones d'élevage. L'approvisionnement au moyen des abattoirs urbains était appelé « circuit long » par opposition au « circuit court » concernant l'approvisionnement au moyen des viandes produites proche des lieux d'élevage.

Des tentatives pour conserver, voire reconstruire les abattoirs locaux continuaient jusqu'aux années 1950, malgré la concurrence constamment croissante de la part des viandes foraines qui mettait en question ce principe. Par ailleurs, le circuit court présentait aux yeux de l'administration l'avantage de réduire le nombre des intermédiaires et de décentraliser les activités (Brevot, 1953). Certains considéraient le maintien du double circuit – réseau hybride entre production locale de viandes et importations de l'extérieur - comme une mesure de sécurité pour l'approvisionnement. Finalement, le conseil municipal s'est en 1958 prononcé pour le maintien de deux circuits, décision étant probablement largement influencée par la pression sociale de la part des bouchers de gros de la Villette qui s'opposaient fermement à toute modification qu'ils percevaient comme menaçante de leurs intérêts professionnels (Chemla, 1994). Toutefois, cette décision n'a pas pu renverser la tendance du marché. A la fin des années 1960, les abattages de porcs ont cessé à la Villette, alors que les abattages de bovins se sont retrouvés au même niveau qu'au début du XXe siècle (Statistique agricole annuelle, 1960, 1970, Philipp, 2004). Les activités du marché de rassortiment des viandes ont été menées à un terme en 1970 et l'entrepôt de viande de la région parisienne a été transféré à Rungis. Quelques abattages ont trainé encore quelques années pour cesser définitivement en 1974.

Entretemps, un projet de reconstruction et de modernisation complète de la Villette avec des abattoirs industrialisés a été mise en œuvre sous l'égide de l'Etat, suscitant nombreuses critiques et étant qualifié de scandale. La ville de Paris s'était entre temps retirée de tout projet de réaménagement qui était entièrement mené par l'Etat. La reconstruction des abattoirs s'est finalement achevée mais le nouveau complexe n'a jamais fonctionné. La consommation parisienne de viande a ainsi continué à reposer

entièrement sur les viandes abattues en campagne et transitant à Rungis et dans la grande distribution.

Le marché de Rungis, s'inscrivant parmi les 19 MIN de la France, fonctionne actuellement comme un régulateur du commerce alimentaire au niveau national, chargé de balancer l'offre de viande avec la demande parisienne et de réexporter le tonnage non écoulé vers d'autres marchés en France ou à l'étranger (Chemla, 1994). Toutefois, sa part de contribution dans les apports alimentaires pour l'agglomération parisienne s'est progressivement réduite depuis son ouverture[1]. La grande distribution - alimentant les supermarchés, hypermarchés et grandes surfaces - assure aujourd'hui la part de lion de l'approvisionnement alimentaires. Selon les statistiques de l'INSEE pour l'année 2006, 70 % des dépenses alimentaires totales se font dans les grandes surfaces (INSEE, 2007).

Dans l'espace d'un siècle, le modèle centralisé d'abattages de bestiaux à proximité physique de la ville de Paris s'est effacé devant la montée du modèle décentralisé d'importation des viandes dépecées et conditionnées depuis les lieux d'élevage. Le transport des viandes vers les marchés alimentaires parisiens s'assure grâce à la réfrigération mécanique par opposition au transport sous forme d'animaux vivants, dont la conservation est une fonction métabolique.

Les raisons pour lesquelles la chaine du froid l'a emporté sur l'approvisionnement en vif ne seront pas analysées en détail dans le présent travail. On se contente simplement à en mentionner les trois qui ne nous paraissent les plus emblématiques pour la vertu de l'histoire :

Une première raison est en lien avec l'emploi des sous-produits d'abattages. Comme il a été résumé par Barles (2007c) «, l'industrie se passe progressivement au XXe siècle des matières premières d'origine animale. L'éclairage domestique au gaz puis à l'électricité (à partir de l'entre-deux-guerres) entraîne une régression spectaculaire de l'industrie stéarique. Les procédés mécaniques de raffinage du sucre remplacent le charbon animal pour la clarification. Les colorants obtenus à partir des sous-produits

[1] Voir section 2.2

de la distillation de la houille, des fours à coke, des raffineries de pétrole, contribuent à l'extinction de l'industrie du bleu de Prusse. Le celluloïd, puis la bakélite, premières matières plastiques, concurrencent les os employés à la tabletterie. Beaucoup des anciens débouchés des coproduits de boucherie se tarissent ainsi » tout en soulageant l'agglomération parisienne de ces industries indésirables. Or, les coproduits des abattages représentent près de la moitié du poids vif de l'animal et par conséquent leur transport n'avait pas de place dans la vérité économique. En revanche, leur « utilité » s'est déplacée en milieu rural, suite à leur intégration dans la fabrication des farines animales.

Deuxièmement, sous l'effet des évolutions socioéconomiques de la capitale, le métier du boucher de gros a progressivement perdu de son prestige, entrainant comme conséquences un déclin d'intérêt pour l'activité de l'abattage et l'affaiblissement de l'influence de la corporation des bouchers dans les processus décisionnels de l'administration (Philipp, 2004). En même temps, l'approvisionnement en viande fraiche conditionnée sous cellophane était, dès son apparition au début des années 1950, encouragé par les pouvoirs publics, en raison de la réforme qu'il induisait sur l'ensemble des opérations de la filière y compris le suivi des règles d'hygiène, l'économie de personnel et la réduction du nombre d'intermédiaires ; le tout se traduisant par la baisse du prix de vente de la viande (Brevot, 1953). Cette posture de la part de l'administration est venue sceller la transformation technico-économique et sociale du réseau d'approvisionnement alimentaire urbain autour d'un nouveau marché financier de technologies et d'infrastructures pour la préparation, le conditionnement et le transport routier d'aliments prêts à livrer à la consommation. Il s'agit d'une restructuration profonde, engagée dans une voie de libération économique, à la confluence des facteurs techniques, politiques et sociaux qui concourent, de fait, à la diffusion des systèmes réticulés à grande échelle (Coutard et Rutherford, 2009).

Troisièmement, étant donné l'affaiblissement progressif du coût de transport et le perfectionnement des technologies de réfrigération, les régions d'élevage avaient tout à gagner d'approvisionner la capitale en carcasses dépecées au lieu d'y expédier d'animaux sur pied, puisque en internalisant les opérations d'abattage et de

conditionnement des viandes, elles profitaient à la fois de la création des emplois et du chiffre d'affaire qui accompagnent les opérations. Ainsi, suite à ce nouveau déterminisme spatial, la région de l'Ile-de-France serait la seule source engagée pour approvisionner en bestiaux les abattoirs parisiens, pourtant, même à son apogée, elle ne suffirait pas pour en pérenniser le fonctionnement.

1.2. La filière « lait »

L'approvisionnement en lait frais relève d'une structure plus simple au sein de la ville par rapport à la viande : il nécessite moins d'intermédiaires et subit toute transformation à proximité du lieu de production. C'est peut-être pour cette raison que l'on trouve peu d'information sur l'approvisionnement en cet aliment. Celui-ci n'a fait l'objet d'aucune statistique officielle au XIXe et au début de XXe siècle et a été peu étudié de manière systématique (Dubuc, 1938, Flandrin et Montanari, 1996). Néanmoins l'approvisionnement en lait sain, riche et bien conservé pour une grande cité comme Paris en une époque des technologies de transport et de conservation rudimentaires, représentait des défis sanitaires et organisationnels complexes qui conviendrait pourtant de résoudre au vu du rôle particulièrement bienfaisant de cet aliment chez les enfants, les vieillards et les convalescents (Dubuc, 1938, Huard, 1939). Pour ces raisons, les différences entre l'approvisionnement en viande - aliment caractérisé par une certaine autonomie de transport - et en lait - denrée volumineuse et périssable dont l'acheminement exige impérativement la rapidité des moyens de transport et leur équipement en dispositifs de conservation - sont fondamentales.

On sait depuis le temps de Pasteur que le lait constitue un milieu idéal pour le développement rapide des microbes pathogènes et que son altération s'accélère sous l'action des températures élevées. Ainsi, consommer du lait ailleurs qu'à l'endroit de sa production, présuppose des mesures de prévention des conditions défavorables, la manière la plus simple et intuitive d'y parvenir étant de minimiser les distances de transport. Pourtant, antérieurement à l'apparition du chemin de fer, le transport du lait n'était pas vraiment une option, le commerce s'était donc structuré d'une manière toute particulière : au lieu d'importer du lait frais, les villes étaient directement équipées des vaches laitières importées des régions d'élevage (Fanica, 2008). L'offre

se trouvait ainsi à proximité physique directe de la demande et la traite des vaches se faisait au seuil des maisons ou, au pire, dans les marchés[1].

On ne dispose pas de chiffres précis sur le nombre des vaches vivant à l'intérieur des fortifications de Paris au début du XIXe siècle – les effectifs que l'on trouve ça et là dans la littérature sont la plupart du temps déduits des quantités de lait vendues à partir des hypothèses de production laitière unitaire. Toutefois, le commerce laitier s'était structuré autour des nourrisseurs - des petits propriétaires de vacheries - qui livraient eux-mêmes le lait sitôt trait aux habitants (Huard, 1939). De manière analogue aux boucheries particulières du début du XIXe siècle, les vacheries garantissaient en grande partie le ravitaillement en lait de la capitale avant que des structures plus élaborées soient mises au service de l'approvisionnement afin de rattraper la demande croissante de la population pour cette précieuse denrée. Au fait, le déséquilibre en termes de concentration spatiale entre l'offre et la demande s'est véritablement fait sentir dans la deuxième moitié du XIXe siècle sous le double effet de la croissance démographique et du recul de la production départementale (Dubuc, 1938). Le recours aux apports de chemin de fer pour palier à ce déséquilibre a en retour conduit à bouleverser l'organisation de la filière, en raison à la fois de l'accroissement du nombre d'intermédiaires nécessaires pour assurer le service et du regroupement des arrivages de lait en une poignée des points au sein de la ville. Le besoin de gestion et de redistribution des tonnages relevait d'une étape supplémentaire dans la chaîne d'approvisionnement. Tout ceci a engendré un nouveau déterminisme spatial aussi bien au sein de la ville que dans les lieux de production et de chargement des trains d'expédition de lait.

Le déclin de l'approvisionnement direct de la capitale au moyen des nourrisseurs peut se mesurer par la diminution progressive du nombre des vaches qu'ils disposent. On estime à partir des données statistiques pour l'ensemble du département de la Seine

[1] « Ah ! Vous êtes de parole, exact comme l'aurore. Entrez donc, monsieur, lui dit la vieille passementière en le reconnaissant. Je vous ai apprêté une tasse de café à la crème, au cas où…, reprit-elle quand la porte fut fermée. Ah ! de la vraie crème, un petit pot que j'ai vu traire moi-même à la vacherie que nous avons dans le marché des Enfants-Rouges. » H. De Balzac, *Ferragus*, [1ère éd. 1834], Paris : Gallimard - La Pléiade, 1977, t. V, p. 874 (l'action se passe en 1819-1820).

en 1839 (Block, 1858) que près de 4 000 vaches laitières approvisionnent Paris, se partagent parmi les nourrisseurs parisiens et ceux de la banlieue. Loua (1873) cite le chiffre de 1 895 bovins dans Paris en 1872 dont 1 842 vaches. Jusqu'en 1887, on compte près de 7000 vaches autour de Paris appartenant à 490 nourrisseurs dont 33 se trouvant à l'intérieur des remparts, (Fanica, 2008). Entre 1900 et 1910, le nombre des vaches laitières détenues par des nourrisseurs culmine à près de 15 000 pour marquer ensuite une diminution rapide au profit des coopératives laitières - appelées à l'époque « industries ». Ce recul s'est avéré irréversible et, d'après Huard (1939), a été accéléré sous l'effet de la naissance d'économies d'échelle. En parallèle, le processus d'urbanisation a repoussé la production plus loin de la ville, engendrant à la fois une augmentation des coûts de transport et la nécessité de mettre en place des procédés de stérilisation du lait pour en assurer la conservation au long du parcours. Ces coûts supplémentaires en sus du coût standard de fonctionnement des laiteries, déjà élevé, ont contribué à la disparition des nourrisseurs en tant qu'approvisionneurs indépendants. Les données statistiques du début de XXe siècle illustrent le transition du mode d'approvisionnement puisque le nombre des vaches laitières détenues par les nourrisseurs s'est réduit de 3 000 entre 1910 et 1913 (pour 735 nourrisseurs) pour ne compter plus que 360 vaches dans la fin des années 1930 (Statistique agricole annuelle, 1906, Huard, 1939, Fanica, 2008). Par ailleurs, les étables laitières intramuros ont pratiquement disparu dans les années 1920 marquant la fin de la période hybride et le début de l'industrialisation de l'approvisionnement parisien.

Du moment que la vache n'est plus traite dans la ville, on peut distinguer cinq étapes dans le parcours du lait du producteur et au consommateur. Il s'agit de la production à la ferme, de la collecte et pasteurisation, du groupement de la production de plusieurs fermes dans des centres de traitement en milieu rural, du transport vers Paris, et du déchargement de lait à son arrivée en ville. A partir des années 1930, la majorité du lait acheté à Paris provient de ce circuit et est qualifié de « grand mélange », puisqu'il est issu de nombreuses exploitations situées à la fois dans le département de la Seine et au-delà (Huard, 1939). Des industries laitières regroupent la production des coopératives de producteurs et se chargent du traitement et du transport de lait à Paris, tout en étant chargé d'assurer les précautions nécessaires pour conserver sa bonne tenue. On compte, en 1923, vingt-six industries laitières dans le département de la

Seine (Statistique agricole annuelle, 1933), traitant la quasi-totalité de la production du département. Dans les grands mélanges laitiers, il faut éliminer le risque qu'un des constituants du mélange soit une source de contamination pour l'ensemble du tonnage transporté en ville. Par conséquent, le lait reçoit une pasteurisation entre la traite et l'acheminement au centre de traitement régional où il subit une inspection spécialisée pour éliminer les volumes impropres avant le dernier chargement (Huard, 1939).

Pendant nombre de décennies, le transport du lait s'effectue par le chemin de fer circulant la nuit pour favoriser le maintien ininterrompu de températures inférieures à 4° C, selon les prescriptions des spécialistes pour une conservation effective (Huard, 1939). Le transport se faisait initialement au moyen des wagons ordinaires dans lesquels étaient alignés les pots de lait, ainsi qu'en wagons spéciaux recevant de la glace dans une double paroi comme on en faisait l'usage dans le transport de la viande depuis la fin du XIXe siècle. L'apparition en 1927 des wagons-citernes isothermes a fait augmenter la capacité des envois qui provenaient désormais en partie des provinces plus lointaines (voir chapitre 3) et, dans l'espace de trois ans, les envois par wagons ordinaires s'est réduit de moitié (Dubuc, 1938). Cette nouvelle technologie a imposé la construction de gares laitières dans Paris où s'effectuait le transvasement du lait dans des bidons, pots et bouteilles pour permettre par la suite sa distribution auprès des détaillants et consommateurs. Huard (1939) rapporte l'existence de cinq gares laitières vers la fin des années 1930, dont deux sur la rive gauche et trois sur la rive droite, équipées des machines pour la mise automatique en bouteille ou des équipements spéciaux en sous-sol pour la fabrication des fromages frais. La gare de Paris-Nord en était une.

Ce n'est que l'émergence, dans les années 1960, de la grande distribution (Daumas, 2006) et la mise en place du procédé UHT (ultra haute température) - alternative prometteuse à la pasteurisation pour la stérilisation du lait - dans les années 1970, qui bouleversent à nouveau le mode d'approvisionnement parisien. Le traitement UHT permet un stockage pendant des mois à température ambiante contrairement à la pasteurisation qui n'assure la bonne conservation pendant quelques jours au maximum. Toute manipulation de transformation et de transvasement se déplace maintenant à l'extérieur de la ville et le lait ne transite plus par les gares laitières pour

parvenir aux détaillants. Le transport se fait surtout par camion et le lait arrive en bouteille et en carton (Boisard, 1994). La conservation étant garantie en l'absence de chaîne du froid, le lait devient un produit peu exigeant en matière de stockage et présente un avantage évident aux yeux de la grande distribution dont la part de marché ne cesse croître (Boisard, 1994). Les mutations survenues dans le mode d'approvisionnement ont engendré la disparition des gares laitières dans les années 1970, dispositifs assurant pour le lait une fonction équivalente à celle des abattoirs pour la viande.

Mis à part les étables des vaches dans l'enceinte de Paris - en forte diminution déjà à partir de la deuxième moitié du XIXe siècle – et l'aménagement des gares laitières à partir du début de XXe siècle, l'essentiel de l'influence structurante de l'approvisionnement en lait de la capitale porte déjà lors du XIXe siècle sur l'extérieur du périmètre de Paris. Du fait de son importance dans l'alimentation humaine lors des siècles précédents, la production laitière a eu la priorité dans l'allocation des terres agricoles encerclant la ville, entraînant ainsi la diminution de la culture du blé au début du XXe siècle du fait de l'extension des prairies (Huard, 1939). Le lait étant précieux dans l'alimentation humaine, on en allouait plus ou peu dans l'alimentation des veaux. Dépourvus de lait, les veaux étaient conduits très jeunes à l'abattoir, entraînant la baisse du nombre des bovins mâles, reproducteurs de cheptel. Bien que des remplaçants fussent mobilisés dans des régions d'élevage voisines en fonction des besoins, la rupture du mécanisme de reproduction et la dépendance de l'extérieure ont plausiblement contribué à la disparition progressive de l'élevage dans la région d'Ile-de-France. A titre d'exemple, au début du XXe siècle, il n'existe dans le département de la Seine qu'un jeune veau âgé de moins d'un an toutes les 342 vaches (Statistique agricole annuelle, 1906). Ce taux est particulièrement faible par rapport au taux moyen national qui, à la même année, s'établi à un veau pour 3,8 vaches. Cet écart de près de deux ordres de grandeur est éloquent du degré de spécialisation de l'élevage bovin dans une zone large autour de Paris où la sécrétion laitière ne remplissait qu'accessoirement ses fonctions de renouvellement du cheptel. La demande parisienne s'est imposée jusqu'au début du XXe siècle comme un choix stratégique pour les éleveurs avoisinants. Après l'analyse, cette fois quantitative, de l'évolution de la démographie parisienne et de ses

consommations de viande et de lait entre le début des XIXe et XXIe siècles, on verra, dans le chapitre 3, l'évolution des aires géographiques d'approvisionnement de la capitale.

1.3. Conclusion

Ce bref regard rétrospectif et qualitatif sur l'approvisionnement parisien en viande et en lait, du début de XIXe siècle à nos jours, a eu comme objectif de résumer quelques aspects autour des mécanismes d'approvisionnement et leur évolution en fonction de la démographie et des avancés technologiques. Après plusieurs siècles d'approvisionnement au moyen de la vache urbaine et des abattages de rues, les pouvoirs publics urbains ont investis en matière de marchés, abattoirs et gare ferroviaires laitières pour répondre à la demande alimentaire croissante et aux exigences d'hygiène de la vie urbaine. Jusqu'à dans la première moitié du XXe siècle, c'est surtout sous forme d'animaux vivants que s'effectue l'approvisionnement en viande, y parvenant obligatoirement à pied jusqu'aux années 1850, et progressivement au moyen du chemin de fer à partir de la deuxième moitié du XIXe. Dans l'espace de quelques décennies l'approvisionnement a transité dans la main de la grande distribution s'assurant notamment par la route. La disparition progressive du périmètre urbain des dispositifs spécifiques de transformation des aliments, témoigne de la transformation de la ville vers un réceptacle de produits finis, conditionnés par des industries agricoles décentralisées dans les campagnes et délivrés par la grande distribution. Dans le chapitre prochain on s'intéressera à quantifier et à suivre l'évolution depuis le XIXe siècle de la consommation parisienne de viande et de lait. Cette démarche présuppose à la fois la délimitation de la population, que l'on puisse qualifier de « parisienne », sur la base des critères d'uniformité alimentaire et la connaissance des flux d'importations. On effectue dans le prochain chapitre le croisement des données démographiques urbaines et celles sur les flux alimentaires.

Chapitre 2 : Démographie parisienne et consommation de viande et de lait, XIXe - XXIe siècles

2.1. Préalable

Un des moteurs des diverses modifications survenues dans le mode d'approvisionnement en viande et en lait de Paris a été la croissance démographique. Pour la viande, on s'aperçoit par l'exploitation des données statistiques des consommations individuelles particulièrement élevées. Paris a dans son histoire récente été un grand consommateur de viande ainsi que l'attestent des études comparatives entre Paris, d'autres villes françaises et la moyenne nationale (Statistique agricole annuelle, 1882). Les chiffres dont on dispose pour la fin du XIXe siècle montrent par exemple que la consommation parisienne de viande s'élevait à près de 130 % de celle des autres villes françaises, alors qu'elle représentait près de quatre fois celle de l'habitant en milieu rural (Statistique agricole annuelle, 1882). Selon la même source, la consommation de viande a progressé de façon absolument régulière entre 1840 et 1882 pour la France entière, avec des augmentations du même ordre entre la consommation urbaine et rurale. Pendant cette période, Paris a tiré le plus grand profit d'une production nationale croissante. Pourtant, toutes les données de la littérature sur la consommation de Paris se limitent à Paris *intramuros*. Aucune étude n'examine la consommation de la banlieue. En plus, même pour Paris, les données se raréfient dès la fin du XIXe siècle en raison des facteurs qu'on a rapidement évoqués dans le chapitre précédent et qu'on reprendra dans les sections suivantes.

En ce qui concerne le lait, la consommation parisienne a fait l'objet de peu d'études mais qui apportent des données précieuses sur les consommations au XIXe et au début du XXe siècle. Ces données, contrairement au cas de la viande, portent explicitement sur une population parisienne urbaine plus large que celle *intramuros*.

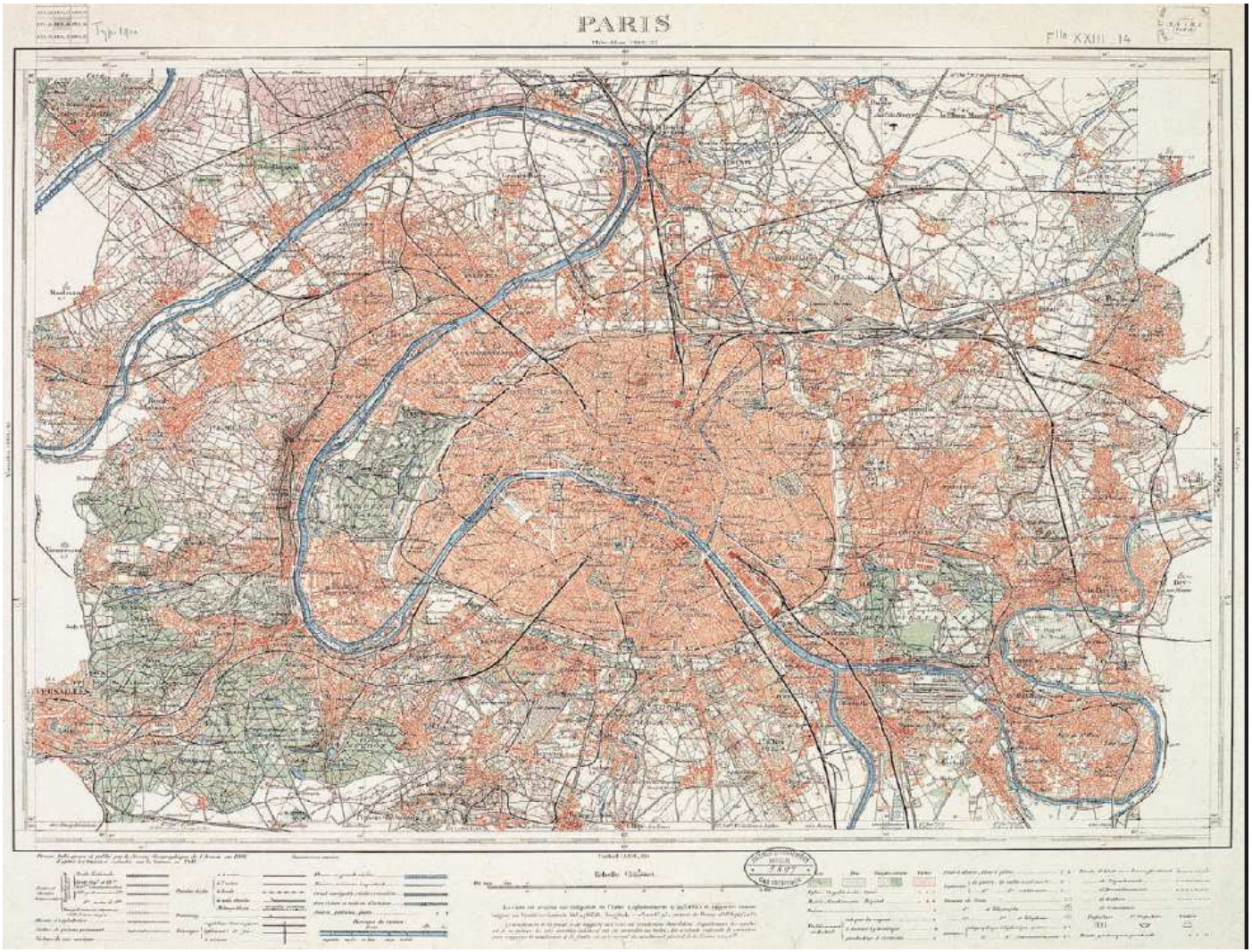
A partir des premières décennies du XXe siècle, les données sont très disparates. Ceci concerne la viande dès les années 1930 et le lait une décennie plus tard. A partir de ces dates, on explore la possibilité de déduire les consommations parisiennes à partir des données de l'INSEE pour la France entière et des bilans d'approvisionnent

nationaux. On introduit ce chapitre avec une discussion sur l'évolution de la démographie parisienne qui servira comme base au calcul des consommations de l'agglomération aux différentes périodes.

2.2. Evolution démographique de Paris, XIXe – XXIe siècles

L'estimation de la consommation moyenne de viande par individu nécessite de croiser des données démographiques avec des données relatives à la production des abattoirs et aux importations des viandes foraines. Or, la progression asymétrique en termes géographiques entre les processus de l'urbanisation et de l'approvisionnement induit des difficultés au croisement des données démographiques avec des données sur les flux d'aliments, d'où la difficulté de définir la ville d'un point de vue alimentaire. Traditionnellement, on se réfère aux villes à l'appui des notions géographiques - telles la continuité de l'espace bâti ou les limites administratives – qui se désintéressent à la dimension « organique » du système urbain et aux différents flux de matières et d'énergie qui en assurent le fonctionnement. Mais les mécanismes de ravitaillement constituent la condition préalable à toute sédentarisation sociale et précèdent le développement de toute activité socioéconomique (Diamond, 1997). Une définition de la ville d'un point de vue alimentaire a été apportée par François Ascher : « la ville est un groupement des populations qui ne produisent pas elles-mêmes leurs moyens de subsistance alimentaire» (Ascher, 2001). Cette définition s'approche de nos préoccupations et pose le principe à partir duquel on suivra l'évolution depuis le début du XIXe siècle de la démographie parisienne et de sa consommation de viande et de lait. Les données démographiques à retenir pour délimiter cette population – qu'on appellera agglomération parisienne - doivent satisfaire au critère de l'uniformité alimentaire. Mais sachant que le rythme de l'accroissement démographique de Paris n'a pas été identique à celui de l'accroissement du pouvoir centralisant et de l'aire de desserte des différents marchés alimentaires (Halles centrales et marchés de rassortiment des abattoirs, puis marché de Rungis et grande distribution), la consommation de l'agglomération parisienne doit être calculée sur la base d'une consommation unitaire, représentative de la consommation de l'habitant aggloméré moyen.

Des données historiques sur la consommation de viande de la *banlieue parisienne* s'absentent des statistiques officielles. Les données se limitent à Paris *intramuros*. Au fait - à notre connaissance -, Paris et sa banlieue n'ont jamais été étudiée conjointent dans une perspective historique ni par les services statistiques ni dans le cadre d'autres études historiques. Pourtant, la population de la banlieue parisienne s'est rapidement accrue au cours du XIXe siècle aussi bien en termes absolus qu'en proportions par rapport à la population *intramuros*. Cette dernière représentait la grande majorité de la population du département de la Seine au XIXe siècle mais plus à partir du début de XXe. On dispose des données des recensements s'effectuant - sauf exception - tout les cinq ans, à partir de 1801 pour la ville de Paris et à partir de 1806 pour le département de Seine. La population *intramuros* s'élevait à plus de 80% de la totale jusqu'à la fin des années 1830 et à plus de 90 % en 1860 suite à l'annexion des communes périphériques. Elle s'est à nouveau réduite à 80 % en 1880, pour atteindre 70 % en 1910, 60 % en 1930 et 50 % en 1964, date de la suppression administrative du département de la Seine. A partir de cette date, Paris avec ses 2 millions d'habitants n'est plus qu'un parmi les sept départements de la région Ile-de-France dont la population totale actuelle dépasse les 11 millions d'habitants. La carte 2.1 montre l'état d'urbanisation du département de la Seine au début en 1906 (Pinon, 2004).



Carte 2.1 : Etat d’urbanisation du département de la Seine en 1906. Source : Pinon, 2004.

Compte tenu des proportions de population hors Paris *intramuros* et de la carte d'urbanisation du département de la Seine, la banlieue parisienne était déjà à la fin du XIXe siècle non négligeable. Mais malgré sa croissance et sa proximité de la capitale, sa consommation n'a guère été étudiée. Ainsi, si le poids de Paris dans la population totale explique pour la plus grande partie du XIXe siècle cette omission, elle ne la justifie plus à partir *grossomodo* des années 1880. A cette date l'approvisionnement repose à la fois sur les introductions de viandes foraines dans les marchés de gros et à la production des abattoirs locaux qui, quant à elle, se divise en deux lots : le premier - que l'on appelle « pour Paris » dans les statistiques - est destiné à la consommation de Paris *intramuros* et le deuxième – que l'on désigne sous le nom « pour l'extérieur » - concerne des populations géographiquement indéterminées habitant hors rempares. A partir des années 1880, la part de viandes pour le compte de Paris est en forte diminution au profit du tonnage « pour l'extérieur » (Philipp, 2004) et cette diminution est, plus ou moins, proportionnelle à l'écart arithmétique entre la population *intramuros* et celle du reste du département de la Seine (Chatzimpiros et Barles, 2010a). De la viande « pour l'extérieur » est également réexpédiée en dehors du département, mais la régularité de ces envois est douteuse. Des villes à l'est du bassin parisien telles que Reims, Charleville, Givet et Longwy et des régions dépourvues d'élevage sont susceptibles de s'approvisionner sur ce tonnage (Baudier, 1914).

Rien que le nom vague accordé au lot des viandes destinées ailleurs qu'à Paris *intramuros*, témoigne d'un mélange de désintérêt et de difficultés pratiques pour préciser les récepteurs de ces envois. Mais ceci tient en premier lieu au fait que la population de la périphérie n'était pas perçue comme de la population parisienne car la ville de Paris ne s'est guère préoccupée, jusqu'à l'entre-deux-guerres, de la banlieue et de ses besoins en termes de services urbains. Mais les critères discriminants sont purement administratifs. Du fait de leur voisinage géographique, la population de Paris et celle de la banlieue ont vraisemblablement formé un même marché alimentaire au préalable de toute démarche d'intégration administrative, et ceci en raison de l'accélération que les besoins alimentaires de la ville induisent sur sa propre croissance. De petits paysans s'installent au voisinage de la grande Ville dont la population constitue un débouché garanti pour leur production agricole. Ce

voisinage fonctionnel déclenche par la suite un processus de spécialisation qui n'en constitue pas moins un moteur d'urbanisation. Les exemples sont nombreux. A partir du XIXe siècle, les cultures de champignons à l'Ouest de Paris, les cultures maraichères au nord et au sud (Troquet et al., 2003), les cultures florales de plein air ou de serre, les cultures légumières irriguées des champs d'épandage, les murs à pèches à Montreuil et d'autres cultures fruitières des environs font l'objet d'une production spécialisée (Lebeau, 1959) qui éloigne les agriculteurs de leur autonomie alimentaire. Dans un premier temps, la spécialisation conduit à la dépendance des denrées qu'on ne produit pas soi-même. Dans un deuxième temps, des facteurs tels que la progression de l'espace bâti et le développement économique constituent des forces supplémentaires pour l'achèvement de la transition des paysans vers un mode de subsistance (et plus généralement de vie) entièrement urbain, comme l'illustre cet exemple caractéristique de la fin des années 1930 : « un propriétaire de vacherie en banlieue parisienne trouvait dix fois plus d'intérêt à vendre ces locaux à un garagiste plutôt que de continuer à opérer son exploitation pour l'approvisionnement parisien» (Huard, 1939). Le XIXe et début de XXe siècle ont été l'apogée de cette vie rurale, mais provisoire, en banlieue parisienne, assez spécifique[1] par ailleurs à l'échelle nationale : alors que la population agricole active de la France a diminué de 3,8 % entre 1896 et 1906, celle du département de la Seine a augmenté de 8,9 % pendant la même période (Statistiques Agricoles Annuelles, 1918-1921). L'intensité du phénomène reflète le rythme d'agrandissement du marché parisien et l'ampleur de son influence sur la structuration socioéconomique des territoires environnants. Pourtant, au fil du temps, de la même manière que l'urbanisation parisienne a créé les conditions propices à l'installation des paysans-fournisseurs des vivres aux alentours de la ville, elle a également entrainé leur disparition en fonction de l'évolution des conditions socioéconomiques. Du moins d'un point de vue alimentaire, Paris et sa banlieue se sont progressivement apparentés en une même unité urbaine qui remontre au XIXe siècle. Leur besoins alimentaires ont progressivement été satisfaits par des zones rurales de plus en plus éloignées, en raison, entre autres, de la non-disponibilité de main d'œuvre pour assurer le travail agricole (Billé, 1930).

[1] Mais pas forcement unique

De nombreux exemples prouvent de manière qualitative l'urbanisation progressive du mode de vie des habitants de la zone entourant Paris. Toutefois, ce raisonnement doit s'accompagner des chiffres afin de suivre la transition démographique de l'agglomération parisienne. Quelles sont les données statistiques à retenir ?

Les recensements officiels s'effectuant à l'échelle des unités administratives, il n'y a pas de données démographiques pouvant répondre directement à notre interrogation. On va donc devoir se servir des celles qui s'approchent le mieux des critères d'uniformité alimentaire.

Il est primordial de cerner la population résidant autour de Paris et consommatrice des aliments présentés aux marchés urbains. Ceci revient à exclure à la fois toute population des alentours de Paris susceptible d'être autonome pour son alimentation en viande, ainsi que tout consommateur des milieux tiers dont l'alimentation s'appuie sur les marchés parisiens. Quant à la deuxième condition, il s'agit de se limiter au groupe de population pouvant par sa localisation être considéré comme faisant partie de l'agglomération parisienne. Par ailleurs, la première condition est liée à la densité de population, notion étroitement liée à l'artificialisation des sols désaffectés de leur fonction productive. Une condition préalable à l'autoconsommation est la disponibilité locale des terres productives fournissant les fourrages nécessaires à l'élevage. Par conséquent, pour délimiter la population recherchée il est pertinent de s'approcher de la notion de densité d'habitat qui est en lien direct avec l'utilisation potentielle des sols à des fins de production alimentaire. De cette manière, on limite la probabilité que la part de l'autoconsommation au sein de la population soit élevée. Etant donné par exemple que 45 % du territoire régional actuel de l'Île-de-France est agricole, il est probable qu'une fraction des Franciliens actuels produisent eux-mêmes leurs subsistances alimentaires.

L'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques) a, pour la première fois, réalisé une délimitation de l'unité urbaine de Paris à l'occasion du recensement de 1954. La délimitation a été basée sur une appréciation empirique de l'affectation des sols et de la densité du bâti. Selon l'INSEE la « notion d'unité urbaine repose sur la continuité de l'habitat : est considérée comme telle un ensemble

d'une ou plusieurs communes présentant une continuité du tissu bâti (pas de coupure de plus de 200 mètres entre deux constructions) et comptant au moins 2 000 habitants. La condition est que chaque commune de l'unité urbaine possède plus de la moitié de sa population dans cette zone bâtie » (http://www.insee.fr). Les unités urbaines sont spatialement redéfinies à l'occasion de chaque recensement de la population et peuvent s'étendre sur plusieurs départements. De nouvelles unités urbaines ont été ainsi constituées lors des recensements de 1962, 1968, 1975, 1982, 1990 et 1999. On dispose de ces données à partir de l'année 1968. En parallèle, une autre proposition a été faite par Dupeux (1981) dans une étude consacrée à l'évolution de la population urbaine française depuis le début du XIXe siècle. La différence dans la définition de Dupeux par rapport à celle de l'INSEE tient au seuil choisi pour l'inclusion des populations communales dans l'agglomération urbaine, que Dupeux a fixé à 3 000 habitants. Ces estimations, disponibles à partir du recensement de 1811 et jusqu'en 1968, sont effectuées, sauf exception, tous les dix ans et fournissent une source précieuse pour l'appréciation de l'extension urbaine de la ville de Paris lors des XIXe et XXe siècles. A partir de l'année 1968, on dispose des données de l'INSEE selon sa définition de l'unité urbaine.

Pour ce qui est des dates antérieures à 1811, date de début des estimations de Dupeux, il n'y avait pas d'unité urbaine autour de Paris. Mis à part le fait que la population de la ville s'élevait en 1811 à plus de 90 % de celle du département entier, il y a longtemps eu des interdictions de bâtir au-delà des murs de la ville, ce qui empêchait la constitution d'une telle unité.

Si on combine les données sur la population de Paris intramuros de 1801 à 1811 avec les estimations de Dupeux sur l'unité urbaine de 1811 à 1968, succédées par celles de l'INSEE de 1968 à nos jours, on obtient pour l'ensemble de la période de 1801 à 2004, une courbe de la population formant un ensemble urbain autour de Paris. Cette population reste légèrement inférieure à celle de la Seine jusqu'en 1956, mais la dépasse à partir de cette date et jusqu'à la suppression administrative du département en 1964. D'autre part, les données sur la population régionale de l'Île-de-France depuis 1851 permettent de comparer l'évolution démographique de la région à celle de l'agglomération parisienne. La figure 2.1 montre ces évolutions sur l'ensemble de

la période d'étude à la fois pour la ville de Paris, le département de la Seine, l'agglomération de Dupeux, l'unité urbaine de l'INSEE et la région Ile-de-France. Probablement en raison de la différence de seuil utilisé dans les définitions de Dupeux et de l'INSEE pour la population agglomérée, un petit saut du nombre des habitants apparaît entre les années 1967 et 1968. Toutefois, ce saut s'inscrit bien dans la tendance générale de la transition démographie entre 1950 et 1970, période reconnue pour la forte croissance urbaine de l'ensemble de la France (Gérard, 1975). On retient comme population de l'agglomération parisienne, celle de Dupeux jusqu'en 1967, puis à partir de 1968 celle de l'INSEE. L'agglomération parisienne compte actuellement 10 200 000 habitants.

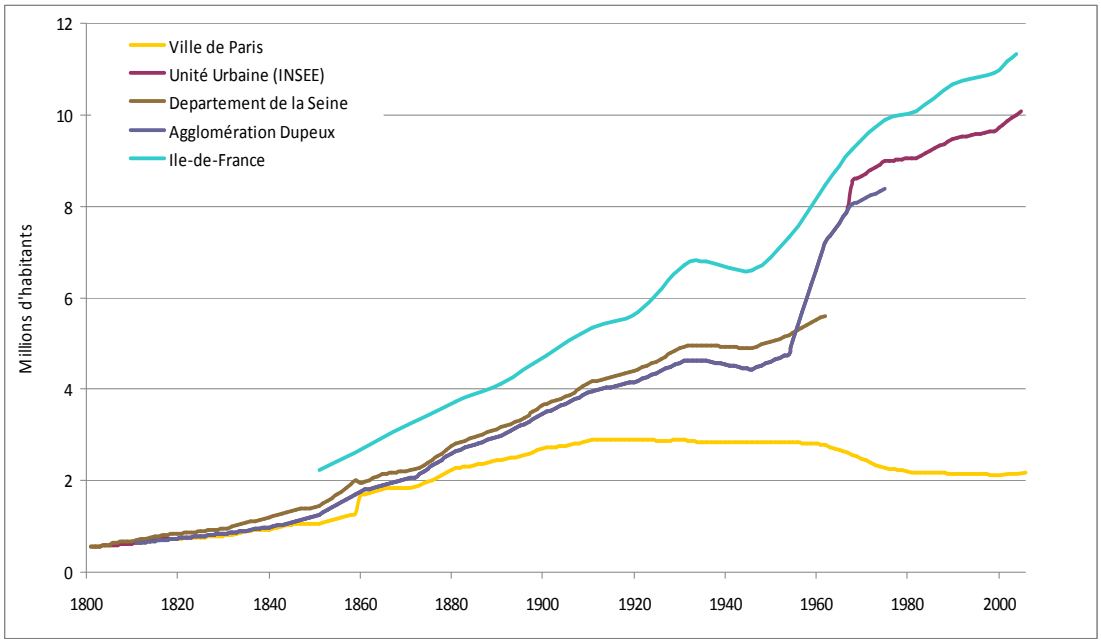


Figure 2.1 : Evolution de la population de Paris, de l'agglomération et du département de la Seine entre 1801 et 2004 (voir dans le texte pour plus de précisions). Source des données : Recensements de la population, Dupeux, 1981.

2.3. Consommation de viande de l'agglomération parisienne

Revenons alors à la consommation de viande de cette population. Des efforts pour estimer la consommation de Paris remontent au moins jusqu'au XVIII siècle, mais l'ouvrage de Husson (1856) vient pour nous apprendre que « ce qui a été recueilli avant Lavoisier sur les consommations parisiennes mérite peu de confiance ». Lavoisier avait entrepris des estimations sur la consommation de viande à Paris pour une année qu'il n'a pas précisée mais qui se situe probablement dans les années 1780

(Husson, 1856). A cette époque et jusqu'en 1847, le droit d'octroi s'appliquait aux animaux introduits par les marchés aux bestiaux à mesure d'une taxe par tête d'animal, obligeant ainsi toute estimation de la consommation à passer par une spéculation préalable sur le rendement en viande des bestiaux. Les relevés de l'octroi à partir de 1847 - supprimés en 1943 – et les abattoirs de la Villette à partir de 1867 ont mis en évidence des poids nets moyens tels qu'on les montre pour une sélection de dates dans le tableau 2.1. Les catégories en vigueur pour la taxation ont fait l'objet de modifications comme ceci apparaît dans le tableau. Les poids correspondent aux poids nets des animaux à l'abattage.

Tableau 2.1 : Poids nets de la viande pour les animaux importés à Paris, d'après la taxation de l'octroi (kg). Sources : Husson, 1856, Statistique agricole annuelle, 1885, 1906, 1931.

	Bœuf	Vache	Taureau	Gros bovins	Veau	Porc	mouton
1847	350	230	-	-	70	91	22
1884	347	235	-	-	78	81	20
1905	382	346	402	-	88	90	24
1930	-	-	-	325	67	77	18

A la lumière de ces chiffres, le tonnage ressortant des abattoirs est connu avec une certaine précision à partir de 1847, permettant - du moins pour le XIXe et le début de XXe siècle – d'évaluer les consommations de viande de Paris *intramuros*. Néanmoins, dès le début du XXe siècle, des facteurs tels que l'urbanisation de la banlieue dans un premier temps, et la multiplication des sources concourant à l'approvisionnement dans un second ont complexifié, voire rendu impossible, le suivi de la consommation parisienne au moyen des importations de viande par les marchés. Cette difficulté n'est pourtant pas spécifique au commerce de la viande. L'approvisionnement de la banlieue en poisson, fruits et légumes aux Halles centrales posait les mêmes difficultés quant à la possibilité de chiffrer la consommation des Parisiens en ces denrées (Reynier, 1945, Demangeon, 1928).

Des données fiables sur la consommation sont par conséquent très partielles : d'un côté elles ne concernent qu'un nombre restreint de dates, toutes au XIXe et début de XXe siècle, et d'autre côté elles ne portent que sur la consommation de Paris *intramuros*. En effet, les années pour lesquelles on dispose de données se situent dans la période pendant laquelle la population de la ville de Paris était largement

majoritaire dans celle de l'agglomération. Le calcul se faisait alors en croisant les données sur le tonnage total des importations avec la population qui en était réceptrice (Statistiques officielles de la ville de Paris et du département de la Seine, Statistiques agricoles Annuelles, 1885-1906. On tenait registre du nombre des bestiaux et de la production d'abattoirs locaux en viandes pour Paris, auxquels on rajoutait l'ensemble du tonnage des viandes foraines arrivant aux marchés de gros (Halles centrales et marchés de rassortiment des abattoirs) que l'on divisait par la population de Paris pour en déduire sa consommation. Néanmoins, ce calcul peut comporter des surestimations si la part des viandes foraines puisées pour le compte de la banlieue dans les marchés de gros est importante. Contrairement à l'octroi qui fournit des informations permettant de connaître le nombre exact des animaux destinés à la consommation des Parisiens, les arrivages de la viande « à la main » dans les marchés de gros se partagent dès le début du XIXe siècle entre Paris et la banlieue (Husson, 1856). Toutefois, c'est surtout à partir de la fin du XIXe siècle que ce partage risque de fausser les estimations sur la consommation de Paris *intramuros* à a fois en raison de la multiplication des arrivages de viande foraine aux marchés de gros et de la forte croissance démographique de la banlieue. Faute des données permettant d'évaluer les enlèvements de lots de viande par les bouchers de la banlieue, une certaine surestimation, quoique faible, risque d'exister dans les statistiques officielles de l'administration.

La période sur laquelle le calcul de la consommation est le plus aisé s'étend ainsi de 1801 à 1867, pendant laquelle l'unité urbaine se limite pratiquement à la ville de Paris et tire l'essentiel de son approvisionnement des apports en animaux vivant des marchés de Sceaux, de Poissy et de la Chapelle pour les bovins et les ovins, et de Saint-Germain pour les porcs. On dispose par l'octroi de la série complète des bestiaux (bœufs, vaches, veaux, mouton, porcs) importés sur pied aux abattoirs de Paris (Thomas, 1873). En appliquant à ces arrivages le rendement en viande pour l'année 1847 (cf. tableau 2.1) on obtient le tonnage mis à disposition par les abattoirs. A côté de ce tonnage, des apports en carcasses abattues dans les provinces concourent à l'approvisionnement dès le début du XIXe siècle mais restent relativement faibles jusque dans les années 1860 (Husson (1856). En revanche, ils sont progressivement stimulés à partir des années 1850, par l'effet conjugué de l'ouverture de la voie ferrée

et de l'autorisation en 1849 de la vente en gros de viandes, à la criée des Halles centrales (Leteux, 2009). Malheureusement, les apports de viande à la main, contrairement aux arrivages sur pied, nous sont connus sans répartition entre les viandes bovine, ovine et porcine, ce qui introduit une difficulté pour le calcul de la consommation par type de viande. Pour s'en affranchir on a fait la simple supposition que la répartition (entre bovins, moutons et porcs) des viandes transportée sous forme des carcasses est identique à celle du tonnage arrivant sur pied. Cette hypothèse risque de comporter une légère surestimation pour la viande de gros bovins et de moutons, du fait que ces animaux jouissent d'une autonomie de transport plus élevée que les veaux et les porcs dont le transport des carcasses par le chemin de fer peut être considéré prioritaire. Quoiqu'il en soit, cette surestimation serait très faible.

Si l'on considère les dates de début (1801) et de fin (1867) de cette période, le tonnage total gagnant la capitale a évolué plus ou moins au même rythme que la croissance démographique de la ville de Paris, soit une augmentation de 215 % pour le premier contre 230 % pour la deuxième. Pourtant, des fluctuations de consommation plus ou moins importantes existent tout au long de cette période. Le tableau 2.2 montre l'évolution globale de la consommation des Parisiens par type de viande, et de la part contributive des arrivages de viande « à la main » par périodes décennales entre 1801 et 1867.

Tableau 2.2 : Consommation de la viande à Paris (kg/hab/an) et parts d'arrivages de la viande « à la main » entre 1801 et 1867. Moyennes décennales. Sources de données: Thomas, 1873, Husson, 1856, Philipp, 2004.

Kg/hab/an	Bovine	Mouton	Porc	Total Paris	% « à la main »
1801-1810	54,8	13,1	9,0	76,9	1%
1811-1820	47,8	10,8	9,6	68,2	2%
1821-1830	46,8	11,2	11,0	69,0	4%
1831-1840	40,2	9,8	9,2	59,2	5%
1841-1850	39,0	10,8	6,4	56,2	8%
1851-1860	45,8	13,2	5,3	64,3	18%
1861-1867	50,8	17,0	7,4	75,2	14%

Les arrivages de viande à la main sont négligeables au début du XIXe siècle. Elles gagnent en revanche vite en importance dans les années 1850 mais marquent une nouvelle diminution en termes de pourcentage dans la prochaine décennie pour retomber à moins de 15 % en 1867, date d'ouverture du complexe de la Villette. La réduction proportionnelle de ces arrivages ne doit pourtant pas occulter la progression constante de ce mode d'approvisionnement dont l'augmentation est d'un facteur 33 entre 1800 et 1867. Par ailleurs, le développement du réseau ferroviaire – l'ouverture progressive de la ligne Paris Bordeaux dont la section Paris Orléans a été construite entre 1839 et 1843, celle d'Orléans à Tours, de 1843 à 1846, celle de Tours à Bordeaux de 1845 à 1853 étant la plus ancienne (Billé, 1930) - coïncide avec le rehaussement de la consommation par habitant (toute viande confondue) ayant atteint leur niveau le plus bas en 1848 (figure 2.2). Les difficultés d'approvisionnement de la capitale en expansion, dont témoigne le recul entre 1810 et la fin des années 1840 de la consommation de viande par habitant, se résolvent au moyen du chemin de fer. En reliant directement les régions d'élevage avec les abattoirs urbains, le chemin de fer privilégie l'approvisionnement des Parisiens au détriment d'autres consommateurs. La consommation parisienne de viande par habitant rejoint donc dans l'espace d'environ 70 ans le niveau record du début du XIXe siècle, malgré la forte transition urbaine de la période.

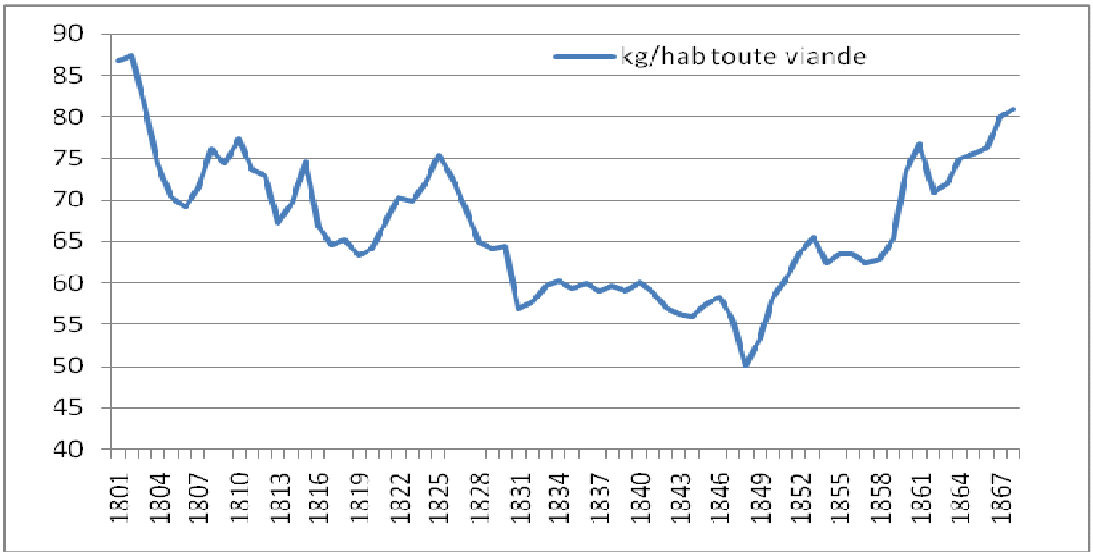


Figure 2.2 : Consommation par habitant kg/hab/an (toute viande confondue). Source, Thomas, 1873, Husson, 1856.

La consommation de la figure 2.2 est spécifique aux habitants de Paris *intramuros*. Bien que la population de la banlieue soit relativement faible à cette époque, on doit tout de même en déterminer la consommation afin d'établir une consommation moyenne pour l'ensemble de l'agglomération. Ne disposant pas de données explicites, on doit l'estimer à partir de la consommation des Parisiens. Comme on l'a vu au début du chapitre, la consommation de Paris s'élevait au XIXe siècle à près de 130 % de celle des autres villes françaises (Statistique agricole annuelle, 1882). Il est d'ailleurs probable que cette différence soit pour la deuxième moitié du siècle liée au fait que ce n'est qu'à Paris que les infrastructures ferroviaires profitent durablement à l'approvisionnement (Leteux, 2009). Faute de données plus précises, on affectera à la banlieue le niveau de consommation des autres villes françaises en admettant par ailleurs que la part de consommation de chaque type de viande est identique à celle du Parisien *intramuros*. Notons que des différences socioéconomiques et de mode de vie entre Paris et la banlieue veulent qu'au XIXe siècle, les ouvriers de la banlieue consomment moins de bœuf et plus de porc que le Parisien *intramuros* (Husson, 1856, Philipp, 2004). Pourtant, ces observations ne sont pas suffisamment fines, en même temps qu'elles manquent de continuité temporelle pour permettre une pondération qui en tiendrait compte. Pour cette raison, on se contente de corriger le niveau de consommation des habitants de la banlieue en faisant l'hypothèse que les différentes viandes sont consommées dans les mêmes proportions que par le Parisien *intramuros*. A l'aide de ce différentiel de 30 %, la consommation totale par habitant moyen de l'agglomération est présentée au tableau 2.3. Y figure également l'écart entre la moyenne pondérée et les consommations de Paris *intramuros*.

Tableau 2.3 : Consommation moyenne décennale de la viande par habitant de l'agglomération (viande bovine, porcine ovine confondues) et écart par rapport à la consommation de Paris *intramuros.* Sources de données : Thomas, 1873 et cette étude.

Kg/hab/an	Consommation moyenne de l'ensemble de l'agglomération kg/hab	Ecart entre Paris et la moyenne pondérée kg/hab
1801-1810	76,9	0,0
1811-1820	68,2	0,0
1821-1830	68,4	0,6
1831-1840	58,7	0,5
1841-1850	55,2	1,0
1851-1860	61,5	2,8
1861-1867	74,3	0,9

A partir de l'année 1867, le marché de la Villette devient le grand marché d'approvisionnement en animaux vivants pour toute espèce animale (bovins, porc et mouton) alimentant Paris et l'extérieur. Des animaux y arrivent principalement en chemin de fer mais aussi à pied depuis des pays d'élevage pour être redistribués entre l'abattoir de la Villette et ceux de la rive gauche (remplacés par celui de Vaugirard en 1896). Comme pour la période précédente, la consommation de Paris *intramuros* peut être estimée sur la base des quantités de viandes ressortant des abattoirs à destination de Paris et des apports de viande à la main en provenance des abattoirs provinciaux introduites dans les marchés de gros. Le tonnage pour chacune de ces sources concourant à la consommation de Paris est rapporté dans les statistiques officielles avec une dissociation en deux groupes : la viande de boucherie (viande bovine et ovine confondues) et la viande de porc (Statistiques Agricoles Annuelles pour les années par exemple entre 1885-1922). Une répartition plus fine de la viande de boucherie entre viande bovine et ovine est possible, quoiqu'approximative, en remontant à la source de ces données. Pour les arrivages de viande à la main, on dispose pour quelques dates des relevés du marché de gros des Halles dans lesquels les arrivages apparaissent explicitement par type de viande (Statistique agricole annuelle, 1885-1908). Bien que ces arrivages ne recouvrent pas la totalité de la viande à la main introduite aux marchés de gros de la capitale (d'autres marchés de gros recevant de la viande foraine existent à la Villette et à Vaugirard mais d'importance restreinte jusqu'à la fin des années 1910), et bien qu'une partie du tonnage soit enlevée pour le compte des populations à l'extérieur de l'agglomération, on les admettra représentatifs dans la désagrégation souhaitée pour la viande de boucherie foraine. Selon alors les relevés du marché des Halles, la viande bovine y est pour 80 %, proportion qui varie peu d'une année à l'autre.

En ce qui concerne la production des abattoirs, ce qui en sort provient de la somme des animaux présentés et vendus au marché de la Villette et des introductions directes des bestiaux achetés sans l'intermédiaire du marché auprès des éleveurs, mais surtout introduits aux abattoirs par la « quatrième rampe » expressément faite pour contourner le marché (Philipp, 2004, Leteux, 2009). La « quatrième rampe » est un lien direct entre la gare de Paris-Bestiaux et l'abattoir, contrairement aux trois autres rampes qui dirigent le bétail au marché aux bestiaux. Il en résulte évidemment que le

tonnage qui sort des abattoirs est supérieur au tonnage introduit sur pied au marché de la Villette, et ceci dans une proportion qui dépend de la part des introductions directes dans le total des animaux abattus. En effet, l'importance des introductions directes est fluctuante d'une année sur l'autre (Philipp, 2004). Des calculs qu'on a effectués pour la fin du XIXe siècle montrent que ces dernières représentent en général entre 10 % et 20 % du tonnage total, mais elles ont atteint plus de 25 % en 1889 pour ensuite retomber à moins de 10 % en 1906. Cette fluctuation est en partie de caractère aléatoire et en partie sous le contrôle des bouchers de gros de la Villette qui s'en servent pour jouer sur les cours (Leteux, 2009). Le reste du pourcentage, soit de 90 % à 75 % selon les années, provient des animaux préalablement présentés et vendus au marché. Selon les calculs qu'on a effectués sur la base des relevés d'opérations du marché de la Villette, la viande bovine y domine pour environ 80 %. Selon des chiffres rapportés par Philipp (2004) pour les introductions directes d'animaux, ce pourcentage en est également plus ou moins représentatif.

Compte tenu de l'ensemble de ces considérations, environ 80 % de la production totale en viande de boucherie des abattoirs parisiens est d'origine bovine, contre 20 % d'origine ovine. Une démarche similaire exploitant les données figurant dans les documents statistiques des années 1910 et 1920, rapportées par source d'approvisionnement et par catégorie animale, (Statistique agricole annuelle, 1910-1920) permet de conclure à une distribution similaire.

On parvient enfin sur la base de ces calculs à dresser un tableau pour la consommation par individu habitant à Paris, par type de viande et par mode d'approvisionnement, pour une sélection de dates sur une cinquantaine d'années au tournant du XXe siècle (tableau 2.4).

Tableau 2.4 : Consommation individuelle de la viande à Paris intramuros (kg/hab/an) et parts d'arrivages de la viande à la main au tournant du XXe siècle. Sources de données : Statistique agricole annuelle, 1885, 1892, 1908, 1924, Philipp, 2004.

	Consommation totale	dont bovine	dont mouton	Dont porcine et charcuterie	% arrivant comme de la viande à la main
1879	74	51	13	11	18%
1890	74	50	12	12	26%
1906	72	48	12	13	23%
1923	76	53	11	12	35%

La consommation est demeurée pratiquement inchangée lors de cette deuxième période. Non seulement la consommation totale de la viande s'est maintenue au même niveau mais, de surcroît, la répartition par type de viande est restée pratiquement constante. Il est d'ailleurs surprenant de constater comment cette répartition s'apparente à celle de la période de 1801 à 1867. Indépendamment des variations sur la consommation totale de la viande, à toutes époques près de 70 % de la consommation est d'origine bovine, le reste se partageant entre la viande de mouton et de porc à des proportions plus ou moins égales. Ceci reflète d'une certaine constance dans la productivité des élevages. En comparant les tableaux 2.3 et 2.4, on peut également observer l'influence différentielle du chemin de fer dans la consommation et le mode d'approvisionnement de chaque époque. L'augmentation nette des apports de viande à la main par le chemin de fer entre 1880 et 1920 n'a fait que piétiner sur l'activité des abattoirs parisiens sans pour autant induire d'augmentation de la consommation. Il s'agit simplement d'une réorganisation du secteur de transformation : moins d'animaux par habitant se font abattre sur place dans les années 1920 que dans les années 1880 au profit des abattoirs situés près des lieux de production.

Comme pour la période précédente, les consommations présentées ci-dessus ne concernent que la consommation des habitants de Paris *intramuros*, que l'on peut de manière identique au XIXe siècle supposer un peu plus élevés de celles du reste de l'agglomération. A défaut d'indications plus précises pouvant mettre en relief des

divergences spécifiques au XXe siècle entre les deux sous-groupes de population on se tiendra à l'hypothèse faite pour le XIXe siècle, selon laquelle les habitants de Paris consomment 30 % plus de viande que l'urbain Français moyen. Ensuite, en pondérant les deux niveaux de consommation avec le nombre d'habitants respectifs de chaque sous-groupe, on obtient la consommation de l'habitant moyen de l'agglomération. En effet, en raison à la fois du rapport entre les deux populations - la population de Paris s'élève encore en 1923 à près de 70 % du total de l'agglomération - et de la faible différence entre les niveaux de consommation, le niveau de consommation de l'habitant moyen ne diffèrent que d'environ 2,3 kg de viande en 1879 contre 5,7 en 1922.

Mais continuons à suivre la consommation de Paris dans le temps. La raison pour laquelle nos calculs s'arrêtent à l'année 1923 ne réside pas dans un changement radical des habitudes alimentaires mais plutôt dans le fait que cette date symbolise la fin de la période où le suivi de la consommation de Paris sur la base du tonnage des importations est relativement aisé. A partir des années 1920 et jusqu'aux années 1940, le tonnage des viandes présentées aux marchés de gros des Halles, de la Villette et de Vaugirard alimente un public que l'on ne saurait pas délimiter dans l'espace. Depuis, le tonnage qu'on y traite n'est qu'une fraction des apports totaux des viandes dans l'agglomération parisienne en raison de la multiplication des sources d'approvisionnement. Aussi bien pour la première que pour la deuxième période, déchiffrer la consommation alors que la démographie de la banlieue s'accroît rapidement sans que son approvisionnement fasse l'objet des statistiques spécifiques exige un travail minutieux qui échappe aux objectifs de la présente thèse. Les modes traditionnels d'approvisionnement se trouvent bouleversés.

A partir de la seconde guerre mondiale, les données sur la production totale des abattoirs parisiens n'indiquent plus la part des viandes destinées à la consommation de Paris, témoignant ainsi du déclin progressif de cette dernière, tant dans la production totale des abattoirs, que par rapport aux apports ferroviaires et routiers aux marchés. Déjà vers la fin des années 1940, la part des envois sur pied ne représente plus que 13 % des envois totaux de viande dans les marchés parisiens (Tanguy, 1949) : tonnage trop marginal pour justifier un intérêt commercial de suivi de la

production des abattoirs par destinateur.

Ayant fait son apparition dans les années 1930, le trafic routier devient, une vingtaine d'années plus tard, un élément clef pour l'approvisionnement. Le tonnage ainsi transporté ne cesse de croitre dès l'après-guerre, mais l'essentiel de sa contribution vient de son adaptabilité aux nouvelles formes de commercialisation telles que les supermarchés et hypermarchés apparus dans la fin des années 1950 et dans le courant des années 1960 respectivement (Daumas, 2006). La route est appréciée pour sa souplesse qui permet de livrer aux distributeurs de gros et de détail sans transiter par les marchés traditionnels (Lachêne, 1962). Les ventes directes de viandes aux centrales d'achats, aux grandes surfaces et aux collectivités publiques croissent rapidement, provoquant la déconnection en termes relationnels entre la consommation parisienne et l'activité des marchés de gros.

La possibilité qu'a ouverte le trafic routier d'un ravitaillement direct des entrepôts des bouchers détaillants sans transiter par les trois marchés de gros revient à complexifier les estimations de la consommation de Paris et de son agglomération dès les années 1930. Quelques décennies plus tard, la mutualisation de l'approvisionnement entre les marchés et les centrales d'achats a marqué la fin d'une longue époque pendant laquelle la consommation de viande de la capitale était entièrement gérée par les pouvoirs publics. Toutefois, comme il a été mentionné précédemment, la vente à Paris de la viande fraiche conditionnée sous cellophane était, dès son apparition au début des années 1950, encouragée par les pouvoirs publics en vertus de la réforme qu'elle induisait sur l'ensemble de la filière, se traduisant par la promotion de l'hygiène et la diminution des coûts (Brevot, 1953).

Si on n'est pas en mesure de calculer la consommation de viande à partir des années 1930 pour les raisons évoquées précédemment, on peut en revanche donner des chiffres sur le tonnage traité par la structure traditionnelle (abattoirs et marchés de gros). En étudiant l'évolution du tonnage total des importations d'animaux sur pied et des carcasses introduites par camion et par chemin de fer aux trois marchés de gros, on constate que celui-ci stagne autour de 320 000 tonnes à partir des années 1930 et jusqu'à la date de transfert du marché des Halles à Rungis (Statistique agricoles

Annuelles, 1920-1971). Derrière cette stabilisation se trouvent toutefois deux tendances contrastées. D'un côté, le tonnage sorti des abattoirs locaux recule depuis les années 1930 mais de l'autre, les apports de carcasses arrivant par la route et le chemin de fer augmentent de 100 000 tonnes en 1930 à 280 000 tonnes en 1970. La stagnation n'est manifestement pas cohérente avec le processus d'urbanisation caractéristique de cette période. Si l'on ramène ce tonnage à la population de l'agglomération parisienne on obtient une disponibilité de viande de l'ordre de 75 kg/hab/an dans les années 1920, 82 kg/hab/an en 1928, 68 kg/hab/an en 1931, 55 kg/hab/an en 1950, 65 kg/hab/an en 1955, 45 kg/hab/an en 1965 et environ 35 kg/hab/an en 1970 (figure 2.3).

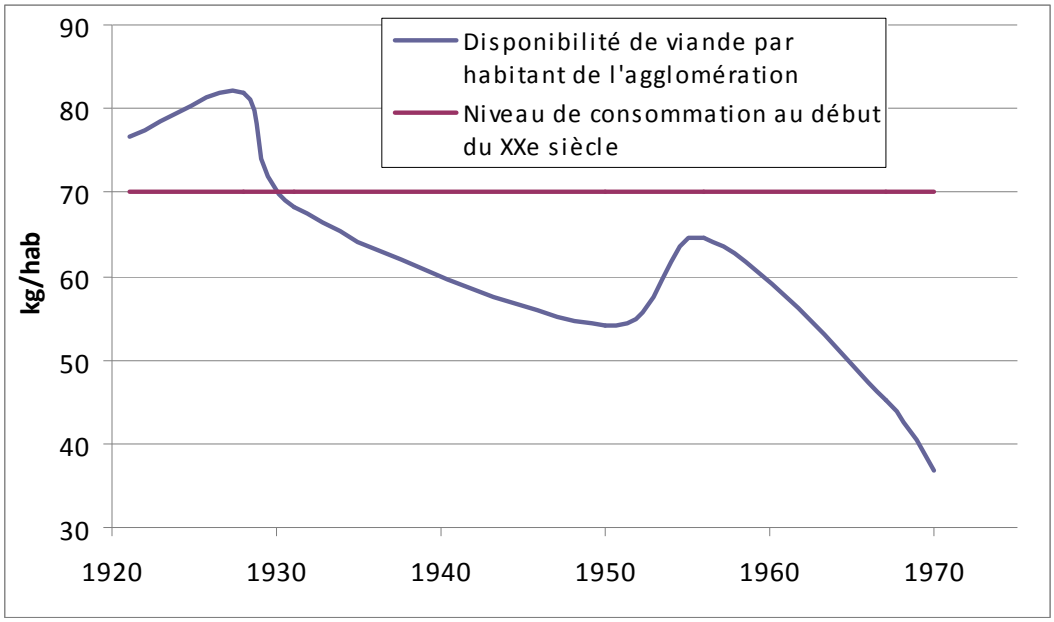


Figure 2.3 : Déclin des apports de viande assurés par la structure traditionnelle de l'approvisionnement de Paris (kg/hab). Source des données : Statistique agricoles Annuelles, 1920-1971.

A l'exception d'une augmentation isolée des apports de viande entre 1950 et 1955 – correspondant à une hausse abrupte des arrivages par voie routière – le tonnage de viande mis en jeu par la structure traditionnelle d'approvisionnement régresse rapidement et irréversiblement. Si l'on admet que le niveau de consommation n'a pas radicalement changé depuis le début du XXe siècle, on peut en tirer deux conclusions : d'un côté, les apports de viande de la structure traditionnelle dépassent les besoins de l'agglomération jusqu'en 1930, et de l'autre - à partir de cette date -

l’approvisionnement se privatise progressivement. Malgré ce courant, le tonnage de viande traité à Rungis - entrepôt issu de la refonte de circuits alimentaires publics en région parisienne - s’est progressivement accru depuis les années 1970, d’environ 350 000 tonnes en 1973 à 430 000 tonnes dans les années 1990 (Chemla, 1994). Pourtant, ramené à la population de l’agglomération, ce tonnage représente une disponibilité inférieure à 40 kg/hab/an, soit de même niveau qu’avant la création de Rungis.

Cette évolution laisse entendre qu’aussitôt que les moyens de transport l’ont permit, le circuit de la viande a progressivement transité des marchés publics au secteur privé, ce dernier assurant la part du lion à partir de la deuxième moitié du XXe.

La dispersion des apports entre divers marchés (publics et privés) s’accompagne de la dispersion des sources statistiques (si ce n’est de leur inexistence) et nous oblige à envisager différemment le calcul de la consommation de viande de l’agglomération. Inversement à la démarche qu’on a pu emprunter jusqu’à présent, qui consistait à déduire la consommation moyenne par individu des données explicites sur les flux des importations urbaines, on est contraint d’affecter à l’ensemble des habitants de l’agglomération une consommation moyenne tirée soit des enquêtes sur la consommation au niveau régional, soit des bilans d’approvisionnement au niveau national.

Des enquêtes officielles sur la consommation en Ile-de-France sont menées par l’INSEE depuis 1971 mais présentent l’inconvénient de ne recenser que la consommation au sein des ménages laissant de côté toute consommation hors foyer, (ex cantines et restauration). Selon l’enquête de l’INCA, seulement 75 % des déjeuners sont en moyenne pris à domicile (AFSSA, 2003). Mais mis à part le fait que ce pourcentage peut varier d'un aliment à l'autre, il ne représente qu'une moyenne nationale représentative pour les années de l'enquête (1998-1999), ainsi il risque d'occulter des spécificités régionales et des variations dans le temps (Barles, 2005b). Les populations urbaines sont en général susceptibles de prendre plus de déjeuners hors domicile, d'autant plus que la mobilité quotidienne des personnes entre le domicile et le lieu de travail soit importante, ce qui est souvent le cas des grandes agglomérations plutôt que des villes moyennes. Enfin, outre ces inconvénients, les

données de ces enquêtes ne sont exploitables que jusqu'en 1991. Cette date marque la fin de la période que les consommations sont rapportées en tonnage de produits. Elles ne recensent depuis que les dépenses monétaires des ménages sans différentier par type d'aliments. Compte tenu de ces facteurs les données de ces enquêtes ne peuvent pas répondre directement à nos besoins.

Une autre approche consiste à utiliser des données issues des bilans d'approvisionnement alimentaire au niveau national, produits pour certains aliments y compris de la viande avec une répartition par espèce animale. Publiées par le ministère de l'agriculture, ces données montrent la disponibilité alimentaire annuelle par type de viande. L'enregistrement le plus ancien dont on dispose date de 1953 ainsi qu'on a collecté des données ultérieures dans les statistiques agricoles de la seconde moitié du XXe siècle (Ministère de l'agriculture, 1966, Annuaire de statistique agricole, 1972, 1976, 1986, Agreste, 2010). Dans ces documents, la consommation totale de la viande est répartie entre les viandes bovines, de porc et de mouton, alors que celle de volaille fait son apparition à partir des années 1970. Pour chaque type de viande, le service de la statistique et de la prospective (SSP) réalise annuellement un bilan d'approvisionnement qui établit les relations entre la production, la consommation, le commerce extérieur et les stocks. Les bilans d'approvisionnement des viandes reposent ainsi sur trois sources d'informations : les enquêtes d'abattage, les statistiques du commerce extérieur français transmises par les Douanes et les stocks. Les informations d'abattage permettent d'établir la production nette, correspondant à la notion d'abattages totaux. Enfin, la consommation moyenne par individu et par type de viande est calculée en divisant le produit du bilan d'importations, production interne, exportation et stock par la population totale de la France. Comme pour la consommation du passé, la consommation ainsi définie n'inclut pas d'abats et d'issues.

La pertinence de cette méthode vis-à-vis du calcul de la consommation des habitants de l'agglomération parisienne dépend de l'uniformité de la consommation au niveau national. Si les disparités vis-à-vis du niveau de consommation sont fortes, les moyennes obtenues ne seront pas représentatives de la consommation parisienne. Du reste, en rapportant la disponibilité alimentaire, cette méthode présente l'avantage -

contrairement aux données de l'INSEE - de tenir compte de l'ensemble de la consommation qu'elle soit à domicile ou hors foyer. En dehors du rapport avec la disponibilité, l'homogénéité de la consommation dépend des facteurs tels que le niveau et le mode de vie (référence). On expose dans le tableau 2.5 des moyennes triennales de la consommation par habitant en France issues des bilans d'approvisionnement pour certaines dates de la deuxième moitié du XXe siècle et jusqu'au début du XXIe siècle.

Tableau 2.5 : Disponibilité de la viande par habitant au niveau national (kg/hab/an), moyennes triennales entre 1955 et 2008. Sources: Statistique agricole annuelle 1963-1965 et rétrospective 1930-1964, annuaires de statistiques agricoles, 1972, 1976, 1986, Agreste, 2010.

Périodes	Bovine	Mouton	Porc	Total (sans volaille)
1953/55	29,9	2,6	22,3	54,8
1955/57	30,6	2,8	24,8	58,1
1962/64	20,3	2,9	27,6	63,7
1973/75	28,9	3,6	28,8	61,3
1983/85	30,4	4,3	32,9	67,6
1996/98	26,3	5,1	35,7	67,1
2000/02	26,1	4,6	36,2	66,9
2006/08	25,9	4,0	34,4	64,3

A partir des données du tableau 2.5 on peut noter deux tendances : la disponibilité de la viande s'accroît sensiblement dans les années 1950 et stabilise autour de 66 kg/hab/an à partir des années 1980. La disponibilité de tonnage par habitant des années 1950 est inférieure à celle de Paris du début de XXe siècle mais est en augmentation. De ce fait, on peut conclure qu'à cette date l'uniformité alimentaire n'est pas atteinte, mais que l'élan est donné. La consommation des Français rattrape son écart par rapport à la consommation des Parisiens au XIXe et début du XXe siècle, tout en montrant une tendance de plafonner au même niveau qu'au début du XXe siècle. Cette transition entre 1950 et la fin du siècle est étroitement liée à l'abaissement régulier des coûts de produits animaux livrés aux consommateurs (Paillat, 1997).

Pourtant, ne disposant pas de données spécifiques pour Paris, on n'est pas en mesure de situer avec exactitude l'uniformisation des rations dans le temps. On ne peut que ponctuellement l'apprécier par comparaison aux données de l'INSEE sur la consommation à domicile en 1991. Selon ces données, la consommation des ménages franciliens en viande de boucherie, de porc et de charcuterie s'élève à près de 30 kg/hab/an soit près de 2 kg/hab/an de moins que la moyenne de la France métropolitaine (INSEE, 1990, 1999). C'est une forte indication pour l'uniformité de la consommation. En revanche, par comparaison aux chiffres de la disponibilité nationale autour de 1990, on conclue que la consommation des foyers ne représente que près de 50% de la consommation totale par habitant pour 75 % des déjeuners pris à domicile selon l'enquête de l'INCA (AFSSA, 2003). En affectant ce même pourcentage de 50 % à la consommation des ménages franciliens, il en résulte que la consommation globale de ces derniers est également de l'ordre de 60 kg/hab/an. Pourtant, leur niveau de vie étant un peu plus élevé que la moyenne française, les Franciliens sont susceptibles de consommer davantage de viande hors domicile (Barles, 2005b), ce qui rapprocherait dès les années 1960 leur consommation totale de viande du niveau de disponibilité nationale (cf. tableau 2.5). Il paraît donc légitime d'admettre que c'est en effet peu après le tournant du XXe siècle que les consommations parisiennes et nationales se sont pratiquement égalées. Dans l'espace de 60 ans, l'écart d'un facteur quatre entre la consommation rurale et celle de Paris, s'est entièrement rattrapé permettant de surmonter les lacunes de données explicites sur les importations de l'agglomération parisienne Paris dans le suivi de sa consommation totale.

On est ainsi en mesure de dresser deux graphiques sur la trajectoire de la consommation de viande pour la plus grande partie de la période entre 1801 et 2008: le premier indiquant la consommation par habitant (figure 2.4) et le second pour l'ensemble de l'agglomération parisienne (figure 2.5). On rappelle que l'estimation de la consommation par habitant de l'agglomération intègre jusqu'aux années 1930 un différentiel de 30 % entre la consommation moyenne par habitant de Paris par rapport au citadin de la périphérie. En revanche, l'hypothèse de l'uniformisation des régimes alimentaires au niveau national est retenue à juste titre partir des années 1960.

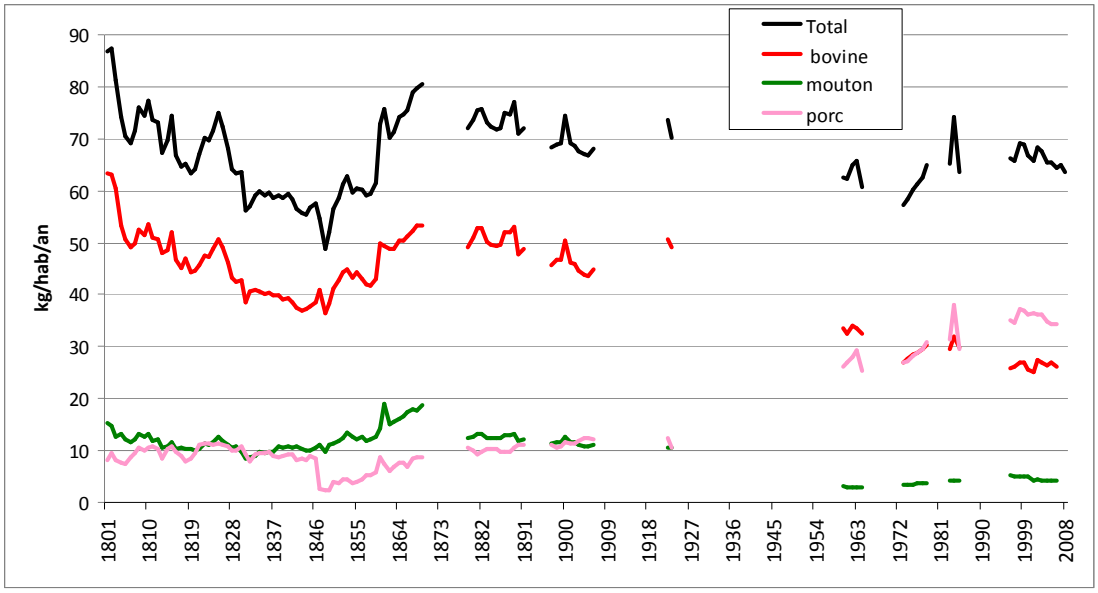


Figure 2.4 : Consommation de viande bovine, ovine et porcine par habitant de l'agglomération entre 1801 et 2008 (kg/hab). Sources de données : voir dans le texte.

La lacune entre les années 1920 et 1960 est gênante, mais illustre la difficulté de suivre les consommations urbaines tant qu'elles se distinguent des moyennes nationales. La possibilité d'appuyer sur les bilans d'approvisionnement national a rectifié ce problème à partir de la fin des années 1950.

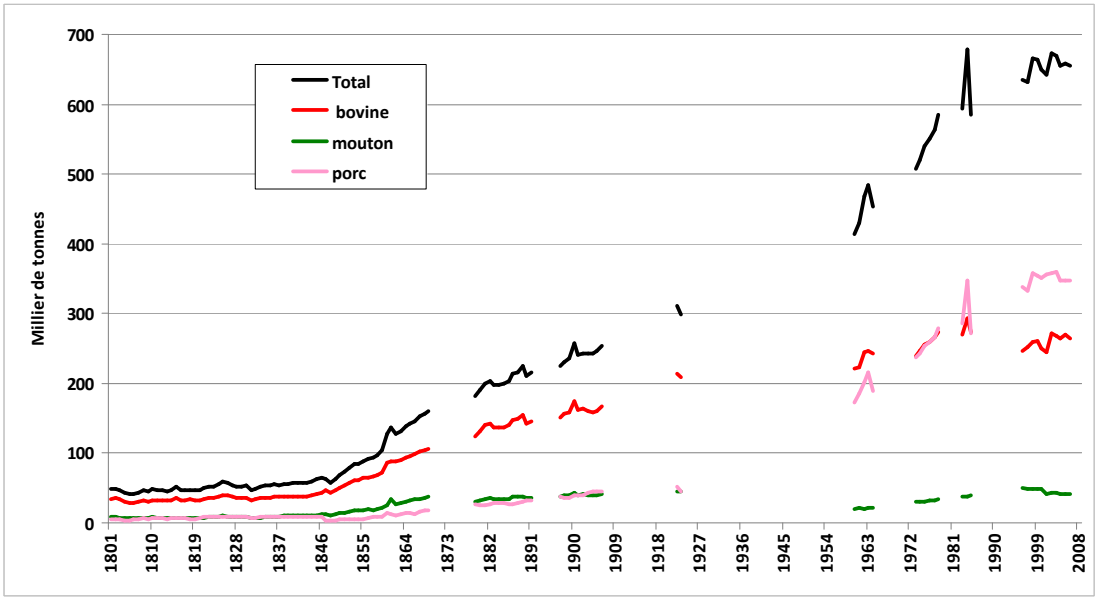


Figure 2.5 : Importations de viande bovine, ovine et porcine de l'agglomération parisienne entre 1801 et 2008. Sources de données : voir dans le texte.

La stagnation, dans la première moitié du XIXe siècle, du tonnage total des importations de viande semble écarter la possibilité que le recul de la consommation individuelle des Parisiens soit le résultat des crises économiques, politiques, agricoles, climatiques, sanitaires etc. qui ont à plusieurs reprises fait subir au territoire français des pertes considérables de bétail[1] (Barles et Lestel, 2007). Elle soutient en revanche l'idée d'une certaine saturation des mécanismes d'approvisionnement qui, antérieurement au développement du chemin de fer, se prouvent insuffisants par rapport au rythme de l'urbanisation. Mais à l'exception de cette période, les fluctuations sont faibles et la consommation totale par individu pour la somme des trois types de viande s'est maintenue pratiquement inchangée à deux siècles d'écart. Ceci témoigne du confort dont a joui Paris dans la longue durée pour son approvisionnement alimentaire dont la viande ne constitue par ailleurs qu'un exemple. La variété et la richesse de la table du Parisien étaient déjà remarquables antérieurement à la révolution (Lavoisier, 1791, Philippe, 1961).

Il faut pourtant signaler qu'un quatrième type de viande, celle de volaille, fait aujourd'hui l'objet d'une consommation importante. La consommation de volaille s'élève à environ 24 kg/hab/an au début du XXIe siècle, contre par exemple à 11 kg/hab/an pour la moyenne des années 1877 et 1878 (Agreste, 2010, Barral, 1880). Ce doublement est le résultat d'une augmentation progressive de la production, depuis notamment les années 1960, période de démarrage de la révolution avicole en France suite au développement des industries d'aliments composés (Diry, 1979). Par opposition à la consommation de la viande de volaille issue des élevages industriels, la consommation lors du XIXe siècle s'appuyait largement sur l'autoconsommation. Le fait que la taxation de cette viande par l'octroi ne s'est imposée qu'en 1872 laisse supposer que l'essentiel de la consommation se satisfaisait auparavant par une production locale à Paris. On recense en 1872 près de 65 000 têtes d'animaux de

[1] A titre d'exemple, les pertes dues à la guerre, à la diminution du territoire et au typhus contagieux ont atteint deux millions de têtes bovines, six millions de têtes ovines et un demi-million de porcs en 1870-71 (Barral, 1880). Ces pertes pourraient être à l'origine de la légère diminution de la consommation individuelle des Parisiens dans la décennie 1870 (figure 2.4).

basse-cours au sein de la capitale dont 75 % des poulets et poules (Loua, 1873). Il est d'ailleurs probable que l'élevage local de volailles ait résisté longtemps à l'urbanisation continuant à assurer dans la première moitié du XXe siècle une part considérable de la consommation des Parisiens. On soutient cette hypothèse du fait que le tonnage présenté à la vente aux Halles centrales - provenant pour sa quasi-totalité de la ligne ferroviaire de Paris-Bordeaux (Billé, 1930, Statistique agricole annuelle 1923) - s'élevait autour de 21 000 tonnes dans les années 1920 (Statistique Agricole Annuelle, 1925-1930) ce qui représente une consommation de 5 kg/hab/an. Par rapport à la consommation de 11 kg/hab/an enregistrée dans les années 1870, cette consommation paraît trop faible, suggérant qu'une production au sein de la banlieue sinon dans Paris intramuros pourraient concourir à l'approvisionnement. Quoi qu'il en soit, les différentes transformations de la filière de volaille et sa profonde restructuration à partir des années 1960, présentent certes un grand intérêt pour être analysées mais cette analyse a due être exclue du présent travail en raison des contraintes de temps.

Dans tout les cas, la consommation de viande de volaille ne s'est pas substituée à celle des autres viandes mais a plutôt enrichi la ration carnée des Parisiens, dont la composition a par ailleurs évolué au cours de la période. La production de la viande de porc a marqué une augmentation spectaculaire au cours du XXe siècle qui a bouleversé la composition de la consommation. En effet, la consommation de porc, qui était la plus faible lors de la majeure partie des XIXe et XXe siècles arrive en tête vers la fin du XXe et début du XXIe siècle en se substituant ainsi sensiblement à la viande de boucherie. La consommation de la viande de mouton diminue de deux tiers par rapport à la fin du XIXe siècle et la viande bovine de moitié. Cette évolution vient renverser l'uniformité de la répartition parmi les trois catégories des viandes dans la consommation totale au XIXe et au début de XXe siècles, qui en dépit de toute variation du niveau de consommation, témoignait d'une stabilité à la fois des préférences alimentaires que du rapport de production parmi les secteurs.

Lors de la seconde moitié du XXe siècle, l'augmentation spectaculaire de la consommation de la viande de porc témoigne d'une mutation profonde. Comme pour la viande de volaille, cette envolée reflète une révolution dans la production porcine

déclenchée par l'envolée de la production des aliments composés pour les porcs, à partir des années 1960 (Ministère de l'agriculture, 1966, Diry, 1979). En termes de pourcentage dans la consommation par individu la viande de porc, qui s'élevait à moins de 10 % dans la ration carnée des Parisiens en 1801, passe à 54 % en 2006. Compte tenu de la croissance démographique, le tonnage total de cette viande s'est accru d'un facteur 55 entre le début des XIXe et XXIe siècles contre un facteur 7 pour la viande de boucherie. La différence d'un ordre de grandeur entre les deux facteurs est éloquente de l'influence qu'elle a eue l'industrialisation de la production animale sur les habitudes alimentaires en cette fin de siècle.

Dans tout le cas, la comparaison entre le tonnage des importations totales de viande de l'agglomération et l'évolution démographique montre que les importations totales n'ont réussi à suivre la marche régulière de la croissance démographique qu'à partir pratiquement de la deuxième moitié du XIXe siècle. Jusqu'à la fin des années 1840, la constance du tonnage des importations de viande constitue une forte indication d'une certaine saturation du système d'approvisionnement pré-ferroviaire. A partir des années 1850, le chemin de fer assure la croissance des importations au rythme de la croissance démographique. Ceci signifie que la saturation du système de transport en termes de capacité d'acheminement des viandes, n'a pas pu être amortie par une hausse significative de la productivité des territoires de proximité, qui se trouve par conséquent également en état relatif de saturation. Il paraît donc que ces deux facteurs – la capacité de production et la capacité de transport – se sont combinés dans la limitation de l'approvisionnement parisien, ils constituent, en quelque sorte, deux facteurs limitant en alternance. L'étude en termes relationnels entre d'un côté la demande alimentaire d'une population et de l'autre la réponse des territoires producteurs et des services d'acheminement des aliments présente un intérêt particulier dans la compréhension du fonctionnement des systèmes en interaction et en état de stimulation mutuelle. Mieux comprendre l'articulation des différents facteurs dans ce type d'interactions est un enjeu qui mériterait d'être étudié plus en profondeur. Par exemple, à quel point est-ce que Paris a contribué par son urbanisation au progrès en termes de productivité des milieux ruraux qui l'entourent et à l'amélioration des technologies de transport ? À quel moment et dans quelles conditions est-ce que le rapport de stimulation mutuelle entre la demande

urbaine et le développement rural cessent-ils ou deviennent moins directes ? Et encore, à quel point est-ce que l'expansion urbaine se limite à la capacité existante des moyens de production et de transport selon les époques ?

Malgré l'intérêt de ces questions, on ne saurait y répondre ici. On se contentera d'observer quelques aspects des évolutions survenues dans l'approvisionnement en termes de provenances des aliments consommés à Paris et de l'influence environnementale engendrée dans les territoires qui y répondent. Sur la base des données des figures 2.4 et 2.5 et malgré les lacunes lors du XXe siècle, l'approvisionnement se montre suivre de près, dès la deuxième moitié du XIXe siècle, le rythme de l'urbanisation. Après déterminer dans la section suivante, l'évolution de la consommation de lait frais, on examinera, dans le chapitre suivant, la répartition en termes de provenances des importations parisiennes de ces aliments pour quelques dates clé dont on dispose des données.

2.4. Consommation de lait de l'agglomération parisienne

Contrairement à la viande, le lait n'a fait l'objet d'aucune statistique officielle au XIXe et au début de XXe siècle et a été peu étudié de manière systématique (Dubuc, 1938). Mais son étude est nettement plus simple que celle de la viande du fait que cet aliment ne subit pas de transformation après avoir été importé dans la ville et qu'il ne fait pas l'objet de réexportations.

Les données sur la consommation du lait nous proviennent d'études ponctuelles plutôt que des enregistrements de l'administration. On a déjà distingué les ouvrages de Dubuc (1938) et de Huard (1939) pour l'étude de l'approvisionnement au XIXe et au début de XXe siècle, alors que pour le reste du XXe siècle, on se confronte, comme pour la viande, aux séries lacunaires de données. De manière similaire à l'étude de l'approvisionnement en viande on doit, à partir de la deuxième moitié du XXe siècle et jusqu'à nos jours, recourir aux données issues des bilans d'approvisionnement nationaux et aux enquêtes de l'INSEE sur les consommations des ménages (INSEE, enquête alimentaire 1991).

Une différence fondamentale dans l'étude de la consommation laitière par rapport à

celle de la viande est que les niveaux de consommation que l'on retrouve pour les XIXe et XXe siècles ne se limitent pas à la seule consommation des Parisiens intramuros, mais portent sur une population plus large, proche de celle du département de la Seine. En effet, le périmètre exact de la population concernée n'est pas explicitement indiqué dans l'ouvrage de Dubuc mais peut être déduit du tonnage total des importations et de la consommation par individu telle que calculée par l'auteur (Dubuc, 1938). En divisant ces données, on arrive à la population utilisée dans les calculs. Elle s'élève à près de 90 % de celle du département de la Seine pour toutes les dates étudiées dans l'ouvrage de Dubuc, allant de 1854 à 1936. Cette population s'apparente bien à la population urbaine telle qu'on l'a définie précédemment. Malgré de ne pas pouvoir conclure sur l'uniformité de la consommation de lait au sein de la population urbaine, on sait que, contrairement à la viande, son étude s'est franchi de l'absence de délimitation officielle entre Paris et la banlieue.

En attribuant à l'agglomération parisienne les consommations par individu rapportées dans l'ouvrage de Dubuc (1938) à cinq dates au XIXe et au début du XXe siècle et en comparant avec la production locale, on obtient le tableau 2.6. Pourtant, il note que les données sur la consommation au XIXe siècle ne peuvent être que des estimations approximatives en raison de la difficulté d'évaluer l'importance des ventes directes par les nombreux nourrisseurs installés à l'intérieur de Paris et dans la banlieue proche (*cf. supra*, § 1.2).

Le tableau 2.6 montre également des estimations sur les distances maximales auxquelles le lait est réclamé à chaque époque. Avant 1850, le lait provenait uniquement du département de la Seine. La question de l'aire d'approvisionnement et des provenances du lait de Paris sera étudiée en détail dans le prochain chapitre. On se tient ici à apporter quelques éléments sur le rapport dans le temps entre la consommation et la production laitière et son influence sur l'étendue de la zone d'approvisionnement.

Tableau 2.6 : Consommation de lait frais par habitant et par l'agglomération parisienne et distance maximale de l'approvisionnement entre 1801 et 1936. Sources : Dubuc (1938), Billé (1930), Huard (1939). [1]Estimation.

Année	l/hab/ an	Population (arrondie) agglomération (milliers habitants)	Consommation agglomération (10^3 m^3)	Production annuelle dép. Seine (m^3)	Rayon maximal de la zone d'approvisio-nnement (km)
1801	73 [1]	550	40	45 000 [1]	< 20 (~rayon dép. Seine)
1854	73	1 410	100	80 000 [1]	< 50 [1]
1900	100	3 450	340	95 000	< 150
1914	110	4 030	420	38 000	< 250
1936	90	4 610	420	16 000	< 400

La consommation annuelle croissante est soutenue par une zone laitière de plus en plus grande en même temps que la production locale diminue rapidement à partir du début de XXe siècle. En dépit de ces évolutions interannuelles sur lesquelles on reviendra par la suite, la consommation laitière est caractérisée par une forte variabilité au cours de l'année, étant par ailleurs en décalage avec le cycle de lactation des vaches (Huard, 1939, Cholley, 1926). La demande en lait diminue en été en fonction de l'exode de vacances[1], contrairement à la sécrétion laitière qui augmente entre mai et juillet en fonction de pluies et température favorables pour une abondance fourragère aux pâturages (Musset, 1937). Les grosses demandes d'hiver se heurtent par conséquent à une sous-production tandis que la sous-consommation d'été correspond à la forte production estivale. La variation de la consommation parisienne est finement documentée dans l'ouvrage de Huard (1939) et montre la répartition mensuelle du tonnage annuel consommé par l'agglomération parisienne en 1931 (figure 2.6). La consommation en hiver est jusqu'à 50 % plus élevée qu'en été, contrairement à la production qui culmine entre mai et juillet (Baptist, 1956).

[1] Surtout des classes aisées mais qui sont aussi les plus grands consommateurs de lait

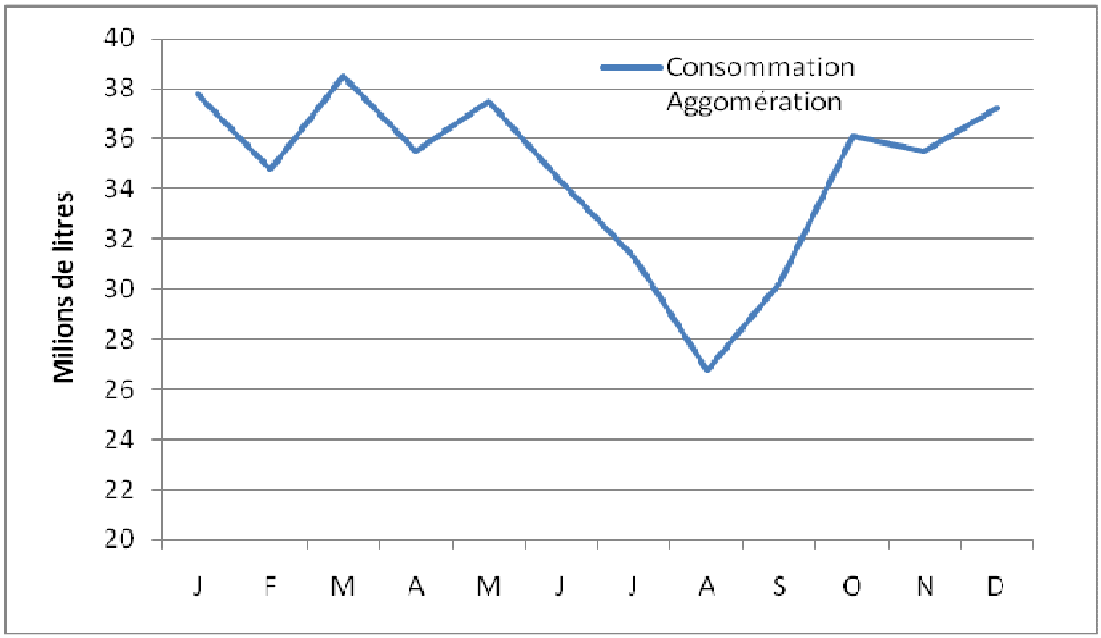


Figure 2.6 : Fluctuation mensuelle (de janvier - à décembre) de la consommation laitière de l'agglomération parisienne vers la fin des années 1930. Source de données : Huard, 1939.

L'extension progressive de l'aire d'approvisionnement du tableau 2.6, bien qu'exprimant l'augmentation des besoins en lait de l'agglomération, reste une mesure partielle car elle concerne le rayon maximal de l'aire d'approvisionnement en périodes de grande demande et de faible productivité. C'est justement l'élargissement du périmètre d'approvisionnement, au moyen surtout du service ferroviaire, qui a permis de résorber cet écart maximal récurant en période hivernal. Pourtant, outre l'extension progressive de la zone laitière qui s'étendait au début du XXe siècle sur trente-trois départements (Musset, 1937), la réponse du département de la Seine à la demande urbaine, aussi bien en termes de productivité qu'en termes de gestion des variations de la production, est très caractéristique et mérite d'être soulevée.

Par sa proximité de la grande agglomération, le territoire agricole du département de la Seine était le premier territoire concerné par la demande parisienne, qui s'est accrue d'un facteur dix entre le début des XIXe et XXe siècles (cf. tableau 2.6). De façon à répondre à cette demande croissante, les éleveurs du département avaient tout intérêt à accroître leur production, mais devaient également trouver les moyens pour surmonter les écarts saisonniers entre l'offre et la demande. Le lait frais ne pouvant pas résister longtemps à la corruption, devait trouver un usage alternatif en période de faible demande. La solution a été trouvée dans la transformation en produits dérivés

laitiers ainsi que dans l'élevage de porcs. Les laiteries annexaient des ateliers de fabrication de beurre, de fromage ainsi que des porcheries pour lesquelles le lait constituait une matière première destinée à l'engraissement des porcs. En valorisant les excédents laitiers, ces dispositifs contribuaient largement à amortir les coûts de fonctionnement des coopératives laitières, particulièrement élevés en raison du matériel spécialisé et coûteux que la collecte et le transport du lait frais exigeaient (Huard, 1939). L'exigence de transformation immédiate des excédents laitiers en produits dérivés a façonné la structure des exploitations laitières jusqu'à la deuxième moitié du XXe siècle, car elle assurait la conservation à la ferme avant la généralisation de la réfrigération à partir des années 1960 et l'émergence du procédé UHT dans les années 1980 (Boisard, 1994). Le décalage temporel entre l'offre et la demande ne posait à partir de cette date plus aucun problème en matière de conservation alors que le procédé UHT a largement bouleversé le mode de conditionnement, conservation et distribution du lait en éliminant l'impératif de proximité entre la production et la consommation.

En parallèle de l'émergence des stratégies de conservation, la forte demande parisienne a fortement stimulé la production. La productivité laitière du département s'est développée de manière spectaculaire par rapport au reste de la France. La comparaison historique des rendements du département par rapport à la moyenne nationale en témoigne (figure 2.7).

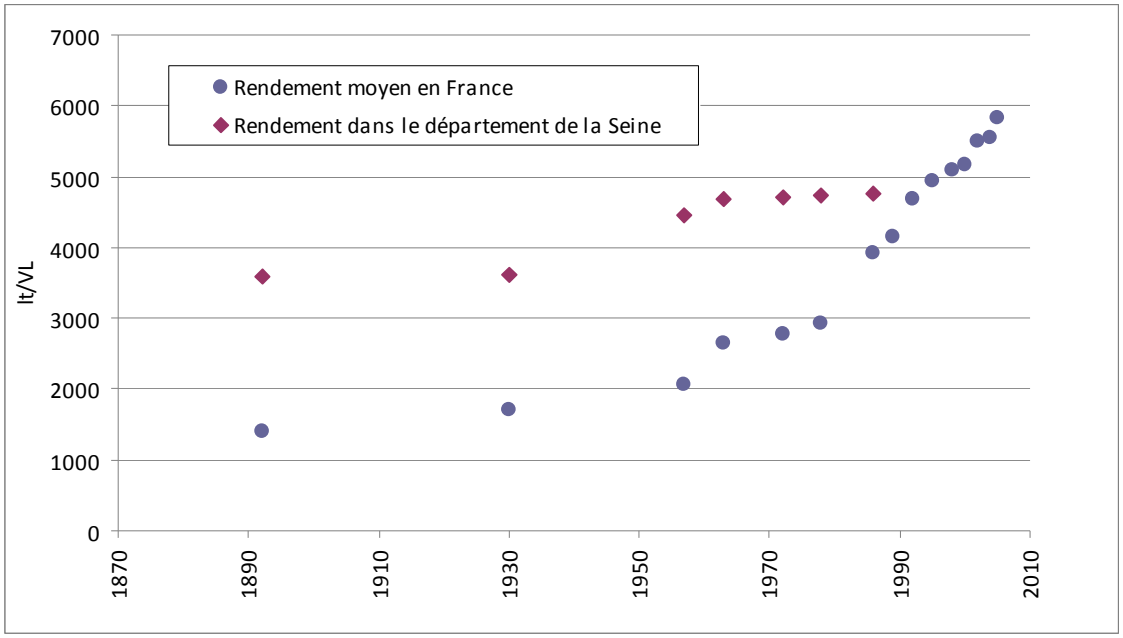


Figure 2.7 : Évolution contrastée des rendements laitiers entre le département de la Seine et la moyenne nationale, XIXe – XXe siècles. Sources de données : Ministère de l'agriculture 1892, Statistique agricole annuelle, 1930, 1957-1985, 1989-1995.

Malheureusement des données comparatives antérieures qui permettraient de situer dans le temps les débuts des écarts de rendements font défaut. On ne dispose que d'une seule donnée sur le rendement français moyen en 1852 : 900 l/vache/an (Duby et Wallon, 1976). Le rendement laitier s'élève en 1892 à 3600 l/vache dans le département de la Seine contre seulement 1 400 l/vache en moyenne en France. Trente années plus tard l'écart se maintient à près de 2000 l/vache/an. Bien qu'en régression dans l'approvisionnement de Paris, les exploitations laitières du département ont réussi à fournir plus de 4 400 l/vache/an en 1955, soit plus du double du rendement national moyen pour la même date. Ce n'est que dans les années 1990 que la productivité nationale a atteint cette performance.

Ces chiffres montrent qu'une longueur d'avance en termes de productivité a été acquise dans le département de la Seine, premier département impliqué dans l'approvisionnement laitier parisien, au XIXe siècle. Elle témoigne d'une stimulation de la productivité en rapport avec la forte demande urbaine et met en évidence une réciprocité relationnelle entre le développement urbain et rural. Ce rapport de catalyse a eu pour conséquence que les rendements laitiers de la région parisienne se maintiennent en tête de la productivité française pour la plus grande partie du XXe

siècle, pour n'être dépassés que par une poignée des régions soumises à une forte intensification laitière à partir des années 1970 : la Haute-Normandie, le Nord, la Picardie et le Franche-Comté, auxquelles s'ajoutent la Bretagne et l'Alsace quelques années plus tard (Annuaire de statistique agricole, 1972, 1979, 1986).

Alors que jusqu'aux années 1930 on dispose d'une pléthore relative d'informations sur la consommation parisienne en lait, son étude n'a pas été poursuivie de la même manière pour le reste du XXe siècle. On peut imaginer que, comme pour le ravitaillement en viande, ce phénomène est dû à la difficulté de suivre le tonnage des apports pour Paris en raison de la décentralisation progressive des points d'arrivage du lait, enclenchée par le développement du transport routier. Il est aussi probablement dû au fait que l'approvisionnement en lait ne constituait plus un problème aussi important qu'auparavant. Quoiqu'il en soir, au lieu de pouvoir déduire la consommation par habitant des données sur les importations urbaines, on doit, pour cette deuxième période, recourir soit aux données issues des enquêtes auprès des consommateurs soit aux bilans d'approvisionnement nationaux.

A partir de 1965, l'INSEE produit annuellement - à l'exception des années 1968 et 1975 – des enquêtes sur la consommation alimentaire des ménages, qui sont jusqu'en 1991 exprimées en masse (ou en volume pour les aliments liquides) par catégorie de produits. A contrario, la méthode de décompte change à partir de cette date pour un regroupement monétaire de la totalité de consommation des ménages, tout aliment confondu. Outre le problème des unités et de l'agrégation de produits hétérogènes, la représentativité de ces enquêtes est en général douteuse surtout en raison de l'exclusion des ménages collectifs et du fait de ne par recenser les consommations hors foyer (Barles, 2005b). Pourtant, en ce qui concerne le lait, aliment surtout consommé lors des petits-déjeuners dont 95 % sont pris à domicile (AFSSA, 2003), la consommation hors foyer ne peut qu'être faible. De ce point de vue et contrairement au cas de la viande, ces statistiques semblent adaptées, du moins jusqu'en 1991, pour l'estimation de la consommation de lait.

Pourtant, un point supplémentaire mérite d'être soulevé. Visant à recenser les habitudes alimentaires des ménages, ces statistiques ne tiennent pas compte du

tonnage périmé et jeté avant de parvenir aux consommateurs. Ceci est non seulement en incohérence avec la méthode de calcul utilisée précédemment qui portait sur les importations totales avant distribution aux détaillants, mais comporte une sous-estimation par rapport au tonnage réellement mobilisé. Bien qu'il ne parvienne pas jusqu'à la bouche du consommateur, le lait a, après sa production, passé par toutes les étapes de la chaîne d'approvisionnement, à savoir le traitement, le stockage et le transport, qui ne vont pas sans coût économique et environnemental. Par souci de cohérence et pour ne pas négliger les pertes latérales, indissociables de la consommation finale, il est pertinent de compléter nos calculs avec une autre source de données.

Le lait figure dans les bilans d'approvisionnement nationaux - disponibles depuis 1950 - en tant que catégorie alimentaire à part entière, permettant ainsi d'en déduire la consommation sur la base de la disponibilité laitière par habitant français moyen. La disponibilité laitière pour l'alimentation humaine dépend du bilan global entre la production totale, le commerce extérieur et l'utilisation dans les secteurs industriels de fabrication des produits laitiers. On dispose de ces données pour les années 1950, 1970, 1980, 1990 puis à des intervalles annuelles entre 1991 et 2007 (Annuaire statistique agricole, 1972-1986, INSEE, 2004, Agreste 2010). La donnée sur la consommation du lait étant manquante en 1960, on a dû la déduire indirectement, à l'aide d'un deuxième poste alimentaire, intitulé « lait et yaourt ». Comme son titre l'annonce, ce poste agrège la consommation du lait et celle du yaourt. Afin d'en isoler la consommation du lait, il suffit d'évaluer celle du yaourt à l'aide des données disponibles pour les années avoisinante : 1950 et 1970. En 1950, la consommation de yaourt est nulle et en 1970 elle s'élève à 8,6 kg/hab/an. On retient leur moyenne pour 1960, soit 4,3 kg/hab/an.

