



Les transitions énergétiques urbaines du XIXe au XXIe siècle : de la biomasse aux combustibles fossiles et fissiles à Paris (France).

Eun Hye Kim

► **To cite this version:**

Eun Hye Kim. Les transitions énergétiques urbaines du XIXe au XXIe siècle : de la biomasse aux combustibles fossiles et fissiles à Paris (France).. Histoire. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2013. Français. <NNT : 2013PA010612>. <tel-00999911>

HAL Id: tel-00999911

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00999911>

Submitted on 4 Jun 2014

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.

Laboratoire Géographies-Cités
Université Paris I Panthéon-Sorbonne

Thèse présentée pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Champ disciplinaire : Géographie, Aménagement
École doctorale de Géographie de Paris

Eunhye KIM

**Les transitions énergétiques urbaines du XIXe au XXIe
siècle : de la biomasse aux combustibles fossiles et fissiles
à Paris (France)**

Sous la direction de Sabine BARLES

Soutenue publiquement le 23 avril 2013 devant

le jury composé de :

Sabine BARLES, Professeur, Université Paris I - Panthéon-Sorbonne, directrice de thèse
Francis BEAUCIRE, Professeur émérite, Université Paris I - Panthéon-Sorbonne, examinateur
Olivier COUTARD, Directeur de recherche, CNRS, LATTIS, examinateur
Emmanuel GARNIER, Maître de conférences HDR, University of Cambridge, examinateur
Minjid MAIZIA, Professeur, Ecole d'ingénieurs Polytechnique de l'Université de Tours,
rapporteur
Franck-Dominique VIVIEN, Maître de conférences HDR, Université de Reims
Champagne-Ardenne, rapporteur

SOMMAIRE

| | |
|--|-----|
| Introduction générale | 9 |
| Chapitre 1. Ecologie urbaine et énergie | 21 |
| Chapitre 2. Méthodologie : bilan de matière et d'énergie | 57 |
| Chapitre 3. Consommation énergétique parisienne : périmètre, population et données historiques et statistiques sur la consommation énergétique, XIXe – XXIe siècles..... | 95 |
| Chapitre 4. Matières premières et géographie des secteurs de transformation..... | 141 |
| Chapitre 5. Bilan de l'énergie et des matières..... | 201 |
| Chapitre 6. Aires d'approvisionnement énergétique de la région parisienne : XIXe – XXIe siècles..... | 277 |
| Conclusion générale | 332 |
| Sources et bibliographie..... | 341 |
| Annexes..... | 366 |

Remerciements

Cette thèse n'aurait pas pris forme, sans le conseil et la correction minutieuse de Sabine Barles. Je la remercie pour la qualité de sa direction et sa grande implication qui ont fait arriver ce travail à son terme.

J'exprime mon grand remerciement à Vincent qui m'a aidé et soutenu tout au long de cette thèse. Je remercie Petros pour son soutien, sa relecture et ses conseils précieux. Je remercie également mes collègues du CRIA pour leur correction finale.

Enfin, mes remerciements vont à ma famille et belle-famille pour leur encouragement et accompagnement.

Résumé

La croissance de la consommation par les villes de ressources naturelles, et en particulier d'énergie d'origine fossile, est un facteur déterminant dans l'altération de la biosphère. Pour comprendre le processus du changement du rapport entre la ville et la biosphère, transition socioécologique dans le cas particulier de la ville, nous avons caractérisé la ville comme étant tributaire de la ressource externe en termes matériel et écologique. On s'intéresse dans ce travail à la relation entre la demande en énergie de la ville, l'évolution du système d'approvisionnement urbain et extraurbain en énergie, et le bassin d'approvisionnement en ressource énergétique avec le cas de l'agglomération parisienne. Pour ce faire, nous avons d'une part tenté d'évaluer la pression environnementale effectuée pour la consommation énergétique urbaine, métabolisme urbain, en utilisant la méthode d'analyse de flux d'énergie et de matière (AFME). L'AFME s'intéresse à mesurer le métabolisme d'une société et inclut par conséquent la consommation énergétique technique (pour le chauffage, l'éclairage, le transport, l'industrie) ainsi que l'alimentation humaine et animale consommée dans la ville. La consommation énergétique urbaine est évaluée par la demande énergétique totale (DET), indicateur de pression environnementale, dans le but de mesurer la consommation d'énergie primaire en amont pour l'approvisionnement en énergie finale du territoire. On essaie ensuite de mettre en parallèle l'évolution de la DET pour l'énergie technique et l'évolution du rayon d'approvisionnement de cette dernière au fur et à mesure de la croissance urbaine. Pour ce faire, on mesure les distances moyenne et maximale d'approvisionnement en km et les lieux de provenance des produits énergétiques en termes de pourcentage dans la demande énergétique totale du territoire sur trois dates entre le XIXe et le XXIe siècle.