La série de consommation entre 1950 et 2007 ne concerne que la consommation officielle, c'est à dire qu'elle ne tient pas compte de l'autoconsommation ou des ventes directes, quantités inférieure à 1 % de la production nationale annuelle (Statistique agricole annuelle, 2008). Cependant, cette consommation officieuse ne concerne à priori que les producteurs laitiers et les consommateurs ruraux et ne peut qu'être marginale, sinon inexistante, au sein de l'agglomération parisienne.

Les données de consommation par habitant, issues des bilans d'approvisionnement hors autoconsommation et ventes directes, sont montrées dans le tableau 2.7. Y apparaissent également la consommation totale de l'agglomération parisienne et des estimations de la production laitière du territoire correspondant à l'ancien département de la Seine. L'écart entre la consommation totale et la production locale est frappant. Malgré la haute performance en termes de rendement des vaches du département de la Seine, sa production ne parvient plus à couvrir qu'une fraction infime des besoins de la population. Elle en représente à peine 2 % en 1970 et elle disparaît pratiquement quelques années plus tard.

Tableau 2.7 : Consommation de lait dans l'agglomération parisienne et production du département de la Seine, 1950-2007. Sources : Statistique agricole annuelle, 1950-2007, Agreste, 2010, INSEE, 1999, 2004. [1]y compris du yaourt, [2]estimations à partir des données sur les années avoisinantes : 8,5*10^3 m^3 en 1957, 3,45*10^3 m^3 en 1971, 1,58*103 m^3 en 1979, 0,76*103 m^3 en 1985).

	1950	1960[1]	1970	1980	1990	2000	2007
Consommation individuelle lt/hab	77,6	76,8	75,2	74	66,3	65,9	51,6
Consommation totale (10^3 m^3)	357	507	652	669	628	641	526
Production locale (département de la Seine [2]) 10^3 m^3	9	8,2	3,5	1,6	0,7	-	-

En comparant la consommation moyenne par habitant du tableau 2.7 pour l'année 1990 avec celle des ménages franciliens en 1991 qu'on a corrigé du pourcentage des déjeuners pris hors domicile (5 %), on constate qu'elles concordent à 4 litres près. Que cette petite différence tienne aux pertes de tonnage périmé avant distribution aux consommateurs ou à des spécificités alimentaires parmi les deux populations, elle témoigne d'une forte uniformité de consommation. La figure 2.8 montre l'évolution entre 1801 et 2007 de la consommation par habitant et la figure 2.9 celle de l'ensemble de l'agglomération.

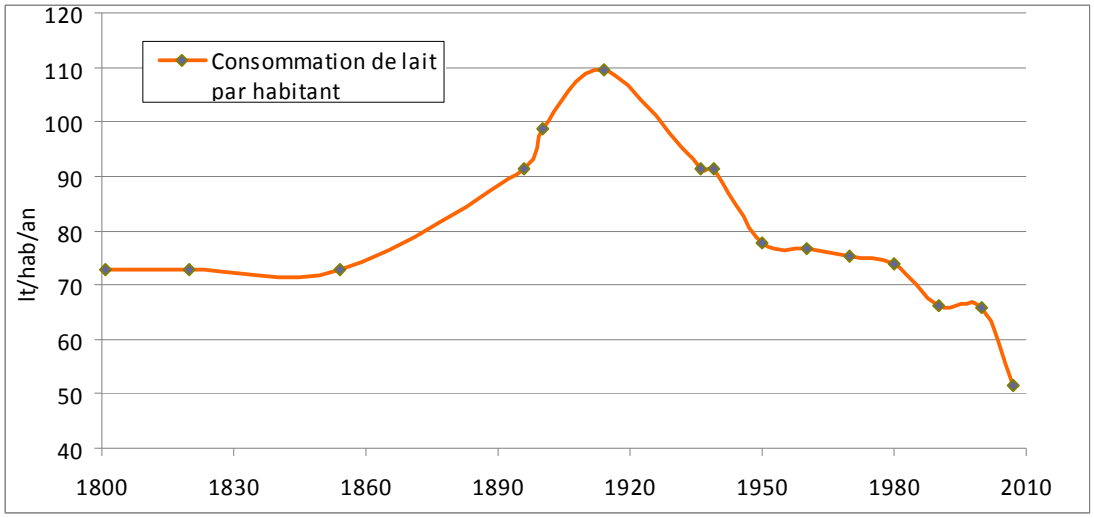


Figure 2.8 : Consommation de lait par habitant de l'agglomération parisienne : 1801-2007. Sources : Dubuc, 1938, INSEE, 1990, 2004 et voir dans le texte.

Vue dans l'ensemble, la consommation de la première moitié du XIXe siècle est suivie d'une hausse importante qui culmine au début du XXe siècle, avant de retomber dans les années 1950 presque au même nouveau qu'en 1801. Le changement de la source de données, passant des données spécifiques aux importations de Paris aux données nationales de disponibilité laitière, ne semble pas introduire de biais, puisque la courbe de consommation suit une marche régulière entre 1910 et 1960. Le Parisien consomme autant que le Français moyen (hors autoconsommation et ventes directes). Par ailleurs, le recul de la consommation à partir des années 1910, est indéniable. Le parisien moyen consomme en 2008 moins de 50 % de lait qu'au début du XXe siècle. Toutefois, cette diminution ne témoigne pas d'un déclin absolu de la consommation mais le déclin de la consommation sous forme de lait frais. La disponibilité laitière pour l'alimentation humaine dépend du bilan global entre la production totale, le commerce extérieur et l'utilisation dans les secteurs industriels de fabrication des produits laitiers. Depuis les années 1970, on constate une augmentation dans la consommation des produits laitiers, ce qui peut expliquer la baisse de la consommation de laits liquides (INSEE, 1990, 2004, Agreste, 2008e).

Le fait que la consommation à Paris s'apparente à la moyenne française n'est pas nouveau. Elle se situait déjà au XIXe siècle autour de celle d'autres villes. Contrairement à la viande dont la consommation, on l'a vu, s'élevait au XIXe siècle à 130 % de celle des autres villes, la consommation de lait à Paris au tournant du XXe

siècle se trouvait bien derrière celle de Limoges (240 l/hab/an) et de Strasbourg (160 l/hab/an), presque au même niveau qu'à Chambéry (95 l/hab/an) et à Grenoble (90 l/hab/an) et un peu supérieure à celle de Lyon (73 l/hab/an), de Nantes (66 l/hab/an) et loin devant celle de Nancy (40 l/hab/an) (Cholley, 1926). Ces données, bien qu'elles portent sur un échantillon relativement limité, prouvent que Paris ne se trouvait ni en tête ni en queue de la consommation française de lait. Pour des raisons différentes à chaque époque, la consommation des Parisiens se trouve autour de la moyenne nationale – pour le lait faisant l'objet d'une commercialisation - tout au long de la période d'étude.

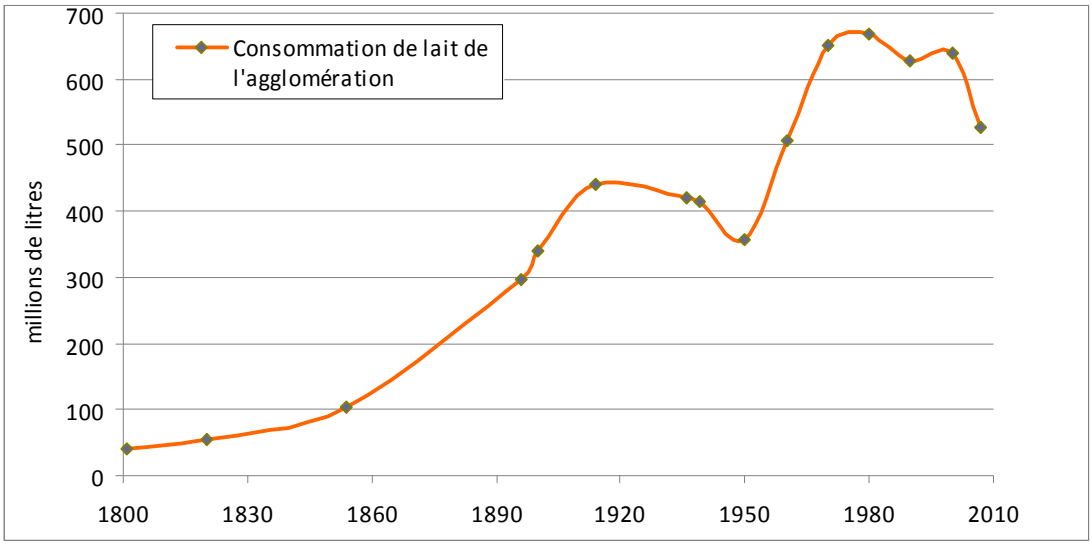


Figure 2.9 : Consommatino de lait de l'agglomération parisienne : 1801-2007. Sources de données : Dubuc, 1938, INSEE, 1990, 2004.

Enfin, en comparant la consommation totale entre les débuts de XXe et de XXIe siècles, on constate qu'en raison de la baisse importante de la consommation par habitant, la consommation actuelle est du même ordre de grandeur qu'il y a un siècle.

2.5. Conclusion

Sur la base des données démographiques qui satisfont au critère de l'uniformité alimentaire au sein d'une population, on a évalué la consommation de viande et de lait de l'agglomération parisienne. La complexité principale inhérente à cette démarche provient de la progression asymétrique en termes à la fois géographiques et de rythme de croissance entre l'urbanisation et la portée de la desserte alimentaire des

structures d'approvisionnement. La demande urbaine en viande a stimulé la croissance des marchés (et des moyens de transports ?) qui, depuis le XIXe siècle, ont suivi un développement continu, pour s'ériger en véritables réseaux d'approvisionnement dont les apports sont très difficilement quantifiables. Cette évolution conduit à la disparition des structures d'approvisionnement gérées par les pouvoirs publics urbains. Le calcul de la consommation parisienne est ainsi soumis, dès les années 1930, aux difficultés de la collecte des données des importations. Une alternative à cette méthode de calcul consiste à évaluer la consommation sur la base des disponibilités alimentaires au niveau national. Toutefois, la représentativité de cette deuxième méthode dépend de l'uniformisation des rations au niveau national. La confrontation des données issues des bilans alimentaires aux données des consommations parisiennes antérieures semble indiquer qu'une uniformisation pour le lait est survenue en France dans les années 1950 et pour la viande dans les années 1960. Sous réserve de validité de cette uniformisation, on a dressé des courbes de consommation par individu et pour l'agglomération parisienne, qui montrent une augmentation modeste des importations totales des laits liquides et une forte augmentation pour la viande (toute viandes confondues) étroitement liée à l'évolution démographique. Toutefois, la répartition des trois types de viandes dans la consommation totale a fortement évoluée entre 1801 et 2006. Les importations de la viande de porc se sont accrues d'un facteur 77 contre un facteur 7 pour la viande de boucherie. La différence d'un ordre de grandeur est en rapport avec des mutations dans le domaine de l'élevage et n'est pas déconnectée des provenances de ces aliments qui évoluent en fonction de la demande et de la répartition dans le territoire des existences animales.

Chapitre 3 : Géographie de l'approvisionnement parisien en viande et en lait et taux d'appropriation des subsistances régionales, XIXe - XXIe siècles.

3.1. Généralités

D'une façon générale, l'interaction en matière d'approvisionnement entre une région de production alimentaire et un milieu de consommation est envisageable en fonction de la distance qui les sépare et de la transportabilité des aliments en question. La connaissance des provenances des aliments présente un triple intérêt. D'une part, elle permet de mesurer les distances d'approvisionnement, notion connue en anglais sous le nom de « Food-miles » (Paxton, 1994). Cette information constitue la base du calcul des dépenses énergétiques liées au transport des aliments et une mesure de la performance écologique de l'approvisionnement. Une étude récente pour les Etats-Unis a montré que ces dépenses représentent environ 15 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'approvisionnement alimentaire tandis que 83 % des émissions totales concernent la phase de la production (Weber et Matthews, 2008). Dans le présent travail, on ne fera pas l'évaluation des dépenses énergétiques de l'approvisionnement. En vue pourtant des démarches futures, il serait intéressant de comparer la consommation énergétique liée au transport de la viande sous forme d'animaux vivants et sous forme de viande réfrigérée et la mobilisation des ressources qui en dérive.

D'autre part, connaitre les origines des aliments revient à localiser l'empreinte alimentaire et à tisser des liens de causalité entre la consommation urbaine et le métabolisme rural. L'empreinte alimentaire, qui mesure l'influence de la consommation sur l'environnement, est étroitement liée aux conditions agroenvironnementales des territoires productifs. On verra dans les prochains chapitres que, suivant les provenances de la viande et du lait consommés à Paris, les rations animales, la localisation et l'étendue des surfaces nourricières, les dépenses hydriques et la valorisation des déjections animales présentent des variations importantes.

Enfin, au-delà de la localisation de l'empreinte, l'étude des provenances des aliments

est particulièrement intéressante vis-à-vis des liens spatiaux entre la demande et la disponibilité alimentaire. Les flux des importations urbaines sont révélateurs des rapports de dépendance vivrière entre les villes et les territoires ruraux qui les entourent, et leur évolution est fonction à la fois de la demande urbaine, de la productivité agricole et de la transportabilité des aliments. Ainsi, l'étude des provenances et de leur évolution dans un contexte d'urbanisation contribue à appréhender en termes relationnels la croissance urbaine, la constitution des surplus alimentaires et la géographie des aires d'approvisionnement.

Ce chapitre vise ainsi à identifier les provenances des importations parisiennes de viande et de lait et à mesurer la fraction qu'elles représentent dans le potentiel d'exportation des territoires d'approvisionnement. La viande bovine, la viande porcine et le lait présentent des caractéristiques différentes vis-à-vis de leur transport et production, caractéristiques ayant contribué à façonner les aires géographiques respectives d'approvisionnements, en forme géographiques souvent très contrastées. On présente dans la section prochaine les sources des données sur les flux des importations et sur la production animale des territoires, l'analyse étant conduite à l'échelle départementale, de façon à obtenir une précision maximale.

3.2. Données et méthodes de calcul

3.2.1. Données sur les provenances des importations parisiennes.

Deux groupes de données sont nécessaires pour calculer le rapport entre le tonnage des importations et la production totale des systèmes d'élevage : des données spatialisées sur les flux des importations parisiennes et des données sur la production totale des cheptels aux lieux de provenance des importations. Le tonnage des importations urbaines sera évidemment une fraction de la production totale. La valeur de cette fraction montre l'articulation en termes de débouché entre la ville et les territoires de production. Plus cette fraction s'approche de l'unité et plus la ville représente un débouché préférentiel dans son aire d'approvisionnement. Dans la mesure des données disponibles, on s'intéresse à suivre l'évolution des aires d'approvisionnement parisien sans perdre de vue l'évolution de la productivité des élevages et de la fraction que Paris s'approprie pour se nourrir.

Les données dont on dispose sur les provenances des importations parisiennes ne permettent toutefois pas d'observer l'évolution de ces paramètres sur l'ensemble de la période d'étude. En effet, suivant ce qu'on a vu dans le calcul des consommations, la disponibilité des données dépend de la structure de l'approvisionnement et reflète l'importance qu'on accorde à la connaissance détaillée des sources d'aliments. Les principaux marchés aux bestiaux de la région parisienne, à savoir ceux de Sceaux et de Poissy, puis celui de la Villette à partir de 1867, relevaient les arrivages des animaux par lieu de provenance et fournissent l'essentiel des données dont on dispose sur l'approvisionnement parisien (cf. supra 1.2). S'y ajoute le tonnage des introductions des viandes au marché de gros des Halles centrales, dont l'importance s'est progressivement accrue suite au développement du chemin de fer dans la deuxième moitié du XIXe siècle. Dans les relevés des Halles centrales les introductions des viandes sont distinguées par espèce animale. Par ailleurs, les importations des bovins sur pied aux marchés aux bestiaux sont divisées en bœufs, vaches et veaux pour les marchés de Sceaux et de Poissy et en bœufs, vaches, veaux et taureaux pour le marché de la Villette. On a ainsi une bonne connaissance des provenances des bovins jusqu'au début du XXe siècle, tant que l'essentiel des apports était assuré par ces marchés.

Contrairement aux bovins, les provenances des porcs sont moins bien connues pour la première moitié du XIXe siècle. Jusqu'à l'ouverture du marché de la Villette, l'approvisionnement en porcs sur pied reposait sur quatre marchés dont les relevés des opérations n'on pas pu être collectés. Il est par ailleurs peu probable que ces données soient mobilisables (voire qu'elles existent) car on n'en a pas trouvé trace dans les travaux des historiens sur l'organisation des marchés, abattoirs et entrepôts parisiens aux XIXe et XXe siècles (ex. Philipp, 2004). D'autre part, l'octroi, dont les données ont servi au calcul des consommations, ne mentionne pas les provenances des aliments. Ainsi, les quelques données disparates et qualitatives dont on dispose par des études ponctuelles (ex. Husson, 1856) ne permettent qu'une détermination approximative de l'aire d'approvisionnement parisien en porcs jusqu'à l'ouverture du marché de la Villette dans la deuxième moitié du XIXe siècle. Celui-ci a centralisé les importations parisiennes de porcs comme de bovins et en rapporte les provenances par département français et par pays étranger.

Comme il a été mentionné précédemment (voir chapitre 2, section 2.3), une fraction relativement faible de porcs a fait l'objet d'introductions directes aux abattoirs sans transiter par le marché des bestiaux de la Villette. Il s'agit surtout des animaux que les bouchers de gros récupéraient sur les quais de la gare Paris-Bestiaux au déchargement des trains – on ignore sur la base de quels critères - dans un objectif de jouer sur les cours de la viande (Leteux, 2005). Mais étant donné que ces animaux parvenaient au marché dans les mêmes trains que les autres, il n'y a aucune raison qu'ils aient des provenances différentes.

La détermination de l'aire d'approvisionnement à partir des données de provenance indiquées dans les statistiques revient à admettre que l'élevage des animaux a véritablement eu lieu dans les régions assurant les exportations, c'est-à-dire que les importations parisiennes n'ont pas de provenances de deuxième ordre. Il en va de même pour le lait, dont on connait les provenances par les mêmes études ponctuelles du début de XXe siècle, utilisées dans le calcul de la consommation (Dubuc, 1938, Huard, 1939, Billé, 1930). Les données précises qu'elles fournissent permettent de délimiter le bassin laitier parisien jusqu'à la fin des années 1930 (Dubuc, 1939).

Dans les deux cas, pour que l'aire d'approvisionnement en viande et en lait soit correctement représentée, il faut que les animaux soient nourris dans les zones apparaissant comme émettrices des produits importés à Paris. Cette hypothèse n'a rien d'étonnant pour le lait, compte tenu des difficultés générales liées au transport et à la conservation des aliments au XIXe siècle. Pour la viande, elle très vraisemblable mais sa validité n'est pas entièrement garantie en raison de la mobilité éventuelle des animaux selon les conditions dans lesquelles s'effectuent leur élevage. En effet, le commerce d'animaux entre régions d'élevage a été utilisé aux siècles précédents comme moyen d'ajustement des effectifs des cheptels à la demande urbaine de viande et à la disponibilité de fourrages des régions d'élevage (Moriceau, 2005). Il s'agit d'une sorte de concertation interrégionale en vertu d'une spécialisation de l'élevage selon les positions géographiques respectives des régions par rapport aux grands marchés de consommation. Par exemple, des régions disposant des bons pâturages pour engraisser des animaux et étant relativement proches des centres urbains, sont susceptibles de développer une spécialisation dans la production des bovins gras,

prêts à abattre, à partir des importations des sujets jeunes et maigres depuis des régions à faible capacité de production fourragère (Antoine, 1999). En se débarrassant des jeunes veaux, ces dernières profitent mieux du lait des mères en s'engageant indirectement dans une spécialisation laitière. Des provinces comme la Normandie, le Limousin et l'Anjou, riches en pâturages et relativement proches du marché parisien, remplissaient les conditions nécessaires à la finition des bovins alors que des provinces comme l'Auvergne abandonnaient systématiquement leurs jeunes animaux aux régions périphériques (Moriceau, 2005). Faire appel aux ressources animales des régions voisines afin de compenser les exportations de bétail vers les marchés de consommation est une forme des provenances de deuxième ordre. Il s'agit d'une situation particulière dans laquelle la demande urbaine engendre un mouvement plus ou moins généralisé d'animaux d'une région à l'autre, chacune assurant un fragment de la chaîne de l'approvisionnement urbain. Il reste très difficile de savoir à quel point la demande parisienne a pu fonctionner de cette façon comme une sorte d'aspirateur des ressources animales, les engageant indirectement dans une voie de consommation et comment ceci aurait pu évoluer dans le temps en fonction des technologies de transports et des mutations agricoles. Des données historiques sur l'élevage français sont indicatives de l'existence de ce phénomène mais sans être suffisamment détaillées et représentatives pour permettre de déduire l'ampleur et la régularité du processus. On sait par exemple qu'à la fin du XVIIIe siècle, l'embouche est un choix délibéré pour les herbagers normands qui assurent la finition d'un élevage déjà effectué dans des régions de l'Ouest, comme par exemple dans le Poitou, Saintonge, Angoumois, Anjou, Bretagne, Bas-Maine ou dans le massif central, ex. Marche, Berry, Limousin (Moriceau, 2005). Pourtant, il est difficile de savoir sur combien de têtes de bétail s'applique cette stratégie commerciale, surtout que, comme on le verra plus loin, toutes les régions mentionnées ci-dessus s'appliquent directement et de manière considérable dans l'approvisionnement parisien au long du XIXe siècle. On garde en tête que le tonnage des envois par exemple normands relevés dans les marchés alimentaires parisiens peut comporter des surestimations par rapport au tonnage réellement produit dans cette province. Bien qu'on estime que les écarts soient faibles, on n'est pas en mesure d'en évaluer l'importance. Quoi qu'il en soit, on doit faire avec.

En ignorant le commerce latéral d'animaux, les provenances telles qu'elles apparaissent dans les documents historiques statistiques et autres permettent de connaitre de façon satisfaisante les aires géographiques d'approvisionnement à la fois en lait, en bovins et en porcs jusqu'au début du XXe siècle. A partir de cette date, la caractérisation des importations en termes de provenance reste problématique.

Bien que présents dans l'approvisionnement parisien jusqu'au début des années 1970, les apports du marché de la Villette et des Halles centrales ont commencé à être insuffisants par rapport aux besoins de l'agglomération à partir des années 1930 (cf. figure 2.3, chapitre 2). Les provenances correspondantes sont donc peu représentatives à partir de cette date, de l'aire géographique d'approvisionnement parisien. La même situation est valable pour le lait dont les apports se partagent entre le chemin de fer et le transport routier entraînant, comme pour la viande, la dispersion des données parmi diverses sources statistiques indisponibles.

Ce n'est que dans les années 1970 qu'apparaît une nouvelle source des données sur le transport des marchandises dans le territoire français. Il s'agit du Système d'Information sur le Transport des Marchandises (SitraM) qui est géré par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, Service de l'observation et des statistiques (SOeS), sous-direction de l'observation statistique des transports. La base de données SitraM recense chaque année les flux de marchandises (définies selon une nomenclature NST de 176 postes) entre le lieu de leur dernier chargement (département ou région française selon le mode de transport ou pays étranger pour les flux internationaux) et leur destination (département ou région française ou pays étranger). Ces enregistrements ont été entamés en 1971 pour la navigation intérieure, en 1973 pour le commerce extérieur, en 1974 pour le rail, en 1975 pour la route et en 2000 pour les transports routiers de marchandises européens. Les données sur le transport routier et fluvial sont établies par département et sur le transport ferroviaire par région. Du fait de recenser les flux annuels de marchandises, la base SitraM permet de mesurer directement les entrées et les sorties matérielles par unité administrative du territoire (i.e département ou région). A contrario, l'évaluation des flux à l'échelle des agglomérations ne peut pas se passer des hypothèses afin de déterminer les écarts de consommation entre différents groupes de populations à

l'intérieur d'une unité administrative (ex. groupements de populations urbaines et rurales au sein d'un département ou d'une région). Pourtant, bien qu'étant une source d'imprécision, ces ajustements ne constituent tout de même pas de barrières à l'exploitation de la base SitraM compte tenu notamment de l'uniformisation actuelle des consommations, surtout alimentaires, à l'échelle nationale. En revanche, la base SitraM présente d'autres inconvénients vis-à-vis de nos objectifs de travail. Sur par exemple les 176 grands postes de marchandises qui la composent, seulement dix-huit concernent l'alimentation, dont un seul, regroupe tous les animaux vivants : bovins, porcins, ovins, caprins et gallinacés y sont agrégés en unités de tonnage. Par ailleurs, un deuxième poste du nom de « *Denrées alimentaires périssables ou semi-périssables et conserves* » regroupe huit sous-postes alimentaires dont deux concernent la viande et un le lait frais et la crème fraîche ensemble. Comme pour les animaux vivants, aucune distinction n'est faite par rapport à l'origine animale de ces viandes. Les chairs de toute espèce sont confondues, puis divisées en deux catégories selon le mode de conservation : la « *viande fraîche, réfrigérée et congelée* » est rapportée séparément de la « *viande séchée, salée, fumée, préparations et conserves de viande* ». Cette nomenclature apparaît donc clairement avoir une visée d'ordre sanitaire plutôt qu'une vocation d'analyse des consommations alimentaires. En tirer des informations sur les provenances de l'ensemble de la ration carnée serait incohérent avec notre analyse pour les XIXe et XXe siècles, d'autant plus que l'appellation « viande » recouvre aujourd'hui tous les types de chairs animales - des oiseaux aux mammifères - contrairement au XIXe siècle où la chair de volaille n'était pas perçue comme viande. Les aires d'approvisionnement ne seraient donc pas comparables d'une date à l'autre car elles concerneraient des produits différents. Mais l'inconvénient principal est encore autre. C'est que la composition des rations animales, facteur primordial vis-à-vis de l'utilisation des ressources agricoles et naturelles pour l'élevage, est spécifique aux espèces et varie dans le temps et dans l'espace selon la structure et le mode de fonctionnement des exploitations. Ainsi, pour être désagrégeable et permettre de mettre en lumière les spécificités en termes de fonctionnement et d'impact environnemental des différents types d'élevage de viande, l'empreinte alimentaire doit être évaluée par produit, ce qui n'est pas possible à partir des données SitraM.

Les données permettant de localiser les provenances des importations de viande font ainsi défaut pour la période actuelle. On se doit toutefois d'établir un lien territorial entre la consommation parisienne et la production alimentaire afin de pouvoir évaluer par la suite l'empreinte de l'alimentation. Dans une première approche, on a choisi de repartir les importations parisiennes au prorata de la production de viande du territoire et du bilan d'approvisionnement national. Ainsi, les importations parisiennes de la viande porcine et bovine sont considérer provenir des régions françaises d'élevage au prorata de leur production ainsi que de l'étranger à proportion égale aux importations françaises de chacune de ces viandes.

Contrairement aux différentes viandes, le lait représente, avec la crème fraîche, une catégorie alimentaire à part entière dans la nomenclature de la base SitraM (sous-poste alimentaire « lait et crème fraîche »), il est ainsi possible d'en déterminer correctement l'aire géographique d'approvisionnement. Pourtant, la mise à disposition de la base SitraM, trop tardive par rapport à l'avancement de cette thèse, ne nous a pas permis d'identifier les provenances éventuelles de deuxième ordre dans l'approvisionnement parisien en lait, on a ainsi été obligé de limiter l'analyse de l'aire géographique d'approvisionnement aux provenances de première ordre. Celles-ci s'écarteraient des lieux réels de production dans le cas des chargements intermédiaires le long de la chaîne d'approvisionnement. Or, on s'attend à ce que les provenances de deuxième ordre soient d'importance limitée dans le cas du lait car il s'agit d'un aliment dont le conditionnement doit se faire à proximité du lieu de production. Qu'il s'agisse de pasteurisation ou de traitement UHT, il est improbable que le lait change de département entre le pis de la vache et l'usine du traitement, les provenances de deuxième ordre se limiteraient donc à des cas de rechargements pour des raisons logistiques. Au fait, remonter aux provenances d'ordres supérieurs, nécessiterait de croiser la base des données SitraM avec une base de données de production animale de façon à dresser le bilan entre les importations, exportations et productions internes de lait de l'ensemble des départements concourant à l'approvisionnement parisien. Du fait que le nombre de calcul dans une telle démarche croît exponentiellement, sa réalisation nécessite un travail préparatoire lourd de collecte des données et d'automatisation des requêtes de la base, travail qui

n'a pas pu être réalisé dans la limite de temps de cette thèse[1]. Mais, quoi qu'il en soit, la détermination des provenances de premier ordre permet déjà une bonne approximation de l'aire géographique de l'approvisionnement en lait. On dispose à l'heure actuelle des données de la base SITRAM pour l'année 2006[2].

Sur la base de ces considérations et sous la contrainte de disponibilité des données on présentera une analyse de l'aire d'approvisionnement parisien en lait, en viande bovine et en viande porcine à quelques dates au XIXe siècle et début de XXe siècle auxquelles s'ajoute 2006 pour le lait. La géographie de l'approvisionnement en viandes à l'époque contemporaine étant tirée des quotas de la production nationale, les représentations ne comportent pas de spécificités vis-à-vis de l'agglomération parisienne.

Comme on l'a annoncé précédemment, un des intérêts de l'étude des provenances est de confronter le tonnage des importations à la production totale des territoires d'approvisionnement. On décrira ci-dessous les sources des données sur les existences animales du territoire ainsi qu'une méthodologie pour les adapter aux besoins de cette comparaison. Celle-ci concerne la viande plutôt que le lait. En effet, du fait que la production laitière est partagée entre l'élevage des veaux, la consommation humaine directe et la fabrication des produits laitiers, faire le bilan entre les importations parisiennes et la production laitière des territoires d'approvisionnement ne suffit pas pour apprécier le degré d'appropriation de la production par la capitale.

3.3.2. Données sur la production totale du territoire. Comment comparer les importations au potentiel de production.

Il s'agit de comparer le tonnage des importations parisiennes à la production annuelle de viande des territoires d'approvisionnement au XIXe et début de XXe siècles. On entend par production des territoires d'approvisionnement, la viande produite

[1] Le développement d'une telle application est actuellement en cours dans le cadre du projet Confluent (ANR Ville durable).

[2] Le coût de la base ne permet pas l'acquisition de chroniques.

localement, c'est-à-dire la biomasse animale issue des élevages locaux. C’est en confrontant cette production aux importations parisiennes et sous réserve de validité de l’hypothèse d’absence des provenances de deuxième ordre qu’on pourra appréhender les liens nourriciers entre la capitale et les territoires qui l’approvisionnent.

La production locale de la viande dans les départements d’approvisionnement n’est pas connue directement. Les enquêtes agricoles décennales aux XIXe et XXe siècles, puis les statistiques agricoles annuelles à partir de 2006 (Statistique agricole annuelle, 2006-2009) mesurent la production des abattoirs de chaque département par espèce animale, indépendamment des origines des animaux abattus. Ainsi, plus le transport interdépartemental en animaux vivants est important plus la production de la viande des départements s’écarte du potentiel réel de production des élevages locaux, ce qui fait aux XIXe et XXe siècles lorsque l’approvisionnement des villes reposait largement sur les importations d’animaux vivants, plus un département s’urbanisait et plus sa production en viande apparaissait élevée dans les statistiques. Aujourd’hui, le transport d’animaux vivants se fait des départements spécialisés dans l’élevage vers les départements spécialisés dans la transformation et conditionnement de la viande dans les industries agroalimentaires. Ainsi, à toute date, la production que mentionnent les statistiques par unité administrative, est déconnectée du potentiel de production des élevages locaux, puisqu’elle comprend la viande transportée sous forme d’animaux vivants et abattue dans les lieux destination.

Les données qui permettent de s’approcher au mieux du potentiel de production des élevages sont celles issues des dénombrements des effectifs d’animaux dans les enquêtes agricoles. Ces enquêtes établissent annuellement l’état statistique des effectifs d’animaux par espèce animale et par département français. Elles relèvent le nombre de têtes qui y sont présentes à la date de l’enquête et divisent les existences animales totales de chaque espèce en sous groupes, selon des critères d’âge ou de la fonction des sujets dans le cheptel. Les données les plus anciennes dont on dispose remontent en 1839 pour les bovins et en 1852 pour les porcs (Block, 1858). Les catégories retenues varient d’une année à l’autre mais elles sont souvent caractérisées par une finesse statistique remarquable. A titre d’exemple, la statistique de 1839

répartit le cheptel bovin en bœufs et en vaches, par opposition à celles des années 1880 où la répartition en est faite en huit catégories : taureaux, bœufs de travail, bœuf à l'engrais, vaches, bouvillons, génisses, élèves entre six mois et un an et veaux de moins de six mois (ex. : Statistiques agricole annuelle, 1886-1891). De manière opposée, les existences porcines sont rapportées en un seul bloc dans toutes les statistiques jusqu'au début du XXe siècle. A partir de cette date et jusqu'aux années 1970, elles sont divisées en quatre catégories : les verrats, truies reproductrices, porcs à l'engrais de six mois et plus et porcs de moins de six mois (Statistique agricole annuelle, 1906, Statistique agricole annuelle, 1963). Aujourd'hui la répartition est encore différente. Les bovins sont divisés en dix catégories : veaux et élèves de moins de six mois, veaux de boucherie, vaches laitières, vaches nourrices, taureaux et jeunes mâles destinés à la reproduction, génisses laitières de renouvellement, génisses nourrices de renouvellement, taurillons et broutards castrés, bœufs et bouvillons castrés, autres bovins d'un an et plus. Pour les porcs on en compte six : porcelets, jeunes porcs de 20 à 50 kg, jeunes truies de 50 kg et plus (non saillies ou en première gestation), truies mères de 50 kg et plus, verrats de 50 kg et plus et porcs à l'engrais de 50 kg et plus (Statistique agricole annuelle, 2006).

L'évolution de la nomenclature des existences animales reflète les changements d'orientation des systèmes d'élevage en un siècle et demi. L'attention statistique que l'on porte actuellement à l'élevage porcin n'est apparue qu'au courant du XXe siècle et est étroitement liée à l'industrialisation du secteur. En revanche, le changement de la nomenclature du cheptel bovin est éloquent de la transformation de l'usage de ces animaux, d'élément intégral des systèmes agraires au XIXe siècle à un pur mécanisme de production de viande et de lait. Par opposition, à l'autre bout de la chaîne d'approvisionnement, la nomenclature des statistiques sur les flux des importations s'est beaucoup appauvrie. On faisait aux XIXe et XXe siècles la distinction des importations par espèce animale et par provenance avec une distinction davantage fine pour les importations bovines entre bœufs, vaches et veaux par opposition à la nomenclature d'aujourd'hui où toutes les viandes sont confondues en un seul poste (cf. supra, § 3.2.1). Car connaître les provenances de la viande par espèce animale présentait beaucoup plus d'intérêt au XIXe et au début de XXe siècle qu'aujourd'hui, lorsque les bilans de production étaient plus étroits et la possibilité du

transport des aliments réduite. L'intérêt statistique s'est déplacé des importations à la production. C'est en raison des bilans étroits que la comparaison entre le tonnage des importations et la production totale aux lieux de provenance des viandes présente un intérêt particulier aux siècles précédents.

Une fois qu'on connaît le nombre des animaux par espèce et par département, on doit définir la fraction qui en est annuellement livrable à la production de la viande. Cette fraction dépend du cheptel dont on parle. Elle est positivement corrélée au taux de reproduction mais elle diminue quand l'élevage est partagé parmi plusieurs fonctions. Par exemple, la présence des vaches laitières et des bœufs de labour dans le cheptel bovin se traduit par la réduction du potentiel de production de la viande. Par conséquent, le potentiel de production de la viande de chaque espèce animale varie d'une époque à l'autre en fonction des facteurs comme le partage des animaux entre la production de la biomasse et le labour, les types de fourrages au soutien de l'élevage, la composition spécifique des cheptels et l'efficacité et fréquence d'insémination des femelles. Les données des statistiques agricoles peuvent être utilisées pour déduire un nombre de ces variables par département, par espèce et par époque. Par exemple, le temps de renouvellement des cheptels peut être indirectement approché par le rapport entre le nombre des femelles et des jeunes animaux par espèce. Par ailleurs, des données sur le nombre de bovins de travail et de vaches laitières, associées aux informations relatives à l'âge moyen des animaux présentés à l'abattage issues des enquêtes décennales (ex. Ministere de l'agriculture, 1897) concourent à estimer le rythme auquel les animaux qui remplissent deux ou plusieurs fonctions productives dans les cheptels sont affectés à la production de la viande. Toutefois, s'employer à cette approche de modélisation de la dynamique des populations animales en fonction de la structure des systèmes agraires et des contraintes agroenvironnementales par époque et département conduirait à nous écarter des objectifs principaux de cette thèse. On a donc opté pour l'évaluation du potentiel de la production de viande comme une simple fonction de la taille des cheptels. Il s'agit d'établir un rapport général entre les existences animales par espèce et le nombre des abattages annuels et de l'appliquer aux cheptels de chaque département. Afin de s'affranchir du problème des flux interdépartementaux d'animaux vivants, ce rapport doit s'établir au niveau national, c'est-à-dire entre le

nombre des abattages annuels du pays et le cheptel total par espèce animale. Ainsi, le transport en animaux vivants d'un département à l'autre n'interviendra pas dans le calcul du potentiel de production de viande.

La validité de cette approche dépendra alors de l'uniformité entre départements du temps de renouvellement des cheptels d'une même espèce animale. Dans le cas des porcs, on s'attend à une meilleure uniformité puisqu'il s'agit d'animaux entièrement élevés pour la production de la viande. Dans le cas des bovins, la validité dépend de l'allocation des existences bovines des départements entre production de viande, production de lait et labour. Par contre, dans les deux cas, plus les importations parisiennes seraient caractérisées par des provenances de deuxième ordre, plus les résultats obtenus seraient faussés du fait que les départements qui engraissent du bétail importé d'ailleurs sont caractérisés par un cheptel à renouvellement plus rapide que les départements qui assurent toutes les étapes de l'élevage.

Le nombre des abattages annuels pour la France entière peut être tiré directement des enquêtes décennales au XIXe siècle (ex. : Ministere de l'agriculture, 1897) et des statistiques agricoles annuelles à partir de 2006 (Statistique agricole annuelle, 2006). Pour des années qui ne sont pas munies des données, on peut l'estimer indirectement à partir de la consommation française moyenne (on dispose ces chiffres pour les années 1842, 1852, 1862 et 1882 - Statistique agricole annuelle, 1882) et du rendement moyen en viande des animaux à l'abattage. Par contre, dans ce deuxième cas on doit examiner - au moyen des bilans d'approvisionnement nationaux - quelle fraction de la consommation provient des animaux indigènes. Selon les chiffres dont on dispose sur le commerce extérieur du pays pour une série d'années entre 1831 et le début du XXe siècle, la France se trouve en état d'autosuffisante (équilibre entre les importations et les exportations) en ce qui concerne l'approvisionnement en porc (Statistiques Agricoles Annuelles, 1885-1891, 1918-1921 et résultats rétrospectifs 1831-1918).

Tableau 3.1 : Production nationale de viande par habitant et par an, nombre d'abattages, nombres des effectifs d'animaux, rapport entre les abattages et les existences par espèce et par date. Sources de données : Block, 1858, Statistique agricole annuelle, 1882, 1885, 2006, Ministère de l'agriculture, 1897.

	Porcs				Bovins			
Année	Production de viande (kg/hab/an)	Nombre d'abattage (têtes)	Existences animales (têtes)	Fraction livrable à la production de viande (rapport d'abattage)	Production viande de (kg/hab/an)	Nombre d'abattage (têtes)	Existences (têtes)	Fraction livrable à la production de viande (rapport d'abattage)
1842[1]	8,5	$3,3*10^6$	$4,5*10^6$	74 %	9,1	$1,1*10^6$	$9,9*10^6$	11 %
1852	9,3	$3,8*10^6$	$5,0*10^6$	77 %	10,9	$1,5*10^6$	$1,2*10^6$	13 %
1862	10,1	$4,3*10^6$	$5,4*10^6$	79 %	12,8	$1,7*10^6$	$1,3*10^6$	13 %
1882	10,3	$4,6*10^6$	$5,9*10^6$	78 %	18,2	$2,5*10^6$	$1,3*10^6$	19 %
1892	11,4	$5,1*10^6$	$6,1*10^6$	85 %	18,3	$2,6*10^6$	$1,4*10^6$	19 %
2006 [2]	34,3	$15,6*10^6$	$14,8*10^6$	170 %	26,1	$5,2*10^6$	$2,0*10^6$	27 %

[1] En 1842 la donnée sur les existences est manquante pour les porcs et correspond en 1839 pour les bovins

[2] A noter que pour 2006 la production de la viande par habitant ne correspond pas à la consommation car ce calcul ne tient pas compte du commerce extérieur. Le taux national d'approvisionnement de 105 % pour les porcs et de 92 % pour les bovins, les consommations respectives sont alors de 5 % plus faibles pour les porcs et de 8 % plus élevées pour les bovins.

Les mêmes sources indiquent un léger déficit pour les bovins entre 1855 et 1885 mais les importations nettes ne représentent qu'un pourcentage négligeable du bilan d'approvisionnement national. Par conséquent, la consommation moyenne pour les deux types des viandes repose pratiquement entièrement sur la production indigène.

Le tableau 3.1 montre la production moyenne par habitant de viande porcine et bovine, le nombre des animaux abattus, le nombre des effectifs de cheptels et le rapport entre les abattages et les effectifs aux différentes dates. La comparaison est faite en ramenant le nombre des abattages de chaque date au rendement français moyen en viande de 2006 : 88 kg pour les porcs et 285 kg pour les bovins (Statistique agricole annuelle, 2006).

Ce tableau met en évidence l'évolution du rapport entre les abattages et les effectifs pour les deux espèces. En premier lieu, ce rapport a continuellement augmenté au cours du XIXe siècle aussi bien pour les porcs que pour les bovins. Mais l'écart entre les deux espèces est énorme. Dans la première moitié du XIXe siècle, presque 75 % des effectifs annuels de porcs étaient livrés à la production de viande, contre 13 % pour les effectifs annuels de bovins. Cette différence est à la fois imputable aux spécificités en termes de métabolisme entre les deux espèces et à la présence des vaches laitières et des bœufs de travail dans le cheptel bovin, fonctions synonymes d'un rallongement considérable de l'âge moyen d'abattage pour ce cheptel. En 1892, les porcs sont en moyenne conduits à l'abattage à l'âge d'un an contre environ quatre ans en moyenne (moyenne pondérée entre les veaux et les gros bovins) pour les bovins (Ministere de l'agriculture, 1897).

On remarque aussi que le rapport d'abattages a presque doublé pour le cheptel bovin entre 1842 et 1892. Ceci est en lien avec une accélération de l'engraissement au XIXe siècle, suite à l'utilisation des rations plus efficaces qui déterminent le taux de conversion des matières végétales en matières animales (NRC, 2001, Chatzimpiros et Barles 2010b). Ensuite, entre la fin du XIXe et le début du XXIe siècle le rapport des abattages a doublé pour les porcs et n'a augmenté que de 40 % pour les bovins. L'accélération décalée du processus de croissance entre les deux secteurs illustre bien que l'intérêt pour l'élevage bovin a bien devancé celui pour les porcs de façon

synchrone à l'évolution différentielle de la structure et du rôle de deux secteurs dans l'économie rurale. Actuellement, la durée de vie des porcs n'est plus que de six mois contre deux ans pour les bovins.

Exprimant le temps de renouvellement des cheptels, le rapport d'abattages dépend des facteurs tels que l'efficacité de l'insémination et la croissance annuelle de biomasse par tête d'animal. D'une part, l'insémination artificielle des cheptels ne prend d'importance qu'à partir de la fin des années 1940[1]. D'autre part, la production annuelle de biomasse s'est notamment accrue dans la deuxième moitié du XXe siècle suite à l'emploie des rations animales hautement énergétiques et protéiques (Chatzimpiros et Barles, 2010b). Ainsi, le rapport d'abattages à la fin du XIXe siècle est représentatif jusqu'à la fin de la première moitié du XXe siècle.

En appliquant aux effectifs des départements d'approvisionnement parisien les rapports d'abattages du tableau 3.1 on est en mesure d'établir le potentiel de production de viande par département. La fraction que réclame l'approvisionnement parisien pourra ensuite être calculée en confrontant à ce potentiel le tonnage des importations parisiennes.

Le département de la Seine constitue un exemple particulier. Les importations de Paris qui en proviennent se caractérisent manifestement par des provenances de deuxième ordre : le tonnage exporté vers Paris, de viande porcine comme bovine, dépasse largement le potentiel de production des cheptels. En effet, les exportations des porcs en 1885 s'élèvent à $880*10^3$ tonnes pour une capacité de production de $140*10^3$ tonnes. En 1906, les exportations sont de $320*10^3$ tonnes pour une production locale de $270*10^3$ tonnes. Pour les bovins, les exportations dépassent en 1839 la production locale de 350 %. Il en résulte pour les trois années des bilans de production négatifs. Pour les porcs, ceci est dû au fait que le département de la Seine fait l'importation des porcins en fin d'engraissement qu'il livre à la production de viande après un séjour très court. Il en va de même pour les bovins. Le cheptel du département de la Seine est en 1839 composé de 16 326 bovins dont 98 % sont des

[1] Le nombre des vaches inséminées artificiellement a augmenté d'un facteur 50 entre 1948 et 1964 (Statistique agricole annuelle 1965 et rétrospective 1930-1964)

vaches laitières (Block, 1958) mais, selon les relevés des marchés de Sceaux et de Poissy, il livre à la production de viande 11 000 bovins soit près de 70 % des existences totales et deux fois plus de bovins non-laitiers que ces effectifs. Ces exemples illustrent que le département de la Seine se chargeait, dès le XIXe siècle, de jouer le rôle d'une plateforme logistique pour le ravitaillement de la capitale.

Jusqu'au début du XXe siècle, la Seine est l'unique département de l'aire d'approvisionnement parisien dont les exportations dépassent la capacité de production. A défaut d'informations sur les provenances de deuxième ordre les apports du département seront réduits à son potentiel de production.

3.3. Géographie de l'approvisionnement en viande et en lait et taux d'appropriation du potentiel de production

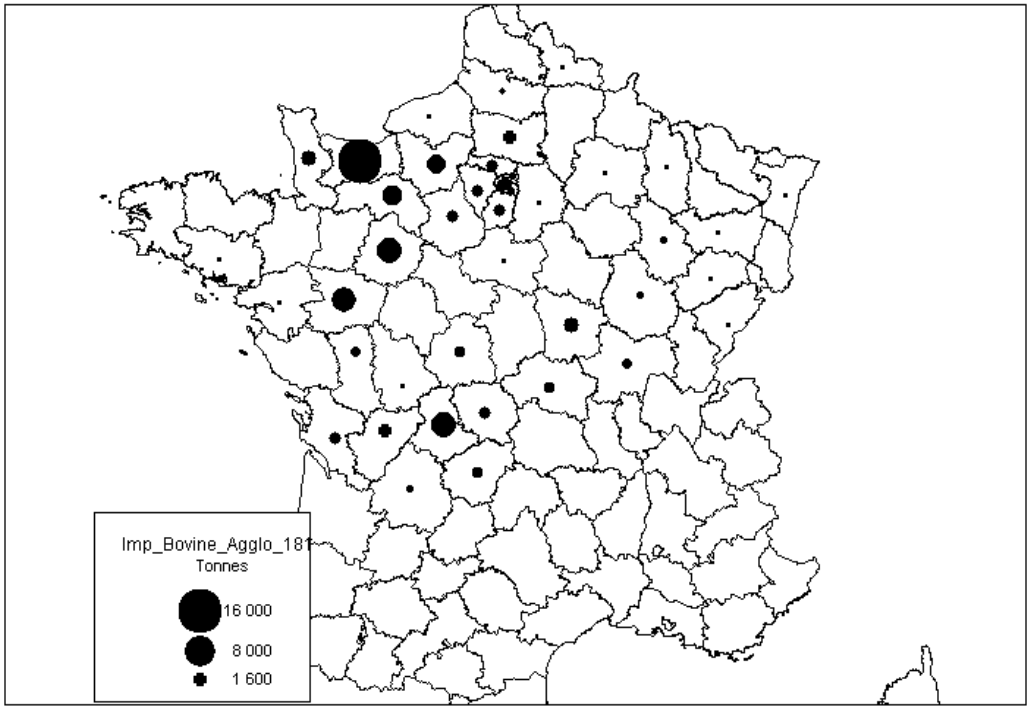
3.3.1 Début XIXe – début XXe siècle

Animaux de trait, les bovins n'ont pas connu les mêmes contraintes que le lait et les porcs pour parvenir aux marchés parisiens antérieurement au développement du chemin de fer. Les existences bovines des régions d'élevage relativement lointaines représentaient une source potentielle de viande pour la capitale : il suffisait pour cela que les éleveurs les mettent à marcher jusqu'à Paris (Coffignon, non daté). On montrera l'évolution des provenances des importations parisiennes par département français au moyen d'une cartographie pour quelques dates au XIXe et début de XXe siècle pour lesquelles les données sont disponibles. Les représentations sont faites selon le découpage administratif actuel par département[1]. Ainsi, les données pour les anciens départements de la Seine et de la Seine-et-Oise sont redistribuées dans les départements actuels de la petite, et de la grande, couronne respectivement[2]. Les provenances des importations sont représentées par des secteurs de taille proportionnelle au tonnage des apports. La carte 3.1 montre les provenances des

[1] Se reporter à l'annexe I pour un fond cartographique de la France avec les noms et les numéros des différents départements.

[2] En 1964, le département de la Seine a été pratiquement reparti aux départements actuels de Paris, de Hauts-de-Seine, de Seine-Saint-Denis et de Val-de-Marne. Celui de la Seine-et-Oise aux départements de l'Essonne, du Val-d'Oise et des Yvelines.

bovins en 1812.



Carte 3.1 : Importations parisiennes de viande bovine (tonnes de carcasse) par lieu de provenance en 1812. Source : Relevés des marchés aux bestiaux de Sceaux et de Poissy dans Philipp (2004).

La disposition géographique de l'approvisionnement laisse apparaître une zone de faible contribution à proximité de Paris, la concentration des apports dans l'Ouest et Sud-Ouest parisien et une deuxième zone d'apports du centre-ouest au nord-est de la France. Cette distribution spatiale indique que les territoires les plus proches de la capitale n'étaient pas les plus appropriés à en assurer l'approvisionnement en bovins. Les apports les plus considérables proviennent – par ordre d'importance - des départements du Calvados, de la Haute-Vienne, de la Sarthe, du Maine-et-Loire, de la Seine-et-Oise, de l'Orne et s'élèvent à 63 % de la consommation totale de la capitale. Ces envois sont en moyenne composés à 61 % des bœufs, à 3% des vaches et à 36 % des veaux s'écartant alors légèrement de la composition moyenne des envois totaux pour cette date étant pour 54 % des bœufs, 4% des vaches et 42 % des veaux. Les écarts dans la composition du cheptel d'exportations vers Paris sont en rapport avec la spécialisation des régions exportatrices dans l'élevage et la structure de leurs systèmes agraires. Du fait d'envoyer plus des bœufs et moins des veaux, les six premiers départements d'approvisionnement montrent en moyenne une spécialisation

dans l'engraissement des gros bovins. Toutefois, on retrouve des spécificités qui méritent d'être mentionnées d'autant plus qu'elles résultent de l'approvisionnement parisien en lait. Les envois de l'ancien département de la Seine-et-Oise, cinquième plus important en termes de tonnage dans l'approvisionnement parisien en viande bovine, se composent à 94% des veaux, à 4 % des vaches et seulement à 2 % des bœufs. Cette contribution résulte du fait que ce département, étant impliqué dans l'approvisionnement laitier de Paris en raison de sa proximité, se débarrasse de la majorité de ces veaux rapidement après leur naissance afin de faire usage de la production laitière dans l'approvisionnement parisien. Ainsi, on constate que la contribution dans l'approvisionnement de la viande bovine est une conséquence directe de la vocation laitière du département limitrophe de la capitale. La proximité au grand marché parisien s'avère doublement lucratif. Un autre exemple concerne le département de la Seine qui, en tant qu'approvisionneur principal de Paris dans la première moitié du XIXe siècle, se pourvoie en vaches élevées ailleurs qu'on exploite pour la production du lait. En fin de carrière, ces vaches sont bien évidemment livrées à la production de la viande, d'où le fait que 80 à 90 % du cheptel bovin présenté aux marchés de vif en provenance de ce département ce sont des vaches. Du reste, ce sont surtout des veaux pour les mêmes raisons que celles évoquées dans le cas de la Seine-et-Oise. Par ailleurs, il est intéressant de noter que les envois de l'ensemble du cheptel de la province de l'Ile-de-France concernent principalement des veaux tout au long du XIXe siècle. En 1812 ils se partagent entre les veaux, vaches et bœufs en proportions de 90 %, 9 % et 1 % respectivement. Cette répartition est de 80 %, 19 % et 1 % respectivement à la fin des années 1820, pourcentages qui se maintiennent inchangeables jusqu'à la fin des années 1850. Cette répartition, nettement différente de la répartition des importations totales des bovins sur la période de 1812 à 1850 (41 % des veaux, 51 % des bœufs, 8 % des vaches), est curieuse car, en dehors du département de la Seine et de la Seine-et-Oise, la province de l'Ile-de-France ne concoure à l'approvisionnement en lait de Paris qu'à partir de la deuxième moitié du XIXe siècle (Dubuc, 1938, cf. chapitre 2). Elle est ainsi due à d'autres facteurs historiques et agronomiques éventuellement liées à des habitudes agricoles et alimentaires locales ainsi qu'à la pénurie de foin aux alentours de la capitale pour l'élevage des veaux en raison de la forte consommation fourragère des vaches

laitières parisiennes. Le commerce de foin garantissait une rémunération pour les agriculteurs avec moins de risque d'investissement que l'élevage (Fanica, 2008). C'est un effet indirect de l'approvisionnement laitier parisien qui, même sans reposer directement sur les apports des départements de sa province, les engageait sur une voie de spécialisation de la production agricole et des activités commerciales.

L'aire d'approvisionnent en bovins s'est progressivement élargie au cours du XIXe siècle sous l'effet de la demande parisienne croissante. La figure 3.1, montre à la fois l'évolution du nombre de départements fournisseurs et du tonnage d'importations entre 1812 et 1850. En effet, les deux séries présentent un coefficient de corrélation de 0,8.

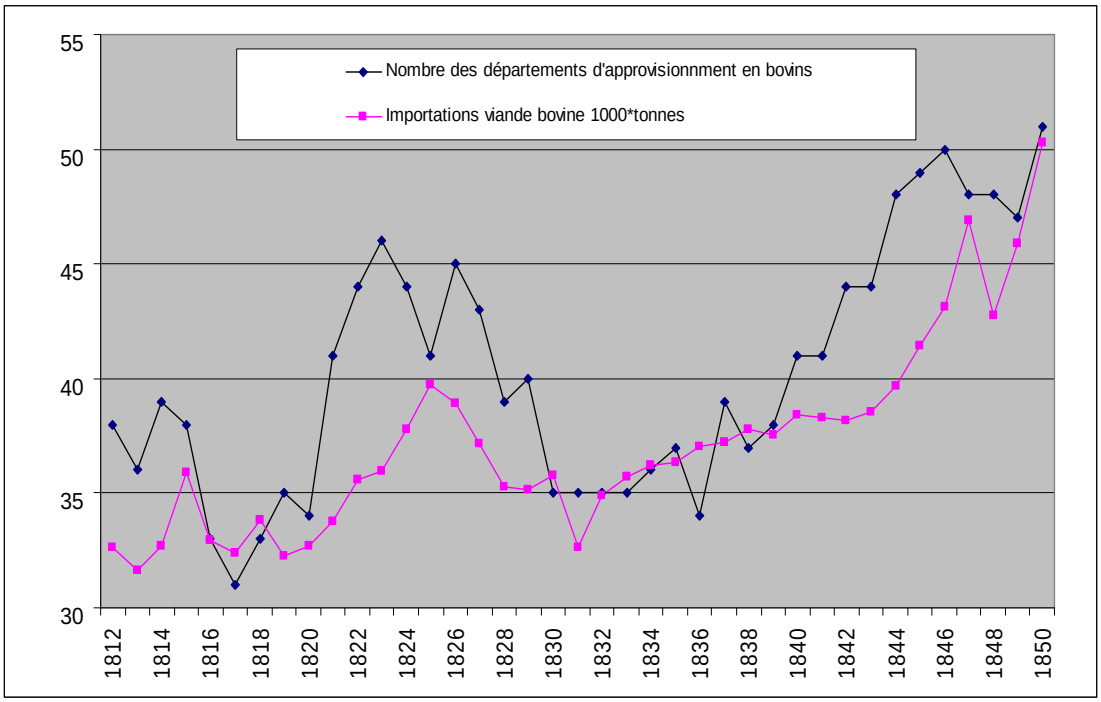


Figure 3.1 : Nombre des départements concourant à l'approvisionnement parisien en viande bovine et tonnage des importations (milliers de tonnes) entre 1812 et 1850. Source de données : Relevés des marchés de Sceaux et de Poissy dans Philipp (2004).

En parallèle avec l'augmentation du nombre des départements fournisseurs, le tonnage moyen d'exportation est passé de $860*10^3$ tonnes/département en 1812 à $990*10^3$ tonnes/département en 1850, soit une augmentation de 15 %, signe d'une augmentation de la productivité moyenne des systèmes d'élevage au soutien de l'approvisionnement parisien. Il est également intéressant de remarquer que le

tonnage des importations suit une évolution nettement moins variable que le nombre des départements d'approvisionnement, ce qui sous-entend des ajustements de tonnage à la demande de la capitale. En 1836 par exemple, le tonnage moyen d'exportation pour les 34 départements d'approvisionnement maximise à $1090*10^3$ tonnes/département afin d'assurer la régularité de l'approvisionnement.

L'approvisionnement semble au fur et à mesure se pérenniser. Le nombre des départements d'approvisionnement et le tonnage des importations se stabilisent à partir du début des années 1830. Cette tendance se poursuit dans la deuxième moitié du XIXe siècle à l'appui du chemin de fer. Le nombre des départements d'approvisionnement passe à soixante-huit en 1885 et à quatre-vingt-un en 1906 et les tonnages des importations à $137*10^3$ et $167*10^3$ tonnes respectivement (Statistiques agricoles annuelles, 1886, 1906).

Les premières données sur les existences bovines par département datent de 1839 (Block, 1858). La figure 3.2 montre le partage de la production entre le tonnage importé à Paris (en rouge) et la disponibilité résiduelle en viande (en bleue) pour les des vingt-six premiers départements d'approvisionnement assurant 99 % des apports.

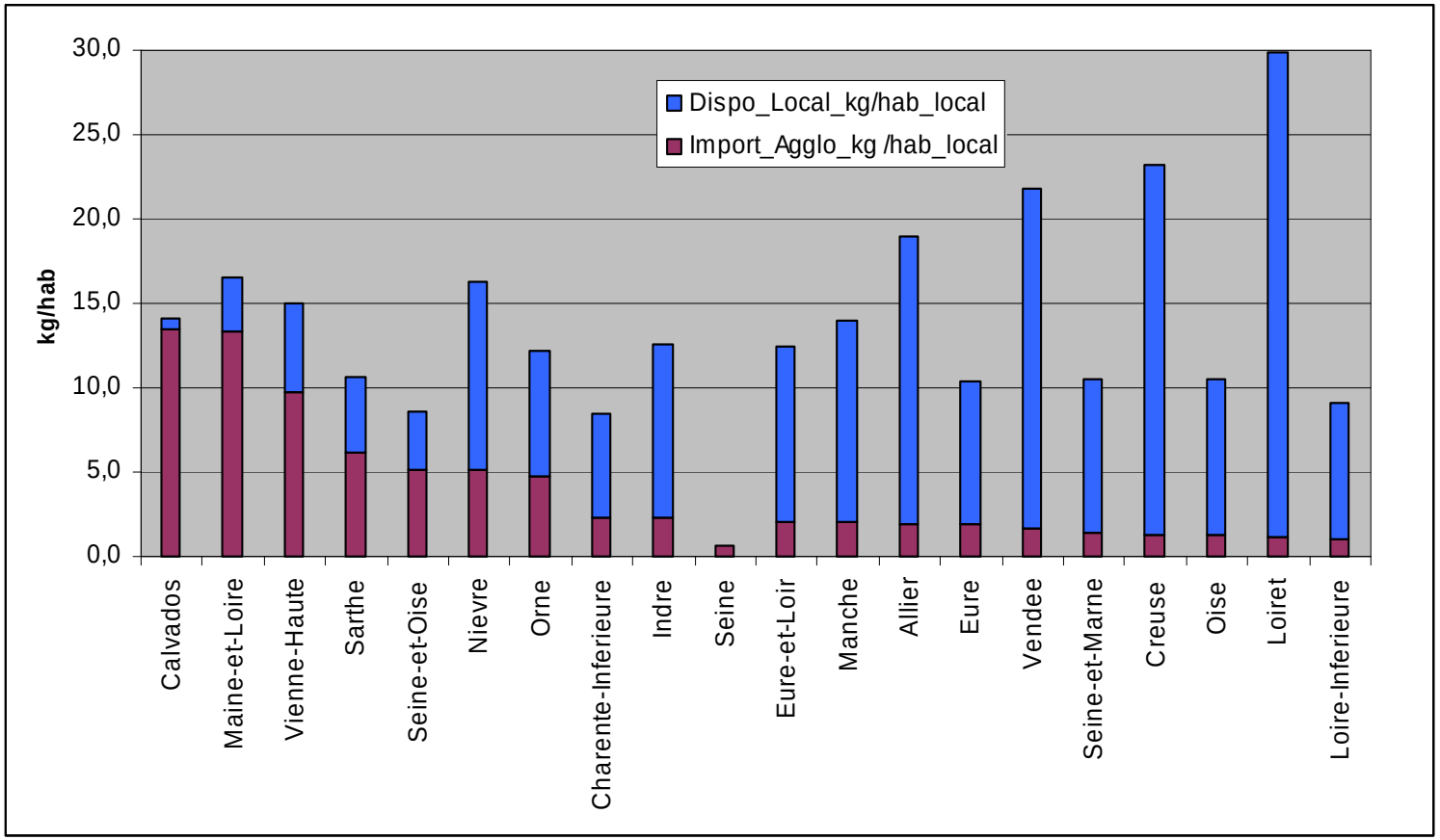


Figure 3.2 : Production de viande bovine et exportation vers Paris par département concourant à l'approvisionnement en 1839 (kg de carcasse/habitant local). Sources de données : Block (1858), Relevés des marchés de Sceaux et de Poissy dans Philipp (2004) et cette étude.

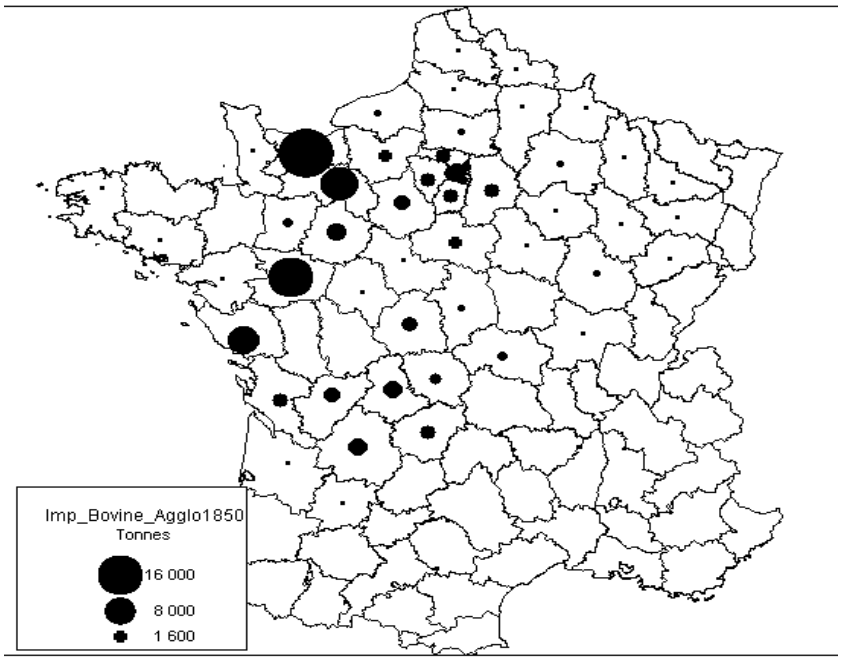
Les importations parisiennes sont inégalement reparties par rapport à la production en viande du territoire. La contribution de certains départements avoisine leur potentiel de production. Il s'agit d'une certaine monopolisation de la production par la capitale qui conduit à priver pratiquement les populations locales de la consommation de viande bovine.

En effet, la contribution et la disponibilité sont presque inversées. Le Calvados, premier département en termes du tonnage d'envois par habitant local, expédie la quasi-totalité de sa production dans la capitale, étant déjà relativement faible. On rappelle pourtant sur ce point la discussion de la section 3.2, sur l'éventualité des provenances de deuxième ordre pour les départements de la Normandie. Les éleveurs normands se spécialisaient dans l'engraissement des bovins importés d'autres régions, ce qui correspond à l'augmentation du temps de renouvellement de leur cheptel, c'est-à-dire de la fraction des existences qui est livrable à la production de viande.

La fraction de la production exportée à Paris est nettement plus faible dans le reste des départements, mais, pour six d'entre eux, elle reste majoritaire. Par ailleurs, un grand nombre de départements contribuent très peu dans l'approvisionnement parisien malgré leur potentiel de production élevé. Il y a en tout vingt-six départements qui envoient moins de 20 % de leur production annuelle et dix-neuf qui en envoient moins de 10 %. Ceci correspond en une diminution asymptote des apports vers Paris en fonction du nombre des fournisseurs.

Au milieu du XIXe siècle, les disparités en termes de contribution à l'approvisionnement parisien en viande bovine, entre les régions de l'ouest et du nord-est de la France s'accentue. La carte 3.2 représente la répartition géographique de l'approvisionnement en 1850. Du côté est, le tonnage des apports est faible et très uniformément réparti sur une zone continue. Du côté ouest, la répartition est plus hétérogène mais les apports se sont beaucoup intensifiés depuis 1812, ce qui laisse apparaître un certain ancrage de l'approvisionnement dans cette partie du pays. En particulier, les départements du Calvados, du Maine-et-Loire et de l'Orne ont accru leurs envois de 90 % par rapport à 1812 assurant en 1850, à eux seuls, 50 % des apports totaux. Par ailleurs, une zone d'apports relativement élevés se constitue dans

le centre-ouest du pays. En plus, deux départements bretons apparaissent pour la première fois dans l'aire d'approvisionnement parisien. Pourtant, l'augmentation du tonnage des importations de Paris depuis 1812, n'a pas fait augmenter le nombre des départements fournisseurs. Les départements déjà présents dans l'aire d'approvisionnement en 1812 ont intensifié leurs envois. C'est car le chemin de fer n'est pas encore au point.

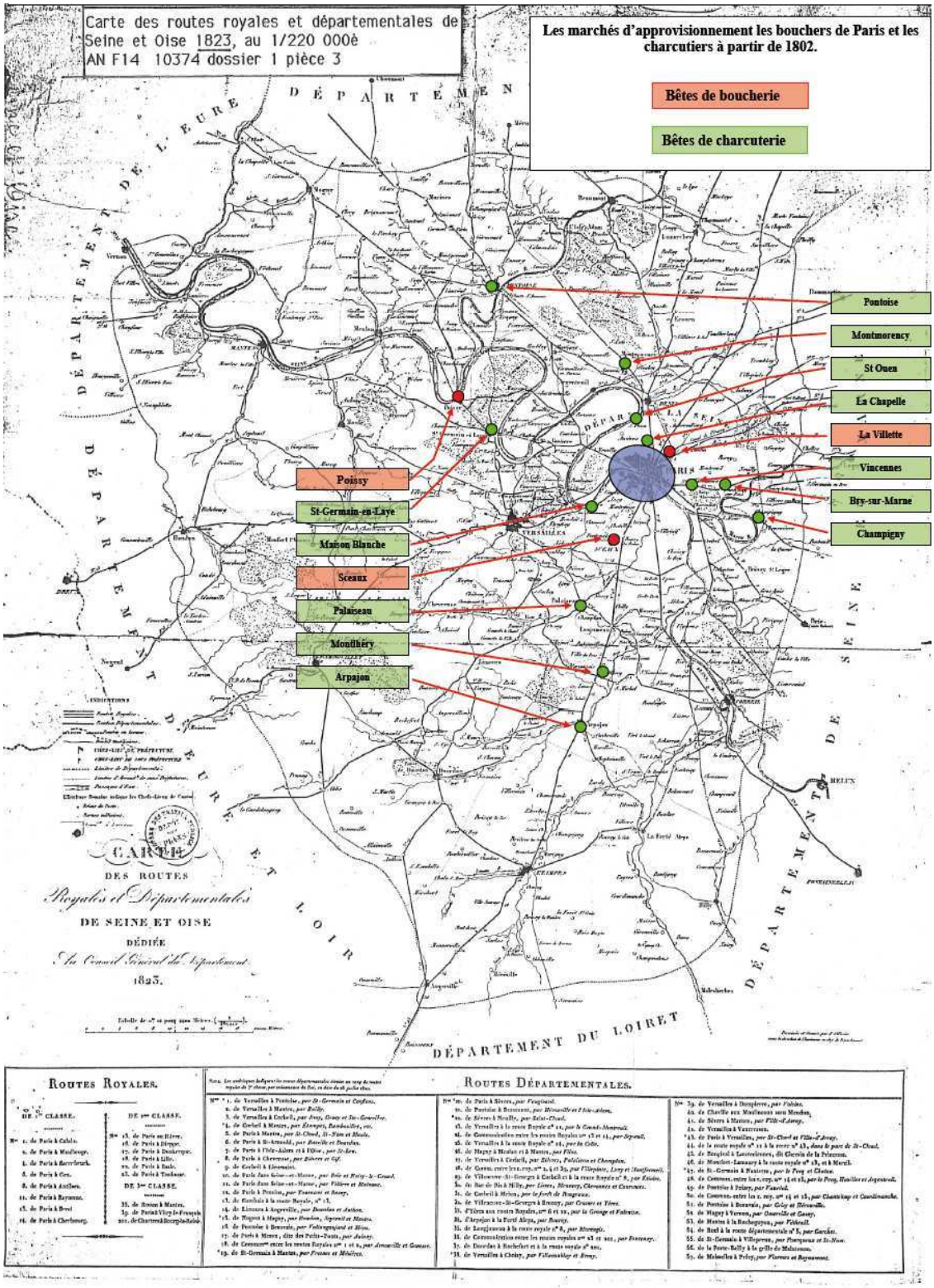


Carte 3.2 : Importations parisiennes de viande bovine (tonnes de carcasse) par lieu de provenance en 1850. Source des données : Relevés des marchés aux bestiaux de Sceaux et de Poissy, dans Philipp (2004).

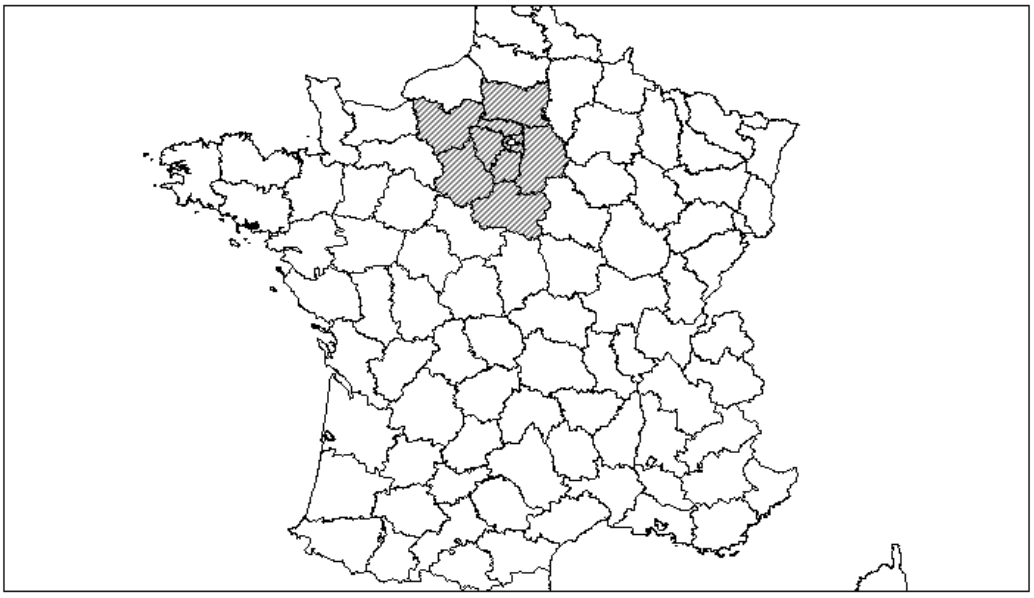
Contrairement aux bovins, l'approvisionnement en porcs et en lait doit s'assurer des zones plus proches de Paris pendant cette période. Le lait, aliment caractérisé par une faible transportabilité en raison de son caractère liquide et périssable devait, avant le développement des moyens de transport mécanisés, provenir des alentours immédiats de la ville. Les nourrisseurs parisiens et de la banlieue[1] assuraient la totalité des apports de lait jusque dans les années 1850 par opposition à l'élargissement progressif du périmètre d'approvisionnement dans la deuxième moitié du XIXe siècle comme on l'a déjà vu dans le tableau 2.6. De manière analogue au lait, les porcs, engraissés au maximum avant de parvenir aux marchés, souffrent d'une mobilité réduite. Dans

[1] Cf. sections 1.2, 2.4

leur état d’engraissement, ils risquent de se casser les pattes et de mourir d'éviscération précoce ou d'arrêt cardiaque, la distance du parcours est donc une contrainte majeure dans l’approvisionnement en porc (Philipp, communication personnelle). Malheureusement, on ne dispose pas de données suffisamment détaillées pour déterminer les provenances des porcs présentés aux marchés urbains dans la première moitié du XIXe siècle. Toutefois, admettant la faible mobilité de ces animaux, on peut supposer qu’ils provenaient majoritairement au début du XIXe siècle, des zones d’élevage à proximité relative des marchés parisiens, ces derniers étant situés dans les départements de la Seine et de la Seine-et-Oise (carte 3.3). Selon cette hypothèse, les départements principaux de ravitaillement en porcs au début du XIXe siècle seraient la Seine, la Seine-et-Oise et ses cinq départements limitrophes : l'Oise, l'Eure, l'Eure-et-Loir, le Loiret et la Seine-et-Marne (carte 3.4). Ceci coïncide géographiquement avec la zone des faibles apports en bovins en 1812 (cf. carte 3.1).



Carte 3.3 : Géographie des marchés approvisionnant Paris en viande de boucherie et de porc à partir de 1802. Source : Philipp, 2004.

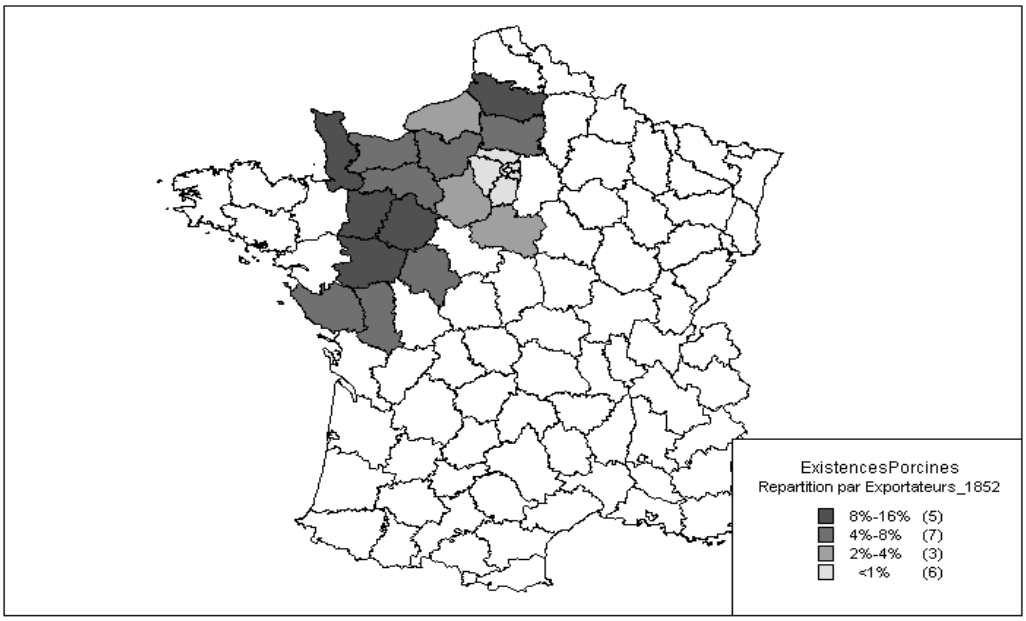


Carte 3.4: Aire géographique de l'approvisionnement parisien en porcs au début du XIXe siècle.

Les départements de la zone ombrée devraient fournir jusqu'aux années 1840 – marquées par les débuts du chemin de fer – la somme de la consommation parisienne et de celle des habitants locaux. On peut facilement estimer ce total afin d'évaluer le bilan entre production et consommation. Les importations parisiennes ont presque doublé lors de la première moitié du XIXe siècle, une hausse néanmoins modeste par rapport à la forte croissance démographique en raison d'une légère baisse de la consommation par habitant entre le 1801 et 1840. La moyenne des importations est d'environ $7*10^3$ tonnes, soit l'équivalent de 78 000 porcs. D'autre part, la consommation locale des départements d'approvisionnement peut être approchée en affectant la moyenne de 6 kg/hab/an - valeur tenant compte de l'évolution de la consommation moyenne nationale dans la deuxième moitié du XIXe siècle – à la population locale d'environ 2 300 000 habitants. Ceci correspond à une demande annuelle d'environ 150 000 porcs, soit un total de 230 000 porcs pour les deux milieux. Compte tenu du rapport d'abattage de 74 % qu'on a calculé pour 1842 (tableau 3.1), cette demande aurait nécessité un cheptel d'environ 300 000 porcs. Or, selon le recensement agricole de 1852 il n'y aurait que 230 000 porcs dans les sept départements en question, soit 75 % des besoins. Si l'on admet que la taille du cheptel n'y a pas diminué depuis 1840, ce bilan indique que d'autres départements étaient probablement impliqués, directement ou indirectement, dans l'approvisionnement de

Paris mais que leur contribution était limitée.

Les premières indications sur les provenances des porcs consommés à Paris proviennent de l'ouvrage de Husson (1856) pour la période 1845-1852. L'auteur indique qu'entre ces deux dates, 42 départements ont envoyé des porcs sur les marchés d'approvisionnement de Paris, parmi lesquels la Sarthe et le Maine-et-Loire ont effectué les envois les plus considérables en termes de tonnage. Derrières eux sont classés l'Oise, la Seine-et-Oise, les Deux-Sèvres, la Seine-Inférieure, l'Indre-et-Loire, l'Orne, le Calvados, le Loiret, la Somme, l'Eure-et-Loir, l'Eure, la Seine, la Mayenne, la Vendée, la Manche. Les vingt-cinq départements restants n'y sont pas mentionnés en raison de leurs faibles envois. Les informations concernant l'aire principale d'approvisionnement, précises d'un point de vue géographique, restent qualitatives : on ne connaît pas le tonnage des exportations du groupement des dix-sept premiers départements d'approvisionnement ni la fraction que leurs envois représentent par rapport aux importations parisiennes totales. Disposant en revanche des données sur les existences porcines du territoire à cette époque (Block, 1858), on a dressé la carte 3.5 pour montrer la répartition du cheptel porcin au sein de l'aire principale de l'approvisionnement parisien.



Carte 3.5 : Répartition du cheptel porcin dans l'aire principale d'approvisionnement de Paris en porcs en 1852. Sources de données : Husson (1856), Block (1858).

La carte fait apparaître que la densité des cheptels augmente avec la distance de Paris.

L’aire s’étend principalement dans l’ouest et le sud-ouest parisien tandis que les départements de l'est, y compris le département de Seine-et-Marne, n’effectuent pas d’envois significatifs. Cette abstention, qui peut paraître au premier abord curieuse, s’explique par la spécialisation des départements de l’est dans la production céréalière, pour le compte, en partie, de l’approvisionnement de Paris. Exprimée en tonnage par habitant local, la production de blé de la Seine-et-Marne s’élève à 500 kg/hab en 1847, soit la quatrième plus élevée de France (Block, 1858) et passe en tête de la production avec plus de 540 kg/hab en 1885 (Statistique agricole annuelle, 1886). Par sa position dans le système hydrographique de la Seine, le Seine-et-Marne ainsi que d’autres départements de l’est parisien se sont spécialisés dans la production céréalière grâce au transport fluvial. C'est probablement en raison de cette spécialisation que la production porcine du département de Seine-et-Marne se trouve en 1852 parmi les plus faibles de la France avec seulement 4,6 kg/hab.

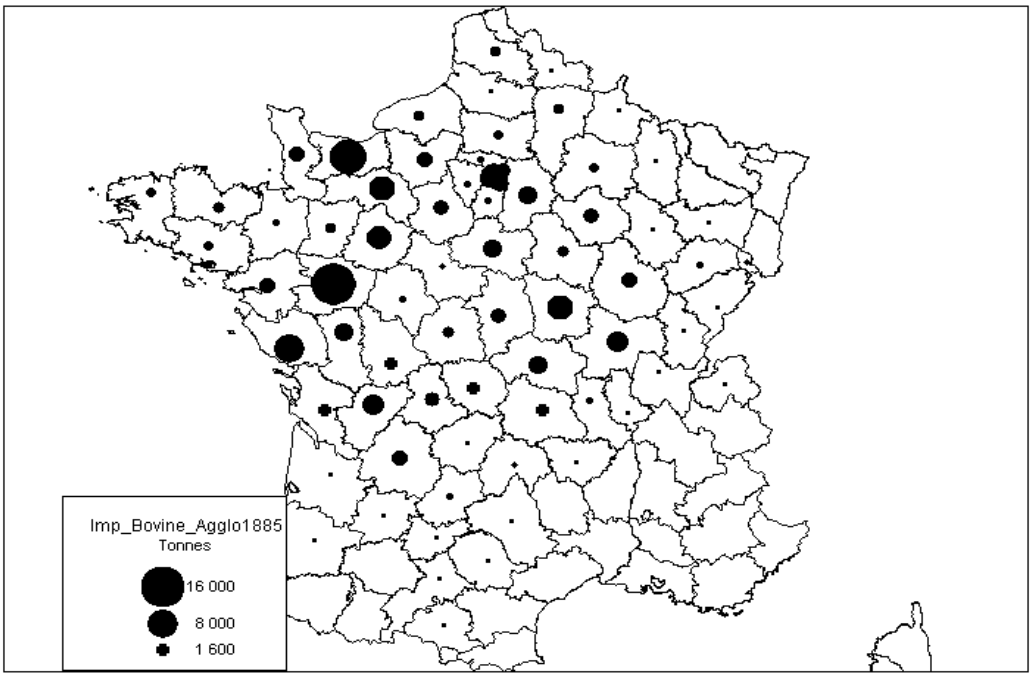
Avec une consommation individuelle égale à 5,8 kg/hab/an, l’approvisionnement parisien réclame environ 83 000 têtes de porcs aux dix-sept départements mentionnés dans Husson (1856). Par rapport à la production totale au sein de ces départements, ceci laisse 620 000 porcs pour les habitants locaux soit une disponibilité de viande de 7,8 kg/hab/an qui est de 1,5 kg/hab/an inférieure à la moyenne nationale de l'époque. La différence de 1,5 kg/hab/an correspond aux exportations vers Paris. Ainsi, bien que le partage de la production se fasse au profit de la consommation des habitants locaux, l’approvisionnement parisien semble s’effectuer au prix d’un léger appauvrissement de la consommation locale.

La géographie de l’approvisionnement en bovins comme en porc est fortement influencée par les contraintes de transport relatives à l’approvisionnement en lait. L’influence s’exerce pourtant de façon différente sur chaque secteur.

L’essentiel de l’approvisionnement en porcs commençait à la limite de la ceinture laitière, alors que les apports les plus considérables en veaux - par opposition aux apports de gros bovins - provenaient des départements de la province de l’Ile-de-France. La raison est que la priorité accordée à la production laitière pour le compte de l’approvisionnement parisien y a d’un côté concurrencé la production porcine et

privé les veaux du lait de leur mère. Comme le montrent les données des relevés des marchés aux bestiaux, plus de 60 % des veaux introduits provenaient de la seule province de l'Ile-de-France dont les envois totaux de bovins se composaient à 81 %, 18 %, et 2 % respectivement de veaux, vaches et bœufs. Par opposition, l'ensemble des introductions bovines aux marchés se répartissaient à 41 %, 8 % 51 % entre les veaux, vaches et bœufs ce qui met en évidence la pénurie relative des bœufs et l'abondance relative des veaux et des vaches dans la province de l'Ile-de-France par rapport au pays de la France.

La géographie de l'approvisionnement change considérablement dans les années qui suivent, en s'étendant sur la quasi-totalité du territoire. La viande bovine provient de 68 départements en 1885 et de 81 départements en 1906 (sur les 89 départements de la France à cette époque) (cartes 3.4 et 3.5).

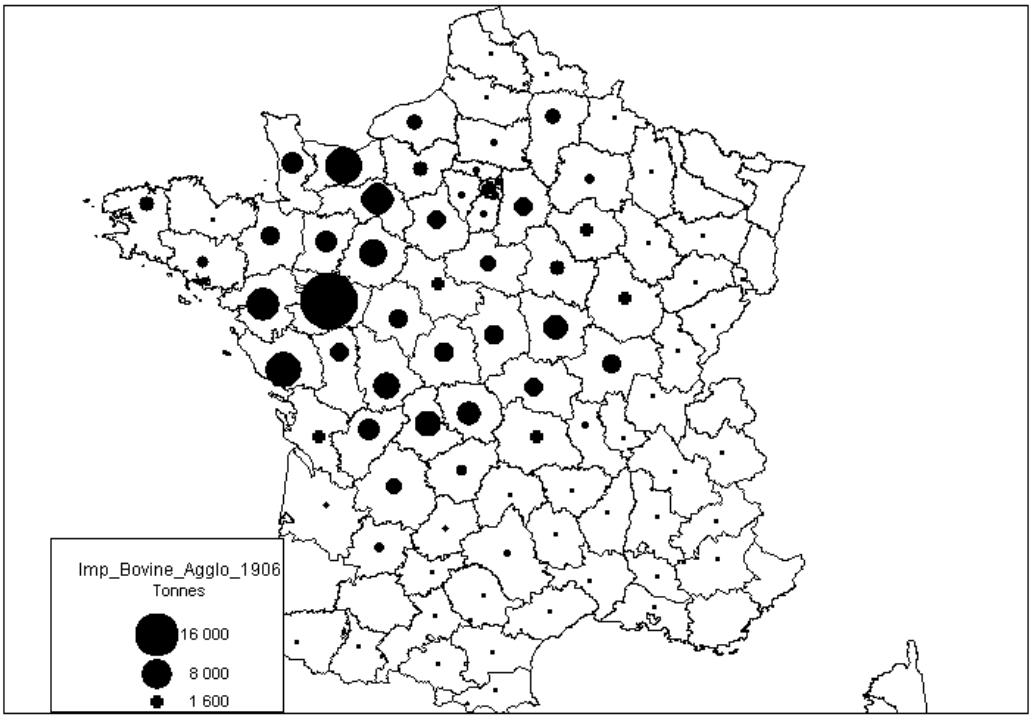


Carte 3.6 : Importations parisiennes de viande bovine (tonnes de carcasse) par lieu de provenance en 1885. Source de données : Statistique agricole annuelle (1886)

En gros, la quasi-totalité du territoire de la France contribue en 1906 à l'approvisionnement parisien en bovins. Sont exclut les départements de la Moselle, de la Haute-Savoie, du Var, des Landes, du Gers, des Alpes-Inférieures, de la Corse, du Bas-Rhin et du Haut- Rhin. Il convient de noter qu'en raison probablement de

l'instabilité politique aux frontières, les départements de l'Alsace n'ont jamais contribué à l'approvisionnement de la capitale au XIXe siècle et début de XXe siècle. La Corse et les départements du sud-est n'y ont nullement contribué non plus.

L'élargissement de l'aire géographique approvisionnement est rendu possible grâce au développement du chemin de fer. Celui-ci a permis aux régions les plus éloignées d'écouler au marché parisien leur surplus alimentaire, ne serait-ce que pour des tonnages infimes. La multiplication des fournisseurs reflète ainsi à la fois l'efficacité du chemin de fer en tant que dispositif de transport des faibles quantités alimentaires sur des distances d'approvisionnement longues et l'importance du marché parisien dans les stratégies commerciales des provinces françaises.



Carte 3.7 : Importations parisiennes de viande bovine (tonnes de carcasse) par lieu de provenance en 1906. Source de données : Statistique agricole annuelle, 1906.

En effet, un grand nombre de départements, pour la plupart situés dans la zone méridionale et dans l'est de la France, contribue des tonnages très faibles dans l'approvisionnement parisien. Il n'empêche pourtant qu'en raison du nombre élevé des nouveaux fournisseurs, leur contribution totale a permise une répartition géographique plus équitable de la demande alimentaire de Paris. Ainsi, malgré l'augmentation d'un facteur quatre du tonnage des importations parisiennes entre

1850 et 1900, la part des importations en provenance des trois départements d'approvisionnement principaux - Calvados, Maine-et-Loire et Orne – s'est réduite de 50 % en 1850 à 27 % en 1900.

La multiplication du nombre de fournisseurs a conduit à réduire, la fraction de la production de viande dont s'empare l'agglomération parisienne. La figure 3.3 montre la part de la production importée à Paris par département fournisseur en 1906 qui est à comparer aux fractions calculées pour 1839 (cf. figure 3.2). La réduction de la fraction importée est particulièrement emblématique dans le cas des départements de Maine-et-Loire et de Calvados. Alors qu'en 1839 ces départements exportaient la quasi-totalité de leurs productions respectives, ils se réservent en 1906 des consommations égales à 20 kg/hab et 40 kg/hab respectivement. L'amélioration considérable de la consommation locale tient d'un côté à l'élargissement de l'aire d'approvisionnement de Paris et de l'autre à l'amélioration de la productivité bovine. Mesurée en kilogramme par habitant local, la production de viande bovine a augmenté de 470 % au Calvados et de 420 % au Maine-et-Loire entre 1839 et 1906. Sur cette période, le tonnage des importations parisiennes en provenance de ces départements a augmenté de 200 % et de 370 % respectivement.

L'exemple des départements de Vienne et de Creuse est éloquent de l'influence qu'a pu jouer le développement du chemin de fer sur l'ouverture des rapports commerciaux avec Paris. Le département de la Vienne, exportant - selon les années - peu ou pas de viande à Paris dans la première moitié du XIXe siècle, y expédie des quantités égales à 5,1 kg/hab local en 1885 et à 17,9 kg/hab local en 1906. Ceci la place ainsi cinquième plus gros approvisionneur de Paris en viande bovine en 1906. De manière analogue, la Creuse, exportant vers Paris un tonnage de l'ordre de 3,0 kg/hab en moyenne dans la première moitié du XIXe siècle, y exporte 6,5 kg/hab local en 1885 et 16,6 kg/hab local en 1906. La perspective de ravitailler la capitale a ainsi exercé visiblement une influence stimulatrice importante dans le développement des productions animales des différentes campagnes françaises.

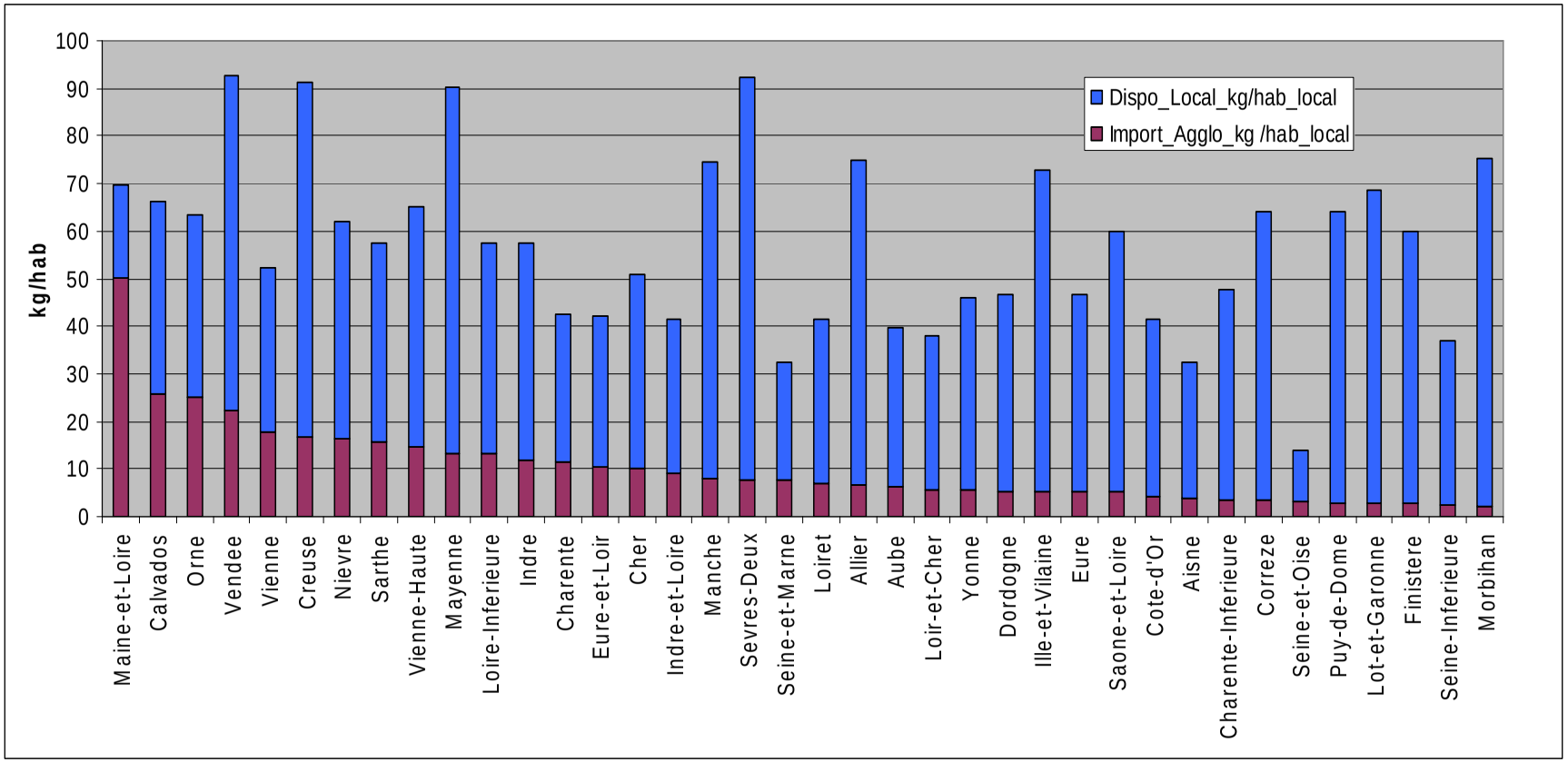
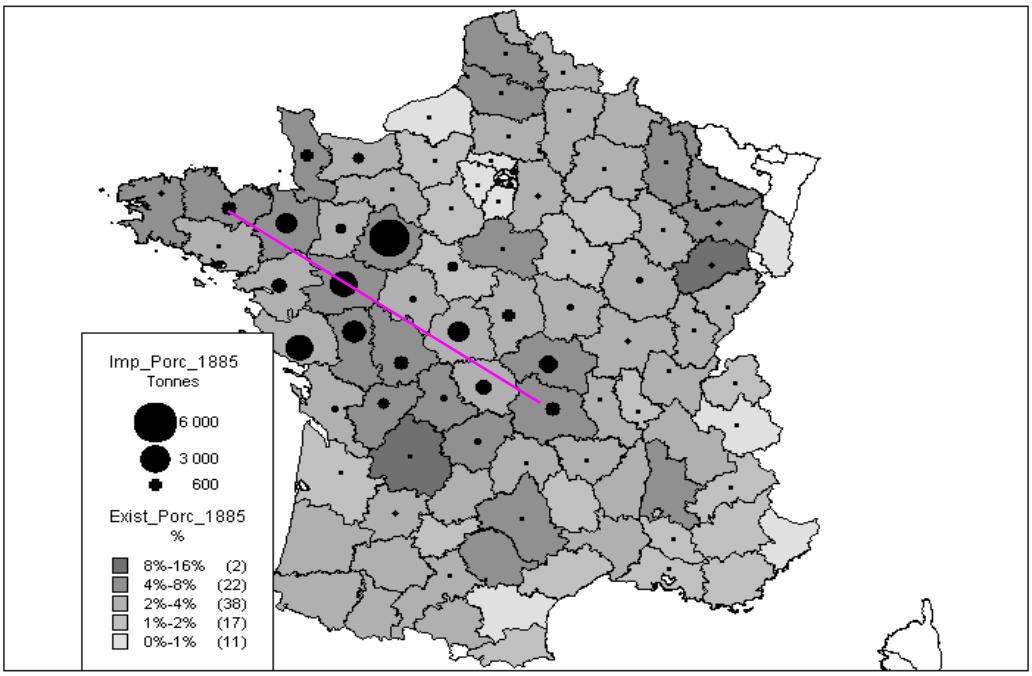


Figure 3.3 : Production de viande bovine et exportation vers Paris par département concourant à l'approvisionnement en 1906 (kg de carcasse/ habitant local). Sources de données : Statistique agricole annuelle, 1906 et cette étude.

Légèrement moins étalée que pour les bovins, l'aire d'approvisionnement en porcs comprend 64 départements en 1885 contre 42 en 1852. Toutefois, l'essentiel des apports provient d'un nombre bien plus restreint de départements dont quelques-uns contribuent également à l'approvisionnement en bovins. Cinq départements, à savoir la Sarthe, le Maine-et-Loire, la Vendée, les Deux-Sèvres et l'Ille-et-Vilaine, assurent en 1885 50 % des apports de porcs. S'y ajoute une quinzaine pour arriver à 90 % des apports totaux et encore six pour atteindre 95 % des apports. Enfin, une dernière quarantaine de départements se partage seulement 5 % des envois totaux de porcs vers la capitale.

La carte 3.8 montre à la fois la distribution spatiale du tonnage des importations de la capitale et la répartition des effectifs des porcs dans le territoire en 1885. Les importations sont représentées en tonnage des envois par département et les existences porcines en pourcentage du cheptel français total. Les existences dans les départements de la Moselle et du Bas-Rhin (nord-est de la France) ne sont pas renseignées car il ne faisait pas continuellement partie du territoire national au XIXe siècle. Comme pour l'approvisionnement en bovins, l'approvisionnement de la capitale en porcs ne repose guère sur ces départements.

Les importations et les existences sont représentées simultanément afin de mieux exprimer le contexte dans lequel la capitale s'approvisionne. On constate d'un côté la concentration des apports dans la zone sud-ouest par rapport à Paris. Ces apports s'articulent notamment autour d'une ligne droite (ligne rose dans la carte 3.8) traversant les départements de la Sarthe, du Maine-et-Loire, de la Vendée et des Deux-Sèvres. De l'autre côté on constate la quasi-absence d'apports dans un rayon d'une centaine de kilomètres autour de Paris. Comme indiqué précédemment, ceci est le résultat des spécialisations de production agricole autour de Paris : les départements limitrophes de l'est se vouent à la production céréalière et ceux du sud, ouest et nord à la production laitière. On note toutefois que l'absence d'importations n'est pas synonyme de l'absence de production. L'analyse croisée en fonction à la fois de la présence de cheptels et du tonnage des importations parisiennes montre que l'élevage porcin n'est pas éliminé des zones en question mais que Paris n'en y soutient pas le développement.



Carte 3.8 : Importations parisiennes de viande porcine (tonnes de carcasse) par lieu de provenance en 1885 et répartition du cheptel porcin (%) par département français à la même date. Source de données : Statistique agricole annuelle, 1886.

En l'absence de demande des porcs, Paris pourvoit indirectement pour la pérennisation de son approvisionnement en lait et en céréales. C'est un exemple caractéristique de l'influence indirecte d'une ville sur la spécialisation agricole des territoires qui l'entourent. La consommation est de manière générale une force majeure d'orientation de la production.

En même temps, Paris ne tire pas son approvisionnement en porcs à partir des territoires qui en sont le mieux dotés : relativement peu d'apports proviennent des départements les plus foncés dans la carte. Le rapport en termes de tonnage entre la disponibilité en porcs des départements et les importations parisiennes apparaît mieux dans la figure 3.5 où la production totale des trente-six départements assurant le 99 % de l'approvisionnement parisien est exprimée par habitant local et comparée au tonnage importé à Paris (couleur rouge).

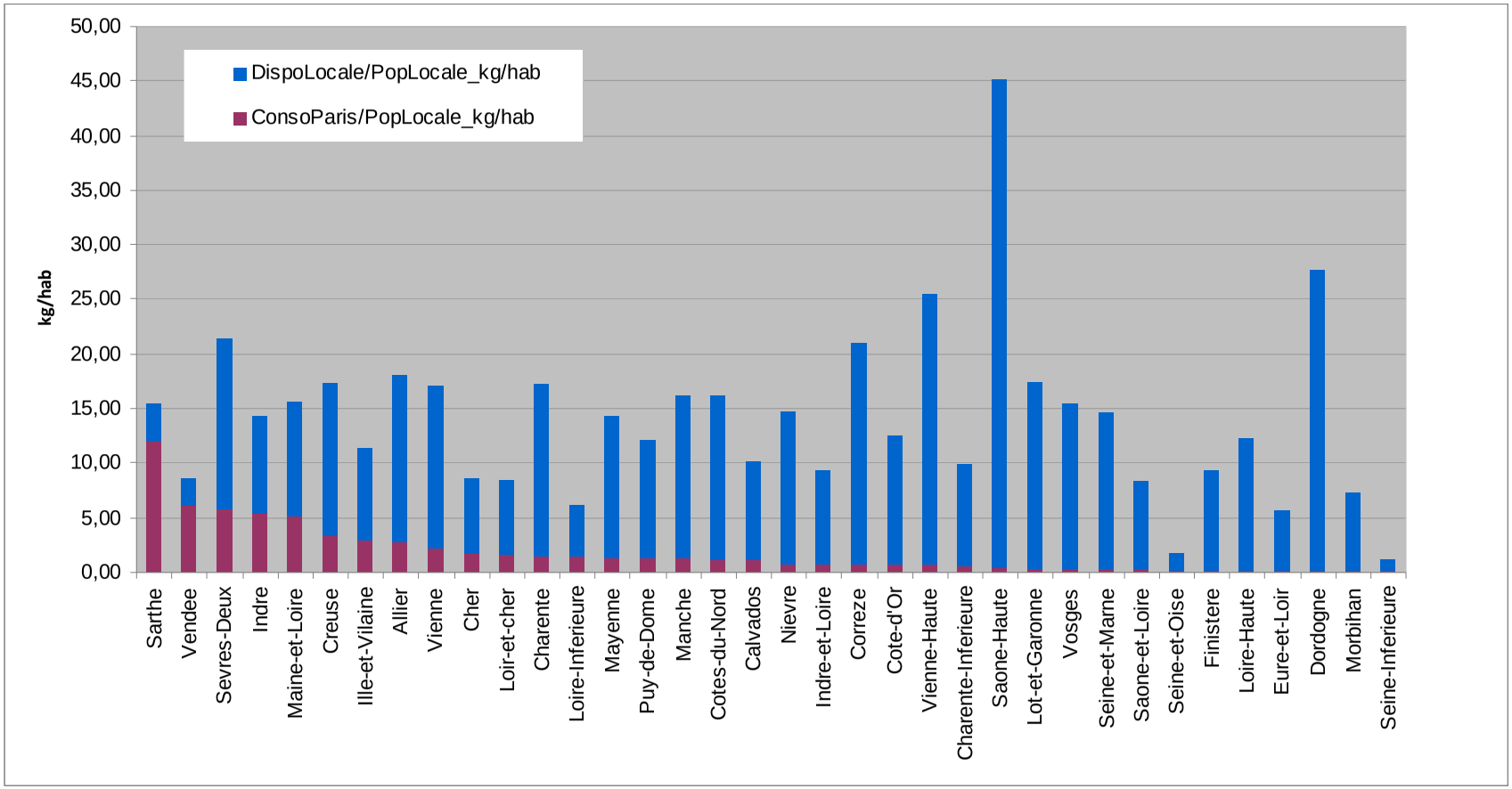


Figure 3.4 : Production de viande de porc et exportation vers Paris par département concourant à l'approvisionnement en 1885 (kg de carcasse/habitant local). Source de données : Statistique agricole annuelle, 1886 et cette étude.

La figure 3.4 confirme que les départements les plus impliqués dans l'approvisionnement ne sont pas ceux qui disposent le plus de porcs. Certains départements de contribution marginale ou nulle au ravitaillement parisien - tel que la Haute-Saône, la Dordogne, la Haute-Vienne, la Corrèze ainsi que beaucoup d'autres qui n'envoient pratiquement rien à Paris comme par exemple la Meuse, la Drôme, les Hautes-Pyrénées, l'Aveyron... - abritent une production de porcs particulièrement élevée dont la demande parisienne ne tire nullement profit. Inversement, des départements à faible production comme la Sarthe et la Vendée mais aussi l'Indre, l'Ille-et-Vilaine, la Loire-Inférieure etc. y cèdent une partie considérable de leurs productions respectives. Les départements de la Sarthe et de la Vendée cèdent en moyenne 75 % de leur production à Paris, ce qui réduit fortement la quantité de viande disponible pour leurs populations locales respectives. Au fait, au sein de ces deux départements, la consommation locale par habitant est de trois à quatre fois inférieure au tonnage exporté à Paris. Les deux prochains départements, à savoir les Deux-Sèvres et l'Indre cèdent en moyenne 30 % de leur production à la capitale tout en se réservant une production annuelle de 12,7 kg/hab pour la consommation locale ou pour l'exportation vers d'autres consommateurs. Après ces quatre premiers départements assurant ensemble 50 % de l'approvisionnement parisien, la fraction de la production expédiée à Paris est nettement moindre.

Le tableau 3.2 regroupe les données de la figure 3.5 par tranches de 20 % des importations parisiennes. Y figurent par tranche d'apport, le nombre de départements exportant à Paris, le tonnage de la production demeurant disponible par habitant local après exportation à Paris et la fraction de la production totale que représentent les importations parisiennes.

Tableau 3.2 : Production de viande de porc et exportation vers Paris par groupement de départements concourant à l'approvisionnement en 1885 (kg de carcasse/habitant local). Source de données : Statistique agricole annuelle, 1886.

% des apports (ordre décroissant)	*Nombre de départements*	*Exportation vers Paris (kg/hab local)*	*Disponibilité après exportation (kg/hab local)*	*Production totale kg/ha*	*Fraction de la production expédiée à Paris _1885*
0 % ≤ 30 %	2	9	3,1	12,1	75%
30 % ≤ 50 %	2	5,6	12,7	18,3	31%
50 % ≤ 70 %	6	3,1	11,4	14,5	22%
70 % ≤ 90 %	10	1,2	11,3	12,6	10%
90 % ≤ 95 %	7	0,5	19,4	20	3%
95 % ≤ 100 %	37	0,1	8,8	8,9	1%
Total des apports	64	1	10,2	11,2	9%
Pas d'importations	23		11,4	11,4	
Consommation moyenne France	87		10,5		

Aussi bien pour l'approvisionnement en porcs qu'en bovins, la mise au point du chemin de fer a révolutionné l'approvisionnement de la capitale mettant à disposition des viandes produites dans des territoires auparavant trop lointains. En même temps, la consommation de viande des populations des départements assurant l'essentiel de l'approvisionnant de Paris s'est indirectement améliorée, car la demande parisienne, prioritaire par rapport à la consommation rurale, a pu se répartir plus amplement dans le territoire.

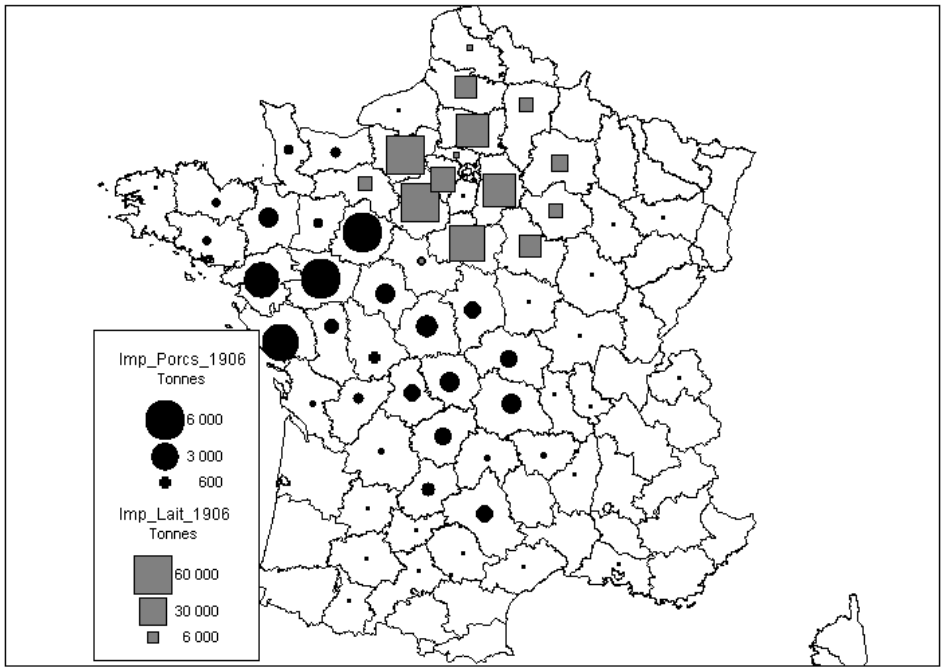
En revanche, la situation est différente pour le lait du fait que sa périssabilité a continué à limiter les distances de son transport longuement après l'apparition du chemin de fer. Une distance tampon s'imposait à chaque époque au rayon de l'approvisionnement en lait, qui a atteint des distances très modestes par rapport à d'autres aliments liquides et périssables. La distance maximale a atteint 100 km en 1897 (Billé, 1930), 150 km en 1900 (Dubuc, 1938), puis elle s'est progressivement rallongée jusqu'à 400 km à la fin des années 1930 (cf. tableau 2.6). Pour comparaison, l'approvisionnement en vin de la capitale s'effectuait sur des distances allant jusqu'à 5 000 km vers la fin des années 1930, la moyenne s'élevant à 2 000 km (Gallet, 1939)[1]. De manière analogue, on retrouve en 1938 des poissons dans les Halles centrales de Paris en provenance des pays comme la Pologne et l'Estonie (Reynier, 1945).

On connaît avec grande précision la géographie de l'approvisionnement parisien en lait jusqu'à la fin des années 1930 (Dubuc, 1938, Billé, 1930). A chaque époque, l'aire d'approvisionnement se déploie sous forme des aires concentriques dont le rayon varie en fonction de la demande. Comme on l'a montré dans le tableau 2.6, le rayon maximal a atteint 400 km dans la fin des années 1930 mais l'essentiel des apports provenaient des distances inférieures à 150 km (Dubuc, 1938). La forme et la taille de la zone d'approvisionnement laitier ne sont pas un hasard. Elles résultent du bilan entre la production du territoire et la demande parisienne et de l'impératif de minimiser les distances parcourues dans le transport. Cette disposition évoque

[1] Ces chiffres paraissent un peu exagérés mais il est tout de même clair que les distances d'approvisionnement en vin étaient bien supérieures qu'en lait

l'approvisionnement sous forme d'anneaux concentriques du modèle économique de von Thünen (1826).

A l'exception des veaux - qui constituent une sorte de « sous produit » de la production laitière - et les vaches laitières en fin de carrière, l'essentiel de l'approvisionnement en bovins et en porcs est repoussé à partir de la deuxième moitié du XXe siècle aux limites de la ceinture laitière. En 1906, les apports en dehors de la ceinture représentent 80 % pour les bovins et 96 % pour les porcs. Pour cette date, la ségrégation spatiale entre les aires principales d'approvisionnement en lait et en porcs est représentée dans la carte 3.9. Pour les porcs, l'aire d'approvisionnement ne s'est pas élargie dans l'absolu par rapport à 1885, mais elle s'est réajustée en s'étendant vers le sud et en se rétractant dans l'est.



Carte 3.9 : Importations de lait et de porcs (tonnage de produit) par lieu de provenance en 1906. Source de données : Statistique agricole annuelle, 1906, Dubuc, 1938.

La carte 3.10, dressée avec grande finesse par Dubuc (1938), montre le bassin laitier parisien en 1936. On constate une forte concentration des dépôts de lait à l'ouest et au sud de Paris. Ceci concerne notamment le département francilien de la Seine-et-Oise, les départements normands de l'Orne et de la Seine-Maritime et les départements du Loiret et du Loir-et-Cher dans l'ancienne province de l'Orléanais.

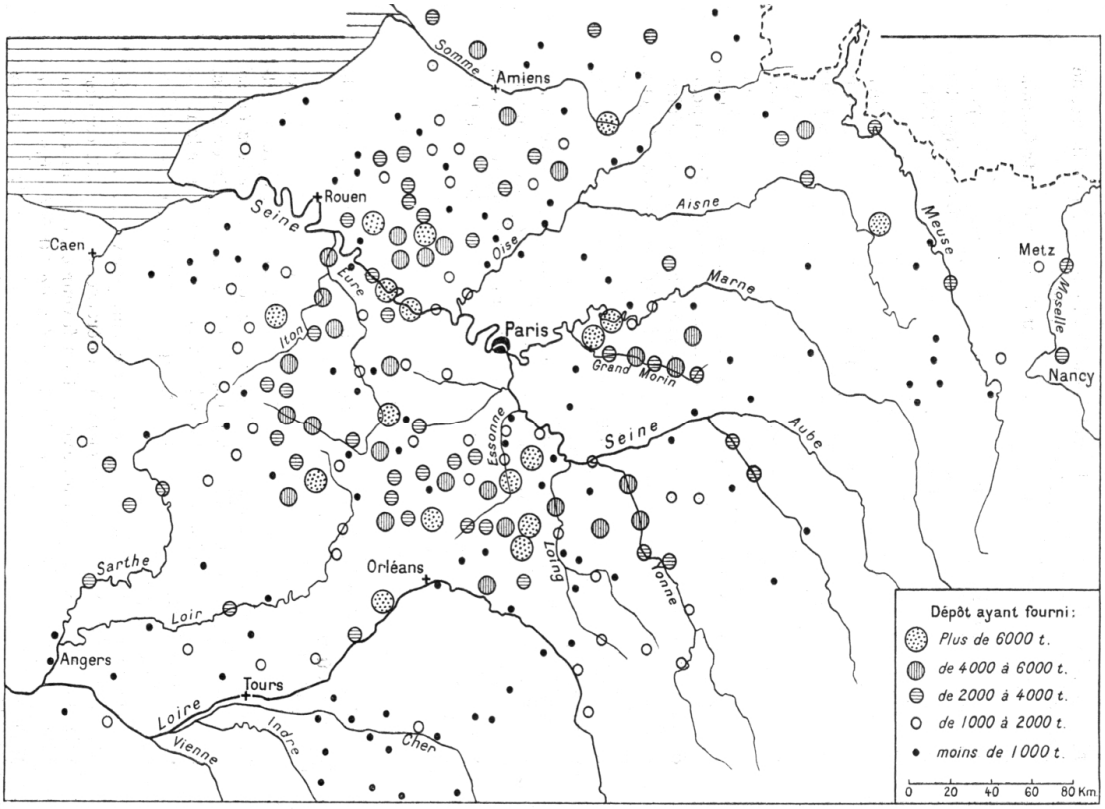


FIG. 1. — LE BASSIN LAITIER DE PARIS. — Échelle, 1 : 3 000 000.

Carte 3.10 : Le bassin laitier de Paris en 1936. Source : Dubuc, 1938.

On remarque dans la carte de Dubuc l'absence de dépôts de lait dans le département de la Seine. Ceci n'est néanmoins pas synonyme d'absence de production. La production y persiste et les rendements en lait des vaches croissent dans la partie non urbanisée du département de la Seine jusqu'à dans les années 1960 (cf. figure 2.8 du deuxième chapitre). L'absence de dépôt s'explique par l'absence des compagnies et coopératives laitières, à la fois du fait que la production départementale était directement livrée aux consommateurs par l'intermédiaire des nourrisseurs mais également en raison du caractère polluant des celles-ci qui les rendait indésirables à proximité de la ville (Huard, 1939).

La forte densité des dépôts dans la zone principale d'approvisionnement témoigne d'un élevage laitier également dense et d'un caractère spatialement ininterrompu. Le territoire agricole y est largement réservé, à l'exception des cultures maraîchères de la proche banlieue, des grandes forêts du sud-ouest parisien et des zones céréalières de la Seine-et-Marne.

C’est ainsi que s’est développé l’approvisionnement parisien du début de XIXe jusqu’à la fin des années 1930. Au tournant du XXe siècle, la quasi-totalité du pays est impliquée dans l’élevage des porcs et des bovins pour la capitale, alors que pour le lait, l’essentiel de l’approvisionnement, se confine - du moins jusqu’à la veille de la seconde guerre mondiale - à des distances inférieures à 300 km.

3.3.2 Début XXIe siècle

A partir des années 1970, la base SitraM constitue une source des données sur le tonnage et les provenances des flux de marchandises dans le territoire français[1]. Comme cela a été discuté dans la section 3.2.1, on fera usage des données SitraM pour l’année 2006 dans le calcul des provenances des importations de l’agglomération parisienne en lait. On se limitera à la détermination des provenances de premier ordre, c'est-à-dire des lieux du dernier chargement du lait importé. La validité de cette approche dépend de la fraction des importations qui n’a pas été produite aux origines du dernier chargement, correspondant ainsi à des laits faisant l’objet des réexportations après avoir été importés depuis les lieux de production.

De manière générale, les provenances au delà du premier ordre apparaissent lorsque les aliments d’importation transitent par des départements intermédiaires dans la chaîne d’approvisionnement, à l’occasion des transformations dans des industries agroalimentaires et des changements de mode de transport. Pour le lait, on s’attend à ce que le tonnage des réexportations soit faible en raison du caractère périssable de l’aliment qui n’autorise pratiquement pas de transport entre les lieux de production et de conditionnement.

On peut faire une évaluation rapide de la cohérence de l’hypothèse de premier ordre des importations parisiennes en confrontant le tonnage des importations à la production des départements d’origine. Si la production est inférieure aux exportations, il est certain qu’il y a des provenances de deuxième ordre. Dans le cas contraire, l’hypothèse selon laquelle les provenances de premier ordre correspondent aux vraies origines de la production, reste valable mais spéculative car on ne tient pas compte dans cette comparaison de la consommation de la population locale, des

[1] Voir section 3.2.1

exportations éventuelles vers d'autres destinations et de l'utilisation éventuelle de lait pour l'élevage et pour la fabrication des produits laitiers.

Trois départements - Essonne, Seine-et-Marne et Seine-Saint-Denis - contribuent à l'approvisionnement parisien avec des quantités de lait largement supérieures à leurs productions internes respectives (figure 3.5). Le tonnage des exportations s'élève à 1092 % de la production locale en Essonne et à 243 % en Seine-et-Marne ; pour la Seine-Saint-Denis la valeur est manquante car la production laitière y est quasi-nulle (Statistique agricole annuelle, 2006). Le lait en provenance de ces départements est, du moins en partie, caractérisé par des provenances de deuxième ordre. Dans les autres cas, les importations parisiennes représentent une fraction relativement faible de la production laitière des départements de provenance, l'hypothèse de l'absence de deuxième ordre est donc fort plausible.

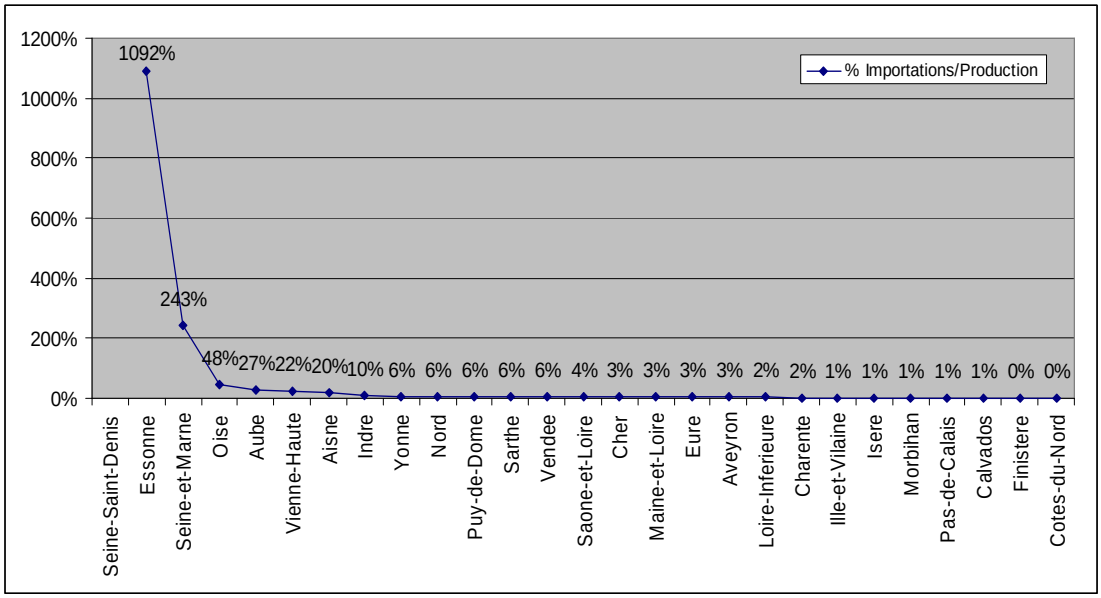


Figure 3.5 : Part des importations parisiennes de lait dans la production laitière des départements d'approvisionnement. Source de donnés : SitraM, 2006, Statistique agricole annuelle, 2006.

La figure 3.6 montre le tonnage des importations parisiennes par lieu de provenance. Pour les trois départements dont le tonnage dépasse la production locale, la différence est indiquée en couleur rouge.

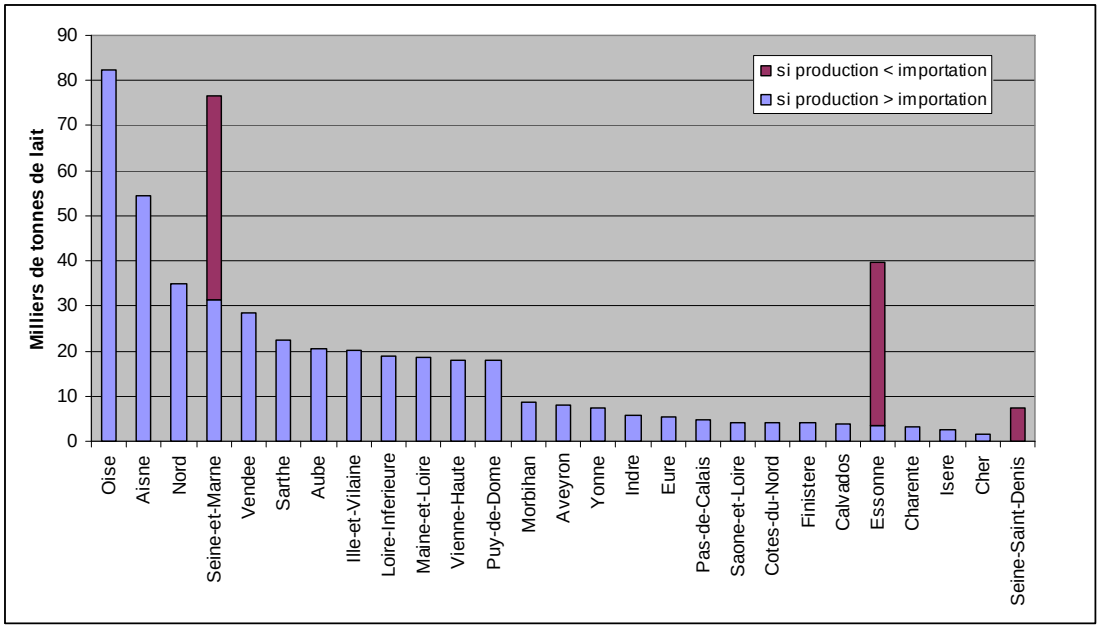
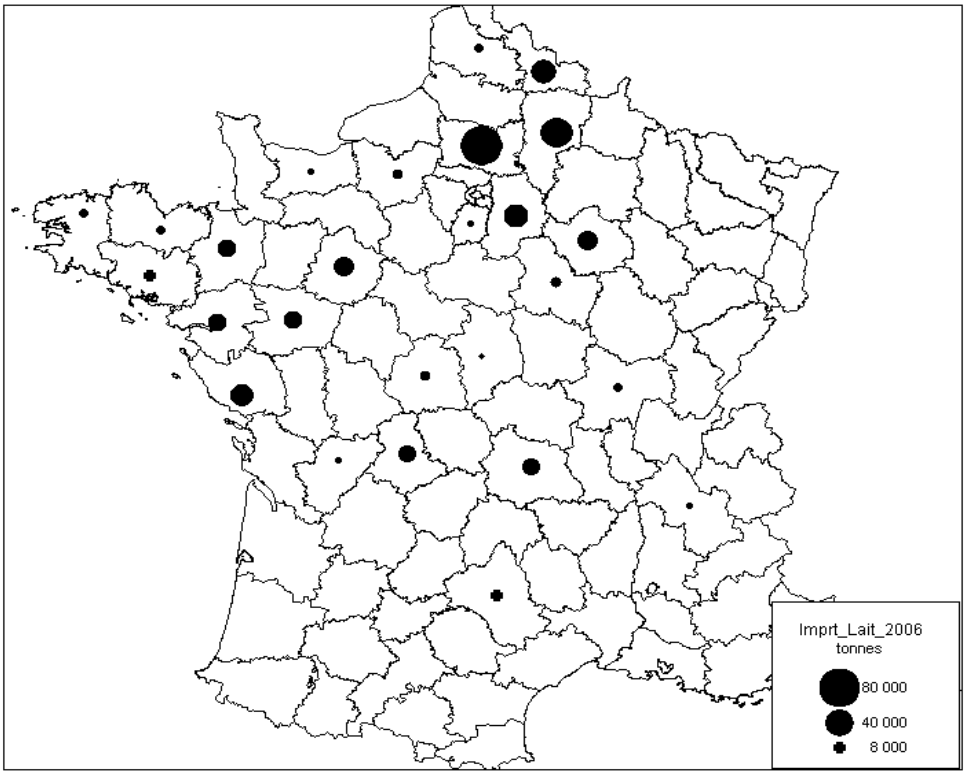


Figure 3.6 : Importations parisiennes de laits liquides (millions de tonnes) par lieu de provenance de premier et de deuxième ordre. Voir dans le texte pour plus de détails. Source de données : SitraM 2006.

La carte 3.11 montre pour l'année 2006 l'aire géographique de l'approvisionnement en fonction du tonnage des importations après soustraction du tonnage de deuxième ordre pour les trois départements mentionnés précédemment. Par opposition à ce qu'on a vu pour le XIXe et la première moitié du XXe siècle la géographie de l'approvisionnement en lait ne se développe guère autour de la ville. On constate la concentration des apports dans les départements de la Bretagne et des Pays-de-Loire et la forte contribution des départements de l'Oise, de l'Aisne et du Nord. Par opposition, les départements de l'est effectuent sensiblement moins d'envois mais leur contribution concerne probablement aussi le tonnage de deuxième ordre transitant par le département de la Seine-et-Marne et peut-être celui transitant par l'Essonne (cf. figure 3.6).



Carte 3.11 : Importations parisiennes de lait en 2006 (tonnes) par lieu de provenance de premier ordre. Le tonnage minimal de deuxième ordre n'y apparaît pas. Sources de données : SitraM, 2006, Statistique agricole annuelle, 2006.

La distance moyenne parcourue pour l'approvisionnement ne dépasse pas 200 km (SitraM, 2006). La consommation parisienne représente moins de 4 % de la production laitière totale de son aire d'approvisionnement actuelle, qui englobe totalement l'aire d'approvisionnement de 1906. Celle-ci fournit aujourd'hui 40 % de la consommation parisienne[1], ce qui représente 7 % de sa production. Par conséquent, l'aire d'approvisionnement de 1906 pourrait subvenir entièrement aux besoins en laits liquides de l'agglomération parisienne en y consacrant moins de 20 % de sa production. Ceci montre que la consommation parisienne ne représente plus aujourd'hui qu'un débouché marginal pour la production laitière des territoires ruraux de proximité, cette dernière trouvant pour sa majorité usage dans des industries de fabrication des produits dérivés.

Contrairement aux XIXe et XXe siècles, l'aire d'approvisionnement en lait ne connaît plus de forme concentrique autour de la ville et en est plus éloignée. La géographie de

[1] Sans tenir compte des tonnages de deuxième ordre

l'approvisionnement étant moins conditionnée par des contraintes en aval de la production, elle répond à des critères de rentabilité en amont. Les technologies de conservation et de transport, ayant résolu les problèmes d'accessibilité aux marchés de consommation, la relocalisation des unités de production se fait en fonction notamment du coût foncier de production et du transport de fourrages.

La relocalisation progressive des cheptels dans le territoire français est intéressante à suivre. Les figures 3.7 et 3.8 montre l'évolution en termes de la concentration géographique des élevages de porcs et de bovins entre le XIXe et le XXIe siècle. Les courbes expriment, pour chaque année, la distribution des existences animales dans le territoire. Les deux axes sont cumulatifs. L'axe vertical reflète la concentration des animaux et l'axe horizontal la part du territoire concernée. La résolution spatiale du calcul est le département. Plus la courbe s'approche de la droite et plus la répartition des animaux est homogène d'un département à l'autre. Inversement, plus les courbes s'éloignent de la droite, plus les cheptels sont concentrés dans certains départements. La comparaison est faite entre cinq années : 1852, 1905, 1963, 1989, 2004. L'intervalle de l'espacement est moindre dans la deuxième moitié du XXe siècle en raison de l'accélération du processus de concentration géographique.

La production animale n'a cessé de se concentrer dans l'espace entre le mi-XIXe siècle et le début du XXIe siècle. Le processus de concentration s'est beaucoup accéléré entre les années 1960 et 1980, en particulier pour les porcs. Depuis, il s'est poursuivi pour les porcs mais stagne pour les bovins. La relocalisation progressive des cheptels est en quelque sorte synonyme d'une certaine uniformisation des aires géographiques d'approvisionnement de différents milieux de consommation. Les quatre départements de la région actuelle de la Bretagne abritent de loin les densités de porcs les plus élevées. On retrouve près de 420 porcs/km2 dans les départements du Finistère (contre 130 habitants/km^2 !) et des Côtes-d'Armor et près de 200 porcs/km^2 dans le Morbihan et l'Ille-et-Vilaine. Derrière eux se trouve le département de la Mayenne (Pays-de-la-Loire) avec 90 porcs/km^2. A titre de comparaison, en 1852 les quatre départements aux densités porcines les plus élevées sont la Dordogne, la Haute-Vienne, le Pas-de-Calais, la Sarthe et la Meuse, chacun comptant entre 17 à 18 porcs/km^2.

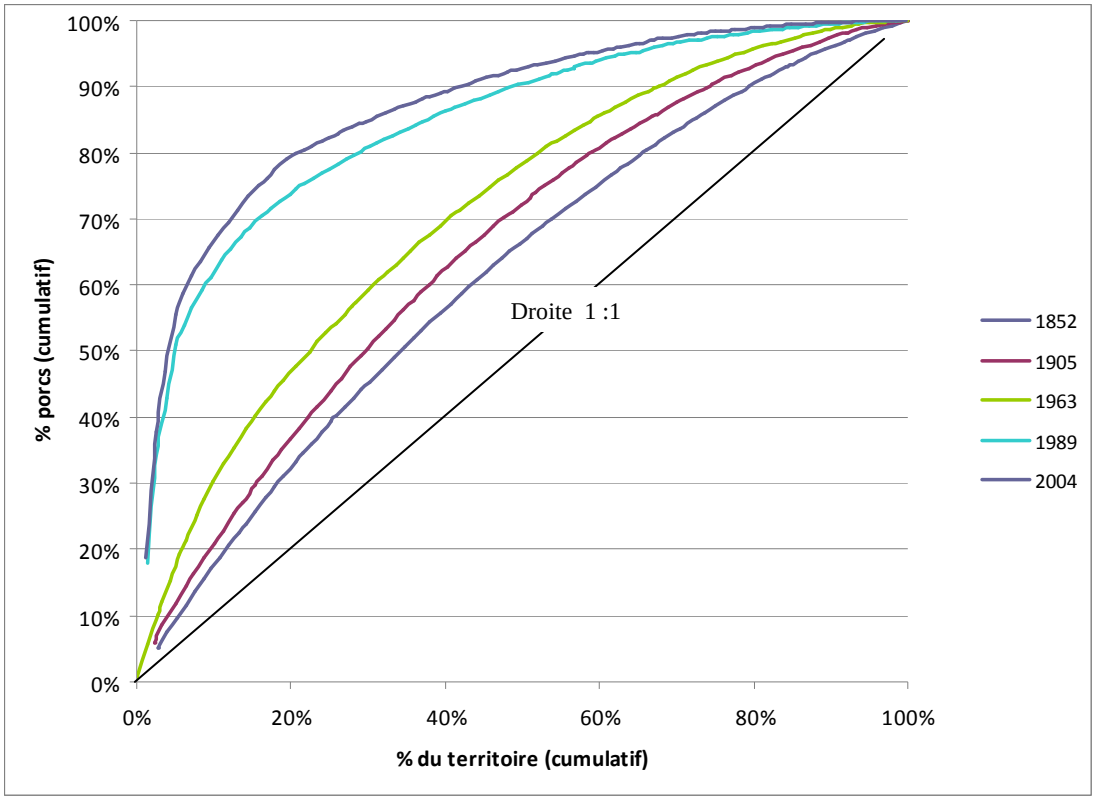


Figure 3.7 : Concentration spatial du cheptel porcin en France entre 1852 et 2004. Sources de données : Block, 1858, Statistiques agricoles annuelles, 1908, 1964, Agreste, 1989, 2004.

En 1906, on retrouve cinq départements avec des densités comprises entre 30 à 38 porcs/km^2, soit deux fois plus élevées qu'en 1852 et dix à douze fois moins élevées qu'en 2004. L'ordre des densités du début de XXe siècle s'est maintenu jusqu'aux années 1960 pour s'envoler deux décennies plus tard. Déjà en 1989 les quatre départements de la Bretagne abritaient à eux seuls 50 % du cheptel porcin français avec une densité maximale de 320 porcs/km^2 dans le département des Côtes-d'Armor. Sur l'ensemble de la période, les densités de porcs ont augmenté plus de vingt fois.

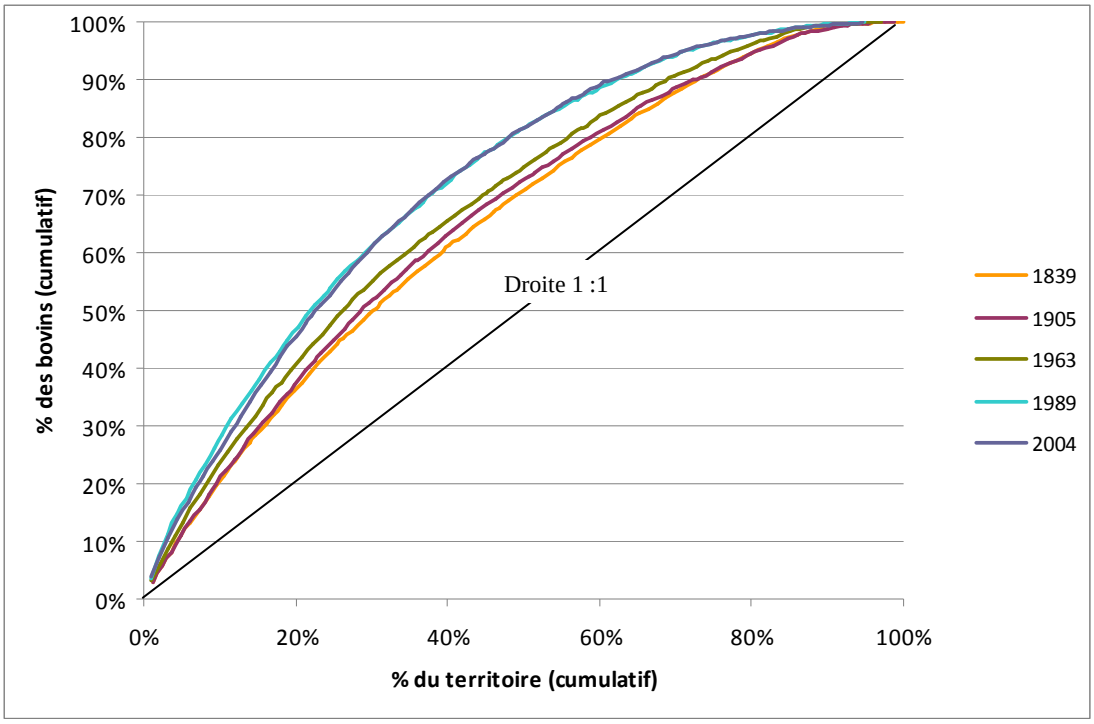


Figure 3.8 : Concentration spatial du cheptel bovin en France entre 1839 et 2004. Sources de données : Block, 1858, Statistiques agricoles annuelles, 1908, 1964, Agreste, 1989, 2004.

Pour les bovins, les densités actuelles sont bien plus faibles que pour les porcs. Elles atteignent 125 bovins/km^2 dans le département de la Manche (Normandie) et de la Mayenne (Pays-de-la-Loire), et sont donc près de trois fois plus faibles que celles des porcs (à noter que les densités moyennes nationales sont d'environ 18 bovins/km^2 et de 27 porcs/km^2 en 2004). Il est intéressant de noter que le rapport des densités entre les deux élevages s'est inversé au cours des siècles, illustrant l'inversement en termes de spécialisation entre les deux secteurs d'élevage. Au XIXe siècle, tandis que les densités nationales moyennes sont presque identiques entre les bovins et les porcs (9,5 bovins/km^2 et 9,3 porcs/km^2 en moyenne), les densités maximales sont de 43 têtes/km^2 pour les bovins (départements du Morbihan et du Finistère, Bretagne) et de 18 têtes/km^2 pour les porcs (Dordogne, Aquitaine). Selon ces chiffres, la spécialisation de la production animale concerne surtout la production bovine au XIXe siècle (l'élevage des porcs notamment fait l'objet d'une autoconsommation), contrairement au XXIe siècle où le secteur porcin devient une activité extra-centralisée.

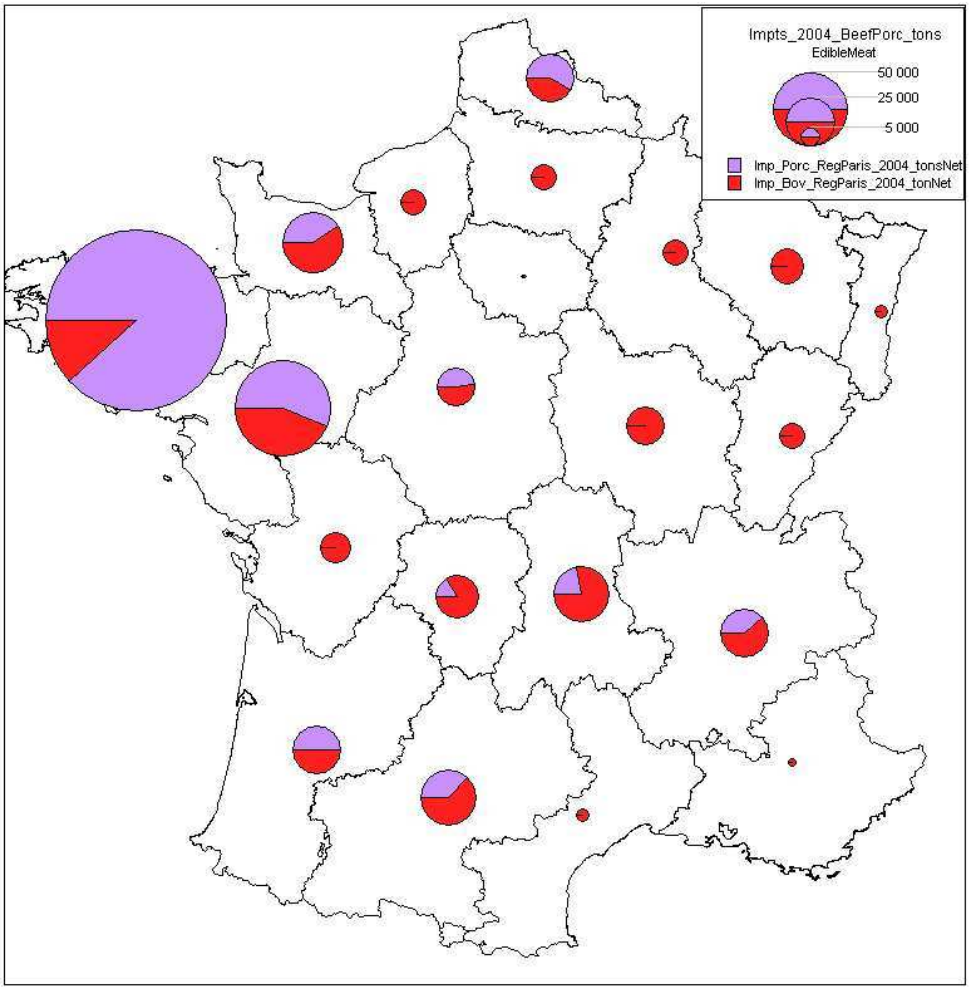
Ces évolutions sont déconnectées de la géographie de la demande alimentaire et

conditionne la géographie d'approvisionnement des différentes milieux de consommation. Plus la production se concentre dans le territoire et plus les aires d'approvisionnement des différents milieux se superposent en s'engageant dans une voie d'uniformisation. Puisqu'on ne dispose pas de données sur les provenances de la viande pour l'agglomération parisienne au XXe siècle, on fait l'hypothèse que l'aire d'approvisionnement parisien a suivi les transitions géographiques de la production animale et s'approche donc de la géographie de la production. Selon cette hypothèse – certes réductrice - la répartition en termes de provenances des importations parisiennes de viande peut être déduite au prorata des sources de viandes dans les bilans d'approvisionnement national. L'approvisionnement de l'agglomération parisienne s'appui ainsi à la fois sur la production indigène et sur les importations de viandes depuis l'étranger.

Les bilans d'approvisionnement nationaux, établis annuellement par type de viande, renseignent le tonnage de la production indigène et celui des importations depuis l'étranger. La répartition en termes de provenances des importations parisiennes de viande se fera au prorata des quotas régionaux de production animale et des importations de l'étranger par pays d'origine.

Des données de production animale spatialisées par unité administrative du territoire sont disponibles pour la France dans les statistiques agricoles annuelles. La carte 3.12 montre la répartition par grande région française[1] du tonnage des importations parisiennes de viande bovine et porcine d'après la géographie des productions respectives en 2006 (Statistiques agricole annuelle, 2006). En revanche, les données des statistiques françaises sur le tonnage des importations de viande de l'étranger ne sont pas spatialisées et doivent être complétées par d'autres sources de données.

[1] Se reporter à l'annexe II pour un fond cartographique où figurent les noms des régions administratives.



Carte 3.12 : Répartition géographique des importations parisiennes de viande bovine (rouge) et porcine (violet) en 2006 au prorata des productions régionales. Source de données, Statistique agricole annuelle, 2006.

Les provenances des viandes importées en France sont disponibles dans la base des données de la FAO sur le commerce international. On a utilisé les données pour l'année 2004 (FAOSTAT, 2006). Cependant, le tonnage des importations françaises de viande bovine et porcine rapporté par la FAO ne sont pas en accord avec le tonnage des statistiques nationales. Pour les bovins, le tonnage de la FAO s'élève à 60 % du tonnage mise en évidence dans les statistiques nationales, pour les porcs, la fraction est de 70 %. Par souci de précision, on a retenu comme source de données pour le tonnage les statistiques nationales et comme source de données pour les provenances la base de la FAO.

Les importations de viande depuis l'étranger n'ont pas comme rôle unique de combler les déficits de la production nationale. La part des importations de viande porcine

dans le bilan d'approvisionnement national était d'environ 18 % en 2006 alors que la production indigène est de 6 % supérieure à la consommation nationale (Agreste, 2010). Ceci montre qu'une partie de la production indigène est exportée et remplacée par de la viande foraine. Pour les bovins, le taux d'approvisionnement de la France est de 92 %, indiquant que la production nationale est de 8 % inférieure à la consommation. Pourtant, la part des importations est de 18 % en 2006 du fait qu'une partie de la production nationale est, comme pour les porcs, remplacée par de la viande importée de l'étranger.

Le lien territorial entre la consommation parisienne et la production de la viande se fera sur la base de ces considérations pour la moyenne des années 2004 et 2006. Les consommations parisiennes, telle qu'on les a calculées au chapitre 2, sont réparties entre la production nationale et le commerce extérieur, proportionnellement à la fois aux quotas régionaux et au tonnage des importations françaises par pays de provenance (tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Importations françaises de viande bovine et porcine (tonnes et %) par pays de provenance au début du XXIe siècle. Sources : FAOSTAT, 2004, Agreste, 2004, 2009.

	Bovine		Porcine		Somme	
	10^3 tonnes	%	10^3 tonnes	%	10^3 tonnes	%
Espagne	7446	16%	28377	43%	35823	31%
Pays-Bas	12211	25%	15891	24%	28102	25%
Allemagne	11473	24%	9194	14%	20667	18%
Belgique	3471	7%	9681	15%	13152	12%
Italie	4936	10%	0	0%	4936	4%
Irlande	3969	8%	0	0%	3969	3%
Autre	2568	5%	422	1%	2991	3%
Luxembourg	0	0%	2682	4%	2682	2%
Autriche	1926	4%	0	0%	1926	2%
Total	48000	100%	66248	100%	114249	100%

3.4. Conclusion

Dans la mesure des données disponibles, on a suivi l'évolution de l'aire géographique de l'approvisionnement parisien en lait entre le début des XIXe et XXIe siècles et en viande bovine et porcine entre le début des XIXe et XXe siècles. Pour le début du

XXIe siècle, l'aire d'approvisionnement par type de viande ne peut être déterminée en raison des données inexistantes. Alternativement, on a spatialisé les importations de viande au prorata d'un côté de la répartition géographique de la production animale nationale et de l'autre des origines des importations françaises depuis l'étranger. L'aire géographique que l'on obtient n'est ainsi spécifique à l'approvisionnement parisien. Pourtant, l'accélération du niveau de concentration géographique des cheptels à partir notamment de la fin des années 1980 conduit en quelque sorte à réduire les spécificités géographiques des aires d'approvisionnement de différents milieux de consommation et réduit par conséquent également le biais de notre analyse. L'aire d'approvisionnement en viande de Paris s'étend dès les années 1880, sur la majorité du territoire de la France, grâce au développement quelques décennies plus tôt, du transport ferroviaire. Au début du XXe siècle, la quasi-totalité du territoire concourt à l'approvisionnement de Paris en viande par opposition à l'approvisionnement en lait qui reste encore très local (distance moyenne d'approvisionnement de l'ordre de 150 km au début du XXe siècle et de 200 km aujourd'hui). La diversification progressive des sources de viande à destination de Paris à partir de la seconde moitié du XXe siècle s'est accompagnée par la diminution de la fraction des productions régionales dont s'empare la capitale. Ceci, en parallèle avec l'amélioration de la productivité des cheptels (surtout des bovins), a permis l'augmentation de la consommation de viande au sein des populations des principaux départements d'approvisionnement.

Chapitre 4 : Reconstitution des rations animales

4.1. Généralités

Ce chapitre fait le lien entre la consommation urbaine de viande et de lait et la consommation de fourrages nécessaires à la production. Le métabolisme animal est le mécanisme de transformation de la production primaire en produits dérivés, avec un rendement qui est fonction de l'espèce animale, de ses caractéristiques physiologiques et des ressources fourragères utilisées pour l'élevage. L'efficacité dans la production animale varie donc dans le temps et dans l'espace en fonction de ces paramètres. La consommation parisienne de viande et de lait est issue des élevages contrastés en termes de mobilisation et de transformation des fourrages en produits animaux. Afin d'évaluer l'influence environnementale de la consommation de viande et de lait, il faut déterminer l'équivalent en fourrage de chacun de ces aliments. C'est parce que les animaux, comme les humains, sont des organismes hétérotrophes, tributaires de la production primaire pour leur survie et développement. Tout comme les villes, les exploitations d'élevages utilisent des aliments produits localement ou importés par d'autres régions ou pays afin de subvenir aux besoins des cheptels. De manière analogue à l'approvisionnement urbain, les aliments des animaux ont leur propres provenances qui représentent des provenances de deuxième dégrée pour la consommation urbaine. La géographie de l'influence de la consommation sur l'environnement et les ressources naturelles est ainsi le résultat de l'imbrication géographique entre d'un côté les origines des importations urbaines et de l'autre l'aire d'approvisionnement des exploitations d'élevage.

Il s'agit dans ce chapitre de reconstituer l'alimentation des animaux d'approvisionnement parisien en fonction des niveaux de production et de la disponibilité de fourrages pour quelques dates clés dans la période d'étude.

4.2 La notion des besoins

L'influence que la consommation parisienne de viande et de lait exerce sur l'environnement dépend de la composition des rations animales. Celles-ci se constituent en fonction des besoins diététiques des animaux et de la disponibilité fourragère dans les régions d'élevage. On cherche ainsi à reconstituer les rations des bovins et des porcs qui ont fourni la viande et le lait à la population parisienne entre les débuts des XIXe et XXIe siècles conformément au niveau de la production et à la disponibilité fourragère de chaque époque.

Les quantités d'éléments nutritifs assimilables nécessaires à toutes les activités définissent les besoins d'un animal : besoins en eau, en constituants énergétiques, en protéines et acides aminés indispensables, en minéraux et vitamines etc. (INRA, 1989).

La détermination des besoins et la compréhension du processus d'assimilation des éléments nutritifs a fait de longue date l'objet des expériences scientifiques qui ont progressivement évolué dans l'élaboration des modèles mathématiques de description du métabolisme animal. Au XIXe siècle l'intérêt portait principalement sur la compréhension du métabolisme des bovins en raison à la fois de l'importance de leur viande et le lait dans la nutrition humaine et de leur rôle prépondérant dans le labour des terres agricoles. On trouve par exemple des exemples empiriques de rationnement, établis sur le principe de l'équivalence fourragère au foin - aliment qualifié de « normal » en raison « du rapport convenable entre le volume et la faculté nutritive » (Vial, non daté, p.70).

Depuis les années 1940, la recherche scientifique a entrepris la mise en équations du métabolisme de diverses espèces animales (des bovins, des porcins, des ovins, des volailles, des chevaux, des poissons et des chiens) afin de faciliter aux nutritionnistes d'en prévoir les besoins diététiques et d'y répondre avec des rations adéquates, constituées comme mélanges de divers aliments des valeurs nutritives standardisées (ex : NRC, 2000, 2001, 1998). La formulation des rations repose sur le principe des

bilans entre les besoins des animaux et l'apport de la matière sèche (MS) en énergie, en protéines et acides aminés, en minéraux et en vitamines.

Dans le présent travail, la formulation des rations animales est conduite sur la base des besoins en énergie et en protéines, les deux intrants les plus emblématiques du métabolisme animal, étant dans leur quasi totalité fournis par la fraction végétale d'une ration. La performance d'un animal dépend des fourrages qu'il consomme. De ce fait, le potentiel de production d'une région d'élevage est étroitement lié à sa disponibilité fourragère, cette dernière étant le résultat de la production locale et du commerce national et international. Les autres besoins, à savoir en eau, en vitamines et en minéraux, quoiqu'indispensable pour le bien-être de l'animal, n'interviennent pas spécialement dans le choix des fourrages puisque ces besoins sont essentiellement fournies par d'autres sources : de l'eau potable et des additifs, comme par exemple des sels minéraux.

L'énergie - qualité nutritionnelle des aliments, mesurée en calories ou en joules (1 Mcal = 1000 kcal = 4.184 MJ) - est un besoin indispensable dans l'accomplissement de toutes les fonctions physiologiques et productives de l'animal. La privation des constituants énergétiques est, avec l'eau, le paramètre nutritionnel qui affecte le plus rapidement la survie (INRA, 1989). Répondre aux besoins énergétiques des animaux est donc le premier critère dans le choix des fourrages d'une ration dont il faut connaître le pouvoir énergétique, c'est-à-dire la quantité d'énergie susceptible de se mettre à la disposition de l'animal. Les sources d'énergie de la matière végétale sont les hydrocarbures - qui se divisent en hydrocarbures structurels, tels les fibres – cellulose, hémicellulose et lignine - et non-structurels, tels les sucres et l'amidon - les matières grasses et enfin dans une moindre mesure les protéines. L'énergie totale d'un aliment, appelée énergie brute (EB) ou pouvoir calorifique, correspond à l'énergie dégagée lors de sa combustion parfaite dans une bombe calorimétrique et dépend de sa teneur en hydrocarbures (dont le pouvoir calorifique est de 3.7 pour le glucose à 4.2 kcal/gr amidon), en matières grasses (9.4 kcal/gr) et en protéines (5.6 kcal/gr) (NRC, 2001). Bien que de pouvoir calorifique inférieur aux autres composantes, les hydrocarbures sont la source principale d'énergie d'une ration, du fait d'en être la composante majoritaire.

L'énergie brute d'un aliment n'est pas dans sa totalité accessible par voie métabolique. La fraction extractible désigne la digestibilité de l'aliment et est fortement variable d'un aliment à l'autre ainsi qu'elle dépend de l'espèce animale. A l'exception de la lignine qui n'est digérable par aucune espèce animale domestique, les fibres cèdent mieux leurs éléments alibiles chez les ruminants que chez les monogastriques. La fraction extractible de l'énergie brute (EB) d'un aliment ou d'une ration est appelée énergie digestive (ED), la différence étant restituée à l'environnement dans les matières fécales (EB des fèces). De l'ED, une fraction est à nouveau restituée à l'environnement sous forme des urines (protéines) et des gaz métaboliques (méthane) et la différence appelée l'énergie métabolisable (EM) est disponible pour les fonctions métaboliques de l'animal. Toutefois, une fraction de l'EM est transformée en chaleur pendant la métabolisation des aliments et peut être dissipée sans contribuer à répondre aux besoins de l'animal. La différence entre l'EM et les pertes de chaleur est appelée énergie nette (EN) et correspond au vrai apport énergétique d'un aliment vis-à-vis des besoins physiologiques d'un animal. La figure 4.1 résume les pertes énergétiques au regard du métabolisme animal et les systèmes de mesure correspondants.

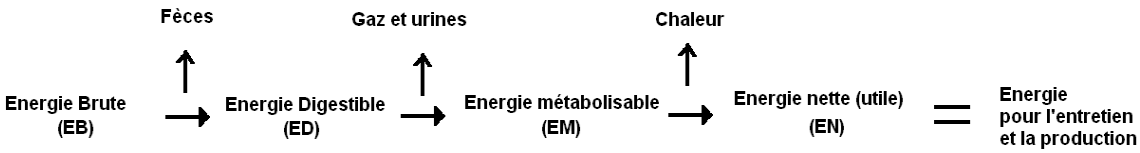


Figure 4.1 : Systèmes de mesure de l'énergie dans l'alimentation animale. D'après NRC, 2001.

Afin d'être compatibles, les besoins et l'apport en énergie doivent être exprimées dans le même système : EB, ED, EM ou EN. En ce qui concerne les besoins, les systèmes d'EB et d'ED ne présentent pas d'intérêt car ils intègrent les pertes sous forme de fèces, urines et gaz qui dépendent fortement de l'alimentation et surtout de la teneur en fibres des aliments. Par exemple, l'EM s'élève à environ 96 % de l'ED des rations porcines, et à environ 82 % des rations bovines mais les écarts sont variables dans le cas des fourrages individuels selon leur teneur en fibres (Noblet et al., 2003).

A la différence des systèmes d'EB et d'ED, l'EM et l'EN excluent les pertes sous forme de matières et sont pour autant une interface pertinente pour la comparaison des

besoins et de l'apport d'énergie chez l'animal. L'EN présente à priori l'avantage de tenir compte de la production endogène de chaleur, ce qui en fait l'expression énergétique la plus précise mais aussi la plus compliquée à mettre en place (NRC, 1998, NRC, 2001, Moenh, 2005). Il convient pourtant de noter que la production de chaleur n'est pas synonyme des pertes. Qu'elle constitue des pertes ou pas, dépend des températures ambiantes, du fait que, selon le gradient de température entre l'animal et l'extérieur, la chaleur produite peut contribuer à la régulation thermique de l'animal avec une réduction des besoins d'énergie pour l'entretien (NRC, 2000, NRC, 2001). Le système de l'EN est surtout développé pour les bovins (NRC, 2000, 2001) chez qui la production endogène de chaleur liée à la fermentation microbienne des aliments est plus importante que chez les porcs. En revanche, le système dominant chez les porcs est l'EM, bien qu'il soit en général reconnu comme inférieur en termes de précision par rapport à l'EN (Noblet et al., 1994, NRC, 1998) et que des méthodes d'évaluation des besoins et de l'apport des aliments ont été développées (Noblet et Henry, 1991, Noblet et al., 1994, Noblet et al., 2003).

L'évaluation des besoins totaux en EM ou EN d'un animal est faite sur la base d'une séparation entre besoins d'entretien et besoins de production. Les premiers se réfèrent au maintien de l'animal dans un état d'équilibre et les deuxièmes au coût énergétique pour la production du travail ou de la biomasse. Cependant, la distinction entre l'entretien et la production est d'ordre théorique plutôt que physiologique (INRA, 1989) car d'une côté il est rare de trouver des conditions nutritionnelles qui se limitent à l'entretien d'un animal d'élevage et de l'autre il s'agit de deux formes interchangeables d'utilisation de l'apport énergique d'une ration. La production sous forme de biomasse est mesurable lorsque l'apport énergétique dépasse les besoins d'entretien, tandis que pour un animal de labour entretenu dans un état d'équilibre, la dissociation entre les besoins d'entretien et de production est ambigüe. Cependant, ce concept est communément utilisé dans la formulation des rations, surtout parce que l'élevage actuel se spécialise dans la production de la biomasse et que les besoins d'entretien sont conditionnés.

Le besoin d'entretien est surtout fonction du poids vif. Plus la biomasse d'un animal est importante, plus d'énergie est nécessaire pour l'entretenir. Le besoin augmente de

manière curvilinéaire avec le poids vif (PV) et est communément estimé - pour les bovins comme pour les porcs - proportionnellement au poids métabolique ($PV^{0.75}$) – mesure correspondant à la surface corporelle (NRC, 1998, 2000, 2001). Par ailleurs, le besoin d'entretien est influencé par les conditions de milieu, surtout par la température ambiante, ainsi que par des facteurs tels que l'état physiologique, l'activité physique, la race, l'âge ou encore l'état de la fourrure (NRC, 1998, 2000). Par exemple, il est suggéré que le besoin d'entretien par unité de biomasse diminue avec l'âge, à un taux d'environ 3 % par an (CSIRO, 1990) et augmente pour des températures inférieures à 20° C, à un taux d'environ 1 % par °C de différence (NRC, 1981). Des équations permettant d'évaluer l'influence des facteurs environnementaux et physiologiques sur le besoin d'entretien de base, sont en général disponibles dans les publications des organismes de recherche animale. Ces ajustements sont évidemment exprimés dans le système énergétique de calcul des besoins.

En dehors de l'entretien, le besoin énergétique lié à une production de biomasse dépend essentiellement de la composition de celle-ci. Il est supérieur pour la synthèse des lipides que pour les protéines en raison surtout de la faible teneur en eau des premières par rapport aux secondes (INRA, 1989, NRC, 2000). Le besoin énergétique de production est en principe indépendant des conditions de milieu ; il est en revanche lié pour les bovins comme pour les porcs au patrimoine génétique de l'animal (INRA, 1989, NRC, 2001).

Dans le présent travail et suivant la disponibilité des données dans la littérature, les besoins en énergie sont exprimés en termes d'énergie métabolisable (EM) pour les porcs et d'énergie nette (EN) pour les bovins et sont estimés à partir des équations calées sur des données expérimentales publiées par le NRC (1998, 2000, 2001). La même source bibliographique fournit des données de composition chimique, de digestibilité et d'apport nutritionnel pour un grand nombre d'aliments, déterminées au moyen des expériences de laboratoire, des dispositions expérimentales et des modèles mathématiques (NRC, 1998, 2000, 2001). Évidemment, pour chaque espèce animale, les besoins et l'apport nutritionnel des aliments sont établis dans le même système énergétique.

Après l'énergie, les protéines sont la deuxième caractéristique essentielle de l'alimentation animale (l'étymologie du mot protéine vient du grec ancien « *prôtos* » signifiant « *premier* », « *essentiel* »). Les protéines jouent des rôles très variés dans la survie et le développement des cellules de l'animal, allant des protéines structurelles qui composent les muscles, les poils, et la peau, aux enzymes catalyseurs de toutes les réactions chimiques individuelles qui ont lieu au sein des cellules (INRA, 1998). Malgré la diversité de leurs fonctions, toutes les protéines sont composées des chaînes de constituants appelés acides aminés dont la teneur en azote (N) est communément d'environ 16 % (INRA, 1998). La teneur en protéines d'un aliment est donc évaluée par son contenu azoté, multiplié par 6,25 (N x 6,25), et s'exprime communément en pourcentage de la matière sèche.

Comme pour l'énergie, le besoin en protéines est évalué comme la somme du besoin d'entretien et de production. Le premier se réfère au renouvellement des protéines déjetées par l'organisme et le deuxième à la génération de la biomasse nouvelle. Selon cette dissociation, le besoin de production est nettement plus important du besoin d'entretien car, contrairement à l'énergie qui se dissipe sous forme de chaleur et de travail, les protéines sont à la base des éléments structurels. Le dépôt des protéines dans la croissance des tissus est la dépense énergétique majeure du processus de production. Dans ce travail, la détermination des besoins et de l'apport en protéines est principalement faite à partir des données du NRC (1998, 2000, 2001).

On s'intéresse de mettre en lien la consommation parisienne de la viande et du lait avec les besoins en énergie et en protéines relatifs à leur production et y affecter une consommation fourragère. De quelle manière peut-on procéder dans le calcul des besoins à l'égard de ces produits ?

De manière générale, on distingue trois voies métaboliques de génération de la biomasse : la gestation, la croissance post-naissance et la lactation. D'un point de vue métabolique, le cumul de l'énergie et des protéines consommées par un animal entre sa naissance et la fin de sa carrière est, dans le cas des truies mères et des vaches laitières, partagé parmi ces trois fonctions tandis que dans le cas de l'élevage à viande, alloué entièrement dans la croissance post-naissance. Les besoins d'entretien et de

production varient selon l'état physiologique des animaux (NRC, 1998, 2000). En faire le calcul précis demande un travail minutieux qui pose le fondement de la démarche nutritionniste dont l'objectif est d'assurer phase par phase la nutrition adéquate pour la survie des animaux et pour la rentabilité de la production. En effet, la recherche animale permet actuellement d'évaluer de manière mécanistique les besoins d'entretien et de production des bovins (Baldwin, 1995, Fox et al., 1995, NRC, 2000, 2001) et des porcs (NRC, 1998, Noblet et al., 1990, 1993, 2003) dans leurs divers stades physiologiques. Les équations de prédiction sont nombreuses et construites sur un grand nombre des données expérimentales.

Nous adoptons une approche plus macroscopique qui vise à mettre en relation les consommations alimentaires humaine et animale respectivement, à partir des produits que l'élevage met à disposition des Parisiens, dans le cas présent, deux pour les bovins (viande et lait) et un pour les porcs (viande seule). Il s'agit donc de déterminer le régime alimentaire type, correspondant à chacun de ces produits. Les besoins des animaux aux divers stades physiologiques doivent ainsi être regroupés à l'égard de ces produits. Pour les deux élevages, les besoins de gestation doivent être associés aux besoins de la croissance post-naissance et affectés ensemble à la production de la viande. Pour les bovins, les besoins de lactation doivent être dissociés des besoins de croissance et de gestation pour être affectés à la production du lait. Cette approche s'éloigne de la méthode déterministe précédemment évoquée et permet de caractériser les flux ressortant des élevages conformément aux attentes de ce travail.

Les sections suivantes décrivent les démarches empruntées dans la formulation des rations porcines et bovines, les premières étant fondées sur des besoins de croissance tirées de la littérature et les deuxièmes sur des simulations à l'aide d'un logiciel commercial, employé de manière à faire la part des ressources entre la production de la viande et du lait.

4.3 Méthodes et données pour le calcul des besoins de production, XIXe – XXIe siècles

4.3.1 Viande porcine

Dans l'élevage porcin, l'ensemble de l'alimentation, qu'elle remplisse des fonctions de gestation, de lactation ou de croissance post-naissance, converge à la production de la viande (figure 4.2).

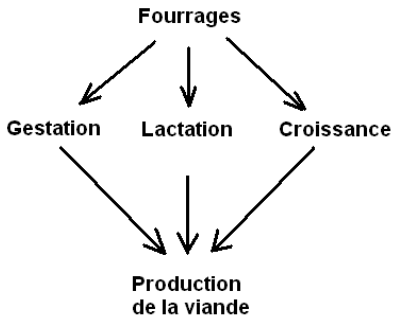


Figure 4.2 : Schéma d'allocation des ressources fourragères dans l'élevage des porcs.

Le lait des truies n'est pas une finalité d'élevage mais une étape intermédiaire et partie intégrale du processus d'accrétion de la biomasse charnelle. Ainsi, associer une consommation fourragère à sa production n'a pas d'utilité dans notre démarche.

La gestation est la première étape de croissance du porc et de production de la viande. L'énergie et les protéines des rations des truies qui y sont associées constituent une consommation indirecte pour le porc abattu qui doit être ajoutée à sa consommation post-naissance. Ainsi, le calcul des rations doit tenir compte du cumul des besoins de croissance entre le poids 0 et le poids d'abattage. On note, que ce cumul ne tient pas compte de la consommation fourragère relative aux besoins d'entretien des truies pendant la gestation. Bien que sous-jacente au processus de la production de viande, cette consommation est très indirecte et n'a pas été comptabilisée.

Les poids moyens d'abattage des porcs consommés à Paris aux différentes époques peuvent être déduits des documents statistiques. Bien que fluctuants d'une année à l'autre, les poids n'ont point évolué à l'égard des deux derniers siècles. Selon les relevés de l'octroi, le rendement en quatre quartiers (80 % du poids vif) était de 91 kg en 1847, 88 kg en 1862, 81 kg en 1885, 84 kg en 1904, 90 kg en 1905, 102 kg en

1906, 77 kg en 1930[1]. Actuellement, il est de 88 kg pour la moyenne française (Statistique agricole annuelle, 2006), soit pratiquement le même qu'aux dates précédentes et correspond à un poids vif de 110 kg. Par conséquent, du point de vue du poids, les besoins quotidiens d'entretien des porcs sont les mêmes entre les XIXe et XXIe siècles. Par ailleurs, les besoins quotidiens de production dépendent de la composition de biomasse et du rythme d'accrétion. Le coût énergétique de synthèse est de 10.6 kcal/g en moyenne pour les protéines et de 12.5 kcal/g pour la graisse. Pourtant, ces valeurs ne correspondent pas au contenu énergétique de ces composantes en raison des émissions de chaleur sous-jacente au processus de synthèse. Soustraction faite, le contenu énergétique des protéines et des lipides est de 5.6 kcal/g et 9.4 kcal/g respectivement. Il s'agit bien des valeurs d'énergie brute (EB) de la biomasse. Le tableau 4.1 indique des valeurs typiques de composition chimique et de contenue énergétique de la biomasse d'un porc moyennement gras de 110 kg de poids vif (Lange et al., 2003).

Tableau 4.1 : Composition chimique et contenu énergétique (Energie brute - EB) de la biomasse d'un porc de 110 kg. Sources : Lange et al., 2003, NRC, 1998.

	Composition de la biomasse			
	%	kg	EB en kcal/gr	EB en Mcal/porc
Eau	57%	62	0	0
Protéines	15%	18	5.6	92
Lipides	25%	28	9.4	259
Cendres	3%	3	0	0
Total	100 %	110	-	351

[1] Voir tableau 2.1, chapitre 2. Pour les années 1862, 1905, 1906 : Ministère de l'agriculture 1897 et Statistique agricole annuelle 1906, 1908 respectivement.

Cette composition est considérée représentative pour toutes les époques[1]. Enfin, le rythme d'accrétion, exprimé en termes de gain moyen quotidien (GMQ) est la variable principale de différentiation entre les élevages des différents siècles. Fonction inverse de la durée d'engraissement, le GMQ montre le potentiel de production d'un système d'élevage et évolue en fonction des fourrages utilisées et des progrès technologiques et génétiques. Compte tenu du fait que l'élevage des porcs est réservé à la production de la viande, connaître l'âge d'abattage revient à connaître la durée d'engraissement et donc le potentiel de GMQ du système d'élevage. L'âge d'abattage moyen d'un porc de 110 kg de poids vif était d'environ 365 jours au XIXe siècle (Ministère de l'agriculture, 1897) et d'environ 185 jours aujourd'hui (ITP, 2003), ce qui correspond à des valeurs de GMQ d'environ 300 g/jour et 600 g/jour respectivement.

La valeur du GMQ détermine les besoins totaux d'élevage. Une valeur élevée de GMQ signifie que beaucoup d'énergie s'emmagasine quotidiennement sous forme de biomasse et que cette biomasse reste peu longtemps à l'entretien. Ainsi, le rapport entre l'énergie retenue et l'énergie consommée sur la durée de vie du porc augmente avec le GMQ et fait croitre l'efficacité de la production.

Le tableau 4.2 montre les besoins quotidiens moyens des porcs des poids vifs inclus entre 3 kg et 110 kg, évalués par le NRC (1998) pour un GMQ d'environ 600 g/jour, sous température ambiante de 20 °C et pour une activité physique minimale (surface disponible d'environ 0,4 m^2 par porc, pour des poids de moins de 20 kg et d'environ 1 m^2 pour des poids au delà) (NRC, 1998). Quant aux poids inférieurs à 3 kg (en italique dans le tableau 4.2), les besoins indiqués dans le tableau 4.2 sont

[1] Il s'agit d'une hypothèse simplificatrice, en raison des difficultés de collecte des données plus précises. La composition chimique des animaux est à la fois fonction de l'alimentation et des conditions d'élevage. Par exemple, selon le témoignage d'un éleveur breton interviewé par Sabine Barles en 2008, les élevages actuels sont souvent surchauffés afin d'obtenir une diminution du taux de graisse de la carcasse des porcs, sachant que ceux-ci reçoivent des rations très concentrées en énergie tandis qu'ils sont élevés en conditions d'activité physique minimale. Dans tout les cas, produire des porcs maigres coûte plus cher que produire des porcs gras, que le coût concerne l'alimentation des animaux ou le chauffage des installations. Une perspective intéressante de travail serait de dresser et comparer les bilans énergétiques et environnementaux des élevages aux différents siècles en tenant compte de la consommation d'énergie sous toutes ses formes.

hypothétiques et calculés par extrapolation des données de NRC. La dernière ligne du tableau indique pour chaque tranche de poids vif le nombre des jours correspondant à l'engraissement, dont la durée totale est de 185 jours.

Tableau 4.2 : Besoins en énergie et en protéines et durée d'engraissement des porcs à GQM de 600 g/jour. Voir dans le texte pour plus de détail. Source : NRC, 1998 et estimations.

PV (kg)	***0-3***	**3-5**	**5-10**	**10-20**	**20-50**	**50-80**	**80-110**
PV moyen (kg)	*1,5*	4	7,5	15	35	65	95
EM (kcal/jour)	*487*	820	1620	3265	6050	8410	10000
Protéines (g/jour)	*35*	65	119	209	334	400	405
Durée/tranche (jours)	5	3	8	17	50	50	50

Du fait de comporter un GMQ de 600 g/jour, les données du tableau 4.2 correspondent aux besoins quotidiens des élevages actuels. Pour le XIXe siècle, les besoins doivent être réduits, sachant que si le besoin d'entretien demeure identique, le besoin de croissance est divisé par deux. La réduction est donc proportionnelle à la différence de GMQ et s'établi par rapport au coût énergétique de synthèse des protéines (NRC, 1998). Le tableau 4.3 en montre les valeurs réduites qui correspondent à la somme des besoins d'entretien et de production relatifs à la croissance d'un porc au rythme de 300 g/jour. Il faut noter que les valeurs correspondantes restent approximatives[1].

Tableau 4.3 : Besoins en énergie métabolisable (EM) et en protéines et durée d'engraissement des porcs à GQM de 300 g/jour. Source : Cette étude à partir des données de NRC, 1998

PV (kg)	*0-3*	3-5	5-10	10-20	20-50	50-80	80-110
PV moyen (kg)	*1,5*	4	7,5	15	35	65	95
EM (kcal/jour)	*91*	424	1224	2869	5654	8014	9630
Protéines (g/jour)	*7*	34	90	184	312	380	390
Durée/tranche (jours)	*10*	7	17	33	100	100	100

[1] Le caractère approximatif du calcul tient à la fois aux estimations relatives aux besoins de croissance qu'au fait qu'au XIXe siècle le porc vivait probablement à une température moyenne inférieure à 20 °C et avait une activité physique plus importante que le porc actuel. Sous réserve de validité de ces hypothèses, les besoins du porc au XIXe siècle sont susceptibles d'être supérieurs à ceux présentés au tableau 4.3.

Comme précédemment, la dernière ligne du tableau 4.3 indique le nombre des jours nécessaire à l'engraissement par tranche de poids vif. La durée totale est de 365 jours.

La comparaison des deux tableaux montre que la différence des besoins entre les deux rythmes de croissance diminue avec l'augmentation du poids vif. Ceci résulte du fait que la part des besoins d'entretien sur les besoins totaux de l'animal augmente avec le poids, car le rapport massique entre le gain et le poids à l'entretien diminue. Par exemple, à la fin de l'engraissement, une croissance de quelques centaines de grammes nécessite l'entretien d'une biomasse de 110 kg.

La somme de l'énergie métabolisable (EM) et des protéines mobilisées pour la production de la viande d'un porc de 110 kg consommé à Paris aux XIXe et XXIe siècles est égale aux besoins quotidiens moyens des tableaux 4.2 et 4.3 cumulés sur les durées respectives de croissance. En faisant l'hypothèse que le GMQ n'a pas évolué avant l'industrialisation de l'élevage, les besoins de production calculés pour le XIXe siècle sont représentatifs de l'ensemble de la période préindustrielle, soit jusqu'aux années 1960 (Diry, 1978).

Tableau 4.4 : Besoins et teneurs en énergie et en protéines d'un porc de 110 kg aux XIXe et XXI siècles et efficacité de conversion de protéines végétales en protéines animales (NCE). Sources : Nos calculs à partir de données diverses (voir dans le texte).

Poids vif d'abattage	110 kg	
	Besoins de production	
	Début XIXe-mi XXe siècles	Début XXIe siècle
EM, Mcal/porc	2440	1310
Protéines, kg/porc	116	62
	Teneurs de la biomasse	
EB, Mcal/porc	351	
Protéines, kg/porc	17.6	
	Efficacité de conversion	
NCE-poids vif	15 %	26 %
Energie[1]	-	-

[1] L'efficacité de conversion de l'énergie est indiquée plus loin en termes d'énergie brute

Le tableau 4.4 récapitule les besoins de production pour chaque époque, la teneur en énergie et en protéines des porcs finis (poids vif) et les efficacités de conversion des protéines végétales en protéines animales (NCE-poids vif).

Selon nos calculs, les besoins de production au XIXe siècle étaient d'environ deux fois plus élevés qu'aujourd'hui. Ceci est une conséquence directe de la diminution d'un facteur deux de la durée de l'élevage, suite au doublement du GMQ. Actuellement, environ 26 % des protéines ingérées sont retenues sous forme de biomasse animale (poids vif), contre 15 % au XIXe siècle.

Soulignons que le contenu et le besoin en énergie du porc ne sont pas à ce stade comparables (ce qui ne permet pas le calcul de l'efficacité énergétique de la production). Le contenu est par définition de l'énergie brute (EB) tandis que le besoin est exprimé en termes d'énergie métabolisable (EM), c'est-à-dire qu'il ne tient pas compte de la fraction de l'énergie brute des aliments qui est restituée à l'environnement sous forme des fèces, des urines et des gaz métaboliques (*cf. supra*). Cette fraction étant spécifique à la composition fourragère de la ration, le calcul de l'efficacité énergétique (conversion en termes d'énergie de la biomasse végétale en biomasse animale) n'est possible qu'après la détermination des régimes alimentaires : selon les fourrages utilisés, l'équivalent en matières végétales de la biomasse animale est différent. L'efficacité énergétique est très variable d'un système fourrager à l'autre (voir section 4.5).

Exprimés en nombre des porcs de 110 kg, les importations parisiennes au début des XIXe, XXe et XXIe siècles sont récapitulées dans le tableau 4.5, suivant le regroupement des provenances des importations par région administrative actuelle. La conversion du tonnage d'importation en têtes animales est faite pour un coefficient de 90 %, admettant que les abats et les issues (parties non-comptabilisées dans le tonnage des importations) représentent 10 % du poids vif du porc. On fait l'hypothèse que le partage des protéines est proportionnel au partage de la biomasse, c'est à dire que 90 % des protéines retenues sous forme de biomasse animale font l'objet des importations parisiennes, le reste étant contenu dans les abats et issues. Ainsi, du point de vue des importations, la NCE est égale à 90 % de celle du tableau 4.4. En effet, la NCE est

spécifique à la production, aux importations ou à la consommation selon qu’on considère la teneur en protéines du poids vif, du tonnage d’importations ou de la viande de consommation c'est-à-dire après soustraction des pertes diverses relatives à l’abattage, à la découpe, à la préparation, à la cuisson etc. L’analyse du rapport entre la production et les importations urbaines avant consommation nécessite la prise en compte de la NCE appliquée au tonnage des importations. Celle-ci est de 13 % et 24 % respectivement aux XIXe et XXIe siècles et correspond à la fraction envoyée à Paris des protéines mobilisées dans les élevages de province. La partie non-importée constitue une importation indirecte de la capitale, puisqu'il s'agit tout de même de l'azote ayant servi la production.

On verra dans la section 4.5 les origines végétales de l'énergie et des protéines des rations que l'on peut affecter aux importations parisiennes du tableau 4.5 par période et par région de provenance. Ensuite, on s'intéressera aux importations indirectes de la capitale dans la détermination de son empreinte alimentaire.

Tableau 4.5 : Nombre des porcs de 110 kg importés à Paris par lieu de provenance au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Pour le début du XXe siècle, les importations comptabilisées s'élèvent à 98 % des importations totales. Sources : Voir chapitre 3 et dans le texte.

Lieux de provenance	Début XIXe siècle	Début XXe siècle	Début XXIe siècle
France Métropolitaine			
Alsace		-	14 318
Aquitaine		2 970	94 525
Auvergne		34 203	52 411
Bourgogne		-	34 149
Bretagne		25 066	1 623 430
Centre		53 937	64 376
Champagne-Ardenne		-	36 475
Franche-Comté		-	24 302
Ile-de-France	65 250	3 636	1 564
Languedoc-Roussillon		-	7 695
Limousin		43 363	34 735
Lorraine		-	18 267
Midi-Pyrénées		19 726	88 523
Nord-Pas-de-Calais		-	103 159
Normandie-Basse		9 814	121 605
Normandie-Haute		-	29 768
Pays-de-la-Loire		228 605	318 505
Picardie		-	26 352
Poitou-Charentes		25 141	63 745
Provence-Alpes-Côte-D'azur		-	4 390
Rhône-Alpes		-	83 348
Totaux France	65250	446 460	2 845 642
Commerce extérieur			
Luxembourg	-	-	27 094
Allemagne	-	-	92 873
Belgique	-	-	97 790
Pays-Bas	-	-	160 517
Espagne	-	-	286 640
Autre	-	-	4 263
Total étranger	-	-	669 177
Total général	**65 250**	**446 460**	**3 514 818**

4.3.2 Viande et lait bovins

Lorsque plusieurs produits de consommation dérivent d'un même animal, il faut en différentier le coût environnemental. Par exemple, il faut partitionner la consommation fourragère d'une vache d'approvisionnement parisien entre sa production de lait et sa production de viande. Ceci peut se faire de deux manières. Soit en allouant le coût environnemental total entre la viande et le lait au moyen des coefficients de pondération ou en évaluant séparément le coût relatif à chaque fonction productive. On considère que la deuxième méthode est supérieure pour les raisons discutées ci-après.

La première méthode a été utilisée par Chapagain et Hoekstra (2003) dans le calcul de l'empreinte hydrique (water footprint) des divers élevages et son allocation entre les produits alimentaires descendants d'un même animal : par exemple, la viande et les œufs pour les poules, le lait et la viande pour les vaches. A partir des données statistiques sur la composition des rations bovines, Chapagain et Hoekstra ont fait le cumul du tonnage des aliments d'une vache entre sa naissance et la fin de sa carrière laitière, qu'ils ont ensuite alloué à la viande et au lait par une pondération basée sur le rapport des tonnages et des valeurs monétaires entre les deux produits[1]. Du fait de cumuler la consommation fourragère du bovin sur sa durée de vie, cette méthode revient à confondre les besoins d'entretien et de production entre les phases physiologiques (veau, génisse, vache laitière) et entre les produits. La viande est mise en rapport avec les besoins de lactation et le lait avec les besoins de croissance. Or, la phase relative à la production de la viande précède celle du lait car la lactation se succède à la croissance de même que les deux phases ne sont pas de la même durée. Les vaches laitières sont maintenues en vie pendant plusieurs années, voire décennies, sans que ceci soit en lien avec leur rendement en viande. Autrement dit, la croissance de la demande en lait n'engendre pas l'augmentation de la disponibilité de viande. Ceci en fait deux productions indépendantes dont les coûts environnementaux doivent

[1] La valeur monétaire utilisée comme moyen d'évaluation de l'utilité de chaque produit. Elle peut être remplacée par une autre valeur, par exemple la valeur nutritive. Voir sur ce point la discussion du chapitre 5, section 5.2 concernant l'allocation des ressources agricoles aux sous-produits du traitement industriel des graines oléagineuses et des betteraves.

être déconnectés entre eux. Il s'agit donc d'évaluer d'une part l'équivalent fourrager du lait importé à Paris – c'est-à-dire les quantités de fourrages que l'on peut affecter à la lactation des vaches –, d'autre part l'équivalent fourrager de la viande importée à Paris, qu'elle soit de veau, de bœuf, ou de vache.

On a ainsi choisi d'évaluer les besoins de croissance et de lactation séparément et de les affecter respectivement à la production de la viande et du lait. On a utilisé pour ce calcul le logiciel commercial Formulate2, de formulation des rations bovines (CVNA, 2006) qui permet de formuler des rations spécifiques à la croissance d'un bovin ou à la lactation d'une vache, en fonction des valeurs nutritives standardisées d'un grand nombre d'aliments (NRC, 2000, 2001). Les rations seront donc simulées et représentent un état d'équilibre en termes nutritifs entre les besoins animaux et les productions fourragères caractéristiques d'une période donnée. Le calcul des besoins est fait quotidiennement en fonction du poids vif de l'animal, de son taux quotidien de production et des conditions environnementales de l'élevage. Toutes les simulations sont tournées pour une température ambiante de 15°C et pour une distance quotidiennement parcourue en pâturage de 1500 m. La température de 15 °C induit une augmentation d'environ 4,5 % des dépenses d'entretien par rapport à la température de 20 °C, température de référence dans le jeu d'équation de NRC (1981, 2000, 2001).

Pour les bovins en croissance le taux quotidien de production correspond au gain moyen quotidien (GMQ) et pour les vaches laitières au rendement moyen quotidien en lait (LMQ). On a mobilisé des sources statistiques historiques et contemporaines pour se procurer des données nécessaires aux simulations. Pour les rendements laitiers, les données des différentes sources étaient souvent exprimées différemment et on a dû les transformer. Dans les statistiques officielles les rendements sont exprimés en litres (ou hectolitres) par an, tandis que dans des études ponctuelles dont on a fait usage ils apparaissent souvent en litres par jour, mais pour un nombre de jours différent. Parfois, la mesure concerne l'année entière ou d'autres fois la durée de la lactation de la vache, cette dernière étant variable d'une vache à l'autre ou parmi les époques. Dans cette étude, le rendement quotidien en lait est partout exprimé à raison de 305 jours de

lactation, qui correspond à la durée typique des vaches actuelles. Le rendement ainsi calculé correspond au LMQ de la vache laitière.

Les rendements en lait ont fortement évolué entre les XIXe et XXIe siècles, de même qu'ils présentent des spécificités régionales, ce qui sous-entend des différences de composition des rations des vaches dans le temps et dans l'espace. Comme il a été montré dans le chapitre 2[1] le rendement des vaches du département de la Seine était jusqu'à la deuxième moitié du XXe siècle nettement supérieur à la moyenne française dont la valeur a suivi une croissance rapide à partir des années 1980. Mais outre cette différence, les écarts sont larges à l'intérieur de l'aire d'approvisionnement parisien à toutes les époques.

Au XIXe siècle, les rendements diminuent avec la distance des centres de consommation. De manière générale, les rendements sont maximaux chez les vaches des nourrisseurs des villes, puis chez celles des nourrisseurs des banlieues et en queue de la productivité se situent les vaches des éleveurs en milieu rural (Fanica, 2008). En effet, la productivité n'est une priorité que lorsque le lait peut être commercialisé. Dans le cas contraire, il suffit que le rendement soit à la hauteur des besoins familiaux.

Vers le milieu du XIXe siècle, le LMQ est d'environ 12 litres/jour chez les nourrisseurs de Paris, 7 litres/jour chez les nourrisseurs des environs de la capitale, et 3 litres/jour pour la moyenne française (Cordier, 1856) – ces chiffres correspondant à 305 jours de lactation. A partir de ces données et en fonction des parts contributives des trois catégories des vaches dans l'approvisionnement parisien, on peut estimer le LMQ associé à la consommation parisienne. Les parts contributives peuvent être estimées ainsi : vers 1850, le nombre des vaches des nourrisseurs parisiens est d'environ 2 200 (Husson, 1856, Loua, 1873) et couvrent environ 10 % de la consommation de l'agglomération, soit 10 000 m^3. Il reste environ 90 000 m^3 à fournir par les vaches de la banlieue et de l'extérieur (cf. chapitre 2). Étant donné qu'en 1850 le chemin de fer est depuis peu longtemps au soutien de l'approvisionnement (Dubuc, 1938), on a estimé la contribution de la banlieue à 90 % et de l'extérieur à 10 %. En

[1] Cf. figure 2.7, chapitre 2

tout, cette répartition donne un LMQ de 7,0 lt/jour dans l'aire d'approvisionnement parisien.

A la fin du XIXe siècle, les LMQ varient entre 3.3 lt/vache/jour et 12 lt/vache/jour parmi les seize départements de l'aire d'approvisionnement parisien, la valeur haute correspondant au département de la Seine (Ministère de l'agriculture, 1897). On compte quatre départements avec des LMQ inclus entre 3.3 et 4.9 lt/vache et onze avec des LMQ entre 5.2 et 6.9 lt/vache. La moyenne générale est d'environ 5,8 lt/vache/jour.

Au début du XXIe siècle, le LMQ des vingt-six départements de l'aire d'approvisionnement parisien est de 20,0 lt/vache, avec un maximum de 27,9 lt/vache dans le département de l'Essonne et un minimum d'environ 15,7 lt/vache dans celui de Puy-de-Dôme (Statistique agricole annuelle, 2006).

Enfin, pour chaque époque, les poids vifs des vaches laitières d'approvisionnement sont adaptés à partir des données des statistiques agricoles et des relevés des marchés alimentaires parisiens. Le poids vif est une donnée nécessaire au calcul des besoins d'entretien de la vache. Pour la première moitié du XIXe siècle, on a fait usage des relevés des marchés de Sceau et de Poissy (Philipp, 2004) et des données de Royer (1843), de Moreau de Jonnès (1848) et de Moriceau (2005). Pour le début du XXe siècle, les poids sont adaptés à partir des données de la statistique agricole de 1906 et de l'enquête générale de 1892 (Ministère de l'agriculture, 1897). Pour le début du XXIe siècle, et en raison de l'acquisition tardive des données des provenances des importations parisiennes de lait (base SitraM) on a utilisé un poids vif unique de 630 kg pour l'ensemble de la zone d'approvisionnement parisien, qui correspond au poids moyen d'abattage des vaches (Statistique agricole annuelle, 2007). Afin d'obtenir un bon compromis entre le volume des simulations et le degré de précision des simulations, on a regroupé les données départementales des rendements laitiers et des poids vifs par région administrative de grande étendue. C'est l'unité territoriale qu'on a retenu pour le calcul des rations.

Tableau 4.6 : Tonnage des importations parisiennes, rendements moyens en lait et poids vif des vaches par région administrative d'approvisionnement en trois dates : milieux XIXe, début XXe et début XXIe siècles. Lactation sur 305 jours. Compilation de plusieurs sources : Cette étude (voir chapitre 2), Dubuc, 1938, Ministère de l'agriculture, 1897, Statistique agricole annuelle, 2006 et estimations

	Milieu XIXe siècle			Début XXe siècle			Début XXIe siècle		
Régions de provenance	Tonnage d'importation (10^3 m^3)	Rendement en lait (lt/jour)	Poids vif* (kg)	Tonnage d'importation (10^3 m^3)	Rendement en lait (lt/jour)	Poids vif* (kg)	Tonnage d'importation (10^3 m^3)	Rendement en lait (lt/jour)	Poids vif* (kg)
Ile-de-France	100	7,0	430	122	7,3	453	35	23	630
Centre				103	7,3	451	7	22	630
Normandie-Haute				63	7,2	459	5	18	630
Picardie				56	5,7	383	137	21	630
Bourgogne				19	5,2	360	12	20	630
Champagne-Ardenne				18	5,0	350	21	20	630
Normandie-Basse				8	4,9	341	4	19	630
Nord-Pas-de-Calais				2	4,8	345	40	21	630
Pays-de-la-Loire							88	22	630
Bretagne							37	22	630
Limousin							18	18	630
Auvergne							18	17	630
Midi-Pyrénées							8	19	630
Poitou-Charentes							3	22	630
Rhône-Alpes							3	18	630
Totaux et moyennes	100	7,0	430	390	5,8	390	435	20	630

Le tableau 4.6 résume, pour trois dates (au milieu du XIXe, au tournant du XXe et au début du XXIe siècle) et par région administrative actuelle, le tonnage des importations parisiennes de lait par lieu de provenance (10^3 m^3), les poids vif des vaches (kg) et leurs LMQ (lt/jour). La dernière ligne indique la somme du tonnage des importations pour les trois dates et les moyennes régionales des rendements et des poids vifs utilisés dans les simulations. Il est intéressant de remarquer qu'entre les débuts des XIXe et XXe siècles, le LMQ dont bénéficie Paris a diminué, illustrant que l'aire d'approvisionnement de la capitale s'est élargie sur des zones moins productives. C'est en effet que la demande en lait a augmenté plus vite que la productivité moyenne des animaux des nouveaux territoires mobilisés dans le ravitaillement.

A partir du poids vif et du LMQ du tableau 4.6 par époque et par région d'approvisionnement, on obtient les besoins en énergie et en protéines d'une vache laitière sur un jour de lactation au rendement moyen. En cumulant les besoins quotidiens obtenus sur les 305 jours de la lactation, on obtient les besoins de la production laitière annuelle et du maintien de la vache dans un état physiologique d'équilibre, sans perte ni gain de poids. Sur le reste de l'année (60 jours), la vache ne fourni pas de lait et ses besoins alimentaires quotidiens se résument aux besoins d'entretien. Leur calcul se fait par une nouvelle simulation par région et époque, pour les poids vifs du tableau 4.6 et pour un rendement en lait nul. Les deux phases s'additionnent aux besoins annuels pour approvisionner Paris.

La composition chimique du lait est son contenu énergétique (énergie brute- EB) sont présentés dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7 : Composition chimique et contenu énergétique du lait. Sources : CVNA, 2006

Composantes	% du lait	EB, kcal/gr
Eau	88%	-
Protéines	3%	5,6
Graisse	4%	9,4
Lactose	5%	4,0
Minéraux	1%	-
Total	100%	0,7

A partir de cette composition, on effectuera le calcul de l'efficacité de conversion de l'énergie et des protéines de la production, variables entre siècles et régions en fonction à la fois des compositions des rations et des rendements en lait (voir section 4.4.3). Dans le cas du lait, contrairement à la viande, les taux d'énergie et de protéines de la production et des importations parisiennes sont les mêmes.

De manière analogue à ce qu'on a vu pour les porcs, les besoins de croissance des animaux sont fonction du gain moyen quotidien (GMQ) (kg/jour). Actuellement, le GMQ varie typiquement entre 0,5 kg/jour et 2,0 kg/jour - la variation étant fonction des races, de l'alimentation, des conditions environnementales etc. (NRC, 2000). En France, une valeur typique du GMQ est d'environ 1,1 kg/jour, comme ceci peut être déduit des données d'abattage des statistiques agricoles (Statistique agricole annuelle, 2008). C'est une valeur qui correspond à une alimentation relativement riche en énergie (INRA, 1988, Vermonel, 1995).

Pour les siècles précédents, le GMQ est plus difficile à évaluer du fait que l'élevage des bovins était partagé entre la production alimentaire et le labour. L'âge d'abattage renseigné dans les documents statistiques correspond à la somme des années de labour et d'engraissement, il correspond donc à un taux qui sous-estime le potentiel de production de la biomasse.

Selon les données statistiques pour l'année 1892, l'âge moyen d'abattage des gros bovins est de 70 mois pour un rendement en carcasse de 265 kg (~440 kg de poids vif), ce qui correspond à un taux de croissance d'environ 0,20 kg/jour, tandis que le GMQ des jeunes veaux, qui ne sont pas concernés par le labour, est - pour la même année - de 0,85 kg/jour (Ministère de l'agriculture, 1897). Etant indépendant du labour, le GMQ des veaux fournit une bonne indication sur le potentiel de production de l'époque. Selon ce GMQ, l'âge auquel le poids vif de 440 kg est atteint est de 17 mois, ce qui donne un temps de labour d'environ 50 mois – soit 75 % de l'âge du bovin - et un coût énergétique quotidien équivalent à 0,65 kg de croissance. Sous réserve de validité de ces considérations, il semble pertinent d'admettre qu'avant et après la fin du XIXe siècle, le GMQ sera respectivement inférieur et supérieur à 0,85 kg/jour. Il a cependant dû augmenter de manière irrégulière, car il est étroitement lié à

la disponibilité fourragère dont l'évolution a été assez irrégulière en France entre le début du XIXe siècle et aujourd'hui. En effet, selon les données issues des statistiques agricoles, une véritable révolution agricole vis-à-vis des aliments des bovins a débuté dans les années 1850 et a engendré jusqu'au début du XXe siècle des transformations profondes du paysage fourrager (voir section 4.4.2). Puis, à partir des années 1960, la mondialisation des ressources agricoles et l'arrivée d'aliments d'importation ont relancé la productivité des animaux, initiant une deuxième phase d'évolution qui est actuellement en cours. Toutefois, dans cette deuxième phase, l'élevage bovin à viande est, de manière générale, beaucoup moins concerné que l'élevage porcin, avicole et laitier (Steinfeld et al, 2006, Galloway et al, 2007) et encore moins en France où il demeure un utilisateur majeur d'aliments traditionnels, produits localement (Chatellier et Vérité, 2003, Agreste, 2008b, Chatzimpiros et Barles, 2010b).

De ce fait, on s'attend à ce que les écarts de GMQ soient moins importants entre les débuts de XXe et XXIe siècles qu'entre les débuts des XIXe et XXe siècles, sachant que la valeur typique actuelle est d'environ 1,1 kg/jour contre 0,9 kg/jour au début du XXe siècle. De plus, la littérature actuelle indique qu'un GMQ de 0,5 kg/jour correspond à une alimentation relativement pauvre en énergie (INRA, 1998, Vermonel, 1995, NRC, 2000) ; c'est donc cette valeur qu'on a admise pour le début du XIXe siècle.

Les GMQ présentés ci-dessus sont indicatifs des potentiels de production des élevages de chaque siècle et seront utilisés comme données d'entrée pour le modèle de simulations des besoins de croissance. D'autre part, selon la disponibilité fourragère de chaque époque, le modèle évalue l'apport nutritif des aliments susceptibles de concourir à l'alimentation du bétail dont le volume est déterminé en fonction des caractéristiques physiologiques de l'animal (NRC, 2000, 2001). Selon l'état d'équilibre entre les besoins et l'apport, le GMQ peut être légèrement inférieur ou supérieur à la valeur ciblée. Ainsi, la valeur exacte des GMQ et par conséquent les efficacités de conversion de l'énergie et des protéines sont fonction de la composition des rations et sont présentés dans la section suivante.

Une fois que les valeurs recherchées de GMQ sont déterminées aux différentes époques, le tonnage des importations parisiennes doit être converti au nombre des animaux d'importation afin d'obtenir la somme des besoins nutritifs liés à leur production. La conversion se fait en fonction des poids d'abattage aux différentes époques et du coefficient de conversion du poids vif en poids importé. Chez les bovins, ce coefficient est d'environ 60 % et correspond au rapport entre poids de la carcasse et poids vif de l'animal (Wulf, 1999). A la différence des habitudes alimentaires relatives à la consommation des porcs, les organes vitaux et reproducteurs, le sang, les tripes, etc des bovins ne font d'habitude pas l'objet de commercialisation à des fins de consommation[1] et ne figurent donc pas dans le tonnage des importations parisiennes. Elles contiennent ensemble environ 30 % des protéines totales de l'animal (Hoch et Agabriel, 2004) contre environ 70 % pour la carcasse. Exprimées en pourcentage et en densité énergétique, la composition chimique de la carcasse est indiquée dans le tableau 4.8 ; elle est considérée comme constante dans le temps et parmi des animaux de poids d'abattage différents. Comme cela a été discuté dans le cas des porcs, il s'agit d'une hypothèse simplificatrice puisque la composition de la biomasse est produite en liaison avec la demande du marché et peut varier en fonction des techniques d'élevage.

Tableau 4.8 : Composition chimique et énergétique de la carcasse bovine. Sources : NRC, 2000, Wulf, 1999, Hoch et Agabriel, 2004.

	% de la carcasse	EB, kcal/g carcass
Eau	57%	0
Protéines	18%	5,6
Graisse	24%	9,4
Minéraux	1%	-
Total et moyenne pondérée	100%	3,3

Les efficacités de conversion des protéines végétales en protéines animales (NCE), variables dans le temps et dans l'espace en fonction des poids et des rations, seront calculées sur la base des protéines de la carcasse - partie faisant l'objet des importations parisiennes.

[1] On note toutefois que les parties consommées peuvent différer d'une culture à l'autre.

Le poids moyen des animaux produits a de manière générale augmenté dans le temps, mais des variations existent aussi en fonction des lieux de production. A la fin du XVIIIe siècle, les animaux les plus lourds provenaient de Normandie et atteignaient environ 450 kg. A l'autre extrême, la Bretagne, produisait des bêtes de moins de 200 kg[1] (Moriceau, 2005). Toutefois, dès le début du XIXe siècle, les écarts de poids entre lieux de provenance sont plus étroits et inclus entre environ 320 kg et 450 kg pour les gros bovins (Moreau de Jonnès, 1848). Cent ans plus tard, les relevés du marché aux bestiaux de la Villette mentionnent le poids moyen de 630 kg pour les gros bovins sans faire la différentiation par lieu de provenance (Statistique agricole annuelle, 1908). Aujourd'hui, le poids d'abattage dépasse 900 kg dans certaines contrées de France pour les gros bovins (Statistique agricole annuelle, 2008).

A l'exception du début de XIXe siècle pour lequel on connaît les spécificités régionales des poids des bovins d'importation, aux débuts des XXe et XXIe siècles les simulations sont faites pour les poids d'abattage de 630 et 800 kg respectivement pour toutes les provenances[2].

Le tableau 4.9 récapitule les poids, les GMQ et le tonnage des importations parisiennes par lieu de provenance aux débuts des trois derniers siècles. Pour la viande d'origine indigène, le tonnage des importations est indiqué par région administrative actuelle et pour les importations depuis l'étranger par pays d'origine. On rappelle qu'au XXIe siècle, les provenances sont déduites proportionnellement, des quotas régionaux de production et du tonnage des importations nationales depuis l'étranger (voir chapitre 3).

A partir des GMQ et des poids d'abattage du tableau 4.9, les besoins quotidiens en énergie et en protéines pour l'entretien et la croissance (donc à l'exception du travail) des bovins approvisionnant Paris sont simulés à l'aide du logiciel de formulation et cumulés sur les durées de vie respectives des animaux.

---

[1] Elle contribuait encore à peine à l'approvisionnement parisien.

[2] Chiffres à ne pas confondre avec le poids moyen de 500 kg vif (~ 285 kg de carcasse) dont on s'est servi au chapitre 3 dans le calcul comparatif de la productivité des cheptels entre les XIXe et XXIe siècles.

Tableau 4.9 : Poids vifs d'abattage, gain moyen quotidien (GMQ) et provenances des importations parisiennes de viande bovine aux débuts des XIXe, XXe et XXIe siècles. Compilation des plusieurs sources : Cette étude (cf. chapitre 3), Statistique agricole annuelle, 1906, 2008, Moreau de Jonnès, 1848, Moriceau, 2005, FAOSTAT, 2004.

	Début XIXe		Début XXe	Début XXIe
GMQ (kg/jour)	0,5		0,9	1,1
Poids d'abattage	Variable, 380 kg en moyenne		636	800
Lieux de provenance	Nbre de bovins	Poids d'abattage	Nbre de bovins	Nbre de bovins
Régions françaises				
Alsace	-	-	-	2 131
Aquitaine	-	-	8 367	11 839
Auvergne	4 245	333	12 096	23 506
Bourgogne	6 715	341	16 727	17 956
Bretagne	0	0	6 700	29 355
Centre	10 408	318	17 383	8 629
Champagne-Ardenne	0	0	9 482	7 904
Franche-Comté	0	0	7 140	8 454
Ile-de-France	18 742	364	44 584	432
Languedoc-Roussillon	0	0	0	3 175
Limousin	16 978	348	29 319	16 355
Lorraine	0	0	0	12 345
Midi-Pyrénées	0	0	0	19 596
Nord-Pas-de-Calais	0	0	0	9 515
Normandie-Basse	32 321	455	144 885	20 988
Normandie-Haute	16 886	455	37 777	7 836
Pays-de-la-Loire	32 334	333	61 024	34 626
Picardie	0	0	9 914	7 304
Poitou-Charentes	13 604	333	23 058	10 810
Provence Alpes Cote d'Azur	0	0	0	813
Rhône-Alpes	0	0	0	14 375
Totaux et moyennes du continent français	152232	375	428 457	267 946
% des importations d'origine française	96 %		98 %	100 %
Pays étrangers				
Pays-Bas	-	-	-	15 849
Allemagne	-	-	-	14 891
Espagne	-	-	-	9 665
Italie	-	-	-	6 406
Irlande	-	-	-	5 152
Belgique	-	-	-	4 506
Autriche	-	-	-	2 500
Autres	-	-	-	3 334
Total étranger	-	-	-	62 304
Total général			**428 457**	**330 454**

4.4 Disponibilité fourragère et reconstitution des rations, XIXe-XXIe siècles

4.4.1. Généralités

La composition d'une ration représente un état d'équilibre en termes nutritifs entre les besoins de l'animal et l'apport des aliments susceptibles de concourir à son alimentation. Le choix des aliments est lié à la disponibilité fourragère d'une région d'élevage, disponibilité qui se constitue en fonction de la production locale et des importations éventuelles depuis d'autres régions ou pays. Jusqu'au milieu du XXe siècle la disponibilité fourragère des régions d'élevage correspond pratiquement à la production locale. Les difficultés de transport et la faible productivité des systèmes agraires font alors du commerce fourrager un élément marginal et de portée limitée (Mazoyer et Roudart, 2002). Dans ces conditions, l'élevage est contraint par la production fourragère locale. Les exploitations doivent se garantir l'autosuffisance vis-à-vis des besoins en énergie et en protéines de leurs cheptels. Par conséquent, les disponibilités régionales et donc les fourrages présents dans les rations peuvent être directement déduits des données sur la production du territoire, disponibles dans les statistiques agricoles. En revanche, à partir de la deuxième moitié du XXe siècle, la contrainte de l'autonomie fourragère disparaît progressivement. Les régions d'élevage peuvent subvenir aux besoins d'énergie et de protéines des cheptels par des fourrages d'importation. La reconstitution des rations doit donc se faire en tenant compte des matières fourragères mises en jeu au niveau mondial. Sans s'intéresser à ce stade aux provenances des fourrages, on fera le calcul des rations sur la base de la disponibilité fourragère déduite à la fois des données de production des régions et des données sur les matières premières mises à disposition par les industries agroalimentaires.

Déterminer la composition des rations des animaux approvisionnant la capitale permet d'associer à la consommation parisienne son équivalent en matières premières et de mesurer l'efficacité de conversion de la biomasse végétale en biomasse animale. L'efficacité de conversion peut être exprimée en termes de tonnage, de protéines et d'énergie, c'est-à-dire en comparant respectivement le tonnage, les protéines et l'énergie des rations au tonnage, aux protéines et à l'énergie des produits d'approvisionnement parisien. Le contenu énergétique de la viande et du lait étant de

l'énergie brute, il doit être confronté à l'énergie brute des fourrages. Le rapport des tonnages, appelé FCR (abréviation anglaise signifiant « Feed Conversion Ratio »), montre combien d'unités fourragères sont nécessaires par unité de production animale. Pour l'énergie et les protéines, les efficacités de conversion sont respectivement appelées ECE et NCE (abréviations anglaises, signifiant respectivement « Energy Conversion Efficiency » et « Nitrogen Conversion Efficiency » retenues par souci de compatibilité avec la littérature internationale) et montrent respectivement les fractions de l'énergie et des protéines de l'alimentation animale faisant l'objet des importations parisiennes sous forme de viande et de lait. Contrairement au FCR, les NCE et ECE sont exprimées en pourcentage.

Ce qui suit est organisé ainsi : on présente dans la section suivante l'évolution de la disponibilité fourragère à destination respectivement des bovins et des porcs d'approvisionnement parisien. Ensuite, la section 4.4.3 contient les résultats des simulations de rations animales aux XIXe, XXe et XXIe siècles.

4.4.2 Evolution de la disponibilité fourragère, XIXe – XXIe siècles

L'azote (N), constituant 16 % des protéines, est un élément chimique indispensable à la production de la biomasse et le nutriment limitant principal des agro-systèmes en climats tempérés. Avant le développement du commerce de fourrages et de l'industrie de fabrication des engrais azotés de synthèse, la présence d'azote dans les agro-systèmes - et donc la fabrication des protéines - étaient régies par des processus biologiques locaux. C'est au moyen des bactéries vivant dans le système racinaire de certaines plantes (plantes légumineuses) et en symbiose avec elles, que l'azote atmosphérique était transformé de sa forme moléculaire de bi-azote – non assimilable par les plantes – en azote biologiquement réactif, disponible dans le circuit de synthèse des protéines végétales (Galloway, 1998). Ce processus symbiotique, appelé fixation biologique d'azote (BNF[1]) est assuré énergétiquement par la photosynthèse des plantes hôtes et constitue la seule pratiquement source d'azote dans les systèmes agraires préindustriels. L'apport de BNF a cru au cours du XIXe siècle en France sous la maîtrise humaine de la culture des légumineuses. En effet, depuis le XVIIe siècle, la

[1] Abréviation anglaise du Biological Nitrogen Fixation

culture des légumineuses se substitue progressivement à la jachère traditionnelle dont le rôle était la mise en repos des terres afin d'en permettre l'enrichissement en azote au moyen des dépôts atmosphériques sous formes d'oxydes et de la BNF des légumineuses à croissance spontanée. L'extension de la culture des légumineuses était le levier principal d'intensification de la productivité agricole jusqu'aux années 1950, date de début de la généralisation du procédé Haber-Bosch de synthèse artificielle de l'azote atmosphérique sous forme d'engrais minéral[1].

D'un point de vue alimentaire, les légumineuses peuvent être distinguées en deux catégories : les légumineuses fourragères – principalement destinées à l'alimentation animale - et les légumineuses cultivées pour leurs graines, aussi appelé protéagineux – principalement destinées à l'alimentation humaine. Parmi les légumineuses fourragères on compte en France la luzerne, les trèfles et le sainfoin et parmi les protéagineux les lentilles, les pois secs, les fèves et pois chiches (Pointereau, 2001). Ce sont les légumineuses fourragères qui ont un rôle structurel dans les systèmes agraires préindustriels. On les trouve à la fois dans les pâturages et les prairies naturelles à un taux d'environ 20 % et cultivées en pur dans les prairies dites "artificielles". Brouté surtout par les herbivores, l'azote des prairies parvient à l'alimentation humaine d'un côté sous forme de viande, de lait et de produits dérivés et de l'autre sous forme de graines des céréales, de racines et d'autres produits des cultures non-fixatrices d'azote produites à l'appui de la fumure[2]. L'association des légumineuses et des animaux d'élevage est donc emblématique de l'accroissement de productivité des systèmes agraires préindustriels.

Première moitié du XIXe siècle

La première révolution agricole démarre en France vers la fin du XVIIIe siècle suite aux débuts de la culture des légumineuses fourragères (Pointereau, 2001).

La superficie cultivée en prairies artificielles couvrait environ 1,6 millions d'hectares vers 1840 (Moreau de Jonnès, 1848), 3,3 millions d'hectares en 1906 (Statistique

[1] Le fumier est un porteur d'azote mais pas une source nette.

[2] Y compris sous forme d'animaux granivores, nourris par ces cultures.

Agricole Annuelle, 1908) et a culminé autour de 4 millions d'hectares dans les années 1950 (Pointereau, 2001), marquant ainsi plus d'un doublement en un siècle. Cette catégorie culturale a par la suite progressivement régressé en surface pour ne compter que 0,37 million d'hectares en 2007, soit une diminution d'un facteur dix en 50 ans. Exprimée en pourcentage de la surface agricole utilisée (SAU), les prairies artificielles représentent environ 4 % en 1840, 8 % en 1906, 11 % en 1958 et 1 % en 2007. La phase ascendante de cette évolution témoigne de l'importance des légumineuses dans la fabrication des protéines à l'ère de l'agriculture préindustrielle, tandis que leur déclin depuis la fin des années 1950 est synonyme de la généralisation des engrais de synthèse et de l'utilisation des protéines d'importation. Sur cette période de 200 ans et en fonction de ces paramètres la composition des rations animales a fortement évolué. Les légumineuses, de contribution croissante dans les rations bovines comme porcines depuis le début du XIXe siècle, cèdent progressivement la place à partir de la deuxième moitié du XXe siècle à des fourrages nouveaux, produits localement ou importés d'autres régions ou pays.

Dans la première moitié du XIXe siècle et pour la France entière, la superficie herbagère dont bénéficie l'élevage couvre un ensemble d'environ 22 millions d'hectares. Elle se compose des prairies naturelles, des prairies artificielles, des jachères et des pâtures et pâtis. Il s'agit d'une classification qui tient aux différences du mode d'exploitation et de productivité des terrains (Moreau de Jonnès, 1848, Block, 1851). Fauchées et ramassées annuellement, les prairies naturelles et les prairies artificielles sont de loin les herbages les plus productifs et la richesse qu'elles produisent le dispute à celle des plus belles céréales (Moreau de Jonnès, 1848). A contrario, les pâtures-pâtis comme les jachères sont laissées au parcours des animaux et malgré leur immensité en termes d'étendue fournissent une richesse marginale aux exploitants. La figure 4.3 montre le rapport de superficie et de production entre les quatre catégories herbagères durant la première moitié du XIXe siècle[1] (Moreau de Jonnès, 1848).

[1] Ce rapport était établi en termes monétaires par les économistes au XIXe siècle, à défaut de mesure du tonnage de production pour les jachères et les pâtis-pâtures.

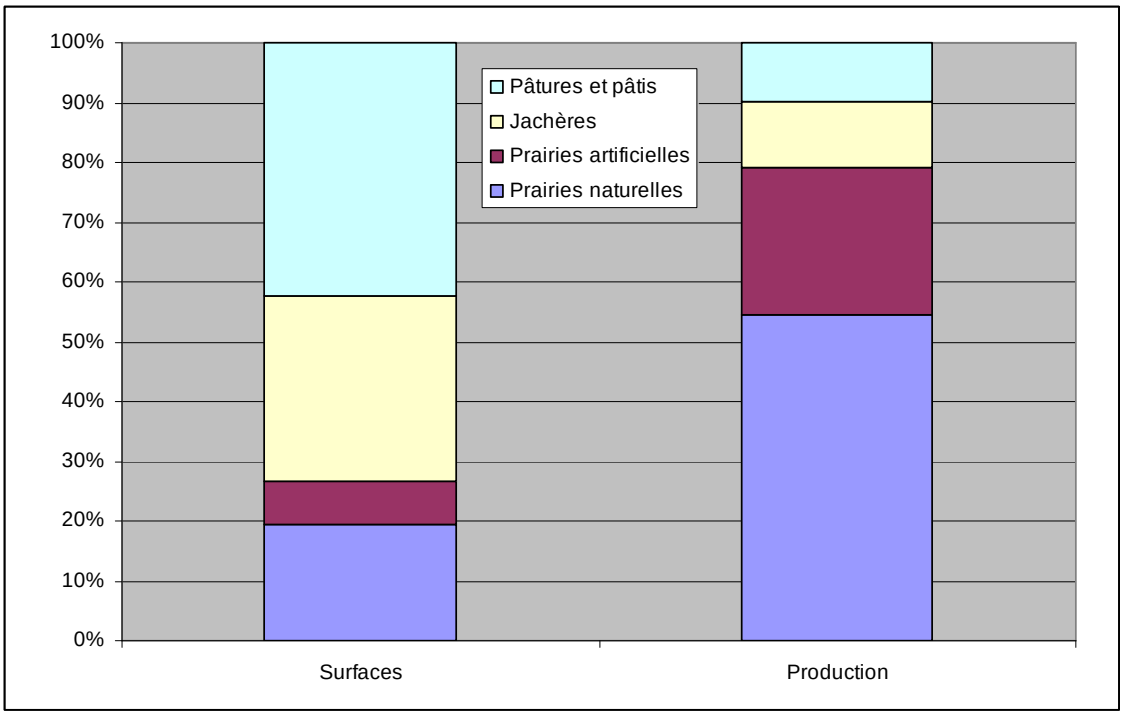


Figure 4.3 : Rapport des surfaces et de la production totale entre les quatre types d'herbages au soutien de l'élevage dans la première moitié du XIXe siècle. Source : Moreau de Jonnès, 1848.

Les pâtures-pâtis et les jachères occupent ensemble près de 75 % de la superficie des herbages du pays et contribuent seulement à 20 % de sa production. L'apport d'azote pour l'ensemble du système de production alimentaire de la France repose pratiquement sur les quelques six millions d'hectares qu'occupent les prairies artificielles et naturelles.