Dans la ville de Paris, la transition énergétique de la biomasse aux combustibles fossiles entraîne la croissance de la demande énergétique totale et l'éloignement accru entre la ville et ses ressources énergétiques. Entre 1801 et 2006, la demande énergétique totale par an (DET/an) de la ville de Paris croît de 40 PJ/an à 300 PJ/an et la part de la biomasse (énergie renouvelable) diminue de 100 % à moins de 10 %. Deux périodes sont distinguées selon les facteurs principaux de la croissance de la consommation énergétique. Entre 1801 et 1920, la DET par habitant par an (DET/hab/an) restant relativement stable entre 54 et 63 GJ/hab/an, la croissance de la DET/an est entraînée par la croissance de la population parisienne d'un facteur 5. Entre 1921 et 2006, la population parisienne restant relativement stable, la croissance de la DET/an est entraînée par la croissance de l'intensité énergétique d'un facteur 2. À l'échelle de l'agglomération, du fait de la forte croissance démographique et de la hausse de la consommation énergétique technique par habitant par an, la DET/an pour l'énergie technique s'élève de 18 à 1650 PJ/an en termes de DET, dont 88 % de combustibles fossiles et fissiles pour 2006. Pendant le XIXe et le XXe siècle, la croissance de la consommation énergétique de la ville et le changement de la source énergétique par l'extension du rayon d'approvisionnement étaient des processus réciproques. Enfin, l'extension du système d'approvisionnement et la croissance de la demande énergétique d'origine fossile et fissile de la ville entraînent l'extension du rayon d'approvisionnement de Paris, qui était limité à une distance moyenne de 190 km pour l'approvisionnement en bois en 1800, à 290 km en 1870 lorsque le charbon devient le combustible majeur. Il atteint 3 850 km en 2006, la ville s'approvisionnant quasiment exclusivement en énergie fossile et fissile.

Mots clés : agglomération parisienne, métabolisme urbain, demande énergétique, bassin d'approvisionnement, système technique d'approvisionnement

Abstract

Increasing urban natural resource consumption and particularly fossil energy consumption is one of the important factors of global environment alteration. To understand the socioecological transition process for the city, we characterize it as a natural resource dependant system in material and ecological terms. Cities mobilize a technical system to draw the external natural resource. Therefore, externality is a fundamental character of urban metabolism. We focus in this work on the relationship between the energy demand of the city, the evolution of the urban and extraurban energy supply system, and the energy resource supply area of Paris. We used energy and material flow analysis (MEFA) to evaluate environmental pressure driven by city's energy consumption, urban metabolism. MEFA aims to evaluate social metabolism, therefore energy demand including both the energy for technical system and bioenergy for food and forage provision for a society. Particularly, total energy requirement (TER) refers to primary energy consumption, an indicator to evaluate the environmental pressure. Furthermore, we try to view the energy demand for the technical energy increase of the city in parallel with its energy supply area for three dates chosen during the 19th and 21th centuries.