Cette comparaison est éloquente à la fois de l'état de l'agriculture dans la première moitié du XIXe siècle et de son potentiel de développement car la grande étendue des pâtis en fait une immense ressource en état de sous-exploitation avec en revanche un énorme potentiel pour l'élevage. Comme il est commenté par Moreau de Jonnès (1848, p. 327) à propos des pâtures : « Tant que cette catégorie de terrains reste à l'état sauvage, elle est une honte pour le pays et une affliction pour l'agriculture ».

Compte tenu du rapport de production entre les prairies artificielles et l'ensemble des herbages et en admettant que les prairies naturelles comprennent 15 % de

légumineuses, on estime la part des légumineuses dans la production fourragère française à environ 20 % en moyenne. Quant à leur répartition dans le territoire, les prairies artificielles se développent en principe à proximité des centres urbains, milieux de forte demande alimentaire et entourés d'une population agricole active qui en assure la satisfaction. En effet, en raison de leurs qualités agronomiques et parce qu'elles sont labourées, les prairies artificielles fournissent un meilleur rendement à l'hectare que les autres fourrages, de même qu'elles permettent d'améliorer la fertilité des sols. Elles sont donc avantageuses et se développent plus rapidement à proximité des grands centres de consommation. En revanche, des régions plus rurales mais actives en élevage abritent surtout des prairies naturelles. C'est par exemple le cas de la Normandie et du Pays-de-la-Loire (Moreau de Jonnès, 1848), régions assurant annuellement 30 % et 20 % respectivement de l'approvisionnement parisien en viande bovine au cours de la première moitié du XIXe siècle.

C'est en raison du processus d'urbanisation qu'au XIXe siècle les prairies artificielles des départements administratifs de l'Ile-de-France figurent parmi les plus productives de la France (Moreau de Jonnès, 1848). Elles se doivent d'être à la hauteur des besoins totaux en lait et d'une partie des besoins en bovins, en porcs, en céréales et en menus denrées des Parisiens. Générées dans les prairies, les protéines végétales se transforment en lait, en viande et en fumier et finissent par alimenter les élevages de porcs grâce à la symbiose nourricière existant entre les porcheries, les laiteries et les amidonneries parisiennes. Ces rapports et autre encore sont caractéristiques des élevages porcins préindustriels (Kiple and Ornelas, 2000, Steinfeld et al., 2006).

Dispositifs de trituration des graines de céréales, les amidonneries fournissent de la farine à la ville et du son aux porcs, ce dernier étant un coproduit du processus de transformation, riche en protéines. Par ailleurs, la proximité physique entre les élevages porcins et laitiers favorise le recyclage des petits laits et des laits tournés dans l'alimentation des porcs (Lefour, 1840). En effet, au même titre que la fabrication du fromage, l'élevage porcin est un moyen de valorisation des laits excédentaires ou des petits laits des exploitations. Les laiteries en gros s'adjoignent des élevages de porcs et des ateliers produisant des salaisons, au point que l'importance des porcheries était liée à la quantité des laits traités. Bien-sûr, les porcs

étaient vendus avec profit et leur élevage représentait une deuxième source de revenu pour les propriétaires des laiteries.

Son et lait forment ensemble une source puissante de protéines pour les porcs, protéines originaire des légumineuses des prairies. Les animaux reçoivent par ailleurs d'autres matières selon les circonstances dans lesquelles se trouvent les producteurs. Par exemple les laits sont souvent épaissis avec de l'orge concassée, recette d'engraissement permettant d'atteindre promptement des grands poids d'abattage (Bixio, 1837). Alternativement, des pommes de terre sont couramment utilisées comme source d'énergie. A contrario, et en dépit des expériences positives fournies par les éleveurs anglais les légumineuses, l'herbe et les plantes vertes comme le chou etc. n'apparaissent pas au XIXe siècle en France dans les rations porcines typiques (Bixio, 1837). Il s'agit d'aliments qui seront adoptés à partir de la deuxième moitié du XIXe siècle.

En sus de leur contribution aux rations porcines, les graines de céréales, et en particulier l'orge, sont mentionnées concourir aux rations des vaches laitières et des bovins en engraissement. De manière générale, la production des céréales au XIXe siècle se partage ainsi : le blé, le méteil et le seigle (céréales panifiables) sont principalement destinées à nourrir les hommes, l'avoine est à la base de l'alimentation des chevaux et l'orge se partage entre les bovins et les porcs. Ramené au nombre des existences bovines et porcines, on estime que la production annuelle d'orge correspond à une disponibilité moyenne d'environ 70 kg/tête/an au milieu du XIXe siècle (Block, 1851, 1858), disponibilité par ailleurs variable d'une région à l'autre. En outre, le niveau de consommation dépend surtout de l'espèce animale. Dans les rations des porcs, animaux granivores, l'orge occupe une place plus importante que dans celles des bovins, chez qui les graines ne constituent qu'un complément nutritionnel destiné à stimuler la production. Par ailleurs, tous les bovins n'en consomment pas en quantité identique. La consommation est proportionnelle à l'importance que l'on accorde aux fonctions productives de l'animal. De ce point de vue, les vaches laitières sont prioritaires. Elles sont à la fois à l'origine d'une denrée considérée comme prioritaire dans l'alimentation humaine et moins faciles à nourrir au

pâturage que les autres bovins pendant la phase de lactation. Leur alimentation se doit d'être à la hauteur des produits qu'elles fournissent.

Suivant ces considérations, les ingrédients typiques des rations relatives à la production de la viande bovine, porcine et du lait au XIXe siècle sont rassemblés dans le tableau 10. Il s'agit du foin, des légumineuses et de l'orge pour les bovins et du lait, de l'orge, du son de blé et des pommes de terre pour les porcs. Le tableau 4.10 en montre la teneur en matière sèche (MS, % du poids d'aliment), en énergie brute (EB, kcal/tonne de MS) et en protéines (CP, % de MS) ; paramètres nécessaires au calcul des efficacités de conversion de la biomasse végétale en biomasse animale. Pour les aliments des porcs, on montre également les valeurs d'énergie métabolisable (EM, kcal/tonne de MS) dont on s'est servi dans la formulation des rations. On rappelle que l'EM n'est pas une mesure absolue de la valeur énergétique des aliments car elle dépend de l'espèce animale. Les valeurs du tableau 4.10 sont alors spécifiques à l'efficacité de digestion des porcs. Pour une description détaillée des caractéristiques nutritives des aliments du tableau 4.10 le lecteur peut se reporter à l'annexe III.

Tableau 4.10 : Teneurs typiques en matière sèche (MS), en énergie brute (EB), en énergie métabolisable (EM, spécifiques aux porcs) et en protéines (CP) du foin, des légumineuses, de l'orge, du lait, du son de blé et des pommes de terre, aliments des rations bovines et porcines, au cours de la première moitié du XIXe siècle. Source : NRC, 1998, ITAB, 2001, NRC, 2000, 2001, Gerbens-Leenes et Nonhebel, 2004. Voir dans le texte pour plus de détails.

	MS (%)	EB (kcal/kg MS)	EM (kcal/kg MS)	CP (% de MS)
Foin	90 %	4110	-	16 %
Légumineuses	90 %	4000	-	25 %
Orge	85 %	4325	3270	12 %
Lait bovin	12%	5653	3870	26 %
Son de blé	89%	4366	2275	16 %
Pommes de Terre	24%	4284	3497	9 %

Second XIXe siècle et premier XXe siècle

Le développement de l'agriculture française au cours du XIXe siècle a essentiellement consisté à mieux valoriser les pâtis-pâtures au moyen, soit de l'accroissement de leur

productivité, c'est-à-dire de l'élévation de leur rendement en tant que prairies naturelles, ou de leur conversion en cultures fourragères, c'est-à-dire en terres arables réservées à l'élevage. Dans les deux cas, il s'agit d'une forte amélioration de la productivité des terrains qui s'accomplit au moyen d'une meilleure gestion vis-à-vis de la temporalité d'ouverture au pâturage, des apports en éléments nutritifs à l'aide des plantes légumineuses, des apports éventuels d'eau d'irrigation et de l'apport de travail, c'est-à-dire d'énergie (Moreau de Jonnès, 1848). Ces investissements vont de pair avec la mutation de la finalité de l'élevage au cours du XIXe siècle, qui passe de simple moyen de production de fumier, à moyen de production alimentaire (Duby et Wallon, 1976). Il s'agit d'un changement de perception engendrant la transformation profonde du paysage fourrager et avec elle un tournant majeur dans l'histoire de l'agriculture française. La figure 4.4 montre pour le milieu du XIXe siècle et pour le début du XXe siècle, l'étendue totale des surfaces fourragères et le partage entre prairies naturelles, prairies artificielles, fourrages annuels et pâture-pâtis. Elle est suivie de la figure 4.5 qui montre le rapport des tonnages produits.

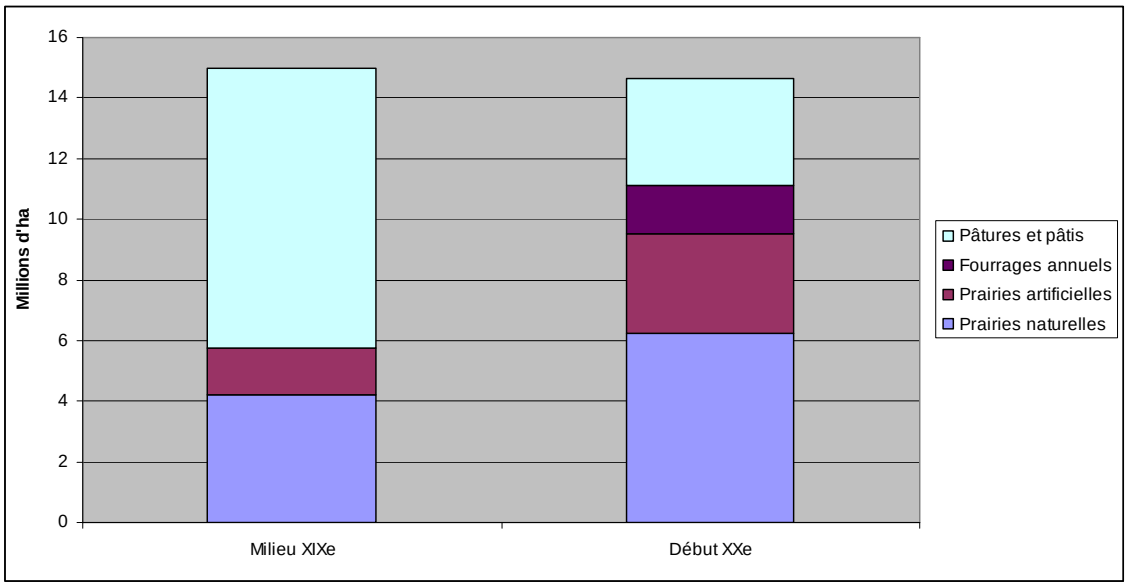


Figure 4.4 : Superficies des prairies naturelles, prairies artificielles, fourrages annuels et pâture-pâtis au milieu du XIXe et au début du XXe siècle. Millions d'hectares. Sources : Moreau de Jonnès, 1848, Statistique agricole Annuelle, 1908.

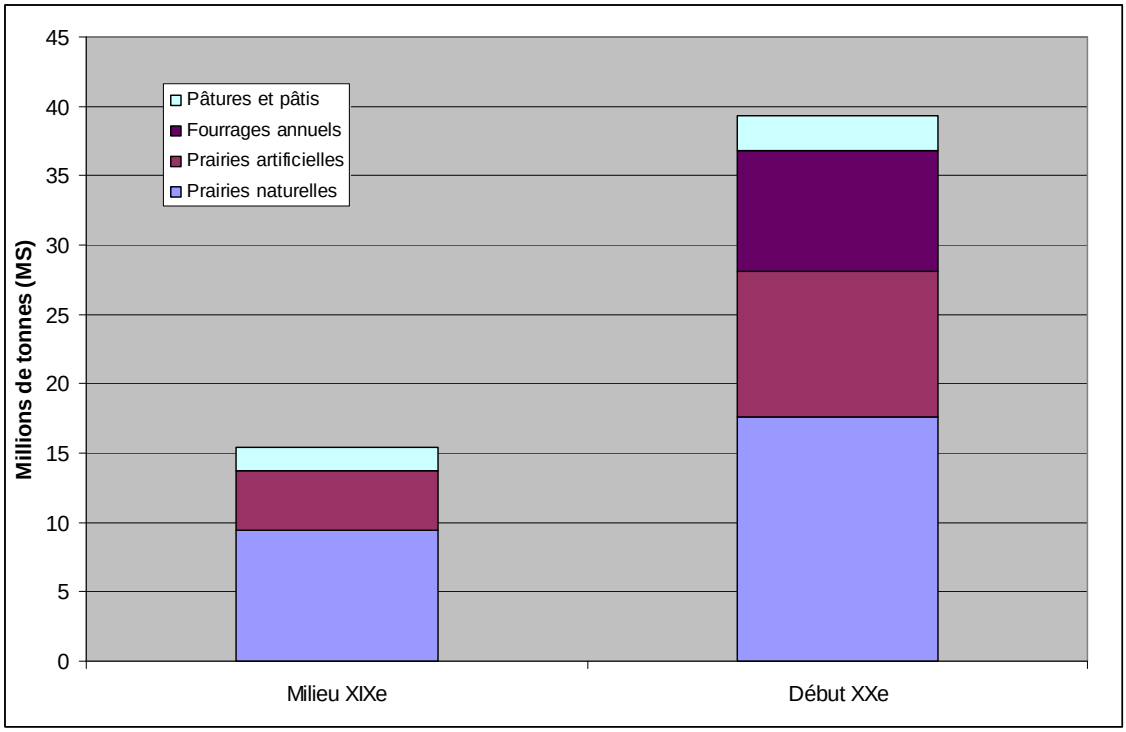


Figure 4.5 : Production (MS) des prairies naturelles, prairies artificielles, fourrages annuels et pâture-pâtis au milieu du XIXe et au début du XXe siècle. Millions des tonnes. Sources : Moreau de Jonnès, 1848, Statistique agricole Annuelle, 1908.

Plusieurs constats peuvent être tirés de ces deux graphiques. Tout d'abord, on constate que la somme des superficies est demeurée pratiquement inchangée (diminution d'environ 2 % entre les deux dates), ce qui témoigne de la quasi inexistence de mutations de l'usage des terres entre l'élevage et d'autres productions. Aucune catégorie culturale n'a réclamé de terres à l'élevage ; au contraire, ce dernier a contribué par son développement à élever la productivité des quelques 5,7 millions d'hectares de pâtures-pâtis d'un facteur deux en un demi-siècle. Du point de vue de la fixation d'azote, on estime que les légumineuses, y compris des prairies artificielles et naturelles, ont gagné plus de 2 millions d'hectares, extension qui permet le progrès des deux autres grandes cultures de l'époque, à savoir des céréales et des vignes. Même si le lien de causalité est indirect, les vignes ont triplé en superficie, atteignant au début du XXe siècle près de 7 millions d'hectares, croissance d'ampleur équivalente au retrait de la jachère grâce à la culture des légumineuses. Quant aux céréales, la production a augmenté de 25 % sur la même période bien que la superficie cultivée ait reculé de 7 % (Mounier, 1848, Moreau de Jonnès, 1848, Statistique Agricole Annuelle, 1908), croissance attribuable à la fertilisation organique.

En dehors des prairies, on compte au début du XXe siècle les fourrages annuels, nouvelle catégorie fourragère à fort rendement agricole. Les fourrages annuels se composent principalement des betteraves fourragères et des fourrages verts y compris du maïs, plantes non-fixatrices d'azote et caractérisées par un taux protéique inférieur à celui de l'herbe et des légumineuses (Ministère de l'agriculture, 1936). Leur faible contribution en protéines dans les rations doit être rattrapée par d'autres sources. On en a identifié trois.

Premièrement, l'augmentation de la production des légumineuses permet de manière générale, d'en augmenter l'utilisation dans les rations par rapport au XIXe siècle. En effet, l'expansion de la culture et l'amélioration des rendements ont conduit au triplement de la production des légumineuses en culture pure. Cependant ce progrès ne se déploie pas uniformément dans le territoire. Selon les régions, la culture des légumineuses était au début du XXe siècle peu ou beaucoup plus développée qu'au début du XIXe siècle, remarque valable pour tous les fourrages issus des terres arables. Les écarts régionaux sont larges. A titre d'exemple, dans la Franche-Comté et le Limousin, les surfaces fourragères labourées représentent environ 15 % des surfaces fourragères principales, contre par exemple 80 % en Ile-de-France et 60 % en Picardie (Statistique agricole annuelle, 1906). Ainsi, suivant les spécialisations régionales, les sources alimentaires des animaux tendent à se rapprochent ou à s'éloigner de la composition de référence, à savoir d'une alimentation étant pour sa majorité écrasante composée d'herbe. Plus on s'éloigne de cette composition et plus les aliments riches en protéines, comme les légumineuses, sont nécessaires pour équilibrer le faible apport d'autres fourrages.

Une deuxième source des protéines a pu être les céréales. En effet, à part l'orge dont la disponibilité moyenne par tête de porc et de bovin est d'environ 50 kg/an au début du XXe siècle, les données statistiques suggèrent que le blé a pu s'introduire dans les rations animales. C'est une hypothèse que l'on fonde sur l'augmentation de la disponibilité de blé en France au cours du XIXe siècle. En effet, pour une augmentation de 30 % de la population française entre 1820 et 1900, la production nationale de blé a doublé, donnant lieu en un supplément de production qui a pu se

partager entre l'alimentation humaine et animale (Ministère de l'Agriculture, 1878, Statistique agricole annuelle, 1906).

Troisièmement, à partir de la fin de XIXe siècle, de nouvelles matières végétales, particulièrement riches en protéines, voient le jour dans le territoire français. Il s'agit des tourteaux, résidus de pressage des graines oléagineuses et protéagineuses (Heuzé, 1893). Au début du XXe siècle, ils dérivent principalement des graines de colza et de lin dont les huiles trouvent usage dans la fabrication des savons et des peintures (Heuzé, 1893). Le contenu protéique des graines fait dans sa totalité partie des résidus et en fait des matières particulièrement riches en azote, valorisables en agriculture comme fertilisants et comme aliments d'élevage. C'est cette deuxième utilisation qui gagne progressivement de l'importance pour faire des tourteaux la source principale des protéines dans la deuxième moitié du XXe, surtout pour les élevages laitier et porcin (voir plus loin). Pourtant, bien qu'en cours de développement, la production des graines oléagineuses est très faible en France au début du XXe siècle, de même qu'elle est géographiquement concentrée dans une poignée de régions. Par conséquent, l'utilisation des tourteaux dans l'alimentation animale est à l'époque une spécificité régionale et d'importance marginale. Par exemple, en 1906, la Normandie rassemble prés de 50 % de la production nationale des graines de colza et 25 % de celle de lin (Statistique agricole annuelle, 1906), mais la production nationale ne représente à cette date que 1 % du tonnage produit en 2004 (Statistique agricole annuelle, 2004). D'autres régions d'approvisionnement parisien comme le Centre, la Picardie et la Bourgogne en ont une production relativement significative et susceptible de concourir aux besoins des animaux les plus exigeants en protéines, à savoir les vaches laitières et les porcs.

En ce qui concerne les porcs et comme ceci a été évoqué dans le chapitre 3, l'évolution de la géographie d'approvisionnement parisien et le développement progressif du marché national des produits laitiers au cours du XIXe siècle sont deux facteurs ayant contribué à supprimer le lait comme source des protéines des rations. Au début du XXe siècle, et contrairement à la première moitié du siècle précédent, les aires d'approvisionnement en porc et en lait ne sont plus superposées. Paris réclame ses porcs au delà de sa ceinture laitière, favorisant ainsi la spécialisation des

productions en deux branches indépendantes. En parallèle, la consommation humaine de lait sous forme des produits dérivés, à savoir des laits caillés, du fromage blanc, des fromages plus ou moins secs, de la crème et du beurre, double entre le début des XIXe et XXe siècles (Flandrin et Montanari, 1996), doublement représentant un enjeux économique pour les producteurs laitiers et incitant à l'abandon de l'élevage comme placement du lait. Enfin, la dissociation des deux productions a pu également s'imposer au nom de l'hygiène suite au développement des connaissances bactériologiques initiées par Pasteur dans les années 1860. Mais dans tous les cas, utiliser du lait pour produire de la viande n'est pas, d'un point de vue biochimique, une symbiose pérenne : elle conduit à réduire l'efficacité de la production car la viande obtenue est le produit de deux conversions de biomasse de rendement inférieur à l'unité. Cependant, le lait ne constitue pas le seul moyen pour que les porcs accèdent aux protéines des prairies. Ils peuvent se les procurer directement (Caroll, 1936, ATTRA, 2004). En effet, l'herbe et les légumineuses fourragères peuvent très bien remplacer une part des céréales des rations porcines[1]. On note toutefois que les porcs, en tant qu'animaux non ruminants, sont caractérisés par une capacité limitée de digestion d'aliments fibreux. L'utilisation de tels aliments à des taux élevés est réputé ralentir la digestion et réduire le rythme de croissance (Hansen et al., 2006). Afin de bien mener la simulation des rations porcine et bien que le rythme de croissance au début du XXe siècle était inférieur à celui d'aujourd'hui, on a pris en compte les recommandations actuelles vis-à-vis de la part acceptable d'aliments fibreux dans la MS de la ration comme l'herbe et les légumineuses pour le bon fonctionnement du pense. On en a limité la part acceptable à 25 % de la MS des rations.

A côté de ces sources, des légumes secs comme les pois secs, les fèves et féveroles sont également susceptibles de concourir à l'élevage porcin. Parmi les régions d'approvisionnement parisien, celles qui disposent le plus de cultures protéagineuses sont le Pays-de-la-Loire, le Poitou-Charentes, l'Auvergne et l'Aquitaine. Enfin, les statistiques agricoles du début de XXe siècle font mention des cultures fourragères

[1] A noter que cette pratique revient aujourd'hui dans le cahier de charge de l'agriculture biologique

comme les choux et les rutabagas, aliments utilisés en Angleterre dès le début du XIXe siècle (Bixio, 1837).

Suivant ces considérations, les valeurs nutritives des ingrédients des rations relatives à la production de la viande bovine, porcine et du lait au XXe siècle sont présentées dans le tableau 4.11. Comme précédemment, les valeurs d'énergie métabolisable (EM, kcal/tonne de MS) concernent exclusivement les aliments des porcs. Pour les bovins dont les rations sont simulées en termes d'énergie nette, les valeurs énergétiques des aliments sont données à l'annexe III.

Tableau 4.11 : Valeurs typiques de teneur en MS, en énergie brute (EB), en énergie métabolisable (EM – spécifiques aux porcs) et en protéines (CP) des matières fourragères utilisées dans l'alimentation des bovins et des porcs approvisionnant Paris au début du XXe siècle. Sources : NRC, 1998, 2000, ITAB, 2001, Gerbens-Leenes et Nonhebel, 2004.

	MS (%)	EB (kcal/ton MS)	EM (kcal/ton MS	CP (% de MS)
Betteraves four.	30 %	4000	-	10 %
Maïs four.	85 %	4200	-	9 %
Foin	90 %	4110	2067	16 %
Légumineuses four.	90 %	4000	1793	22 %
Orge	85 %	4325	3270	12 %
Blé	85 %	4377	3691	13 %
Tourteau de lin	90 %	2633	-	30 %
Tourteau de colza	90 %	4687	2933	37 %
Chou fourrager	14 %	4300	3074	15 %
Pois secs	86 %	4480	3550	25 %
Fèveroles	86 %	3698	3494	31 %
Navet	11 %	4300	3115	12 %

Jusqu'au milieu du XXe siècle, les légumineuses fourragères et l'herbe sont les sources principales des protéines pour l'élevage français et - plus généralement - d'azote pour l'agriculture. Avec les pois secs et les féveroles qui sont également des légumineuses mais dont les superficies cultivées sont nettement moins étendues – à peine 10 % des légumineuses fourragères au début du XXe siècle (Statistique Agricole Annuelle, 1908) - elles sont seules parmi les plantes du tableau 4.11 à avoir une croissance autonome du point de vue de l'azote. La production des céréales, des oléagineux et des autres fourrages annuels demande aux agriculteurs de compenser l'azote enlevé au sol avec chaque récolte. C'est ainsi qu'à partir des années 1950, la multiplication des apports azotés d'origine industrielle a permis la progression des

rendements culturaux et l'utilisation des matières concernées comme aliments de base dans les rations animales : il s'agit principalement des fourrages annuels pour les bovins et des graines de céréales pour les porcs.

Second XXe et premier XXIe siècle

Parmi les fourrages annuels, l'importance du maïs fourrager croît continuellement depuis le début du XXe siècle. Sa culture se substitue progressivement à celle des autres fourrages annuels et ses rendements croissent d'un facteur dix. En termes de production, il représente autour de 20 % de celle des fourrages annuels dans les années 1930, 44 % en 1964, 75 % en 1978 et 83 % en 2003, augmentation qui se fait au détriment des racines – en particulier des betteraves -, dont la superficie totale diminue d'un facteur vingt au cours de la même période (Ministère de l'agriculture, 1966, Annuaire de Statistique agricole,1979, Statistique agricole annuelle, 2004). En tout, le tonnage de production du maïs fourrager est multiplié d'un facteur vingt depuis le début du XXe siècle, augmentation beaucoup plus rapide que celle des prairies.

La figure 4.6 montre pour la France entière le rapport des tonnages entre les prairies artificielles, les prairies naturelles - temporaires et permanentes - et le maïs fourrager au milieu du XXe et au début du XXIe siècle, la comparaison étant toujours faite en termes de matière sèche (MS). Exprimé en pourcentage de la production totale de prairies, la production du maïs fourrager s'élève à 3 % au milieu du XXe siècle et à 25 % au début du XXIe siècle, une augmentation d'un ordre de grandeur qui concerne principalement l'alimentation des vaches laitières.

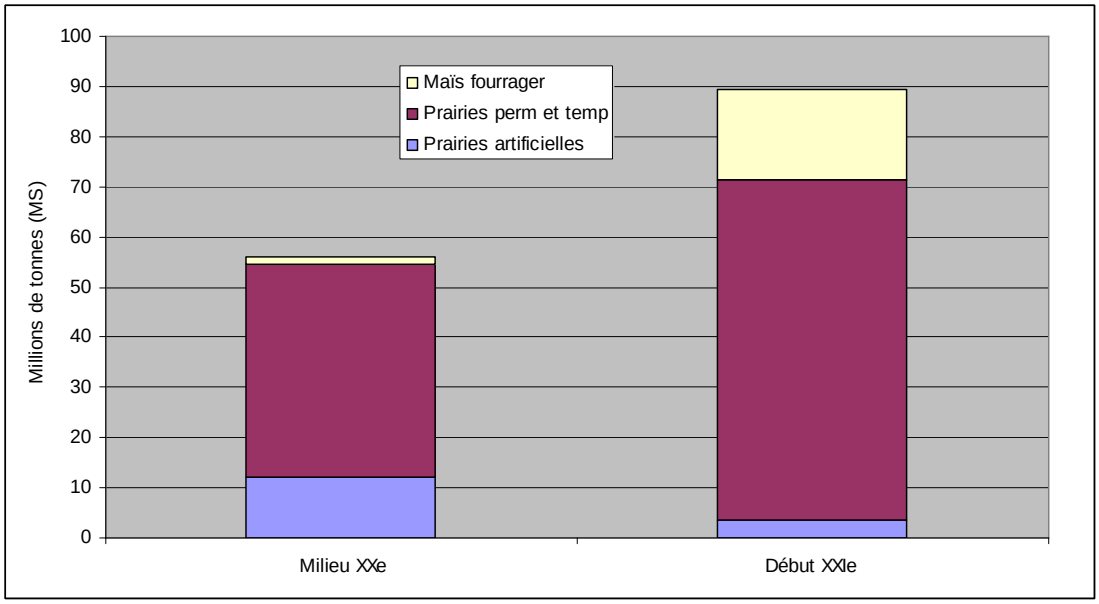


Figure 4.6 : Production des prairies artificielles, des prairies temporaires-permanentes et du mais fourrager au milieu du XXe et au début du XXIe siècle. Tonnes de matière sèche (MS). Source : Ministère de l'agriculture, 1966, Agreste, 2004

Les spécialisations régionales dans l'alimentation bovine peuvent être déduites des statistiques agricoles, car le maïs, l'herbe et les légumineuses – les trois aliments de base pour les bovins - sont produits à proximité des exploitations en vue d'une utilisation locale (Agreste, 2006). Ainsi, la présence des données de production dans les statistiques agricoles atteste de l'utilisation de ces matières dans les rations. Par exemple, pour l'année 2006, le coefficient de corrélation entre la répartition régionale du cheptel bovin (vaches laitières, allaitantes et bovins à viande tous confondus) et la répartition de la production de fourrages grossiers (maïs fourrage et total des prairies) est de 0.97, ce qui vaut preuve d'autosuffisance du secteur bovin en fourrages grossiers à l'échelle des régions (Statistique agricole annuelle, 2006). Par ailleurs, la production du maïs concerne principalement l'alimentation du cheptel laitier, pour des raisons liées à la fois aux besoins nutritifs des vaches et à la logistique de la production. Par exemple, à côté du fort apport énergétique du maïs et de son influence positive sur les rendements laitiers, la mécanisation agricole en a simplifié et accéléré la récolte par rapport au foin, ce qui en fait un aliment particulièrement avantageux pour les vaches laitières nourries en lot. Par opposition, les prairies résistent mieux dans les zones d'élevage à viande comme les régions du sud (Provence-Alpes-Côte-D'azur, en Languedoc-Roussillon, en Rhône-Alpes), le Midi-Pyrénées et le Limousin (Agreste, 2008b). Parmi les régions les plus spécialisées en maïs figurent la Bretagne,

le Nord-Pas-de-Calais, la Picardie et le Pays-de-la-Loire. Par ailleurs, la progression de la culture de maïs se poursuit dans les bassins laitiers au détriment des prairies à un rythme de quelques milliers d'hectares par an. Entre 2000 et 2007, les trois régions les plus concernées par la réduction sont l'Auvergne, la Bretagne et la Normandie (Agreste, 2008b). Compte tenu des différentes teneurs en protéines entre les légumineuses, l'herbe et le maïs, l'augmentation de la part de ce dernier dans les rations fait augmenter la dépendance de l'élevage vis-à-vis d'autres sources de protéines. Il s'agit principalement des tourteaux et des céréales et dans une moindre mesure de la pulpe de betteraves, résidus de l'extraction du sucre de betteraves sucrières, relativement riches en protéines. Ces matières sont mises au point par les industries agroalimentaires sous forme d'aliments composés (voir ci-après).

De manière analogue au maïs fourrage, la productivité des céréales demeure pratiquement stationnaire jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale et s'envole depuis. A partir de la fin des années 1950, les rendements ne cessent d'augmenter, tendance qui se poursuit jusqu'à la fin des années 1990, date depuis laquelle les rendements plafonnent (Agreste, 2008a). La figure 4.7, tirée de Agreste (2008b), montre l'évolution des rendements en grain des principales céréales cultivées en France depuis le début des années 1860. La révolution agricole dont témoigne la trajectoire des rendements a donné une nouvelle allure à l'élevage porcin. Les céréales, dont la production totale a plus que quadruplé en l'espace de cent ans, deviennent progressivement l'ingrédient principal des rations porcines, se substituant aux choux et aux autres racines fourragères dont la production en France se contracte (Statistique agricole annuelle, 1906, 2004, 2007). Cette évolution n'est pas une spécificité française mais un trait commun parmi les élevages porcins industrialisés (Naylor et al., 2005). De manière générale, les céréales constituent actuellement l'aliment par excellence des rations porcines et, leur apport en protéines, - plus faible qu'en énergie par rapport aux besoins des cochons - est typiquement équilibrée par l'utilisation des tourteaux, rôle jadis assuré notamment par les légumineuses fourragères et l'herbe des prairies.

Figure 4.7 : Rendements annuels en grain des principales céréales cultivées en France depuis le début des années 1860. Source : Agreste, 2008a.

Dans ce cadre d'uniformité alimentaire, les différences de composition des rations se réduisent au type des graines utilisées, qui peuvent varier d'un pays à l'autre en fonction des politiques agricoles en vigueur et des facteurs technico-économiques et agroenvironnementaux. Aux Etats-Unis par exemple, les rations se composent dans leur immense majorité des graines de maïs et du tourteau de soja, deux matières emblématiques de la production agricole américaine (FAOSTAT, 2008). En France, l'alimentation repose davantage sur un mélange de céréales et de tourteaux, mélange constitué principalement de blé, d'orge, de maïs et des tourteaux de colza et de soja (Agreste, 2008c).

L'augmentation de la production des céréales est au cœur de l'industrialisation du secteur porcin. Ces débuts remontent à la fin des années 1940 avec l'abandon progressif de la fabrication de l'alimentation porcine à la ferme au profit de l'utilisation d'aliments composés mis à disposition par les industries agroalimentaires. Il s'agit d'aliments fabriqués à partir des matières premières de haute valeur nutritive, d'origine majoritairement végétale et en provenance d'agro-systèmes locaux ou

forains, situé en France ou à l'étranger[1]. La production d'aliments composés concerne à la fois les élevages porcins, avicoles, bovins, ovin-caprins et des élevages d'importance secondaire comme celui des lapins. Toutefois les animaux granivores comme les volailles et les porcs en sont les consommateurs principaux.

La figure 4.8 montre l'évolution du tonnage total de la production d'aliments composés en France entre 1948 et 2006 et les volumes partiels à destination des secteurs avicole, porcin et bovin (Ministère de l'agriculture, 1966, Diry, 1979, Agreste, 2006). Ces trois secteurs rassemblent ensemble plus de 90 % du tonnage produit total.

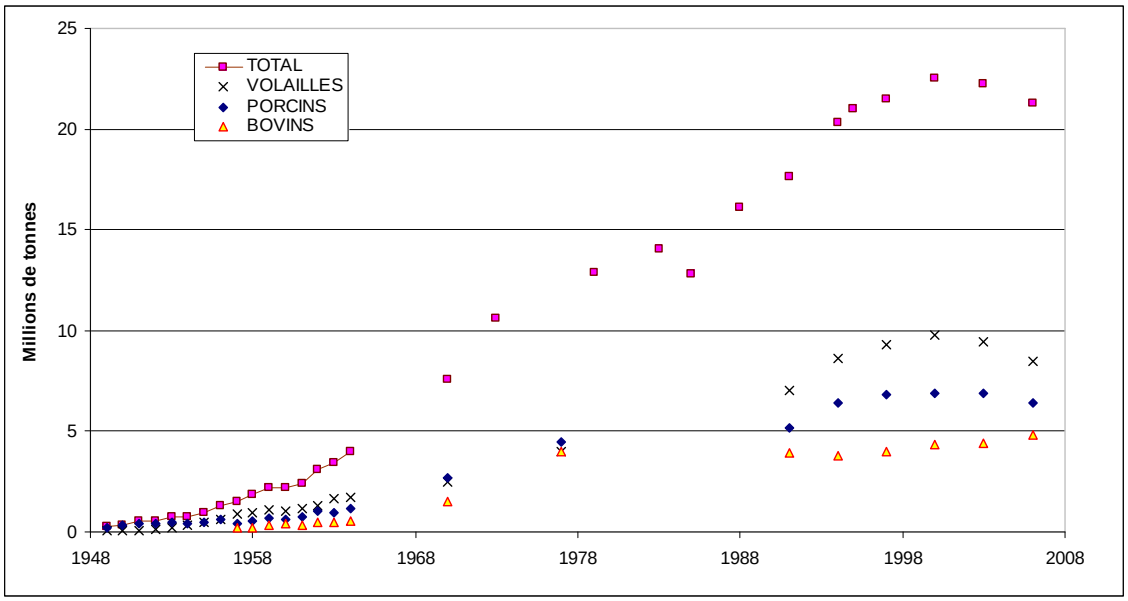


Figure 4.8 : Tonnage de production d'aliments composés en France, 1948-2006. Sources : Ministère de l'agriculture, 1966, Diry, 1979, Agreste, 2008c.

En termes absolus, l'élevage porcin absorbe environ 30 % de la production totale d'aliments composés et l'élevage bovin (tous bovins confondus) environ 20 %. Toutefois, exprimé en pourcentage de l'alimentation totale, la part des aliments composés est nettement plus faible pour les bovins que pour les porcs. Comparé aux fourrages grossiers (tonnage de production de la figure 4.6, pondéré entre les bovins et les autres herbivores), le tonnage d'aliments composés pour le compte des bovins représente environ 7 % de leur alimentation, tandis que pour les porcs il en occupe la

[1] Quant aux origines des ces matières, voir le chapitre prochain.

majeure partie. Ramené au nombre des porcs annuellement produits en France, la production d'aliments composés s'élève à plus de 250 kg/tête en 2006, soit environ 70 % de l'alimentation totale (Agreste, 2008c). Autrement dit, seulement 30 % de l'alimentation porcine est actuellement fabriquée directement à la ferme. Le rapport d'utilisation d'aliments composés est donc d'environ 10:1 entre les porcs et les bovins.

Etant donnée la part élevée des aliments composés dans l'alimentation porcine, la composition des rations est déterminée au niveau des industries agroalimentaires plutôt qu'au niveau des élevages. Ceci revient à ce que les rations porcines soient de composition relativement uniforme dans le territoire, puisque les spécificités régionales vis-à-vis du choix des matières premières n'interviennent en moyenne que pour 30 % du tonnage de l'alimentation. Pour cette raison et afin de simplifier la démarche de formulation des rations, on a considéré qu'au début du XXIe siècle, l'alimentation des porcs d'approvisionnement parisien est indépendante des régions leur élevage.

En revanche, chez les bovins, l'utilisation d'aliments composés est fonction des spécialisations fourragères régionales, puisque les écarts entre les besoins des animaux et l'apport nutritif des trois fourrages de base, à savoir le maïs fourrager, l'herbe et les légumineuses, dépendent de leurs parts d'utilisation dans les rations. De manière générale, plus l'alimentation repose sur le maïs fourrager (à haut contenu énergétique) – c'est surtout le cas des vaches laitières - et plus d'aliments riches en protéines sont nécessaires pour équilibrer les besoins. En revanche, les besoins en concentrés énergétiques diminuent avec l'augmentation de la part de maïs fourrager. En effet, dans le cas des bovins, les aliments composés sont, en tant que suppléments alimentaires, destinés à compléter les déficits nutritionnels qu'engendrent les spécialisations fourragères au niveau des exploitations.

Les matières premières utilisées dans la fabrication d'aliments composées sont majoritairement les céréales (principalement du blé, du maïs et de l'orge), les tourteaux (de soja et de colza) et les coproduits céréaliers (sons de blé et d'autres céréales).

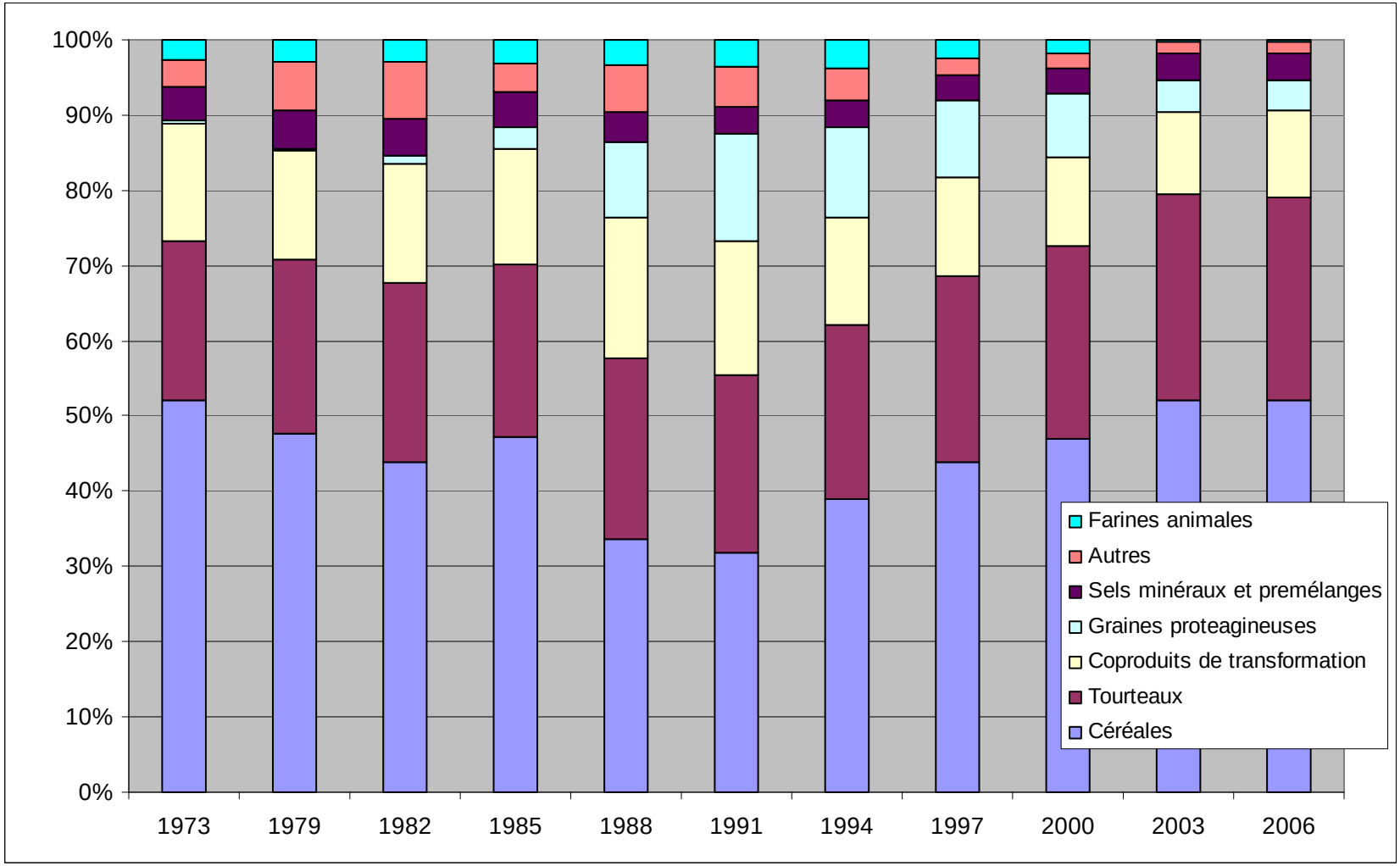


Figure 4.9 : Part des matières premières utilisées dans la fabrication d'aliments composés en France, 1973-2006. D'après : Agreste, 2008c.

Pour le reste, il s'agit des graines oléo-protéagineuses entières, telles les pois, le soja et le colza, des sels minéraux, des aliments déshydratés, telles la pulpe de betteraves et la luzerne, et des farines d'origine animale. La figure 4.9 montre l'évolution de la composition des aliments composés entre 1973 et 2006 (pas de temps triennal, 1976 manquant) par catégorie des matières premières (Agreste, 2008c). Les aliments déshydratés concernent surtout les bovins et sont inclus dans la catégorie « Autres ». L'emploi des farines animales s'arrête pratiquement en 2000, suite à l'interdiction des farines issues des mammifères et des volailles. A l'exception de la période 1988-2000 où la part des graines oléo-protéagineuses entières représente environ 10 à 15 % des matières premières, les céréales, les tourteaux et les coproduits céréaliers sont presque les composantes exclusives des aliments composés. En 2006, elles représentent ensemble 95 % de leur partie végétale.

Le tableau 4.12 résume pour les principaux aliments utilisés au début du XXIe siècle dans les élevages porcin et bovin, les teneurs en MS (% du poids d'aliment), en protéines (% de la MS), en énergie brute (kcal par tonne de MS) et en énergie métabolisable pour les porcs (kcal par tonne de MS)[1].

Tableau 4.12 : Teneurs en matière sèche (MS), en énergie brute (EB), en énergie métabolisable (EM – spécifiques aux porcs) et en protéines (CP) des aliments utilisés actuellement dans l'alimentation des bovins et des porcs en France. Sources : ITAP, 2001, NRC, 1998, NRC, 2001, Gerbens-Leenes et Nonhebel, 2004.

	MS (%)	EB (kcal/kg MS)	EM (kcal/kg MS)	CP (% MS)
Maïs four.	85 %	4200	-	9 %
Foin	90 %	4110	-	16 %
Légumineuses four.	90 %	4000	-	22 %
Blé	85 %	4377	3691	12 %
Orge	85 %	4325	3270	12 %
Maïs grain	85 %	4456	3795	9 %
Tourteau Colza	89 %	4687	2933	37%
Tourteau soja	89 %	4691	3573	47%

On est ainsi en mesure de reconstituer les rations des porcs et des bovins d'approvisionnement parisien aux XIXe, XXe et XXIe siècles, d'associer aux

[1] On rappelle que plus de détail sur la composition chimique des aliments sont disponibles en l'annexe III.

importations leur équivalent en fourrages et de mesurer les efficacités de conversion de la biomasse végétale en biomasse animale[1]. On présente ces résultats dans la section suivante. Afin d'obtenir une meilleure visibilité, on a délibérément opté pour regrouper les différentes graines de céréales et les différents types des tourteaux en deux catégories agrégatives : céréales et tourteaux. On s'intéressera à en désagréger les tonnages dans le chapitre prochain, où on explorera la question des provenances des aliments. Suite à la révolution agricole et au développement des transports, les campagnes se désenclavent et l'agriculture se mondialise. La contrainte de l'autonomie fourragère disparaît progressivement. Les aliments composés sont ainsi fabriqués à proximité des élevages mais à partir des matières premières à la fois produites localement et importées d'autres régions françaises ou pays étrangers.

4.4.3 Les rations animales XIXe – XXIe siècles

On a simulé les rations de production de la viande bovine, porcine et du lait pour les régions d'approvisionnement parisien au début des XIXe, XXe et XXIe siècles, en fonction des disponibilités fourragères régionales et des besoins nutritifs des animaux. Les résultats apparaissent dans les figures 4.10, 4.11, 4.12 pour le lait, la viande bovine et la viande porcine respectivement. Pour chaque produit et région d'approvisionnement, les rations sont exprimées en termes du rapport de tonnage entre la consommation fourragère et les importations parisiennes, c'est-à-dire l'efficacité de conversion de la biomasse végétale en biomasse animale destinée à Paris (FCR). On rappelle que pour la viande, la conversion est calculée par rapport au poids d'importation des animaux, égal à 90 % du poids vif pour les porcs et à 60 % du poids vif pour les bovins. Pour chaque produit et date, les régions d'approvisionnement sont classées en ordre décroissant de tonnage de l'aliment de référence de l'élevage concerné : de l'herbe pour les bovins et des céréales et coproduits céréaliers pour les porcs.

[1] Les efficacités de production (FCR, NCE, ECE) sont étroitement liées à celle de la productivité de biomasse animale, que l'on a mesurée dans la section 4.3 au moyen du rythme de croissance (GMQ) pour les animaux destinés à la production de viande et du rendement de lait (LMQ) pour les vaches laitières.

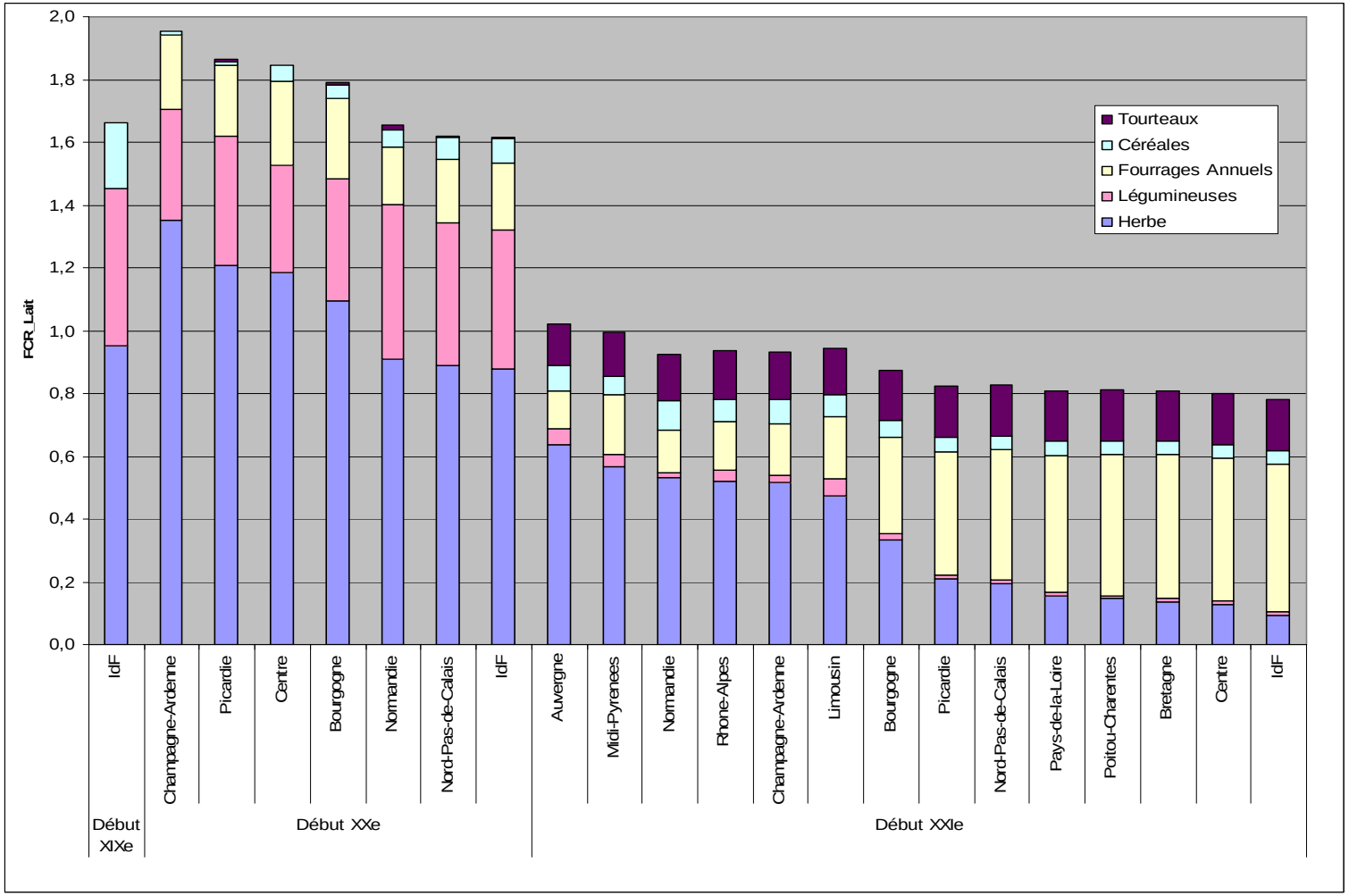


Figure 4.10 : Composition et FCR des rations relatives à la production du lait par région principale d'approvisionnement parisien au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Source : Cette étude.

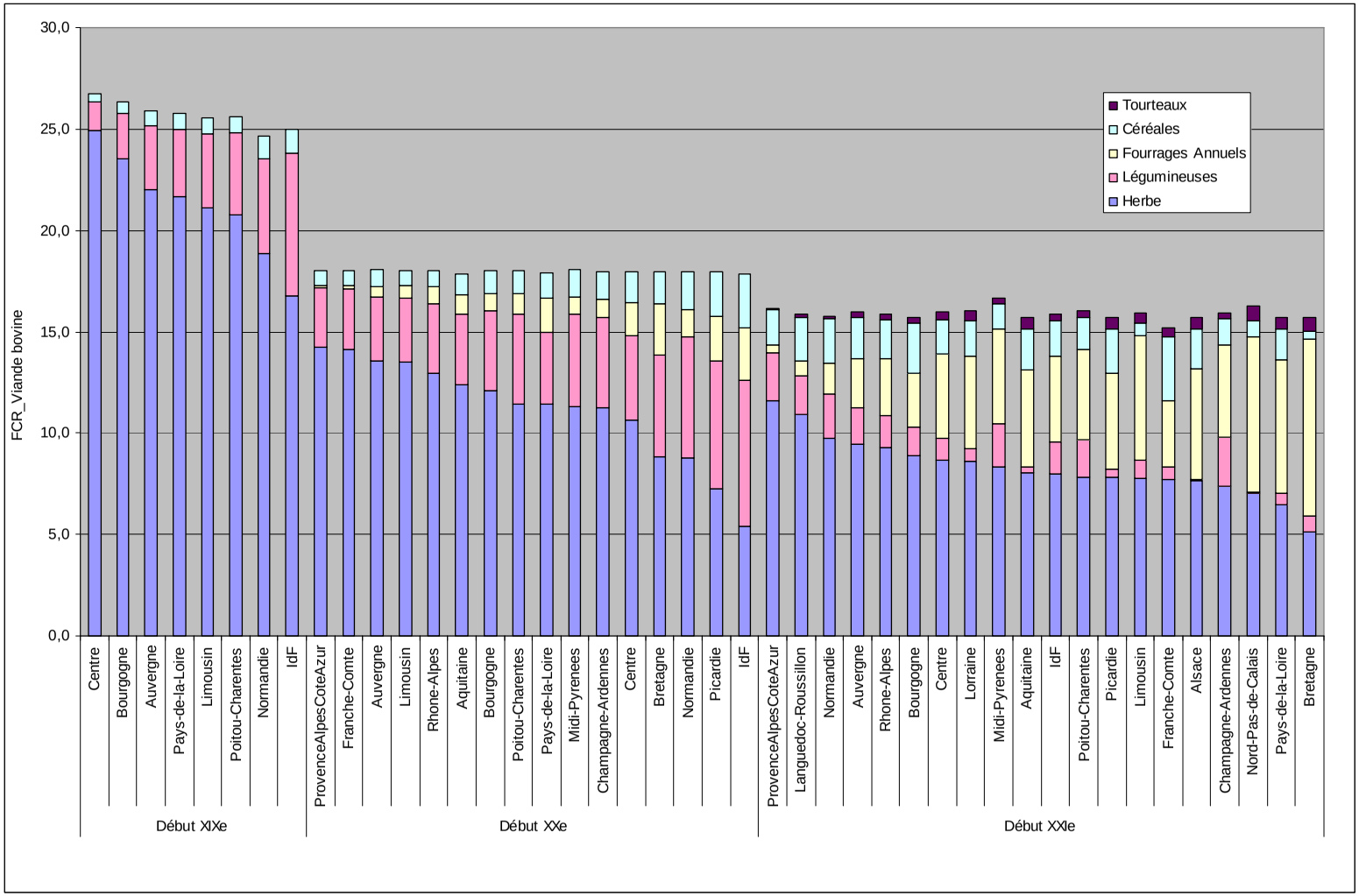


Figure 4.11 : Composition et FCR des rations relatives à la production de la viande bovine par région d'approvisionnement parisien au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Source : Cette étude.

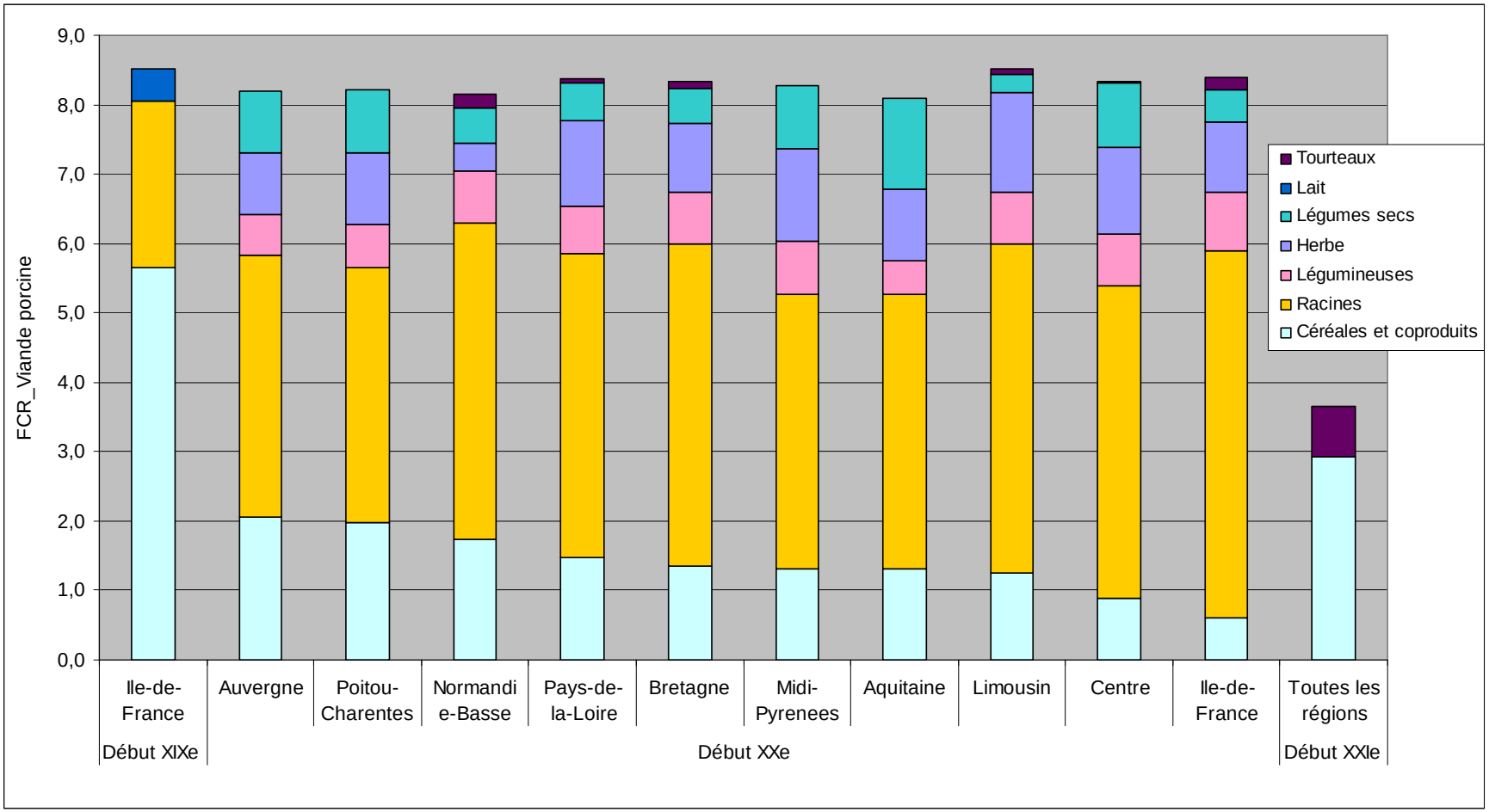


Figure 4.12 : Composition et FCR des rations relatives à la production de la viande porcine par région d'approvisionnement parisien au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Source : Cette étude.

Parce qu'une ration animale représente un état d'équilibre en termes nutritifs entre les besoins de la production et l'apport des aliments, une même quantité de nutriments, et donc une même production, peuvent être obtenues à partir de rations de compositions différentes. C'est ce qu'illustrent nos graphiques ci-dessus. L'équivalent fourrager des importations parisiennes de viande et de lait est différent selon les dates et les régions de provenance. Les spécialisations régionales en matière d'alimentation animale dépendent d'un certain nombre de facteurs d'ordre à la fois agronomique et technico-économique y compris des conditions climatiques, de la disponibilité de mains d'œuvre - surtout pour l'agriculture préindustrielle – et des politiques agricoles - surtout pour l'agriculture actuelle - et déterminent en retour l'efficacité des élevages en termes de conversion des matières en produits animaux. Sans avoir effectué d'analyse détaillée sur les facteurs de différentiation de la composition des rations animales, nos simulations quantifient, même approximativement, l'évolution depuis le XIXe siècle de la consommation de fourrages pour le ravitaillement parisien en produits animaux de base.

En ce qui concerne la production bovine, la substitution des légumineuses et des fourrages annuels à l'herbe au cours du XIXe siècle est signe de progrès et d'accroissement de la productivité des élevages. Dans la première moitié du XIXe siècle, ce progrès caractérise les régions en voie d'urbanisation avant de se diffuser plus amplement à partir de la deuxième moitié du XIXe siècle suivant la diffusion de la demande alimentaire. Ce processus est reflété dans les simulations des rations. Dès le début du XIXe siècle, la proportion des légumineuses dans les rations franciliennes dépasse celle de la plupart des régions d'approvisionnement un siècle plus tard. On l'estime autour de 30 % de la MS des rations laitières comme des celles relatives à la production de la viande, contre 15 % en moyenne dans les autres régions d'approvisionnement. En parallèle, près de 15 % des rations laitières et 5 % des rations bovines franciliennes sont composées des graines d'orge. En termes de bilan, on estime que l'approvisionnement parisien en lait et en viande réquisitionne environ 40 % et 15 % respectivement de la production francilienne d'orge. Pour les autres régions, la part des céréales et des légumineuses des rations à viande est nettement plus faible.

Au début du XXe siècle la part des légumineuses des rations bovines (lait et viande) est estimée entre 15 % et 40 % selon les régions, avec une moyenne d'environ 25 %, commune entre les deux productions. Par ailleurs, les rations laitières reposent de manière significative sur les fourrages annuels. Pratiquement absents jusqu'à la deuxième moitié du XIXe siècle, les fourrages annuels, majoritairement composés de betteraves, représentent au début du XXe siècle 13 % de la MS des rations laitières en moyenne. Leur utilisation permet de diminuer la dépendance vis-à-vis des céréales. Le recul de l'herbe et des légumineuses des rations bovines au cours du XXe siècle se fait au profit des fourrages annuels - en particulier du maïs - dont le faible apport protéique appelle à l'utilisation des tourteaux de soja et de colza. En effet, la substitution du maïs et des tourteaux à l'herbe et aux légumineuses constitue le levier principal de différentiation des élevages actuels par rapport aux siècles précédents. Elle est synonyme d'intensification de la production, surtout pour l'élevage laitier, et se pratique majoritairement dans les régions de l'ouest et du nord de la France. Selon nos calculs, les trois régions où l'efficacité de conversion des fourrages en lait est maximale sont l'Ile-de-France, le Centre et la Bretagne. La part d'herbe et de légumineuses des rations laitières y est d'environ 15 %, le reste étant partagé entre le maïs fourrage (~60 %), les tourteaux (~20 %) et les céréales (~5 %). A l'autre opposé, les élevages laitiers des régions comme l'Auvergne, Midi-Pyrénées et la Normandie sont beaucoup plus extensifs. L'herbe et les légumineuses couvrent environ 65 % de la MS des rations. Les parts des tourteaux et du maïs fourrage sont de moins de 15 % chacune et celle des graines de céréales d'environ 5 %. On estime les écarts de FCR entre les deux types d'élevages laitiers à environ 20 %. De manière générale, on trouve une forte corrélation positive entre la part du maïs fourrage des rations et l'efficacité de conversion de la biomasse végétale en lait ($r = 0.92$)

L'élevage orienté viande est nettement plus extensif que l'élevage laitier. D'après nos simulations le maïs se substitue aux légumineuses mais la part de l'herbe demeure plus ou moins au même niveau qu'au début du XXe siècle. Le maïs fourrage représente moins de 30 % de la MS de la plupart des rations et l'utilisation des tourteaux est par conséquent nettement plus faible par rapport à l'élevage laitier. Pourtant, les proportions d'utilisation des fourrages varient selon les régions. La part du maïs est évaluée à 2 % de la MS des rations dans les systèmes extensifs de la zone

méridionale et jusqu'à 50 % en Bretagne et en Pays-de-la-Loire. Pourtant, contrairement à l'élevage laitier, la part du maïs fourrager dans les rations semble être décorrélée de l'efficacité de conversion de la biomasse. En revanche, on observe une corrélation positive entre les FCR et la part des graines de céréales (r= 0.6). Sous réserve de validité de nos hypothèses, l'utilisation du maïs fourrager dans les rations des bovins à viande semble répondre à d'autres critères d'efficacité que celui de conversion de la biomasse. Ceux-ci peuvent concerner la logistique de la production et la réduction des coûts de fonctionnement relatifs par exemple à la récolte et au transport des aliments dans les lots d'élevage. Quoi qu'il en soit, il paraît que la faible réactivité de l'efficacité de production de la viande bovine au maïs fourrager soit une, sinon l'explication principale, du fait que les prairies résistent mieux dans les zones d'élevage à viande.

En ce qui concerne l'élevage porcin, l'évolution en matière d'alimentation entre le début des XIXe et XXe siècles sont étroitement liées à la géographie de l'approvisionnement. Jusqu'à la deuxième moitié du XIXe siècle, la proximité physique entre les élevages porcins, les laiteries et les amidonneries parisiennes a favorisé le recyclage des protéines du son et des petits laits dans l'alimentation des porcs. On estime la part de ces deux matières à environ 50 % de la MS des rations. Par ailleurs, les rations se composent d'environ 25 % de racines et de 20 % d'orge. En termes de bilan régional, on estime les besoins en orge des porcs d'approvisionnement parisien à 40 % de la production régionale, soit à peu près le même volume que les besoins d'approvisionnement laitier. En tout, selon nos calculs, 95 % de la production francilienne d'orge est transformée en viandes bovines, porcines et en lait pour le compte des Parisiens.

Au début du XXe siècle, les provenances des porcs s'éloignent de la capitale et leur alimentation se diversifie en quête des sources de protéines nouvelles. Les contraintes relatives à la fabrication des protéines végétales sous forme des graines réorientent l'élevage porcin vers le pâturage. L'herbe et les légumineuses fourragères dont les protéines étaient auparavant consommées indirectement par les porcs sous forme des petits-laits, assurent au début du XXe siècle en moyenne 25 % des besoins. Les protéagineux et dans une moindre mesure les tourteaux en assurent ensemble environ

20 %. Exprimée en pourcentage de MS, les rations se composent en moyenne à 50 % de racines, à 20 % d'herbe et de légumineuses, à 20 % de céréales et à 10 % de protéagineux et tourteaux. Rappelons que les tourteaux ne sont pas utilisés dans toutes les régions et que leur tonnage est marginal par rapport à aujourd'hui. On l'estime à environ 3 % de la MS des rations normandes et à 1 % en moyenne.

Dans la deuxième moitié du XXe siècle, l'élevage porcin s'industrialise et les parts des céréales et des tourteaux des rations augmentent jusqu'à en dominer la composition à l'espace de quelques décennies. Selon nos calculs, les besoins actuels des porcs sont équilibrés par des céréales (y compris des coproduits) et des tourteaux en proportions de 80 % et 20 % respectivement du tonnage des rations.

La figure 4.13 résume les parts contributives en protéines des rations animales par catégorie fourragère et par date, moyennées sur l'aire d'approvisionnement de chaque époque. On retient de cette représentation l'importance des tourteaux dans l'apport des protéines pour les élevages porcin et laitier. Ils couvrent près de 50 % des besoins. En revanche, pour la production de la viande bovine, ils n'en représentent que 10 %.

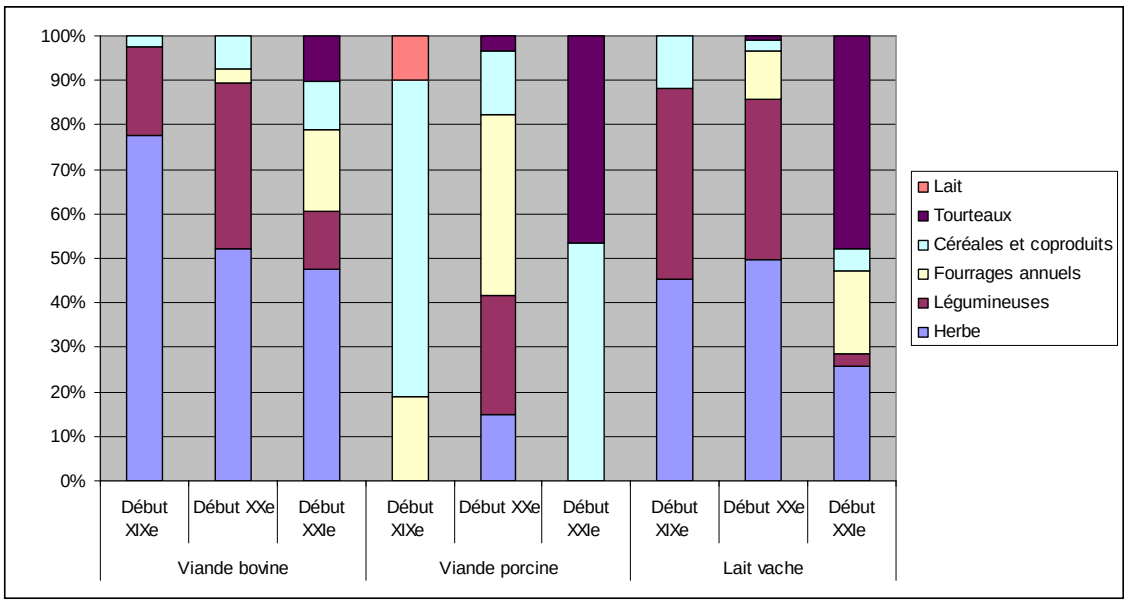


Figure 4.13 : Répartition de l'apport en protéines des rations par catégorie fourragère et par date moyennée parmi les régions d'approvisionnement. Source : Cette étude.

Pour les trois produits, le FCR s'est amélioré dans le temps : moins de fourrages sont nécessaires par unité de biomasse animale produite au XXIe par rapport aux XIXe et

XXe siècles. On résume dans le tableau 4.13 les valeurs moyennes des FCR par produit et par date ainsi que les indices d'évolution par période étudiée (1 = non augmentation).

Tableau 4.13 : FCR et indices d'évolution de la productivité des secteurs bovins, porcins et laitiers aux XIXe, XXe et XXIe siècle. Moyennes pondérées parmi les régions assurant l'approvisionnement parisien. Source : Cette étude

	Début XIXe	Début XXe	Début XXIe	Indice d'évolution XIXe-XXe	Indice d'évolution XXe-XXIe	Indice d'évolution XIXe-XXIe
Viande bovine	25,6	17,9	15,9	1,4	1,1	1,6
Viande porcine	8,5	8,3	3,6	1,0	2,3	2,3
Lait	1,7	1,8	0,9	0,9	2,0	1,9

On note que les temporalités de croissance de la productivité sont en décalage entre les trois produits. On observe qu'entre le début des XIXe et XXe siècle, le progrès de productivité concerne principalement la production de la viande bovine. Pour les porcs, le FCR est stationnaire tandis que pour le lait on observe une légère décroissance qui s'explique par l'élargissement de l'aire d'approvisionnement parisien sur des zones moins productives. En effet, la demande parisienne en lait s'accroît plus vite que la productivité du cheptel ; ainsi, au début du XXe siècle, des vaches moins productives doivent être mobilisées dans la desserte de la capitale par rapport au début du XIXe siècle.

Au cours de la deuxième période, les FCR doublent pour les porcs et le lait, tandis que pour la production de viande bovine le progrès est nettement plus modeste, car il est pour l'essentiel accompli dans le cadre des systèmes agraires préindustriels. En plus, comme on l'a mentionné précédemment, la productivité de la viande bovine tire moins de profit des aliments modernes, à savoir du maïs et des tourteaux, aliments qui ont révolutionné le secteur laitier dans la deuxième moitié du XXe siècle.

En ce qui concerne la comparaison des FCR des deux viandes, la conversion est plus efficace dans la production des porcs que dans celle des bovins. L'équivalent en fourrages des importations parisiennes est, à toute époque, de trois à quatre fois

supérieur pour la viande bovine que pour la viande porcine. Par ailleurs, la production laitière est de loin la plus efficace en termes de conversion de la biomasse. Pourtant, en raison des différences de composition chimique entre les viandes et le lait, le FCR n'est pas la meilleure mesure de comparaison. Mesurée en termes des protéines (NCE) et d'énergie (ECE), les efficacités de conversion des fourrages en viandes et en lait sont indiquées dans le tableau 4.14. Elles sont exprimées en pourcentage et montrent respectivement la part du contenu énergétique (énergie brute) et protéique des rations faisant l'objet des importations parisiennes.

Tableau 4.14 : Efficacités de conversion des protéines (NCE) et de l'énergie (ECE) des rations animales en protéines et en énergie de viande bovine, porcine et de lait au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Source : Cette étude.

	Début XIXe	Début XXe	Début XXIe
Efficacité de conversion des protéines (NCE)			
Viande bovine	5%	8%	10%
Viande porcine	13%	13%	24%
Lait	16%	16%	24%
Efficacité de conversion énergétique (ECE)			
Viande bovine	3%	4%	5%
Viande porcine	9%	9%	20%
Lait	10%	10%	19%

De manière générale, l'efficacité de conversion est plus faible pour l'énergie que pour les protéines et au même titre que les FCR, elle est plus faible pour la viande bovine que pour la viande porcine et le lait, deux productions dont les efficacités sont plus ou moins équivalentes à toute époque. Par rapport au rendement moyen d'énergie de l'alimentation d'un niveau trophique à l'autre, habituellement considéré égal à 10 % (Odum, 1953), nos résultats sont généralement en accord tout en illustrant les variations entre différentes espèces et périodes historiques. Il en va de même pour l'efficacité de conversion des protéines pour laquelle peu de valeurs sont disponibles dans la littérature internationale et concernent notamment des élevages très intensifs (Smil, 2002).

Qu’elle soit mesurée en tonnage, en protéines ou en énergie, l’efficacité de l’élevage est faible. Les importations parisiennes représentent une partie très minoritaire des ressources totales mobilisées. Au XIXe siècle et pour les trois produits ensemble, les flux des matières comme de protéines d’importation sont respectivement dix et quinze fois inférieurs aux tonnages des matières et des protéines résiduelles dans les régions d’élevage. Au XXIe siècle, les écarts sont moins importants, néanmoins considérables. Les quantités résiduelles des matières et des protéines sont respectivement cinq et six fois supérieures aux importations parisiennes. De ce point de vue, les volumes résiduels peuvent être considérés comme des flux urbains indirects, puisqu’il s’agit des éléments mobilisés mais pas importés. Les flux indirects ne sont pas pris en compte dans les bilans de matières car il s’agit d’entités non directement mesurables et qui échappent aux statistiques.

4.5 Conclusion

On a reconstitué les rations des animaux approvisionnant Paris au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. La composition des rations montre l'équivalent en fourrages des importations de viande et de lait en fonction des besoins en énergie et en protéines des animaux et de la disponibilité fourragère aux différentes dates. On a déterminé à travers cette démarche le rendement en viande et en lait du fourrage, en termes à la fois de biomasse, d'énergie et de protéines par date et par région concourant à l’approvisionnement. Ceci constitue le préalable nécessaire pour mettre en rapport la consommation alimentaire urbaine et la mobilisation des ressources naturelles dans la production agricole. On calculera dans les chapitres prochains l’évolution de l’emprise spatiale de l’approvisionnement en termes d’étendue et de géographie, les quantités d’azote et d’eau mobilisées à chaque période et le dégrée de valorisation de l’azote résiduel. Il s’agit donc d’abord de déterminer les origines spatiales des fourrages consommés c'est-à-dire la géographie d’approvisionnement des exploitations d’élevage et de tenir compte des propriétés agronomiques des fourrages assurant la production.

Chapitre 5 : L'empreinte spatiale de l'alimentation parisienne, XIXe -XXIe siècles

5.1 Généralités

Après avoir déterminé dans le chapitre précédent l'équivalent en fourrages des importations parisiennes, on cherche ici à mesurer les besoins surfaciques de la production. Nous définissons comme empreinte spatiale de la consommation de viande et de lait, la somme des surfaces permettant l'alimentation des bestiaux ; l'étendue donc de leurs surfaces nourricières. Chaque ingrédient des rations est une composante dans la détermination de l'empreinte spatiale, dont l'étendue et la géographie sont fonction des rendements agricoles et des lieux de production des fourrages. Lorsque les aliments ne sont pas produits au sein des exploitations dans lesquelles la viande et le lait destinés à Paris sont produits, la géographie de l'empreinte spatiale est différente de celle de l'approvisionnement parisien. Par conséquent, telle qu'on l'a définie, l'empreinte spatiale montre l'étendue des terres nourricières d'une ville en fonction de la géographie d'approvisionnement des élevages ; elle constitue donc un indicateur spatialisé liant la demande alimentaire (ici en viande et en lait) et la structure des systèmes agraires qui en assurent la satisfaction.

Le partage de l'empreinte spatiale entre les élevages et les territoires qui en comblent les déficits fourragers dépend du niveau d'autonomie des exploitations. Evaluer cette autonomie, c'est-à-dire déterminer par rapport au périmètre des exploitations d'élevage la part respective des fourrages locaux et des fourrages d'importation, constitue le préalable nécessaire à la fois pour localiser l'empreinte au moyen des données sur les provenances des importations et pour quantifier les flux des nutriments. L'analyse de ces deux aspects permet d'aborder la question de l'approvisionnement parisien d'un point de vue à la fois sociopolitique et biogéochimique. Sociopolitique, car connaître la géographie de l'alimentation des animaux destinés à l'approvisionnement urbain revient à mettre en évidence l'appropriation des ressources naturelles, proches ou lointaines, par les citadins et à réfléchir les politiques d'approvisionnement dans un cadre de solidarité intra-

générationnelle. D'autre part, biogéochimique, car l'importation des fourrages, qu'il s'agisse des flux intra-régionaux, interrégionaux ou internationaux, est synonyme d'importation des nutriments entre autres de l'azote qui, en tant qu'élément biogène, influence le potentiel de production primaire des environnements anthropiques et naturelles aux lieux de destination (voir chapitre 6).

Ce chapitre s'organise comme suit : on présente dans la section 5.2 la méthode de calcul de l'étendue de l'empreinte, puis dans la section 5.3 la démarche pour en déduire la géographie sur la base de la dépendance fourragère des exploitations et des provenances des fourrages. On présente enfin, dans la section 5.4, l'évaluation de l'empreinte spatiale parisienne au début des XIXe, XXe et XXIe siècles.

5.2 Méthode de calcul de l'empreinte spatiale.

L'empreinte spatiale d'une consommation est fonction inverse de la productivité agricole, productivité qu'on mesure au moyen des rendements culturaux. Plus les rendements sont élevés et moins d'espace est nécessaire pour obtenir une même quantité de biomasse végétale destinée à la nourriture des animaux. Dans le présent travail, l'empreinte spatiale parisienne correspond à la surface agricole nécessaire annuellement pour nourrir les animaux approvisionnant Paris en viandes et en lait.

Du fait que les animaux consomment à la fois des fourrages entiers – entendus comme les produits directs de récolte - et des sous-produits de transformation – résultant de la transformation du rendement cultural en deux ou plusieurs matières –, la méthode de calcul a deux variantes.

Pour un ingrédient i, consommé en quantité Qi (tonnes), et produit unique d'un rendement agricole Yi (tonnes/hectare), la formule de calcul de la surface de production Si (hectares) est la suivante (équation 5.1) :

$$Si = Qi / Yi \qquad (5.1)$$

Cette opération permet d'obtenir directement le nombre d'hectares nécessaires annuellement par ingrédient de la ration. Elle est utilisée pour les fourrages

consommés entiers comme par exemple le foin, le maïs fourrager, les graines entières etc.

En revanche, pour les sous-produits de transformation, le calcul de la surface de production est plus compliqué car la matière consommée par l'animal constitue seulement une fraction du produit agricole initial. De fait, le rapport du sous-produit de transformation à la surface de production n'est pas direct : d'une part, pour obtenir une quantité Q de sous-produit il faut une quantité Q/r de produit initial, où r est le rendement de transformation de la matière. D'autre part, la même surface de production fournie d'autres sous-produits. Par conséquent, si S est la surface agricole nécessaire à la production de la culture d'origine (ci-après appelée produit-mère ou produit-initial), la surface correspondant à chaque sous-produit en sera une fraction qui n'est pourtant pas physiquement mesurable mais que l'on doit évaluer conceptuellement. En effet, les constituants des sous-produits de transformation sont les coproduits d'un même processus physico-chimique, à savoir de la conversion photosynthétique de la radiation solaire en biomasse végétale dont les besoins de production (consommation des ressources) sont indissociables et irréductibles[1]. Leur répartition entre les produits dérivés n'est donc possible qu'au moyen d'une allocation conceptuelle à l'appui de coefficients de pondération. Pour ce qui nous concerne, cette allocation est nécessaire dans le cas des tourteaux, de la pulpe de betteraves et du son de céréales[2].

De manière générale, le traitement de transformation d'une graine (de même pour une betterave) consiste à en extraire les composés, et à les regrouper – d'après leurs propriétés physicochimiques - en catégories de valeur d'usage supérieure. Il s'agit d'un processus de partage à la fois de la masse et des qualités du produit initial en sous-produits de volumes et de propriétés distinctes. L'allocation peut donc se faire en

[1] Un contre exemple est la facture d'électricité d'un ménage qui peut facilement être répartie aux consommations partielles des appareils.

[2] Notons que cette démarche est nécessaire pour toutes les ressources utilisées dans la production dont le partage entre les sous-produits de transformation n'est pas mesurable. On y reviendra dans le chapitre consacré à l'empreinte hydrique pour allouer l'évapotranspiration de la plante (produit-mère) aux sous-produits de transformation.

déterminant, pour chaque sous-produit, deux coefficients adimensionnels. Le premier sert à mesurer la fraction massique de chaque sous-produit i par rapport au produit initial, coefficient qu'on appellera « fraction produit i» (P_{fi}, abréviation anglaise de « product fraction »). En tant que coefficient mesurant le partage massique, le P_f montre le nombre des tonnes d'un sous-produit que l'on puisse obtenir par tonne de produit initial. Les P_f d'un grand nombre des matières sont disponibles dans la base des données de la FAO (2003).

Le deuxième coefficient sert à évaluer le rapport des « valeurs » entre le sous-produit i et la somme des sous-produits de transformation, coefficient qu'on appellera « fraction valeur i » (V_{fi}, abréviation anglaise de « value fraction »). La « fraction valeur » (V_f) est un coefficient d'ajustement des propriétés intrinsèques des sous-produits. C'est parce que « la valeur » du produit initial ne se partage pas équitablement entre les sous-produits de transformation (c'est justement l'intérêt du traitement et de la séparation des sous-produits). Les V_f sont donc destinées à représenter cette inégalité de partage.

Il est évident que, du fait d'incorporer une évaluation chiffrée des produits, l'allocation acquiert un caractère subjectif, et devient fonction du système d'évaluation que l'on retient.

Différents systèmes sont envisageables. Confrontés au problème de l'allocation, Chapagain et Hoekstra (2003) ont basé leurs V_f sur les valeurs monétaires globales des produits dérivés. Ils calculent la V_f d'un sous-produit i comme le ratio de sa valeur marchande sur la somme des valeurs marchandes de tous les produits dérivés. Ils monétarisent en quelque sorte l'allocation qui devient fonction de la demande de marché : plus un sous-produit coûte cher et plus il est « pénalisé » en termes de consommation de ressources. De fait, cette méthode d'allocation est fortement sensible aux variations des prix d'une période et à l'autre, surtout parmi des sociétés avec des niveaux technologiques et des finalités de production différentes. De plus, confondre des unités physiques et monétaires, est d'une rationalité que l'on peut juger contestable.

Pour ces raisons, on a opté pour calculer les V_f à partir des valeurs énergétiques des sous-produits. Dans ce cas, les V_f expriment, en pourcentage, le partage du contenu énergétique du produit d'origine entre les sous-produits de transformation. Elles sont donc fonctions directes des compositions chimiques des matières concernées et indépendantes de l'usage que l'on en fait.

Pour un sous-produit i, de masse égale à P_{fi} du produit initial, la V_{fi} peut être calculée avec l'équation 5.2, où $E_{prod_initial}$ et E_i sont respectivement les contenus énergétiques du produit initial et du sous-produit i.

$$V_{fi} = EB_i * P_{fi} / EB_{prod_initial} \quad (5.2)$$

Le tableau 5.1 montre les P_f et les V_f des sous-produits de transformation des graines de lin (huile et tourteau), de colza (*idem*), de soja (*idem*), des betteraves sucrières (sucre et pulpe) et des céréales (son et farine), tels qu'on les a calculés d'après leur contenus énergétiques.

Tableau 5.1 : P_f et V_f des sous-produits de transformation des rations animales. Sources : FAO, 2003 et cette étude.

	Lin	Colza	Soja	Betteraves	Céréales
Sous-produit d'élevage (tourteau/pulpe/son)	Tourteau	Tourteau	Tourteau	Pulpe	Son
P_f sous-produit d'élevage	0,63	0,6	0,79	0,24	0,18
V_f sous-produit d'élevage (tourteau/pulpe/son)	0,40	0,45	0,66	0,18	0,18
Sous-produit industriel	Huile	Huile	Huile	Sucre	Farine
P_f sous-produit industriel	0,4	0,4	0,21	0,73	0,82
V_f sous-produit industriel (tourteau/pulpe/son)	0,60	0,56	0,34	0,82	0,82

On rappelle que les P_f et V_f montrent en termes massiques et énergétiques le partage du produit initial aux sous-produits de transformation. De ce fait, le rapport entre les deux valeurs, à savoir V_f / P_f, indique la richesse énergétique relative de chaque sous-produit.

Le calcul de la superficie (S_i) correspondant à la production d'une quantité Q_i d'un sous-produit i, est donc possible par l'équation 5.3, où Y est le rendement cultural du produit d'origine :

$$S_i = (Q_i / Y) * (V_{fi} / P_{fi}) \quad (5.3)$$

On remarque qu'à l'exception du son, les autres sous-produits utilisés en élevage, à savoir les tourteaux et la pulpe de betteraves, sont caractérisés des richesses énergétiques inférieures à celles des sous-produits à usage industriel. Par conséquent, leur part dans la consommation des ressources de production sera inférieure à leur proportion massique. Pour le son, dont les P_f et V_f sont égaux, elle est proportionnelle à la masse.

Il est intéressant de noter que nos V_f sont plus ou moins en accord avec les V_f calculées par Chapagain et Hoekstra (2003) sur la base des valeurs monétaires. Ces auteurs estiment les *Vf* des tourteaux de soja, de colza, de lin et du son de céréales à respectivement 0,66, 0,33, 0,39 et 0,17 (contre 0,66, 0,45, 0,40 et 0,18 dans notre étude)[1]. A l'exception du tourteau de colza, la concordance des résultats indique que le rapport des prix entre les sous-produits est étroitement lié au rapport des contenus énergétiques. A contrario, ceci n'est manifestement pas le cas pour l'huile et le tourteau de colza. Compte tenu du fait que dans la méthode de calcul de Chapagain et Hoekstra, la V_f d'un sous-produit de transformation dépend des valeurs marchandes des autres sous-produits obtenus du produit mère, la sous-valorisation du contenu énergétique de tourteau signifie la survalorisation de celui de l'huile. Ceci est une conséquence du différentiel de demande entre les deux sous-produits ; il s'agit donc d'un effet des débouchés. En effet, depuis l'apparition de l'industrie de biodiesel, la production de colza se développe en vertu du débouché de l'huile. Son prix est à la hausse en fonction de la bourse du pétrole et stimule une production dont la croissance conduit le prix du tourteau à la baisse.

[1] Pas de valeur pour la pulpe de betterave dans Chapagain et Hoekstra (2003)

5.3 Aliments d'importation et localisation de l'empreinte

Comme évoqué en introduction, le fait que la géographie de l'empreinte s'écarte de celle de l'approvisionnement parisien dépend des déficits de production fourragère des élevages. L'importation des fourrages par les fermes – importation par rapport au périmètre de leurs terres agricoles - est en effet synonyme d'externalisation d'une part de la surface nourricière des animaux. Par conséquent, la localisation de l'empreinte commence avec la quantification du tonnage des fourrages d'importation à l'échelle des exploitations, tonnage pouvant provenir des territoires situés dans la région même de l'élevage, dans d'autres régions françaises ou de l'étranger. En l'absence des données sur les provenances réelles des aliments d'importation, celles-ci peuvent être évaluées indirectement sur la base des données de production et de spécialisation agricoles du territoire. Mais quels sont les fourrages d'importation et quelles sont les dates concernées ?

Le commerce des fourrages, on s'en souvient, est pour la France une spécificité de la deuxième moitié du XXe siècle (cf. chapitre 4). Il était d'importance et d'envergure marginale aux dates antérieures[1] compte tenu à la fois des difficultés de transport, du faible potentiel de production des agro-systèmes, et du fait que la finalité principale de l'élevage était la production de fumier plutôt que la production alimentaire. La possibilité - du point de vue biogéochimique et de transport - et l'intérêt – du point de vue économique – pour le commerce des fourrages ont progressivement crus à partir des années 1940 et aboutis à la fabrication d'aliments composés à partir des matières premières d'origines diverses (cf. figure 4.8, 4.9). En 2006, la part d'aliments composés dans l'alimentation animale s'élève, en termes de tonnage, à environ 70 % pour les porcs et à 7 % pour les bovins ; avec des spécificités régionales importantes suivant la répartition des espèces et les caractéristiques technico-économiques des exploitations. Ainsi, contrairement au début des XIXe et XXe siècles où l'étendue de l'empreinte est fonction des rendements agricoles aux lieux de provenance des importations parisiennes (les données de rendements sont tirées principalement de Moreau de Jonnès (1848), Mounier (1846) et Block (1858) pour le début de XIXe et

[1] Néanmoins pas entièrement absents : l'octroi sur le foin à destination des chevaux parisiens s'en porte preuve.

de Statistique agricole annuelle (1906) pour le début du XXe siècle), elle dépend, au début du XXIe siècle, également des rendements aux provenances diverses des matières premières des aliments composés. Les céréales (blé, orge, maïs), les tourteaux (colza et soja), la pulpe des betteraves et la luzerne déshydratée représentent ensemble près de 98 % des matières premières des aliments composés (Agreste, 2008c). Ce sont donc ces matières qui sont susceptibles de commercialisation et dont la part d'importation par les exploitations d'élevage doit être déterminée par région d'approvisionnement parisien.

Pour certaines de ces matières il est facile de conclure qu'elles sont entièrement importées. Il s'agit des matières peu ou pas produites au sein des élevages, soit parce qu'elles ne font pas partie du produit végétal principal des exploitations (ce qui est fonction des orientations technico-économiques des exploitations – OTEX (Agreste, 2005b)) ou parce que, tout simplement, elles ne sont pas (ou très peu) cultivées en France (selon les données des Statistiques agricoles annuelles). Dans les deux cas, les provenances des matières concernées sont à déduire à la fois des statistiques de production et des données sur le commerce extérieur de la France.

En revanche, pour les matières faisant partie de la production agricole des exploitations d'élevage, le recours aux fourrages d'importation doit être examiné au moyen de bilans entre cette production et les besoins des cheptels. Les déficits éventuels correspondraient aux fourrages d'importation dont les provenances sont à déduire - comme précédemment - des statistiques de production et des données douanières.

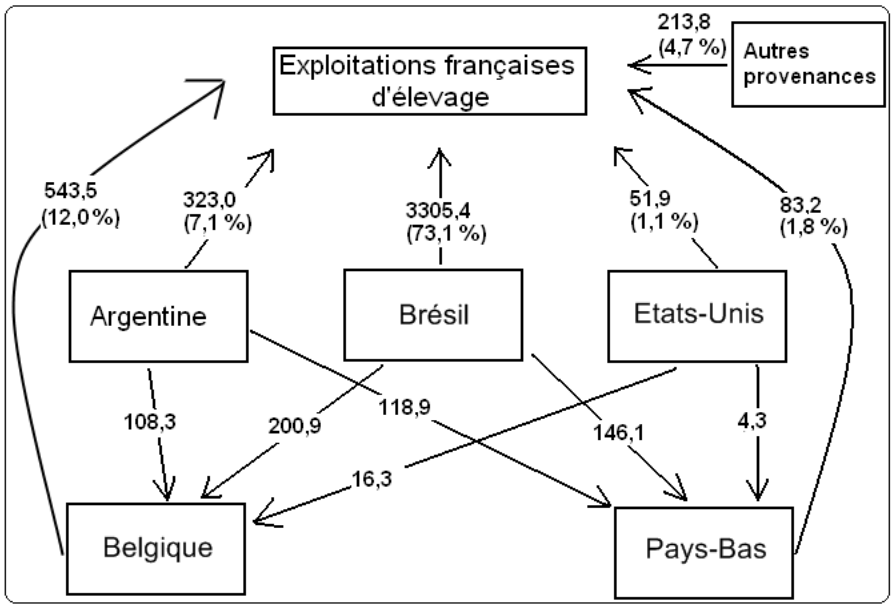
On expose ci-après, matière par matière, les données et les hypothèses mises en œuvre dans l'évaluation de tonnage des fourrages d'importation par région et par type d'élevage au début du XXIe siècle. On rappelle que par opposition à ce mode d'approvisionnement, les fourrages grossiers principaux, à savoir le foin, les légumineuses et le maïs fourragers, sont exclusivement produits au sein des élevages.

Soja

Le soja provient pour sa majorité écrasante d'importations depuis l'étranger, ce qui n'est d'ailleurs pas une spécificité française mais une généralité européenne. Pour l'Europe entière 97 % de la consommation de soja est d'importation (Brooks, 2001). En France, la production nationale de soja s'élève à environ 1 % des importations nettes (la comparaison étant faite en équivalent tourteau), pourcentage insignifiant pour en tenir compte dans l'approvisionnement des élevages (Agreste, 2004, FAOSTAT, 2004). Ainsi, on considère que la consommation totale de soja des cheptels français - et donc des animaux approvisionnant Paris – est assurée par du soja d'importation, dont la répartition par origine est identique à celle de la somme des importations françaises sous forme de tourteau et sous forme des graines. D'après nos simulations des rations, le tourteau de soja représente 50 % de la consommation totale de tourteau des porcs et des vaches laitières et la totalité de la consommation des bovins à viande. En termes d'apport de protéines, ceci correspond à 26 % des protéines totales des rations des porcs et des vaches laitières et à 10 % des protéines des bovins à viande.

On a exploité la base des données de la FAO sur le commerce extérieur de la France en soja afin d'en obtenir les provenances. Les données concernent les provenances de premier ordre, c'est-à-dire qu'elles indiquent le pays du dernier chargement des marchandises avant le franchissement de la frontière. Evidemment, les échanges commerciaux peuvent incorporer plusieurs étapes intermédiaires entre le pays d'origine (pays de production) et le pays de consommation. En effet, à part le Brésil, l'Argentine et les Etats-Unis, trois pays emblématiques vis-à-vis de la production mondiale de soja, on trouve parmi les fournisseurs de soja en France, la Belgique et les Pays Bas, pays qui n'en sont pas producteurs. Leurs expéditions, d'un tonnage égal à environ 14 % des importations françaises (FAOSTAT, 2004), sont évidemment des réexportations. Afin de remontrer aux vraies origines pour ce tonnage, on a effectué les bilans d'approvisionnement en soja de ces deux pays. Cette analyse conduit de nouveau au Brésil, à l'Argentine et aux Etats-Unis. En tout, ces trois pays assurent ensemble 95 % des importations françaises, 81 % provenant du Brésil, 12 % de l'Argentine et 2 % des Etats-Unis. La figure 5.1 illustre le réseau des flux de soja pour

l'approvisionnement de la France, y compris les réexportations de la Belgique et des Pays-Bas (tonnage exprimé en équivalent tourteau).



Importations nettes totales pour l'élevage français : 4520,8 kt eq. tourteau
Importations d'origine brésilienne, argentine et états-unienne : 4307,1 kt eq. tourteau (95,3%)
Importations nettes directes depuis ces trois origines principales : 3680,4 kt eq. tourteau (85 %)
Importations nettes indirectes depuis ces trois origines principales : 626,7 kt eq. tourteau (15 %)

Figure 5.1 : Circuit d'approvisionnement de la France en soja. Importations nettes exprimées en kilotonnes (kt) équivalent tourteau. Source des données : FAOSTAT, 2004.

L'empreinte parisienne se situe donc en partie dans ces trois pays. Sa taille sera proportionnelle à la consommation de tourteau des cheptels et fonction des rendements agricoles aux origines de la production.

Exprimé en tonnage de matière sèche (MS), le rendement en grain de soja s'élève à 2,14 tonnes/ha au Brésil, 2,03 tonnes/ha en Argentine et 2,61 tonnes/ha aux Etats-Unis (FAO, 2004). Pour le soja en provenance des pays tiers, on a utilisé le rendement moyen mondial, égal à 2,07 tonnes/ha. Le tableau 5.2 récapitule la part des importations de soja et les rendements culturaux par pays d'origine.

Tableau 5.2 : Répartition en termes d'origines et rendement culturaux correspondants (tonnes de MS/ha) aux importations françaises de soja en 2004. Source : FAOSTAT, 2004.

	Parts du tonnage d'importation par provenance	Rendement cultural
Argentine	12 %	2,03
Brésil	81 %	2,14
Etats-Unis	2 %	2,61
Autres	5 %	2,07
Totaux et moyennes	100 %	2,13

Colza

La France est exportatrice nette des graines de colza mais en importe du tourteau. Cette situation paradoxale s'explique du fait que la production indigène est majoritairement exportée sous forme de graines sans que la fraction restante suffise pour subvenir aux besoins de tourteau des cheptels (qui, en tant que débouché, représentent 99 % de l'utilisation interne Agreste, 2010). Le taux d'approvisionnement[1] en graines, fortement variable d'une année à l'autre, est de 165 % en 2006 (contre par exemple 144 % en 1993, 286 % en 1998, 172 % en 2004 et 116 % en 2008) tandis que le taux d'approvisionnement en tourteau - nettement plus constant dans le temps - est de 20 % en moyenne sur la période 2000-2008 (Agreste, 2010). Ces chiffres indiquent que 65 % de la production des graines est exportée tandis que 80 % de la consommation des cheptels en tourteaux est importée depuis l'étranger.

Cette contradiction entre l'abondance de la production indigène des graines de colza et la forte dépendance de l'étranger pour le tourteau est intrigante. Pour appréhender le rapport de tonnage entre les deux flux, on a dressé le bilan combinatoire de l'approvisionnement national en graines et en tourteau, en tenant compte du coefficient de transformation de la graine en tourteau (P_f = 0,6, cf section 5.2). Le bilan est fait en équivalent-graines entre d'un côté la production agricole nationale (Agreste, 2004) et de l'autre les importations et les exportations sous forme de graines et de tourteau (FAO, 2004). D'après ce calcul, le taux généralisé d'approvisionnement

[1] Défini comme le rapport de tonnage entre la production indigène et l'utilisation intérieure (Agreste, 2010)

national de colza avoisine 140 %, c'est-à-dire qu'en termes absolus, la production française suffit largement aux besoins de tourteau des cheptels.

Etant donnée cette information, la question d'approvisionnement en tourteau se pose ainsi : est-ce que la France exporte des graines qu'elle réimporte par la suite sous forme de tourteaux ?

Afin d'y répondre, on a comparé le tonnage des exportations françaises de graines par lieu de destination avec le tonnage des importations de tourteaux par lieu de provenance, comparaison toujours faite en équivalent-graines.

La quasi-totalité des échanges de la France sont entretenus avec quatre pays européens : l'Allemagne, la Belgique le Royaume-Uni et les Pays-Bas. Ces quatre pays sont à la fois les destinataires de 96 % du tonnage des exportations françaises des graines et à l'origine de l'ensemble (99,99 %) des importations de tourteaux (FAOSTAT, 2004). Les soldes (tonnes) et les rapports des tonnages (%) entre les importations et les exportations françaises par lieu de provenance et de destination respectivement figurent dans le tableau 5.3. Selon que le bilan est positif ou négatif, les exportations françaises par pays de destination sont respectivement supérieures ou inférieures aux importations de colza de ces pays. Un bilan positif (rapport < 100 %) suggère que la France réimporte son colza sous forme de tourteau tandis qu'un bilan négatif (rapport > 100 %) que d'autres sources de colza concourent à l'approvisionnement français.

Tableau 5.3 : Solde et rapport en pourcentage des importations et des exportations françaises de colza (y compris des graines et du tourteau, le tout étant exprimé en équivalent graines) par pays d'origine et de destination. Source : FAOSTAT, 2004.

	Allemagne	Belgique	Royaume-Uni	Pays-Bas
Solde (tonnes)	888 730	239 378	-59 127	-4 049
Rapport en % (importation/exportation)	16	40	178	117

Le bilan est positif avec l'Allemagne et la Belgique et négatif avec les Pays-Bas et le Royaume-Uni. Ainsi, pour les deux derniers pays, la différence de tonnage semble avoir d'autres origines que la France. Or, l'examen de leurs bilans

d’approvisionnement respectifs met en lumière des échanges indirects avec celle-ci. Allemagne et Belgique exportent ensemble 80 000 tonnes de graines au Royaume-Uni (en assurant ainsi avec la France 85 % des importations totales) et environ 22 200 tonnes aux Pays-Bas. Ces tonnages, nettement supérieurs aux soldes négatifs respectifs du tableau 5.3, sont possiblement d'origine française puisqu'ils sont fournis par des pays qui s'approvisionnent par la France.

La concordance des tonnages permet donc d’admettre que le tourteau importé en France provient de graines produites en France et triturées à l’étranger. Il s'agit évidemment d'une simplification, qui est en revanche fort plausible. On résume le schéma d’approvisionnement dans la figure 5.2.

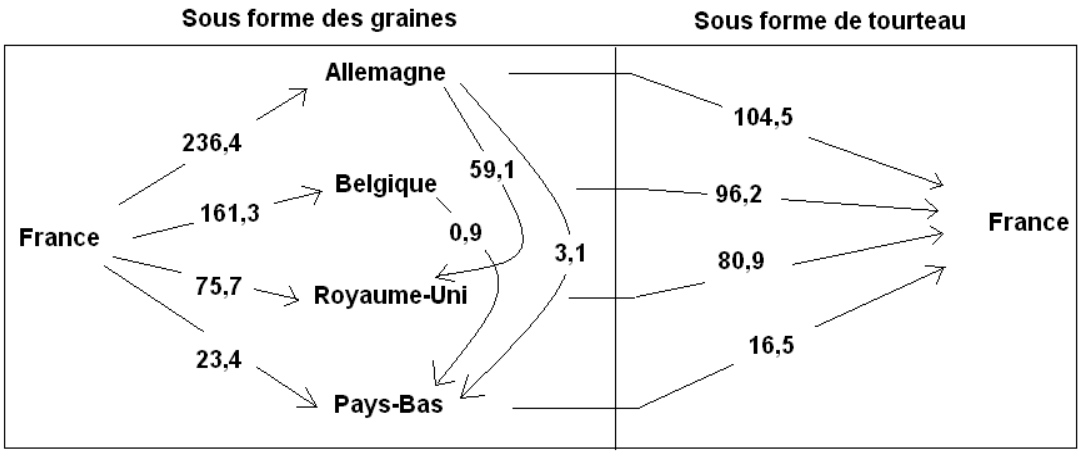


Figure 5.2 : Exportations et importations françaises de colza sous forme respectivement de graines et de tourteaux. D’après : FAOSTAT, 2004. Voir dans le texte pour les détails.

La question des provenances du colza se pose de nouveau à l’échelle des régions. Plus précisément, peut-on envisager que des exploitations d’élevage aient exporté du colza pour le réimporter sous forme de tourteau ? La réponse est négative : l’élevage et les cultures oléagineuses sont spatialement ségrégués à l’échelle des régions comme à celle des exploitations (Agreste, 2005b). Les six premières régions françaises de production de colza (assurant ensemble 75 % de la production nationale) abritent moins de 10 % et 25 % respectivement des cheptels porcins et bovins (Statistique agricole annuelle, 2006). La ségrégation est davantage frappante à l’échelle des exploitations. Pour les exploitations porcines de toutes les régions françaises, les oléo-protéagineux représentent moins de 2 % des surfaces cultivées, le reste étant consacré

aux céréales (Agreste, 2007a). La situation est similaire pour les bovins. Par conséquent, comme pour le soja, les surfaces nourricières relatives aux tourteaux de colza sont externalisées des exploitations d'élevage. Cependant, et sans surprise, leur localisation n'est pas connue. On a donc considéré que le tourteau de colza (dont la majeure partie a transité par l'étranger) provient des six régions françaises en tête de la production nationale et proportionnellement à leurs superficies de production. Le tableau 5.4 en montre la répartition en pourcentage et les rendements culturaux correspondants (Statistique agricole annuelle, 2006), ces derniers étant exprimés en tonnage de matière sèche par hectare. L'empreinte relative à la consommation de tourteau peut donc être obtenue avec l'équation 3. D'après nos simulations, le tourteau de colza représente en moyenne 50 % de la consommation de tourteau des porcs comme des vaches laitières.

Tableau 5.4 : Répartition de l'empreinte parisienne relative au colza et rendements culturaux moyen pour les six premières régions de production (assurant ~75 % de la production nationale). Source : Agreste, 2004. Voir dans le texte pour des détails.

Régions de production de colza	% de l'empreinte parisienne relative au colza	Rendement en grain (Tonnes de MS/ha)
Centre	32	2,5
Bourgogne	18	2,7
Champagne-Ardenne	16	2,8
Lorraine	14	2,8
Poitou-Charentes	12	2,4
Picardie	8	3,0
total/moyenne	100	2,6

Céréales

Les céréales font partie du produit agricole des exploitations d'élevage (Agreste, 2005b, 2007a), ce qui signifie que la consommation des cheptels provient possiblement d'un mélange de céréales d'importation et de production locale. Pour les bovins dont la consommation de céréales est faible - 11 % en moyenne du tonnage des rations des bovins à viande et 6 % pour les vaches laitières (cf. chapitre 4) -, on a fait l'hypothèse qu'elle est entièrement d'origine locale. Cette hypothèse d'autosuffisance des exploitations conduit à en réduire la dépendance de l'extérieur et à en alléger les bilans d'azote (Naylor et al, 2005, Galloway et al., 2007, Chatzimpiros et Barles, 2010b).

Contrairement à l'alimentation des bovins, les céréales sont majoritaires dans les rations des porcs. De ce fait, le niveau d'autonomie céréalière des exploitations mérite d'être évalué minutieusement sur la base du bilan entre besoins et production à l'échelle des fermes. Il s'agit de comparer le nombre réel des porcs dans les exploitations au nombre soutenable par la production locale.

Le nombre des porcs entretenus est mesuré par les recensements agricoles. On dispose de données sur les densités de porcs – nombre recensé par hectare de surface agricole utilisée (SAU) des exploitations d'élevage - par région administrative française (Agreste, 2007a). D'autre part, le nombre de porcs soutenable est fonction du besoin par tête et de la productivité du territoire, c'est-à-dire des rendements agricoles. La consommation des céréales par type de graine (blé, orge, et maïs) est disponible par nos simulations et les rendements agricoles régionaux correspondants sont disponibles dans les statistiques agricoles (Statistique agricole annuelle, 2006). Blé, orge et maïs représentent respectivement 64 %, 24 % et 12 % de la consommation céréalière des porcs.

La différence entre les densités recensées et les densités soutenables correspond au nombre des porcs (par unité de surface) soutenus par des céréales d'importation. Il s'agit des déficits en céréales du secteur porcin exprimés par région administrative française. Le tableau 5.5 indique les densités recensées, les densités soutenables et le taux d'autonomie des exploitations en céréales, ce qui correspond à la part des porcs excédentaires vis-à-vis de cet aliment.

Les exploitations porcines de seulement cinq régions - dont la production annuelle totale représente à peine 7 % de la production nationale - sont en autonomie céréalière. Pour le reste, les exploitations sont tributaires des céréales d'importation. En Bretagne, région rassemblant près de 60 % de la production porcine nationale, l'autonomie céréalière des exploitations est de 40 %, c'est-à-dire que 60 % des besoins reposent sur des importations. Pour la France entière, le taux moyen d'autonomie (pondéré par la production) est de 60 %. D'après ces calculs, l'approvisionnement parisien actuel engendre l'importation d'environ $350*10^3$ tonnes de céréales dans les exploitations d'élevage, soit un influx de 6 600 tonnes d'azote (la teneur moyenne du

mélange des trois céréales étant de 1,9 %). On retrouvera ce chiffre dans le chapitre 6 où on dressera le bilan d'azote de l'approvisionnement parisien.

Tableau 5.5 : Densités recensées et soutenables des porcs par région française et taux d'autonomie en céréales des exploitations. Source : Agreste, 2007a et cette étude.

	Densités recensées (têtes/ha)	Densités soutenables (têtes/ha)	Taux d'autonomie en céréales (%)
Alsace	24	23	95
Aquitaine	24	18	72
Auvergne	24	18	76
Bourgogne	24	22	89
Bretagne	53	21	40
Centre	24	22	89
Champagne-Ardenne	24	24	100
Franche-Comté	24	22	92
Île-de-France	24	24	100
Languedoc-Roussillon	15	11	73
Limousin	24	17	69
Lorraine	24	22	91
Midi-Pyrénées	26	16	62
Nord - Pas-de-Calais	24	26	100
Normandie-Basse	24	23	94
Normandie-Haute	24	25	100
Pays-de-la-Loire	29	20	69
Picardie	24	26	100
Poitou-Charentes	24	19	79
PACA	15	11	75
Rhône-Alpes	24	19	77

Défaut des données sur les origines réelles du tonnage des céréales d'importation, on en a fait la répartition au prorata des productions des régions céréalières principales. Pour chaque type de graine (blé, orge, maïs), on a retenu les régions regroupant 60 % de la production nationale.

Les onze régions ainsi retenues apparaissent au tableau 5.6[1]. Les parts associées sont déduites de la répartition du tonnage de production pour la somme des trois céréales et déterminent celle de l'empreinte parisienne. Le Centre, la Picardie, la Champagne-Ardenne, la Bourgogne, le Nord-Pas-de-Calais, la Haute-Normandie et la Picardie sont notamment concernés pour la production de blé et d'orge et l'Aquitaine, le

[1] On a exclut les régions de la Bretagne, du Pays-de-la-Loire et de la Normandie-Basse en raison de leurs forts besoins internes d'élevage.

Poitou-Charentes, le Midi-Pyrénées, l'Alsace et le Rhône-Alpes pour la production de maïs.

Tableau 5.6 : Répartition de l'empreinte parisienne dans les régions céréalières principales. Source : Cette étude.

	% de l'empreinte parisienne de viande de porc, relative aux céréales d'importation
Centre	23
Champagne-Ardenne	15
Picardie	14
Poitou-Charentes	12
Bourgogne	10
Nord-Pas-de-Calais	8
Normandie-Haute	6
Lorraine	4
Aquitaine	3
Midi-Pyrénées	2
Alsace	1
Rhône-Alpes	1

Pulpe de betterave et luzerne déshydratée

Sous-produit de transformation des betteraves sucrières, la pulpe de betterave représente selon nos simulations moins de 1 % des rations des vaches laitières (soit 1,5 % de l'apport total de N). Il s'agit d'une matière d'importation pour les fermes.

La culture des betteraves est très concentrée dans le territoire français. On la trouve dans neuf régions seulement dont quatre assurent plus de 80 % de la production nationale (Statistique agricole annuelle, 2004). La Picardie est en tête avec 40 %. Etant données l'utilisation marginale de cette matière et la concentration spatiale de la production, on a simplifié l'analyse des origines de la pulpe des rations en considérant que tout provient de Picardie. L'empreinte correspondante est donc fonction des rendements picards et de la « fraction valeur » *vf* de la pulpe (cf. tableau 5.1).

En ce qui concerne la luzerne, nos simulations ne font pas la distinction de la consommation entre l'état frais et l'état déshydraté. On a considéré que la luzerne est un fourrage grossier faisant partie du produit agricole des exploitations d'élevage au même titre que l'herbe, le maïs et les autres légumineuses fourragères. Sa part dans les rations des bovins à viande est estimée à 8 % et pour les vaches laitières à environ 3 %.

Partage de l'alimentation animale entre fourrages locaux et d'importation

On a ainsi identifié par espèce animale et par région française de production, la part et les provenances des fourrages d'importation des animaux approvisionnant Paris. Pour la viande en provenance de l'étranger (19 % de la viande porcine et 19 % de la viande bovine en 2006, cf. chapitre 3), le mode d'approvisionnement des élevages est considéré identique qu'en France.

Avant de procéder au calcul de l'empreinte spatiale, on présente ci-après le partage de l'alimentation des cheptels approvisionnant Paris entre fourrages locaux et d'importation, ces derniers étant exprimés par domaine de spécialisation dans la production fourragère (tableau 5.7). La part de la production locale exprime le taux d'autonomie en fourrages des exploitations.

Tableau 5.7 : Partage de l'alimentation animale (tonnage de N) au début du XXIe siècle par type d'élevage approvisionnant Paris et par domaine de spécialisation dans la production fourragère. Source : Cette étude

Produit	Total pour l'élevage (10^3 tonnes N)	Production au sein des exploitations d'élevage	Fourrages importés dans les exploitations d'élevage				
		Fourrages divers selon le secteur (%)	Céréales (%)	Colza (%)	Pulpe des betteraves (%)	Soja (%)	Total (%)
Viande bovine	73,8	89	-	-	-	11	100
Viande porcine	35,9	31	23	21	-	26	100
Lait	11,0	48	-	22	1	29	100
Total	120,8	68	7	8	0,1	17	100

Pour l'ensemble de la viande bovine, porcine et du lait approvisionnant Paris, le besoin en protéines de la production est de $120*10^3$ tN, dont 68 % sont fournis par des fourrages produits au sein des exploitations.

Le taux d'autonomie des exploitations présente des disparités fortes d'un secteur à l'autre. Elle s'élève en moyenne à environ 30 % en production de la viande porcine et avoisine 50 % et 90 % respectivement en productions laitière et de viande bovine.

Compte tenu des efficacités de conversion des protéines végétales en protéines animales (NCE) des trois secteurs (10 % pour la viande bovine, 23 % pour la viande porcine et 25 % pour le lait), les quantités et la répartition en termes d'origines fourragères des protéines mobilisées pour chaque gramme de protéines importé à Paris sous forme de viande bovine, porcine et de lait sont indiquées dans le tableau 5.8.

Tableau 5.8 : Répartition des besoins en protéines par unité des protéines importées Paris sous forme de viande et de lait. Source : Cette étude.

	Protéines (N*6,25) sous forme des produits animaux (gramme)	Protéines (N*6,25) sous forme de fourrages (grammes)					
		Fourrages locaux	Céréales	Colza	Pulpe des betteraves	Soja	Total
Viande bovine	1	8,7	0,0	0,0	0,0	1,1	9,8
Viande porcine	1	1,3	1,0	0,9	0,0	1,1	4,3
Lait	1	1,9	0,0	0,9	0,1	1,2	4,0
Moyenne (pondérée)	1	4,4	0,4	0,5	0,0	1,1	6,5

Par exemple, l'importation d'un gramme de protéines sous forme de viande porcine sollicite en moyenne 1,3 gramme de protéines fourragères dans les exploitations d'élevage, un gramme dans les régions céréalières, 0,9 gramme dans les régions produisant du colza et 1,1 gramme de protéines de soja en provenance du Brésil, de l'Argentine et des Etats-Unis.

Les disparités vis-à-vis des taux d'autonomie des exploitations sont fortes d'une région à l'autre pour les trois secteurs. Les figures 5.3, 5.4 et 5.5 montrent les valeurs régionales par secteur, les régions étant classées en ordre décroissant de la part des protéines importées.

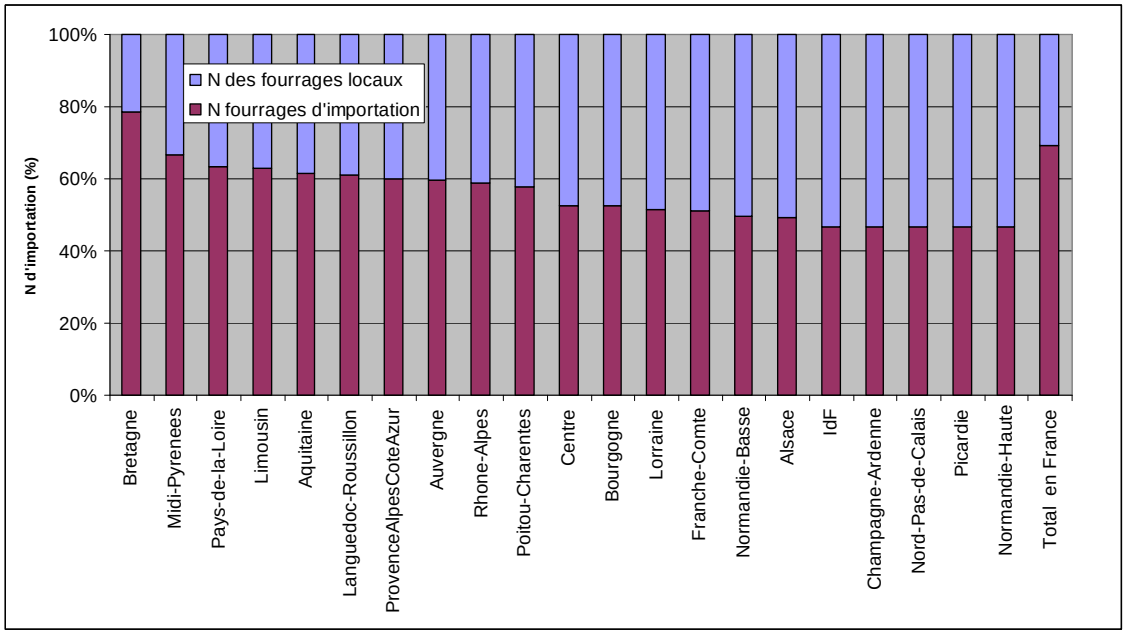


Figure 5.3 : Part des protéines locales (produites au sein des exploitations d'élevage) et importées pour la production de la viande porcine au début du XXIe siècle par région française d'élevage (% N). Source : Cette étude

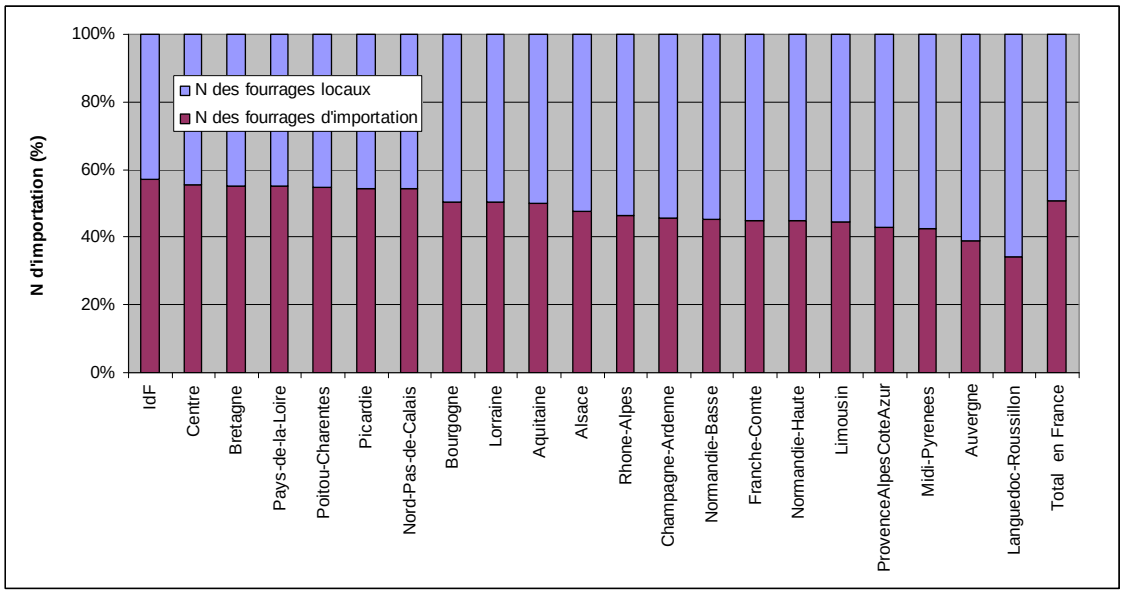


Figure 5.4 : Part des protéines locales (produites au sein des exploitations d'élevage) et importées pour la production laitière au début du XXIe siècle par région française d'élevage (% N). Source : Cette étude

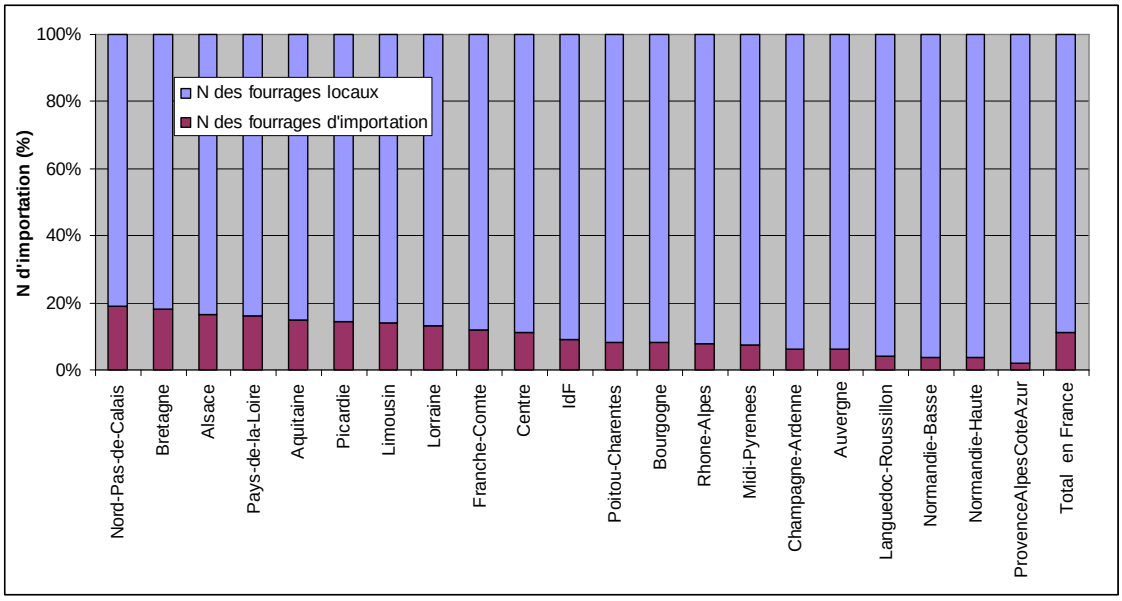


Figure 5.5 : Part des protéines locales (produites au sein des exploitations d'élevage) et importées pour la production de la viande bovine au début du XXIe siècle par région française d'élevage (% N). Source : Cette étude

Les disparités concernent les trois secteurs. La part d'importation varie d'environ 45 % à 80 % dans le secteur porcin, de 35 % à 60 % dans le secteur laitier et de 2 % à 20 % dans le secteur de la viande bovine.

Dans ce qui suit, le tonnage des importations parisiennes de viande bovine, porcine et de lait est exprimé en azote afin de s'affranchir de l'hétérogénéité de composition des trois produits, de les rendre additionnables et d'en faire la somme en termes d'empreinte.

5.3 L'empreinte spatiale de la consommation parisienne, XIXe – XXIe siècles.

Pour la viande bovine, porcine et le lait, l'empreinte spatiale de l'agglomération parisienne a plus que triplé entre les débuts des XIXe et XXe siècles pour une augmentation d'un facteur 5 de l'approvisionnement parisien, puis elle a diminué presque de moitié entre les débuts de XXe et XXIe siècle pour une augmentation d'un facteur 2,3 de l'approvisionnement parisien.

Exprimés en unités absolues, le tonnage des importations parisiennes (tonnes de N) et les empreintes spatiales correspondantes (10^3 ha) par produit et par date sont indiqués

dans le tableau 5.9. Les trois dernières colonnes montrent les taux de croissance d'une date à l'autre.

Tableau 5.9 : Importations parisiennes de viande bovine, porcine et de lait et empreintes spatiales correspondantes, XIXe- XXIe siècles. Sources : Cette étude.

		Unités	Début XIXe	Début XXe	Début XXIe	Taux de croissance XIXe-XXe	Taux de croissance XXe-XXIe	Taux de croissance XIXe-XXIe
Bovin	Importations parisiennes	(tonnes N)	1027	4787	7614	4,7	1,6	7,4
	Empreinte	(10^3*ha)	382,4	1150,0	729,3	3,0	0,6	2,0
Porc	Importations parisiennes	(tonnes N)	155	1082	8351	7,0	7,7	53,9
	Empreinte	(10^3*ha)	54,3	344,6	257,5	6,3	0,7	4,7
Lait	Importations parisiennes	(tonnes N)	412	2054	2755	5,0	1,3	6,7
	Empreinte	(10^3*ha)	61,4	223,6	80,2	3,6	0,4	1,3
Total	Importations parisiennes	(tonnes N)	1594	7923	18600	5,0	2,3	11,7
	Empreinte	(10^3*ha)	498,1	1718,1	1067,0	3,4	0,6	2,2

Notons que par opposition aux importations physiques des produits, l'empreinte spatiale est une forme d'importation virtuelle de sols. Terme initialement utilisé vis-à-vis de l'eau consommée en agriculture (Allan, 1998), le flux virtuel correspond aux ressources qui sont mobilisées dans la production des biens consommés, mais qui ne sont pas contenues dans les produits et ne sont donc pas transférées physiquement. Cette expression est pertinente indépendamment de la ressource et du consommateur concernés, elle est donc applicable dans le cas de l'appropriation des sols, de l'eau etc. destinés à l'approvisionnement humain ou animal.

L'empreinte spatiale de l'agglomération parisienne relative à l'approvisionnement en viandes bovine et porcine et en lait a suivi une évolution irrégulière entre les XIXe et XXIe siècles. En tout, on voit que l'augmentation d'un facteur de presque 12 des importations entre le début des XIXe et XXIe siècles s'est accompagnée de seulement un doublement de la superficie mobilisée dans la production ; preuve que la révolution agricole (entendue dans le sens de la productivité) l'a emporté sur l'évolution démographique parisienne. On reviendra sur ce point ci-après.

En tant que surface assurant la subsistance alimentaire d'une population, l'empreinte constitue un espace « extra-urbain » vital et complémentaire à l'espace urbain au sens propre. On a suivi l'évolution du rapport des superficies entre les deux types de surfaces aux trois dates de notre étude. Pour le début des XIXe et XXe siècles, les données sur l'étalement parisien sont tirées de Merlin (1967). Selon cette source, l'agglomération mesure 105 km^2 en 1826[1] et 1 700 km^2 en 1911, dates s'approchant le mieux de celles de nos calculs. Au début du XXIe, l'IAURIF (2005) évalue la superficie de l'agglomération parisienne (10,1 millions d'habitants) à 2576 km^2, étendue correspondant à la somme des espaces construits (habitat, transport, activités etc.) et des espaces ouverts (parcs, jardins, terrains de sport et vacant urbains)[2]. Le tableau 5.10 indique, aux trois dates, le rapport des superficies et l'emprise au sol, par habitant de l'agglomération, à la fois au sein de la ville et pour la somme des espaces urbains et extra-urbains (ha/hab).

Tableau 5.10 : Rapport des superficies urbaines et extra-urbaines de l'agglomération parisienne pour son ravitaillement en viandes et en lait et emprise au sol par habitant. Source : Merlin, 1967, IAURIF, 2005, et cette étude.

	Emprise au sol (10^3 *ha)		Rapport (empreinte/ superficie agglomération)	Population agglomération (10^6 habitants)	Emprise au sol par habitant (ha/hab)	
	Superficie agglomération	Empreinte			Urbaine	Somme urbaine et extra-urbaine
Début XIXe	10,5	475,2	45,3	0,8	0,013	0,616
Début XXe	170,0	1718,1	10,1	3,7	0,046	0,506
Début XXIe	257,6	1058,0	4,1	10,1	0,025	0,130

[1] Cette surface semble élevée, Paris couvrant à peine 33,4 km^2 et rassemblant plus de 90 % de la population du département de la Seine (472 km^2). Nous n'avons pas trouvé d'autre évaluation de la surface urbanisée au début du XIXe siècle.

[2] Notons que cette superficie ne tient pas compte des zones urbanisées comme par exemple des îlots professionnels (les campus universitaires en sont des exemples des plus en plus fréquents) situées au-delà du périmètre de l'agglomération mais dont les activités s'adressent (majoritairement) aux habitants de l'agglomération.

La comparaison montre que le rapport des superficies a nettement diminué dans le temps et que la ville s'étend actuellement sur un espace égal à 25 % de son empreinte. En termes absolus, l'augmentation d'un facteur 12 de la population depuis le début du XIXe siècle s'est accompagnée de l'augmentation d'un facteur 25 de la superficie urbaine et du doublement de l'empreinte alimentaire. Ramené à la population, l'emprise au sol (ha/hab) a doublé au sein de l'agglomération, et a diminué d'un facteur cinq pour la somme des superficies urbaine et extra-urbaine. Enfin, il est intéressant de noter que la taille de l'empreinte parisienne actuelle est presque égale à la superficie agricole utile (SAU) moyenne des régions françaises et seulement deux fois supérieure à la SAU des exploitations professionnelles en Ile-de-France - seulement car il s'agit de la région française la plus urbanisée et de l'une des plus petites. On s'aperçoit ainsi que la diminution au cours du XXe siècle des besoins surfaciques pour le ravitaillement, rapproche l'empreinte parisienne des trois produits en termes d'étendue de la disponibilité des terres agricoles régionales. Pourtant l'écart risque de s'élargir de nouveau en raison à la fois de la croissance démographique et du recul de la SAU régionale.

L'amélioration globale de la productivité (capacité productive) est le double résultat de la multiplication des rendements culturaux et de l'augmentation de l'efficacité de conversion de la biomasse végétale en biomasse animale (NCE, cf. chapitre 4). Ainsi, un hectare fournit au début du XXIe siècle plus de biomasse végétale qu'au début du XIXe siècle, de même que cette biomasse est de manière générale convertie plus efficacement en biomasse animale. En tout, le tonnage des produits animaux que l'on peut obtenir sur une surface agricole donnée, dépend à la fois de l'étendue, des rendements agricoles et de la NCE du métabolisme animal. En évaluant la succession dans le temps et les parts contributives de ces trois facteurs dans l'augmentation de la production bovine (viande et lait confondus) de trois régions françaises d'élevage au début des XIXe, XXe et XXIe siècles[1], Chatzimpiros et Barles (2010b) ont conclu que le triplement de la production au cours du XIXe siècle s'est accompli à 60 % par l'expansion de la surface nourricière des animaux, à 35 % par la croissance de la NCE

[1] Il s'agit de la Bretagne, de la Normandie et du Pays-de-la-Loire, suivant le découpage administratif actuel du territoire.

et à 5 % seulement par l'amélioration de la productivité agricole. En revanche, le quadruplement de la production au cours du XXe siècle - et surtout depuis les années 1950 – s'est appuyé pour près de 80 % sur l'augmentation des rendements culturaux, pour environ 20 % sur celle de la NCE des animaux, tandis que l'étendue des terres nourricières est demeurée pratiquement stationnaire. Dans le cas de l'approvisionnement parisien, la diminution de l'empreinte alimentaire au cours du XXe siècle est davantage remarquable du fait de l'amélioration spectaculaire de la NCE des porcs dont la productivité, contrairement à celle des bovins, est demeurée stationnaire au XIXe siècle. Ainsi, l'augmentation d'un facteur 7,7 de la consommation de la viande porcine entre le début des XXe et XXIe siècles s'est accompagnée d'une diminution de 25 % de l'empreinte spatiale correspondante.

Si on ramène les tonnages des importations à l'étendue des empreintes, on obtient par date et par région d'approvisionnement la capacité productive des différents élevages (kg d'azote de viande et de lait par hectare de surface nourricière, kg N/ha). La figure 5.6 montre les capacités moyennes pour l'ensemble de l'aire d'approvisionnement et la figure 5.7 les valeurs spécifiques aux différentes régions.

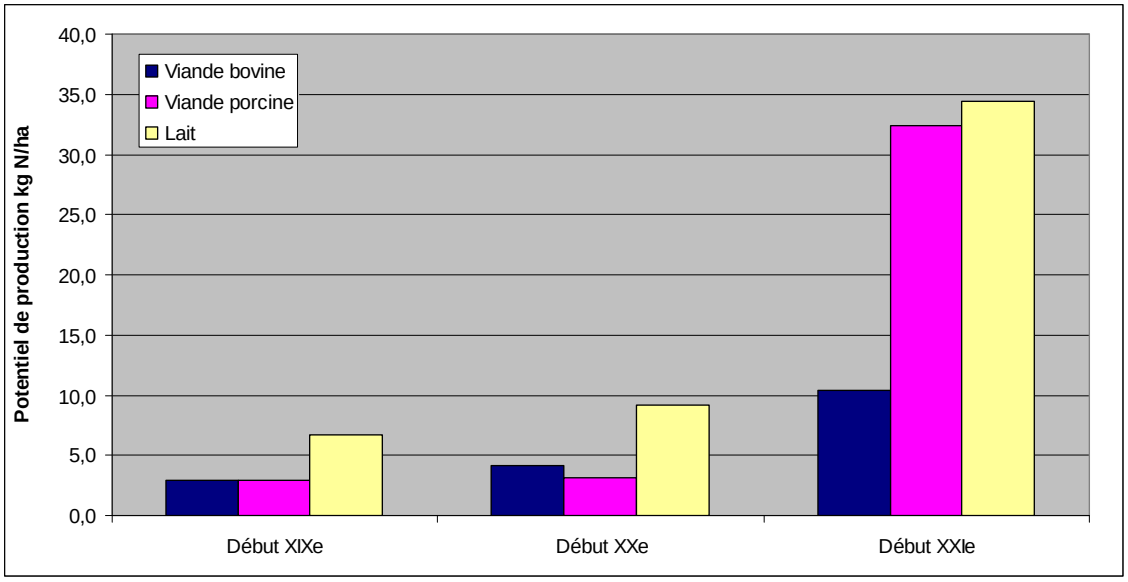


Figure 5.6: Potentiels de production moyens (kg N/ha) des systèmes agraires approvisionnant Paris en viande et en lait au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Source : Cette étude.

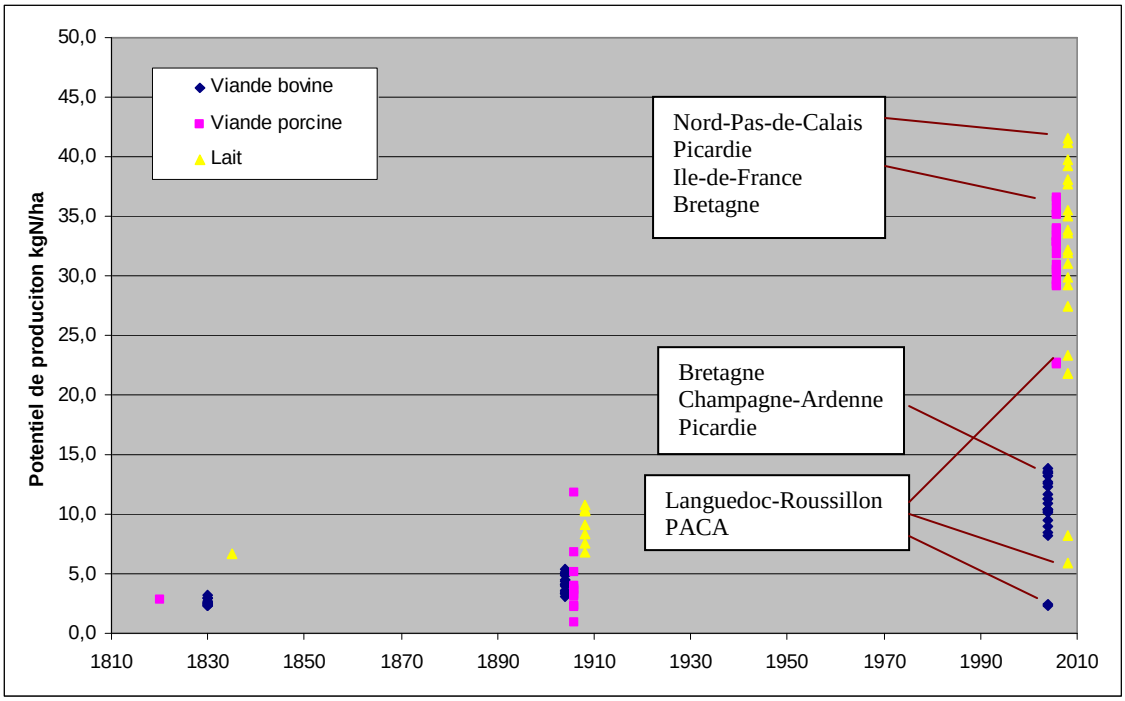


Figure 5.7: Dispersion des potentiels de production (kg N/ha) par région approvisionnant Paris en viande et en lait au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Source : Cette étude.

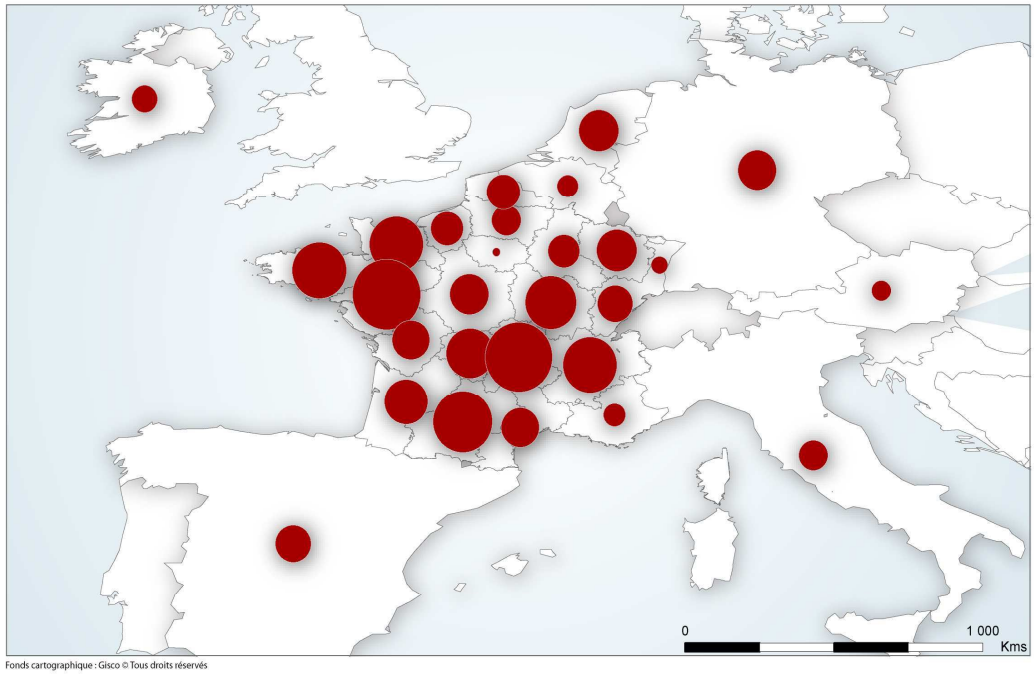
Les potentiels de production sont calculés en divisant la production animale des fermes par la surface nourricière totale, c'est-à-dire la somme des surfaces nourricières au sein et en dehors des exploitations d'élevage. Il s'agit d'une mesure spatialement agrégative car la fraction externalisée de la surface nourricière peut se situer à des milliers de kilomètres des élevages.

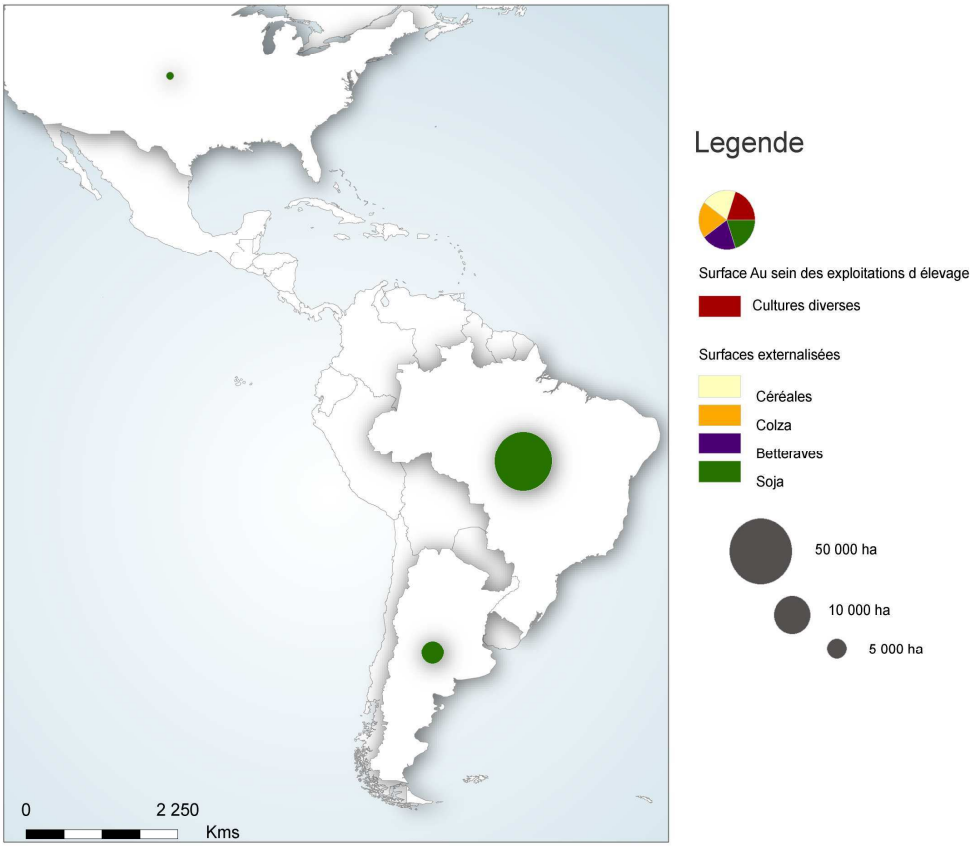
On s'aperçoit par la figure 5.7 que la capacité productive est, pour une même date, fortement variable parmi les régions, en fonction surtout des différences de composition des rations et de rendements culturaux des fourrages. Par ailleurs, les disparités régionales semblent croître au XXe siècle et reflètent les fortes divergences en termes d'intensivité d'utilisation des ressources pour l'élevage. Quoiqu'un peu floue, la distinction entre les systèmes intensifs et extensifs concerne à la fois les fourrages utilisés, par exemple la part des fourrages d'importation dans l'alimentation des cheptels, et le mode de production des cultures vis-à-vis par exemple du recours plus ou moins massif aux intrants de production y compris de l'eau et des engrais azotés. Dans les systèmes extensifs le prélèvement des ressources par intervention anthropique est en général moins intense et les superficies de production plus étendues. On remarque par exemple dans la figure 5.7 que la productivité en viande

bovine et en lait de deux régions, à savoir le Languedoc-Roussillon et la Provence-Alpes-Côte-D'azur, se situe au niveau d'il y a cent ans, car les rendements culturaux et les compositions des rations n'ont guère évolué. En effet, l'élevage dans ces régions – qui y reste une activité marginale – est moins dépendant des fourrages d'importation. Il s'appuie notamment sur la production des prairies recevant des faibles doses d'engrais azoté (Agreste, 2008d). En ce qui concerne la viande porcine, les écarts régionaux de productivité sont uniquement dus aux différences de rendements.

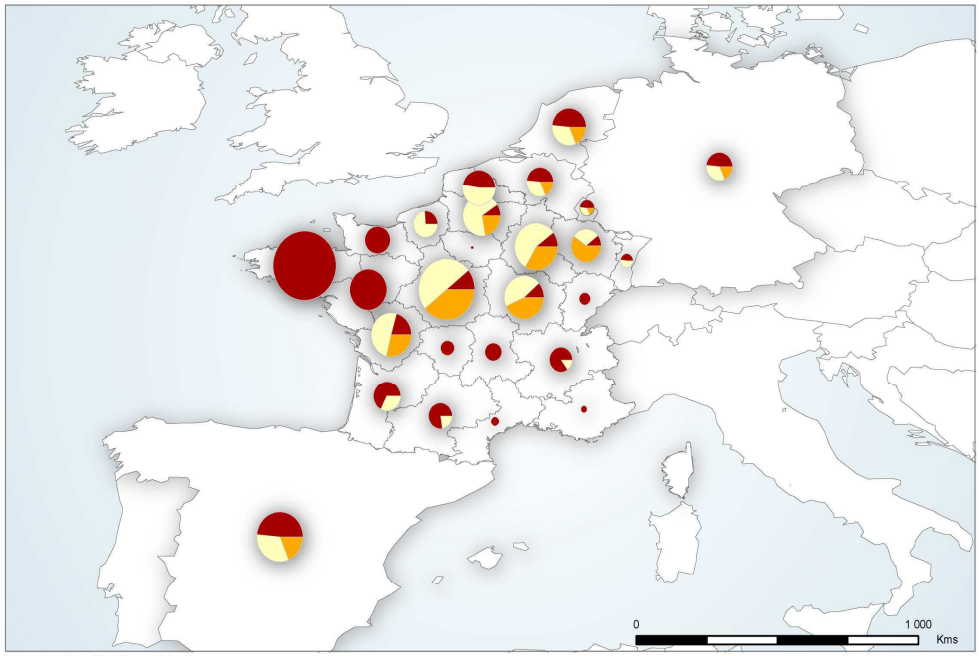
L'éclatement spatial de l'empreinte parisienne entre les exploitations d'élevage et d'autres lieux de production des fourrages d'importation est significatif au début du XXIe siècle et variable selon le produit : les élevages porcins externalisent plus de surface nourricière que les élevages laitiers et des bovins à viande, ils sont - comme on dit dans le domaine de l'économie rurale plus « hors-sol ». La disposition géographique de l'empreinte, analysée par lieu de production des fourrages, apparaît dans les cartes 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 pour la viande bovine, porcine, le lait et pour les trois produits ensemble respectivement[1]. L'échelle utilisée dans la représentation de l'empreinte est la même pour les trois produits séparément, en revanche, pour leur somme, les secteurs sont des tailles proportionnellement inférieures.

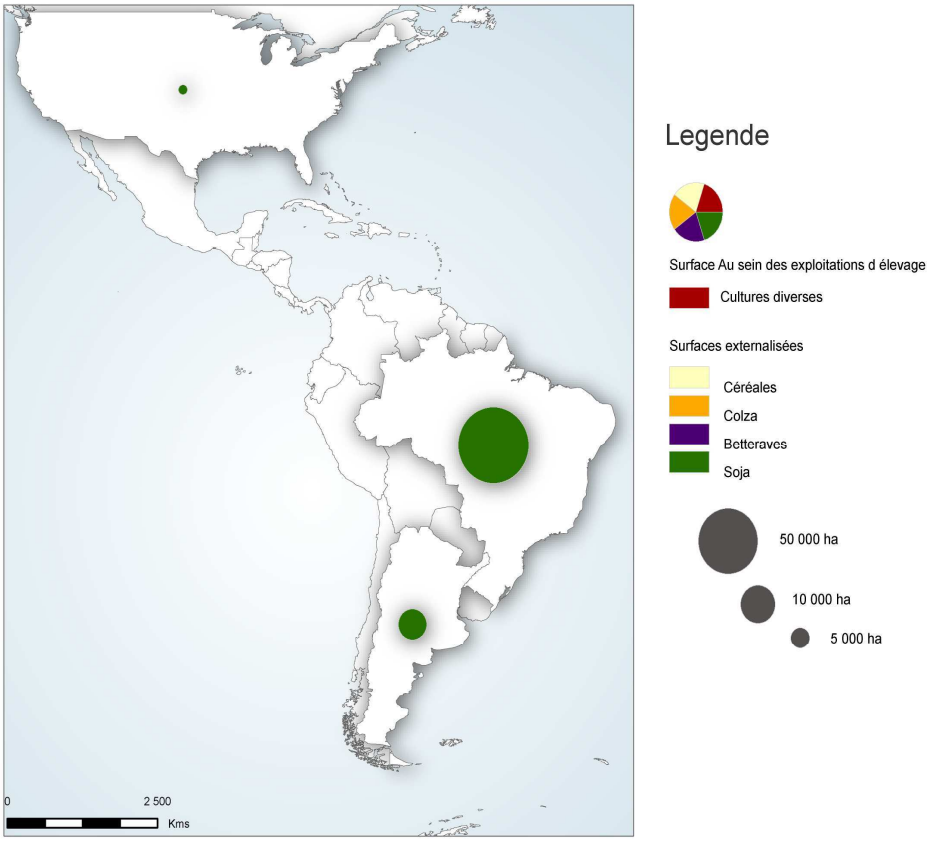
[1] Comme indiqué précédemment, l'empreinte liée aux importations des viandes depuis l'étranger est une fraction de l'empreinte totale, déduite proportionnellement au rapport des tonnages.



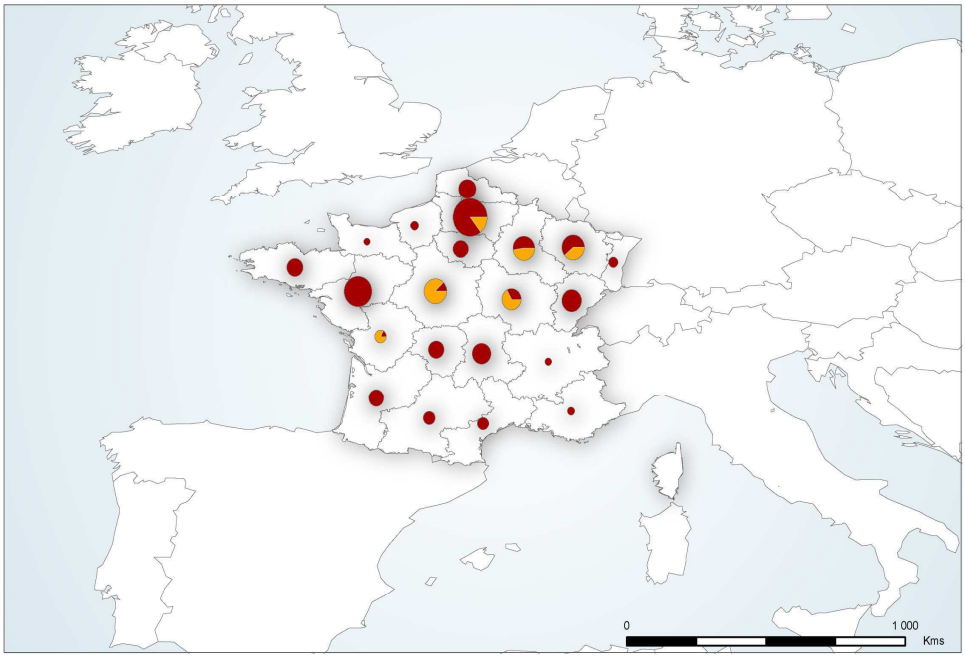


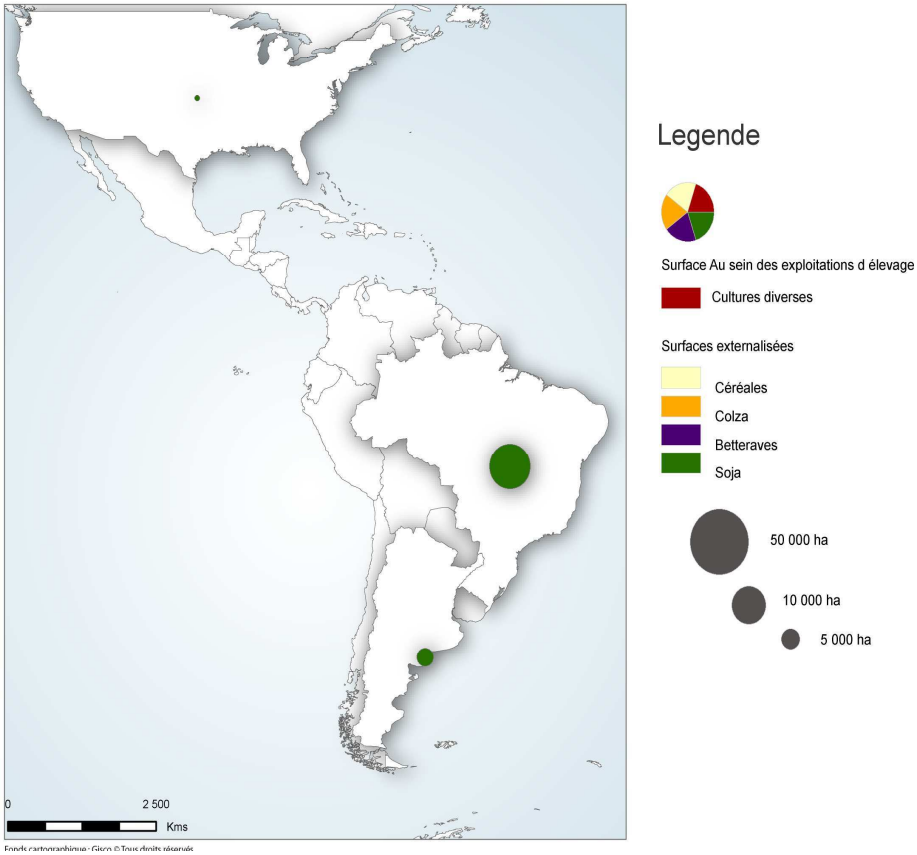
Carte 5.1 : L'empreinte spatiale (ha) de l'approvisionnement parisien de viande bovine au début du XXIe siècle par type de fourrage utilisé pour l'élevage. Source : Cette étude.





Carte 5.2 : L'empreinte spatiale (ha) de l'approvisionnement parisien de viande porcine au début du XXIe siècle, par type de fourrage utilisé pour l'élevage. Source : Cette étude.





Carte 5.3 : L'empreinte spatiale (ha) de l'approvisionnement parisien en lait au début du XXIe siècle, par type de fourrage utilisé pour l'élevage. Source : Cette étude

Dans le cas de la production de la viande bovine et selon nos simulations, tous les aliments sont produits au sein des exploitations d'élevage, sauf le soja, qui est importé de l'Amérique, en particulier du Brésil. La dépendance en termes des surfaces varie entre moins de 1 % en Provence-Alpes-Côte-D'azur et en Languedoc-Roussillon et jusqu'à environ 15 % en Bretagne et dans le Nord-Pas-de-Calais et correspond à des dépendances respectives en termes des protéines d'environ 2 % et 20 %.

Dans le cas de la production porcine, les exploitations bretonnes - où les densités des porcs sont maximales – sont « hors-sol » pour près de 75 %. Viennent ensuite les exploitations des Pays-de-la-Loire et de Midi-Pyrénées avec 50 % des surfaces nourricières externalisées.

L'empreinte due aux surfaces externalisées se situe majoritairement au centre de la France, dans des régions spécialisées en production céréalière et de colza. On note par exemple que l'empreinte parisienne dans la région du Centre, (région assurant 2 % des importations des porcs d'origine indigène mais une bonne part de la production nationale de céréales et d'oléagineux), s'approche en étendue à celle de la région de Bretagne, cette dernière assurant près de 60 % de l'approvisionnement. Par ailleurs, l'empreinte au Brésil résultant des importations de soja est de taille supérieure aux empreintes françaises, locales et externes, des toutes les régions vues séparément.

Par rapport aux viandes, l'empreinte relative à l'approvisionnement en lait est nettement moins étendue. La région française la plus affectée est la Picardie, où 84 % de l'empreinte régionale se situe au sein des exploitations - servant ainsi la production laitière locale -, 14 % est relative à la production du tourteau de colza - pour le compte donc d'autres régions - et 2 % résulte de la production de pulpe de betterave. Par ailleurs, la zone Est-Ouest, entre la Lorraine et la Bretagne, rassemble 33 % de l'empreinte parisienne. Pourtant, aux régions de Centre, de Bourgogne, de Champagne-Ardenne et de Lorraine cette empreinte correspond principalement à la production du tourteau de colza, il s'agit donc des superficies qui fournissent des protéines en d'autres régions. Les exploitations franciliennes sont les premières concernées. On estime la part externalisée de la surface nourricière à 50 % environ, pour une dépendance des protéines de 60 %. Par opposition, les exploitations de la

région de Languedoc-Roussillon sont les moins dépendantes de l'extérieur ; la part importée des protéines consommées par leurs vaches étant estimée à 30 %. En tout, une bonne part des besoins en protéines du cheptel laitier français est satisfaite par l'importation du tourteau de soja brésilien, produit sur une superficie avoisinant le quart de l'empreinte parisienne totale.

Le tableau 5.11 résume l'empreinte actuelle par produit alimentaire en termes d'étendue et de répartition des surfaces entre locales et externalisées. En tout (viande bovine, porcine et lait ensemble) environ 75 % de l'empreinte parisienne se situe au sein des exploitations d'élevage, la part externalisée concernant pour 7 % les céréales, pour 5 % le tourteau de colza et pour 12 % le tourteau de soja. Il s'agit d'un éclatement qui, on s'en souvient, dépend à la fois du tonnage des fourrages d'importation et des rendements agricoles aux lieux de production.

Tableau 5.11 : Empreinte spatiale au début du XXIe siècle, par domaine de spécialisation dans la production fourragère. Source : Cette étude

	Empreinte spatiale en unités absolues (10^3 ha)	Empreinte au début du XXIe siècle par domaine de spécialisation dans la production fourragère (voir dans le texte pour plus d'explications) [1]					
		Au sein des exploitations d'élevage	Dans les régions céréalières	Dans les régions produisant du colza	Dans les pays producteurs de betteraves	Dans les pays producteurs de soja	Total
		Empreinte spatiale (%)					
Bovin	729,4	94	-	-	-	6	100
Porc	248,5	38	26	17	-	19	100
Lait	80,2	65	-	14	0,3	21	100
Total	1058,0	78	6	5	0,0	10	100

A la différence des besoins d'importation des fourrages par les exploitations (qu'on a précédemment calculées en termes des protéines), le taux d'externalisation des surfaces nourricières ne constitue pas une mesure de l'autonomie des exploitations. En effet, la part externalisée dépend à la fois du rapport entre les besoins et la production fourragère des exploitations, et du rapport en termes de rendements agricoles entre les

[1] Cf. cartes 5.1-5.3

cultures locales et les fourrages d'importation. Toute chose par ailleurs égale, la part externalisée de la surface nourricière diminue si les rendements des cultures locales sont inférieurs à ceux des fourrages d'importation et vice-versa. La comparaison en termes à la fois d'autonomie fourragère et d'externalisation des surfaces nourricières pour l'élevage porcin en Ile-de-France et en Provence-Alpes-Côte-d'Azur en fournit un bon exemple. Les exploitations porcines franciliennes, bien qu'autonomes en céréales, se caractérisent par un taux d'externalisation supérieur à celui des exploitations provençales dont le déficit en céréales est de 25 % (cf. tableau 5.5). C'est parce que les rendements agricoles en Provence sont inférieurs à ceux des régions qui en comblent les déficits tandis que pour l'Ile-de-France le rapport est inverse. En un mot, l'ampleur et la répartition spatiale de l'empreinte sont des paramètres soumis aux disparités de productivité agricole des territoires fournissant les fourrages.

Mais en dehors des rendements agricoles, la productivité globale de l'élevage - et donc la taille de l'empreinte - dépend également, on s'en souvient, de l'efficacité de conversion du fourrage en biomasse animale. Ces deux facteurs ensemble déterminent la quantité de viande et de lait que l'on peut obtenir par unité de surface fourragère. Or, les caractéristiques agronomiques et nutritionnelles d'un fourrage peuvent avoir des effets contrastés sur l'efficacité globale de la production. Par exemple un fourrage de valeur nutritionnelle élevée et de rendement agricole faible aura un effet positif sur l'efficacité de conversion de la biomasse et un effet négatif sur l'étendue de la production. Dans le cas où les deux étapes (production végétale et animale) sont assurées par une même exploitation, les effets contrastés s'équilibrent, tandis que dans le cas contraire – c'est le cas des aliments d'importation – ils donnent lieu à une forme d'inégalité environnementale.

L'utilisation des tourteaux, aliments typiquement d'importation, particulièrement riches en azote, hautement digestibles mais issus des cultures à faibles rendements agricoles, est source d'inégalité. Leur utilisation permet d'accroître la productivité des cheptels avec des retombées positives évidentes chez l'importateur, tandis que le territoire d'exportation s'expose à l'occupation extensive d'espace avec un coût potentiellement grand pour l'environnement vis-à-vis des pollutions diffuses ou,

comme c'est le cas de la production de soja au Brésil, de la destruction de la forêt tropicale. Stimulée par la croissance de la demande mondiale en produits animaux, la culture de soja progresse très rapidement depuis quelques décennies dans plusieurs contrées au Brésil en convertissant des écosystèmes naturels, y compris de la forêt amazonienne, en terroirs agricoles (USDA, 2004). L'empreinte parisienne au Brésil s'élève à environ 90 * 10^3 hectares, soit 12 % de l'empreinte totale de Paris.

5.4 Conclusion

L'empreinte spatiale est une mesure géographiquement explicite de l'étendue des terres bio-productives en tant que support territorial de l'approvisionnement alimentaire d'une population, ici en viande porcine et bovine et en lait. Sa géographie dépend à la fois de l'autonomie fourragère des exploitations et de la localisation des territoires qui en comblent les déficits. On a calculé l'empreinte alimentaire parisienne et montré son évolution entre le début des XIXe, XXe et XXIe siècles en fonction de la structure des systèmes agraires et de leur capacité productive. Pour les aliments qui sont des sous-produits de transformation, le calcul de l'étendue de production tient compte du partage de masse et d'énergie du produit mère aux produits dérivés. Jusqu'à la moitié du XXe siècle, l'empreinte se situe à proximité des lieux d'élevage des animaux, elle est ainsi de géographie identique à celle de l'approvisionnement parisien. A partir de la deuxième moitié du XXe siècle, l'autonomie fourragère des exploitations diminue progressivement et engendre l'éclatement des surfaces nourricières des animaux, surtout en ce qui concerne l'apport des protéines et, pour les porcs, une partie des besoins en céréales. Le tourteau de soja provient pour sa majorité écrasante des Amériques – en particulier du Brésil (12 % de l'empreinte) -, celui de colza des régions françaises dont les plus productives sont au centre de la France et les céréales d'un grand nombre des régions dont la localisation dépend du type des graines. La dépendance fourragère des élevages présente des écarts régionaux importants. On l'a estimée entre 45 % et 80 % dans la production de la viande porcine, entre 30 % et 60 % dans la production laitière tandis qu'elle est nettement plus faible, voire quasi-absente dans certaines régions produisant de la viande bovine. A noter que par rapport aux exploitations d'autres pays, comme par exemple les Etats-Unis, où les secteurs d'élevage sont davantage industrialisés, ces niveaux de

dépendance fourragère peuvent être considérés comme modestes. Notons enfin qu'en raison des disparités de productivité d'un endroit et d'une culture à l'autre, le taux d'externalisation des surfaces nourricières d'élevage ne constitue pas, contrairement à la part des fourrages d'importation, une mesure de l'autonomie des exploitations. Le prochain chapitre est consacré à l'évaluation du bilan d'azote de l'approvisionnement parisien dans le périmètre de l'empreinte, bilan qui est fonction à la fois de l'alimentation des cheptels et de la gestion des agro-systèmes.

Chapitre 6 : L'empreinte azote de l'approvisionnement parisien

6.1 Introduction

L'empreinte azotée (ou empreinte N) est développée de façon à suivre les transformations de l'azote dans la chaîne de production alimentaire. On cherche à mesurer à la fois le tonnage total d'azote mis en jeu pour le ravitaillement parisien - tonnage qu'on appelle empreinte N brute - et son partage entre la production alimentaire, la production d'engrais organique en vue d'une valorisation agricole et les pertes environnementales. Ce partage dépend de la manière dont fonctionnent les agro-systèmes et caractérise la profondeur de l'empreinte urbaine. La notion de profondeur permet de mesurer, de manière spatialisée, les rejets urbains indirects et diffus engendrés par la production de la nourriture des citadins, en fonction de l'efficacité environnementale qui caractérise le fonctionnement biogéochimique des agro-systèmes. On déclinera donc l'empreinte N brute de l'approvisionnement parisien selon ses différentes composantes, en commençant par l'évaluation des sources d'azote aux agro-systèmes, par date et par lieu de production des fourrages. Depuis sa forme moléculaire de bi-azote, biologiquement inaccessible à la grande majorité des organismes, l'azote est converti en azote biologiquement réactif par trois voies possibles : 1) sous l'action des certains microorganismes (fixation biologique d'azote - BNF), 2) par l'intermédiaire de phénomènes naturels (ex. éclairs) et 3) sous l'action des activités anthropiques, soit intentionnellement (la production des engrais azotés de synthèse en étant l'exemple par excellence) ou accidentellement (combustion des carburants fossiles) (Galloway et al ., 2004). On distingue donc trois voies possibles d'introduction d'azote dans les agro-systèmes : par BNF, dont l'apport est fonction des cultures fourragères, par dépôts atmosphériques et sous forme d'engrais de synthèse. On discutera les parts de ces sources dans l'apport total aux trois dates. Telle qu'on la développe, l'empreinte azote permettra à la fois d'analyser, sur une durée historique longue de deux siècles, les liens intrinsèques entre l'agglomération parisienne et son espace nourricier, et d'évaluer l'influence agro-environnementale de l'approvisionnement alimentaire en fonction des mutations agricoles.

6.2 Les composantes de l'empreinte azote

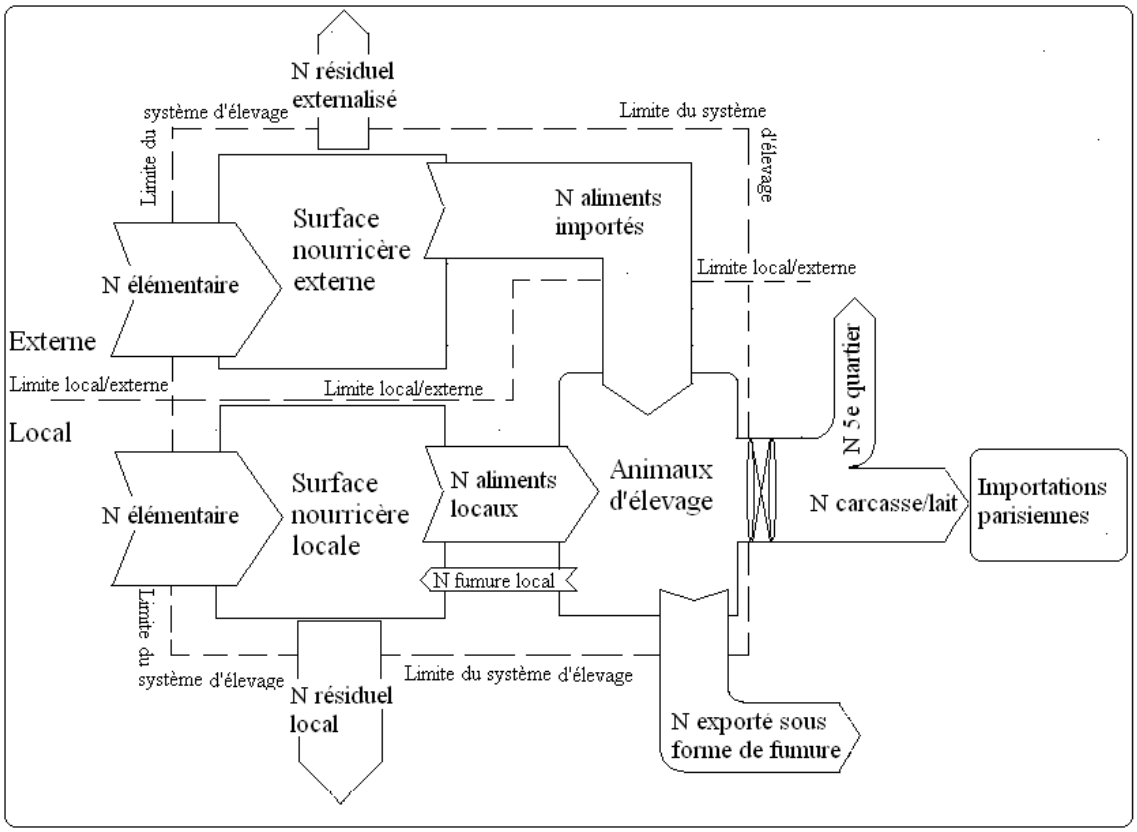


Figure 6.1 : Schéma générique des flux d'azote relatifs à l'approvisionnement parisien. Source : Cette étude.

La figure 6.1 représente le schéma générique des flux d'azote pour un système d'élevage, avec distinction entre les surfaces nourricières locales et externes aux exploitations d'élevage. Pour les surfaces externes, l'input total se partage en sortie entre l'azote exporté sous forme d'aliments et les pertes environnementales par voie de lessivage et/ou de dénitrification[1]. Pour les surfaces nourricières locales, on distingue trois flux d'exportation : l'azote contenu dans la biomasse animale (pour les élevages à viande ceci correspond à la somme d'azote des importations parisiennes et du cinquième quartier qui correspond aux parties non livrables à la consommation (eg.

[1] Pour les surfaces nourricières internes comme externes, on ne tient à priori pas compte des changements éventuels des réserves d'azote des sols. Il s'agit d'une hypothèse couramment utilisée qui revient à admettre que la teneur en azote des sols est constante. Ceci est le cas d'un grand nombre d'agrosystèmes actuels en Asie, en Amérique du Nord, en Europe etc. où les rotations culturales et le mode de gestion des agrosystèmes ne changent pas ou sinon peu d'une année à l'autre (Cassman et al., 2002).

abats et issus)), l'azote exporté des exploitations d'élevage sous forme de fumure et les pertes environnementales.

Le tonnage d'azote exporté sous forme de biomasse animale a été calculé par date et par région approvisionnant Paris au chapitre 4. Il s'élève à 8 820 tonnes pour les exploitations bovines dont 30 % correspond au 5e quartier, à 7 510 tonnes pour les exploitations porcines (dont 10 % est du 5e quartier) et à 2 755 tonnes pour les exploitations laitières.

L'exportation d'azote sous forme de fumure au début des XIXe, XXe et XXIe siècles sera calculée selon la méthodologie qu'on décrira dans la section 6.4. Enfin, le tonnage de N résiduel pourra ensuite être déduit par la différence entre l'input total d'azote et les outputs précédemment décrits.

Dans le cas des systèmes de polyculture-élevage, considérer la fumure comme un produit d'exportation revient à isoler la composante relative à la production animale de celle relative à la production végétale. De cette manière on dissocie les pertes environnementales liées à la fertilisation des cultures autres que les fourrages, des pertes d'azote relatives à la production de viande et de lait pour Paris. On isole ainsi l'impact environnemental de l'approvisionnement dont le calcul sera fonction de la structure des élevages (c'est-à-dire de leur contribution de fumure par rapport aux besoins de fertilisation régionaux) mais sans tenir explicitement compte de l'efficacité d'utilisation de la fumure aux différentes périodes historiques par des plantes dont la finalité est autre que l'alimentation du bétail.

Chacun des flux d'azote de la figure 6.1 (à l'exception des flux internes au système d'élevage) correspond à une composante de l'empreinte azote parisienne. La figure 6.2 schématise ces composantes qu'on définit ci-après.

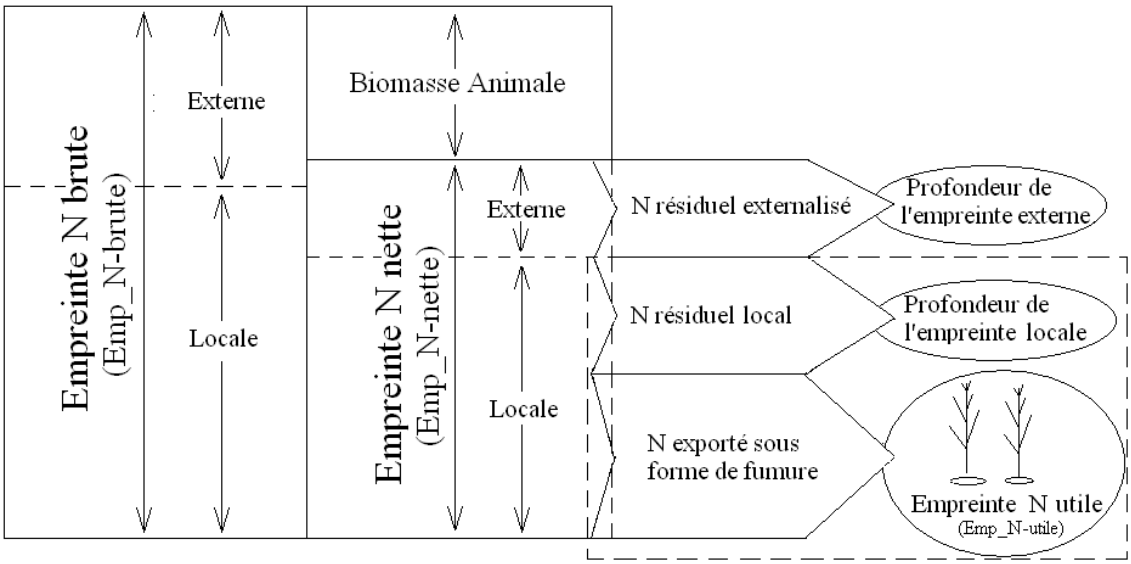


Figure 6.2 : Schématisation des composantes des empreintes azote de l'approvisionnement parisien. Source : Cette étude.

Nous définissons l'empreinte azote brute (Emp_N-brute) comme la somme de l'azote mobilisé pour la production des fourrages des animaux approvisionnant Paris. On y inclut l'azote provenant des dépôts atmosphériques car, bien que sa présence soit 'accidentelle', il contribue au potentiel de génération de biomasse.

La différence entre l'Emp_N-brute et l'azote enlevé des élevages sous forme de biomasse animale (somme des produits importés par l'agglomération et des abats et issues (cinquième quartier)) correspond à l'empreinte nette de l'approvisionnement (Emp_N-nette). Par définition, l'Emp_N-nette exprime en termes de N le potentiel de production primaire (y compris en milieu agricole et naturel) engendré par l'approvisionnement parisien, potentiel géographiquement éclaté entre les surfaces nourricières locales et externes. On distingue donc l'Emp_N-nette locale et externe.

L'emp_N-nette externe est égale au N résiduel (figure 6.2), elle désigne donc des pertes environnementales, c'est-à-dire la quantité d'azote susceptible de rejoindre les systèmes aquatiques et l'atmosphère par lessivage et par dénitrification. Ramenée à la surface mobilisée dans la production, l'Emp_N nette montre l'intensité des pertes d'azote. On appelle cette intensité profondeur de l'empreinte externe. Il convient de préciser que pour les sous-produits de transformation, le calcul de la profondeur doit se faire par rapport à la superficie de production de la culture d'origine, c'est-à-dire la somme des surfaces allouées aux sous-produits de transformation (cf. chapitre 5). En

effet, l'allocation de la surface de production entre les sous-produits de transformation n'est pas corrélée avec le partage des protéines. Par conséquent, la fabrication des protéines contenues dans un sous-produit a pu nécessiter une surface différente de celle qu'on a associée à sa production. Les tourteaux en sont l'exemple par excellence : ils contiennent la totalité de l'azote de la récolte mais leur production correspond à une fraction de la surface agricole d'origine. L'azote résiduel de chaque sous-produit sera donc affecté à la surface totale de production du produit-mère. Selon le milieu récepteur et la forme chimique sous laquelle il est exporté, cet azote peut être à l'origine à la fois des perturbations de fonctionnement des écosystèmes (Vitousek et al., 1997, Billen et Garnier, 2007), du changement climatique (Garnier et al., 2006, Cellier et al., 2008) et d'impacts directs et indirects sur la santé humaine (Wolfe et Patz, 2002), les premiers étant surtout en rapport avec l'eau potable et les seconds avec la toxicité des polluants dits secondaires, comme l'ozone, dont les oxydes d'azote sont les précurseurs. Dans le cadre de cette étude, on calcule la profondeur de l'empreinte qui correspond à ces pollutions potentielles, on n'évalue donc pas les impacts qui peuvent en découler qui devraient faire l'objet d'autres travaux.

Contrairement à la composante externe, l'Emp_N-nette locale se partage entre les pertes environnementales et l'azote exporté sous forme de fumure (cf. figure 6.2). Produite lors de la conversion du fourrage en biomasse animale, la fumure est - contrairement à l'azote résiduel dans les champs - relativement facile à récupérer surtout à partir des animaux nourris en lot (Girardin, 1844). L'empreinte N utile (Emp_N-utile) caractérise ainsi la contribution de l'approvisionnement en viande et en lait à la production agricole locale : l'apport de la fumure aux cultures non fixatrices d'azote faisait en effet de l'élevage la condition de possibilité de la production agricole au XIXe siècle (Girardin, 1844) et en fait aujourd'hui un levier important pour la réduction de la dépendance aux engrais de synthèse. La valorisation de la fumure est néanmoins une question de gestion soumise actuellement aux règles de la rentabilité économique.

La distinction de l'Emp_N-nette entre ces composantes externe et locale sous-entend la prise en compte des flux d'azote sous forme d'aliments, car ceux-ci constituent l'output sous forme de produit des surfaces nourricières externes et l'input sous forme

de matière première pour les exploitations d'élevage. Ainsi, comme le montre la figure 6.1, l'Emp_N-nette locale sera égale à la somme des inputs de N élémentaire aux surfaces nourricières des exploitations d'élevage, plus l'input de N sous forme d'aliments moins le N enlevé sous forme de biomasse animale (équation 6.1) :

Emp_N-nette locale = Inputs_N-local + N aliments – N biomasse animale (6.1)

La section suivante est consacrée au calcul des empreintes brutes et nettes de l'approvisionnement, qui montrent respectivement le besoin total en azote et la quantité d'azote non comprise dans la biomasse animale. Dans la section 6.4 l'Emp_N-nette sera exprimée en termes de profondeur et d'empreinte utile, ce qui permettra d'évaluer l'influence de l'approvisionnement parisien à la fois en tant que force de production agricole et en tant que source de pollution pour les écosystèmes extérieurs.

6.3 Empreintes N brute et nette de l'approvisionnement parisien, XIXe – XXIe siècles

6.3.1 Inputs d'azote dans les surfaces nourricières locales

Comme évoqué précédemment, les sources d'azote pour les surfaces nourricières au sein des exploitations d'élevage sont la fixation biologique (BNF), les dépôts atmosphériques (N-atm), les engrais de synthèse (N-fert) et les aliments d'importations, les deux dernières n'étant de contribution significative qu'à partir de la deuxième moitié du XXe siècle. Les importations d'azote sous forme d'aliments par type d'élevage et par région française pour le début du XXIe siècle sont quantifiées au chapitre précédent en fonction des rations animales et de la production végétale des exploitations (cf. tableau 5.7 et figures 5.3, 5.4 et 5.5 pour la production de viande porcine, de lait et de viande bovine respectivement).

Pour les autres sources, les inputs d'azote sont évalués sur la base des données provenant à la fois des statistiques nationales, des travaux de modélisation et de la littérature internationale. On note qu'on ne tient pas compte dans cette évaluation des modifications des stocks d'azote du sol (cf. note 1, p. 229).

N par dépôts atmosphériques

Le taux de déposition de l'azote oxydé est fonction des émissions atmosphériques. Originaires à la fois des sources naturelles (telles l'activité volcanique, les éclairs, les incendies naturels, etc.) et anthropiques (telle la combustion des carburants fossiles et l'agriculture) les émissions d'oxydes d'azote ont – d'après les résultats des simulations des modèles chimie-transport - presque triplé au niveau mondial depuis le milieu du XIXe siècle, engendrant en retour une augmentation de même ampleur du taux de déposition (Galloway et al., 2004). Pour la France, des résultats de simulations pour un maillage de 50x50 km^2 situent le taux annuels des dépôts entre 3 et 7 kg N/ha (EMEP, 2006). On a retenu dans notre analyse des valeurs moyennées à l'échelle des régions. Pour le début des XIXe et XXe siècles on a retenu un taux moyen de 2 kg N/ha, uniforme pour toutes les régions, que l'on considère comme taux de déposition de référence prioritairement aux perturbations majeurs du cycle d'azote. L'apport total par cette voie sera égal aux taux estimés par les modèles fois l'étendue des surfaces nourricières locales.

Apport par BNF et par l'application des engrais de synthèse.

La fixation biologique d'azote (BNF) et - à partir de la deuxième moitié du XXe siècle - les engrais de synthèse constituent les deux sources principales d'azote pour l'agriculture. Afin d'en évaluer l'apport il faut d'un côté associer des taux de BNF aux milieux de production des aliments des rations et de l'autre mobiliser des données sur l'utilisation de l'azote minéral.

Pour l'année 2006, on dispose de données sur le mode de fertilisation des cultures régionales principales[1] (Agreste, 2008d). Elles renseignent, par culture et par région française, les parts des superficies fertilisées en azote minéral et la dose moyenne de fertilisation, ainsi que les parts des superficies culturales précédées d'une légumineuse fixatrice d'azote (engrais vert). Pourtant, les données sont lacunaires vis-à-vis de certaines régions et cultures. Par exemple, le champ de l'enquête couvre seulement 26

[1] Les 11 cultures interrogées sont : blé tendre, blé dur, orge, maïs (grain et fourrage), colza, tournesol, pois protéagineux, betterave industrielle, pommes de terre, prairies temporaires et prairies permanentes.

% des surfaces nationales en prairies permanentes, toutes étant situées dans le nord de la France[1]. Pour les autres cultures, le taux de couverture varie entre 48 % et 97 % (Agreste, 2008c). Mais l'incertitude principale vis-à-vis du calcul des apports d'azote revient au choix des valeurs de fixation biologique (BNF) car celles-ci peuvent varier significativement dans le temps et dans l'espace en fonction des conditions de milieux. Les microorganismes à l'origine de la BNF se distinguent, on s'en souvient, en deux catégories : *Rhizobium* et non-*Rhizobium*, les premiers vivant dans le système racinaire des plantes dites légumineuses et en symbiose avec elles et les deuxièmes librement en jachères ou en association avec certaines cultures comme des céréales. Les taux de fixation sont habituellement compris entre 40 et 300 kg N/ha pour le *Rhizobium* et se situent autour de 5 kg N/ha pour le non-*Rhizobium* (Smil, 1999). Pour les trois dates de notre étude, on a retenu cette valeur moyenne de 5 kg N/ha pour l'ensemble des aliments des rations animales issus des cultures non-légumineuses, à savoir les céréales, les racines et les fourrages annuels. En revanche, le choix des valeurs de BNF est délicat pour les légumineuses étant donné à la fois la largeur de la gamme et la dimension temporelle de notre étude, c'est-à-dire que les taux de BNF ont pu évoluer dans le temps en fonction des conditions agroenvironnementales et pédoclimatiques, et du fait que les prairies artificielles, temporaires et permanentes concernées par ce choix constituent la source alimentaire principale des bovins à toute époque et une source non-négligeable pour les vaches laitières au début du XXIe siècle : le choix de BNF a donc des répercussions importantes sur le résultat final. S'y ajoute le fait que la fertilisation par engrais verts est très répandue dans certaines régions au début du XXIe siècle, surtout par rapport à la culture du maïs (grain et fourrage) : 49 % des superficies de maïs en Bretagne sont concernées et 14 % en moyenne pour les 18 régions renseignées dans l'enquête agricole (Agreste, 2008d).

Etant donné ces incertitudes, on a choisi d'estimer les valeurs de BNF aux trois dates en tenant compte des rendements culturaux des prairies artificielles des régions approvisionnant Paris. Exprimés en azote, les rendements montrent le tonnage récolté annuellement à l'hectare et constituent ainsi un élément indicatif vis-à-vis du taux

[1] La concentration spatiale des interrogations étant probablement en rapport avec celle des excès des nitrates, dont la prévention constitue l'objectif principal de l'enquête.

nécessaire de renouvellement. On en a fait la comparaison pour la luzerne au début des XXe et XXIe siècles (tableau 6.1).

Tableau 6.1 : Rendement en azote de la luzerne (kg N/ha) au début des XXe et XXIe siècles. Sources : Statistiques agricoles annuelles, 1908, 2004.

	Rendement en azote de la luzerne (kg N/ha)	
	Début XXe siècle	Début XXIe siècle
Alsace	-	305
Aquitaine	78	252
Auvergne	109	328
Bourgogne	83	252
Bretagne	98	212
Centre	103	185
Champagne-Ardenne	102	358
Franche-Comté	78	243
Ile-de-France	142	249
Languedoc-Roussillon	112	102
Limousin	107	280
Lorraine	-	282
Midi-Pyrénées	106	182
Nord-Pas-de-Calais	-	284
Normandie-Basse	132	262
Normandie-Haute	119	312
Pays-de-la-Loire	100	271
Picardie	128	315
Poitou-Charentes	114	280
PACA	91	179
Rhône-Alpes	97	179
Moyenne	105	253

Les différences des rendements sont grandes à la fois entre les deux dates et parmi les régions, ce qui peut être interprété comme une variabilité spatiotemporelle de la BNF. Il nous a pourtant paru prudent de ne tenir compte que des écarts moyens, ce qui nous amène à retenir une valeur moyenne de BNF par date. On fait l'hypothèse que la partie récoltée de la luzerne représente au début du XXe siècle 50 % de l'azote total mis en jeu dans sa production, l'autre moitié restant dans les fractions non récoltées et les nodules de fixation. Ceci revient à admettre un input d'environ 200 kg N/ha au début du XXe siècle. Sachant que les prairies artificielles sont fauchées et ramassées annuellement et que, par conséquent, leur productivité n'est pas (ou sinon très peu) alimentée par des excrétions d'animaux nourris au pâturage, cet input correspond à la valeur de BNF. En revanche, en admettant la valeur de 250 kg N/ha comme seuil d'apport par fixation biologique, la production de la luzerne de certaines régions doit

être soutenue au début du XXIe siècle par des engrais de synthèse[1]. Notons que l'incertitude vis-à-vis du choix de la dose de fertilisation – que l'on a admise égale à la différence entre l'azote de la récolte et l'apport par BNF - est d'influence marginale dans le calcul de l'empreinte car la luzerne représente moins de 6 et 1 % respectivement des surfaces nourricières des bovins à viande et des vaches laitières.

À défaut d'autres données, on a donc retenu les valeurs de 200 et 250 kg N/ha pour la BNF associée à la culture de la luzerne au début des XXe et XXIe siècles respectivement. Suivant la même démarche, le taux de fixation de la luzerne est estimé à 180 kg N/ha au début du XIXe siècle, celui du trèfle à 140 et 150 kg N/ha respectivement au XIXe et XXe siècle et celui des légumineuses à graines (pois sec, fèveroles etc.) à 70 kg N/ha pour les deux dates. Par ailleurs, admettant que la présence des légumineuses dans les prairies naturelles (temporaires et permanentes) s'élève à 15 % en termes de superficie, la BNF relative à ces milieux est estimée à 25, 30 et 45 kg N/ha respectivement au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Enfin, on estime l'apport annuel d'azote des engrais verts à 125 kg N/ha au début du XXIe siècle, ce qui correspond à l'utilisation de la luzerne comme précédent cultural sur la moitié de l'année. Le tableau 6.2 récapitule les valeurs de BNF retenues par culture et date.

Notons que, bien que nos estimations sur les valeurs de la BNF soient en accord avec les valeurs faisant consensus dans la littérature internationale (Smil, 1999, Herridge et Peoples, 2008), elles n'en sont pas moins entachées d'incertitudes susceptibles de fausser le calcul de l'empreinte. De plus, l'hypothèse d'invariabilité des stocks d'azote du sol est une source supplémentaire d'incertitude.

Afin d'appréhender l'ampleur de ces incertitudes, on a dressé les bilans d'azote des principaux fourrages produits au sein des exploitations d'élevage ainsi que les efficacités d'utilisation de l'azote correspondantes[2] (NUE, abréviation anglaise de « Nitrogen Use Efficiency »). La valeur de la NUE dépend des cultures et des facteurs

[1] Etant donné que les prairies artificielles ne font pas partie des cultures interrogées dans l'enquête agricole, cette hypothèse ne peut être vérifiée.

[2] Définie comme la part de l'azote élémentaire enlevé avec la récolte.

agroenvironnementaux, y compris de la source de fertilisation, des pratiques culturales etc. Pour des cultures annuelles comme les céréales, la NUE est généralement comprise entre 30 et 50 % (Cassman et al., 2002), c'est-à-dire que la quantité d'azote mise en jeu pour la production est habituellement deux à trois fois supérieure à la quantité enlevée avec la récolte. Pour les prairies, milieux mieux protégés contre les pertes d'azote par lessivage et dénitrification grâce à la couverture permanente des sols et à l'absence de labour (Mignolet et al., 1999, Farrugia et al., 2000, Benoît, 2007), la NUE est à priori supérieure.

Tableau 6.2 : Taux de fixation biologique par culture et par date pour les fourrages des rations animales. Source : Estimations d'après les valeurs de BNF citées dans Smil (1999) et Herridge et Peoples (2008) et les rendements agricoles aux trois dates.

	Début XIXe	Début XXe	Début XXIe
Sources de BNF par milieu cultural	Taux de fixation par culture (kg N/ha/an)		
Luzerne en pur	180	200	250
Trèfle en pur	140	150	Non utilisé comme fourrage
Prairies naturelles (15% légumineuses)	25	30	38
Luzerne comme engrais vert avant la culture du maïs (durée ~185 jours)	-	-	125
Légumineuses à graines	70	70	-
Jachères/cultures non légumineuses	5	5	5

Les résultats sont montrés dans le tableau 6.3. L'apport total par culture et par région est calculé comme la somme des apports de BNF, d'engrais de synthèse et de fumure organique, ce dernier étant calculé en multipliant les superficies recevant de la fumure (Agreste, 2008d) avec la dose maximale autorisée par la directive nitrates, soit 170 kg N/ha. L'azote exporté avec la récolte est calculé par des données de rendements (Statistique agricole annuelle, 2006). Pour les régions dont les cultures ne sont pas interrogées par l'enquête agricole, les doses d'engrais de synthèse sont déduites par extrapolation des données des autres régions et proportionnellement aux écarts des rendements. Les bilans et NUE ainsi déduits sont annotés avec un astérisque. Enfin, les trois dernières lignes indiquent les NUE relatives à la production des rations animales (NUE_m). Elles sont calculées en pondérant les NUE moyennes des différents fourrages par leurs tonnages respectifs dans les rations animales.

Tableau 6.3 : Bilans d'azote et NUE pour les principales cultures produites au sein des exploitations d'élevage en 2006, d'après les données de l'enquête agricole et les valeurs retenues pour la BNF et la fertilisation organique. (*) = valeurs déduites par extrapolation, car cultures non interrogées. Sources : Voir dans le texte.

	Bilan d'azote (input - output) par culture (kg N/ha)					NUE correspondante (%)				
	Orge grain	*Maïs grain*	*Maïs four.*	*Blé grain*	*Prairies nat.*	*Orge grain*	*Maïs grain*	*Maïs four*	*Blé grain*	*Prairies nat.*
Alsace	50*	85	71*	55	15*	66*	57	66*	68	85*
Aquitaine	44*	139	80	71	14	66*	43	60	57	85
Auvergne	43*	95	18	72	29	66*	54	86	57	70
Bourgogne	50	111	59	80	-5	66*	46	62	57	106
Bretagne	39	158	127	36	50	72	38	50	76	63
Centre	34	94	42	78	6	76	54	70	58	93
Champ.-Ardenne	51	110	61	84	18*	68	46	66	59	85*
Franche-Comté	56	147	96	85	31	63	36	55	56	72
Ile-de-France	37	93	62*	71	13*	74	54	66*	63	85*
Languedoc-Rouss.	25*	107*	52*	33*	21	66*	47*	66*	62*	44
Limousin	48*	101*	54*	54*	-1	66*	47*	66*	62*	101
Lorraine	69	93*	57*	83	20*	60	47*	66*	57	85*
Midi-Pyrénées	93	112	56*	67	33	44	50	66*	57	65
Nord-Pas-de-Calais	54	135*	63	46	-9	69	47*	69	74	109
Normandie-Basse	54*	117*	76*	50	18	66*	47*	66*	70	87
Normandie-Haute	39	122*	82*	55	-37	75	47*	66*	70	149
Pays-de-la-Loire	48*	130	75	57	34	66*	44	60	65	72
Picardie	34	103	31	53	-18	78	50	82	71	121
Poitou-Charentes	50	101	21	80	-14	65	52	83	56	115
PACA	25*	112*	64*	32*	21	66*	47*	66*	62*	44
Rhône-Alpes	47*	114	59	70	40	66*	50	68	58*	60
	NUE_m									
Viande bovine	76 %									
Viande porcine	62 %									
Lait	76 %									

Dans le cas des céréales et pour la plupart des régions, les NUE sont plus élevées que les valeurs communément admises dans la littérature (Cassman et al., 2002). On constate aussi que les bilans des prairies naturelles des six régions sont négatifs, ce qui conduit à des valeurs de NUE supérieures à 100 %. Si l'on admet que ceci ne résulte pas de l'appauvrissement des sols (hypothèse très soutenue dans le cas des prairies), alors il y a sous-estimation des inputs d'azote dans les exploitations d'élevage, sous-estimation provenant soit des données de l'enquête, soit de la valeur retenue pour la BNF des prairies et des engrais verts, soit des deux. Notons pourtant que pour les prairies, les animaux nourris au pâturage peuvent représenter une source supplémentaire d'azote, susceptible d'en équilibrer le bilan. Il s'agit en effet d'un circuit de recyclage, à l'intérieur du système d'élevage, qui conduit à en réduire la dépendance des importations d'azote de l'extérieur.

Quoi qu'il en soit, les moyens qui permettraient d'affiner davantage la démarche font défaut. On en reste donc là en gardant à l'esprit que les inputs au sein des exploitations - et donc l'empreinte N nette de l'approvisionnement parisien - risquent d'être sous-estimés dans certaines régions et surestimées dans d'autres. La sous-estimation concernerait des régions comme la Picardie et le Poitou-Charentes où les NUE apparentes du maïs fourrager et des prairies dépassent respectivement 80 % et 100 %. De même, il est probable que les inputs soient sous-estimés vis-à-vis des céréales en Ile-de-France, en Nord-Pas-de-Calais et en Bretagne. A contrario, la NUE de 44 % des prairies en Provence-Alpes-Côte-D'azur et en Languedoc-Roussillon ou encore la valeur de 36 % pour le maïs en Franche-Comté induiront probablement une surestimation de l'empreinte parisienne correspondante.

Sur la base de ces considérations, le calcul des inputs d'azote dans les surfaces nourricières locales (totales en ce qui concerne les XIXe et XXe siècles) est posé. Au XIXe et début de XXe siècle, la BNF représente la quasi-totalité de l'apport pour les trois élevages. Quant à l'élevage des porcs, l'input d'azote qu'on y associe au début du XIXe siècle correspond à la BNF résultant de la production de lait des vaches utilisé comme aliment des porcs (voir chapitre 4). Ce lait est dans une certaine mesure « importé » par les exploitations porcines de l'époque, mais compte tenu du rapport de symbiose entre les deux élevages, on a affecté la surface de production du lait

consommé par les porcs et la BNF relative à ces surfaces, à la production de la viande porcine.

Au début du XXIe siècle, l'input d'azote par source d'origine est montré dans la figure 6.3 pour l'ensemble des importations parisiennes de viande bovine, porcine et de lait. Les résultats par produit suivent dans les figures 6.4, 6.5 et 6.6 respectivement pour la viande bovine, porcine et le lait. Les régions sont classées en ordre décroissant de la part d'azote originaire de BNF, y compris donc en provenance des prairies et des précédents culturaux.

Avant de procéder au calcul de l'empreinte azotée de l'approvisionnement parisien, on présente succinctement ci-après la démarche suivie pour estimer les inputs d'azote dans les surfaces nourricières externes.

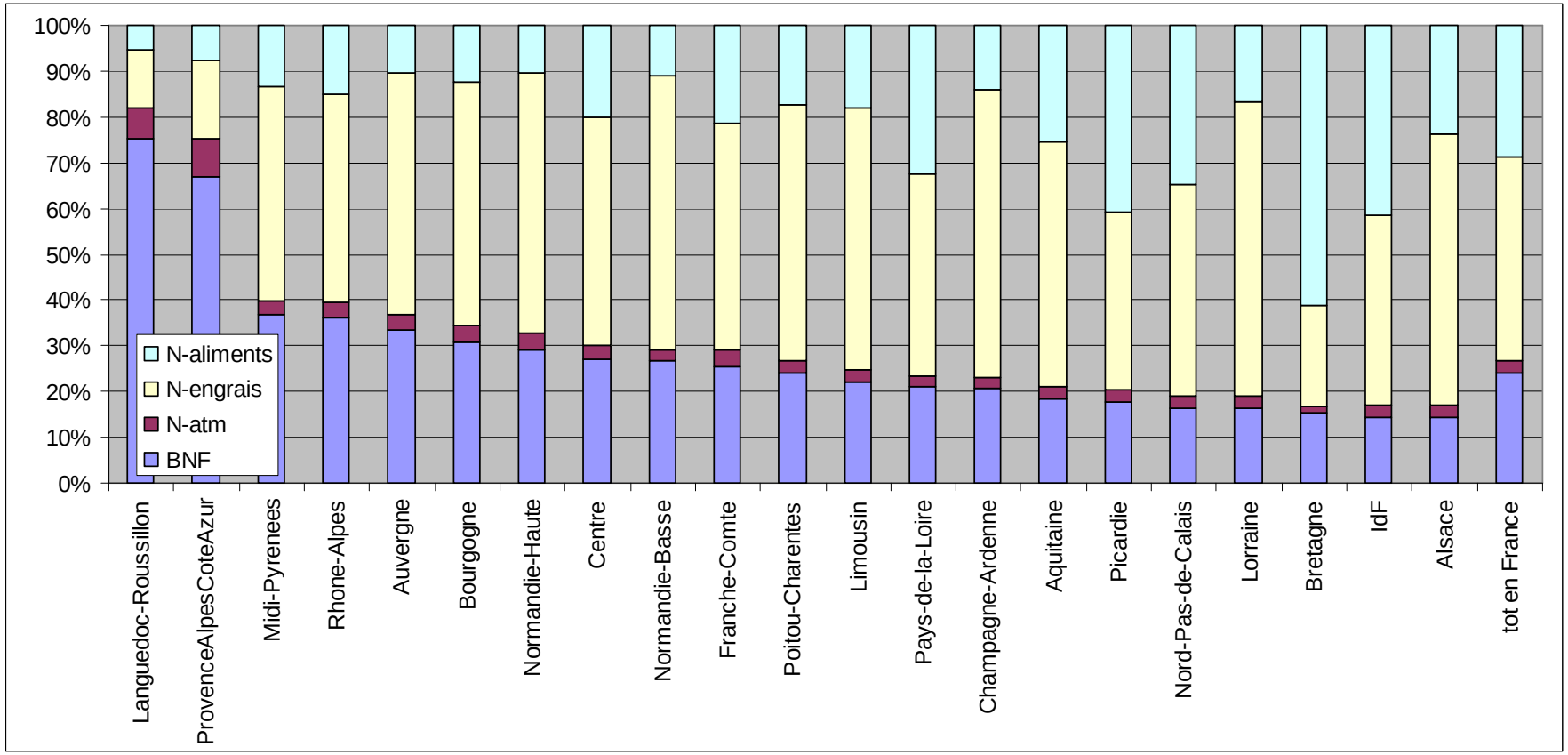


Figure 6.3 : Input d'azote dans les exploitations d'élevage approvisionnant Paris au début du XXIe siècle par source d'introduction et par région d'élevage. Moyennes pondérées pour la viande bovine, porcine et le lait. Source : Cette étude.

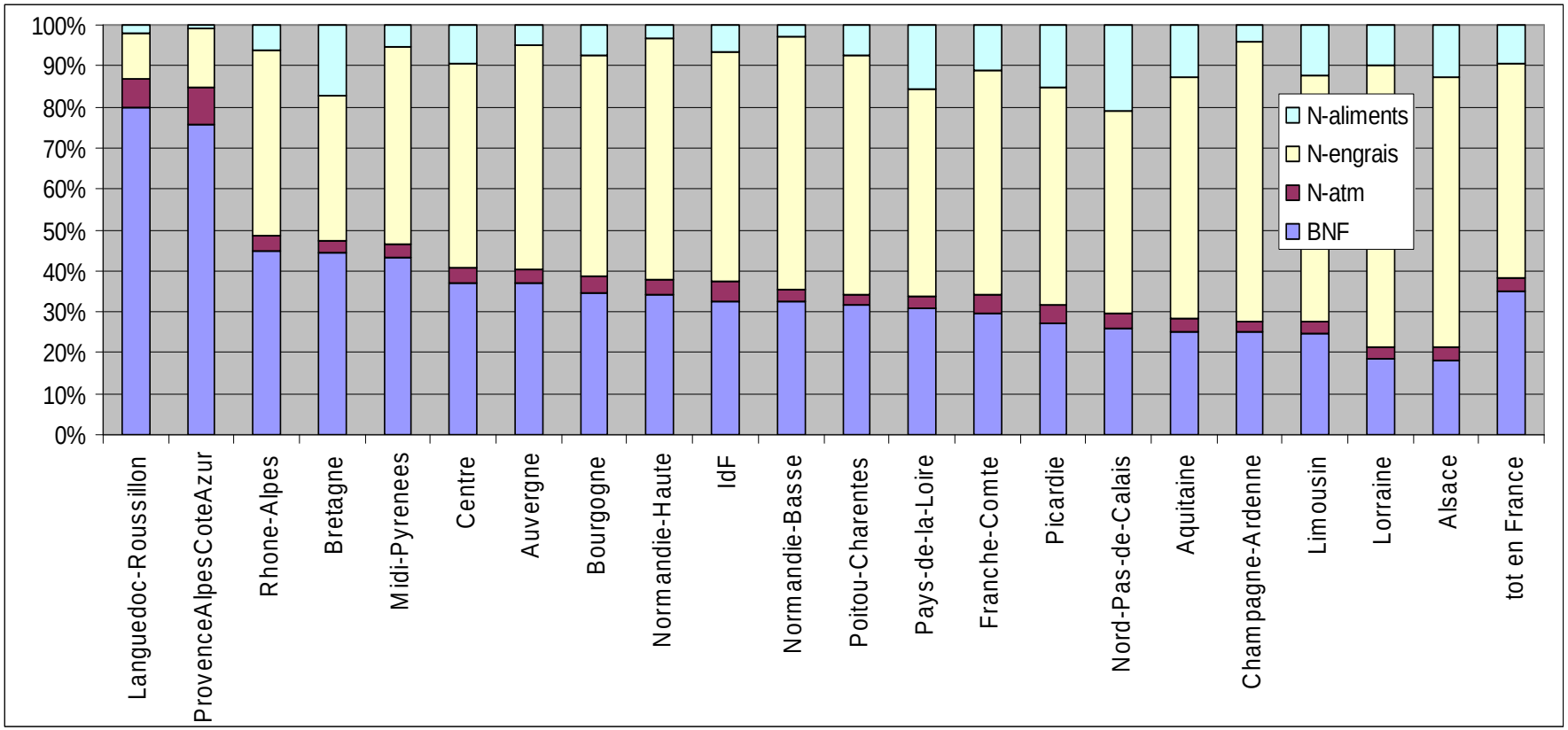


Figure 6.4 : Input d'azote dans les exploitations d'élevage approvisionnant Paris en viande bovine au début du XXIe siècle par source d'introduction et par région d'élevage. Source : Cette étude**.**

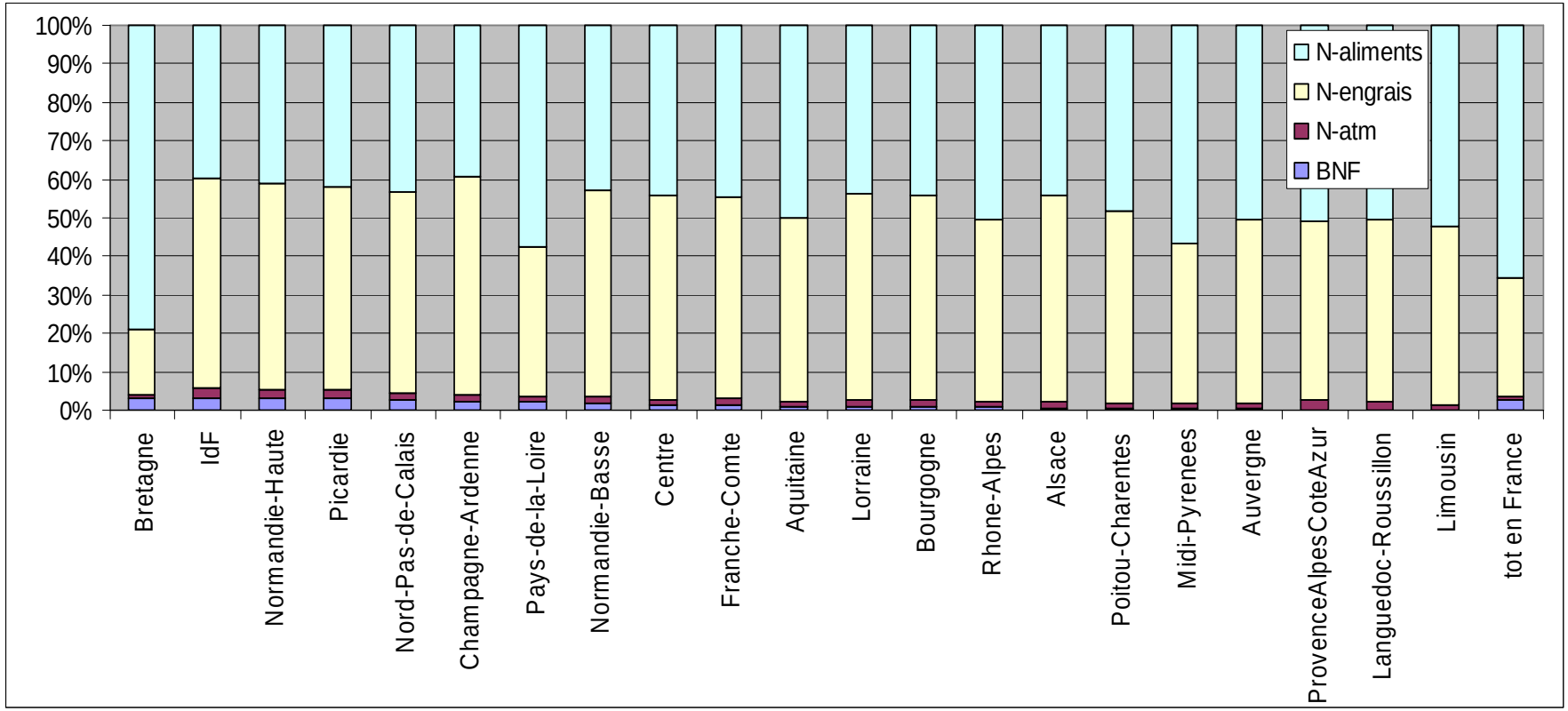


Figure 6.5 : Input d'azote dans les exploitations d'élevage approvisionnant Paris en viande porcine au début du XXIe siècle par source d'introduction et par région d'élevage. Source : Cette étude.

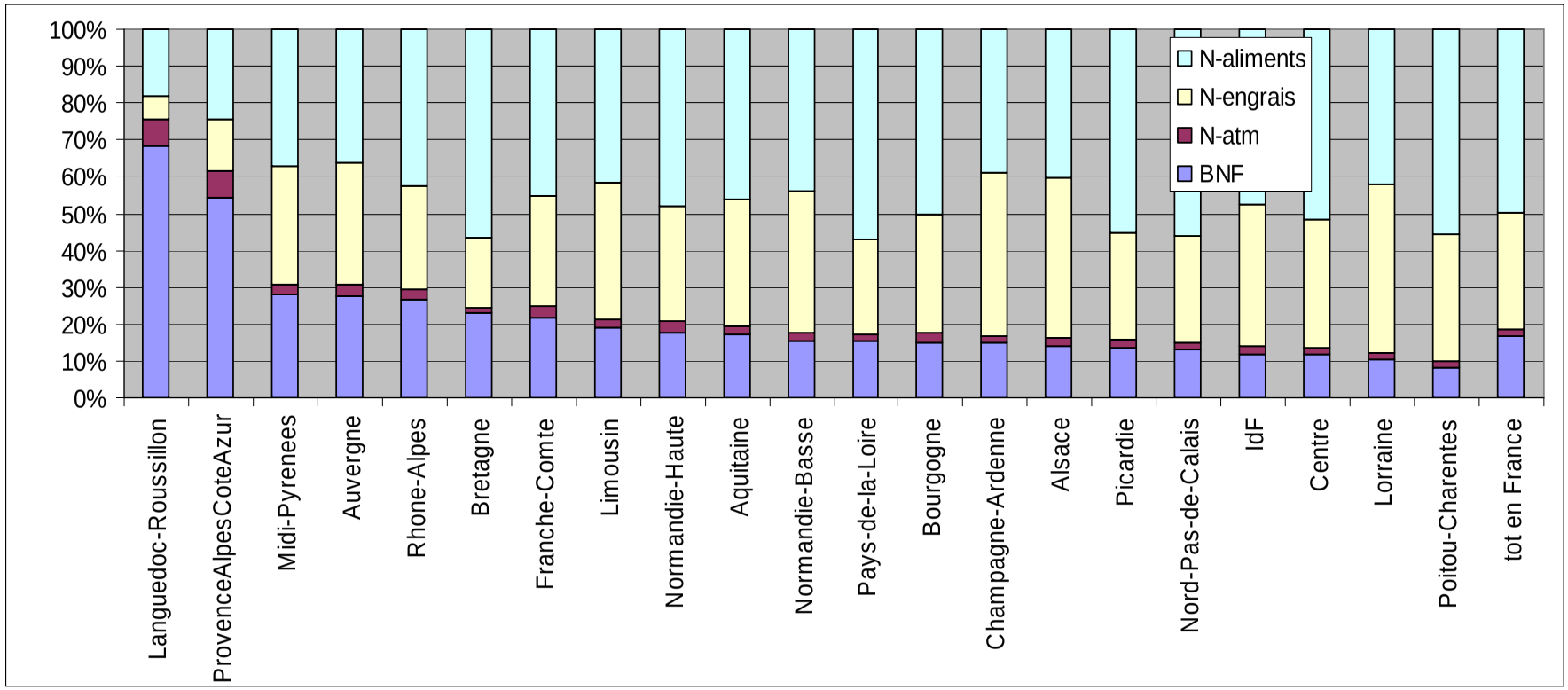


Figure 6.6 : Input d'azote dans les exploitations d'élevage approvisionnant Paris en lait au début du XXIe siècle par source d'introduction et par région d'élevage. Source : Cette étude.

6.3.2 Inputs d'azote dans les surfaces nourricières externes

La composante externe de l'empreinte totale est égale à la somme de l'azote exporté sous forme d'aliments et de l'azote résiduel, ce dernier étant égal à la profondeur de l'empreinte externe (cf. figures 6.1 et 6.2). Le N-résiduel externalisé est donc 'simplement' fonction de l'efficacité d'utilisation de l'azote par les plantes. Compte tenu des incertitudes discutées précédemment et du fait que pour les aliments d'importation depuis l'étranger les données statistiques nécessaires au calcul sont - selon les origines - difficilement mobilisables et de fiabilité incertaine, on a approché l'empreinte brute externe en fixant une valeur de NUE. On a retenu la valeur de 50 %, ce qui revient à admettre que le tonnage d'azote résiduel aux surfaces nourricières externes sera identique au tonnage d'azote importé par les exploitations d'élevage sous forme d'aliments. Notons que dans la mesure où les cultures légumineuses se caractérisent à priori par des NUE plus élevées que les non-légumineuses du fait que l'apport d'azote par BNF est à priori mieux synchrone avec les besoins en azote des plantes (Drinkwater et al., 1998), cette hypothèse est susceptible de surestimer les pertes relatives à la production de soja et de sous-estimer celles relatives à la production de colza, de céréales et de betteraves. Par exemple, la NUE de la culture de colza calculée par le croisement des données de l'enquête agricole sur la fertilisation totale des cultures (Agreste, 2008d) et des données de statistiques de production pour l'année 2006 (Statistique agricole annuelle, 2006), se situe autour de 40 % dans la plupart des régions françaises. Pourtant, en raison de sources d'incertitudes évoquées précédemment et afin de simplifier l'analyse, on a retenu la valeur de 50 % pour l'ensemble des cultures importées de l'extérieur.

6.3.3 Les empreintes brute et nette de l'approvisionnement parisien

Les figures 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 montrent l'empreinte brute et nette de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine, en lait et pour les trois produits ensemble aux XIXe, XXe et XXIe siècles. L'empreinte est exprimée par rapport à la fois aux importations parisiennes (kg N/kg N_Imp), à la population parisienne (kg N/hab) et à la surface nourricière totale (kg N/ha). La répartition de

l'empreinte au début du XXIe siècle entre ces composantes locales et externes est faite dans la section suivante.

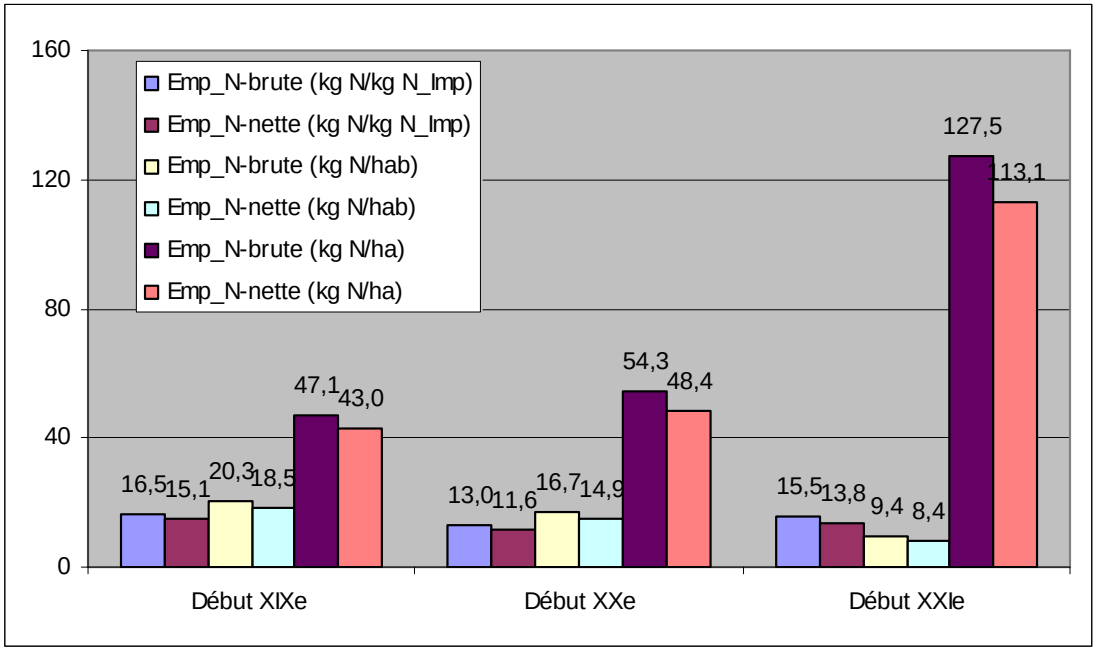


Figure 6.7 : Empreinte azote brute (Emp_N-brute) et nette (Emp_N-nette) de l'approvisionnement parisien de viande bovine aux XIXe, XXe, XXIe siècles, exprimée par rapport aux importations (kg N/ kg N_Imp), à la population (kg N/hab) et à la surface productrice totale (kg N/ha). Source : Cette étude.

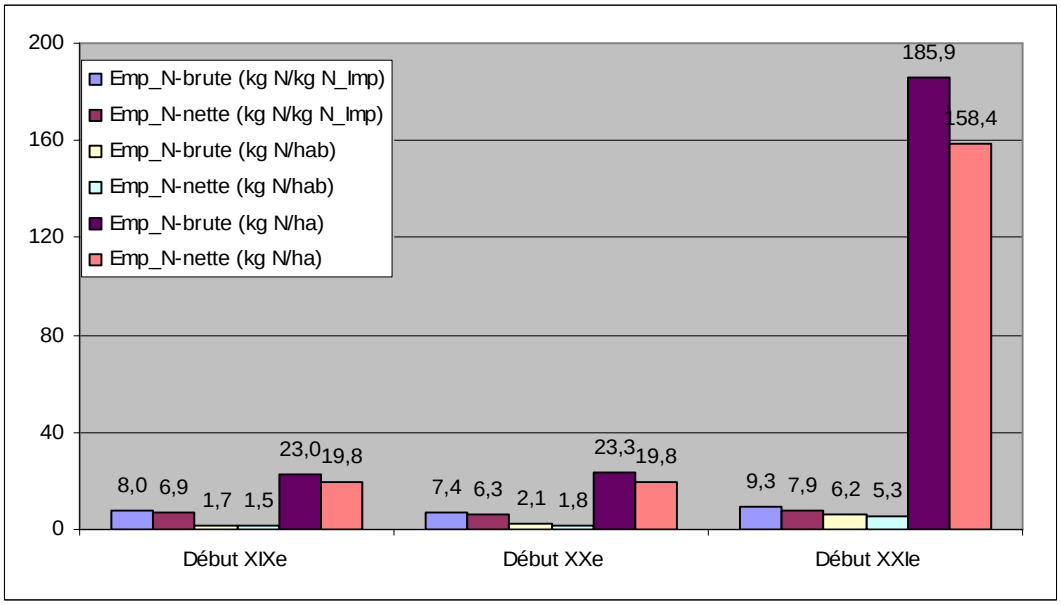


Figure 6.8 : Empreinte azote brute (Emp_N-brute) et nette (Emp_N-nette) de l'approvisionnement parisien de viande porcine aux XIXe, XXe, XXIe siècles, exprimée par rapport aux importations (kg N/ kg N_Imp), à la population (kg N/hab) et à la surface productrice totale (kg N/ha). Source : Cette étude.

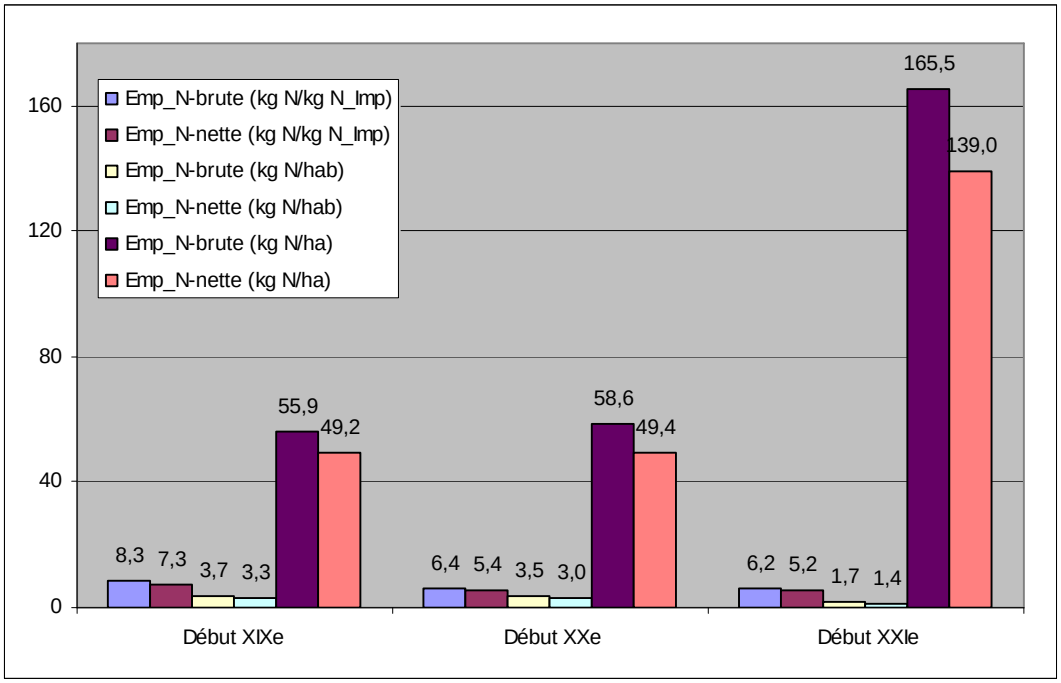


Figure 6.9 : Empreinte azote brute (Emp_N-brute) et nette (Emp_N-nette) de l'approvisionnement parisien en lait aux XIXe, XXe, XXIe siècles, exprimée par rapport aux importations (kg N/ kg N_Imp), à la population (kg N/hab) et à la surface productrice totale (kg N/ha). Source : Cette étude.

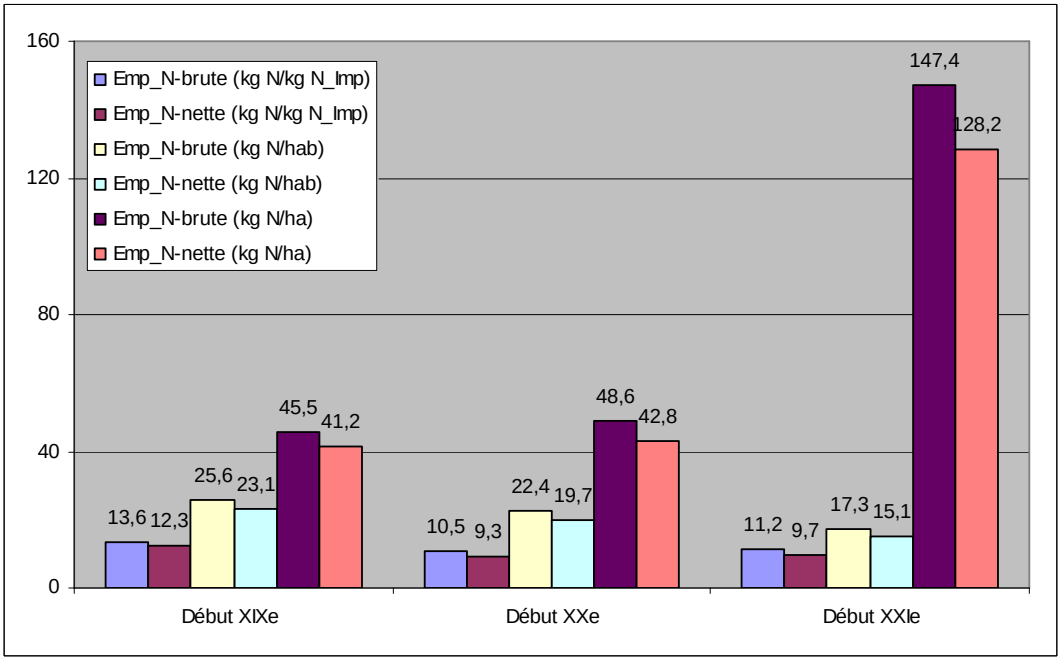


Figure 6.10 : Empreinte azote brute (Emp_N-brute) et nette (Emp_N-nette) de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait ensemble aux XIXe, XXe, XXIe siècles, exprimée par rapport aux importations (kg N/ kg N_Imp), à la population (kg N/hab) et à la surface productrice totale (kg N/ha). Source : Cette étude.

Exprimée par rapport aux importations, l'empreinte brute (Emp_N-brute) indique le nombre des kilogrammes d'azote mobilisés dans les agro-systèmes par kilogramme d'azote importé à Paris, tandis que l'empreinte nette (Emp_N-nette) donne le nombre des kilogrammes d'azote demeurant réactif dans les surfaces productives. Leur diminution est synonyme de celle du potentiel de production primaire aux territoires d'approvisionnement suite à la consommation urbaine d'une même quantité de viande ou de lait.

Les écarts entre les dates sont davantage prononcés lorsqu'on exprime l'empreinte par rapport à la population. L'Emp_N-nette d'un parisien avoisine 23 kg d'azote au début du XIXe siècle, 20 kg au début du XXe siècle et 15 kg au début du XXIe siècle. Exprimée ainsi, l'Emp_N-nette montre la quantité d'azote réactif demeurant par habitant sur la surface productive, dont le partage entre l'exportation d'azote sous forme de fumure et les pertes environnementales par voies de lessivage et de dénitrification dépend de la manière dont fonctionnent les agro-systèmes et caractérise la profondeur de l'empreinte urbaine. Il est ainsi possible d'élargir la notion d'équivalent habitant (Equ/Hab) classiquement considéré comme représentatif des émissions individuelles d'azote dans les eaux usées urbaines (Equ/Hab = 15 g N/jour, soit 5,4 kg N/an) et de définir un *équivalent habitant amont* qui englobe en quelque sorte tous les rejets individuels d'azote en amont de la ville, relatifs à la production de la nourriture d'un citadin. Ceci revient à mesurer, de manière spatialisée, les rejets indirects et diffus de la ville en fonction de l'efficacité environnementale dont se caractérise le fonctionnement biogéochimique des agro-systèmes. La profondeur de l'empreinte pourra être mesurée en unités d'équivalent habitant après soustraction de l'azote exporté sous forme de fumure de l'empreinte N nette de l'approvisionnement.

L'Emp_N-nette est maximale pour la production de viande bovine, résultat qui ne surprend pas compte tenu du fait que l'efficacité de conversion des protéines végétales en protéines animales est plus faible chez les bovins que chez les autres animaux. Mais l'efficacité de production a augmenté pour les trois espèces depuis le début du XIXe siècle (cf. chapitre 4). Ainsi, la diminution totale de l'Emp_N-nette de l'approvisionnement est le double résultat du gain en efficacité et de la diminution proportionnelle de viande bovine dans la consommation totale. En effet, l'Emp_N-

nette d’un habitant provenait pour 80 % de la consommation de viande bovine au début du XIXe siècle, pour 75 % au début du XXe siècle et de 55 % au début du XXIe siècle. Consommer des produits animaux au XIXe et début de XXe siècle, et en particulier de la viande bovine, revenait à apporter de l’azote réactif aux territoires de production, en augmenter donc le potentiel de production primaire. L’objectif qu’on se pose pour la détermination de l’empreinte N-utile est justement d’évaluer le partage de ce potentiel entre la production agricole et les pertes environnementales.

Si l’empreinte diminue dans le temps lorsqu’on l’exprime par rapport aux importations ou à la population parisienne, elle a énormément augmenté lorsqu’on l’exprime par unité de surface nourricière. Ceci illustre l’intensification généralisée de la production agricole : les charges d’azote réactif ont plus que triplé en 100 ans, augmentation entrainant celle des pertes lorsqu'elle n'est suivie par celle de la teneur en matière organique des sols. En effet, le rapport stœchiométrique entre le carbone (C) et l'azote (N) d'un sol (N/C) en détermine la capacité d'immobilisation d'azote. Suite à la généralisation des engrais azotés de synthèse depuis le milieu du XXe siècle, ce rapport aurait diminué, et entrainé la diminution de la capacité de rétention de l'azote, l'augmentation par conséquent de la proportion des pertes.

Au début du XXIe siècle, l'Emp_N-nette se partage entre les surfaces nourricières locales et externes aux exploitations d'élevage. La composante externe correspond à l'azote résiduel de la production fourragère et, ramenée à la superficie de production, exprime la profondeur de l'empreinte externe (kg N/ha). Pour les surfaces nourricières locales, l'Emp_N-nette se partage entre l'azote résiduel et l'azote exporté sous forme de fumure en vue d'une valorisation agricole (cf. figure 6.2). On montre dans la figure 6.11, les deux composantes de l’Emp_N-nette de l’approvisionnement parisien au début du XXIe siècle, exprimées par hectare des surfaces nourricières locales et externes.

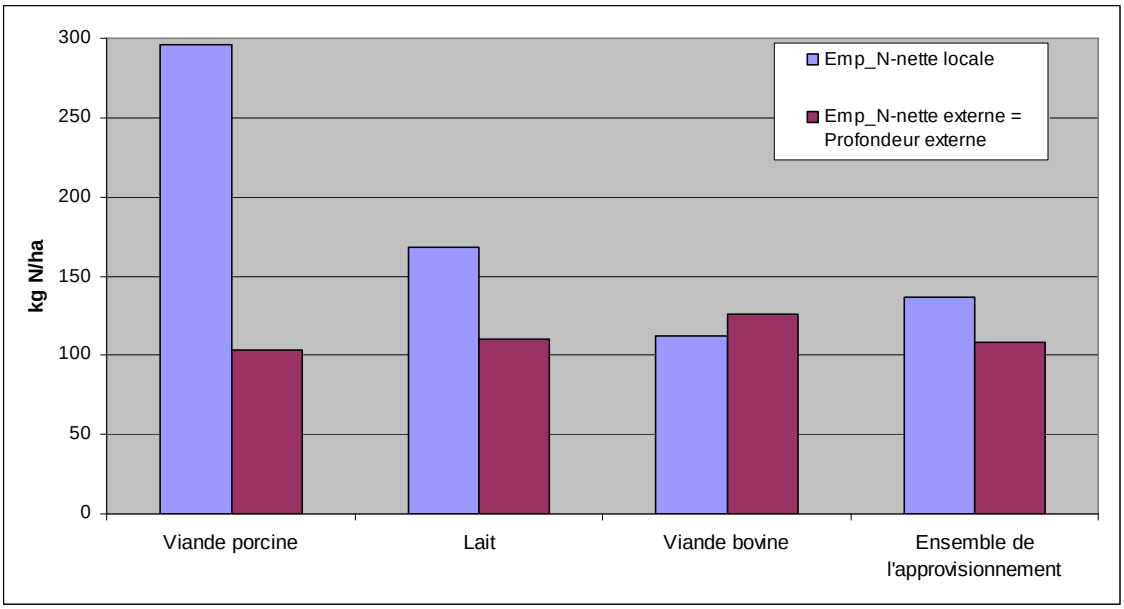


Figure 6.11 : Empreinte N nette (Emp_N-nette) de l'approvisionnement en viande bovine, porcine, en lait et pour les trois produits ensemble au début du XXIe siècle, par hectare de surface nourricière locale et externe.

La profondeur de l'empreinte externe est similaire pour les trois produits alimentaires. Elle s'élève à environ 110 kg N/ha pour la viande porcine et le lait et à environ 120 kg N/ha pour la viande bovine. En revanche, l'Emp_N-nette locale est beaucoup plus élevée pour la viande porcine que pour la viande bovine et le lait.

6.4 Partage de l'Emp_N-nette locale en empreinte N utile et en profondeur de l'empreinte, XIXe – XXIe siècles

Par rapport aux siècles précédents, de l'Emp_N-nette par hectare de production a augmenté d'un facteur trois pour l'ensemble de l'approvisionnement parisien (viande bovine, porcine et lait confondus). L'augmentation est d'un facteur deux pour la viande bovine, d'un facteur trois pour le lait et d'un facteur huit pour la viande porcine et relève par là un défi particulièrement important vis-à-vis de la gestion d'azote. On s'emploie donc à décliner l'Emp_N-nette de l'approvisionnement selon ces composantes de profondeur et d'empreinte N utile (Emp_N-utile).

Évaluer ce partage, c'est caractériser l'influence de la consommation parisienne sur l'environnement et l'agriculture des régions qui en assurent la satisfaction. Il s'agit d'une démarche ambitieuse qui est conditionnée par la disponibilité des données. La donnée la plus essentielle pour effectuer ce calcul, à savoir la quantité d'azote exporté

sous forme de fumure par région et par espèce animale approvisionnant Paris, est indisponible aux trois dates. On peut tout de même l'approcher en passant par l'évaluation au niveau des régions, du tonnage d'azote que les élevages (tous cheptels confondus) restituent à l'agriculture chaque année. La contribution de la consommation parisienne dans l'apport total de fumure sera proportionnelle à la fraction des cheptels régionaux que représentent les animaux approvisionnant Paris.

6.4.1 Les cheptels approvisionnant Paris comme fraction des cheptels régionaux

La pondération qu'on annonce présuppose la comparabilité en termes de production de fumure des différentes espèces animales au sein d'une région d'élevage. Ceci n'étant pas le cas entre les effectifs des différentes espèces, il faut établir des équivalences au moyen des coefficients tenant compte des caractéristiques physiques et métaboliques des cheptels. L'unité gros bétail (UGB) est l'unité de compte communément utilisée à cet effet et montre le nombre d'animaux d'une espèce équivalent en termes de production d'excrétions à une vache laitière. Les principales espèces présentes sur le territoire français aux trois dates sont les bovins, les porcs et les ovins/caprins. S'y ajoutent les chevaux au début des XIXe et XXe siècles et les volailles au début du XXIe siècle. Les volailles étant jusqu'à la deuxième moitié du XXe siècle des animaux de basse cour surtout destinés à l'autoconsommation, elles n'apparaissent pas dans les statistiques agricoles et ne représentent qu'une fraction infime des ressources animales totales. L'industrialisation en revanche du secteur dans la deuxième moitié du XXe siècle en a fait croître énormément l'importance dans l'économie rurale de plusieurs régions françaises. Inversement, la population d'équidés était importante au XIXe et début du XXe siècle mais a diminué rapidement depuis la généralisation de l'automobile pour ne compter au début du XXIe siècle que quelques centaines des milliers d'individus, soit le dixième des existences enregistrées au XIXe et début du XXe siècle (Block, 1858, Statistiques agricole annuelle, 1906, 2008).

A partir des bases de données de la FAO sur les existences animales au niveau mondial, Chilonda et Otte (2006) ont établi des équivalences en termes de UGB entre différentes catégories animales par grande région du monde (Amérique du Nord, pays

de l'OCDE, Afrique, etc., à noter que l'Europe ne figure pas dans le classement). D'après cette étude, 1 UGB = 1 bovin/vache laitière = 9 ovins/caprins = 3,6 cochons = 1,4 chevaux = 90 poulets dans les pays de l'OCDE (Chilonda P. and Otte J, 2006).

Par ailleurs, d'après des données statistiques françaises couvrant une grande gamme d'animaux d'âges divers et comportant un niveau de détails remarquable, les équivalences s'établissent ainsi : 1 UGB = 1 vache laitière = 1 taureau reproducteur = 1,2 vaches allaitantes = 1,7 bovins d'âge entre 1 et 2 ans = 2,5 génisses de moins d'un an = 7,7 porcs à l'engrais = 14,3 jeunes truies = 18,2 porcelets = 6,7 béliers = 5,6 chèvres = 20 agnelles = 1,1 pouliches lourdes = 125 poulets de chair, etc. (Vilain et al., 2008, Agreste, 2007b). La valeur en termes d'UGB d'un effectif évolue donc, on s'y attendait, sur la durée de sa vie, car la quantité d'excrétions produite est fonction du volume d'aliments ingérés et donc du poids vif. Cette évolution se produit d'ailleurs dans la longue durée car le poids à l'abattage et les caractéristiques métaboliques des animaux dont dépendent les déjections annuelles évoluent de manière différée entre les espèces en fonction des bouleversements d'ordre technico-économique des secteurs d'élevage.

Comme on l'a montré dans le chapitre 4, l'ampleur et la temporalité d'augmentation des caractéristiques physiques, métaboliques et de consommation fourragère ont été différentes entre les bovins à viande, les vaches laitières et les porcs depuis le XIXe siècle, ce qui signifie que les équivalences en termes d'UGB ont évolué. En effet, un gros bovin, comme une vache laitière, dont le poids vif et le rendement annuel en lait ont considérablement augmenté depuis le XIXe siècle, valent actuellement plus de porcs dont la quantité des déjections a légèrement diminué (cf. chapitre 4). Ainsi, pour ces trois catégories animales pour lesquelles on connaît les déjections annuelles d'azote au début des trois siècles, on a retenu nos propres valeurs d'UGB. En revanche, pour les volailles, les ovins/caprins et les chevaux pour lesquels on ne dispose pas des valeurs propres, on a retenu celles des statistiques françaises actuelles (Agreste, 2007b). Les volailles n'apparaissent dans le calcul qu'au début du XXIe siècle, date à laquelle les chevaux s'en retirent. Le tableau 6.4 indique les équivalences en termes d'UGB entre les cheptels des régions approvisionnant Paris aux trois dates, exprimées par rapport aux vaches laitières actuelles.

Tableau 6.4 : Équivalences en termes d'unité gros bétail (UGB) entre les cheptels français au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Equivalences établies par rapports aux vaches laitières actuelles sur la base des déjections annuelles d'azote par catégorie animale. Lecture du tableau : 1 UGB = 1 vache laitière actuelle = 6,1 porcs au XIXe siècle etc. Source : Cette étude et Vilain et al., 2008, Agreste, 2007b.

	Vaches laitières	Bovins à viande	Porcs	Mouton	Chevaux	Volailles
XIXe	1,6	2,0	6,1	10,4	1,1	-
XXe	1,8	1,6	6,1	10,4	1,1	-
XXIe	1,0	1,6	6,6	10,4	-	125,0

On peut au moyen de ces coefficients exprimer les importations parisiennes comme fraction des effectifs des cheptels régionaux, puis utiliser cette fraction pour pondérer la quantité de fumure mise en jeu au niveau régional par les importations parisiennes de viande et de lait. Les effectifs des cheptels recensés annuellement par région et par catégorie animale sont disponibles dans les statistiques agricoles (Block, 1858, Statistique agricole annuelles, 1906, 2006).

6.4.2 Calcul de l'azote exporté sous forme de fumure des exploitations d'élevage

Jusqu'à la première moitié du XXe siècle, l'élevage constituait la condition de possibilité de la production agricole : l'apport d'azote de fumure était destiné à compenser l'azote enlevé par la récolte, cette dernière étant une fraction de la première. Pour les deux premières dates de notre étude, la quantité de fumure disponible peut être estimée comme multiple du produit agricole du territoire que l'on connaît par les statistiques agricoles.

Les céréales, cultures non-fixatrices d'azote, riches en protéines et majoritaires dans l'alimentation humaine sont celles qui déterminent en grande partie le besoin en azote de l'agriculture. S'y ajoutent les pommes de terre dont la consommation augmente au cours du XIXe siècle. Bien que de teneur protéique relativement faible, les pommes de terres extraient des quantités significatives d'azote des sols en raison des rendements agricoles élevés.

On a collecté des données sur la production et les rendements des pommes de terre et des sept céréales cultivées en France, (froment, méteil, seigle, orge, sarrasin, maïs et

avoine) par département français au début des XIXe et XXe siècles, que l'on a converties en azote et regroupées par région administrative actuelle. L'azote apporté sous forme de fumure peut ensuite être déterminé en affectant au tonnage récolté un coefficient d'utilisation de l'azote de la fumure. Billen et al. (2009) estiment le rapport entre l'azote de la récolte et l'azote de la fumure à environ 60 %. A l'appui de ce coefficient, la quantité mobilisée par région française dans la production agricole peut être évaluée. La part que l'on peut affecter aux animaux approvisionnant Paris sera proportionnelle à la fraction qu'ils représentent dans les UGB régionales.

Une fois que ce tonnage calculé, on doit en soustraire le tonnage d'azote contenu dans les céréales et les pommes de terre consommées par les animaux d'approvisionnement, car il s'agit d'un flux d'azote interne au système d'élevage dont on ne doit pas tenir compte dans le calcul de l'Emp_N-utile (cf. figure 6.1). Celle-ci sera par ailleurs calculée pour l'ensemble de l'approvisionnement parisien, c'est-à-dire sans distinction des parts relatives à la viande bovine, porcine et au lait, étant donné à la fois les incertitudes que comporterait une telle répartition et de la mixité d'espèces dans les systèmes d'élevage préindustriels.

Au début du XXIe siècle, l'élevage ne constitue plus la condition de possibilité de la production agricole. Plutôt qu'un impératif de subsistance, l'intérêt vis-à-vis du recyclage des excrétions animales est un enjeu environnemental. On connait l'étendue des superficies d'épandage par région française à partir des données de l'enquête agricole (Agreste, 2008d). En revanche, aucune information n'est disponible vis-à-vis des parts contributives des espèces animales dans la superficie fumée totale, ni sur la dose de fertilisation. Or, contrairement aux dates précédentes, il y a intérêt au début du XXIe siècle à évaluer l'Emp_N-utile par produit, ce qui permettra de tenir compte dans la caractérisation de l'empreinte parisienne, des spécificités en termes d'autonomie fourragère entre les trois secteurs d'élevage. Dans ce but, on a cherché à affecter des surfaces d'épandage aux trois cheptels approvisionnant Paris. Ceci est fait en deux temps. On a d'abord fait l'hypothèse que les surfaces d'épandage sont proportionnelles aux tailles en termes d'UGB des cheptels approvisionnant Paris, puis on a évalué cette hypothèse en fonction de la quantité d'azote organique produite par chacun des cheptels. On présente ci-après les différentes étapes du calcul.

Tableau 6.5 : Superficie totale recevant de la fumure organique (10^3 ha) par région française et répartition, en termes d'UGB des cheptels régionaux. Source : Statistique agricole annuelle (2006, 2007), Agreste (2008d) et cette étude. Voir dans le texte pour plus de détails.

	Superficies fumées régionales (10^3 ha)	Pondération des superficies régionales d'épandage par espèce animale (%)					
		Vaches laitières	Autres bovins	Porcins	Volailles	Ovins/ caprins	Total
Alsace	18	34	44	9	9	3	100
Aquitaine	247	14	51	8	17	9	100
Auvergne	423	20	67	4	3	5	100
Bourgogne	333	6	83	3	5	3	100
Bretagne	555	21	24	36	19	0	100
Centre	171	12	59	9	14	7	100
Champagne-Ardenne	160	21	64	6	6	3	100
Corse	0	0	63	8	3	26	100
Franche-Comté	321	41	53	4	1	2	100
Ile-de-France	31	19	41	3	33	4	100
Languedoc-Roussillon	3	11	58	3	7	21	100
Limousin	200	4	84	3	1	8	100
Lorraine	140	28	64	2	2	4	100
Midi-Pyrénées	437	13	56	6	7	18	100
Nord-Pas-de-Calais	179	30	47	12	10	1	100
Normandie-Basse	496	34	55	7	4	1	100
Normandie-Haute	105	29	61	5	3	2	100
Pays-de-la-Loire	610	20	51	10	18	1	100
Picardie	224	29	53	6	10	2	100
Poitou-Charentes	238	14	53	7	11	15	100
PACA	4	5	22	6	8	59	100
Rhône-Alpes	525	29	45	6	14	6	100
France entière	5 420	21	52	12	11	5	100

Le tableau 6.5 montre l'étendue des surfaces régionales d'épandage et la répartition en termes d'UGB des cheptels régionaux. A partir de ces chiffres, on a déduit, au prorata du tonnage des importations parisiennes, les superficies d'épandage correspondant à l'approvisionnement en viande bovine, porcine et en lait de la capitale. Comme expliqué précédemment, on doit soustraire de ces superficies, la fraction interne aux exploitations d'élevage. Cette opération est conduite en comparant, culture par culture, l'étendue des surfaces fumées avec l'étendue des surfaces nourricières locales, en utilisant comme seuil pour la fraction potentiellement fumée de ces dernières la fraction fumée au niveau régional (Agreste, 2008d). La surface d'épandage locale de chaque culture fourragère sera égale à la valeur minimale obtenue par cette comparaison, la différence étant égale à la surface externe. Il est évident que, si une culture recevant de la fumure au niveau régional ne fait pas partie de la surface nourricière d'une espèce animale, la fraction locale de la surface d'épandage sera nulle pour cette espèce et, par conséquent, la fraction externe sera égale à la totalité de la surface d'épandage. Ainsi, l'étendue fumée externe aux exploitations d'élevage par espèce animale et par région d'approvisionnement sera égale à la somme des écarts d'étendues entre les surfaces d'épandage totales et celles locales aux exploitations. Les superficies ainsi obtenues dérivent de l'hypothèse d'une répartition des surfaces d'épandage proportionnelle aux tailles, en termes d'UGB, des cheptels approvisionnant Paris.

Il s'agit maintenant d'évaluer cette hypothèse afin de s'assurer que la quantité d'azote exportable sur les surfaces d'épandage affectées aux trois élevages ne dépasse pas la quantité potentiellement disponible pour exportation par secteur. Afin de mener cette comparaison, il faut tout d'abord admettre une dose spécifique d'azote d'épandage. On a retenu la dose maximale autorisée par la directive nitrates, soit 170 kg N/ha (European Commission Nitrate Directive, 1991/676/CEE). Si la quantité disponible d'azote d'un secteur s'avère déficitaire, alors les surfaces d'épandage doivent être réduites à la capacité d'exportation d'azote, la différence de surface sera réallouée parmi les autres secteurs suivant le même critère. L'Emp_N-utile de l'approvisionnement par produit, sera donc égale à la valeur minimale entre la quantité d'azote disponible pour exportation et celle exportable sur les surfaces de l'étape précédente à raison de 170 kg N/ha. La dose retenue revient à comptabiliser

dans l'Emp_N-utile l'azote exporté conformément au cahier de charge de la directive nitrate, tout excédent en termes de dose par rapport au seuil de 170 kg N/ha est comptabilisé dans la profondeur de l'empreinte parisienne.

Par ailleurs, seul l'azote provenant des excrétions animales est potentiellement disponible pour exportation en vue d'une valorisation agricole. Cette quantité potentiellement exportable peut être évaluée indirectement en soustrayant de l'empreinte nette de chaque produit, les pertes spécifiques à la production des fourrages. Ceci nous amène à distinguer deux composantes pour la profondeur de l'empreinte : une spécifique à la production des fourrages, qu'on appelle « profondeur_fourrages », et une relative aux déjections animales, qu'on appelle « profondeur_excrétions ». La profondeur_fourrages correspond aux pertes d'azote lors de la croissance des plantes et peut être approchée au moyen de la NUE. On la considère comme la profondeur 'minimale' de l'empreinte parisienne dans le sens où l'azote concerné n'est pas récupérable pour une valorisation agricole. Par opposition, la profondeur_excrétions, représente l'azote dont la récupération et la valorisation est fonction de la structure des systèmes agraires et du mode de gestion des effluents d'élevage. La profondeur_excrétions est donc possible à éliminer à travers une gestion efficace des effluents et à condition des surfaces d'épandage adéquates. La profondeur_fourrages d'un produit animal i est calculée en fonction de la NUE_m de la ration correspondante (cf. tableau 6.3), qui - on s'en souvient - correspond à la NUE moyenne des fourrages pondérée par leur tonnage dans la ration (équation 6.2):

$$\text{Profondeur_fourrages}_i = N_{\text{récolte local}}{}^{i} * (1-NUE_m{}^{i})/NUE_m{}^{i} \qquad (6.2)$$

où $N_{\text{récolte local}}{}^{i}$ est le tonnage d'azote récolté au sein des exploitations d'élevage.

Rappelons que les NUE_m ont été estimées à 76 % pour les rations de viande bovine et laitières et à 62 % pour les rations porcines. L'Emp_N-utile de l'approvisionnement d'un produit i sera donc égale à la valeur minimale entre la quantité d'azote exportable sur les surfaces d'épandage évaluées en fonction des UGB et la quantité d'azote des déjections. Ceci est résumé par l'équation 6.3 :

$$Emp_N\text{-}utile_i = \min((S_{épand}^{i} * N_{dose}) ; (Emp_N\text{-}nette_i - profondeur_fourrages_i)) \quad (6.3)$$

où $S_{épand}^{i}$ est la surface d'épandage affectée à l'approvisionnement parisien en produit i en fonction des UGB, N_{dose} la dose d'application d'azote organique (égale à 170 kg N/ha) et $Emp_N\text{-}nette_i$ l'empreinte nette de l'approvisionnement pour le produit i.

D'après cette comparaison, l'étendue des surfaces fumées par les animaux approvisionnant Paris en viande bovine, porcine et le lait sont montrées dans le tableau 6.6.

Tableau 6.6 : Superficies agricoles fumées à raison de 170 kg N/ha par les animaux approvisionnant Paris en viande bovine, porcine et en lait au début du XXIe siècle. Source : Cette étude.

	Superficies d'épandage externes aux exploitations d'élevage approvisionnant Paris par produit (ha)			
Régions	Lait	Viande bovine	Viande porcine	Somme pour les trois produits
Alsace	147	1 086	167	1 400
Aquitaine	354	10 838	2 582	13 774
Auvergne	226	24 242	2 024	26 491
Bourgogne	905	15 837	1 274	18 017
Bretagne	228	6 080	28 056	34 364
Centre	590	8 548	2 157	11 295
Champagne-Ardenne	2 102	10 608	1 146	13 856
Franche-Comté	2 207	7 369	848	10 424
Ile-de-France	3 275	580	56	3 910
Languedoc-Roussillon	6	188	0	194
Limousin	1 636	15 707	834	18 177
Lorraine	550	8 492	370	9 411
Midi-Pyrénées	792	25 100	3 464	29 357
Nord-Pas-de-Calais	1 532	6 222	2 794	10 549
Normandie-Basse	305	23 310	4 337	27 952
Normandie-Haute	219	7 372	590	8 182
Pays-de-la-Loire	1 295	19 245	8 441	28 980
Picardie	9 796	5 231	830	15 857
Poitou-Charentes	212	9 622	2 232	12 066
PACA	3	94	15	112
Rhône-Alpes	254	15 837	3 287	19 378
France entière	26 636	221 607	65 503	313 746

Le calcul des surfaces d'épandage permet ainsi d'évaluer l'empreinte N utile et la profondeur_excrétions par produit alimentaire, cette dernière étant calculée pour un produit i par l'équation 6.4 :

$$\text{Profondeur_excrétions}_i = \text{Emp_N-nette}_i - (\text{Emp_N-utile}_i + \text{profondeur_fourrages}_i) \quad (6.4)$$

Notons que la profondeur_excrétions comporte les incertitudes de l'ensemble des étapes antérieures de calcul. Par exemple, sa valeur est fonction à la fois des valeurs retenues pour les inputs d'azote aux exploitations d'élevage (BNF, engrais de synthèse, dépôts atmosphériques, aliments d'importation), du calcul de l'Emp_N-utile de l'approvisionnement parisien (fonction de la pondération des surfaces d'épandage régionales par les animaux approvisionnant Paris, de la dose d'azote retenue pour l'épandage etc.), de la NUE qu'on a affectée à la production des fourrages des rations animales etc. Une perspective du présent travail serait donc de raffiner le calcul de la profondeur de l'empreinte en fonction des meilleures estimations vis-à-vis de ces variables, surtout en utilisant des valeurs de BNF et de NUE spécifiques aux milieux culturaux par région de production des fourrages.

Pour résumer : d'un côté l'identification de la profondeur_fourrages en tant que composante de la profondeur totale de l'empreinte parisienne et, de l'autre, l'affectation des valeurs de NUE à la production des rations animales ont permis de raffiner le calcul de l'Emp_N-utile de l'approvisionnement parisien au début du XXIe siècle. En revanche, cette démarche n'a pas été engagée au XIXe et début du XXe siècle en raison des données disparates, qu'accorderaient au calcul un caractère très approximatif, voire arbitraire. La disponibilité réduite des données à ces dates et la mixité des ressources animales et végétales dans les systèmes agraires préindustriels ont conduit à approcher l'empreinte azote de l'approvisionnement conjointement pour la viande bovine, porcine et le lait. Cette approche « agrégative » ne diminue pas l'intérêt de l'analyse, puisque en l'absence (ou presque) de commerce des fourrages au XIXe et début de XXe siècle et sachant que la disponibilité d'azote en agriculture était contrôlée par la BNF, les spécificités, en termes de bilan d'azote, parmi les trois secteurs d'élevage sont forcement faibles. Le seul inconvénient que cause le

changement d'approche est l'absence d'homogénéité des résultats entre d'un côté le XIXe et début du XXe siècle et de l'autre le XXIe siècle. Ceci nous amène à présenter l'empreinte parisienne en deux temps. On montre d'abord pour les trois dates et conjointement pour la viande bovine, porcine et lait, le partage de l'Emp_N-nette parisienne entre ces composantes de profondeur totale et d'Emp_N-utile. Exprimés ainsi, les résultats sont exempts d'incertitudes vis-à-vis de la pondération des surfaces d'épandage par les cheptels. Dans un deuxième temps on présentera, pour le début du XXIe siècle l'Emp_N-utile, la profondeur_fourrages et la profondeur_excrétions par produit.

6.4.3 Profondeur et Empreinte_N-utile de l'approvisionnement parisien, XIXe – XXIe siècles

La figure 6.12 montre l'empreinte N utile (Emp_N-utile) et la profondeur de l'empreinte de l'approvisionnement parisien (viande bovine, porcine et lait confondus) au début des XIXe, XXe et XXIe siècles par région d'approvisionnement. Rappelons que ces deux entités s'additionnent à l'empreinte N nette locale (Emp_N-nette locale) de l'approvisionnement. Compte tenu de la méthode de calcul, les incertitudes vis-à-vis des inputs d'azote (BNF, apport d'engrais de synthèse et dépôts atmosphériques) affecteraient surtout le calcul de la profondeur tandis que l'Emp_N-utile dépend plutôt du choix des valeurs de rendement de la fumure en céréales et de la conversion en UGB des cheptels régionaux. La profondeur de l'empreinte est probablement sous-estimée à travers le choix de BNF en Île-de-France et en Picardie au début du XXe siècle (cf. note de bas de page de la p. 263) tandis qu'elle est probablement surestimée, pour la même raison, au début du XXIe siècle dans la zone méridionale (Provence-Alpes-Côte-D'azur, Languedoc-Roussillon et Aquitaine). L'apport par BNF y est probablement moindre et la production s'appuie davantage sur le recyclage d'azote provenant des animaux nourris au pâturage. Comme on l'a déjà mentionné, cette analyse aurait à gagner beaucoup en précision si l'on disposait des valeurs de BNF par milieu cultural et par région.

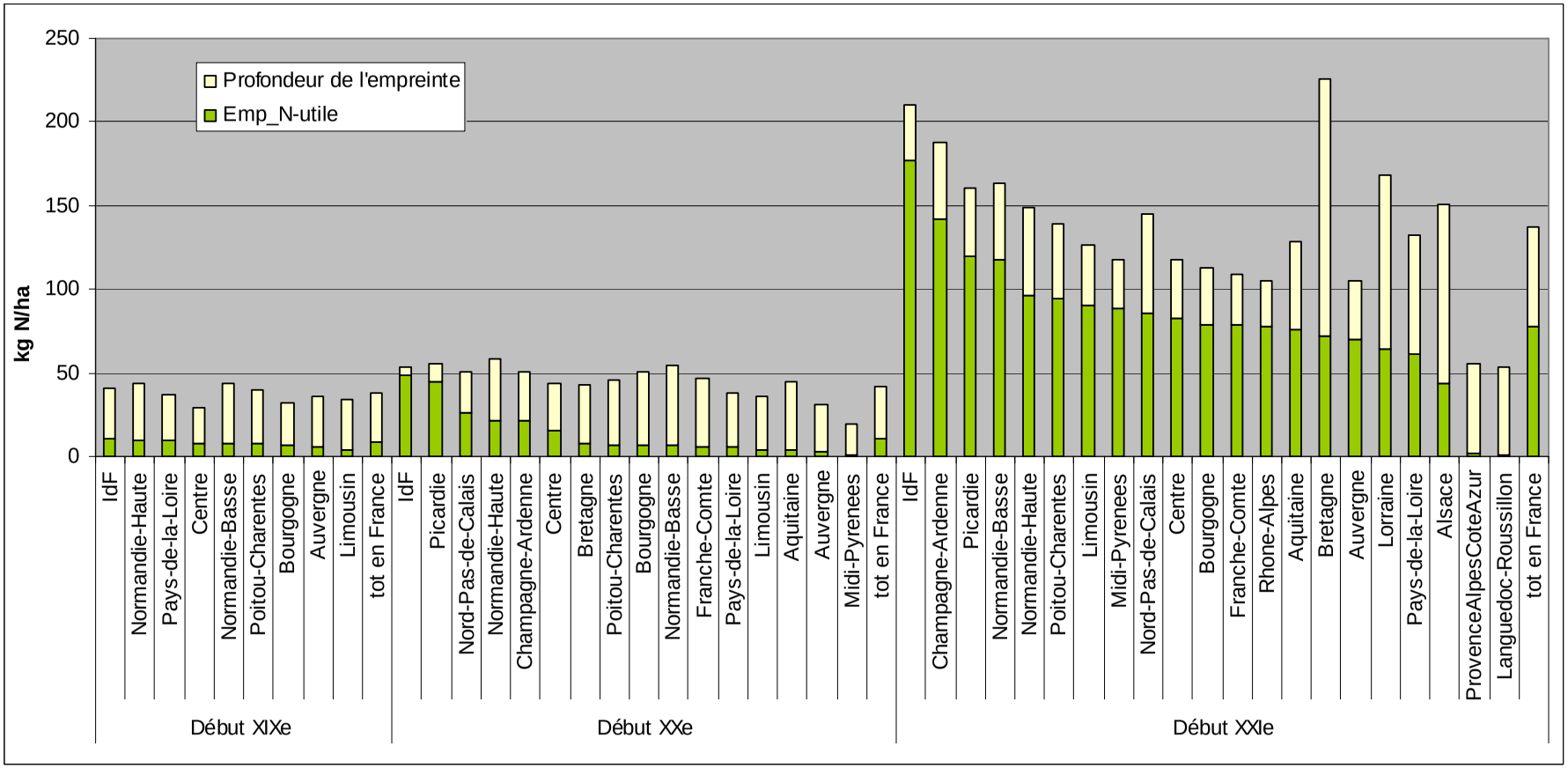


Figure 6.12 : Empreinte N utile (Emp_N-utile) et profondeur de l'empreinte de l'approvisionnement parisien (viande bovine, porcine et lait confondus) au début des XIXe, XXe et XXIe siècles par région d'approvisionnement, kg N/ha. Source : Cette étude.

L'Emp_N-utile, c'est-à-dire la quantité d'azote exportée par hectare de surface nourricière d'élevage en vue d'une valorisation agricole, a augmenté en proportions au cours des XXe et XXIe siècles : elle représentait environ 20 % de l'Emp_N-nette au début du XIXe, 25 % au début du XXe siècle et 55 % au début du XXIe siècle. Les pertes d'azote par hectare ont à contrario doublé de 30 kg N/ha au XIXe et début de XXe siècle à 60 kg N/ha en moyenne au début du XXIe siècle. Les spécificités régionales sont tout de même importantes aux trois dates.

Au début du XIXe siècle, l'Emp_N-utile est comprise entre environ 10 % et 30 % de l'Emp_N-nette dans toutes les régions. Elle varie entre moins de 10 % et plus de 90 % au début du XXe siècle et entre 0 et 85 % au début du XXIe siècle. La région de l'Ile-de-France est en tête de ce classement aux trois dates et suivie de près par la Haute-Normandie au début du XIXe et par la Picardie au début du XXe siècle[1]. Au début du XXIe siècle l'Emp_N-utile est nulle dans les régions de la Provence-Alpes-Côte-D'azur et du Languedoc-Roussillon du fait que les surfaces d'épandage y sont quasi-absentes (cf. tableau 6.5). Mais étant donné que la production animale y est marginale, l'impact environnemental global de l'approvisionnement y est limité.

Entre le début des XIXe et XXe siècles, la part d'Emp_N-utile a augmenté dans certaines régions, comme par exemple en Ile-de-France, et diminué dans d'autres, comme par exemple en Basse Normandie, ce qui illustre l'évolution contrastée au sein du pays de la production agricole et de l'élevage. L'augmentation de la part de l'Emp_N-utile dans l'Emp_N-nette de l'approvisionnement est représentative d'un équilibre croissant entre les productions animales et végétales. En revanche, la

[1] Notons que l'Emp_N-nette en Ile-de-France et en Picardie est possiblement sous-estimée au début du XXe siècle à travers le choix de la valeur BNF des prairies artificielles (cf.tableau 6.2). Dans le cas des valeurs de fixation plus élevées, l'Emp_N-utile francilienne et picarde serait proportionnellement moins élevée. Il serait de même dans le cas des apports d'azote des sources dont on n'a pas tenu compte dans l'analyse, en provenance par exemple de l'épandage des eaux usées et des gadoues urbaines (Barles, 2002, 2007a). Ces apports sont à priori négligeables vis-à-vis des besoins agricoles mais il serait tout de même intéressant de calculer le rapport des tonnages. Il serait enfin intéressant d'examiner l'éventualité des transferts interrégionaux de fumure, surtout entre régions limitrophes et interconnectées par des réseaux hydrographiques. Des telles expéditions seraient par exemple envisageables au début XXe siècle de la région de la Champagne-Ardenne vers l'Ile-de-France.

diminution de la part de l'Emp_N-utile dans l'Emp_N-nette est indicative d'une certaine spécialisation en matière d'élevage en défaveur d'autres productions. C'est le cas du développement rapide des prairies contre la stagnation ou le recul de la production des céréales au sein d'une même région. En Basse Normandie par exemple et en Midi-Pyrénées, la production des céréales a diminué de 7 % et 15 % respectivement au cours du XIXe siècle, contrairement à la production animale qui, mesurée en termes d'UGB, a dans les deux régions augmenté d'environ 60 %. La disponibilité de fumure par unité de graine récoltée y est donc bien supérieure au XXe siècle par rapport au XIXe siècle, ce qui se traduit par l'augmentation de la profondeur de l'empreinte. Mais l'évolution contrastée des deux productions dans ces régions fait exception dans le territoire. Partout ailleurs en France, les productions céréalières et animales sont toutes deux en croissance au cours du XIXe siècle. De plus, les deux types de production semblent se rapprocher géographiquement au cours du XIXe siècle, du moins à l'intérieur de l'aire d'approvisionnement parisien. En effet, la production céréalière des régions approvisionnant Paris et les expéditions d'animaux vers la capitale étaient négativement corrélées au début du XIXe siècle mais positivement au début du XXe siècle. Il s'agit d'un renversement caractéristique des transformations des systèmes agraires qui se structurent davantage autour de l'élevage. Une perspective intéressante de ce travail serait d'approfondir l'étude - du point de vue de la biogéochimie - des liens de causalité entre la demande alimentaire urbaine et le développement de la production des régions qui en assurent la satisfaction.

Tel qu'on l'a caractérisée, et compte tenu des proportions des viandes et du lait dans les importations parisiennes, l'Emp_N-utile de l'approvisionnement permet la production d'environ 0,25 tonnes de céréales par hectare d'élevage au début du XIXe, 0,35 tonnes au début du XXe et 2,35 tonnes au début du XXIe siècle, le calcul étant toujours fait pour une NUE de 50 % pour la culture des céréales ainsi produites[1]. Ceci correspond à la production de 1,3 kilogrammes des protéines sous forme de graine par

[1] Etant donné que la fertilisation organique améliore la capacité de rétention d'azote des sols (Drinkwater et al., 1998, Poudel et al., 2001), les pertes d'azote sont à priori plus faibles au XIXe et début du XXe par rapport au XXIe siècle et par conséquent, la NUE et donc le potentiel de production de l'approvisionnement est probablement sous-estimé aux deux premières dates.

kilogramme des protéines importé à Paris sous forme de viande et de lait au début du XIXe siècle, le rapport étant de 1,2 au début du XXe siècle et de 1,7 au début du XXIe siècle. Sous réserve de surestimation des inputs d'azote – et donc des pertes par lessivage et volatilisation - au XIXe et début du XXe siècle[1], l'augmentation du rapport au cours du XXe siècle indique une meilleure gestion des effluents d'élevage.

Les spécificités par région et par secteur d'élevage vis-à-vis des pertes d'azote d'origine des déjections (profondeur_excrétions) sont très importantes au début du XXIe siècle affirmant l'intérêt de l'empreinte comme outil de caractérisation des flux indirects d'azote entre la ville, les campagnes et les environnements extérieurs.

Les figures 6.13, 6.14 et 6.15 montrent respectivement pour la viande bovine, la viande porcine et le lait le partage de l'Emp_N-nette de l'approvisionnement parisien entre l'Emp_N-utile, la profondeur_fourrages et la profondeur_excrétions. La figure 6.16 montre ces résultats pour la viande bovine et le lait conjointement, du fait que ces deux produits proviennent en grande partie des mêmes exploitations d'élevage. Enfin, la figure 6.17 montre l'Emp_N-utile, la profondeur_fourrages et la profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien pour les trois produits ensemble.

[1] Gardant pourtant à l'esprit qu'au XIXe et début du XXe siècle, les pertes d'azote sont très probablement inférieures aux surplus en raison de l'augmentation probable de la teneur en composés azotées des sols (cf. note de bas de page p. 264).

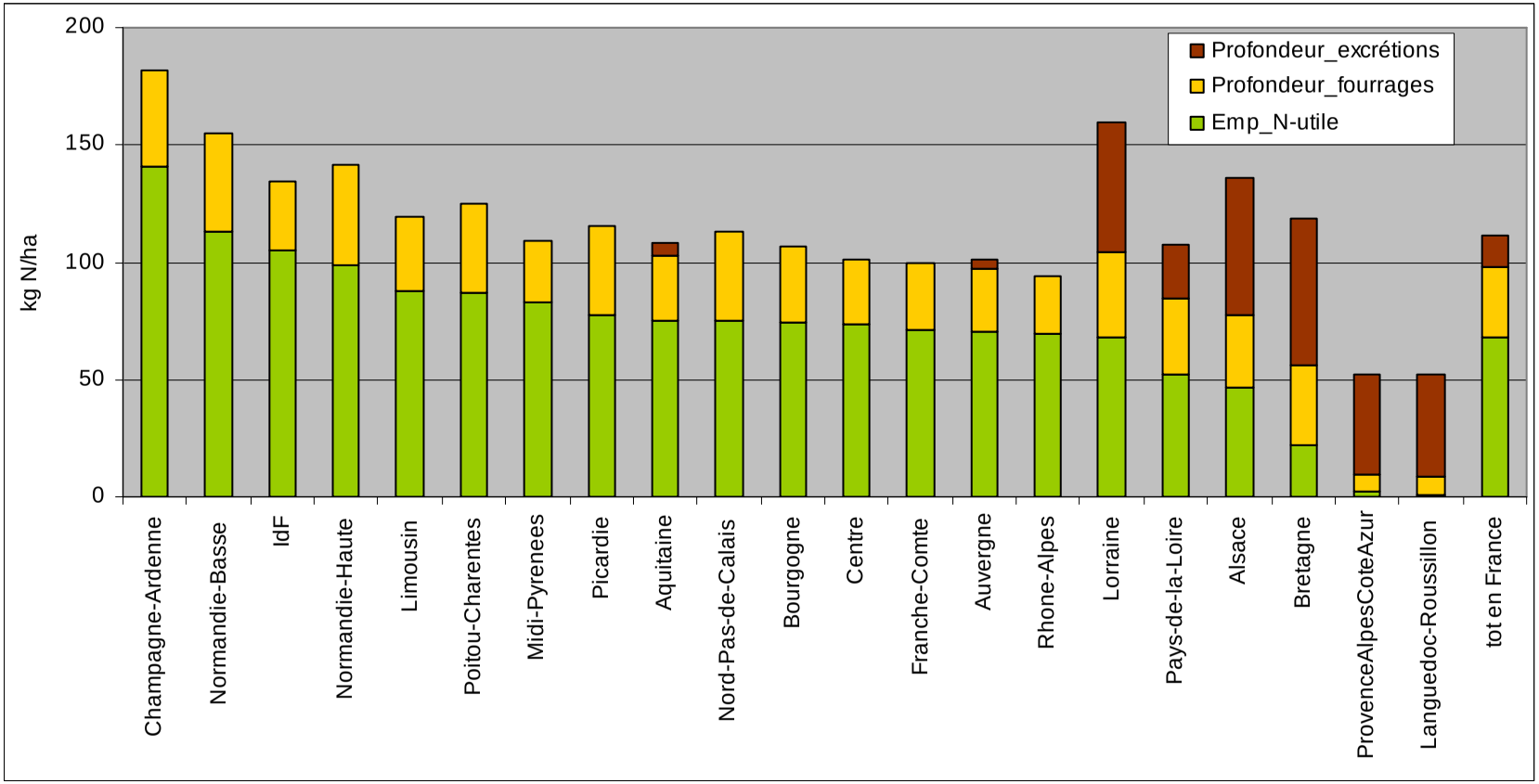


Figure 6.13 : Emp_N-utile, profondeur_fourrages et profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien en viande bovine, par région d'élevage au début du XXIe siècle. Source : Cette étude.

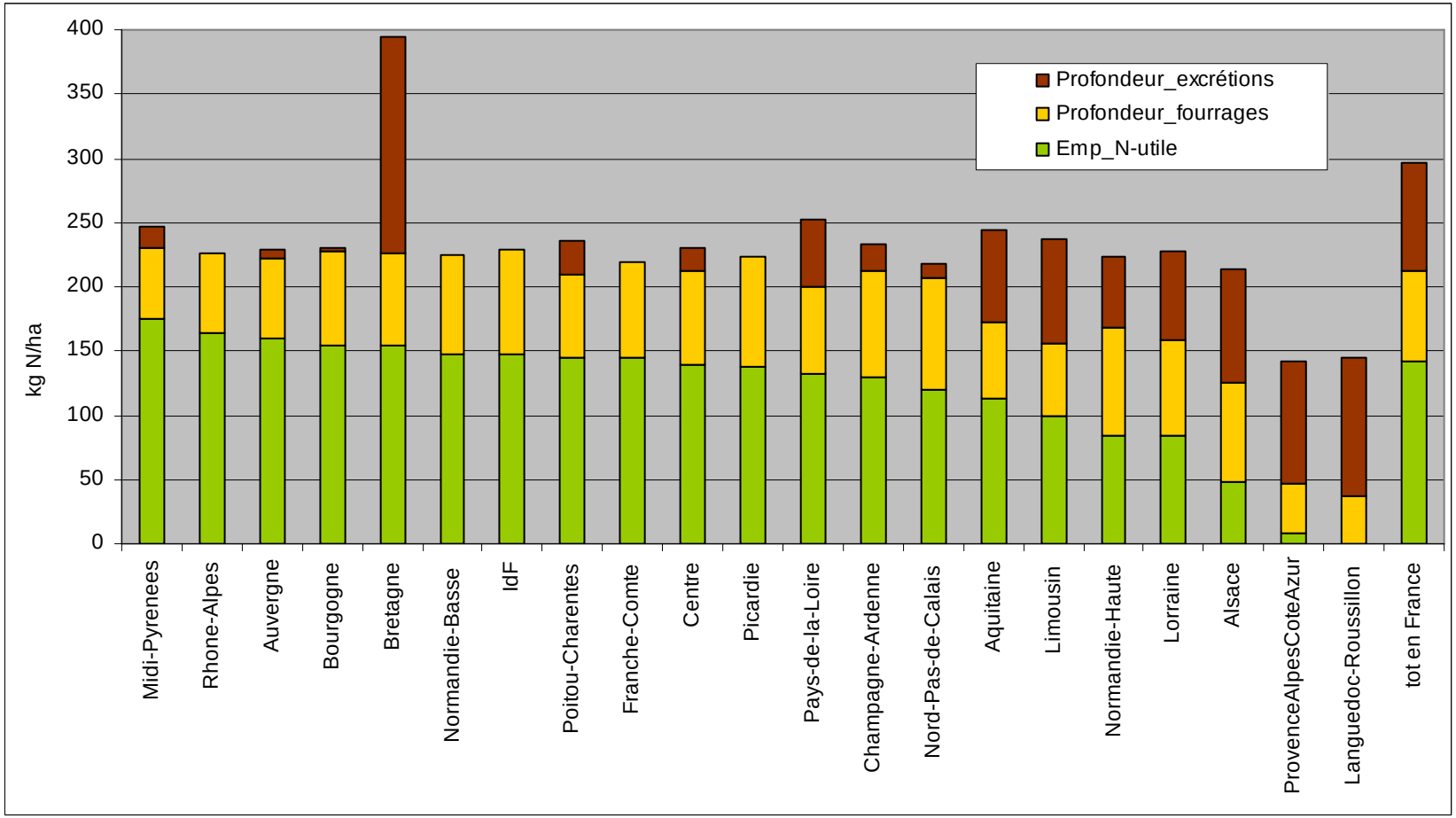


Figure 6.14 : Emp_N-utile, profondeur_fourrages et profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien en viande porcine, par région d'élevage au début du XXIe siècle. Source : Cette étude.

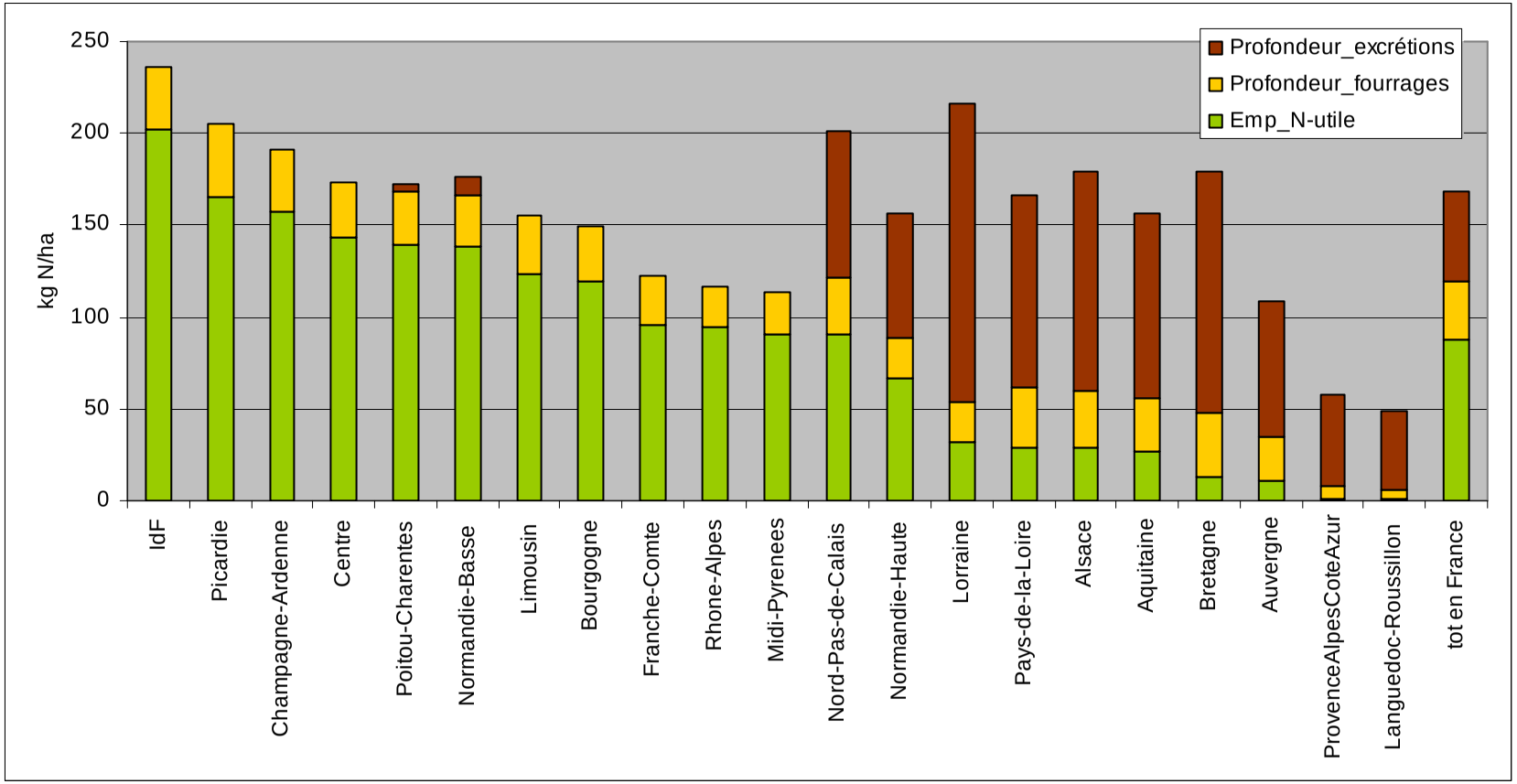


Figure 6.15 : Emp_N-utile, profondeur_fourrages et profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien en lait par région d'élevage au début du XXIe siècle. Source : Cette étude.

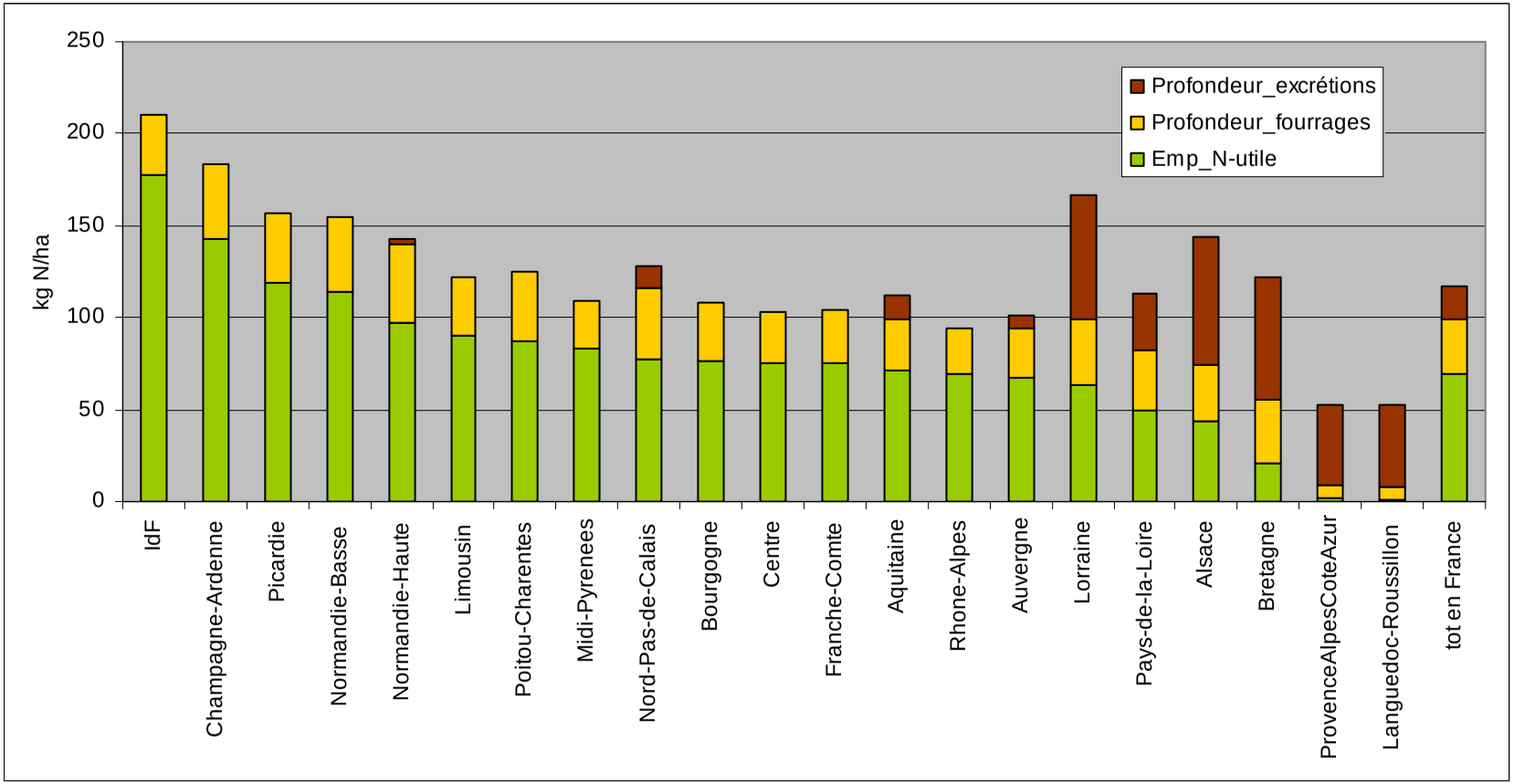


Figure 6.16 : Emp_N-utile, profondeur_fourrages et profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien en viande bovine et en lait ensemble, par région. Source : Cette étude.

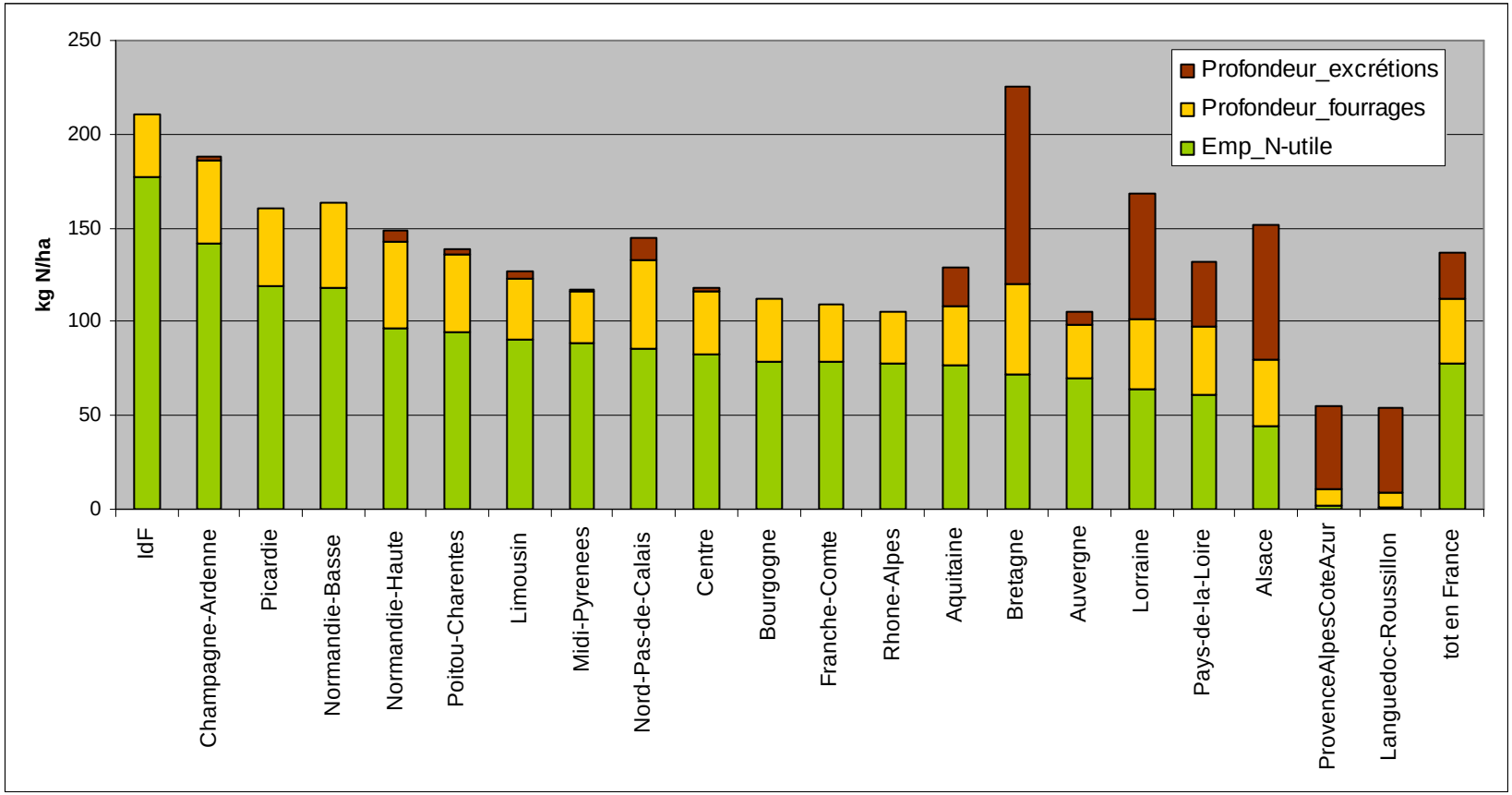


Figure 6.17 : Emp_N-utile, profondeur_fourrages et profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait ensemble par région d'élevage au début du XXIe siècle. Source : Cette étude.

Cette analyse montre que, pour certains produits et régions, la profondeur_excrétions représente une fraction plus ou moins importante de la profondeur totale de l'approvisionnement : davantage d'azote pourrait être exporté sous forme de fumure, ce qui permettrait de réduire la contribution de l'approvisionnement parisien sur la perturbation du cycle biogéochimique d'azote. De manière générale, le problème vis-à-vis des excédents concerne notamment les secteurs laitiers et porcins des régions les plus « chargées » en animaux d'élevage. En revanche, dans les grandes régions céréalières – comme par exemple, en Champagne-Ardenne, en Centre, en Picardie, en Bourgogne, en Poitou-Charentes, en Ile-de-France etc. – la profondeur_excrétions est faible ou nulle et, par conséquent, l'Emp_N-utile élevée, ce qui illustre quantitativement l'importance de la complémentarité symbiotique entre la consommation de viande et de lait des Parisiens et la production de céréales des différentes régions. En moyenne, la profondeur_excrétions s'élève à environ 14 kg N/ha pour la viande bovine, à 85 kg N/ha pour la viande porcine et à 50 kg N/ha pour le lait, soit respectivement 15 %, 30 % et 30 % de l'Emp_N-nette des trois produits. Pour l'ensemble de l'approvisionnement, l'Emp_N-utile, la profondeur_fourrages et la profondeur_excrétions sont estimées à environ 80, 35 et 25 kg N/ha respectivement.

Pour les bovins à viande et pour les vaches laitières, la profondeur_fourrage est inférieure à celle des porcs grâce à la meilleure efficacité d'utilisation d'azote (NUE) des prairies et – dans une moindre mesure - du maïs fourrager par rapport aux autres céréales annuelles concourant notamment à l'alimentation des cochons. Pour le maïs fourrager, la valeur élevée de NUE s'explique en partie par l'insertion dans les rotations, des cultures intermédiaires comme pièges à nitrates. En revanche, la distribution relativement uniforme de la profondeur_fourrages d'une même production parmi les régions, s'explique par l'invariabilité, dans le calcul, de la valeur de NUE_m affectée aux rations. A contrario, l'Emp_N-utile et la profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien présentent des spécificités régionales importantes car elles sont, avant tout, fonction de l'adéquation par rapport aux densités animales, des surfaces d'épandage à l'échelle des régions.

La profondeur_excrétions du secteur bovin est, dans la majorité des régions françaises, nulle. Ceci montre que la production de déjections par unité de surface d'élevage est, dans les régions concernées, en équilibre avec la quantité de fumure que les surfaces d'épandage environnantes peuvent accueillir dans la limite de la dose maximale autorisée par la directive nitrates. Ce résultat suggère par ailleurs que l'efficacité de recyclage des effluents azotés de l'élevage bovin peut être élevée en dépit de l'ouverture des prairies au pâturage qui, s'étend dans certaines régions, sur 30 % de l'année (Agreste, 2008d). Ceci illustre la supériorité, en termes de gestion des effluents, des systèmes d'élevage relativement extensifs par opposition aux systèmes plus intensifs comme c'est le cas notamment en Bretagne, en Pays-de-la-Loire, en Lorraine et en Alsace. Dans ces quatre régions, la valeur relativement élevée de la profondeur_excrétions s'explique par l'insuffisance en termes d'étendue, des surfaces allouées à l'épandage. Par opposition, la valeur élevée de la profondeur_excrétion dans les régions de Provence-Alpes-Côtes-d'Azur et de Languedon-Roussillon est probablement due à une surestimation des inputs d'azote par fixation symbiotique (BNF).

De manière générale, la profondeur_excrétions est maximale en Bretagne. Elle s'y élève à 105 kg N/ha pour la moyenne des trois produits (soit 50 % supérieure à l'Emp_N-utile correspondante) et y avoisine 170 kg N/ha dans le cas de la production de porcs. Compte tenu du fait que la Bretagne assure près de 60 % de la production française des porcs, les pertes d'azote de la production sont, en termes absolus, très importantes. Le problème n'est pas nouveau. Il résulte d'une certaine « congestion » de l'activité d'élevage dans cette région. En effet, les surfaces d'épandage y sont très disputées, la part allouée au secteur porcin étant actuellement de l'ordre de 35 % (cf. tableau 6.5). Nous estimons qu'environ 30 000 d'hectares en sus de l'étendue d'épandage actuelle (soit une étendue presque identique) seraient nécessaires en Bretagne afin d'y éliminer la profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien en porcs. Pour les trois produits ensemble, la superficie supplémentaire nécessaire à cet effet y est estimée à plus de 50 000 hectares, soit 150% de l'étendue mise à disposition actuellement.

En dehors de la Bretagne, la profondeur_excrétions de l'approvisionnement est comprise entre 0 et 160 kg N/ha pour le lait, entre 0 et 60 kg N/ha pour la viande bovine et entre 0 et 100 kg N/ha pour la viande porcine. La moyenne pour les trois produits ensemble, toujours sans compter la Bretagne, se situe entre 0 et 70 kg N/ha (Alsace et Lorraine). En tout – y compris en Bretagne – on estime qu'à raison du taux maximal d'épandage de 170 kg N/ha, environ 100 000 hectares devraient s'ajouter aux 310 000 hectares des surfaces d'épandage utilisées actuellement afin d'éliminer la profondeur_excrétions de l'approvisionnement parisien.

La figure 6.18 montre pour l'approvisionnement en viande bovine, porcine et en lait conjointement, les flux d'azote (kg N), les surfaces de production (ha) et la superficie d'épandage externe aux exploitations d'élevage (ha) par habitant de l'agglomération parisienne au début du XXIe siècle. Le rejet d'azote (profondeur de l'empreinte) de la production de ces trois aliments assurant 25 % de l'apport total des protéines, est de l'ordre de 9,0 kg N/hab/an, soit 1,6 Equ/Hab[1]. Par analogie et sachant que la fraction végétale de l'alimentation parisienne sera à priori caractérisée par moins de pertes d'azote que la fraction animale, l'équivalent habitant amont pour l'ensemble de l'alimentation d'un Parisien serait de l'ordre de 30 kg N/hab, soit environ 5,0 Equ/Hab. Ceci signifie que les stations d'épuration des villes ne traitent qu'environ 17 % des rejets totaux d'azote de leurs habitants.

[1] Rappelons que l'équivalent habitant (Equ/Hab) est considéré comme représentatif des émissions individuelles d'azote (notamment) dans les eaux usées urbaines (Equ/Hab = 15 g N/jour, soit 5,4 kg N/an).

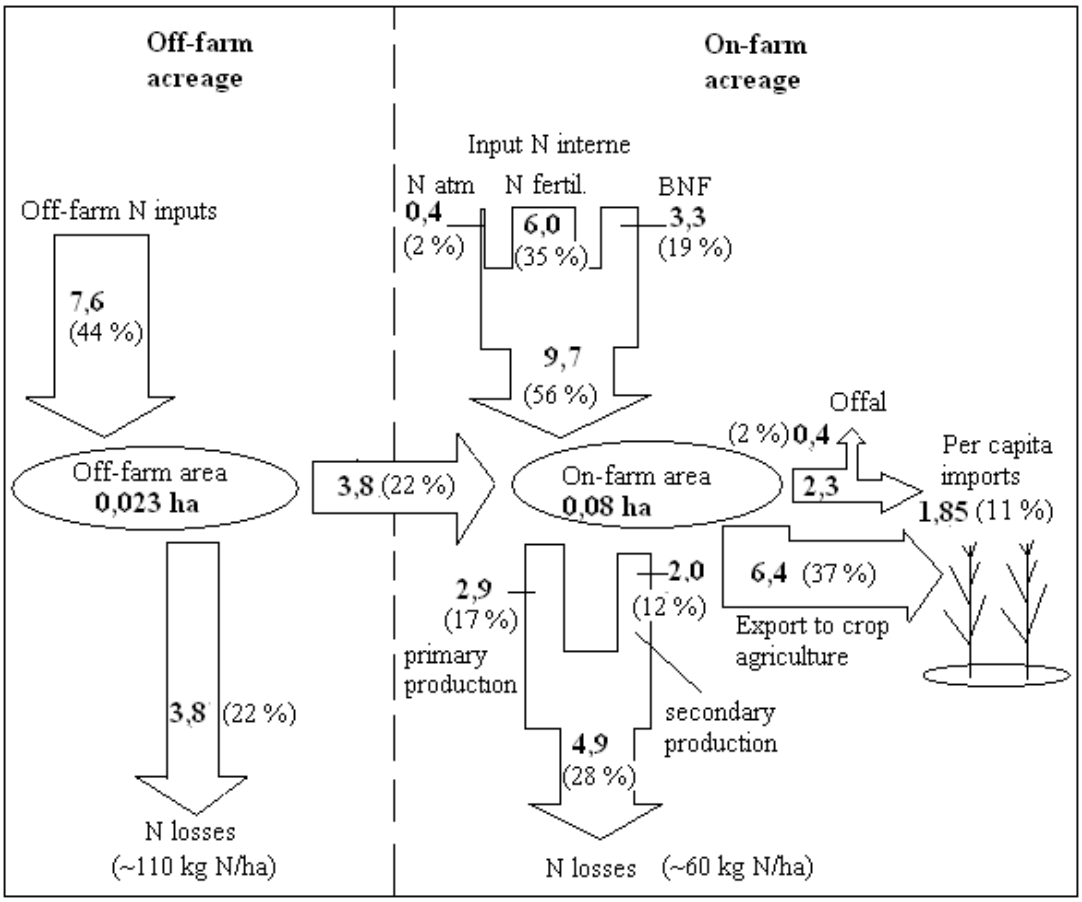


Figure 6.18 : Récapitulation de l'empreinte par habitant au début du XXIe siècle. Flux d'azote (kg N), étendue de production (ha) et superficie fumée externe aux exploitations d'élevage (ha) pour l'approvisionnement en viande bovine, porcine et en lait. Source : Cette étude.

Environ 40 % des pertes concernent les hydro-systèmes aux lieux de production des aliments importés par les exploitations d'élevage. Ce taux est égal à 58, 62 and 20 % respectivement pour la production de lait, de viande porcine et de viande bovine, soulignant le degré différent d'externalisation des impacts entre les trois secteurs. D'autre part, comme il est indiqué dans la figure 6.18, la production des fourrages est responsable de 60 % de la profondeur totale au sein des exploitations d'élevage, le reste (40 %) provenant des déjections laissées à l'abandon.

D'après ces résultats, la production végétale potentiellement soutenable par la fertilisation organique des cultures, c'est-à-dire la somme de l'Emp_N-utile actuelle et de la profondeur_excrétions, s'élève à environ 2,2 unités des protéines végétales par unité des protéines animales importées à Paris, le calcul étant fait pour une efficacité d'utilisation d'azote de la fumure de 50 %. Rappelons qu'en l'état actuel,

l’exportation de fumure permet de produire 1,7 unités des protéines végétales par unité des protéines animales importées à Paris, soit 75 % de la valeur potentielle. Pour la Bretagne, ce taux est de seulement 40 %.

Le potentiel de fertilisation de l’approvisionnement parisien provient actuellement pour 10 % des importations de lait, pour 65 % des importations de viande bovine et pour 25 % des importations de viande porcine pour la moyenne française, tandis qu’en Bretagne, l’élevage des porcs représente 70 % du potentiel de fertilisation organique. Ceci est en quelque sorte paradoxal étant donné qu’apporter de l’azote à l’agriculture a traditionnellement été l’une des fonctions des ruminants. En effet, il était impossible jusqu’à la deuxième moitié du XXe siècle que la ville importe autant d’azote sous forme des porcs et que le potentiel de fertilisation de ces derniers soit tellement élevé. Cette évolution est liée au bouleversement des sources d’azote permettant la production. Pour les bovins, le potentiel de fertilisation a nettement reculé suite à la fois au retrait des légumineuses et à l’augmentation du rendement en viande et en lait du fourrage. A contrario, le potentiel de fertilisation des porcs a augmenté dans la deuxième moitié du XXe siècle, avec la mise au service des élevages des aliments d’importation et des engrais de synthèse. L’apport d’azote que représentent ces sources pour les exploitations actuelles d’élevage est l’équivalent de l’apport par fixation biologique (BNF) que représentait l’élevage bovin pour l’agriculture préindustrielle. Tant que la fumure avait pour les agriculteurs la ‘même’ valeur que la viande pour les citadins, la faible efficacité de conversion des protéines végétales en protéines animales et la consommation urbaine élevée de viande et de lait convergeaient - à travers la valorisation des fumures organiques - vers le développement agricole des campagnes. La consommation des produits animaux peut dans une certaine mesure redevenir le moteur principal de la production végétale et rétablir la symbiose nourricière entre la ville et les campagnes. On estime que de cette façon, la profondeur de l’empreinte parisienne pourrait être réduite d’environ 40 %.

6.5 Conclusion

Telle qu'on l'a définie, l'empreinte azote est un outil de caractérisation de l'influence agro-environnementale de l'approvisionnement alimentaire, mesurée en termes des flux d'azote. Elle permet d'aborder la question de l'approvisionnement urbain à travers l'analyse des liens intrinsèques entre la demande alimentaire urbaine et la production agricole. L'Emp_N-utile, c'est-à-dire la quantité d'azote exportée sous forme de fumure par hectare de surface nourricière d'élevage, mesure la contribution des consommateurs de viande et de lait dans la fertilisation organique de l'agriculture végétale. En revanche, la profondeur de l'empreinte dont on distingue trois composantes (deux spécifiques à la production des fourrages dont une externe et une interne aux exploitations d'élevage, et une troisième résultant de fumures animales laissées à l'abandon) représente les rejets indirects et diffus de la ville relatifs à la production de la nourriture des citadins. La comptabilisation de ces rejets a permis d'élargir la notion d'équivalent habitant (Equ/Hab) classiquement considéré comme représentatif des émissions individuelles d'azote dans les eaux usées urbaines (Equ/Hab = 15 g N/jour, soit 5,4 kg N/an) et de définir un *équivalent habitant amont* qui, dans le cas de l'approvisionnement actuel en viande bovine, porcine et en lait frais, s'élève à 1,6 Equ/Hab. Etant donné que la fraction végétale de l'alimentation parisienne sera à priori caractérisée par moins de pertes d'azote que la fraction animale, on estime que l'équivalent habitant amont pour l'ensemble de l'alimentation d'un Parisien serait de l'ordre de 30 kg N/hab, soit environ 5 Equ/Hab. Ceci signifie que les stations d'épuration de l'agglomération parisienne ne traitent que 17 % environ des rejets totaux d'azote des citadins, montrant ainsi que l'influence urbaine sur l'environnement s'étend bien au delà des limites spatiales des villes. On estime pourtant que la profondeur de l'empreinte parisienne pourrait être réduite de moitié dans la production céréalière avec le rapprochement physique entre l'agriculture animale et végétale. Compte tenu des bilans actuels d'azote des exploitations d'élevage et de la dose maximale d'épandage d'azote organique fixée par la directive nitrates (soit 170 kg N/ha), ceci serait possible en alternant – en moyenne - un hectare de céréaliculture tout les trois hectares d'élevage.

Chapitre 7 : L'empreinte hydrique de l'approvisionnement parisien

7.1 Généralités

L'empreinte hydrique constitue la dernière dimension de l'empreinte alimentaire que l'on développe dans le cadre de cette thèse. Inspirés par les travaux d'Allan (1998, 2001) sur le commerce virtuel d'eau qu'engendre le commerce physique des marchandises et sur l'importance stratégique de ce commerce dans l'approvisionnement des pays arides, Hoekstra et Hung (2002, 2005) ont introduit le concept d'empreinte hydrique (water footprint) comme un indicateur spatialisé de la consommation indirecte d'eau d'une population résultant de sa consommation de produits d'origine agricole. Par habitant au niveau mondial l'empreinte hydrique est estimée à 1 240 m^3/hab/an dont environ 20 % correspondent aux flux virtuels d'eau relatifs au commerce international des produits (Chapagain et Hoekstra, 2004).

L'agriculture est le plus grand consommateur d'eau et le climat du lieu de production agricole joue un rôle majeur dans le coût hydrique de la consommation alimentaire. Les échanges de produits agricoles entre les pays peuvent se traduire par des économies importantes d'eau quand les pays exportateurs sont caractérisés par des climats plus favorables à la production agricole que les pays importateurs[1]. À l'échelle mondiale, les économies d'eau de ce type sont estimées à 352 Gm^3/an, soit environ 5 % de l'empreinte globale (Chapagain et al., 2006a). Suite à ces estimations, d'autres études ont approfondi le calcul de l'empreinte hydrique de certains produits agricoles en distinguant la part de l'eau pluviale et d'irrigation dans la consommation totale d'eau et en proposant une quantification de l'effet polluant de la production à travers la conversion des quantités de polluants émis dans l'environnement en volumes d'eau jugés nécessaires à leur neutralisation par dilution. Chapagain et al. (2006b) ont ainsi estimé l'empreinte hydrique de la production mondiale de coton à 256 Gm^3/an, soit

[1] Il convient pourtant de noter que par rapport à d'autres effets environnementaux que peut induire le transport des produits (ex. : consommation d'énergie non renouvelable, pollution atmosphérique dont gazes à effet de serre, ouverture des cycles biogéochimiques, etc.) l'intérêt environnemental des économies d'eau peut être contesté.

43 m^3/hab/an, dont 81 % correspond à l'empreinte quantitative (39 % d'eau pluviale et 42 % d'eau d'irrigation évapotranspirée) et 19 % à l'empreinte qualitative (volume de dilution des polluants lors de la production de coton et de l'élaboration des produits de consommation). L'empreinte ainsi calculée est en outre spatialisée à l'échelle des régions des principaux pays de production et de transformation du coton, ce qui fait de cette étude la première à relier la consommation mondiale d'un produit avec une demande locale d'eau. Depuis, Chapagain et Orr, (2008) ont évalué l'empreinte hydrique de la consommation européenne de tomates par région de production en Espagne. Dans la même lignée, les empreintes hydriques de la consommation mondiale de blé (Mekonnen et Hoekstra, 2010) et de riz (Chapagain et Hoekstra, 2011) ont été évaluées par pays de consommation et par région de production à 108 et 784 Gm^3/an chacune, avec une part de l'eau pluviale, d'irrigation et de dilution respectivement évaluée à 70 %, 19 % et 11 % pour le blé et à 48 %, 44 % et 8 % pour le riz.

Nous évaluons ici l'empreinte hydrique de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait, par région de production des aliments du bétail et en fonction de la productivité agricole au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Il s'agit de la première évaluation de l'empreinte hydrique à l'échelle urbaine et sur une période historique longue. Des résultats préliminaires sur l'empreinte hydrique de Paris intramuros pour l'approvisionnement en viande bovine et ovine au début des XIXe et XXe siècle sont disponibles dans Chatzimpiros et Barles (2008a). Les changements de composition des rations animales et l'évolution des rendements agricoles depuis le début du XIXe siècle constitueront deux variables principales dans l'évolution de l'intensité d'utilisation de l'eau pour ravitailler Paris.

7.2 Méthodes et données

7.2.1 L'empreinte hydrique quantitative

Il s'agit de mesurer le volume d'eau pluviale et d'irrigation mobilisés (évapotranspirés) dans la production des fourrages consommés par les animaux approvisionnant Paris. Schématiquement, ce volume correspond à l'étendue de l'empreinte spatiale fois la hauteur moyenne d'eau extraite des sols agricoles sous l'action de l'énergie solaire.

Cette extraction, qu'on appelle évapotranspiration réelle (ETR), n'est évidement pas uniforme dans l'espace mais varie en fonction du potentiel d'évapotranspiration d'une culture sous un climat donné et de la disponibilité d'eau des sols qui fixe le niveau de réponse des surfaces terrestres par rapport aux forçages climatiques. Étant donnée les grandes étendues de production, l'ETR est rarement mesurée directement. Elle peut en revanche être évaluée indirectement à partir des données météorologiques, pédoclimatiques et culturales. On évaluera l'ETR comme la valeur minimale entre la demande en eau des plantes et la disponibilité hydrique des sols et on discutera les divergences méthodologiques avec des études antérieures.

7.2.1.1 La notion d'évapotranspiration de l'eau

L'évapotranspiration correspond à la somme du processus purement physique d'évaporation d'eau à partir d'une surface humide (E) et du processus biophysique de transpiration d'eau par les stomates des plantes qui survient lors de la formation de biomasse végétale (Monteith, 1994). Il s'agit de deux fonctions simultanées et en interaction entre elles, qui sont difficiles à mesurer séparément : la transpiration des plantes et le développement du couvert végétal qui contribuent respectivement à élever le taux d'humidité de l'air et à réduire la quantité d'énergie solaire atteignant le sol, se combinent pour affaiblir le processus d'évaporation directe d'eau. Inversement, l'assèchement des couches supérieures de sols par l'évaporation directe d'eau peut réduire ou empêcher la transpiration des cultures en fonction du stade végétatif dont dépend la profondeur du système racinaire.

De manière générale, l'évaporation domine dans le processus d'évapotranspiration au début du cycle végétatif et diminue progressivement en proportions avec la croissance de la canopée, l'approfondissement du système racinaire et la densification de la couverture de sols faisant barrière au transfert d'énergie. L'évaporation et la transpiration sont donc difficilement mesurables séparément, bien qu'elles constituent deux fonctions distinctes de transfert dans le cycle de l'eau. Par conséquent, même si l'évaporation est externe au processus de production de biomasse, elle est traitée comme faisant partie des besoins en eau des cultures et contribue à l'empreinte hydrique des consommateurs. Ainsi, si la transpiration correspond aux besoins

minimaux d'eau de la production culturale, l'évaporation représente les pertes latérales et indissociables de la production.

7.2.1.2 Calcul des besoins en eau des cultures

Le logiciel CROPWAT, développé par la FAO (FAO, 1992), est un outil de calcul des besoins en eau des cultures et d'évaluation des besoins d'irrigation à partir des données météorologiques et pédoclimatiques. Il est largement employé au niveau international dans des applications pratiques et académiques, y compris dans la quasi-totalité des études d'empreinte hydrique (Hoekstra et al., 2009). Il a été utilisé pour notre étude pour le calcul des besoins en eau des cultures (CWR – abréviation anglaise de Crop Water Requirements).

CROPWAT évalue les CWR quotidiens avec la méthode des coefficients culturaux. Dans cette méthode, les CWR d'une culture sont calculés en fonction de l'évapotranspiration potentielle (ET_o) d'une prairie hypothétique type, non-limitée en eau et dont les rendements pour un climat donné sont maximaux et fonction seulement du climat. Ces conditions idéales de production s'appellent conditions standards ou optimales (standard conditions) (Doorenbos et Kassan, 1979). De l'autre côté, les coefficients culturaux (K_c) expriment les différences en termes d'évapotranspiration entre cette prairie hypothétique et d'autres cultures. Les coefficients K_c sont adimensionnels et les ET_o et CWR se mesurent en millimètres (mm). On a ainsi l'équation 7.1 :

$$CWR = ETo \times K_c, \qquad (7.1)$$

Les deux termes de l'équation 7.1 sont complémentaires : l'ETo permet d'évaluer la demande hydrique sous un climat donné indépendamment de la culture, tandis que les coefficients K_c sont indépendants des conditions climatiques et simplement fonction des spécificités culturales en termes d'albédo, de propriétés aérodynamiques et de caractéristiques physiologiques (Allen et al., 1998).

L'évapotranspiration potentielle ET_o, aussi appelée de référence, peut être calculée par différentes méthodes. L'équation Penman-Monteith, incorporée dans le logiciel CROPWAT, est recommandée par la FAO pour le calcul de l'ET_o. Il s'agit d'un

modèle à base physique permettant une bonne précision dans le calcul de l'ET_o en fonction des données climatiques et météorologiques journalières standards (Allen et al., 1998), selon l'équation 7.2 :

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \qquad (7.2)$$

où
ET_o : évapotranspiration de référence [mm day^{-1}],
R_n : radiation solaire nette à la surface du sol [MJ m^{-2} day^{-1}],
G : densité du flux de chaleur au niveau du sol [MJ m^{-2} day^{-1}],
T : température de l'air à la hauteur de 2 mètres du sol [°C],
u_2 : vitesse du vent à la hauteur de 2 mètres du sol [m s^{-1}],
e_s : pression de saturation de la valeur d'eau [kPa],
e_a : pression actuelle de la vapeur d'eau [kPa],
e_s - e_a : écart entre la pression de saturation et la pression actuelle de la vapeur d'eau [kPa],
D : pente de la courbe de pression de la vapeur d'eau [kPa $°C^{-1}$],
g : constante psychométriques [kPa $°C^{-1}$]

Le jeu de données nécessaires au calcul de l'ET_o est disponible dans la base de données CLIMWAT (FAO, 1993) pour la (quasi-)totalité des pays du monde et pour plusieurs stations météorologiques par pays. On y retrouve pour la France des données d'au moins une station météorologique par région administrative. Ainsi, pour les fourrages d'origine française, on a calculé l'ET_o par région administrative, et pour les fourrages importés de l'étranger par pays d'origine.

Les valeurs de K_c dépendent de l'espèce culturale et du stade végétatif de celle-ci et sont indépendantes du climat de production. Trois valeurs de K_c par culture ($K_{c\text{-}ini}$, $K_{c\text{-}mid}$, $K_{c\text{-}end}$) sont fournies dans le jeu de données du logiciel CROPWAT, selon la subdivision en quatre phases du cycle végétatif des cultures : la phase initiale qui s'étend du semis à environ 10 % de couverture végétale du sol ($K_c = K_{c\text{-}ini}$), la phase de développement du couvert végétal qui se termine au moment où la couverture du sol est complète ($K_{c\text{-}ini} < K_c < K_{c\text{-}mid}$), la mi-saison qui se termine au début de la chute ou de sénescence du feuillage ($K_{c\text{-}mid} < K_c < K_{c\text{-}end}$), et enfin la phase de maturation ($K_c = K_{c\text{-}end}$). Les valeurs de K_c des phases de développement (crop development) et de maturation (late season) sont obtenues par interpolation linéaire (figure 7.1). Les rapports des durées entre les phases sont spécifiques aux cultures et disponibles dans

le jeu de données de CROPWAT. Le tableau 7.1 montre les valeurs de K_c et la date de semis utilisées dans le calcul des CWR des cultures principales de notre étude.

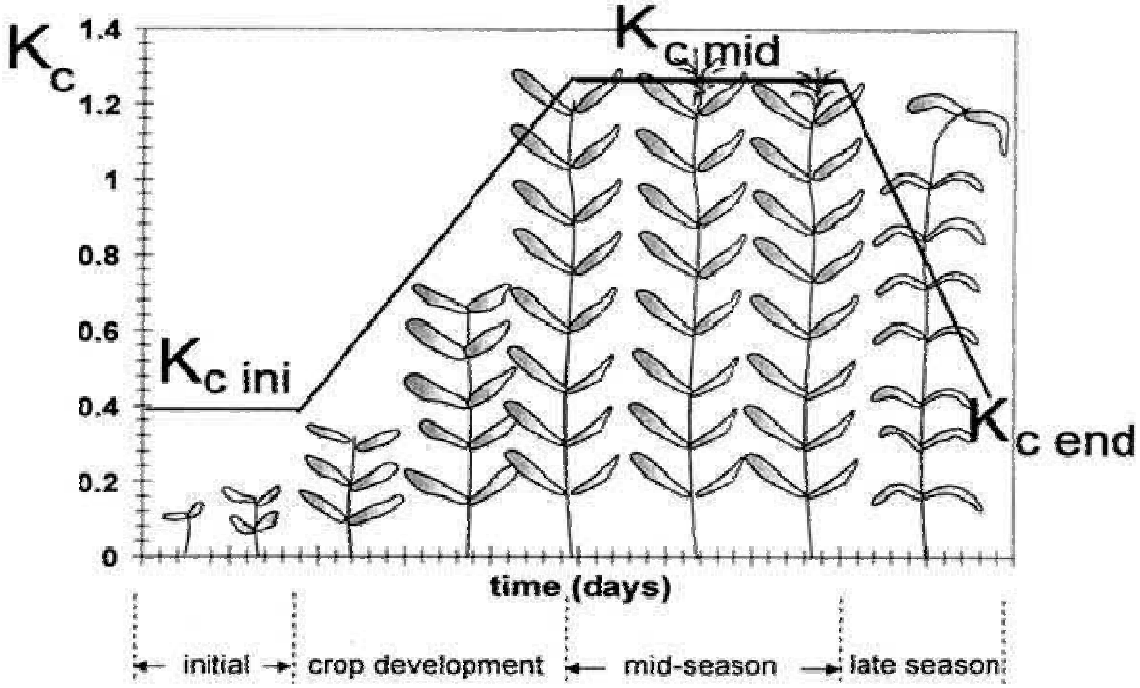


Figure 7.1: Schéma indicatif des coefficients culturaux K_c par stade végétatif. Source : www.fao.org.

Tableau 7.1: Valeurs de Kc par stage végétatif des principales cultures utilisées dans cette étude. Source : Allen et al., 1998.

	Date de semi	$K_{c\text{-}ini}$	$K_{c\text{-}mid}$	$K_{c\text{-}end}$
Blé d'hiver (sols non zélés)	20 octobre	0.7	1.15	0.25-0.4
Maïs	1er mai	0.3	1.2	0.35
Orge	20 octobre	0.3	1.15	0.25
Colza	20 août	0.35	1.0-1.15	0.35
Luzerne	Plante vivace	0.4	0.95	0.9
Prairies naturelles	Plante vivace	0.4	0.85-1.05	0.85
Soja	10 octobre	0.4	1.15	0.5

L'évapotranspiration réelle d'une culture (ETR) peut être inférieure aux besoins maximaux CWR, dans le cas d'une production de biomasse limitée en raison 1) des déficits hydriques, 2) d'autres facteurs limitant les rendements, comme par exemple des déficits de nutriments. Dans les deux cas, l'évapotranspiration réelle (ETR) sera inférieure aux CWR calculés par CROPWAT et les écarts seront à priori égaux à la réduction de la transpiration des cultures. Dans la grande majorité des travaux

d'empreinte hydrique disponibles dans la littérature, l'empreinte hydrique des produits agricoles est calculée sur la base des CWR, plutôt que sur l'évapotranspiration réelle (Hoekstra et Chapagain, 2004, Chapagain et al., 2006a,b). De notre côté, on s'est approché de l'évapotranspiration réelle des cultures en deux étapes : on a d'abord ajusté les CWR simulés en fonction des rendements réels des cultures par date et par région (CWR spécifiques), puis on a confronté les résultats obtenus avec des estimations de la disponibilité d'eau des sols.

7.2.1.3 Calcul des CWR spécifiques

L'ajustement des CWR comporte deux étapes : la première étant de calculer les écarts entre les rendements réels des cultures et les rendements de référence utilisés dans les simulations de CROPWAT et la seconde de convertir ces écarts de production en écarts de transpiration. La transpiration d'une culture est fonction linéaire de la quantité de biomasse produite et dépend de la composition chimique de celle-ci (Montheith, 1994, Goudriaan et al., 2001). La quantité transpirée par unité de production dépend du chemin biochimique suivi dans le processus de la photosynthèse (elle est plus élevée chez les cultures de type C_3 comme le blé, les pommes de terre, l'orge etc. par rapport aux cultures de type C_4 comme le maïs[1], (Montheith, 1977)) et est maximale dans la fabrication des lipides, minimale pour les hydrocarbures et intermédiaire pour les protéines (Penning de Vries, 1983, Gerbens-Leenes et Honhebel, 2004). Des données sur l'augmentation de la transpiration des plantes par unité de production de biomasse sont disponibles pour sept cultures hypothétiques (H-cultures), représentatives en termes de teneur en hydrocarbures, en protéines et en lipides des dix catégories culturales, majoritaires dans l'alimentation humaine et animale (Gerbens-Leenes et Nonhebel, 2004). Le tableau 7.2 indique la quantité d'eau transpirée par unité de production de biomasse des six H-cultures qu'on a utilisées dans notre étude[2].

---

[1] Les indices 3 et 4 montrent le nombre d'atomes de carbone du premier composé stable formé lors du processus de la photosynthèse (égal donc à 3 et 4 chez les plantes C_3 et C_4 respectivement).

[2] Dans l'étude de Gerbens-Leenes et Nonhebel (2004), les H-pommes de terres représentent des cultures relativement riches en hydrocarbures, relativement pauvres en protéines, relativement

Tableau 7.2 : Transpiration d'eau par unité de production de biomasse (lt/kg MS) de six cultures hypothétiques (H-cultures). Source : Gerbens-Leenes et Nonhebel, 2004.

	H-pommes de terres	H-blé	H-maïs (climat tempéré)	H-pois sec	H-colza d'hiver	H-prairie naturelle (grass)
lt/kg MS	150	240	171	185	303	176

On affectera ces valeurs de transpiration aux écarts de rendement entre les cultures réelles et les rendements de référence utilisés dans les simulations des CWR. On connaît les rendements de référence pour un grand nombre de cultures à partir des données de la FAO (Doorenbos et Kassam, 1979). Les cultures non renseignées dans cette base de données mais faisant partie des aliments consommés par le bétail à – au moins – une des trois dates de notre étude sont le colza, l'orge, les prairies naturelles, le seigle, les fèveroles et le soja. Pour ces cultures, on a considéré que les rendements actuels moyens en France métropolitaine et – pour le soja – ceux aux pays d'origine du soja importé, sont représentatifs des rendements de référence (Statistique agricole annuelle, 2006, FAOSTAT, 2006). Cette hypothèse se confirme dans le cas des rendements de référence des cultures renseignées dans la base de la FAO. Les besoins spécifiques en eau par culture et par région (CWR_{spec}, mm) sont calculés en fonction des rendements avec l'équation 7.3 :

$$CWR_{spec} = CWR*(1-\max((R_{réf}- R_{réel})*T ;0)) \quad (7.3)$$

où

CWR : besoins en eau par culture et par région simulés avec CROPWAT (mm)

T : hauteur de transpiration d'eau par unité de production de biomasse et par catégorie culturale du tableau (lt/kg MS)

Rréel : rendements agricoles réels par culture et par région de production au début des XIXe, XXe et XXIe siècles (kg MS/ha)

Rréf : les rendements de référence correspondant aux CWR simulées (kg MS/ha)

On admet par l'équation 7.3 que :

---

pauvres en lipides et dont une fraction élevée de la biomasse végétale totale est comestible. Elles représentent ici l'ensemble des tubercules. Le H-colza d'hiver, est représentatif des cultures relativement riches en lipides et représente ici l'ensemble des oléagineuses. Le H-blé et le H-maïs sont respectivement représentatifs des céréales type C3 et C4. La H-prairie naturelle et le H-pois sont tenus pour représentatifs des légumineuses vivaces et des cultures protéagineuses respectivement.

1) tout déficit de productivité par rapport aux rendements de référence - c'est surtout le cas de la production agricole au XIXe et début du XXe siècle - se traduit par la réduction de l'évapotranspiration totale proportionnellement à l'écart des rendements. C'est à dire que la réduction de la transpiration n'est pas compensée par l'augmentation de l'évaporation, ce qui est en principe conforme avec le fait qu'à des stades végétatifs avancés, les plantes exploitent de l'eau qui, en raison de sa localisation plus ou moins profonde, n'est pas sujette à l'évaporation (effet tampon) ;

2) la CWR est une valeur seuil pour l'évapotranspiration, c'est-à-dire que dans le cas des rendements supérieurs aux rendements de référence, toute augmentation de la transpiration des plantes est suivie par la réduction - de la même ampleur - de l'évaporation directe des sols, la somme des deux restant égale à CWR. Ceci est conforme avec le fait que la densification du couvert végétal et l'humidification de l'air conduisent à priori à réduire l'évaporation directe des sols. Cette deuxième hypothèse est conservatrice dans le sens qu'elle est susceptible de sous-estimer l'empreinte hydrique des Parisiens, surtout au début du XXIe siècle.

Les CWR_{spec} ainsi calculées fournissent une bonne estimation de l'évapotranspiration réelle des cultures (ETR) par climat et par niveau de production. Afin de limiter les incertitudes de calcul et d'évaluer les apports éventuels d'eau d'irrigation, on a choisi de comparer les CWR_{spec} avec la disponibilité hydrique aux sites de production. Celle-ci sera évaluée à partir des données pluviométriques et pédologiques. En l'absence d'irrigation, l'ETR sera prise égale à la valeur minimale entre la quantité disponible d'eau et les CWR_{spec} des cultures.

7.2.1.4 L'évapotranspiration réelle - ETR

La disponibilité d'eau dépend des apports pluviaux et d'irrigation, les premiers pouvant être évalués à partir des données pluviométriques et des données sur la capacité de rétention d'eau des sols, et les deuxièmes à partir des doses d'irrigation. Les doses d'irrigation sont cependant des données rarement disponibles dans les statistiques. On les a évaluées indirectement sur la base des déficits hydriques des cultures et des données sur les taux d'irrigation. La dose réelle d'irrigation par culture

et par région - inférieure ou égale aux déficits – sera calculée au prorata des surfaces irriguées.

Les données pluviométriques indiquent les hauteurs mensuelles des précipitations (pluie totale) enregistrées aux stations pluviométriques des régions de production des fourrages. On a utilisé le jeu de données disponible dans la base CLIMWAT (FAO, 1993) par région française et par pays étranger de production des fourrages. Les données de cette base concernent une année pluviométrique moyenne.

On a considéré que 90 % de la pluie totale – fraction qu'on appelle pluie effective (ER, - effective rainfall) - devient potentiellement disponible pour la production agricole, le 10 % restant étant considéré comme « perdu » du point de vue de la production par voie de ruissellement des sols et d'interception d'eau par le couvert végétal. Les hauteurs mensuelles de pluie effective sont ensuite réparties à l'intérieur de chaque mois par une courbe polynomiale paramétrée par défaut dans CROPWAT. On a effectué le calcul avec un pas de temps de 20 jours. Ceci a permis de comparer l'apport de pluie effective (ER) avec les CWR des cultures et d'évaluer à la fois la consommation d'eau pluviale à chaque pas de temps et la variation de la disponibilité d'eau des réserves utiles des sols (RUS). A chaque pas de temps i, cette dernière est égale à la somme entre d'un côté la disponibilité d'eau au pas précédent (RUS_{i-1}) et de l'autre la différence arithmétique entre la pluie effective (EF) et les CWR. Si CWR > EF, les plantes puisent de l'eau dans la réserve utile jusqu'à la satisfaction de leurs besoins ou l'assèchement de la réserve utile des sols. Si en revanche CWR < EF, les réserves utiles se remplissent d'eau en quantité égale à « EF-CWR » à condition que RUS_i soit inférieure à la capacité nominale de rétention (RUS_{nom}), équation 7.4 :

$$RUS_i = \min (RUS_{i-1} + (ER_{i-1} - CWR_{i-1}) \; ; \; RUS_{nom}) \qquad (7.4)$$

La capacité nominale de rétention d'eau dépend des propriétés physicochimiques des sols. Jacquard et Choisnel (1985) ont proposé une cartographie des valeurs de RUS_{nom} en France, pour le premier mètre de profondeur des sols, à partir des mesures diffuses dans le territoire. Les RUS_{nom} varient habituellement entre 50 mm et 200 mm. On a moyenné ces valeurs diffuses par région administrative française et on les a introduites dans le calcul de l'empreinte. Tout apport d'eau excédant la capacité

nominale de rétention constitue une « perte » du point de vue de l'agriculture, notamment par percolation profonde. L'eau des réserves utiles sera accessible aux plantes pour un taux (a) égal à la profondeur du système racinaire dans le premier mètre de profondeur du sol. Ceci est égal à 80 % pour les prairies dont le système racinaire atteint 0,8 mètres de profondeur, et à 100 % pour toutes les autres cultures de notre étude (FAO, 1992). Les prélèvements d'eau d'origine pluviale (CEP, mm) sur la durée végétative des cultures peuvent donc être calculés comme le cumul des prélèvements à chaque pas de temps i avec l'équation 7.5 :

$$CEP = \sum(CEP_i) = \sum (\min (CWR_i ; (ER_i + a*RUS_i))) \quad (7.5)$$

où CWR_i, ER_i, RUS_i et CWR_{i-1}, ER_{i-1} RUS_{i-1} sont respectivement les besoins en eau des cultures, la pluie effective et la disponibilité d'eau des réserves utiles des sols aux temps i et i-1, RUS_{nom} est la capacité nominale de rétention d'eau des sols et « a » le taux d'accessibilité aux cultures des réserves utiles du sol.

En climat tempéré - comme c'est le cas de la France - les réserves utiles se remplissent habituellement entre la mi-septembre et la mi-février et elles sont à sec entre le début juin et la fin août. C'est pendant cette période d'assèchement qu'ont lieu les besoins d'irrigation (I_{besoin}, mm). On a évalué ces besoins par culture et par région avec l'équation 7.6 :

$$I_{besoin} = \max ((CWR_{spec} – CEP) ; 0) \quad (7.6)$$

où CWR_{spec} et CEP sont respectivement les besoins en eau spécifiques au niveau des rendements et les prélèvements d'eau d'origine pluviale.

D'après cette analyse, on obtient que des déficits hydriques concerneraient au début des XIXe et XXe siècles les prairies de certaines régions françaises (le déficit moyen étant évalué à 45 mm), tandis qu'au début du XXIe siècle, des déficits apparaissent dans la majorité des régions et concernent toutes les cultures fourragères - à l'exception des légumineuses vivaces. Les déficits concernent particulièrement les prairies naturelles (déficit moyen de 100 mm), le maïs fourrager et grain (déficits moyens de 60 et 70 mm respectivement) et les cultures de colza et de blé des régions du centre de la France (déficits moyens d'environ 50 mm). Pourtant, compte tenu des

incertitudes de calcul relatives d'une part aux données pluviométriques, pédoclimatiques, de rendements agricoles de référence et aux écarts en termes d'évapotranspiration avec les rendements réels des cultures, et d'autre part à l'effet que les déficits hydriques des sols peuvent avoir sur l'évaporation directe des sols, on tient les résultats sur les besoins d'irrigation comme des approximations indicatives. Sachant en revanche que la systématisation de l'irrigation ne débute pratiquement que dans la deuxième moitié du XXe siècle (la surface irrigable en France des années 1970 ne comptait par exemple qu'environ 800 * 10^3 ha contre 2500 * 10^3 ha en 2007 (Gleyses et Rieu, 2004, Agreste, 2008d)) et qu'actuellement même, le taux d'irrigation des prairies naturelles est à priori inférieur à 3 % - déduction faite à partir des données de l'enquête agricole sur les pratiques culturales en 2006 (Agreste, 2008d) et de l'enquête sur la structure des exploitations agricoles en 2007 (Agreste, 2008f) -, on n'a pas tenu compte d'apport d'irrigation au début des XIXe et XXe siècles. A contrario, au début du XXIe siècle, les doses d'irrigation (I_{dose}) ont pu être évaluées en multipliant les besoins d'irrigation (I_{besoin}) par culture et par région, obtenus avec l'équation 7.6, avec les parts irriguées des cultures régionales (Gleyses et Rieu, 2004, Agreste, 2008f, Agreste, 2008d). On connaît en effet pour chaque région française les parts irriguées des Surfaces Agricoles Utilisées (SAU) – ce qui correspond au taux moyen d'irrigation des surfaces agricoles régionales – et les parts irriguées de la culture du maïs, qui est de loin la principale culture irriguée dans toutes les régions françaises. Pour les autres cultures déficitaires en eau, les parts irriguées sont considérées comme proportionnelles à leur présence dans la SAU régionale. Les doses d'irrigation (I_{dose}) sont donc évaluées à partir des besoins d'irrigation I_{besoin} et au prorata des surfaces irriguées par culture et par région.

L'évapotranspiration réelle (ETR) par culture, par région et par date peut donc être calculée avec l'équation 7.7 :

$$ETR = \min (CEP + I_{dose} ; CWR_{spec}) \qquad (7.7)$$

où : CWR_{spec} sont les besoins en eau des cultures spécifiques au niveau de production de biomasse, CEP les prélèvements d'eau d'origine pluviale et I_{dose} la dose d'eau d'irrigation. On ne tient ainsi pas compte dans le calcul de l'empreinte des pertes

latérales d'eau dans le processus d'irrigation. Ces pertes, qui surviennent à la fois avant et après l'application de l'eau aux cultures, sont généralement importantes (souvent supérieurs à la quantité prélevée par les plantes). Notre évaluation de l'empreinte parisienne est donc conservatrice.

La distinction de l'eau pluviale et d'irrigation dans l'évapotranspiration des cultures permet d'aborder la question de l'empreinte hydrique de l'approvisionnement alimentaire en termes de coût énergétique et, plus généralement, écologique lié aux déviations des volumes d'eau du cycle hydrologique naturel. Contrairement à l'eau pluviale, l'apport de l'eau d'irrigation est énergétiquement coûteux en fonction du mode d'adduction, du volume de l'apport et de la hauteur éventuelle d'élévation dans le cas de pompage dans des nappes. En fonction par ailleurs des quantités prélevées, des caractéristiques physicochimiques, biologiques et paysagers des milieux affectés et de la concurrence éventuelle des prélèvements agricoles avec d'autres usages de l'eau, les impacts de l'agriculture irriguée peuvent être très importants. On tient ainsi à faire la distinction de l'eau pluviale et d'irrigation dans le « coût » hydrique de l'approvisionnement parisien.

7.1.2.5 Eau cachée des produits et empreinte quantitative

On appelle eau cachée d'un fourrage (EW, abréviation anglaise d'Embedded Water), le volume d'eau évaporée par unité de production agricole. Le terme « cachée » tient au fait que cette eau n'est pas physiquement incorporée dans les produits et reste invisible aux yeux des consommateurs[1]. L'EW peut être calculée en divisant l'ETR des cultures (mesurée en mm) par les rendements agricoles (R, mesurés en t/ha), équation 7.8 :

$$EW = 10 * ETR/R, \qquad (7.8)$$

L'EW se mesure en m^3/t de produit, mais peut évidement s'exprimer également en m^3/t MS, comme en m^3/kg N etc. Le chiffre « 10 » résulte de la conversion des unités.

[1] De même que l'on évoque les flux cachés (ou indirects) dans le cas du métabolisme urbain.

L'EW des sous-produits de transformation – l'huile et le tourteau comme sous-produits de traitement des graines oléagineuses, le sucre et la pulpe des betteraves sucrières etc. - seront des fractions du volume d'EW du produit d'origine (cf. chapitre 5). L'allocation des dépenses hydriques est faite de manière identique à l'allocation d'espace, comme indiqué dans le chapitre 5. Les coefficients d'allocation pour le soja, le colza, les betteraves et les céréales - nommés « fraction produit » (p_{fi}) et « fraction valeur » (v_{fi}) – sont tirés du tableau 5.1). L'allocation se fait avec l'équation 7.9:

$$EW_i = EW * (v_{fi}/p_{fi}) \qquad (7.9)$$

où EW_i est l'eau cachée affectée en un sous-produit i.

La somme des volumes d'EW des matières fourragères consommées annuellement par un animal correspond à l'EW de la production animale annuelle. L'empreinte hydrique annuelle de l'approvisionnement parisien en viandes et en lait est la distribution dans l'espace des quantités d'EW des fourrages des rations animales. L'eau de boisson des animaux et d'autres dépenses hydriques relatives à la préparation de la nourriture et au nettoyage des installations d'élevage ne sont pas comptées dans l'empreinte hydrique de l'approvisionnement, mais ces quantités ne s'élèvent qu'à environ 1 à 2 % de l'EW des fourrages (Chapagain et Hoekstra, 2003).

Notons enfin que dans la littérature internationale, le terme EW est souvent remplacé par le terme « eau virtuelle » (VW, de Virtual Water), terme qu'on n'a délibérément pas utilisé dans ce travail. En effet, au même titre que l'eau cachée, l'eau virtuelle exprime le fait que l'eau de production n'est pas physiquement incorporée dans les produits de consommation mais consommée de façon indirecte et invisible aux yeux de consommateurs. Or, pour les sites de production, la soustraction d'eau est bel et bien visible, ce qui rend le terme virtuel non seulement déroutant mais aussi inexact en tant que qualificatif de l'eau elle-même (Chatzimpiros et Barles, 2008b). On soutient en revanche l'emploi du terme virtuel comme qualificatif des « flux » immatériels d'eau par opposition aux flux physiques des marchandises. On retient donc le terme « flux virtuels d'eau » pour exprimer l'équivalent en ressources hydriques des importations parisiennes de viande et de lait.

7.2.2 L'empreinte hydrique qualitative

On n'inclura pas de composante qualitative dans l'empreinte hydrique de l'approvisionnement alimentaire de Paris. On restera à la notion de profondeur d'empreinte comme indicateur des émissions de polluants d'origine agricole dans l'environnement (cf. chapitre 6).

Comme indiqué en l'introduction du présent chapitre, des nombreuses études d'empreinte hydrique additionnent aux prélèvements d'eau de la production agricole des volumes d'eau considérés être pollués par cette production (Chapagain et al., 2006b, 2011, Chapagain et Orr, 2009). D'après ces études, l'empreinte hydrique d'un produit est égale à la somme du volume d'eau évapotranspirée par les plantes et du volume d'eau considéré nécessaire à la neutralisation, par voie de dilution, des émissions de polluants. Or, le volume de dilution est calculé de façon très simpliste : il dérive de la simple division arithmétique entre la quantité d'une substance polluante estimée être émise dans l'environnement et le seuil admissible de concentration de cette substance dans l'eau, selon la norme de qualité pour un usage donné. L'azote est habituellement la substance retenue comme représentative des pollutions d'origine agricole dans le calcul de l'empreinte qualitative et la norme de potabilité pour les nitrates (soit 10 mg de N/lt d'après la norme américaine ou 50 mg/lt de $N\text{-}NO_3$ d'après la norme européenne) comme seuil de qualité (Chapagain et Hoekstra, 2006b, 2011). Les émissions sont calculées proportionnellement à la dose de fertilisation pour un taux de lessivage fixe (habituellement pris égal à 5 ou 10 %) et la concentration initiale de nitrate de l'eau de dilution est admise nulle (Chapagain et al., 2006b, Chapagain et hoekstra, 2011).

Pourtant ainsi calculée, l'empreinte qualitative n'est nullement représentative de l'impact infligé sur les ressources hydro-écosystémiques - dont l'eau ne constitue que le support physique -, d'autant moins que la quantification soit faite de manière standardisée, sans tenir compte de la variabilité du processus de lessivage en fonction des systèmes de culture (Benoît et al., 1995, Mignolet et al., 2004), des processus de dilution, de rétention et de transformation des nutriments dans leur parcours hydrologique (Billen et al., 2007), des effets synergiques en fonction des environnements nutritifs de milieux aquatiques (Billen et Garnier, 2007) et des

spécificités biologiques et écologiques de ces milieux. En outre, en tant que méthode de quantification, elle est par définition inappropriée dans le cas des émissions de micropolluants dont la toxicité n'est pas fonction de la concentration.

En bref, la comptabilité en volumes d'eau est arbitraire et inappropriée pour exprimer l'impact humain sur l'état et le fonctionnement des hydro-systèmes dont les composantes physiques et biologiques interagissent de manière dynamique et variable en fonction des conditions de milieux et ces interactions conditionnement en retour la pertinence des modes de gestion à différentes échelles spatiales et temporelles (Benoît et Claude, 2002). On a ainsi jugé préférable de laisser de côté toute tentative de quantification de l'impact qualitatif « aquatique » de l'alimentation parisienne. De telles évaluations relèvent du champ de l'écotoxicologie et échappent aux objectifs de cette thèse.

7.3 L'empreinte hydrique de l'approvisionnement parisien, XIXe – XXIe siècles

Exprimés en m^3/kg N, les volumes d'EW de la viande bovine, porcine et du lait importés à Paris au début des XIXe, XXe et XXIe siècles apparaissent dans le tableau 7.3. Y figurent également l'empreinte hydrique de l'approvisionnement par date, exprimée à la fois par habitant et pour l'ensemble de l'agglomération parisienne. Les EW des viandes et du lait sont exprimées par kilogramme d'azote et non pas par kilogramme de produit pour se passer des écarts des taux protéiques et d'humidité. La conversion en m^3/tonne de produit se fait en divisant les EW du tableau 7.3 par la teneur en azote, soit respectivement 2,9, 2,4 et 0,5 % pour la viande bovine, porcine et le lait[1] (cf. chapitre 4).

[1] Il s'agit bien des teneurs en azote de la carcasse bovine et porcine (cf. chapitre 4).

Tableau 7.3: EW par produit (m3/kg N) et empreinte hydrique de l'approvisionnement en viande bovine, porcine et en lait au début des XIXe, XXe et XXIe siècles, par habitant (m^3/hab) et pour l'ensemble de l'agglomération parisienne (10^6 m^3). Source : Cette étude.

	XIXe siècle	XXe siècle	XXIe siècle
EW des produits (m^3/kg N importé)			
Viande bovine	1513	1055	494
Viande porcine	1322	794	118
Lait	639	476	136
Empreinte hydrique de l'approvisionnement ...			
par habitant (m^3/hab)	2390	1847	505
de l'agglomération (10^6 m^3)	2000	6900	5100

L'approvisionnement alimentaire est devenu plus économe en eau sur la période étudiée. La diminution s'explique d'un côté par la réduction du volume d'eau cachée (EW) des produits et par la diminution proportionnelle de viande bovine dans les importations parisiennes – viande dont l'EW par kg d'azote est de quatre à cinq fois supérieure à celle de la viande porcine et du lait.

La réduction des EW des produits s'explique principalement par l'augmentation des rendements agricoles et par l'augmentation progressive dans l'alimentation animale de la part de fourrages caractérisés par des durées végétatives relativement courtes. On discutera plus en détail par la suite, la façon dont cette évolution a « paradoxalement » induit l'intensification des prélèvements d'eau.

Bien que ne concernant que trois produits alimentaires, l'empreinte hydrique de l'approvisionnement parisien en viandes et en lait correspond à une fraction plus ou moins significative de la consommation indirecte d'eau de la ville pour nourrir ces habitants. A ce titre, elle peut être comparée à l'alimentation urbaine en eau potable qui correspond aux besoins directs en eau des citadins. On fait cette comparaison dans le tableau 7.4 où l'approvisionnement en eau potable et l'empreinte hydrique alimentaire sont respectivement qualifiés de consommations directes et indirectes d'eau. On insiste au fait que puisque les importations parisiennes de viande bovine, porcine et de lait représentent environ 25 % de l'apport total des protéines des

citadins, le rapport des volumes entre la consommation directe et indirecte d'eau serait plus élevé que celui du tableau 7.4 si l'on tenait compte de l'ensemble de l'approvisionnement alimentaire.

Tableau 7.4 : Rapport entre la consommation directe et indirecte d'eau de l'agglomération parisienne pour son alimentation respectivement en eau potable et en viande bovine, porcine et en lait, XIXe – XXIe siècles. Source : Cette étude et Barles 2002, 2006.

	Consommation d'eau (m^3/hab/an)		
	XIXe siècle	XXe siècle	XXIe siècle
Directe [1]	9	110	73
Indirecte (partielle)	2390	1847	505
	Rapport de consommations		
Indirecte/directe	262	17	7

Bien que partielle, la consommation indirecte d'eau de l'agglomération parisienne pour son approvisionnement en viande bovine, porcine et en lait est actuellement 7 fois supérieure en volume à la consommation directe. Malgré l'augmentation d'un facteur 8 de cette dernière, depuis le début du XIXe siècle, le rapport des consommations a diminué d'un facteur 40.

Au début du XXIe siècle, l'empreinte hydrique se situe pour 75 % en France, pour 15 % en Europe et pour 10 % en Amérique suivant l'origine géographique des aliments consommés par le bétail[2]. Quant à la part française, elle correspond pour 90 % en moyenne à la production fourragère au sein des exploitations d'élevage et pour 10 % à la production des matières premières d'aliments composés[3].

La figure 7.2 montre la répartition de l'empreinte hydrique par région française par comparaison avec celle de l'empreinte spatiale. Les décalages entre les deux

[1] La consommation directe d'eau est calculée sur la base des apports anthropiques journaliers, égal à 20, 270 et 250 lt/hab/jour respectivement au début des XIXe, XXe et XXIe (Barles, 2002, 2006).

[2] Pour l'analyse sur les provenances des différents fourrages, voir chapitre 5.

[3] Idem

empreintes au sein d'une même région sont dus à des écarts d'évapotranspiration en raison des différences régionales de climat et de cultures utilisées comme fourrages.

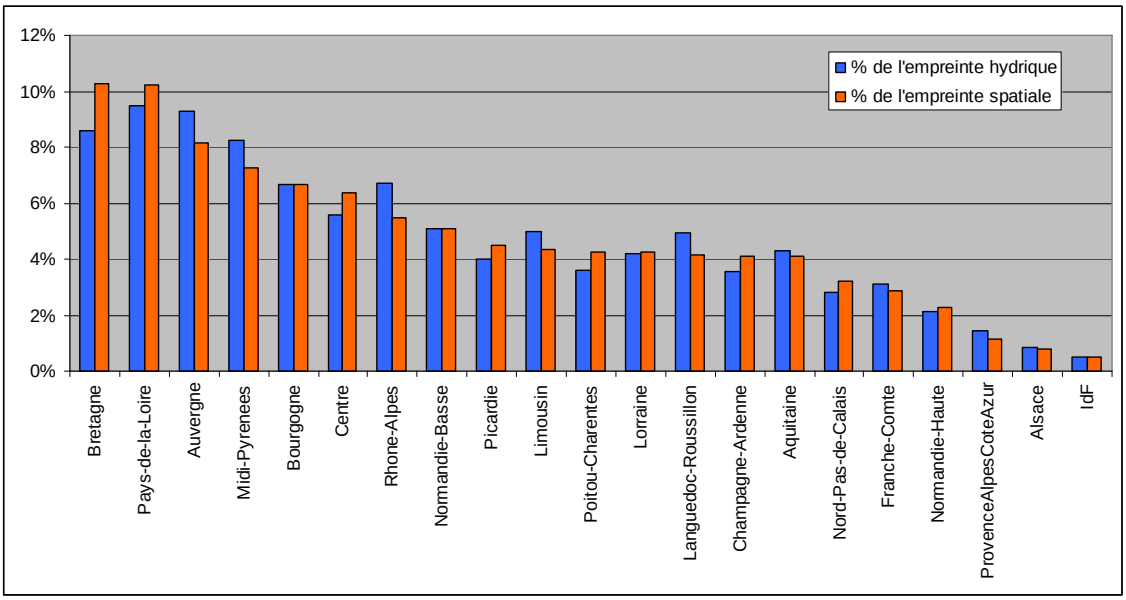


Figure 7.2 : Répartition de l'empreinte hydrique et spatiale de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait par région française. Source : Cette étude.

La production fourragère s'alimente pour sa majorité écrasante d'eau pluviale. Les apports d'eau d'irrigation concernent surtout la culture du maïs (fourrager et grain), notamment dans les régions du sud. On a estimé la part de l'irrigation à 1 % de l'évapotranspiration au sein des exploitations d'élevage, à 2 % pour les céréales utilisées comme matières premières dans la fabrication d'aliments composés et à moins de 0,3 % pour le tourteau de colza et la pulpe de betterave. En tout, on estime que l'eau d'irrigation représente actuellement environ 1,1 % de l'empreinte hydrique de l'approvisionnement parisien[1], soit un total de $55*10^6$ m^3 dont 75 % en France. La figure 7.3 montre le volume d'eau d'irrigation (10^6 de m^3) par région française de production des fourrages.

[1] Rappelons que, pour la production en Europe, les besoins en eau des fourrages et la part de l'irrigation dans l'empreinte hydrique sont considérés identiques à ce qu'ils sont en France. Les spécificités hydrogéologiques et pédoclimatiques des différents pays approvisionnant Paris ne sont donc pas chiffrées.

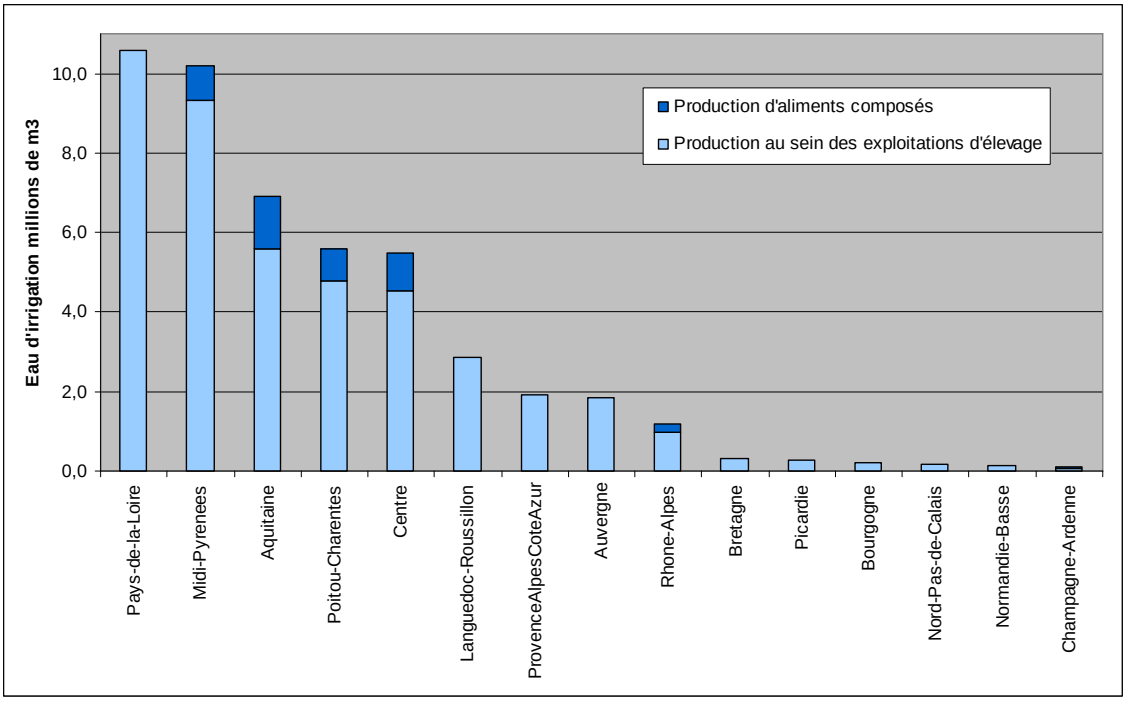


Figure 7.3 : Volumes d'eau d'irrigation par région française de production des fourrages. Source : Cette étude.

Les volumes sont géographiquement concentrés dans les régions du sud et du centre-ouest de la France. Ce sont d'ailleurs ces régions qui assurent l'essentiel de production de maïs grain à l'origine des aliments composés. Il s'agit en particulier des régions de l'Aquitaine, de Midi-Pyrénées, de Poitou-Charentes et - dans une moindre mesure - du Centre, assurant ensemble 60 % de la production nationale de maïs grain, dont environ 20 à 30 % des besoins hydriques sont assurés par l'irrigation. A contrario, dans les régions du grand-ouest et du nord de la France qui assurent la majorité de la production animale nationale, l'agriculture est essentiellement pluviale.

Pourtant, bien que l'apport d'eau d'irrigation assure actuellement en moyenne une fraction infime de l'empreinte hydrique de l'approvisionnement, l'irrigation prend des proportions relativement importantes dans certaines régions. Pour un pays humide comme la France, bénéficiant d'une bonne répartition annuelle des précipitations, le besoin d'irrigation est un symptôme d'intensification de la production. En effet, le taux d'utilisation d'eau pluviale a significativement augmenté depuis le début du XIXe siècle et s'approche actuellement étroitement de la disponibilité. Si les prélèvements s'intensifient davantage, en raison soit de l'augmentation du rendement des cultures ou des déséquilibres climatiques, l'eau risque de devenir le facteur

limitant de la production agricole à grande échelle en France, et le recours à l'irrigation une pratique généralisée même dans les régions humides du nord-ouest. Le tableau 7.5 montre le taux d'utilisation de l'eau pluviale dans la production des rations animales aux trois dates. Pour chaque catégorie animale, le taux d'utilisation correspond au rapport moyen pondéré entre l'évapotranspiration d'eau des cultures fourragères et les apports d'eau d'origine pluviale dans les surfaces nourricières des animaux. On a fait la distinction entre les fourrages produits au sein des exploitations d'élevage et les grandes cultures étant à l'origine des matières utilisées dans la fabrication d'aliments composés.

Tableau 7.5 : Taux moyen agrégé d'utilisation de la pluie effective pour approvisionner Paris au début des XIXe, XXe, XXIe siècles. Source : Cette étude.

	début XIXe	début XXe	début XXIe
Au sein des exploitations d'élevage (%)			
Viande bovine	70	82	95
Viande porcine	79	72	77
Lait	79	80	96
Grandes cultures pour la fabrication d'aliments composés (%)			
Les trois élevages confondus	-	-	79
Moyennes pondérées	72	79	91

L'augmentation concerne surtout la production bovine. A contrario, dans le cas de la production de porcs et d'aliments composés, le taux moyen agrégé de mobilisation d'eau se situe *grosso modo* au même niveau qu'aux siècles précédents. Mais les spécificités régionales sont importantes, notamment au début du XXIe siècle, en fonction à la fois des cultures utilisées dans la production et des spécificités climatiques. La figure 7.4 montre le taux agrégé d'utilisation d'eau par région administrative française et par type de production.

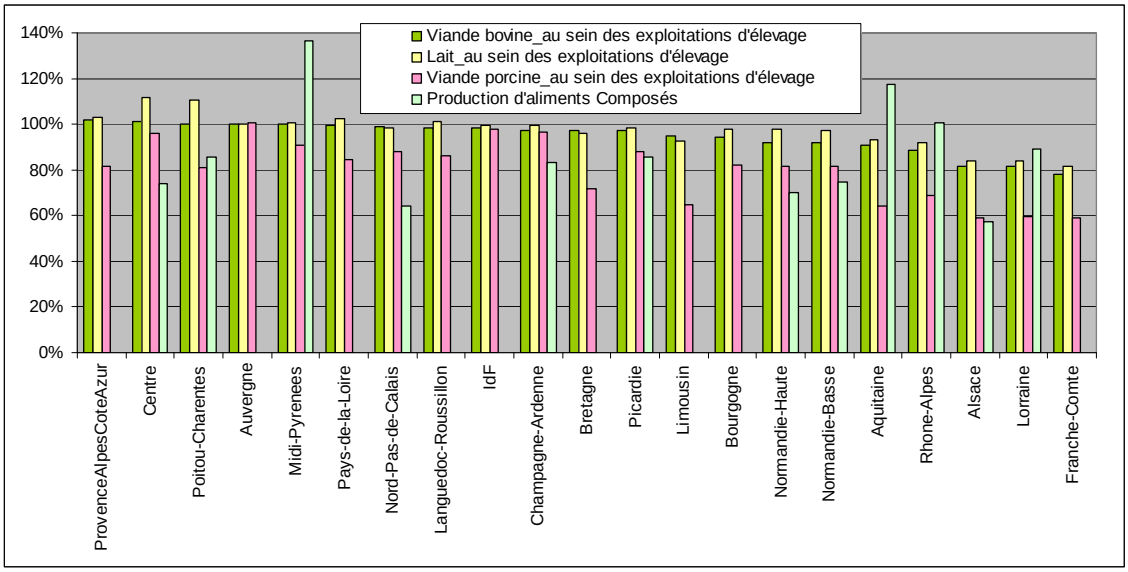


Figure 7.4 : Taux agrégé d'utilisation de la pluie effective au sein des exploitations d'élevage et pour la production d'aliments composés par région administrative française au début du XXIe siècle. Source : Cette étude.

Des taux supérieurs à 100 % s'expliquent par l'apport d'eau d'irrigation et sont relativement rares. Le taux d'utilisation dépasse néanmoins 95 % dans la majorité des élevages de bovins à viande et de vaches laitières et dans quelques-uns des élevages de porcs. Pour la production d'aliments composés, la variabilité est surtout fonction des spécialisations régionales en matière de céréaliculture. Dans le cas de la production de maïs (exemples : Midi-Pyrénées et Aquitaine) le taux est nettement plus élevé que dans celle de blé et d'orge (exemples : Alsace et Nord-Pas-de-Calais).

L'augmentation des rendements agricoles – c'est-à-dire l'augmentation de la transpiration des plantes – a été le moteur principal d'augmentation de l'évapotranspiration depuis le début du XIXe siècle. D'après nos calculs, le besoin annuel en eau de la culture du maïs fourrager a augmenté d'environ 110 mm en moyenne entre le début des XXe et XXIe siècles, celui de la luzerne de 100 mm et celui des prairies de plus de 120 mm, augmentations résultant de la hausse des rendements puisqu'elles représentent l'intensification des prélèvements d'eau par ces cultures. Dans le cas des rations animales qui se composent de fourrages à durées végétatives diverses, la durée moyenne de production est la variable permettant de comparer l'intensité des prélèvements entre rations. Par exemple, pour des rations avec des EW identiques, l'intensité des prélèvements augmente avec la diminution du temps moyen de production. Le tableau 7.6 montre les durées moyennes de

production des rations des animaux approvisionnant Paris par date et par produit (jours). Elles sont calculées en pondérant les durées végétatives des différents fourrages utilisés comme aliments par les fractions qu'ils représentent dans l'emprise spatiale de la production.

Tableau 7.6 : Durées moyennes pondérées (jours) de production des rations animales par date et par produit. Source : Cette étude.

	Début XIXe	Début XXe	Début XXIe
Viande bovine	357	341	293
Viande porcine	276	185	261
Lait	345	342	257
Moyenne pondérée	346	310	283

Le taux d'intensification des prélèvements d'eau pour nourrir le bétail peut être calculé pour un climat donné entre deux dates en divisant l'évapotranspiration moyenne requise par date dans la production des rations, avec la durée moyenne de la production. En raison pourtant des aires différentes d'approvisionnement entre les XIXe, XXe et XXIe siècles et donc des différences d'évapotranspiration dues aux différents climats de production, les écarts d'intensité ne seront pas uniquement dus aux écarts de productivité. Si en revanche l'on excluait les origines transatlantiques de soja, le biais de calcul se réduirait significativement. Afin de montrer, ne serait-ce qu'approximativement, notre estimation du degré d'intensification des prélèvements d'eau depuis le XIXe siècle, on a effectué le calcul pour les fourrages d'origine française uniquement (figure 7.4), tout en gardant à l'esprit que, compte tenu des valeurs d'évapotranspiration potentielle (ET_o) du tableau 7.7 concernant l'ET_o moyenne pondérée par produit et par date dans l'aire d'approvisionnement parisien, le degré d'intensification des prélèvements serait sous-estimé pour la production porcine et laitière et surestimé pour la production de viande bovine.

Tableau 7.7: ETo moyennes par produit et par date, pondérées par l'empreinte spatiale de l'approvisionnement. Source : Cette étude.

	Début XIXe	Début XXe	Début XXIe
Viande bovine	732	741	773
Viande porcine	779	764	745
Lait	779	740	739
Moyenne pondérée	744	745	764

Exprimée par rapport à la demande au début du XIXe siècle, une estimation de l'intensification des prélèvements est montrée dans la figure 7.5

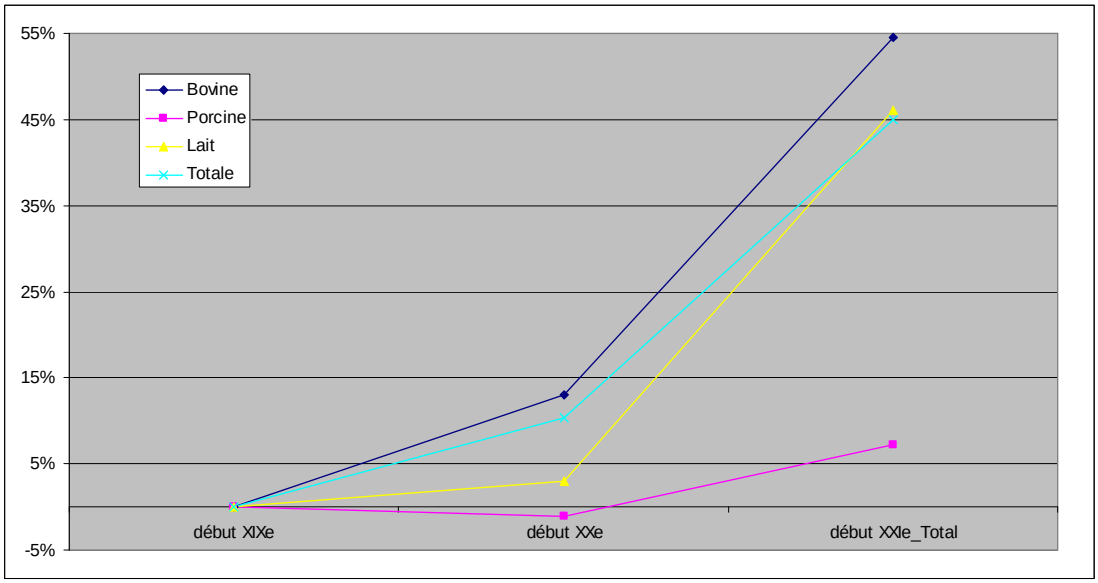


Figure 7.5 : Augmentation de l'intensité des prélèvements par rapport au début du XIXe siècle pour la production des rations animales approvisionnant Paris. Source : Cette étude.

Pour la somme des viandes et du lait importés à Paris, l'intensification est estimée à environ 10 % au cours du XIXe siècle et à 35 % au cours du XXe siècle. Elle est nettement plus importante pour les systèmes de production de viande bovine et de lait par rapport aux systèmes de production de viande porcine.

On note enfin que la diminution des durées de production des rations est souvent synonyme de rallongement du temps moyen de mise en jachère des sols agricoles et d'augmentation des émissions de polluants dans l'environnement (McCracken et al., 1994). Outre les émissions et les implications pour les écosystèmes, ceci a des conséquences d'ordre paysager faisant de l'approvisionnement alimentaire urbain une variable majeure dans la transformation des paysages.

7.4. Conclusion

On a évalué l'empreinte hydrique de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. Comme l'empreinte spatiale et l'empreinte azote, l'ampleur de l'empreinte hydrique n'est que partiellement fonction de la demande alimentaire urbaine. Cette empreinte correspond

au volume d'eau évapotranspirée par les cultures fourragères alimentant le bétail. On a calculé l'évapotranspiration réelle des cultures en fonction d'un côté des variables déterminant la demande en eau de la production, telles les conditions climatiques et le niveau de rendements agricoles, et de l'autre, de la disponibilité d'eau d'origine pluviale et d'irrigation par région de production des fourrages. Si les apports d'eau d'irrigation sont actuellement très minoritaires dans l'empreinte hydrique de l'approvisionnement parisien, l'eau est sur le point de devenir le facteur limitant de la production fourragère à grande échelle en France, puisque - d'après nos calculs effectués pour une année hydrologique moyenne – le taux des prélèvements d'eau pour la production d'une ration animale dépasse en moyenne 95 % de l'apport des précipitations dans plusieurs régions d'élevage. Le choix des cultures dans l'alimentation animale constitue un levier important pour réduire (ou supprimer) la dépendance de l'élevage vis-à-vis de l'irrigation.

Conclusion générale et perspectives

Dans le cadre de cette thèse, on s'est intéressé à comprendre le mécanisme d'approvisionnement en viande et en lait frais de l'agglomération parisienne sur une période longue de deux siècles et à déterminer, produit par produit, l'*empreinte environnementale* de l'approvisionnement en termes d'emprise spatiale, de mobilisation d'eau et de flux d'azote entre les agro-systèmes et l'environnement au début des XIXe, XXe et XXIe siècles. On a utilisé des données statistiques nationales et internationales de transport et de production agricole pour déterminer et suivre l'évolution de l'aire géographique d'approvisionnement, évaluer la fraction des subsistances régionales que réclame la capitale pour son approvisionnement, reconstituer à l'aide des modèles de rationnement et des tables d'alimentation les rations des animaux approvisionnant Paris, déterminer, en termes à la fois de biomasse, d'énergie et de protéines, le rendement en viande et en lait du fourrage aux différentes dates et enfin calculer, de manière spatialisée, l'étendue des terres agricoles et les flux d'azote et d'eau impliqués dans la production.

La consommation parisienne de viande et de lait a ainsi été quantifiée en termes de mobilisation des ressources naturelles (empreinte spatiale (ha), hydrique (m3) et azotée brute (tN)), d'apport de fertilité - à travers la valorisation des déjections animales - dans l'agriculture végétale des régions d'approvisionnement (empreinte N-utile) et de pertes d'azote réactif dans l'environnement. Ces pertes, diffuses dans l'espace, caractérisent la profondeur de l'empreinte parisienne et sous-tendent l'influence de l'alimentation des citadins sur l'altération du cycle biogéochimique d'azote. La profondeur de l'empreinte peut être exprimée à la fois par habitant et par hectare de production. Exprimée par habitant (kg N/hab), elle a permis d'élargir la notion de l'équivalent habitant (Equ/Hab) classiquement considéré comme représentatif des émissions individuelles d'azote dans les eaux usées urbaines (Equ/Hab = 15 g N/jour, soit 5,4 kg N/an) et de définir un équivalent habitant amont qui englobe en quelque sorte tous les rejets individuels d'azote, en amont de la ville, relatifs au ravitaillement d'un Parisien. Exprimée d'autre part, par hectare de production (kg N/ha), la profondeur de l'empreinte a permis de mesurer l'intensité des rejets azotés depuis la surface nourricière urbaine contribuant ainsi au dialogue

en termes de soutenabilité entre la consommation alimentaire en ville et l'usage des sols agricoles.

L'empreinte a été déterminée pour l'approvisionnement de l'agglomération parisienne en viande bovine, porcine et en lait frais. La somme du tonnage des importations se caractérise par une forte stabilité au cours de la période étudiée. Mesurées en azote (i.e protéines), les importations s'élevaient à environ 1,88 kg/hab/an au début du XIXe siècle, à 2,1 kg/hab/an au début du XXe siècle et à 1,85 kg/hab/an au début du XXI siècle, soit une fluctuation inférieure à 10 % entre les trois dates. Ces importations représentent respectivement environ 30 %, 28 % et 26 % de l'apport protéique total de l'alimentation du Parisien au début des XIXe, XXe, XXIe siècles[1].

La stabilité remarquable de la somme des importations est pourtant en quelque sorte accidentelle car, produit par produit, le tonnage des importations diffère considérablement d'une date à l'autre. Le tableau C.1 montre la répartition par produit (%) des importations totales de viande et de lait (kg N/hab) au début des trois siècles.

Tableau C.1 : Importations annuelles d'azote par habitant sous forme de viande bovine, porcine et de lait frais au début des XIXe, XXe et XXIe siècles et répartition par produit.

	Début XIXe	Début XXe	Début XXIe
Population de l'agglomération parisienne	840 000	3 730 000	10 140 000
Importations (kg N/hab)	1,88	2,12	1,85
Dont (%) sous forme de :			
Viande bovine	64	60	41
Viande porcine	10	14	45
Lait frais	26	26	15

[1] La comparaison est faite par rapport aux estimations de Billen et al. (submitted) sur l'apport protéique total du Parisien en 1786 (adapté au début du XIXe siècle), 1896 et 2006.

Les importations de lait frais et de viande bovine ont chacune diminué de plus d'un tiers depuis le début du XIXe siècle, mais la diminution a été entièrement compensée par les importations de viande de porc qui ont fait plus que quadrupler sur cette période. Le bouleversement de la consommation s'est essentiellement produit au cours du XXe siècle et est de nature différente entre les viandes et le lait. Pour le lait frais, le recul de la consommation directe est notamment lié l'augmentation de la consommation indirecte sous forme de produits laitiers. Mesurée en équivalent lait par habitant et par an, cette dernière a pratiquement doublé en France dans la deuxième moitié du XXe siècle (Flandrin et Montanari, 1996, Agreste, 2008e), affirmant que la diminution de la consommation directe de lait est le résultat des transformations de la chaîne agroalimentaire à l'aval de la production. En revanche, le recul de la consommation de viande bovine au profit de celle de porc résulte directement de mutations agricoles. D'une part, le développement des industries d'engrais de synthèse et la motorisation de l'agriculture ont conduit à réduire l'élevage bovin à sa finalité alimentaire mettant un terme au rapport traditionnel de symbiose fonctionnelle entre la consommation urbaine de viande et la production de céréales. Ainsi, depuis la généralisation, dans la deuxième moitié du XXe siècle, des engrais de synthèse à bon marché, la faible efficacité des bovins, par rapport aux porcs, à convertir l'azote du fourrage en protéines animales a cessé de représenter un avantage pour l'économie rurale. D'autre part, l'augmentation des rendements agricoles de la deuxième moitié du XXe siècle a surtout porté sur des cultures céréalières qui sont celles qui assurent actuellement l'essentiel de l'alimentation des porcs (en tant qu'animaux monogastriques) ; la production de la ration porcine s'est donc fortement améliorée en termes de coût foncier à la défaveur de la ration bovine. Cette économie en terres de production a également été accomplie dans le cas de la production laitière avec la généralisation progressive du maïs fourrager comme aliment de base des vaches laitières. Mais en sus des améliorations de rendements agricoles, les élevages porcin et laitier ont pris de l'avance par rapport à l'élevage bovin eu égard au rendement en viande et en lait du fourrage. D'après nos calculs, l'augmentation au cours du XXe siècle de l'efficacité de conversion des protéines végétales en protéines animales a été d'environ 85 % pour la viande porcine, de 20 % pour la viande bovine et de 50

% pour le lait. A l'appui de ces évolutions caractéristiques du XXe siècle, la mobilisation des terres agricoles par kilogramme de protéines animales importées à Paris a diminué d'un facteur 10 pour la viande porcine, d'un facteur 2,5 pour la viande bovine et d'un facteur 4 pour le lait. Actuellement, environ 0,1 ha de terres sont nécessaires à la production d'un kilogramme de protéines animales sous forme de viande bovine et moins de 0,03 ha par kg de protéines sous forme de viande porcine et de lait. Au début du XIXe siècle, il en fallait respectivement 0,37, 0,35 et 0,15 ha pour la viande bovine, porcine et le lait. La réduction différentielle des besoins surfaciques entre les différentes productions animales en parallèle avec la dépréciation de l'élevage bovin en tant que source potentielle de labour et de fumure sont parmi les facteurs principaux du renversement en termes de composition de la ration carnée du Parisien.

Etant donné ces améliorations et la répartition des importations parisiennes entre la viande bovine, porcine et le lait, l'étendue de production par habitant s'est réduite d'un facteur six depuis le début du XIXe siècle mais l'intensité d'utilisation de l'eau et la profondeur de l'empreinte par hectare ont respectivement doublé et quadruplé, ce qui illustre la tendance manifeste au cours de cette période d'un compactage de l'agriculture au détriment d'une gestion soutenable de l'eau et des nutriments. Accompli notamment dans la deuxième moitié du XXe siècle, ce compactage s'est accompagné d'un certain abandon des terres agricoles et d'une progression des surfaces artificialisées au profit principalement de la demande en bâti et en infrastructures de transport (Agreste, 2005c, Pointereau et Coulon, 2009).

Les figures C1, C2 et C3 résument l'empreinte spatiale (ha), hydrique (mm) et azotée (kg N) d'un habitant de l'agglomération parisienne pour la somme de son approvisionnement en viande bovine, porcine et en lait frais au début des XIXe, XXe et XXIe siècles respectivement. En parallèle avec la comptabilité en tonnage, les flux entrants et sortants d'azote dans et depuis l'agro-système sont également exprimés en pourcentage des inputs et outputs totaux respectivement. De même, la consommation d'eau est exprimée en termes à la fois d'évapotranspiration réelle moyenne des fourrages (ETR, mm) et de taux moyen de mobilisation des apports d'origine pluviale.

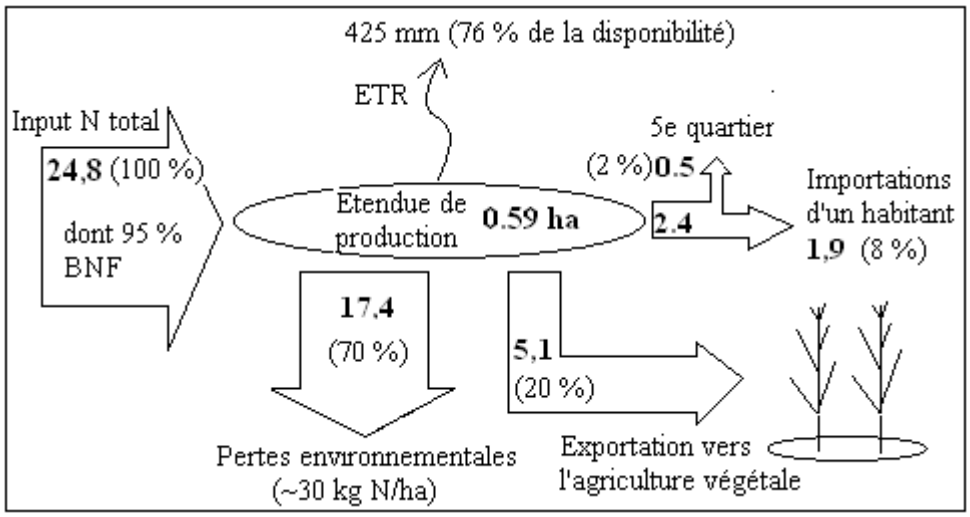


Figure C.1 : Récapitulation de l'empreinte de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait au début du XIXe siècle : flux annuels d'azote (kg N), d'eau (mm) et étendue de production (ha) par habitant de l'agglomération. Source : Cette étude

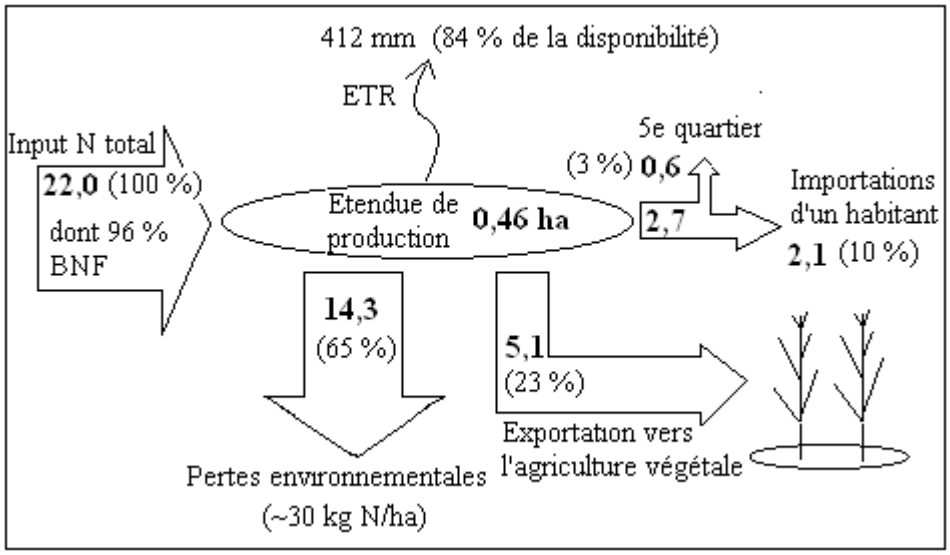


Figure C.2 : Récapitulation de l'empreinte de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait au début du XXe siècle : flux annuels d'azote (kg N), d'eau (mm) et étendue de production (ha) par habitant de l'agglomération. Source : Cette étude.

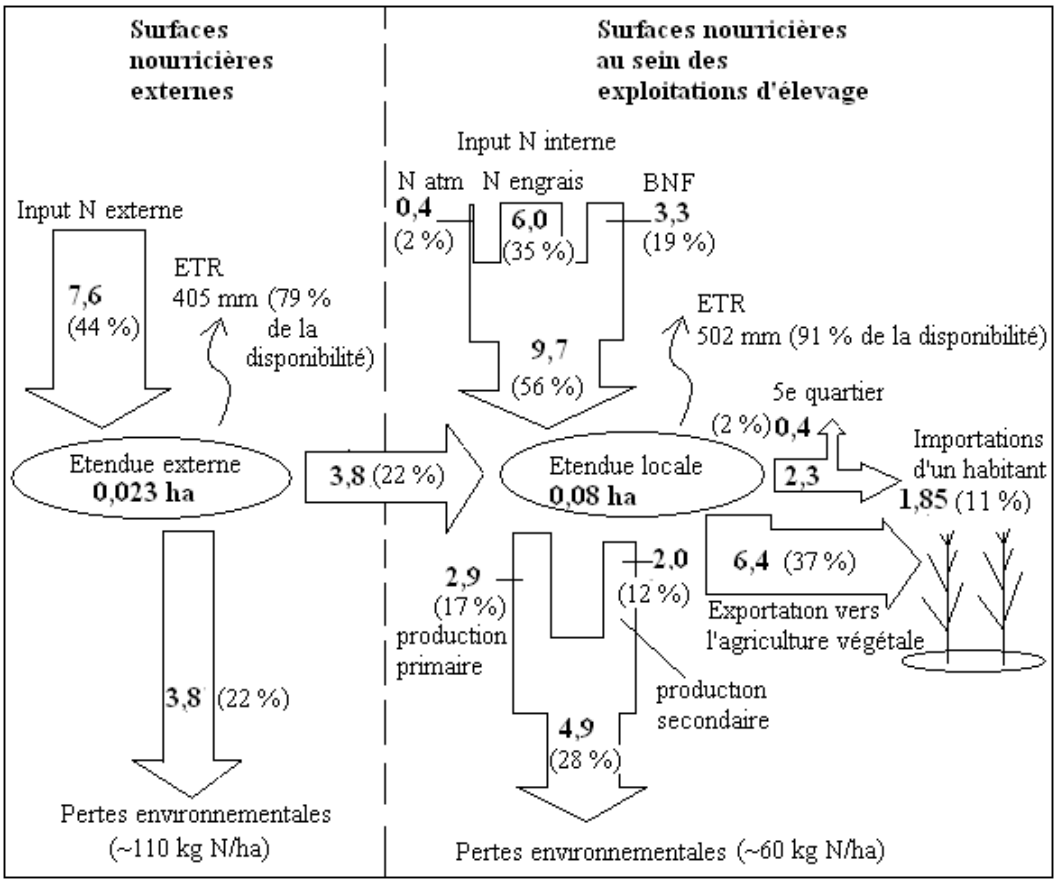


Figure C.3 : Récapitulation de l'empreinte de l'approvisionnement parisien en viande bovine, porcine et en lait au début du XXIe siècle : flux annuels d'azote (kg N), d'eau (mm) et étendue de production (ha) par habitant de l'agglomération. Source : Cette étude.

Exprimée en azote, la somme des importations de viande bovine, porcine et de lait est estimée représenter environ 8, 10 et 11 % de l'azote mis en jeu dans la production au début des XIXe, XXe et XXIe siècles respectivement. Ceci signifie, qu'à toute date, environ 90 % de l'empreinte N brute de l'approvisionnement contribue potentiellement à la cascade d'azote. La part réelle des pertes – estimées actuellement à environ 5 Equ/Hab pour l'ensemble de l'approvisionnement alimentaire - dépend de l'efficacité d'utilisation d'azote des cultures et de la gestion que l'on fait des fumures dont la valorisation constitue actuellement un enjeu environnemental essentiel. On estime pourtant qu'au début du XXIe siècle, 25 % des pertes totales d'azote (40 % des pertes au sein des exploitations d'élevage) - soit 2,0 kg N/hab/an ou encore 25 kg N/ha de surface nourricière locale - proviennent des fumures laissées à l'abandon. Ceci correspond à la part de l'empreinte azotée qui pourrait être recyclée dans de la production végétale. D'autre part, les pertes d'azote de la production primaire sont fonction d'un côté des paramètres

agronomiques spécifiques aux cultures et de l'autre des pratiques culturales telles que la dose et la temporalité de fertilisation, le type des rotations culturales et le mode de travail des terres etc. Ainsi, les prairies sont des milieux qui, sous une bonne gestion agronomique, réunissent les conditions pour minimiser les pertes environnementales au profit d'une efficacité azotée élevée. L'étude de l'approvisionnement par produit d'élevage permet ainsi d'introduire comme variable d'ajustement dans le calcul des pertes (profondeur de l'empreinte) le type de fourrage utilisé pour l'élevage. Dans le cadre du présent travail, le calcul des pertes de la production primaire est jugé relativement approximatif faute de disponibilité et de fiabilité des données relatives à la fertilisation des cultures et aux variations potentielles des stocks d'azote des sols. Sous réserve de la disponibilité de ces données - directement ou indirectement à travers la connaissance de manière spatialisée des pratiques culturales - ce travail aurait beaucoup à gagner en précision.

L'ampleur des différentes composantes de l'empreinte dépend également de sa géographie qui est le résultat de l'imbrication plus ou moins importante entre d'un côté les origines des importations urbaines et de l'autre l'aire d'approvisionnement des exploitations d'élevage. Comme le résume la figure C.3, les exploitations françaises sont actuellement très déficitaires en fourrages en raison des concentrations élevées des cheptels, ce qui conduit à importer des aliments d'autres régions ou pays en y externalisant en retour des fragments d'empreinte y compris spatiale, hydrique et azotée. Le commerce de fourrage est un fait déterminant de la pression environnementale - dans le sens large - exercée par l'approvisionnement. Il se fait au prix de l'augmentation des distances d'approvisionnement et, par là, de l'augmentation des dépenses d'énergie pour le transport, de l'ouverture des cycles biogéochimiques et de l'implication dans la production des territoires caractérisés par des réglementations inadéquates ou trop indulgentes face à la surexploitation des ressources naturelles ou, pire encore, à la disparition complète des écosystèmes. Ce dernier symptôme prend actuellement des proportions inquiétantes dans le cas notamment du Brésil (forêt amazonienne) et de l'Argentine, deux pays qui fournissent une grande part du marché mondial, et croissant, de soja aux dépens des écosystèmes de haute valeur écologique (USDA, 2004, Naylor et al., 2005), exploités pour le compte de consommateurs peu avertis au fait de ces processus.

Ceci conduit à une répartition inégale d'impacts vis-à-vis de la production du même kilogramme de viande ou de lait, impacts qui contribuent à la dette écologique tout en restant invisibles aux yeux des consommateurs sous l'effet des longues distances d'approvisionnement. L'ouverture des cycles biogéochimiques affecte d'ailleurs principalement les lieux de destination des aliments pour l'élevage en raison soit de l'indisponibilité des surfaces pour l'épandage ou de l'absence de mécanismes efficaces pour résorber les excédents en nutriments des exploitations. Enfin, à l'appui de ces importations qui concernent majoritairement des aliments concentrés en protéines, les éleveurs sont conduit à produire des fourrages riches en énergie caractérisés par des durées végétatives courtes et des rendements culturaux élevés, susceptibles de rallonger le temps de mise en jachère des surfaces nourricières, d'y augmenter l'intensité d'utilisation de l'eau et le recours à l'irrigation et de diminuer la part de l'azote organique pouvant être recyclée dans la production végétale locale. Il s'agit d'un enchainement des interdépendances en termes d'intensité et de soutenabilité d'utilisation des différentes ressources naturelles.

L'importation de protéines par les exploitations d'élevage se fait majoritairement sous formes de tourteaux qui, on s'en souvient, sont les sous-produits de traitement des graines oléagineuses suite à l'extraction de l'huile. De ce fait, l'éclatement spatial entre les lieux de production des cultures oléagineuses et les lieux d'élevage des animaux dépend en premier lieu de l'organisation en termes de géographie du marché de l'huile puisque c'est elle le produit principal de la trituration. La production des cultures énergétiques conditionne ainsi visiblement, au début du XXIe siècle, la géographie de l'empreinte alimentaire et l'ampleur de certaines de ses composantes.

Il serait ainsi intéressant de donner suite à ce travail en envisageant des scénarios prospectifs pour l'approvisionnement alimentaire de Paris, à l'appui des outils de mesure de l'empreinte alimentaire, et en fonction des variables relatives au fonctionnement biogéochimique des agro-systèmes et à la montée en puissance des cultures énergétiques dont la rentabilité économique s'impose comme une nouvelle contrainte sur l'usage des sols agricoles et sur l'évolution en termes de structure et de géographie du système agro-alimentaire. On expose ici succinctement quelques

pistes de réflexion vis-à-vis des scénarios prospectifs pour l'approvisionnement parisien. Comme explicité en introduction de la thèse, l'élargissement souhaité de la démarche à l'ensemble de l'approvisionnement alimentaire pourrait reposer, pour l'essentiel, sur les acquis méthodologiques du présent travail.

Il serait par exemple intéressant de considérer, dans une démarche comparative, des systèmes agraires fondés sur le principe de la complémentarité biogéochimique entre l'élevage et la production végétale, mais dont le fonctionnement s'appuie sur des cultures fourragères, des sources d'azote et des niveaux d'intrants différents. Les caractéristiques agronomiques et nutritionnelles des cultures constituent la variable principale vis-à-vis des pertes de la production primaire, du rendement en viande et en lait des rations et de la production végétale potentiellement soutenable par la fertilisation organique des cultures. On obtiendrait ainsi, pour les systèmes étudiés, des surfaces, des besoins en eau d'irrigation et des profondeurs d'empreinte variables que l'on pourrait confronter sur la base du potentiel d'exportation des produits animaux et végétaux, des critères de qualité environnementale et des contraintes d'utilisation des ressources. Il serait par ailleurs possible de classifier ces résultats sur la base des estimations du coût énergétique de fonctionnement y compris dans des scénarios tenant compte des dépenses que nécessiterait l'abattement des pollutions azotées des eaux jusqu'à par exemple la norme de potabilité. Par opposition à la situation actuelle, les scénarios pourraient s'articuler autour des principes suivants : que l'alimentation animale provienne uniquement des sources fourragères indigènes et que la densité maximale des cheptels soit fixée par les besoins de fertilisation des cultures environnantes. De cette façon, la consommation des produits animaux redeviendrait le moteur principal de la production végétale sans que l'empreinte des consommateurs s'externalise sur des écosystèmes forains.

L'expérimentation d'un scénario de développement de la culture de soja à proximité relative de Paris, de façon à couvrir les besoins actuels des cheptels concourant au ravitaillement de la capitale, serait pertinent à condition de monétariser les couts environnementaux de la production et du transport transatlantique de soja, ce qui renverserait la compétitivité des exportations sud-américaines au profit de la

production française. Après sa chute d'un facteur cinq au cours des vingt dernières années (Agreste, 1989-2008), la production française de soja pourrait se redresser tout en permettant des économies d'énergie dans la production d'engrais grâce à la fixation biologique d'azote de cette culture légumineuse. On estime qu'à l'appui de la culture de soja au sein des systèmes de polyculture-élevage équilibrés, la profondeur de l'empreinte parisienne pourrait être réduite jusqu'à 40 % par rapport à la situation actuelle, sans réduction notable du rendement en viande et en lait des exploitations. De plus, dans un scénario de monétarisation du coût environnemental de la production industrielle d'engrais destiné aux cultures énergétiques non-fixatrices d'azote, comme par exemple le colza dont la production s'est beaucoup développée en France au cours des dernières années, l'huile de soja gagnerait en rente avec un profit intrinsèque pour la production animale et l'environnement.

D'autres scénarios envisageables pour l'approvisionnement alimentaire de Paris, devraient concerner la reformulation radicale des rations animales avec le retour massif des légumineuses vivaces, le retrait du maïs fourrager et le respect du cahier de charges de l'agriculture biologique. Pour l'étendue actuelle de l'aire d'approvisionnement, ces scénarios conduiraient à priori à une réduction importante de la profondeur de l'empreinte et de l'intensité des prélèvements d'eau, mais aussi de la part des protéines animales soutenable dans l'alimentation des Parisiens.

L'élaboration de ces scénarios permettrait enfin de s'interroger sur la responsabilité de la ville par rapport à la gestion de son espace nourricier, de même que sur le mérite de leur proximité physique. La proximité tend à favoriser une gestion intégrée des territoires, dans le but d'y harmoniser deux ou plusieurs activités, les unes étant productrices des conditions de milieux dans lesquelles doivent s'opérer les autres. Dans le cadre de la multifonctionnalité souhaitée au sein des espaces nourriciers extra-urbains, il serait donc essentiel d'y rendre compatible la production alimentaire et celle de l'eau potable à faible coût économique. Grâce à la proximité, les villes dont les frontières administratives sont incessamment traversées par des flux physiques de produits, se donneraient les moyens de s'impliquer dans la gestion territoriale des dispositifs de toute nature qui en assurent le fonctionnement. De cette façon, le signal d'apparition d'un impact environnemental susceptible de nuire aux

intérêts urbains pourrait atteindre rapidement les instances de gestion chargées d’adapter les conditions de milieu au profit de la ville elle-même.

Références Bibliographiques

Abad, R., 2002. *Le Grand Marché : l'approvisionnement de Paris sous l'Ancien Régime*. Fayard, Paris, 2002, 1030 p.

AFSSA, 2003. Enquête INCA. Graphiques et tableaux. Disponible sur la toile, format PDF, [réf. du 12 sept. 2009]. http://www.afssa.fr/dossiers/index.asp?id_dossier=2842.

Agreste, 2005a. Le commerce extérieur agroalimentaire : seulement 8 milliards d'excédent en 2004. Agreste Primeur n° 262, juin 2005

Agreste, 2005b. Chiffres et Données Agriculture, n° 166. Enquête sur la structure des exploitations en 2003. Ministère de l'agriculture et de la pêche. Disponible sur la toile : http://www.agreste.agriculture.gouv.fr

Agreste, 2005c. Les prairies alimentent les changements fonciers. Agreste-Primeur n°168, Septembre 2005.

Agreste, 2006. Bilans d'approvisionnement agroalimentaires 2004-2005. Chiffres et Données Agriculture, n° 184. Ministère de l'agriculture et de la pêche. Disponible sur la toile : http://www.agreste.agriculture.gouv.fr

Agreste, 2007a. Agreste primeur n° 188. L'alimentation porcine fonction des objectifs des éleveurs. Ministère de l'agriculture et de la pêche. Disponible sur la toile : http://www.agreste.agriculture.gouv.fr

Agreste, 2007b. Chiffres et Données Agriculture, n° 203. Rica France – Tableau standard, Annexes. http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/

Agreste, 2008a. Les rendements du blé et du maïs ne progressent plus. Agreste-Primeur n°210, mai 2008.

Agreste, 2008b. Les paysages agricoles se redessinent. Agreste-Primeur n°217, novembre 2008.

Agreste, 2008c. Agreste Chiffres et Données Agroalimentaire. Les matières premières de l'alimentation animale en 2006. Ministère de l'agriculture et de la pêche. Disponible sur la toile : http://www.agreste.agriculture.gouv.fr

Agreste, 2008d. Enquête sur les pratiques culturales en 2006. Chiffres et Données Agriculture, n° 200. Ministère de l'agriculture et de la pêche. Disponible sur la toile : http://www.agreste.agriculture.gouv.fr

Agreste, 2008e. Les Français boudent les produits laitiers. Agreste-Primeur n°208, février 2008.

Agreste, 2008f. Enquête sur la structure des exploitations agricoles en 2007. Chiffres et Données Agriculture, n° 201. Ministère de l'agriculture et de la pêche. Disponible sur la toile : http://www.agreste.agriculture.gouv.fr

Agreste, 2010. Bilans d'approvisionnement agroalimentaires 2007-2008. Chiffres et Données Agriculture n° 209, janvier 2010. Ministère de l'agriculture et de la pêche. Disponible sur la toile : http://www.agreste.agriculture.gouv.fr

Allan, J.A., 1998. Watersheds and problemsheds: Explaining the absence of armed conflict over water in the Middle East. *Middle East Rev. Int. Aff.*, 2, 49-51.

Allan, J.A., 2001. *The Middle East Water Question: Hydropolitics and the Global Economy*; I.B. Tauris & Co Ltd: London, UK.

Allen R. G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998, Guidelines for computing crop water requirements, *FAO Irrigation and drainage paper 56*, disponible sur la toile [Ref. du 20 janvier 2011] : http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm.

Annuaire statistique de la Ville de Paris, 1905. Volume 24. Paris, Imprimerie Nationale.

Annuaires de statistiques agricoles, 1972 - 1986. Ministère de l'agriculture, Paris, Imprimerie Nationale.

Antoine A., 1999. L'élevage en France, XVI-XVIe siècles, in La Terre et les Paysans en France et en Angeltterre aux XVII et XVIII siècles, *Bulletin de l'Association d'histoire des modernistes des universités* 24, pp. 51-52. In Moriceaux J.M., 2004. *Histoire et géographie de l élevage français, du moyen Age à la Révolution*, Fayard, Paris.

Ascher, F., 2001. *Les nouveaux principes de l'Urbanisme. La fin des villes n'est pas à l'ordre du jour*. Editions de l'Aube, 104 p.

ATTRA, *Hog production alternatives*. Livestock production guide, NCAT, 2004, pp 29. Disponible sur la toile: http://attra.ncat.org/attra-pub/PDF/hog.pdf

Baldwin, R.L., 1995. *Modeling Ruminant Digestion and Metabolism*. New York; Chapman and Hall

Balzac H., *Ferragus*, [1ère éd. 1834], Paris : Gallimard - La Pléiade, 1977, t. V.

Baptist M.G., 1956. Les moyens d'abaisser le coût de production du lait dans les petites exploitations familiales. Economie rurale, n°27. Problèmes d'économie laitière, pp. 77-85.

Baret, M. T., L'élevage bovin et le lait en Bas-Dauphiné, *Revue de géographie alpine*. 1952, tome 40, n°3, pp 421-455.

Barles S., 2002. L'invention des eaux usées : l'assainissement de Paris, de la fin de l'Ancien Régime à la seconde guerre mondiale in : G. Massard-Guilbaud, C. Bernhardt. Le démon moderne. Clermont-Ferrand, Presses Universitaires Blaise-Pascal, pp.129-156.

Barles S., 2005a. A metabolic approach to the city: Nineteenth and twentieth century Paris pp.28-47. In Luckin B., Massard-Guilbaud G., Schott D. (Eds) *Resources of the city: contribution to an Environmental History of Modern Europe*. Ashgate, Aldershot.

Barles S., 2005b. « 5.3 : Le métabolisme urbain : L'azote, XIXe-XXe siècle », p. 1-17, In : Programme PIREN-Seine, rapport d'activité 2004. Paris : UMR CNRS 7619 Sisyphe, février 2005. Pag. Mult. Disponible sur la toile, [réf. du 10 mai 2011], format PDF, <http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/?q=book/577>

Barles S., 2007a. Feeding the city: Food Consumption and Circulation of Nitrogen, Paris, 1801-1914. *Science of the Total Environment*. 375 (1-3), 48-58.

Barles S., 2007b. Urban Metabolism and river systems: an historical perspective – Paris and the Seine, 1790-1970. *Hydrology and Earth System Science*. 4, 1845-1878.

Barles S., 2007c. La nature indésirable: L'animal, ressource et nuisance urbaines, Paris, XIXe siècle. In Nilsson L. (ed.), Urban Europe in Comparative Perspective. *Actes de la 8e conférence européenne d'histoire urbaine, Stockholm, 30 août-2 septembre 2006. Stockholm : Institute of Urban History, Stockholm Universit*y, 2007. 1 CDROM.

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., Lestel L., 2007. The nitrogen question : Urbanisation, industrialisation and river quality. The case of Paris (France), 1830-1939. *Journal of Urban History* 33(5), pp. 794-811.

Barral J., 1880. *Enquête sur la situation de l'agriculture en France en 1879*. Tomes I et II. Vve Bouchard-Huzard, Paris.

Baudier, 1914. *Le commerce du bétail et de la viande en France*, Thèse de Droit, Paris, 1914, p 222.

Beaucire, F., 1985. Enquête sur la notion et les pratiques de l'écologie urbaine en France. Research report. Paris: CNRS.

Benoiston de Châteauneuf, L. F. *Recherches sur les consommations en tout genre de la ville de Paris en 1817 comparées avec ce qu'elles étaient en 1789*. Mémoire lu à l'Académie des sciences le 11 janv. 1819. Paris, 1820-1821. 2 vol.

Benoît M. et Claude C., 2002. Approche méthodologique de l'organisation des assolements afin de préserver la qualité des eaux souterraines. *Revue géographique de l'Est*, 42(3), pp. 111-121.

Benoît M., 2007. Prairies et qualité des eaux: mesures parcellaires, assolement, et observatoires des pratiques. *Fourrages* 189, pp. 17-50.

Benoît M., Saintôt D., Gaury F., 1995. Mesures en parcelles d'agriculteurs des pertes en nitrates. Variabilité sous divers systèmes de culture et modélisation de la qualité de l'eau d'un bassin d'alimentation. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 81 (4), pp. 175-188.

Billé R., 1930. Le chemin de fer de Paris à Bordeaux. In : *Annales de Géographie*, 39 n°221, pp.449-467.

Billen G. et Garnier J., 2007. River basin nutrient delivery to the coastal sea: assessing its potential to sustain new production of non siliceous algae. *Marine Chemistry* 106(1-2), pp.148-159.

Billen G., Barles S., Chatzimpiros P., Garnier J., submitted to *Regional Environmental Change*. Grain, meat and vegetables to feed Paris : where did they come from ? Localizing Paris food supplying areas from 18th to 21st century.

Billen G., Garnier, J., Némery J., Sebilo M., Sferratore A., Barles S., Benoit P., Benoît M., 2007. A long-term view of nutrient transfer through the Seine river continuum. *Science of the total Environment* 375, pp 80-97.

Billen, G., Barles, S., Garnier, J., Rouillard, J., Benoit, P., 2009. The food-print of Paris: Long term reconstruction of the nitrogen flows imported into the city from its rural hinterland, *Regional Environmental Change*, Vol.9 (1), pp. 13-24.

Bixio A. (dir.), 1837. *Maison rustique du XIXe siècle. Encyclopédie d'Agriculture pratique*, tome II : cultures industrielles et animaux domestiques, Paris, 580 p.

Block M., 1851. *Des charges de l'agriculture dans les divers pays de l'Europe*, Paris, Imprimerie et Librairie d'Agriculture et d'Horticulture de Mme V Bouchard-Huzard, 349 p.

Block M., 1858. *Statistique de la France comparée avec les autres pays de l'Europe,* tome II, Paris, Librairie d'Amyot (Ed), p 596.

Boisard, P., 1994. Le lait et la machine. Dans : Gillet, P. (sous la direction de). *Mémoires lactées. Blanc, bu, biblique : le lait du monde*. Ed. Autrement, Collections Mutations/Mangeurs N°143, Paris, 222 p.

Brantz D., Metabolising the Animal : Meat Production as Urban Practice in Nineteenth-Century Europe, dans *Milieu, matière et matérialité des villes européennes*. Recueil des communications à la 4e table ronde internationale Histoire de l'environnement urbain, XIXe-XXe siècle, organisée par le LTMU et le Centre d'Histoire des Techniques et de l'Environnement (CNAM), Paris, 16-18 nov. 2006. Champs-sur-Marne : LTMU / Paris : CDHTE, 2006. 291 p.

Brevot G., 1953. La vente à Paris de la viande fraiche conditionnée sous cellophane, *Vigilat*, avril 1953, pp 6-7.

Brooks G., 2001. The EU animal feed sector: protein ingredients use and implications of the ban of use of meat and bonemeal. Disponible sur la toile en format .pdf [Ref du 10 juillet 2010] : www.pgeconomics.co.uk/pdf/mbm**ban**impactjan2001.pdf

Cadoux G., 1900. *Les finances de la ville de Paris de 1798 à 1900*, Berger Levrault , p 448. *In* : Leteux, S. Impacts des transports ferroviaires sur la filière viande et la consommation carnée de Paris (1850-1920). *Revue d'Histoire des chemins de fer*, 41, pp. 191-203.

Caron F., 1997. *L'histoire des chemins de fer en France*, Tome I : 1740 – 1883, Fayard (Ed), Paris, 700 p.

Carroll W., E., 1936, Possibilities of increasing the use of forage and roughage in swine nutrition, *Journal of Animal Science*, 1936b:26-29.

Cassmann K.G., Dobermann, A. and Walker, D.T.. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency and nitrogen management. *Ambio* 31, 132-140.

Cellier P., Bethenod O., Castell J.F., Germon J.C., 2008. Contribution de l'agriculture à l'effet de serre. Importance de l'azote et interactions avec l'ozone. *Oléagineux Corps Gras Lipides*, 15(5), pp. 317-323.

Chapagain A.K., Hoekstra, A.Y., 2003. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products. In: Value of Water Research Report Series No. 13, UNESCO-IHE, Delft.

Chapagain A.K., Hoekstra, A.Y., 2004. Water Footprints of Nations; Value of Water Research Report Series No. 16; UNESCO-IHE: Delft, The Netherlands.

Chapagain A.K., Hoekstra, A.Y., 2007. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands, *Ecological Economics* 64(1): 109-118.

Chapagain A.K., Hoekstra, A.Y., 2011. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives, *Ecological Economics*, in press.

Chapagain A.K., Hoekstra, A.Y., and Savenije, H.H.G., 2006, Water saving through international trade of agricultural products, *Hydrology and Earth System Sciences* 10(3): 455-468.

Chapagain A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije, H.H.G. and Gautam, R., 2006. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries, *Ecological Economics*. 60(1): 186-203.

Chapagain A.K., Orr, S., 2009. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes, *Journal of Environmental Management*, 90: 1219-1228.

Chatellier V., Vérité R., 2003. L'élevage bovin et l'environnement en France : le diagnostic justifie-t-il des alternatives techniques ? *INRA productions animales* 16(4), pp. 231-249.

Chatzimpiros P., Barles S., 2008a. Quantitative water footprint of meat consumption in historical perspective: First results for Paris (France), 1817 and 1906, p. 215-239, in : HAVRANEK, M. (ed.). Urban metabolism: measuring the ecological city. Book of proceedings of the international conference ConAccount 2008, Prague, Sept. 2008. Prague: Charles University Environmental Centre, 2009. 404p.

Chatzimpiros P., Barles S., 2008b. L'empreinte aquatique quantitative de la consommation parisienne de viande**.** Résultats rétrospectifs : 1817, 1906 in : Ecologie Territoriale., Rapport d'activité 2008, LTMU/UMR CNRS 7136 AUS/ Université de Paris 8, Programme PIREN-Seine., 12 p. Disponible à l'adresse : http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/780

Chatzimpiros P., Barles S., 2010a. Des territoires ruraux sous l'emprise urbaine.

L'évolution de l'empreinte parisienne pour son approvisionnement en viande de porc et en lait entre les XIXe et XXIe siècles, Journées d'échange de l'Ecole Doctorale Ville, Transports et Territoires. Disponible sur la toile : http://villes-environnement.fr/ajax/papiers_affiche/110.html

Chatzimpiros P., Barles S., 2010b. Nitrogen, land and water inputs in changing cattle farming systems. A historical comparison for France, 19th – 21st centuries. *Science of the total environment*, Volume 408, Issue 22, pp. 4644-4653.

Chemla G., 1994. *Les Ventres de Paris. Les Halles, la Villette et Rungis. L'histoire du plus grand marché du monde*, Glénat, Grenoble, 222 p.

Chilonda P., Otte J, 2006. Indicators to monitor trends in livestock production at national, regional and international levels. *Livestock Research for Rural Development.* Volume 18, Article n°117. disponible sur la toile à l'adresse : http://www.lrrd.org/lrrd18/8/chil18117.htm, dernière consultation le 18/11/2010.

Cholley A., 1926. Le ravitaillement en lait de Lyon. *Les études rhodaniennes*, vol 2, pp. 195-198.

Coffignon A., non daté. *L'estomac de Paris*. La librairie illustrée (Ed.), Paris, 1887, 333p.

Cordier A., 1856. Production du lait en France, Journal d'agriculture pratique, tome I, p. 566 In : Fanica P. O., 2008, *Le lait, la vache et le citadin : du XVIIe au XXe siècle*, Paris, Ed. Quae

Coutard O. et Rutherford J., 2009. Les réseaux transformés par leurs marges : développement et ambivalence des techniques décentralisées. *Flux* n° 76/77, pp. 6-13.

Coutard O., Lévy J.P., 2010 (Sous la direction de). *Ecologies Urbaines*. Paris, Economica-Anthropos (collection villes), 317 p.

Coutin P., 1949. La Population en France. *Bulletin de la Société française d'économie rurale*, vol 1 n°1, pp.18-25.

Cowling E. B. and Galloway J. N., 2002. Challenges and opportunities facing animal agriculture: Optimizing nitrogen management in the atmosphere and biosphere of the Earth, *Journal of animal science*, Vol. 31 (2), 157-167.

Crutzen, P.J., 2002. Geology of mankind. *Nature* 415, pp. 23.

CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), 1990. Feeding Standards for Australian Livestock: Ruminants. East Melbourne, Victoria, Australia: CSIRO Publications, In: NRC, *Nutrient requirements of beef cattle*, 2000.

CVNA, 2006. Formulate2, Cattle ration optimizer, http://www.formulate2.com/.

Daumas J.-C., 2006. Consommation de masse et grande distribution. Une révolution permanente (1957-2005). *Vingtième siècle. Revue d'histoire* 91, pp. 57-76.

Demangeon S., 1928. L'approvisionnement de Paris en fruits et légumes. In : *Annales de Géographie* 37 n°206, pp. 97-121.

Demonet M., 1990. *Tableau de l' agriculture française au milieu du XIXe siècle*. L'enquête de 1852, Paris, Éditions de l'EHESS, p. 98 et 191.

Diamond J., 1997. *Guns, Germs and Steel*. W.W. Norton&Company, New York, 480pp.

Diry, J.-P., 1979. L'industrie française de l'alimentation du bétail. *Annales de Géographie*, 88, n°490, pp. 671-704.

Doorenbos, J. and Kassam, A. 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 33. Rome.

Drinkwater L.E., Wagoner P., Sarrantonio M., 1998. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature* 396(6708), pp. 262-265.

Dubuc, R., 1938. L'Approvisionnement de Paris en lait. *Annales de Géographie* 47(267), pp. 257 – 266.

Duby, G. et Wallon A., 1976. (Sous la direction de). *Histoire de la France rurale*, Tome 3 : de 1789 à 1914 et tome 4 : de 1914 à nos jours, Ed. Seuil, Paris.

Dupeux, G., 1981. *Atlas historique de l'urbanisation en France (1811-1975)*. Paris, Éd. du CNRS.

EMEP (The Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air Pollutants in Europe), 2006. EMEP measurement data base (available online from http://www.emep.int/).

ENA, 2011. *European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives*. (Eds) Sutton M.A., Howard C.M., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B., Cambridge University Press, New York, 600p.

Erisman J.M., Sutton A.M., Galloway J., Klimont Z., Winiwarter W., 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636-639.

Erkman S., 1998. *Vers une écologie industrielle*, Ed. Charles Léopold Mayer, 252 p.

European Commission Nitrate Directive, 1991/676/CEE. http://ec.europa.eu/environment/water/water-nitrates/index_en.html, [Ref. du 14 mars 2011].

Fanica P. O., 2008, *Le lait, la vache et le citadin : du XVIIe au XXe siècle*, Paris, Ed. Quae.

FAO, 1993. CLIMWAT database. Accessible sur la toile à l'adresse : http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html

FAO, 2003, *Technical Conversion Factors for Agricultural Commodities*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. Disponible sur la toile [Ref. du 20 Octobre 2008] : *http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/ECONOMIC/ESS/pdf/tcf.pdf*

FAO, CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management. Irrigation and Drainage Paper 46. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992.

FAOSTAT database, 2000 - 2010. FAO Statistical Databases, Accessible sur la toile à l'adresse : http://faostat.fao.org/default.aspx

Farrugia A., Castillon P., Le Gall A., Cabaret M.M., 2000, Proposition d'une méthode de calcul permettant de raisonner la fertilisation azotée des prairies, *Fourrages*, (164), pp. 355-372.

Flandrin J., L., Montanari M., (dir.), 1996. *Histoire de l'alimentation*, Paris, Fayard, 916 p., 7e partie, l'époque contemporaine XIXe-XXe siècles pp. 737-738.

Folke, C., Jansson, A., Larsson, J., Costanza, R., 1997. Ecosystem appropriation by cities. *Ambio* 26, 167–172.

Forkes, J., 2007. Nitrogen balance for the urban food metabolism of Toronto, Canada. *Resources, conservation and recycling*, 52, 74-94.

Fouéré Y., 1939. *Les marchés d'approvisionnement de la viande à Paris*, Imprimerie française de centralisation, 28O p.

Fox, D.G., Barry, M.C., Pitt, R.E., Roseler, D.K. and Stone, W.C. 1995. Application of the Cornell net carbohydrate and protein model for cattle consuming forages. J. Anim. Sci. 73:267.

Galloway J., 1998. The global nitrogen cycle: changes and consequences. E*nvironmental Pollution* 102, S1 pp. 15-24.

Galloway J.N., Asner G., Boyer E.W., Capone D.G., Cleveland C., Dentener F.J., Greene P., Holland E., Howarth R.W., Karl D.M., Michaels A.F., Seitzinger S.P., Townsend A.R., Vorosmarty C. (alphabetical after first), 2004. Global and Regional Nitrogen Cycles: Past, Present and Future. *Biogeochemistry*, 70(2): 153-226.

Galloway J.N., Burke M., Bradford G.E., Naylor R., Falcon W., Mooney H.A., Gaskell J., Oleson K., McCollough E., Steinfeld H., 2007. International Trade in Meat: The Tip of the Pork Chop. *Ambio* 36, No. 8 pp. 622–629.

Galloway N.J., Aber D.J., Erisman J.W., Seitzinger P.S., Howarth W.R., Cowling B.E., Cosby B.J., 2003. The Nitrogen Cascade. *BioScience* 53(4), pp. 341-356.

Garnier J., Cébron A., Tallec G., Billen G., Sebilo M., Martinez A., 2006. Nitrogen behaviour and nitrous oxide emission in the tidal Seine River estuary (France) as influenced by human activities in the upstream watershed. *Biogeochemistry* 77(3), pp. 305-325.

Gérard, M-C., 1976. Recensement de la population de 1975 : L'extension des « grandes banlieues ». In : *Economie et statistique*, n°80, pp. 63-71.

Gerbens-Leenes P. W., Nonhebel S., 2004. Critical water requirements for food, methodology and policy consequences for food security. *Food Policy* 29, pp. 547-564.

Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A.Y. et Van der Meer, T.H., 2009. The water footprint of bioenergy, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (25), pp. 10219-10223.

Girandin J.P.L., 1844. *Des fumiers considérés comme engrais*, 3e édition, Paris, Fortin-Masson et Cie.

Goldewijk K.K, Beusen A., Janssen P., 2010. Long-term dynamic modelling of global population and built-up area in a spatially explicit way: HYDE 3.1. *The Holocene* 20(4), pp. 565-573.

Goudriaan, J., Groot, J.J.R., Uithol, P.W.J., *Productivity of agro-ecosystems. In: Terrestrial Global Productivity* (Eds.: H.A. Mooney and B. Saugier). - [S.l.] : Academic Press, 2001, 301–313.

Hadjibiros K., 2003. The River Acheloos Diversion Scheme. www.hydrodinosaurs.fr.st, 11p.

Hansen L. L., Claudi-Magnussen C., Jensen S. K., Andersen H. J., 2006. Effect of organic pig production systems on performance and meat quality, *Meat Science*, volume 74, n°4, pp 605-615.

Hansen, J., Nazarenko, L., Ruedy, R., Sato, M., Willis, J., Del Genio, A., Koch, D., Lacis, A., et al., 2005. Earth's energy imbalance: confirmation and implications. *Science* 308, 1431–1435.

Herridge D.F., Peoples M.B., Boddey R.M., 2008. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant Soil* 311, pp. 1-18.

Heuzé G., 1893. *Les plantes industrielles*. Paris : Librairie Agricole de la maison rustique, 4 volumes.

Hoch T., Agabriel J., 2004. A mechanistic dynamic model to estimate beef cattle growth and body composition: 1. Model description. *Agricultural systems*, 81, pp. 1-15.

Hoekstra, A.Y. and Hung, P.Q., 2002. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. In: *Value of Water Research Report Series* No. 13, UNESCO-IHE, Delft.

Hoekstra, A.Y. and Hung, P.Q., 2005. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade, *Global Environmental Change*, 15(1): 45-56.

Hoekstra, A.Y., 2009. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis, *Ecological Economics* 68(7), pp. 1963-1974.

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M., 2009. Water footprint manual: State of the art 2009, Water Footprint Network, Enschede, the Netherlands.

Howarth, R.W., G. Billen, D. P. Swaney, A. Townsend, N. Jaworski, K. Lajtha, J. A. Downing, R. Elmgren, N. Caraco, T. Jordan, F. Berendse, J. Freney, V. Kudeyarov, P. Murdoch, Zhu Zhao-liang. 1996. Riverine Inputs of Nitrogen to the North Atlantic Ocean: Fluxes and Human Influences. *Biogeochemistry*, 35:75-139.

Huard, M.G., 1939. L'approvisionnement de Paris en lait. Thèse vétérinaire. Imprimerie commerciale de l'Ouest-Eclair, Rennes.

Husson A., 1856. *Les consommations de Paris*. 1e ed. Paris, Guillaumin, 496 p.

IAURIF, 2005. Mode d'Occupation du Sol, *Note Rapide* n°387, juin 2005.

INRA, 1989. *Alimentation des animaux monogastriques*, INRA (Ed), 1989, 284 p.

INRA, 1998, Alimentation des bovins, ovins et caprins, R. Jarrige (ed), INRA Paris, 476 p.

INSEE, 1990. Annuaire rétrospectif de la France. Séries longues. INSEE, Paris

INSEE, 1999. Annuaire statistique de la France. INSEE, Paris

INSEE, 2000. Forte extension des villes entre 1990 et 1999. INSEE Première. Disponible sur la toile [réf. du 10 avrir 2011], format PDF, http://www.insee.fr/fr/ffc/docs_ffc/ip707.pdf

INSEE, 2007. Consommation des ménages. Quels lieux d'achat pour quels produits ? INSEE Première. Disponible sur la toile, [réf. du 5 avril 2011], format PDF, http://www.insee.fr/fr/ffc/ipweb/ip1165/ip1165.pdf

Institut de l'élevage, 1993. Production bovines, viande et lait, Statistiques du GEB. http://www.inst-elevage.asso.fr/

ITAB (Institut Technique de l'Agriculture Biologique), 2001. *Actes des journées techniques élevage*, ITAB (Ed), Limoges, Octobre 2001.

ITP (Institut Technique du Porc), 2003. *Porc performance*, 2002, ITP (éditeur), France, 56 p

Jackson B. R., Carpenter R. S., Dahm N. C., McKnight M. D., Naiman J. R., Postel L. S., Running W. S., 2001. Water in a Changing World. *Ecological Applications*, 11(4), pp. 1027-1045.

Jacquard C., Choisnel E., Evaluation des besoins en eau de mais: variabilité climatique, in Perrier Alain (Ed) : *Les besoins en eau des cultures*, Conférence Internationale, Paris 11-14 Sept 1984, INRA, Paris 1985, 451-470.

James L.A. et Andrew M.W., 2006. The human role in changing fluvial systems: Retrospect, inventory and prospect, *Geomorphology* 79, pp. 152-171.

Kiple K.F. and Ornelas K.C., eds., *The Cambridge World History of Food*, Cambridge University Press, 2000, 1958 p.

Kraussmann F., 2011. A City and its Hinterland: Vienna's Energy Metabolism 1800-2006. In Singh S., Haberl H., Schmid M., Mirtl M., Chertow M. (Eds), *Long Term Socio Ecological Research*. Springer, New York.

Lachêne R., 1962. Le problème des transports et les Halles de Paris. In : *Economie rurale Agriculture et transport* n°51, pp. 61-72.

Lange C. F. M., Morel P. C. H., and Birkett S. H., 2003. Modeling chemical and physical body composition of the growing pig. *Journal of Animal Science*, 81:E159-165.

Lavoisier Antoine Laurent, 1791. *Résultats extraits d'un ouvrage intitulé : De la Richesse territoriale du royaume de France*, Imprimé par ordre de l'Assemblé Générale en 1791. Disponible sur la toile à l'adresse : gallica.bnf.fr.

Lebeau R., 1959. Michel Philipponneau, La vie rurale de la banlieue parisienne. Etude de géographie humaine. *Revue de géographie de Lyon* 34(1), pp.75-79.

Lefour P. A. A., 1840. Chronique du mois de Juillet, *Journal d'agriculture pratique*, tome IV, In : Fanica P. O., 2008, *Le lait, la vache et le citadin : du XVIIe au XXe siècle*, Paris, Ed. Quae

Leteux S., 2009. Impacts des transports ferroviaires sur la filière viande et la consommation carnée à Paris (1850-1920). *Revue d'Histoire des chemins de fer* 41, pp. 193-203.

Loua T., 1873. *Atlas statistique de la population de Paris*, Paris, p. 78, *In* : BARLES, S. « Undesired nature: Animal as a resource and a nuisance, 19th century Paris », p. 1-7, *in* : NILSSON, L. (ed.), *Urban Europe in Comparative Perspective*. Actes de la 8e conférence européenne d'histoire urbaine, Stockholm, 30 août-2 sept. 2006. Stockholm : Institute of Urban History, Stockholm University, 2007. 1 CDROM, pag. mult.

Mazoyer, M. et Roudart, L., 1998. *Histoire des agricultures du monde. Du Néolithique à la crise contemporaine*. Seuil, Paris. 531 p.

McCracken, D. V., Smith, M. S., Grove, J. H., MacKown, C. T. & Blevins, R. L., Nitrate leaching as influenced by cover cropping and nitrogen source. *Soil Sci. Soc. J.* 58(1994), 1476-1483.

McNeill, J.R., 2001. *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*, W.W. Norton & Company (Ed.), New York and London, 421p.

Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2010) A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat, *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7), 1259–1276.

Merlin, P., 1967. *Les transports parisiens*. Paris, Masson, p. 76.

Mignolet C., Schott C., Benoît M., 2004. Spatial dynamics of agricultural practices on a basin territory: a retrospective study to implement models simulating nitrate flow. The case of the Seine basin. *Agronomie* 24(4), pp. 219-235.

Mignolet C., Thénard V., Benoît M., Anfrie M.N., Foissy D., Grosse M., Trommenschlager J.M., 1999, Livestock farming systems and sustainable drinking water production : proposition of risk indicators at different organisation levels, *Livestock farming Science* (61), pp. 307-317.

Ministère de l'Agriculture, 1897. Statistique agricole de la France. Résultats généraux de l'enquête décennale de 1892. Paris, 1897. 451+365 p.

Ministère de l'Agriculture, 1878. Récoltes des céréales et pommes de terre, de 1815 à 1876. Paris.

Ministère de l'Agriculture, 1966, Statistique agricole 1965 et résultats rétrospectifs 1930-1964, Paris, Imprimerie Nationale.

Moehn S., Atakora J., Ball O.R., 2005. Using net energy for diet formulation: Potential for the Canadian pig industry. *Advances in pork production* 16, pp. 119-130.

Monteith, J.L., 1994. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. *Agr. Forest Meteorol*. Vol.68, 213–220.

Montheith J. L., 1977. Reassessment of maximum growth rates for C3 and C4 crops. *Experimental Agriculture* 14(1) pp. 1-5.

Moreau de Jonnès A., 1848, *Statistique de l'agriculture de la France*, Paris.

Moriceau, J. M., 2005. *Histoire et géographie de l'élevage français. Du moyen âge à la révolution*, Paris, Fayard (Ed).

Mounier, M., L., 1846. *De l'agriculture en France, d'après les documents officiels*, tome premier, Paris.

Musset R., 1937, Les prix en France de 1927 à 1935 et leurs conditions géographiques. *Annales de Géographie*, 46, n°259, pp. 76-78.

Naylor, R., Steinfeld, H., Falcon, W., Galloway, J., Smil, V., Bradford, E., Alder, J. and Mooney, H., 2005. Losing the links between livestock and land. *Science*, 310: 1621–1622.

Neset, T-S S, Bader H-P, Scheidegger R, 2006. Food Consumption and Nutrient Flows - Nitrogen in Sweden since the 1870s. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 10 Issue 4, pp.61-75.

Neset, T-S S, Drangert J-O, Bader H-P, Scheidegger R., 2010. Recycling of Phosphorus in Urban Sweden. A historical overview to prepare a strategy for the future. *Water Policy*, vol 12 (4) pp. 611-624.

Noblet, J, Bontems, V. and Tran, G. 2003. Estimation de la valeur énergétique des aliments pour le porc. *INRA Prod. Anim*. 16:197-210.

Noblet, J., and Y. Henry. 1991. Energy evaluation systems for pig diets. pp. 87–110 in Manipulating Pig Production III, E. S. Batterham, ed. Australasian Pig Science Association, Attwood, Australia.

Noblet, J., H. Fortune, C. Dupire, and S. Dubois. 1993. Digestible, metabolizable and net energy values of 13 feedstuffs for growing pigs: effect of energy system. *Anim. Feed Sci*. Technol. 42:131–149.

Noblet, J., H. Fortune, X. S. Shi, and S. Dubois. 1994. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci*. 72:344–354.

Noblet, J., J. Y. Dourmad, and M. Etienne. 1990. Energy utilization in pregnant and lactating sows: Modeling of energy requirements. *J. Anim. Sci*. 68:562–572.

NRC (National Research Council), 1981. *Effect of Environment on Nutrient Requirements of Domestic Animals*. Washington, D.C.: National Academy Press.

NRC (National Research Council), 1998. *Nutrient Requirements of Swine.* Tenth revised edition. Disponible sur la toile: http://www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309059933

NRC (National Research Council), 2000. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. Seventh revised edition: Update 2000. Disponible sur la toile: http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=9791&page=1

NRC (National Research Council), 2001. *Nutrient requirements of dairy cows*, Seventh revised Edition, available online: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=9825.

Odum E. P., 1953. *Fundamentals of ecology*. Philadelphia: Saunders.

Omafra, L'acidose ruminale chronique (arc) chez la vache laitière, Fiche technique, 2003, disponible sur la toile [Ref. du 10juillet, 2010]: http://www.omafra.gov.on.ca/french/livestock/dairy/facts/03-032.htm

Paillat, M., 1997 (Sous la direction de). *Le mangeur et l'animal*. *Mutations de l'élevage et de la consommation*. Autrement, Collection Mutations/Mangeurs, N°172, Paris, 150p.

Paxton A., 1994. *The FoodMiles Report: the Dangers of Long Distance Food Transport*, Safe Alliance: London.

Penning de Vries F.W.T., 1983. Modeling of growth and production. *In* : Gerbens-Leenes P. W., Nonhebel S., 2004. Critical water requirements for food, methodology and policy consequences for food security. *Food Policy* 29, pp. 547-564.

Philipp E., 2004. Approvisionnement de Paris en viande : entre marchés abattoirs et entrepôts, 1800-1970. Thèse de doctorat d'histoire des techniques, CNAM, 2 vol.

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

Piguet Frédéric Paul, Blanc Isabelle, Corbiere-Nicollier Tourane et Erkman Suren, 2007. L'empreinte écologique : un indicateur ambigu. *Futuribles*, numéro 334, pp. 5-24.

Pimm S.T., Russell G. J., Gittleman J. L., Brooks T. M., 1995. The future of Biodiversity. *Science* 269 pp. 347-350.

Pinon P., 2004. *Les plans de Paris : Histoire d'une capitale*, en collaboration avec Bertrand le Boudec, sous la direction de Dominique Carré, (Ed.) Le passage, Paris Bibliothèques, 135p + CDROM.

Pointereau P., 2001. Légumineuses : quels enjeux écologiques ? Le courrier de l'environnement n°44, octobre, 2001.

Pointereau P., Coulon F., 2009. Abandon et artificialisation des terres agricoles. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, n°57, Juillet 2009.

Postel S., 1996 in *State of the World 1996*, Brown L. R. (Ed.), Norton, New York, pp.40-59. In Matson et al., 1997, Agricultural Intensification and Ecosystem Properties, *Science* 277 pp 504 – 509.

Postel, S. L., G. C. Daily, and P. R. Ehrlich. 1996. Human appropriation of renewable fresh water. *Science* 271:785-788.

Poudel, D.D., Horwath W.R., Mitchell J.P., Temple S.R., 2001, Impacts of cropping systems on soil nitrogen storage and loss, *Agricultural Systems* (68), pp. 253-268.

Rees W., 1992. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Envirnment and Urbanization*. 4, 121-130.

Reynier M., 1945. L'approvisionnement de Paris en poisson à la veille de la guerre. In : *Annales de Géographie* 54 n° 293, pp. 13-28.

Royer, C.E., *Notes Economiques sur l'Administration des Richesses et la Statistiques agricole de la France*, Paris, 1843.

Sahagian D., 2000. Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations: sea level and water redistribution. *Global Planetary Change* 25, pp. 39-48.

Sargentis, G-F., K. Hadjibiros and A. Christofides (2005). Plastiras lake: the impact of water level on the aesthetic value of landscape. *Proc. 9th Int. Conf. on Environmental Science and Technology*, University of the Aegean, Rhodes, pp. 817-824 (poster).

Shiklomanov IA, 1997. Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources and Water Availability in the World: Assessment of Water Resources and Water Availability in the world. Geneva (Switzerland): World Meteorological Organization.

SitraM (Système d'Information sur les Transports de Marchandises), 2006. Base de données du Ministère de Transport (MEDDEM, www.statistiques.equipement.gouv.fr/).

Smil V., 1992. *General energetics, energy in the biosphere and civilization*. Wiley, New York

Smil V., 1999. Nitrogen in crop production: An account of global flows. *Global Biogeochemical Cycles* 13, pp.647-662.

Smil V., 2000. *Feeding the World: Challenges for the 21st century*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Smil V., 2001. Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of Food Production. Cambridge (MA): MIT Press.

Smil V., 2002. Nitrogen and food production: Proteins for human diets. *Ambio* 31: 126-131.

Smil V., 2008. *Energy in Nature and Society. General Energetics of Complex systems*. MIT Press, Massachusetts Institute of Technology.

Smith K. (Ed). *Nitrous Oxide and Climate Change*, Earthscan Ltd, 320 p.

Stanhill G., 1977. An Urban Agro-ecosystem : the exemple of nineteenth century Paris. Agro-ecosystems, 3, pp. 269-284.

Statistique agricole annuelle, série 1885-1970. Ministère de l'agriculture, 1886-1971, Paris, Imprimerie Nationale.

Statistique agricole annuelle, série 1989-2009. Disponible sur la toile: http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/

Steffen W. Crutez J., McNeill J.R., 2007. The Anthropocene : are humans now overwhelming the great forces of Nature ? *Ambio* 36(8), pp. 614-621.

Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, and C. de Haan. 2006. *Livestock's long shadow: Environmental issues and options*, FAO, Rome. Disponible sur la toile [Ref. du 16 mars 2008: http://www.virtualcentre.org/en/library/key_pub/longshad/A0701E00.htm.

Sylvain L., 2005. *Libéralisme et corporatisme chez les bouchers parisiens, 1776-1944*. Thèse de doctorat d'Histoire. Université Charles de Gaulle, Lille, 2 vol., 847 p.

Tanguy R., 1949. Comment Paris s'approvisionne en viande, *France illustration*, pp.1-6.

Thomas, E., 1873. *Le marché aux bestiaux de La Villette et les abattoirs de la ville de Paris : Guide historique et pratique de l'approvisionneur, de l'acheteur et des employés attachés*
aux divers services de cette partie spéciale de l'alimentation de Paris. Paris, 430 p.

Tilman D., Fargione J., Wolff B., D'Antonio C., Dobson A., Howarth R., Schindler D., Shclesinger W. H., Simberloff D., Swackhamer D., 2001. Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change. *Science* 292, pp. 281-284.

Tilman, *D*., K. G. Cassman, P. A. Matson, R. Naylor and S. Polasky, 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices, *Nature* 418,pp. 671- 677.

Townsend, A. R., R. W. Howarth , F. A. Bazzaz , M. S. Booth , C. C. Cleveland , S. K. Collinge , A. P. Dobson , P. R. Epstein, E. A. Holland , D. R. Keeney , M. A. Mallin , P. Wayne and A. Wolfe. 2003. Human health effects of a changing global nitrogen cycle. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1(5):240-246.

Trochet J.-R, Péru J.-J., Roy J.-M., 2003. *Jardinages en région parisienne du XVIIe au XXe siècle*, ed Grâne : Créaphis, 275 p.

Tugault Y. 1974. Croissance urbaine et peuplement. Population rurale et populatin urbaine : Evolution à long terme. *Population (French Edition)*, 29e Année, La population de la France, pp.207-238.

U.S. Census Bureau, Population Division, 2011. Disponible sur la toile [réf. du 10 avril 2011] : http://www.census.gov/ipc/www/idb/index.php

United Nation Population Division, 2006. *World Population Prospects: The 2006 Revision* and *World Urbanization Prospects: The 2007 Revision*, Disponible sur la toile [Réf. du 5 avril 2011]: http://esa.un.org/unup

USDA (United States Department of Agriculture), 2004 « The Amazon: Brazil's final soybean frontier", Disponible sur la toile (Ref. du 9 November 2010) : http://www.fas.usda.gov/pecad/highlights/2004/01/amazon/amazon_soybeans.htm,

USDA, 2010. Energy Use in the U.S. Food System, USDA Economic Research Service Report No. ERR-94. http://www.ers.usda.gov/Publications/ERR94/

van den Bergh C.J.M. Jeroen, Verbruggen Harmen, 1999. Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the 'ecological footprint'. *Ecological Economics* 29, pp. 61-72.

Vermorel M., 1995. Emissions annuelles de méthane d'origine digestive par les bovins en France. *INRA Production animales* 8(4), pp. 265-272.

Vial, C., non daté, *Engraissement du bœuf*, Paris, Librairie Agricole de la Maison Rustique pp 179.

Vilain (Ed.) et al., 2008. La méthode IDEA – Indicateurs de durabilité des exploitations agricoles – Guide d'utilisation, Ed. Educagri, Dijon, 100p. Table disponible sur la toile [Ref. du 20 novembre, 2010] à l'adresse : http://www.idea.portea.fr/

Vitousek P.M., Aber, J.D. Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D. W., Schlesinger W. H., Tilman D. G., 1997b. Human alteration of the global nitrogen cycle: causes and consequences. *Ecological Applications* 7(3): 737-750.

Vitousek P.M., Ehrlich, P.R., Ehrlich, A.H., Matson, P.A., 1986. Human appropriation of the products of photosynthesis. *BioScience* 36, 368–373.

Vitousek P.M., Mooney H.A., Lubchenco J., Melillo J.M., 1997a. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science* 277, pp.494-499.

von Thünen J.H., 1826. Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und National Oekonomie. In: Fischer G, Jena G (eds), Perthes, Hamburg.

Vorosmarty C.J., Sahagian D., 2000. Anthropogenic disturbance of the terrestrial water cycle. *BioScience* 50: 753-765.

Wackernagel M., Rees W., 1996. Our Ecological Footprint : Reducing Human Impact on the Earth. Illustrated by Phil TEstemale. The new catalyst bioregional series, vol. 9. Gabriola Island, BC and Philadelphia, PA: New Society Publishers.

Warren-Rhodes K., Koenig A., 2001. Ecosystem appropriation by Hong Kong and its implications for sustainable development, *Ecological Economics* 39(3), pp 347-359.

Weber L.C., Matthews H.S., 2008. Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United Stated, *Environmental Science and Technology*, 42(10), pp. 3508-3513.

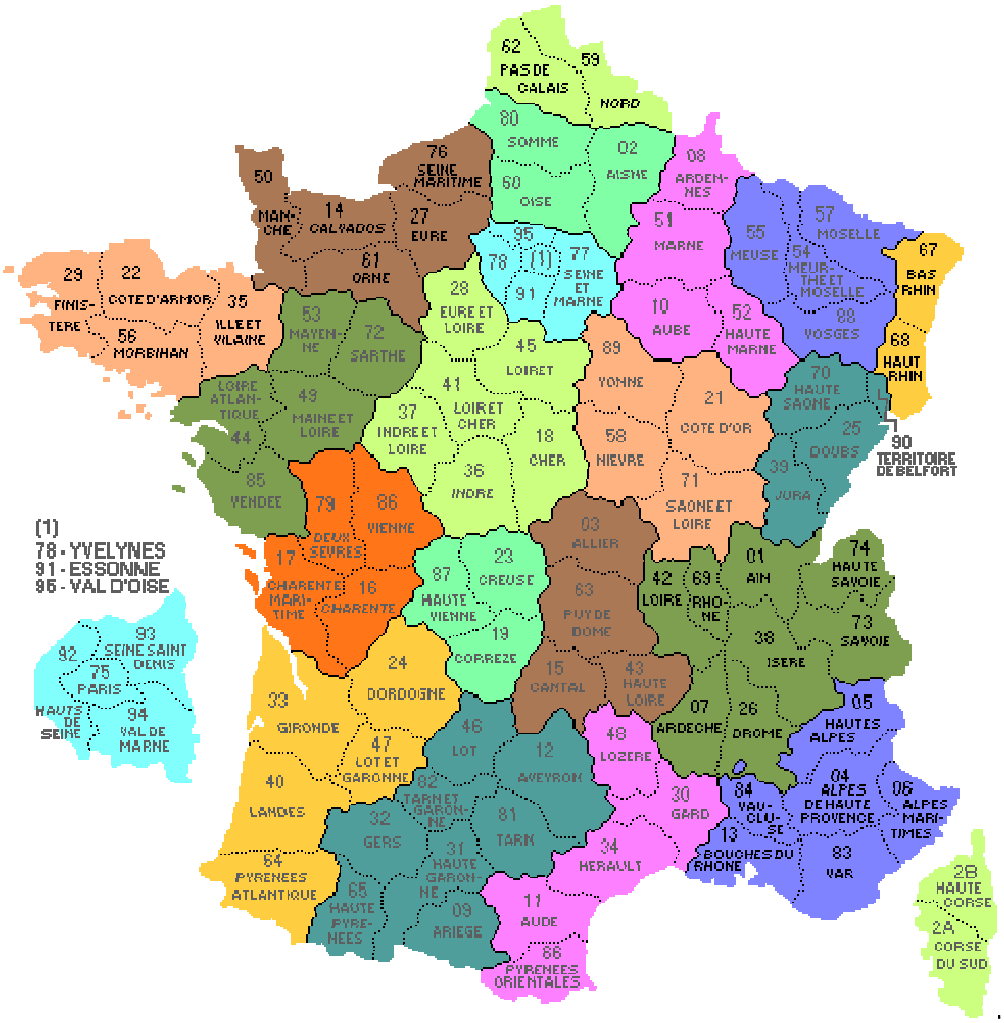
Wolfe A., Patz J.A., 2002. Nitrogen and human health: Direct and indirect impacts. *Ambio* 31, pp. 120-125.

Wulf D.M., 1999. "Did the locker plant steal some of my meat?" Brookings, SD: South Dakota State University, *In* : Smil V., 2002, Eating Meat: Evolution, patterns, and consequences. *Population and development review*, 28(4):599-639.

WWF, 2006. Living Planet Report, 44 pages. Disponible sur la toile à l'adresse [Ref du 5 avril, 2011] :
http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/living_planet_report/

Annexe I

Fond cartographique de la France. Découpage par département administratif. Les départements sont coloriés de façon à représenter le découpage régional.



Annexe II

Fond cartographique de la France. Découpage par région administratif.

Annexe III

Valeurs nutritives des aliments pour ruminants. Source : NRC, 2000, 2001.

TABLE 11-1 Means and Standard Deviations for the Composition Data of Feeds Commonly Used in Beef Cattle Diets

Entry No.	Feed Name/ Description	International Feed No.	Value as Determined at Maintenance Intake: TDN (%)	DE (Mcal/kg)	ME (Mcal/kg)	Net Energy Values for Growing-Cattle Mcal/kg: NE_m	NE_g	Dry Matter (%)	Crude Protein (%)	Ruminal Undegradability (%)	Ether Extract (%)	Fiber (%)	NDF (%)	ADF (%)
	ALFALFA (*Medicago sativa*)													
01	Fresh		62	2.73	2.24	1.38	0.80	23.40	18.90	22	3.15	26.50	47.10	36.80
		N	—	—	—	—	—	22	3146	—	9	10	2092	3126
		SD	—	—	—	—	—	3.66	3.00	—	0.65	2.28	7.02	5.11
02	Fresh, late vegetative	2-00-181	66	2.91	2.39	1.51	0.92	23.20	22.20	22	2.90	24.20	30.90	24.00
		N	—	—	—	—	—	14	17	—	4	14	12	6
		SD	—	—	—	—	—	3.39	2.00	—	0.95	2.29	4.79	3.66
03	Fresh, full bloom	2-00-188	50	2.22	1.81	0.92	0.42	23.50	19.3	22	2.6	30.4	38.6	35.9
		N	—	—	—	—	—	8	8	—	2	2	12	2
		SD	—	—	—	—	—	3.88	3.70	—	0.57	1.83	6.14	2.82
04	Hay		60	2.65	2.17	1.31	0.74	90.60	18.6	25	2.39	26.1	43.9	33.8
		N	—	—	—	—	—	5,895	5883	12	169	122	4675	5764
		SD	—	—	—	—	—	1.76	2.84	7	1.16	4.54	6.44	4.67
05	Hay, sun-cured, early bloom	1-00-059	60	2.65	2.17	1.31	0.74	90.50	19.90	22	2.9	28.5	39.3	31.9
		N	—	—	—	—	—	43	63.00	—	28	29	14	15
		SD	—	—	—	—	—	1.92	2.25	—	1.35	3.98	3.58	2.40
06	Hay, sun-cured, mid-bloom	1-00-063	58	2.56	2.10	1.24	0.68	91.00	18.70	—	2.6	28.0	47.1	36.7
		N	—	—	—	—	—	60	56.00	—	23	22	22	26
		SD	—	—	—	—	—	1.85	2.93	—	1.82	4.25	6.53	2.58
07	Hay, sun-cured, full bloom	1-00-068	55	2.43	1.99	1.14	0.58	90.90	17.0	22	3.4	30.1	45.8	38.7
		N	—	—	—	—	—	210	20.00	—	12	14	10	9
		SD	—	—	—	—	—	2.06	2.50	—	1.73	4.27	3.49	2.42
08	Meal		62	2.73	2.24	1.38	0.80	91.70	18.9	59	2.70	26.5	42.0	33.2
		N	—	—	—	—	—	145	97.00	10	60	73	11	26
		SD	—	—	—	—	—	1.93	2.01	17	0.48	2.48	7.7	4.7
09	Meal, dehydrated, 15% protein	1-00-022	59	2.60	2.13	1.27	0.70	90.40	17.30	59	2.4	29.0	55.4	37.5
		N	—	—	—	—	—	23	21	—	13	18	1	2
		SD	—	—	—	—	—	2.18	1.75	—	0.44	3.17	—	1.47
10	Meal, dehydrated, 17% protein	1-00-023	61	2.69	2.21	1.34	0.77	91.80	18.90	59	3.00	26.2	45.0	34.3
		N	—	—	—	—	—	72	50	—	37	46	1	2
		SD	—	—	—	—	—	1.50	0.68	—	0.49	2.25	—	0.95
11	Silage	3-00-216	63	2.78	2.28	1.41	0.83	44.10	19.5	23	3.70	25.4	47.5	37.5
		N	—	—	—	—	—	8259	8315	6	84	38	6842	8295
		SD	—	—	—	—	—	11.6	2.93	8	0.92	2.9	6.6	4.9
	BARLEY (*Hordeum vulgare*)													
12	Grain	4-00-549	88	3.84	3.03	2.06	1.40	88.1	13.20	27	2.2	3.37	18.1	5.77
		N	—	—	—	—	—	1743	1884	16	8	6	1216	1399
		SD	—	—	—	—	—	0.86	1.50	10	0.44	1.6	4.8	2.2
13	Silage		60	2.65	2.17	1.31	0.74	37.10	11.90	23	2.92	—	56.8	33.9
		N	—	—	—	—	—	188	186	—	5	—	44	185
		SD	—	—	—	—	—	9.30	2.70	—	0.61	—	5.7	4.2
14	Straw	1-00-498	40	1.76	1.45	0.60	0.08	91.20	4.40	25	1.90	41.5	72.5	48.8
		N	—	—	—	—	—	29	35	—	7	26	2	3
		SD	—	—	—	—	—	3.31	0.91	—	0.27	4.03	1.83	4.65
	BEET SUGAR (*Beta vulgaris altissima*)													
15	Pulp, dehydrated	4-00-669	74	3.26	2.68	1.70	1.14	91.00	9.8	45	0.6	20.0	44.6	27.5
		N	—	—	—	—	—	47	31	4	25	29	2	5
		SD	—	—	—	—	—	1.37	1.04	14	0.15	2.40	20.4	6.79
	BERMUDAGRASS, COASTAL (*Cynodon dactylon*)													
16	Fresh	2-00-719	64	2.82	2.31	1.44	0.86	30.30	12.6	20	3.7	28.4	73.3	36.8
		N	—	—	—	—	—	15	48	—	10	11	41	41
		SD	—	—	—	—	—	6.91	2.88	—	0.95	1.77	5.10	4.64
17	Hay, sun-cured, 43-56 days growth	1-09-210	49	2.16	1.77	0.93	0.39	93.0	7.8	23	2.7	32.6	—	—
		N	—	—	—	—	—	1	4	—	2	2	3	3
		SD	—	—	—	—	—	—	1.19	—	1.83	4.73	2.45	4.18
	BLUEGRASS, KENTUCKY (*Poa pratensis*)													
18	Fresh, early vegetative	2-00-777	72	3.17	2.60	1.70	1.08	30.80	17.4	20	3.5	25.2	55	29
		N	—	—	—	—	—	4	2	—	2	2	1	1
		SD	—	—	—	—	—	0.69	0.14	—	0.07	0.21	—	—
	BLOOD													
19	Meal	5-00-380	66	2.91	2.49	1.51	0.92	90.50	93.8	75	1.69	1.35	41.6	2.81
		N	—	—	—	—	—	52	40	7	19	2	28	37
		SD	—	—	—	—	—	5.9	12.1	12	3.4	14	20.2	2.60

TABLE 9-1 Nutrient Requirements for Growing and Finishing Cattle

Wt @ Small marbling		533 kg					
Weight range		200-450 kg					
ADG range		0.50-2.50 kg					
Breed Code		1 Angus					
Body Weight, kg		200	250	300	350	400	450
Maintenance Requirements							
NE_m	Mcal/d	4.1	4.84	5.55	6.23	6.89	7.52
MP	g/d	202	239	274	307	340	371
Ca	g/d	6	8	9	11	12	14
P	g/d	5	6	7	8	10	11
Growth Requirements							
(ADG)			*NE_g required for gain, Mcal/d*				
0.5	kg/d	1.27	1.50	1.72	1.93	2.14	2.33
1.0	kg/d	2.72	3.21	3.68	4.13	4.57	4.99
1.5	kg/d	4.24	5.01	5.74	6.45	7.13	7.79
2.0	kg/d	5.81	6.87	7.88	8.84	9.77	10.68
2.5	kg/d	7.42	8.78	10.06	11.29	12.48	13.64
			MP required for gain, g/d				
0.5	kg/d	154	155	158	157	145	133
1.0	kg/d	299	300	303	298	272	246
1.5	kg/d	441	440	442	432	391	352
2.0	kg/d	580	577	577	561	505	451
2.5	kg/d	718	712	710	687	616	547
			Calcium required for gain, g/d				
0.5	kg/d	14	13	12	11	10	9
1.0	kg/d	27	25	23	21	19	17
1.5	kg/d	39	36	33	30	27	25
2.0	kg/d	52	47	43	39	35	32
2.5	kg/d	64	59	53	48	43	38
			Phosphorus required for gain, g/d				
0.5	kg/d	6	5	5	4	4	4
1.0	kg/d	11	10	9	8	8	7
1.5	kg/d	16	15	13	12	11	10
2.0	kg/d	21	19	18	16	14	13
2.5	kg/d	26	24	22	19	17	15

intake, and DIP required for the MCP produced and UIP required with the equations presented in Chapter 10 for level 1.

All five diets were then balanced for UIP and DIP for the 300-kg body weight category by changing both CP and DIP until both UIP and DIP were balanced. The DIP is balanced for all other weights for each diet because MCP yield stays constant at 13 percent of TDN. The UIP would be deficient at lighter weights because the animal tissue requirement for protein at the energy allowable ADG exceeds the MCP and UIP provided by the diet. At weights less than 300 kg, the UIP deficiency would increase with the high-energy diets compared to low-energy diets because their lower eNDF results in a lower rumen pH, which reduces microbial growth as described in Chapter 2. This deficiency can be overcome by increasing the CP and lowering the DIP, *but not to exceed that needed to balance DIP*, until the UIP requirement is met. In practical diets, this means substituting sources of DIP in the supplement with sources of UIP. At weights more than 300 kg, the diet UIP provided exceeds the MP required because of less protein in the ADG as the cattle increase in weight. The UIP excess can be decreased by lowering the CP while increasing the DIP as needed to keep the DIP balanced. The only practical way to accomplish this in the diet formula is to replace sources of UIP with sources of DIP until the CP and DIP reach a level provided by the grain and forage plus urea.

If actual data were available, predicted DMI would have been adjusted until it agreed with observed DMI, then the NE adjusters would have been used to adjust feed NE values until predicted and observed performance agree.

Ash (%)	Calcium (%)	Phosphorus (%)	Magnesium (%)	Potassium (%)	Sodium (%)	Sulfur (%)	Copper (mg/kg)	Iodine (mg/kg)	Iron (mg/kg)	Manganese (mg/kg)	Selenium (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Cobalt (mg/kg)	Molybdenum (mg/kg)
10.50	1.29	0.26	0.26	2.78	0.01	0.27	4.47	—	191	26.3	—	15.2	0.44	0.94
41	3079	3029	3029	3079	2750	401	2748	—	2749	2750	—	2748	6	2742
0.75	0.30	0.06	0.08	0.59	0.03	0.05	4.82	—	350	29.60	—	29.7	0.05	1.00
10.20	1.71	0.39	0.36	2.27	0.21	0.36	10.7	—	111	41	—	—	0.17	—
10	10	10	10	10	2	9	1	—	1	2	—	—	1	—
0.83	0.48	0.04	0.10	0.50	0.01	0.09	—	—	—	18	—	—	—	—
10.9	1.29	0.26	0.40	3.62	0.16	0.31	14.9	—	293	41	—	32	—	0.49
8	6	6	6	6	6	1	5	—	6	6	—	6	—	5
2.35	0.24	0.04	0.10	0.89	0.07	—	2.33	—	232	35.2	—	16.2	—	0.06
8.57	1.40	0.28	0.28	2.43	0.05	0.28	7.3	—	198	30.3	0.41	18.8	0.65	0.93
378	5771	5769	5319	5324	2813	654	2896	—	2904	2895	158	2904	38	1,354
0.92	0.32	0.05	0.07	0.53	0.06	0.07	6.5	—	319	27	0.31	12	0.34	1.30
9.2	1.63	0.21	0.34	2.56	0.15	0.30	12.7	0.17	227	36	0.55	30	—	0.29
36	98	91	93	96	7	1	93	1	97	95	86	97	—	9
1.61	0.39	0.05	0.10	0.61	0.13	—	3.0	—	137	25.5	0.39	7.6	—	0.24
8.5	1.37	0.22	0.35	1.56	0.12	0.28	17.7	0.16	225	28	—	31	—	0.39
41	9	13	7	8	5	3	3	1	4	4	—	3	—	2
1.48	0.28	0.05	0.11	0.51	0.05	0.03	5.64	—	182	7.7	—	14.1	—	0.05
7.8	1.79	0.24	0.27	1.56	0.07	0.27	9.9	0.13	155	42	—	26	—	0.23
16	6	7	6	7	3	1	6	1	8	6	—	4	—	4
1.07	0.14	0.08	0.11	0.75	0.07	—	4.2	—	28.1	8.6	—	2.8	—	0.28
10.3	1.53	0.27	0.29	2.48	0.09	0.25	11.4	—	396	39.4	0.33	35.8	0.31	3.0
41	53	56	31	34	31	14	25	—	27	27	4	24	5	17
0.75	0.25	0.03	0.04	0.19	0.05	0.02	3.1	—	66	5.0	0.35	9.3	0.04	0.70
9.9	1.38	0.25	0.29	2.46	0.08	0.21	10.4	0.13	309	30.7	0.31	21.4	—	0.19
12	5	5	5	6	4	4	2	1	3	2	2	2	—	1
0.93	0.07	0.03	0.04	0.14	0.01	0.02	1.7	—	54.7	2.5	0.32	1.4	—	—
10.6	1.51	0.25	0.32	2.61	0.11	0.24	9.3	0.16	441	34	0.36	21	—	0.33
21	25	28	12	11	10	8	6	1	7	7	2	5	—	3
0.61	0.13	0.02	0.04	0.29	0.05	0.03	1.74	3.74	0.40	7.5	0.04	—	—	—
9.5	1.32	0.31	0.26	2.85	0.02	0.28	12.1	—	252	32.4	0.18	19.5	0.65	1.27
26	8190	8190	8164	8164	4307	1251	4307	—	4307	4307	7	4307	2	4307
1.4	0.27	0.05	0.06	0.55	0.03	0.08	23.7	—	407	29.2	0.07	24.8	0.15	0.97
2.4	0.05	0.35	0.12	0.57	0.01	0.15	5.3	—	59.5	18.3	—	13.0	0.35	1.16
1153	1395	1906	1409	257	1408	63	1408	—	1408	1408	—	1408	16	196
0.18	0.03	0.05	0.02	0.18	0.01	0.02	2.8	—	56.3	8.5	—	5.03	0.28	0.55
8.3	0.52	0.29	0.19	2.57	0.12	0.24	7.7	—	375	44.8	0.15	24.5	0.72	1.56
2	187	187	82	82	82	32	82	—	82	82	32	82	6	82
0.32	0.16	0.07	0.05	0.83	0.32	0.07	2.9	—	602	28	0.12	13.7	0.41	0.94
7.5	0.30	0.07	0.23	2.36	0.14	0.17	5.40	—	200.	16	—	7	—	0.07
8	34	40	22	22	5	5	18	—	20	4	17	1	—	—
1.40	0.09	0.03	0.05	0.48	0.01	0.01	1.33	—	72.0	0.73	0.58	—	—	—
5.3	0.68	0.10	0.28	0.22	0.20	0.22	13.8	—	293	37.6	0.12	1.0	—	0.08
22	18	23	21	12	8	9	5	—	13	10	1	3	—	3
1.29	0.07	0.01	0.05	0.07	0.07	0.01	0.07	—	62.8	1.3	—	0.03	—	0.04
8.1	0.49	0.27	0.17	1.70	0.06	—	6.0	—	2.44	—	—	—	—	—
34	8	8	1	1	1	—	1	—	1	—	—	—	—	—
1.86	0.07	0.03												
76.6	38.3	8.0	0.26	0.18	0.13	1.30	0.08	0.21	9	—	290	—	—	.12
2	1	1	1	1	1	1	1	—	1	—	—	—	1	—
1.34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9.4	0.50	0.44	0.18	2.27	0.14	0.17	—	—	300	—	—	—	—	—
1	2	2	1	1	1	1	—	—	1	—	—	—	—	—
	0.09	0.04												
2.62	0.40	0.32	0.04	0.31	0.40	0.80	13.9	—	2281	11.7	—	33.0	—	0.53
15	39	39	39	39	39	27	39	—	39	39	—	39	—	39
2.4	0.74	0.37	0.06	0.22	0.26	0.39	6.4	—	469	6.4	—	13.9	—	1.03

TABLE 11-1 Means and Standard Deviations for the Composition Data of Feeds Commonly Used in Beef Cattle Diets —*Continued*

Entry No.	Feed Name/ Description	International Feed No.	Value as Determined at Maintenance Intake: TDN (%)	DE (Mcal/kg)	ME (Mcal/kg)	Net Energy Values for Growing-Cattle Mcal/kg: NE_m	NE_g	Dry Matter (%)	Crude Protein (%)	Ruminal Undegradability (%)	Ether Extract (%)	Fiber (%)	NDF (%)	ADF (%)
	BREWER'S GRAINS													
20	Dehydrated	5-02-141	66	2.39	2.39	1.51	0.91	90.20	29.2	50	10.8	7.8	48.7	31.2
		N	—	—	—	—	—	581	571	10	10	40	133	320
		SD	—	—	—	—	1.51	3.70	13	3.25	1.47	10.2	4.4	0.34
	BROOME, SMOOTH (*Bromus inermis*)													
21	Fresh, early vegetative	2-00-956	74	3.26	2.68	1.76	1.14	26.1	21.3	23	4.0	23.0	47.9	31.0
		N	—	—	—	—	—	8	6	—	3	3	4	5
		SD	—	—	—	—	—	6.39	2.47	—	0.35	0.53	3.63	3.16
22	Hay, sun-cured, mid-bloom	1-05-633	56	2.47	2.03	1.18	0.61	87.6	14.4	23	2.2	31.9	57.7	36.8
		N	—	—	—	—	—	2	4	—	3	3	1	3
		SD	—	—	—	—	—	—	3.22	—	0.16	3.21	—	4.58
23	Hay, sun-cured, mature	1-00-944	53	2.34	1.92	1.07	0.52	92.6	6.0	23	2.0	32.2	70.5	44.8
		N	—	—	—	—	—	6	2	—	1	2	1	1
		SD	—	—	—	—	—	0.54	0.28	—	—	2.82	—	—
	CANARY GRASS, REED (*Phalaris arundinacea*)													
24	Fresh	2-01-113	60	2.65	2.17	1.31	0.74	22.8	17.0	19	4.1	24.4	46.4	28.3
		N	—	—	—	—	—	4	3	—	2	2	1	1
		SD	—	—	—	—	—	4.89	3.65	—	0.49	3.39	—	—
25	Hay, sun-cured	1-01-104	55	2.43	1.99	1.14	0.58	89.3	10.2	22	3.0	33.9	70.5	36.6
		N	—	—	—	—	—	10	14	—	10	10	6	6
		SD	—	—	—	—	—	2.08	2.06	—	0.64	3.80	1.14	0.78
	CANOLA (*Brassica dapus*)													
26	Grain		70	3.09	2.53	1.63	1.03	92.2	30.7	20	7.4	12.5	55.4	22.1
		N	—	—	—	—	—	39	346	—	7	6	66	150
		SD	—	—	—	—	—	1.55	4.32	—	0.71	1.82	10.4	3.89
27	Meal, sun-cured	5-03-871	69	3.04	2.49	1.60	1.0	82.0	40.9	28	3.47	13.3	27.2	17.0
		N	—	—	—	—	—	154	129	10	105	120	24	19
		SD	—	—	—	—	—	1.63	4.32	17	1.13	1.95	4.81	3.36
	CITRUS (*Citrus* spp)													
28	Pomace without fines, dehydrated	4-01-237	82	3.62	2.96	2.00	1.35	91.1	6.7	30	3.7	12.8	23.0	23.0
		N	—	—	—	—	—	275	365	—	260	314	1	1
		SD	—	—	—	—	—	1.52	0.40	—	0.86	1.19	—	—
	CLOVER, LADINO (*Trifolium pratense*)													
29	Fresh, early vegetative	2-01-380	68	3.00	2.46	1.57	0.97	19.3	25.8	20	4.6	13.9	35	33
		N	—	—	—	—	—	4	3	—	3	3	1	1
		SD	—	—	—	—	—	1.44	1.21	—	1.87	0.40	—	—
30	Hay, sun-cured	1-01-378	60	2.65	2.17	1.31	0.74	89.1	22.4	22	2.7	20.8	36.0	32.0
		N	—	—	—	—	—	5	4	—	3	3	1	1
		SD	—	—	—	—	—	2.71	1.18	—	0.750	2.90	—	—
	CLOVER, RED (*Trifolium pratense*)													
31	Fresh, early bloom	2-01-428	69	3.04	2.49	1.6	1.00	19.6	20.8	20	5.0	23.2	40.0	31.0
		N	—	—	—	—	—	5	3	—	2	3	1	1
		SD	—	—	—	—	—	0.46	3.06	—	0.07	4.25	—	—
32	Fresh, full bloom	2-01-429	64	2.82	2.31	1.44	0.86	26.2	14.6	22	2.9	26.1	43.0	35.0
		N	—	—	—	—	—	4	3	—	2	2	1	1
		SD	—	—	—	—	—	3.00	0.46	—	1.55	5.02	—	—
33	Hay, sun-cured	1-01-415	55	2.43	1.99	1.14	0.58	88.4	15.0	24	2.8	30.7	46.9	36.0
		N	—	—	—	—	—	21	13	—	11	11	2	2
		SD	—	—	—	—	—	1.91	1.91	—	0.32	3.96	12.9	9.19
	CORN, DENT YELLOW (*Zea mays indentata*)													
34	Cobs, ground	1-28-234	50	2.21	1.81	0.97	0.42	90.1	2.8	50	0.6	35.4	87.0	39.5
		N	—	—	—	—	—	3	3	—	3	3	2	2
		SD	—	—	—	—	—	0.25	0.28	—	0.148	0.40	2.82	6.36
35	Distiller's grains with solubles dehydrated	5-28-236	90	3.88	3.18	2.18	1.50	90.3	30.4	52	10.7	6.9	46.0	21.3
		N	—	—	—	—	—	450	439	6	166	76	158	370
		SD	—	—	—	—	—	2.19	3.55	20	3.12	1.33	8.71	4.82
36	Gluten feed	5-28-243	80	3.53	2.89	1.94	1.30	90.0	23.8	22	3.91	7.5	36.2	12.7
		N	—	—	—	—	—	33	57	2	10	6	25	48
		SD	—	—	—	—	—	1.69	3.59	11	1.04	2.41	6.8	2.62
37	Gluten meal	5-28-242	89	3.92	3.22	2.20	1.52	88.2	66.3	59	2.56	5.5	8.9	7.9
		N	—	—	—	—	—	20	29	8	12	1	12	25
		SD	—	—	—	—	—	2.10	2.97	12	0.30	—	2.86	4.1
38	Grain, cracked	4-20-698	90	3.92	3.25	2.24	1.55	90.0	9.8	55	4.06	2.29	10.8	3.3
		N	—	—	—	—	—	3708	3579	14	134	127	2488	3481
		SD	—	—	—	—	—	0.88	1.06	19	0.64	0.90	3.57	1.83
39	Silage, well-eared	3-28-250	72	3.17	2.60	1.69	1.08	34.6	8.65	30	3.09	19.5	46.0	26.6
		N	—	—	—	—	—	32231	32364	4	314	54	27777	32315
		SD	—	—	—	—	—	7.25	1.28	6	0.81	4.44	6.50	4.19

Ash (%)	Calcium (%)	Phosphorus (%)	Magnesium (%)	Potassium (%)	Sodium (%)	Sulfur (%)	Copper (mg/kg)	Iodine (mg/kg)	Iron (mg/kg)	Manganese (mg/kg)	Selenium (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Cobalt (mg/kg)	Molybdenum (mg/kg)
4.18	0.29	0.70	0.27	0.58	0.15	0.40	11.3	—	221	44	—	82.0	—	3.16
100	267	267	267	267	267	90	267	—	267	267	—	267	—	267
0.18	0.10	0.05	0.18	0.23	0.08	6.4	—	104	12.7	—	13.7	—	0.74	—
10.4	0.55	0.45	0.32	3.16	—	0.20	—	—	—	—	—	21	—	—
6	2	2	—	1	—	1	—	—	—	—	—	1	—	—
0.45	0.10	0.18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10.9	0.29	0.28	0.10	1.99	0.01	—	25.0	—	91	40	—	30	—	0.58
3	1	1	1	1	1	—	1	—	1	1	—	1	—	1
1.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7.2	0.26	0.22	0.12	1.85	0.01	—	10.4	—	80	73	—	24	—	0.19
2	3	2	3	3	2	—	2	—	2	2	—	1	—	2
1.41	0.15	0.01	0.07	0.80	—	—	5.1	—	28.2	45.8	—	—	—	0.06
10.2	0.36	0.33	—	3.64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	2	2	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.85	0.06	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8.1	0.36	0.24	0.22	2.91	0.02	0.14	11.9	—	150	92	—	18	—	—
10	12	12	8	8	2	1	1	—	1	1	—	1	—	—
0.80	0.09	0.04	0.06	0.47	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4.0	0.30	0.59	0.21	0.16	0.03	0.42	12.4	—	253	47.7	—	88.3	—	4.2
11	126	126	126	126	126	17	126	—	126	126	—	126	—	126
0.03	0.12	0.09	0.04	0.17	0.10	0.06	5.2	—	370	9.8	—	16.8	—	0.85
7.10	0.70	1.20	0.57	1.37	0.03	1.17	7.95	—	211	55.8	—	71.5	—	1.79
31	102	133	27	38	25	14	14	—	25	27	—	27	—	22
0.38	0.10	0.11	0.11	0.20	0.07	0.04	0.94		88	12.6		6.0		0.35
6.6	1.88	0.13	0.17	0.77	0.08	0.08	6.14	—	360	7	—	15	—	0.19
335	20	16	9	14	5	6	6	—	11	8	—	6	—	3
0.80	0.42	0.02	0.02	0.17	0.02	0.04	0.42	—	335	0.7	—	2.6	—	0.10
11.9	1.27	0.35	0.42	2.40	0.12	0.16	—	—	—	—	—	20	—	—
3	1	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	1	—	—
1.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9.4	1.45	0.33	0.47	2.44	0.13	0.21	9.41	0.30	470	123	—	17	—	0.16
2	3	3	3	3	1	3	3	1	4	3	—	1	—	1
0.16	0.22	0.06	0.07	0.27	—	0.01	1.2	—	211	60.9	—	—	—	—
10.2	2.26	0.38	0.51	2.49	0.20	0.17	9.0	0.25	300	50	—	19	—	0.16
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	—	1	—	1
0.567	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7.8	1.01	0.27	0.51	1.96	0.20	0.17	10.0	0.25	300	47	—	16	—	0.12
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	—	1	—	1
0.70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7.5	1.38	0.24	0.38	1.81	0.18	0.16	11.0	0.25	238	108	—	17	—	0.16
9	11	11	7	11	2	2	4	1	8	4	—	3	—	1
0.88	0.22	0.06	0.13	0.58	0.04	0.01	12.6	—	121	46.5	—	17.1	—	—
1.8	0.12	0.04	0.07	0.89	0.08	0.47	7.00	—	230	6	0.08	5	—	0.13
1	2	2	2	2	1	2	1	—	1	1	1	1	—	1
—	0.01	0.01	0.01	0.02	—	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—
4.60	0.26	0.83	0.33	1.08	0.30	0.44	10.6	—	358	27.6	—	67.8	—	1.80
18	384	384	383	383	382	113	383	—	383	383	—	383	—	291
0.86	0.23	0.15	0.08	0.27	0.26	0.12	7.81	—	858	11.7	—	23.9	—	0.45
6.9	0.07	0.95	0.40	1.40	0.26	0.47	6.98	—	226	22.1	—	73.3	—	1.80
8	61	61	61	61	61	20	61	—	61	61	—	61	—	49
1.74	0.05	0.29	0.10	0.34	0.20	0.09	2.55	—	127	7.28	—	19.4	—	0.49
2.86	0.07	0.61	0.15	0.48	0.06	0.90	4.76	—	159	20.6	—	61.4	—	0.93
7	33	33	33	33	33	8	33	—	33	33	—	33	—	33
0.52	0.09	0.29	0.16	0.06	0.13	0.16	6.5	—	86.9	38.1	—	86.6	—	0.63
1.46	0.03	0.32	0.12	0.44	0.01	0.11	2.51	—	54.5	7.89	0.14	24.2	—	0.60
87	3516	3515	3437	3437	1749	382	1743	—	1738	1741	17	1743	—	1691
0.33	0.07	0.04	0.03	0.06	0.05	0.02	1.98	—	43.2	7.1	0.12	11.1	—	0.31
3.59	0.25	0.22	0.18	1.14	0.01	0.12	4.18	—	131	23.5	—	17.7	—	0.53
56	32195	32195	32125	32127	13313	3335	13316	—	13323	13316	—	13323	—	10815
0.78	0.09	0.04	0.03	0.26	0.03	0.03	5.14	—	340	25.1	—	16.1	—	0.58

TABLE 11-1 Means and Standard Deviations for the Composition Data of Feeds Commonly Used in Beef Cattle Diets —*Continued*

Entry No.	Feed Name/ Description	International Feed No.	Value as Determined at Maintenance Intake: TDN (%)	DE (Mcal/kg)	ME (Mcal/kg)	Net Energy Values for Growing-Cattle Mcal/kg: NE_m	NE_g	Dry Matter (%)	Crude Protein (%)	Ruminal Undegradability (%)	Ether Extract (%)	Fiber (%)	NDF (%)	ADF (%)
	COTTON (*Gossypium* spp.)													
40	Hulls	1-01-599	42	1.85	1.52	0.68	0.15	90.4	4.2	50	1.7	47.8	88.3	65.3
		N	—	—	—	—	—	22	28	—	26	27	2	4
		SD	—	—	—	—	—	1.34	0.74	—	1.19	3.07	2.41	4.31
41	Seed	5-01-614	90	3.97	3.25	2.24	1.55	89.4	24.4	27	17.5	25.6	51.6	41.8
		N	—	—	—	—	—	241	476	—	167	62	260	418
		SD	—	—	—	—	—	2.51	3.16	—	2.99	3.91	6.04	4.78
42	Seed, meal solv-extd	5-07-873	75	3.31	2.71	1.79	1.16	90.2	46.1	43	3.15	13.2	28.9	17.9
		N	—	—	—	—	—	138	117	21	91	53	25	35
		SD	—	—	—	—	—	1.57	3.17	11	1.72	1.64	7.05	3.27
	FATS													
43	Fat, animal, hydrolyzed	4-00-376	177	7.30	7.30	6.00	4.50	99.2	—	—	99.2	—	—	—
		N	—	—	—	—	—	5	—	—	3	—	—	—
		SD	—	—	—	—	—	0.28	—	—	1.04	—	—	—
44	Oil, vegetable	4-05-077	177	7.80	6.40	4.75	3.51	99.8	—	—	99.9	—	—	—
		N	—	—	—	—	—	5	—	—	6	—	—	—
		SD	—	—	—	—	—	0.29	—	—	0.11	—	—	—
	FEATHERMEAL													
45	Poultry	5-03-795	68	3.00	2.46	1.57	0.97	93.3	85.8	76	7.21	0.9	54.9	18.3
		N	—	—	—	—	—	19	20	2	9	1	11	20
		SD	—	—	—	—	—	2.16	7.41	6	2.28	—	7.56	9.29
	FESCUE, KENTUCKY 31 (*Festuca arundinacea*)													
46	Fresh	2-01-902	61	2.69	2.21	1.34	0.77	31.3	15.0	2.0	5.5	24.6	62.2	34.4
		N	—	—	—	—	—	5	51	—	18	18	8	8
		SD	—	—	—	—	—	3.76	2.02	—	0.75	2.39	8.36	4.39
47	Hay, sun-cured, mature	1-09-189	44	1.94	1.59	0.75	0.22	90.0	10.8	25	4.7	31.2	70.0	39.0
		N	—	—	—	—	—	1	13	—	13	10	1	1
		SD	—	—	—	—	—	—	3.58	—	0.84	2.36	—	—
	FISH, ANCHOVY (*Engraulis ringens*)													
48	Meal, mechanical extracted	5-01-985	79	3.48	2.86	1.91	1.27	92.0	71.2	60	4.6	1.1	—	—
		N	—	—	—	—	—	67	58	26	36	9	—	—
		SD	—	—	—	—	—	1.19	2.24	16	1.62	0.01	—	—
	FISH, MENHADEN (*Brevoortia tyrannus*)													
49	Meal, mechanical extracted	5-02-009	73	3.22	2.64	1.73	1.11	91.7	67.9	60	10.7	0.8	—	—
		N	—	—	—	—	—	79	91	26	96	38	—	—
		SD	—	—	—	—	—	1.18	2.65	16	1.84	0.20	—	—
	MEAT													
50	Meal, rendered	5-00-385	71	3.13	2.57	1.66	1.05	93.8	58.2	56	11.0	2.01	48.2	6.35
		N	—	—	—	—	—	65	53	7	20	9	22	43
		SD	—	—	—	—	—	4.38	7.94	21	2.15	0.92	11.8	3.39
	MOLASSES AND SYRUP													
51	Beet sugar molasses, >48% invert sugar, >79.5 degrees brix	4-00-668	75	3.31	2.71	1.79	1.16	77.9	8.5	20	0.2	0.0	0.0	0.0
		N	—	—	—	—	—	21	12	—	3	—	—	—
		SD	—	—	—	—	—	1.71	1.11	—	0.105	—	—	—
52	Sugarcane, molasses, >46% invert sugar, >79.5 degrees brix (black-strap)	4-04-696	72	3.17	2.60	1.70	1.08	74.3	5.8	20	0.2	0.5	—	0.4
		N	—	—	—	—	—	84	64	—	6	1	—	1
		SD	—	—	—	—	—	3.27	2.03	—	0.240	—	—	—
	OATS (*Avena sativa*)													
53	Grain	4-03-309	77	3.40	2.78	1.85	1.22	89.2	13.6	17	5.2	12.0	29.3	14.0
		N	—	—	—	—	—	97	229	4	125	108	54	111
		SD	—	—	—	—	—	1.80	1.59	3	0.97	1.40	7.03	4.45
54	Hay, sun-cured	1-03-280	53	2.34	1.91	1.08	0.52	90.7	9.5	20	2.4	32.0	63.0	38.4
		N	—	—	—	—	—	27	32	—	13	17	1	1
		SD	—	—	—	—	—	2.55	2.26	—	0.88	3.57	—	—
55	Hulls	1-03-281	35	1.54	1.27	0.41	0.00	92.4	4.1	25	1.5	33.2	72.2	39.6
		N	—	—	—	—	—	26	17	—	15	15	4	4
		SD	—	—	—	—	—	1.14	1.33	—	0.81	3.44	5.72	2.06
56	Silage	3-03-296	59	2.6	2.13	1.27	0.70	36.4	12.7	23	3.12	31.8	58.1	38.6
		N	—	—	—	—	—	635	639	—	5	2	143	631
		SD	—	—	—	—	—	10.8	3.04	—	0.32	4.62	6.71	4.55
57	Straw	1-03-283	50	2.21	1.81	0.97	0.42	92.2	4.4	30	2.2	40.4	74.4	47.9
		N	—	—	—	—	—	71	74	—	16	64	4	5
		SD	—	—	—	—	—	2.10	1.09	—	0.42	2.98	2.70	2.48

Ash (%)	Calcium (%)	Phosphorus (%)	Magnesium (%)	Potassium (%)	Sodium (%)	Sulfur (%)	Copper (mg/kg)	Iodine (mg/kg)	Iron (mg/kg)	Manganese (mg/kg)	Selenium (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Cobalt (mg/kg)	Molybdenum (mg/kg)
2.9	0.15	0.09	0.14	0.58	0.02	0.08	13.3	—	131	119	0.09	22	—	0.02
20	16	16	10	11	7	6	4	—	5	3	1	3	—	3
0.48	0.02	0.02	0.01	0.05	0.01	0.06	4.0	—	49.7	2.2	—	0.1	—	0.01
4.16	0.17	0.62	0.384	1.24	0.01	0.27	7.9	—	107	131	—	37.7	—	1.16
16	383	383	383	383	383	121	383	—	383	383	—	383	—	374
0.29	0.10	0.10	0.05	0.07	0.01	0.05	2.7	—	190	210	—	8.1	—	0.50
7.0	0.20	1.16	0.65	1.65	0.07	0.42	16.5	—	162	26.9	—	73.5	—	25.0
34	164	167	47	167	79	21	41	—	42	43	—	37	—	33
0.47	0.13	0.08	0.09	0.08	0.05	0.12	2.8	—	71	13.2	—	15.5	—	0.87
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3.50	1.19	0.68	0.06	0.20	0.24	1.85	14.2	—	702	12.0	—	105	—	0.56
5	18	18	18	18	18	15	18	—	18	18	—	18	—	18
0.40	1.69	0.84	0.04	0.09	0.13	0.45	5.24	—	482	45	—	9.0	—	0.29
7.2	0.51	0.37	0.27	2.30	—	0.18	—	—	—	—	—	22	—	—
2	25	27	24	24	—	24	—	—	—	—	—	1	—	—
3.60	0.10	0.08	0.05	0.48	—	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—
6.8	0.41	0.30	0.16	1.96	0.02	—	22.0	—	132	97	—	35	—	—
13	2	2	2	2	1	—	2	—	2	2	—	2	—	—
0.92	0.13	0.07	0.02	0.19	—	—	12.7	—	9.2	22.6	—	1.4	—	—
18.0	4.06	2.69	0.27	0.79	0.96	0.78	9.9	3.41	234	12	1.47	114	—	0.19
47	51	52	32	35	32	4	27	2	28	31	27	31	—	1
1.54	0.54	0.45	0.05	0.27	0.33	0.23	1.80	3.49	63.2	5.9	0.25	16.7	—	—
20.6	5.46	3.14	0.16	0.77	0.44	0.58	11.3	1.19	594	40	2.34	157	—	0.17
87	68	67	19	21	22	4	20	2	21	21	16	18	—	2
2.12	0.800	0.31	0.03	0.16	0.13	0.26	3.5	1.41	271	17.7	0.69	19.0	—	0.07
21.3	9.13	4.34	0.27	0.49	0.80	0.51	21.4	—	758	174	—	265	—	2.3
7	52	52	52	52	52	25	52	—	52	52	—	52	—	52
5.67	2.75	1.21	0.30	0.16	0.33	0.74	68.3	—	609	990	—	995	—	1.8
11.4	0.15	0.03	0.29	6.06	1.48	0.60	21.6	—	87	6	—	18	—	0.46
9	13	11	10	10	8	9	7	—	8	7	1	5	—	—
1.34	0.054	0.01	0.01	0.29	0.08	0.05	1.3	—	25.2	0.3	—	0.032	—	—
13.3	1.00	0.10	0.42	4.01	0.22	0.47	65.7	2.10	263	59	—	21	—	1.59
52	32	31	12	16	9	9	8	1	11	11	—	5	—	4
2.34	0.182	0.02	0.10	0.88	0.02	0.02	26.0	—	34.4	6.4	—	6.0	—	0.75
3.3	0.01	0.41	0.16	0.51	0.02	0.21	8.6	—	94.1	40.3	0.24	40.8	0.06	1.70
94	168	175	152	151	49	22	131	—	132	141	32	144	5	104
0.50	0.03	0.05	0.02	0.09	0.02	0.02	4.1	—	50.0	15.3	0.15	9.5	0.02	0.76
7.9	0.32	0.25	0.29	1.49	0.18	0.23	4.8	—	406	99	—	45	—	0.07
11	7	26	23	11	16	3	4	—	5	4	—	1	—	3
0.85	0.09	0.06	0.27	0.65	0.06	0.06	1.5	—	160	48.2	—	—	—	0.01
6.6	0.16	0.15	0.13	0.59	0.07	0.10	7.1	—	138	27	0.43	29	—	—
12	9	9	6	8	6	2	4	—	3	5	1	3	—	—
0.69	0.04	0.05	0.03	0.05	0.08	0.06	3.2	—	48.4	9.68	—	8.0	—	—
10.1	0.58	0.31	0.21	2.88	0.09	0.24	8.0	—	367	66.3	0.07	29.8	—	1.89
2	627	627	562	562	562	67	562	—	562	562	19	562	—	469
1.20	0.21	0.07	0.06	0.85	0.13	0.06	4.5	—	388	33.5	0.06	8.9	—	0.94
7.8	0.23	0.06	0.17	2.53	0.42	0.22	10.3	—	164	31	—	6	—	—
14	58	66	18	16	5	6	4	—	15	5	—	11	—	—
1.85	0.09	0.04	0.04	0.25	0.07	0.01	0.54	—	47.1	11.8	—	1.1	—	—

TABLE 11-1 Means and Standard Deviations for the Composition Data of Feeds Commonly Used in Beef Cattle Diets —*Continued*

Entry No.	Feed Name/ Description	International Feed No.	Value as Determined at Maintenance Intake: TDN (%)	DE (Mcal/kg)	ME (Mcal/kg)	Net Energy Values for Growing-Cattle Meal/kg: NE_m	NE_g	Dry Matter (%)	Crude Protein (%)	Ruminal Undegradability (%)	Ether Extract (%)	Fiber (%)	NDF (%)	ADF (%)
	ORCHARD GRASS (*Dactylis glomerata*)													
58	Fresh, early bloom	2-03-442	68	3.00	2.46	1.57	0.97	23.5	12.8	20	3.70	32.00	58.1	30.70
		N	—	—	—	—	—	8	7	—	5	5	3	2
		SD	—	—	—	—	—	3.87	2.37	—	0.80	2.93	8.31	1.98
59	Fresh, mid-bloom	2-03-443	57	2.51	2.06	1.21	0.64	27.4	10.1	22	3.5	33.5	57.6	35.6
		N	—	—	—	—	—	3	4	—	2	2	1	1
		SD	—	—	—	—	—	5.36	3.89	—	0.36	2.25	—	—
60	Hay, sun-cured, early bloom	1-03-425	65	2.87	2.35	1.47	0.88	89.1	12.8	24	2.9	33.9	59.6	33.8
		N	—	—	—	—	—	7	9	—	6	5	4	4
		SD	—	—	—	—	—	3.30	3.51	—	0.82	1.72	5.28	1.25
61	Hay, sun-cured, late bloom	1-03-428	54	2.38	1.95	1.11	0.55	90.6	8.4	24	3.4	37.1	65.0	37.8
		N	—	—	—	—	—	7	1	—	1	1	3	3
		SD	—	—	—	—	—	1.51	—	—	—	—	2.77	0.20
	PEANUT (*Arachis hypogaea*)													
62	Seeds without coats, meal solvent extracted	5-03-650	77	3.40	2.78	1.85	1.22	92.4	52.9	30	2.30	8.40	—	—
		N	—	—	—	—	—	16	12	2	10	10	—	—
		SD	—	—	—	—	—	1.82	3.93	0.06	1.00	1.19	—	—
	PRAIRIE PLANTS, MIDWEST													
63	Hay, sun-cured	1-03-191	51	2.25	1.84	1.00	0.45	91.0	6.4	25	2.3	33.7	62.3	41.7
		N	—	—	—	—	—	8	5	—	5	5	1	1
		SD	—	—	—	—	—	1.42	1.63	—	0.65	1.94	—	—
	RICE (*Oryza sativa*)													
64	Bran with germs	4-03-928	70	3.09	2.53	1.63	1.05	90.5	14.4	25	15.0	12.9	33.00	20.0
		N	—	—	—	—	—	37	34	—	28	25	8	1
		SD	—	—	—	—	—	0.74	1.42	—	2.14	1.46	6.57	—
65	Hulls	1-08-075	12	0.53	0.43	0.00	0.00	91.9	3.1	35	1.1	42.7	82.40	68.7
		N	—	—	—	—	—	21	22	—	18	18	3	2
		SD	—	—	—	—	—	1.45	1.10	—	1.07	3.59	4.95	1.54
	RYE GRASS, ITALIAN (*Lolium multiflorum*)													
66	Fresh	2-04-073	84	3.70	3.04	2.06	1.40	22.6	17.9	20	4.1	20.9	61.00	38.0
		N	—	—	—	—	—	5	2	—	2	2	1	1
		SD	—	—	—	—	—	2.35	2.26	—	0.141	1.27	—	—
	SORGHUM (*Sorghum bicolor*)													
67	Grain	4-04-383	82	3.62	2.96	2.00	1.35	90.0	12.6	57	3.03	2.78	16.10	6.38
		N	—	—	—	—	—	226	230	8	68	45	7	10
		SD	—	—	—	—	—	2.29	1.99	8	0.68	0.95	3.36	0.56
68	Silage	3-04-323	60	2.65	2.17	1.31	0.74	30	9.39	29	2.64	26.90	60.80	35.8
		N	—	—	—	—	—	588	584	—	32	16	282	581
		SD	—	—	—	—	—	13.5	2.83	—	0.34	3.74	7.59	5.65
	SOYBEAN (*Glycine max*)													
69	Seed coats	1-04-560	77	3.40	2.98	1.86	1.22	90.3	12.2	25	2.10	39.9	66.3	49.0
		N	—	—	—	—	—	28	27	—	17	23	6	6
		SD	—	—	—	—	—	3.43	2.51	—	0.56	4.79	2.03	2.85
70	Meal	—	84	3.7	3.04	2.06	1.4	90.9	51.8	34	1.67	5.37	10.3	7.0
		N	—	—	—	—	—	807	786	45	204	192	150	283
		SD	—	—	—	—	—	1.88	3.45	12	0.97	0.90	5.80	3.33
71	Seeds, meal solvent extracted, 44% protein	5-20-637	84	3.70	3.04	2.06	1.40	89.1	49.90	34	1.6	7.0	14.9	10.0
		N	—	—	—	—	—	119	111	—	87	92	2	3
		SD	—	—	—	—	—	1.22	1.25	—	0.67	0.95	1.27	0.057
72	Seeds without hulls, meal solvent extd	5-04-612	87	3.84	3.15	2.15	1.48	89.9	54.00	34	1.1	3.8	7.79	6.10
		N	—	—	—	—	—	78	75	—	41	55	1	3
		SD	—	—	—	—	—	1.72	1.72	—	0.38	0.55	—	0.75
73	Seed whole	5-04-610	94	4.14	3.40	2.35	1.64	86.4	40.3	25	18.2	10.1	14.9	11.1
		N	—	—	—	—	—	5	241	—	50	35	55	179
		SD	—	—	—	—	—	2.07	3.84	—	2.64	4.32	6.22	5.71
	SUNFLOWER, COMMON (*Helianthus annuus*)													
74	Seeds without hulls, meal solvent extd	5-04-739	65	2.87	2.35	1.47	0.88	92.5	26	28	2.9	12.7	40.0	30.0
		N	—	—	—	—	—	21	22	9	19	20	1	1
		SD	—	—	—	—	—	1.73	3.96	5	0.63	2.18	—	—
	TIMOTHY (*Phleum pratense*)													
75	Fresh, late vegetative	2-04-903	66	2.91	2.39	1.51	0.91	26.7	12.2	20	3.8	32.1	55.7	29.0
		N	—	—	—	—	—	5	8	—	2	2	6	1
		SD	—	—	—	—	—	1.86	3.87	—	0.25	1.93	3.65	
76	Hay, sun-cured, early bloom	1-04-882	59	2.6	2.13	1.28	0.71	89.1	10.8	22	2.8	33.6	61.4	35.2
		N	—	—	—	—	—	13	12	—	10	8	5	5
		SD	—	—	—	—	—	1.72	3.35	—	0.54	1.36	1.22	2.38

Ash (%)	Calcium (%)	Phosphorus (%)	Magnesium (%)	Potassium (%)	Sodium (%)	Sulfur (%)	Copper (mg/kg)	Iodine (mg/kg)	Iron (mg/kg)	Manganese (mg/kg)	Selenium (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Cobalt (mg/kg)	Molybdenum (mg/kg)
8.1	0.25	0.39	0.31	3.38	0.04	0.26	33.1	—	785	104	—	—	—	—
6	1	1	1	1	1	1	1	—	2	1	—	—	—	—
1.68	—	—	—	—	—	—	—	—	21.2	—	—	—	—	—
7.5	0.23	0.17	0.33	2.09	0.26	—	50.1	—	68	136	—	25	—	0.10
4	1	2	1	1	1	—	1	—	1	1	—	1	—	1
0.53	—	0.08	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8.5	0.27	0.34	0.11	2.91	0.01	0.26	19.0	—	93	157	—	40	—	0.43
6	1	1	1	1	1	1	1	—	1	1	—	1	—	1
1.60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10.1	0.26	0.30	0.11	2.67	0.01	—	20.0	20.0	84	167	0.03	38	—	0.30
3	1	1	1	1	1	—	1	—	1	1	1	1	—	1
3.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6.3	0.32	0.68	0.17	1.28	0.03	0.33	16.0	0.07	155	29	—	36	—	0.12
7	2	3	1	2	1	2	1	1	1	1	—	1	—	1
1.02	0.247	0.05	—	0.03	—	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—
8.0	0.35	0.14	0.26	1.0	—	—	—	—	88	—	—	34	—	—
4	3	3	2	1	—	—	—	—	1	—	—	1	—	—
1.07	0.01	0.06	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11.5	0.10	1.73	0.97	1.89	0.03	0.20	12.2	—	229	396	0.44	33	—	1.53
27	21	21	13	18	6	9	6	—	9	8	1	7	—	2
2.16	0.06	0.40	0.24	0.22	0.03	0.01	3.80	—	80.6	125	—	23.8	—	0.25
20.6	0.12	0.07	0.37	0.65	0.02	0.08	3.4	—	99	320	0.15	24	—	—
12	15	14	3	8	1	3	1	—	1	4	1	1	—	—
1.51	0.06	0.02	0.40	0.62	—	0.03	—	—	—	27.1	—	—	—	—
17.4	0.65	0.41	0.35	2.00	0.01	0.10	—	—	1000	—	—	—	—	—
2	2	2	—	1	1	1	—	—	1	—	—	—	—	—
2.33	0.01	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.87	0.04	0.34	0.17	0.44	0.01	0.14	4.7	—	80.8	15.4	0.46	0.99	—	—
62	40	39	37	28	27	4	26	—	36	34	3	13	—	—
0.43	0.04	0.07	0.04	0.11	0.01	0.03	1.9	—	45.1	4.6	0.58	0.64	—	—
5.9	0.49	0.22	0.28	1.72	0.01	0.12	9.2	—	383	68.5	0.03	1.31	—	—
1	572	572	567	573	567	85	567	—	567	567	2	567	—	—
—	0.26	0.07	0.19	0.65	0.02	0.03	5.7	—	88.4	60.0	0.01	0.75	—	—
4.9	0.53	0.18	0.22	129	0.03	0.11	17.8	—	409	10	0.14	48	0.12	—
10	10	8	2	5	4	2	1	—	2	3	1	2	1	—
0.48	0.134	0.07	0.07	0.26	0.02	0.03	—	—	120	5.0	—	34	—	—
6.9	0.46	0.73	0.32	2.42	0.07	0.46	19.1	—	277	48.3	0.46	67.9	—	6.67
121	348	352	276	281	268	99	271	—	267	270	12	270	—	250
0.58	0.80	0.20	0.06	0.20	0.31	0.06	17.8	—	159	48.6	0.25	57.3	—	2.85
7.2	0.40	0.71	0.31	2.22	0.04	0.46	22.4	—	185	35	0.51	57	—	0.12
66	26	29	19	21	12	6	15	—	15	15	10	13	—	1
0.58	0.11	0.04	0.03	0.24	0.03	0.04	7.9	—	39.0	3.5	0.28	7.5	—	—
6.7	0.29	0.71	0.33	2.36	0.01	0.48	22.5	0.12	145	41	0.22	63	—	0.12
34	19	19	6	9	4	2	6	1	2	5	2	7	—	1
0.68	0.05	0.05	0.02	0.15	0.01	0.01	5.0	—	35.3	8.66	0.14	7.7	—	—
4.56	0.27	0.65	0.27	2.01	0.04	0.35	14.6	—	182	343	—	59.0	—	3.98
1	156	156	156	156	156	17	156	—	156	156	—	156	—	156
—	0.20	0.08	0.03	0.12	0.31	0.04	4.2	—	197	15.6	—	34.3	—	3.42
8.1	0.45	1.02	0.70	1.27	0.03	0.33	4.0	—	33	20	2.30	105	—	—
14	11	11	7	7	2	2	1	—	1	2	1	1	—	—
0.34	0.08	0.23	0.12	0.33	0.02	0.14	—	—	—	6.0	—	—	—	—
7.5	0.40	0.26	0.16	2.73	0.11	0.13	8.9	—	132	127	—	36	—	0.15
8	4	4	4	4	4	2	2	—	4	2	—	2	—	2
0.97	0.12	0.08	0.04	0.40	0.09	—	2.5	—	78.2	32.7	—	7.1	—	0.082
5.7	0.51	0.29	0.13	2.41	0.01	0.13	11	—	203	103	—	62	—	—
9	3	3	2	2	1	1	1	—	2	1	—	1	—	—
0.92	0.08	0.07	0.21	2.10	—	—	—	—	4.2	—	—	—	—	—

TABLE 11-1 Means and Standard Deviations for the Composition Data of Feeds Commonly Used in Beef Cattle Diets —*Continued*

Entry No.	Feed Name/ Description	International Feed No.	Value as Determined at Maintenance Intake: TDN (%)	DE (Mcal/kg)	ME (Mcal/kg)	Net Energy Values for Growing-Cattle Mcal/kg: NE_m	NE_g	Dry Matter (%)	Crude Protein (%)	Ruminal Undegradability (%)	Ether Extract (%)	Fiber (%)	NDF (%)	ADF (%)
77	Hay, sun-cured, full bloom	1-04-884	56	2.47	2.03	1.18	0.61	89.4	8.1	25	2.9	35.2	64.2	37.5
		N	—	—	—	—	—	8	15	—	7	7	8	8
		SD	—	—	—	—	—	2.43	1.03	—	0.73	1.20	2.19	2.27
	TREFOIL, BIRDSFOOT (*Lotus corniculatus*)													
78	Fresh	2-20-786	66	2.91	2.39	1.51	0.91	19.3	20.6	20	4.0	21.2	46.7	—
		N	—	—	—	—	—	9	12	—	3	3	11	—
		SD	—	—	—	—	—	4.25	3.97	—	1.30	7.74	11.7	—
79	Hay, sun-cured	1-05-044	59	2.60	2.13	1.25	0.71	90.6	15.9	23	2.1	32.3	47.5	36.0
		N	—	—	—	—	—	9	8	—	7	7	1	1
		SD	—	—	—	—	—	1.46	2.31	—	0.52	5.32	—	—
	WHEAT (*Triticum aesticum*)													
80	Bran	4-05-190	70.0	3.09	2.53	1.63	1.03	89.0	17.4	20	4.3	11.3	42.8	14.0
		N	—	—	—	—	—	88	64	4	56	54	6	6
		SD	—	—	—	—	—	1.23	1.13	10	0.80	1.28	8.68	1.46
81	Flour by-product, less than 9.5% fiber	4-05-205	69	3.04	2.50	1.6	1.00	89.3	18.7	21	4.7	8.5	35.9	11.7
		N	—	—	—	—	—	96	59	3	94	66	26	38
		SD	—	—	—	—	—	1.49	1.15	2	0.85	1.00	6.81	0.93
82	Fresh, early vegetative	2-05-176	73	3.22	2.64	1.73	1.11	22.2	27.4	20	4.4	17.4	46.2	28.4
		N	—	—	—	—	—	2	2	—	1	1	1	1
		SD	—	—	—	—	—	0.99	1.62	—	—	—	—	—
83	Grain	4-05-211	88	3.88	3.18	2.18	1.5	90.2	14.2	23	2.34	3.66	11.8	4.17
		N	—	—	—	—	—	136	100	5	34	25	14	43
		SD	—	—	—	—	—	1.97	1.96	6	1.21	1.14	2.02	3.58
84	Hay, sun-cured	1-05-172	58	2.56	2.10	1.24	0.68	88.7	8.7	23	2.2	29.0	68.0	41.0
		N	—	—	—	—	—	12	8	—	6	9	1	1
		SD	—	—	—	—	—	3.09	2.22	—	0.90	2.01	—	—
85	Silage	3-05-184	57	2.51	2.06	1.21	0.64	34.2	12.5	20	6.09	26.8	60.7	39.2
		N	—	—	—	—	—	181	181	—	2	3	82	181
		SD	—	—	—	—	—	11.1	2.96	—	2.1	3.80	7.62	5.28
86	Straw	1-05-173	41	1.81	1.48	0.64	0.11	91.3	3.5	40	2.0	41.7	78.9	55.0
		N	—	—	—	—	—	37	68	—	15	25	14	16
		SD	—	—	—	—	—	3.12	1.29	—	1.10	5.81	4.82	4.95

NOTE: Undegradability values that do not have N (number) or SD (standard deviation) entries are based on in situ data and are estimates only. The energy values (TDN, DE, etc.) are based on book values and were not adjusted for the mean composition data. The energy values can be influenced by all the factors that affect the other nutrients as well as amount of intake, processing technique, grain:forage ratio, and thermal stress. For most feeds there is no data base providing means and SD for the energy values. Some trace minerals and the fat-soluble vitamins are not listed in the table because their values were not routinely determined by the laboratories contributing data to this summary. Int. Ref. #, international reference number.

not reviewed in this section, but the effects of the most commonly used treatments affecting nutritive value are discussed. However, many of the references useful in providing further insight on methods and details of methods are available in other reviews (e.g., Beeson and Perry, 1982; Berger et al., 1994). Although, processing is used across a wide array of feedstuffs, it is not an issue with many for which uniform methodology applies. This presentation is confined to roughages and grains; methods applied to roughages and grains often vary and/or unprocessed feed is an alternative.

Roughages

The nutritive value of roughages is often improved through the use of physical and, occasionally, chemical or biological treatment methods. Responses to physical processing such as steaming, chopping, wafering, and grinding (with or without pelleting) are usually in inverse proportion to the quality of the starting forage (Minson, 1963). Coarse chopping, with or without wafering, usually has only a slight influence on nutritive value, although intake might be enhanced through indirect effects such as ease of handling and presentation to the animals. Alternatively, fine grinding, with or without pelleting, can have a major influence, particularly on intake but also on available energy. Potential benefit depends on appropriate supplementation, especially with protein (Campling and Freer, 1966; Weston, 1967). Increased intake usually is observed when mean particle size is reduced to 5 mm, and intake is increased in proportion to further reduction in size with maximal intake achieved when mean particle size is 1 mm

Ash (%)	Calcium (%)	Phosphorus (%)	Magnesium (%)	Potassium (%)	Sodium (%)	Sulfur (%)	Copper (mg/kg)	Iodine (mg/kg)	Iron (mg/kg)	Manganese (mg/kg)	Selenium (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Cobalt (mg/kg)	Molybdenum (mg/kg)
5.2	0.43	0.20	0.09	1.99	0.07	0.14	29.0	—	140	93	—	54	—	—
5	3	4	3	4	3	3	2	—	2	2	—	1	—	—
0.813	0.09	0.01	0.04	0.51	0.09	0.01	33.9	—	24.9	16.9	—	—	—	—
11.2	1.74	0.26	0.40	3.26	0.11	0.25	12.8	—	176	83	—	31	—	0.49
7	8	8	6	8	6	1	5	—	5	5	—	5	—	6
3.25	0.40	0.05	0.12	1.66	0.05	—	3.4	—	125	13.6	—	7	—	0.21
7.4	1.70	0.23	0.51	1.92	0.07	0.25	9.26	—	227	29	—	77	—	0.11
5	3	3	3	4	1	1	1	—	3	1	—	1	—	1
0.79	0.09	0.01	0.20	0.25	—	—	—	—	149	—	—	—	—	—
6.6	0.14	1.27	0.63	1.37	0.06	0.24	14.2	—	163	134	0.57	110	108	—
37	30	29	17	17	13	8	8	—	10	8	5	6	3	—
0.60	0.03	0.21	0.07	0.10	0.02	0.02	1.8	—	56	14	0.25	36	0.03	—
5.0	0.17	1.01	0.40	1.81	0.02	0.19	12.6	—	170	124	—	102	—	2.1
30	69	70	55	56	44	18	50	—	51	49	—	45	—	39
0.99	0.15	0.13	0.09	0.14	0.06	0.04	3.13	—	118	23	—	35	—	37
13.3	0.42	0.40	0.21	3.50	0.18	0.22	—	—	100	—	—	—	—	—
1	1	1	1	1	2	2	—	—	1	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	0.14	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—
2.01	0.05	0.44	0.13	0.40	0.01	0.14	6.48	—	45.1	36.6	0.05	38.1	—	0.12
25	90	91	16	16	2	15	16	—	16	16	1	15	—	1
0.26	0.03	0.14	0.01	0.02	0.01	0.01	1.3	—	5.6	2.4	—	2.8	—	—
7.9	0.15	0.20	0.12	0.99	0.21	0.22	—	—	200	—	—	—	—	—
4	8	8	1	5	2	2	—	—	1	—	—	—	—	—
2.05	0.02	0.08	—	0.44	0.1	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—
7.5	0.44	0.29	0.17	2.24	0.04	0.21	9.0	—	386	79.5	—	28.0	—	1.61
1	177	177	169	169	168	36	159	—	169	169	—	169	—	169
—	0.32	0.09	0.15	0.73	0.10	0.06	6.0	—	322	47	—	11.0	—	1.06
7.7	0.17	0.05	0.12	1.40	0.14	0.19	3.6	—	157	41	—	6	—	0.05
46	51	48	37	39	5	5	34	—	35	34	—	30	—	2
2.61	0.07	0.02	0.02	0.70	0.01	0.01	1.2	—	39.5	13.7	—	0.77	—	0.01

or less. Pelleting is an improvement over grinding because it produces less dust. The average effect of pelleting and grinding was an 11 percent increase in intake for cattle, with a greater response from young compared to mature animals (Greenhalgh and Reid, 1973). In a summary of research with bulls, Sundstol (1991) reported that grinding by itself and grinding with pelleting enhanced intake of straw by 7 and 37 percent, respectively. The above summary applies mostly to hays and straws. Silages are rarely processed as finely as dry forages although the amount of chopping and particle size reduction that occurs during harvesting can vary significantly. From a summary of available literature on corn (Wilkinson, 1978) and grass silage (McDonald et al., 1991) and within the range of particle lengths commonly observed for silage (mean length, 5 to 15 mm), there is a negative relationship of length to intake; however, the intake decrease is generally less than 10 percent.

Digestibility of roughages is decreased by grinding, with or without pelleting, and the decrease is usually in proportion to the intake increase (Blaxter et al., 1956). For 21 studies, Minson (1963) found an average 3.3 percent decrease in dry matter digestibility. Thomson and Beever (1980) reported greater decreases for ground grasses (0 to 15 percent) than for ground legumes (3 to 6 percent). Digestibility decreases are usually attributed to a faster rate of passage of food, with more digestion occurring in the hindgut. In contrast, pelleting and grinding roughages results in lowering heat increment so that the net dietary energy from these roughages is often higher than for the parent product (Osbourne et al., 1976).

Chemical alkali is used to upgrade roughages; it hydro-

APPENDIX TABLE 1 Feed Library—Energy and Crude Protein Values, Plant Cell Wall Constituents, Digestibility Rates, Amino Acids, Minerals, and Vitamins

Feed No.	Common Name	Int. Ref. No.	Conc. %DM	Forage %DM	DM %AF	NDF %DM	Lignin %NDF	eNDF %NDF	TDN %DM	ME Mcal/kg	NEm Mcal/kg	NEg Mcal/kg
101	Bahiagrass, 30% Dry Matter	2-00-464	0	100	30.0	68.00	10.29	41	54.0	1.95	1.11	0.55
102	Bahiagrass, Hay	1-00-462	0	100	90.0	72.00	11.11	98	51.0	1.84	1.00	0.45
103	Bermudagrass, Late Vegetative	1-09-210	0	100	91.0	76.60	8.57	98	49.0	1.77	0.93	0.39
104	Brome Hay, Pre-bloom	1-00-887	0	100	88.0	55.00	7.69	98	60.0	2.17	1.31	0.74
105	Brome Hay, Mid Bloom	1-05-633	0	100	88.0	57.70	6.06	98	56.0	2.02	1.18	0.61
106	Brome Hay, Late bloom	1-00-888	0	100	91.0	68.00	11.11	98	55.0	1.99	1.14	0.58
107	Brome Hay, Mature	1-00-944	0	100	92.0	70.50	11.27	98	53.0	1.92	1.07	0.52
108	Fescue, Meadow Hay	1-01-912	0	100	88.0	65.00	10.77	98	56.0	2.02	1.18	0.61
109	Fescue Alta, Hay	1-05-684	0	100	89.0	70.00	9.29	98	55.0	1.99	1.14	0.58
110	Fescue K31, Hay	1-09-187	0	100	91.0	62.20	6.35	98	61.0	2.21	1.34	0.77
111	Fescue K31, Hay, Full bloom	1-09-188	0	100	91.0	67.00	7.46	98	58.0	2.10	1.24	0.68
112	Fescue K31, Mature	1-09-189	0	100	91.0	70.00	10.00	98	44.0	1.59	0.75	0.22
113	Napiergrass, Fresh 30 day DM	2-03-158	0	100	20.0	70.00	14.29	41	55.0	1.99	1.14	0.58
114	Napiergrass, Fresh 60 day DM	2-03-162	0	100	23.0	75.00	18.67	41	53.0	1.92	1.07	0.52
115	Orchardgrass, Hay, Early bloom	1-03-425	0	100	89.0	59.60	7.70	98	65.0	2.35	1.47	0.88
116	Orchardgrass, Hay, Late bloom	1-03-428	0	100	90.6	65.00	11.40	98	54.0	1.95	1.11	0.55
117	Pangolagrass, Fresh	2-03-493	0	100	21.0	70.00	11.40	41	55.0	1.99	1.14	0.58
118	Red Top, Fresh	2-03-897	0	100	29.0	64.00	12.50	41	63.0	2.28	1.41	0.83
119	Reed Canarygrass, Hay	1-00-104	0	100	89.0	64.00	6.25	98	55.0	1.99	1.14	0.58
120	Ryegrass, Hay	1-04-077	0	100	88.0	41.00	4.88	98	64.0	2.31	1.44	0.86
121	Sorghum Sudan, Hay	1-04-480	0	100	91.0	66.00	6.06	98	56.1	2.03	1.18	0.62
122	Sorghum-Sudan, Pasture	2-04-484	0	100	18.0	55.00	5.45	41	65.0	2.35	1.47	0.88
123	Sorghum-Sudan, Silage	3-04-499	0	100	28.0	68.00	7.04	41	55.0	1.99	1.14	0.58
124	Timothy Hay, Late Vegetative	1-04-881	0	100	89.0	55.00	5.45	98	62.0	2.24	1.38	0.80
125	Timothy Hay, Early bloom	1-04-882	0	100	89.0	61.40	6.56	98	59.0	2.13	1.28	0.71
126	Timothy Hay, Mid bloom	1-04-883	0	100	89.0	63.70	7.46	98	57.0	2.06	1.21	0.64
127	Timothy Hay, Full bloom	1-04-884	0	100	89.0	64.20	8.82	98	56.0	2.02	1.18	0.61
128	Timothy Hay, Seed stage	1-04-888	0	100	89.0	72.00	12.50	98	47.0	1.70	0.86	0.32
129	Wheatgrass, crest. hay	1-05-351	0	100	92.0	65.00	9.23	98	53.0	1.92	1.07	0.52
135	Grass Pasture, Spring	2-00-956	0	100	23.0	47.90	6.00	41	74.0	2.68	1.76	1.14
136	Grass Pasture, Summer		0	100	25.0	55.00	7.00	41	67.0	2.42	1.54	0.94
137	Grass Pasture, Fall		0	100	24.0	67.00	6.50	41	53.0	1.92	1.07	0.52
138	Mix Pasture, Spring		0	100	21.0	41.50	7.00	41	79.0	2.86	1.91	1.27
139	Mix Pasture, Summer		0	100	22.0	46.50	7.80	41	67.0	2.42	1.54	0.94
140	Range, June Diet		0	100	20.0	65.60	5.00	41	64.9	2.35	1.47	0.88
141	Range, July Diet		0	100	20.0	67.70	5.50	41	62.3	2.25	1.39	0.81
142	Range, Aug. Diet		0	100	20.0	63.70	8.00	41	59.4	2.15	1.29	0.72
143	Range, Sep. Diet		0	100	20.0	66.60	9.00	41	57.3	2.07	1.22	0.65
144	Range, Winter		0	100	80.0	66.10	11.00	41	50.5	1.83	0.99	0.44
145	Meadow, Spring		0	100	15.0	53.00	8.00	41	44.8	1.62	0.78	0.25
146	Meadow, Fall		0	100	20.0	52.00	8.00	41	51.9	1.88	1.03	0.48
147	Meadow, Hay		0	100	90.0	67.60	5.00	98	60.0	2.17	1.31	0.74
148	Prairie, Hay	1-03-191	0	100	91.0	72.70	6.00	98	48.0	1.74	0.90	0.35
201	Alfalfa Hay, Early Vegetative-S	1-00-54-S	0	100	91.0	33.00	18.18	92	66.0	2.39	1.51	0.91
202	Alfalfa Hay, Early Vegetative-N	1-00-N	0	100	91.0	36.00	14.72	92	67.0	2.42	1.54	0.94
203	Alfalfa Hay, Late Vegetative-S	1-00-059-S	0	100	91.0	37.00	18.92	92	63.0	2.28	1.41	0.83
204	Alfalfa Hay, Late Vegetative-N	1-00-N	0	100	91.0	39.00	16.67	92	64.0	2.31	1.44	0.86
205	Alfalfa Hay, Early Bloom-S	1-00-059-S	0	100	91.0	39.30	20.00	92	60.0	2.17	1.31	0.74
206	Alfalfa Hay, Early Bloom-N	1-00-N	0	100	91.0	42.00	16.90	92	62.0	2.24	1.38	0.80
207	Alfalfa Hay, Mid Bloom-S	1-00-063-S	0	100	91.0	47.10	22.73	92	58.0	2.10	1.24	0.68
208	Alfalfa Hay, Mid Bloom-N	1-00-N	0	100	91.0	49.00	18.91	92	60.0	2.17	1.31	0.74
209	Alfalfa Hay, Full Bloom-S	1-00-068-S	0	100	91.0	48.80	22.92	92	55.0	1.99	1.14	0.58
210	Alfalfa Hay, Full Bloom-N	1-00-N	0	100	91.0	51.00	20.39	92	56.0	2.02	1.18	0.61
211	Alfalfa Hay, Late Bloom-S	1-00-070-S	0	100	91.0	53.00	23.02	92	52.0	1.88	1.04	0.49
212	Alfalfa Hay, Late Bloom-N	1-00-N	0	100	91.0	55.00	22.18	92	53.0	1.92	1.07	0.52
213	Alfalfa Hay, Mature-S	1-00-71-S	0	100	91.0	58.00	24.83	92	50.0	1.81	0.97	0.42
214	Alfalfa Hay, Seeded		0	100	91.0	70.00	24.30	92	45.0	1.63	0.79	0.25
215	Alfalfa Hay, Weathered		0	100	89.0	58.00	25.86	92	48.0	1.74	0.90	0.35
216	Alfalfa Meal, dehydrated 15%CP	1-00-022	0	100	90.0	55.40	26.00	6	59.0	2.13	1.28	0.71
217	Alfalfa Silage, Early Bloom	3-00-216	0	100	35.0	43.00	23.26	82	63.0	2.28	1.41	0.83

NOTE: See the Glossary for definitions of acronyms and Chapter 10 for a discussion of tabular energy and protein values, feed carbohydrate and protein fractions, and recommended analytical procedures.

[a]Carbohydrate digestion rates.

[b]Protein digestion rates.

									Carbohydrate Kd[a]			Protein Kd[b]		
CP %DM	DIP %CP	solCP %CP	NPN %SolCP	NDFIP %CP	ADFIP %CP	Starch %NSC	Fat %DM	Ash %DM	A %/hr	B1 %/hr	B2 %/hr	B1 %/hr	B2 %/hr	B3 %/hr
8.90	83.0	41.0	2.40	14.50	2.00	5	2.10	10.00	250	30	3.0	135	11	0.09
8.20	63.0	25.0	96.00	31.00	6.50	6	1.60	11.00	250	30	3.0	135	11	0.09
7.80	85.0	25.9	25.40	34.20	8.90	6	2.70	8.00	250	30	3.0	135	11	0.09
16.00	79.0	25.0	96.00	31.00	6.50	46	2.60	10.00	250	30	3.0	135	11	0.09
14.40	79.0	25.0	96.00	31.00	6.50	44	2.20	10.90	250	30	3.0	135	11	0.09
10.00	59.0	25.0	96.00	31.00	6.50	44	2.30	9.00	250	30	3.0	135	11	0.09
6.00	48.0	25.0	96.00	31.00	6.50	42	2.00	7.20	250	30	3.0	135	11	0.09
9.10	67.0	25.0	96.00	31.00	6.50	44	2.40	8.00	250	30	3.0	135	11	0.09
10.20	71.0	25.0	96.00	31.00	6.50	44	2.20	10.00	250	30	3.0	135	11	0.09
15.00	82.0	25.9	25.40	34.20	8.90	44	5.50	9.00	250	30	3.0	135	11	0.09
12.90	77.0	25.9	25.40	34.20	8.90	44	5.30	8.00	250	30	3.0	135	11	0.09
10.80	86.0	25.9	25.40	34.20	8.90	42	4.70	6.80	250	30	3.0	135	11	0.09
8.70	83.0	46.0	2.20	10.00	2.20	8	3.00	9.00	250	30	3.0	135	11	0.09
7.80	81.0	46.0	2.20	10.00	2.20	8	1.00	6.00	250	30	3.0	135	11	0.09
12.80	77.0	25.0	96.00	31.00	5.70	44	2.90	8.50	250	30	3.0	135	11	0.09
8.40	64.0	25.0	96.00	31.00	6.10	42	3.40	10.10	250	30	3.0	135	11	0.09
9.10	84.0	42.0	4.80	24.00	2.20	5	2.30	7.60	250	30	3.0	135	11	0.09
11.60	87.0	42.0	4.80	24.00	2.20	39	3.90	8.00	350	25	9.0	200	14	2.00
10.30	71.0	25.0	96.00	31.00	6.10	44	3.10	10.00	250	30	3.0	135	11	0.09
8.60	65.0	25.0	96.00	31.00	5.70	46	2.20	10.00	250	30	5.0	135	11	0.09
11.30	69.0	20.0	95.00	40.00	11.00	43	1.80	9.60	250	20	3.0	135	11	0.09
16.80	88.0	45.0	11.11	30.00	5.00	90	3.90	9.00	300	20	9.0	200	14	2.00
10.80	72.0	50.0	90.00	40.00	11.00	56	2.80	9.80	10	20	5.0	175	12	1.50
14.00	79.0	25.0	96.00	31.00	5.70	46	3.00	8.00	250	30	4.0	135	11	0.09
10.80	73.0	25.0	96.00	31.00	5.70	44	2.80	5.70	250	30	4.0	135	11	0.09
9.70	69.0	25.0	96.00	31.00	6.10	44	2.70	7.00	250	30	3.0	135	11	0.09
8.10	62.0	25.0	96.00	31.00	6.10	42	2.90	5.20	250	30	3.0	135	11	0.09
6.00	50.0	25.0	96.00	31.00	6.50	42	2.00	6.00	250	30	3.0	135	11	0.09
9.00	67.0	25.0	96.00	31.00	6.10	44	2.30	9.00	250	30	3.0	135	11	0.09
21.30	94.0	41.0	2.44	14.50	2.00	47	4.00	10.40	350	40	9.0	200	12	2.00
15.00	90.0	42.0	4.76	24.00	2.20	45	3.70	9.00	350	40	9.0	200	10	2.00
22.00	93.0	43.0	2.33	16.40	2.00	45	3.70	10.00	350	45	7.0	200	12	2.00
26.00	94.0	43.0	2.33	12.40	2.10	50	3.20	10.25	350	45	9.0	200	14	2.00
19.50	92.0	44.0	3.41	12.50	2.60	48	3.20	9.40	350	45	9.0	200	14	2.00
11.00	72.0	42.0	5.00	24.00	2.00	38	3.00	10.00	250	30	7.0	135	12	3.00
10.50	70.0	42.0	5.00	24.00	2.00	38	3.00	10.00	250	30	7.0	135	12	2.00
9.70	66.0	42.0	5.00	24.00	2.00	38	3.00	10.00	250	30	7.0	135	10	0.75
6.90	67.0	42.0	5.00	24.00	2.00	38	3.00	10.00	250	30	7.0	135	12	0.75
4.70	63.0	42.0	5.00	24.00	2.00	38	3.00	10.00	250	30	7.0	135	10	0.20
20.30	94.0	60.0	5.00	2.00	1.00	38	3.00	10.00	250	30	9.0	135	40	6.00
13.40	92.0	60.0	5.00	2.00	1.00	38	3.00	10.00	250	30	7.0	135	40	6.00
13.40	77.0	25.0	5.00	2.00	1.00	38	3.00	11.00	250	30	6.0	135	8	0.09
5.30	62.0	25.0	5.00	2.00	1.00	38	3.00	8.00	250	30	3.5	135	3.5	0.09
30.00	90.0	30.0	96.00	15.00	10.00	64	4.00	10.00	250	30	5.5	150	9	1.25
23.40	87.0	30.0	96.00	15.00	10.00	64	3.20	10.00	250	30	5.5	150	9	1.25
27.00	89.0	30.0	93.00	15.00	10.00	64	3.80	9.00	250	30	5.5	150	9	1.25
21.70	86.0	30.0	93.00	15.00	10.00	64	3.00	10.00	250	30	5.5	150	9	1.25
25.00	88.0	29.0	93.00	18.00	11.00	64	2.90	9.20	250	30	5.5	150	9	1.25
19.90	84.0	29.0	93.00	18.00	11.00	64	2.90	9.20	250	30	5.5	150	9	1.25
22.00	84.0	28.0	93.00	25.00	14.00	64	2.60	8.50	250	30	5.5	150	9	1.25
17.00	82.0	28.0	93.00	25.00	14.00	64	2.39	8.57	250	30	5.5	150	9	1.25
17.00	82.0	27.0	93.00	29.00	16.00	64	3.40	7.80	250	30	5.5	150	9	1.25
13.00	77.0	27.0	93.00	29.00	16.00	64	1.80	9.00	250	30	5.5	150	9	1.25
17.00	82.0	26.0	92.00	33.00	18.00	64	1.50	8.00	250	30	5.5	150	9	1.25
12.00	75.0	26.0	92.00	33.00	18.00	64	1.60	8.00	250	30	5.5	150	9	1.25
14.00	79.0	25.0	92.00	36.00	20.00	64	1.30	7.00	250	30	5.5	150	9	1.25
12.00	75.0	25.0	92.00	36.00	20.00	64	1.00	7.00	250	30	5.5	150	9	1.25
10.00	70.0	15.0	100.00	45.00	25.00	64	1.00	8.00	250	30	5.5	150	9	1.25
17.30	54.0	28.0	100.00	25.00	17.00	64	2.40	9.90	300	37	10.0	150	8	0.15
19.00	92.0	50.0	100.00	27.00	15.00	89	3.20	9.50	10	25	5.5	150	11	1.75

APPENDIX TABLE 1 Feed Library—Energy and Crude Protein Values, Plant Cell Wall Constituents, Digestibility Rates, Amino Acids, Minerals, and Vitamins

Feed No.	Common Name	Int. Ref. No.	Conc. %DM	Forage %DM	DM %AF	NDF %DM	Lignin %NDF	eNDF %NDF	TDN %DM	ME Mcal/kg	NEm Mcal/kg	NEg Mcal/kg
218	Alfalfa Silage, Mid Bloom	3-00-217	0	100	38.0	47.00	23.40	82	58.0	2.10	1.24	0.68
219	Alfalfa Silage, Full Bloom	3-00-218	0	100	40.0	51.00	23.53	82	55.0	1.99	1.14	0.58
220	Birdsfoot, Trefoil, Hay	1-05-044	0	100	91.0	47.50	19.15	92	59.0	2.13	1.28	0.71
221	Clover, Ladino Hay	1-01-378	0	100	89.0	36.00	19.44	92	60.0	2.17	1.31	0.74
222	Clover, Red Hay	1-01-415	0	100	88.0	46.90	17.86	92	55.0	1.99	1.14	0.58
223	Vetch, Hay	1-05-106	0	100	89.0	48.00	16.67	92	57.0	2.06	1.21	0.64
230	Leg Pasture, Spring		0	100	20.0	33.00	8.00	41	79.0	2.86	1.91	1.27
231	Leg Pasture, Summer	2-00-181	0	100	21.0	38.00	8.50	41	66.0	2.39	1.51	0.91
301	Barley, Silage		0	100	39.0	56.80	5.44	65	60.0	2.17	1.31	0.74
302	Barley, Straw	1-00-498	0	100	91.0	72.50	13.75	100	40.0	1.45	0.60	0.08
303	Corn Cobs, Ground	1-28-234	0	100	90.0	87.00	7.78	56	50.0	1.81	0.97	0.42
304	Corn Silage, 25% Grain-N	3-28-250-N	0	100	29.0	52.00	9.62	81	68.0	2.46	1.57	0.97
305	Corn Silage, 25% Grain-S	3-28-250-S	0	100	29.0	55.00	10.91	81	61.0	2.21	1.34	0.77
306	Corn Silage, 35% Grain	3-28-250	0	100	33.0	46.00	8.70	81	69.0	2.49	1.60	1.00
307	Corn Silage, 40% Grain	3-28-250	0	100	33.0	45.00	8.89	81	66.0	2.39	1.51	0.91
308	Corn Silage, 40% GR + NPN	3-28-250	0	100	33.0	45.00	8.89	81	67.0	2.42	1.54	0.94
309	Corn Silage, 40% GR + NPN + Ca	3-28-250	0	100	33.0	45.00	8.89	81	68.0	2.46	1.57	0.97
310	Corn Silage, 45% Grain	3-28-250	0	100	34.0	43.00	7.32	81	72.0	2.60	1.70	1.08
311	Corn Silage, 45% GR + NPN		0	100	34.0	43.00	7.32	81	78.7	2.84	1.90	1.26
312	Corn Silage, 45% GR + NPN + Ca		0	100	34.0	43.00	7.32	81	75.0	2.71	1.79	1.16
313	Corn Silage, 50% Grain	3-28-250	0	100	35.0	41.00	7.00	71	75.0	2.71	1.79	1.16
314	CS50% +, NPN + CA		0	100	35.0	41.00	7.00	71	82.3	2.98	2.01	1.36
315	Corn Silage, Immature (no Ears)	3-28-252	0	100	25.0	60.00	5.00	81	65.0	2.35	1.47	0.88
316	Corn Silage, Stalklage	3-28-251	0	100	30.0	68.00	10.29	81	55.0	1.99	1.14	0.58
317	Corn Stalks, Grazing		0	100	50.0	65.00	10.00	100	65.9	2.38	1.50	0.91
318	Oat, Silage Dough	3-03-296	0	100	36.4	58.10	16.07	61	59.0	2.13	1.28	0.71
319	Oat, Straw	1-03-283	0	100	92.2	74.40	20.00	98	45.0	1.63	0.79	0.25
320	Oat, Hay	1-03-280	0	100	91.0	63.00	9.09	98	53.0	1.92	1.07	0.52
321	Sorghum, Silage	3-04-323	0	100	30.0	60.80	9.38	81	60.0	2.17	1.31	0.74
322	Wheat, Silage dough	3-05-184	0	100	35.0	60.70	14.81	61	57.0	2.06	1.21	0.64
323	Wheat, Straw	1-05-175	0	100	89.0	78.90	16.47	98	41.0	1.48	0.64	0.11
401	Barley Malt, Sprouts w/hulls	4-00-545	100	0	93.0	46.00	6.52	34	71.0	2.57	1.66	1.05
402	Barley Grain, Heavy	4-00-549	100	0	88.0	18.10	10.53	34	84.0	3.04	2.06	1.40
403	Barley Grain, Light		100	0	88.0	28.00	10.36	34	77.0	2.78	1.85	1.22
404	Corn, Hominy	4-02-887	100	0	90.0	23.00	3.64	9	91.0	3.29	2.27	1.57
405	Corn Grain, Cracked	4-20-698	100	0	88.0	10.80	2.22	30	90.0	3.25	2.24	1.55
406	Corn Dry, Ear 45 lb/bu		100	0	86.0	31.00	7.14	56	77.0	2.78	1.85	1.22
407	Corn Dry, Ear 56 lb/bu	04-28-238	100	0	87.0	28.00	7.10	56	82.0	2.96	2.00	1.35
408	Corn Dry, Grain 45 lb/bu		100	0	88.0	10.00	2.22	60	88.0	3.18	2.18	1.50
409	Corn Ground, Grain 56 lb/bu	04-02-931	100	0	88.0	9.00	2.22	0	88.0	3.18	2.18	1.50
410	Corn Dry, Grain 56 lb/bu	04-02-931	100	0	88.0	9.00	2.22	60	88.0	3.18	2.18	1.50
411	Corn Grain, Flaked	4-20-224	100	0	86.0	9.00	2.22	48	93.0	3.36	2.33	1.62
412	Corn HM, Ear 56 lb/bu		100	0	72.0	28.00	7.10	56	85.0	3.07	2.09	1.42
413	Corn HM, Grain 45 lb/bu		100	0	72.0	10.50	2.22	0	90.0	3.25	2.24	1.55
414	Corn HM, Grain 56 lb/bu	04-20-771	100	0	72.0	9.00	2.22	0	93.0	3.36	2.33	1.62
415	Cottonseed, Black Whole	5-01-614	100	0	92.0	40.00	15.00	100	95.0	3.43	2.38	1.67
416	Cottonseed, High Lint	5-01-614	100	0	92.0	51.60	16.00	100	90.0	3.25	2.24	1.55
417	Cottonseed, Meal - mech	5-01-617	100	0	92.0	28.00	21.40	36	78.0	2.82	1.88	1.24
418	Cottonseed, Meal - Sol-41%CP	5-07-873	100	0	92.0	28.90	20.80	36	75.0	2.71	1.79	1.16
419	Cottonseed, Meal - Sol-43%CP	5-01-630	100	0	92.0	28.00	20.80	36	75.0	2.71	1.79	1.16
420	Molasses, Beet	4-00-668	100	0	77.9	0.00	0.00	0	75.0	2.71	1.79	1.16
421	Molasses, Cane	4-04-696	100	0	74.3	0.00	0.00	0	72.0	2.60	1.70	1.08
422	Oats, 32 lb/bu	4-03-318	100	0	91.0	42.00	9.52	34	73.0	2.64	1.73	1.11
423	Oats, 38 lb/bu	4-03-309	100	0	89.0	29.30	9.38	34	77.0	2.78	1.85	1.22
424	Rice, Bran	4-03-928	100	0	90.5	33.00	13.00	0	70.0	2.53	1.63	1.03
425	Rice Grain, Ground	4-03-938	100	0	89.0	16.00	13.00	0	79.0	2.86	1.91	1.27
426	Rice Grain, Polished	4-03-932	100	0	89.0	1.84	0.00	0	89.0	3.22	2.21	1.52
427	Rye, Grain	4-04-047	100	0	88.0	19.00	5.30	34	84.0	3.04	2.06	1.40
428	Sorghum, Dry grain	4-04-383	100	0	89.0	23.00	6.09	34	76.0	2.75	1.82	1.19
429	Sorghum, Rolled grain	4-04-383	100	0	90.0	23.00	6.09	34	82.0	2.96	2.00	1.35
430	Sorghum, Steam flaked		100	0	70.0	23.00	6.09	34	88.0	3.18	2.18	1.50
431	Tapioca,		100	0	89.0	8.00	0.00	0	84.0	3.04	2.06	1.40
432	Wheat, Ground	4-05-211	100	0	89.0	11.80	6.25	0	88.0	3.18	2.18	1.50
433	Wheat , Middlings	4-05-205	100	0	89.0	35.00	5.95	2	83.0	3.00	2.03	1.37
434	Wheat Grain, Hard red spring	4-05-268	100	0	88.0	11.70	6.25	0	84.0	3.04	2.06	1.40
435	Wheat Grain, Soft white	4-05-337	100	0	90.0	9.70	4.29	2.6	85.0	3.07	2.09	1.42
501	Brewers Grain, 21% Dry Matter	5-02-142	100	0	21.0	42.00	9.52	18	70.0	2.53	1.63	1.03
502	Brewers Grain, Dehydrated	5-02-141	100	0	92.0	48.70	13.04	18	66.0	2.39	1.51	0.91
503	Canola, Meal	5-03-871	100	0	92.0	27.20	12.76	23	69.0	2.49	1.60	1.00
504	Coconut, Meal		100	0	92.0	56.00	17.86	23	64.0	2.31	1.44	0.86

									Carbohydrate Kd[a]			Protein Kd[b]		
CP %DM	DIP %CP	solCP %CP	NPN %SolCP	NDFIP %CP	ADFIP %CP	Starch %NSC	Fat %DM	Ash %DM	A %/hr	B1 %/hr	B2 %/hr	B1 %/hr	B2 %/hr	B3 %/hr
17.00	91.0	45.0	100.00	32.00	18.00	89	3.10	9.00	10	25	5.5	150	11	1.75
16.00	91.0	40.0	100.00	37.00	21.00	89	2.70	8.00	10	25	5.5	150	11	1.75
15.90	82.0	28.0	96.00	25.20	14.00	60	2.10	7.40	250	30	5.5	150	9	1.25
22.40	86.0	30.0	96.00	15.00	10.00	60	2.70	9.40	250	30	5.5	150	9	1.25
15.00	80.0	25.0	92.00	35.60	20.00	60	2.80	7.50	250	30	5.5	150	9	1.25
20.80	86.0	28.0	96.00	25.20	14.00	60	3.00	7.00	250	30	5.5	150	9	1.25
28.00	95.0	46.0	2.17	10.00	2.15	60	2.70	10.00	350	45	9.0	300	20	2.00
22.20	94.0	46.0	2.17	12.00	3.00	60	2.90	10.20	350	45	9.0	300	18	2.00
11.90	86.0	70.0	100.00	7.70	6.10	70	2.92	8.30	10	50	4.0	300	10	0.50
4.40	30.0	20.0	95.00	75.00	65.00	100	1.90	7.50	250	30	3.0	135	11	0.09
2.80	22.0	25.0	10.00	15.00	10.00	90	0.60	1.80	300	35	4.0	150	12	0.10
8.30	76.0	55.0	100.00	16.00	9.00	80	2.10	8.00	10	25	6.0	300	10	0.20
8.30	76.0	55.0	100.00	16.00	9.00	80	2.10	7.00	10	25	5.0	300	10	0.20
8.60	77.0	50.0	100.00	16.00	9.00	80	2.60	7.00	10	30	6.0	300	10	0.20
9.20	78.0	50.0	100.00	16.00	8.00	80	3.10	4.00	10	30	6.0	300	10	0.20
13.20	85.0	66.0	100.00	16.00	8.00	80	3.10	4.00	10	30	6.0	300	10	0.20
13.00	85.0	66.0	100.00	16.00	8.00	80	3.10	6.00	10	30	6.0	300	10	0.20
8.65	78.0	45.0	100.00	16.00	8.00	80	3.09	3.59	10	30	6.0	300	10	0.20
13.00	85.0	66.0	100.00	16.00	4.85	80	3.05	6.10	10	30	6.0	300	10	0.20
13.00	85.0	66.0	100.00	16.00	4.85	80	3.05	4.50	10	30	6.0	300	10	0.20
8.00	75.0	50.0	100.00	16.40	7.88	80	3.50	4.20	10	30	6.0	300	10	0.20
13.00	85.0	63.0	100.00	16.00	4.85	80	3.50	5.80	10	30	6.0	300	10	0.20
9.00	78.0	45.0	100.00	16.00	4.50	80	3.10	11.00	10	30	4.0	300	10	0.20
6.30	68.0	45.0	100.00	16.00	4.50	59	2.10	9.00	10	25	4.0	300	10	0.20
6.50	69.0	20.0	95.00	31.43	13.57	10	2.10	7.20	250	30	5.0	135	4	0.09
12.70	85.0	50.0	100.00	30.00	10.00	53	3.12	10.10	10	50	5.0	300	12	0.20
4.40	55.0	20.0	95.00	75.00	65.00	5	2.20	7.80	250	30	3.0	135	11	0.09
9.50	68.0	30.0	93.00	30.00	10.00	90	2.40	7.90	250	30	4.0	135	11	0.09
9.39	73.0	45.0	100.00	50.00	5.00	56	2.64	5.90	10	20	5.0	300	8	0.20
12.50	81.0	45.0	100.00	27.00	8.00	70	2.50	7.50	10	50	6.0	300	14	0.20
3.50	31.0	20.0	95.00	75.00	65.00	100	2.00	7.70	250	50	3.0	135	11	0.09
28.10	64.2	48.0	83.00	27.00	4.00	85	1.40	7.00	250	30	6.0	135	11	0.09
13.20	66.9	17.0	29.00	8.00	5.00	90	2.20	2.40	300	30	5.0	300	12	0.35
14.00	66.9	17.0	29.00	8.00	5.00	90	2.30	4.00	300	30	5.0	300	12	0.35
11.50	47.5	18.0	78.00	8.00	5.00	90	7.30	1.71	150	20	5.0	150	4	0.09
9.80	44.7	11.0	73.00	15.00	5.00	90	4.06	1.46	200	15	5.0	135	6	0.09
9.00	46.0	16.0	69.00	18.00	3.00	90	3.70	2.00	150	18	5.0	135	7	0.10
9.00	46.0	16.0	69.00	18.00	3.00	90	3.70	1.90	150	18	5.0	135	7	0.10
9.80	41.2	12.0	73.00	15.00	5.00	90	4.30	1.60	150	10	4.0	135	5	0.10
9.80	57.4	11.0	73.00	15.00	5.00	90	4.30	1.60	250	25	6.0	135	10	0.10
9.80	44.7	11.0	73.00	15.00	5.00	90	4.30	1.60	150	10	4.0	135	4	0.10
9.80	43.0	8.0	73.00	15.00	5.00	90	4.30	1.60	300	25	6.0	135	5	0.08
9.00	62.0	30.0	80.00	18.72	8.28	95	3.70	1.90	25	30	6.0	135	10	0.10
9.80	67.8	40.0	100.00	15.90	5.30	95	4.30	1.60	50	30	6.0	135	10	0.15
9.80	67.8	40.0	100.00	15.90	5.30	95	4.30	1.60	50	30	6.0	135	10	0.15
23.00	69.6	40.0	2.50	6.00	6.00	90	17.50	5.00	300	25	6.0	175	8	0.25
24.40	69.6	40.0	2.50	10.00	6.00	90	17.50	4.16	300	25	6.0	175	8	0.25
44.00	57.0	20.0	40.00	10.00	8.00	90	5.00	7.00	300	25	6.0	175	8	0.25
46.10	57.0	20.0	40.00	10.00	8.00	90	3.15	7.00	300	25	6.0	175	8	0.25
48.90	57.0	20.0	40.00	10.00	8.00	90	1.70	7.00	300	25	6.0	175	8	0.25
8.50	100.0	100.0	100.00	0.00	0.00	0	0.00	11.40	500	30	3.0	300	11	0.25
5.80	100.0	100.0	100.00	0.00	0.00	0	0.00	13.30	500	30	20.0	350	11	0.25
13.60	76.6	53.0	19.00	11.00	5.00	90	4.90	5.00	300	35	5.0	325	12	0.35
13.60	83.0	53.0	19.00	11.00	5.00	90	5.20	3.30	300	35	5.0	325	12	0.35
14.40	51.0	40.0	80.00	47.00	2.00	90	15.00	11.50	300	40	8.0	250	12	0.35
8.90	69.9	40.0	50.00	21.40	2.70	90	1.90	5.00	350	50	10.0	300	15	1.00
8.60	66.3	40.0	50.00	21.40	2.70	90	0.80	1.00	300	40	8.0	250	12	0.35
13.80	79.0	53.0	19.00	7.00	4.00	90	1.70	2.00	300	40	8.0	300	12	0.35
12.40	50.8	12.0	33.00	10.00	5.00	90	3.10	2.00	150	10	5.0	135	6	0.12
12.60	43.0	12.0	33.00	10.00	5.00	90	3.03	1.87	200	10	5.0	135	6	0.12
12.00	56.4	8.0	80.00	10.00	5.00	100	3.10	2.00	250	15	5.0	160	8	0.15
3.10	56.1	25.0	45.00	30.00	5.00	80	0.80	3.00	300	40	8.0	300	12	0.35
14.20	77.0	30.0	25.00	4.00	2.00	90	2.34	2.01	300	40	9.0	300	12	0.35
18.40	77.2	40.0	75.00	4.00	3.00	90	3.20	2.87	300	70	6.0	250	6	0.35
14.20	74.0	30.0	73.00	4.00	2.00	90	2.00	2.00	300	40	6.0	300	12	0.35
11.30	74.0	30.0	73.00	4.00	2.00	90	1.90	2.00	300	40	6.0	300	12	0.35
26.00	40.9	8.0	50.00	38.00	10.00	100	6.50	10.00	300	38	6.0	150	8	0.50
29.20	34.1	4.0	75.00	40.00	12.00	100	10.80	4.00	300	38	6.0	150	6	0.50
40.90	67.9	32.4	65.00	10.64	6.38	90	3.47	7.10	300	40	6.0	230	12	0.20
21.50	61.6	14.0	75.00	10.00	3.00	90	7.40	7.00	300	40	6.0	230	12	0.20

APPENDIX TABLE 1

Feed No.	Common Name	Int. Ref. No.	Conc. %DM	Forage %DM	DM %AF	NDF %DM	Lignin %NDF	eNDF %NDF	TDN %DM	ME Mcal/kg	NEm Mcal/kg	NEg Mcal/kg
505	Corn Gluten, Feed	5-28-243	100	0	90.0	36.20	2.22	36	80.0	2.89	1.94	1.30
506	Corn Gluten, Meal	5-02-900	100	0	91.0	37.00	2.70	36	84.0	3.04	2.06	1.40
507	Corn Gluten, Meal 60%CP	5-28-242	100	0	91.0	8.90	7.14	36	89.0	3.22	2.21	1.52
508	Distillers Gr., + solubles	5-02-843	100	0	91.0	46.00	9.09	4	88.0	3.18	2.18	1.50
509	Distillers Gr., Dehy - Light	5-28-236	100	0	91.0	46.00	10.00	4	88.0	3.18	2.18	1.50
510	Distillers Gr., Dehy - Inter.	5-28-236	100	0	91.0	46.00	10.00	4	88.0	3.18	2.18	1.50
511	Distillers Gr., Dehy - Dark	5-28-236	100	0	91.0	46.00	10.00	4	88.0	3.18	2.18	1.50
512	Distillers Gr., Dehy - Very Dark	5-28-236	100	0	91.0	46.00	10.00	4	88.0	3.18	2.18	1.50
513	Distillers Gr., solubles dehy	5-28-844	100	0	91.0	23.00	4.35	4	88.0	3.18	2.18	1.50
514	Distillers Gr., Wet		100	0	25.0	40.00	10.00	4	90.0	3.25	2.24	1.55
515	Lupins,		100	0	90.0	33.00	10.00	0	78.0	2.82	1.88	1.24
516	Peanut, Meal	5-03-650	100	0	92.4	14.00	10.00	36	77.0	2.78	1.85	1.22
517	Soybean, Meal - 44	5-20-637	100	0	89.0	14.90	2.14	23	84.0	3.04	2.06	1.40
518	Soybean, Meal - 49	5-04-612	100	0	90.0	7.79	2.50	23	87.0	3.15	2.15	1.47
519	Soybean, Whole	5-04-610	100	0	90.0	14.90	1.54	30	94.0	3.40	2.35	1.65
520	Soybean, Whole Roasted		100	0	90.0	13.40	10.00	30	94.0	3.40	2.35	1.65
521	Sunflower, Seed meal	5-04-739	100	0	90.0	40.00	30.00	23	65.0	2.35	1.47	0.88
522	Urea,		100	0	99.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
601	Apple, Pomace	4-00-424	0	100	22.0	41.00	2.00	34	68.9	2.49	1.60	1.00
602	Bakery, Waste	4-00-466	100	0	92.0	18.00	5.56	0	89.0	3.22	2.21	1.52
603	Beet Pulp, +Steffen's filt	4-00-675	100	0	91.0	42.00	4.76	33	66.0	2.39	1.51	0.91
604	Beet Pulp, Dehydrated	4-00-669	100	0	91.0	44.60	3.70	33	74.0	2.68	1.76	1.14
605	Citrus Pulp, Dehydrated	4-01-237	100	0	91.0	23.00	13.04	33	82.0	2.96	2.00	1.35
606	Grape, Pomace	1-02-208	100	0	90.0	55.00	41.00	34	33.0	1.19	0.34	0.00
607	Soybean, Hulls	1-04-560	100	0	91.0	66.30	2.99	2	80.0	2.89	1.94	1.30
608	Linseed, Meals	5-02-848	100	0	90.0	25.00	24.00	23	78.0	2.82	1.88	1.24
609	Cottonseed, Hulls		0	100	91.0	90.00	24.00	100	45.0	1.63	0.79	0.25
610	Wheat, Bran		100	0	89.0	51.00	5.88	19	70.0	2.53	1.63	1.03
701	Bloodmeal	5-00-380	100	0	90.0	0.94	0.00	0	66.0	2.39	1.51	0.91
702	Feather, Meal	5-03-795	100	0	90.0	42.90	0.00	23	68.0	2.46	1.57	0.97
703	Fishmeal	5-02-009	100	0	90.0	0.68	0.00	10	73.0	2.64	1.73	1.11
704	Meat , Meal	5-00-385	100	0	95.0	32.84	0.00	0	71.0	2.57	1.66	1.05
705	Tallow	4-00-376	100	0	99.0	0.00	0.00	0	177.0	6.40	4.75	3.51
706	Whey, Acid	4-08-134	100	0	7.0	0.00	0.00	0	78.0	2.82	1.88	1.24
707	Whey, Delact.	4-01-186	100	0	93.0	0.00	0.00	0	71.0	2.57	1.66	1.05
801	Ammonium Phos (Mono)	6-09-338	100	0	97.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
802	Ammonium Phos (Dibasic)	6-00-370	100	0	97.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
803	Ammonium Sulfate	6-09-339	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
804	Bone Meal	6-00-400	100	0	97.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
805	Calcium Carbonate	6-01-069	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
806	Calcium Sulfate	6-01-089	100	0	97.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
807	Cobalt Carbonate	6-01-566	100	0	99.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
808	Copper Sulfate	6-01-720	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
809	Dicalcium Phosphate	6-01-080	100	0	97.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
810	EDTA	6-01-842	100	0	98.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
811	Iron Sulfate	6-20-734	100	0	98.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
812	Limestone	6-02-632	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
813	Limestone Magnesium	6-02-633	100	0	99.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
814	Magnesium Carbonate	6-02-754	100	0	98.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
815	Magnesium Oxide	6-02-756	100	0	98.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
816	Manganese Oxide	6-03-056	100	0	99.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
817	Manganese Carbonate	6-03-036	100	0	97.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
818	Mono-Sodium Phosphate	6-04-288	100	0	97.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
819	Oystershell Ground	6-03-481	100	0	99.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
820	Phosphate Deflourinated	6-01-780	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
821	Phosphate Rock	6-03-945	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
822	Phosphate Rock - Low Fl	6-03-946	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
823	Phosphate Rock - Soft	6-03-947	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
824	Phosphate Mono-Mono	6-04-288	100	0	97.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
825	Phosphoric Acid	6-03-707	100	0	75.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
826	Potassium Bicarbonate	6-29-493	100	0	99.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
827	Potassium Iodide	6-03-759	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
828	Potassium Sulfate	6-06-098	100	0	98.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
829	Salt	6-04-152	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
830	Sodium Bicarbonate	6-04-272	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
831	Sodium Selenite	6-26-013	100	0	98.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
832	Sodium Sulfate	6-04-292	100	0	97.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
833	Zinc Oxide	6-05-553	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
834	Zinc Sulfate	6-05-555	100	0	99.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
835	Potassium Chloride	6-03-755	100	0	100.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
836	Calcium Phosphate (Mono)	6-01-082	100	0	97.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
837	Sodium TriPoly Phosphate	6-08-076	100	0	96.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00
999	Minerals	X-XX-XXX	100	0	99.0	0.00	0.00	0	0.0	0.00	0.00	0.00

									Carbohydrate Kd[b]			Protein Kd[b]		
CP %DM	DIP %CP	solCP %CP	NPN %SolCP	NDFIP %CP	ADFIP %CP	Starch %NSC	Fat %DM	Ash %DM	A %/hr	B1 %/hr	B2 %/hr	B1 %/hr	B2 %/hr	B3 %/hr
23.80	75.0	49.0	100.00	8.00	2.00	100	3.91	6.90	300	50	5.0	150	4	0.10
46.80	38.1	4.0	75.00	11.00	2.00	100	2.40	3.00	300	50	5.0	150	4	0.10
66.30	41.0	4.0	75.00	11.00	2.00	100	2.56	2.86	300	50	5.0	150	4	0.10
29.50	27.2	19.0	89.00	62.00	21.00	100	10.30	5.20	300	17	7.0	150	6	0.50
30.40	28.0	6.0	67.00	40.00	13.00	100	9.80	5.20	300	17	7.0	150	6	0.50
30.40	26.4	6.0	67.00	44.00	18.00	100	10.70	5.20	300	17	7.0	150	6	0.50
30.40	25.9	6.0	67.00	45.00	21.00	100	9.80	5.20	300	17	7.0	150	6	0.50
30.40	24.9	6.0	67.00	47.00	36.00	100	9.80	5.20	300	17	7.0	150	6	0.50
29.70	45.1	44.0	100.00	55.00	13.00	100	9.20	8.00	300	17	7.0	150	6	0.50
29.70	33.4	25.0	68.00	55.00	12.00	100	9.90	5.20	300	17	7.0	150	6	0.50
34.20	69.2	26.0	23.00	4.00	3.00	90	5.50	5.10	300	30	5.0	200	10	0.20
52.90	80.0	33.0	27.00	10.00	1.00	90	2.30	6.30	300	45	6.0	230	13	0.20
49.90	65.0	20.0	55.00	5.00	2.00	90	1.60	7.20	300	25	6.0	230	11	0.20
54.00	65.0	20.0	55.00	5.00	2.00	90	1.10	6.70	300	25	6.0	230	11	0.20
40.34	75.0	44.0	22.73	4.00	3.00	90	18.20	4.56	300	30	5.0	200	10	0.20
42.80	38.3	5.7	100.00	23.60	7.29	90	18.80	5.80	300	25	5.0	150	5	0.18
25.90	80.0	30.0	37.00	8.00	5.00	90	2.90	8.10	300	35	4.0	160	10	0.15
281.00	100.0	100.0	100.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0	0.0	400	0	0.00
5.40	48.2	11.0	100.00	32.00	31.50	100	4.70	5.00	350	50	5.0	350	11	0.25
9.00	75.6	40.0	75.00	6.00	3.00	85	12.70	5.00	300	16	7.0	100	12	0.35
10.00	42.5	26.5	96.00	53.00	11.00	90	0.40	6.00	300	40	8.0	300	12	0.35
9.80	42.6	27.0	96.00	53.00	11.00	90	0.60	5.30	300	40	8.0	300	12	0.35
6.70	41.6	27.0	96.00	53.00	11.00	90	3.70	6.60	350	50	9.0	350	11	0.25
0.00	100.0	0.0	0.00	0.00	0.00	100	7.90	10.00	350	50	9.0	350	11	0.25
12.20	58.0	18.0	72.00	20.00	14.00	90	2.10	4.90	350	40	8.0	150	12	0.15
38.30	65.0	20.0	10.00	10.00	2.40	90	1.50	6.50	300	35	6.0	230	11	0.20
4.10	50.0	20.0	50.00	13.00	13.00	60	1.70	4.00	300	25	6.0	175	11	0.09
17.10	77.0	29.4	45.00	35.00	6.40	94.6	4.40	6.90	300	40	4.0	250	12	0.35
93.79	25.0	5.0	0.00	1.00	1.00	0	1.70	2.62	0	0	0.0	135	1.3	0.09
85.80	30.0	9.0	89.00	50.00	32.00	90	7.21	4.52	0	0	0.0	125	3	0.09
67.90	40.0	21.0	0.00	1.00	1.00	90	10.70	20.60	0	0	0.0	150	1	0.80
58.20	45.0	13.4	26.50	56.41	3.16	0	11.00	21.30	0	0	0.0	150	5	0.12
0.00	100.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	99.00	1.00	0	0	0.0	0	0	0.00
14.20	100.0	100.0	8.00	0.00	0.00	0	0.70	10.00	350	0	0.0	350	0	0.00
17.90	100.0	100.0	8.00	0.00	0.00	0	1.10	17.00	350	0	0.0	350	0	0.00
70.90	100.0	100.0	100.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
115.90	100.0	100.0	100.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
134.10	100.0	100.0	100.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
13.20	40.0	40.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	500	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00
0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0	0.00	100.00	0	0	0.0	0	0	0.00