In Paris, energy transition from biomass to fossil fuels and increase in TER cause remoteness between the city and its natural resources. During the 19th to the 21st, energy resources requirement of the city rises from 40 PJ/yr to 300 PJ/yr in terms of TER and the share of biomass diminishes from 100 % to less than 10% of total. Two periods are distinguished according to the determinants of energy consumption increase. Between 1801 and 1920, although TER/capita/year is stable, the population increase by 5 folds is determinant in increased energy demand of the city in TER/year. Between 1921 and 2006, when the population is relatively stable, increased per capita energy demand (TER/capita/year) by 2 folds is the determinant factor of energy demand increase. At urban metropolitan scale, due to the rise of technical energy consumptions in per capita and the tremendous population increase, between 1801 and 2006, total technical energy demand of Paris metropolitan area grows from 18 to 1650 PJ/yr, in which fossil and fissile energies represent 88 % of TER/year for 2006. The increase of energy consumption, driven by the industrial revolution in the 19th century, the development of technical energy systems, by the rise of secondary energy consumption and the improvement of standard of living were the main drivers of fossil energy consumption increase. In fact, between 1801 and 2006 in Paris, the consumption increase, the main resource changes from biomass to fossil and fissile fuels by the extension of technical system and the remoteness of the resources from the city were reciprocal processes. Therefore, the average distance for energy supply which was 190 km in 1800 for wood supply, extended to 290 km in 1870 when coal became the main energy source. The average distance reaches 3850 km in 2006, when the city is depending on fossil and fissile fuels.

Key words: Paris City, Parisian metropolitan area, urban metabolism, total energy requirement, energy supply area, technical energy system

Symbole et abréviation

Les unités

| | |
|----------------|--------------------------|
| MJ | mégajoule |
| GJ | gigajoule |
| TJ | térajoule |
| PJ | pétajoule |
| EJ | exajoule |
| TEP | tonne équivalent pétrole |
| TEC | tonne équivalent charbon |
| CV | cheval-vapeur |
| W | watt |
| MW | mégawatt |
| GW | gigawatt |
| Wh | watt heure |
| KWh | kilowatt heure |
| MWh | mégawatt heure |
| GWh | gigawatt heure |
| th | thermie |
| cal | calorie |
| kcal | kilocalorie |
| kg | kilogramme |
| t | tonne |
| kt | kilotonne |
| q | quintal |
| l | litre |
| hl | hectolitre |
| m ³ | mètre cube |
| st | stère |

Sigles

AEN (NEA) : Agence pour l'Energie Nucléaire (*Nuclear Energy Agency*)

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AFME (MEFA) : Analyse de Flux de Matière et d'Energie (*Material and Energy Flow Analysis*)

AGRESTE : Service de la statistique et de la prospective du Secrétariat Général du Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt

AIE (IEA) : Agence Internationale de l'Energie (*International Energy Agency*)

AN : Archives Nationales

APUR : Atelier Parisien d'Urbanisme

ASVP : Annuaire Statistique de la Ville de Paris

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CREDOC : Centre de Recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de vie

CDHT : Centre d'Histoire des Techniques (devenu CDHTE : Centre d'histoire des techniques et de l'environnement)

CPCU : Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain

CPDE : Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité
CPDP : Comité Professionnel Du Pétrole
CPECG : Compagnie Parisienne d'Eclairage et de Chauffage par le Gaz
DGEMP : Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières
DRIRE : Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement
EUROSTAT : Office Statistique des Communautés Européennes
FAO : Food and Agriculture Organization
IAU : Institut d'Aménagement et d'Urbanisme
IAURIF : Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Île-de-France
IFIAS : International Federation of Institutes for Advanced Study
INCA : Enquête individuelle et nationale sur les consommations alimentaires
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
NRC : *National Research Council*
ONU (UN) : Organisation des Nations Unies (*United Nations*)
PEGASE : Pétrole, Électricité, Gaz et Autres Statistiques de l'Énergie
PLU : Plan Local d'Urbanisme
PUCA : Plan Urbanisme Construction Architecture
Sessi : Service des Statistiques Industrielles
SGF : Statistique Générale de la France
SOeS : Service de l'Observation et des Statistiques
Syctom : Syndicat intercommunal des ordures ménagères de l'agglomération parisienne
TIRU : Traitement Industriel des Résidus Urbains
TRAPIL : Société des Transports Pétroliers par Pipeline

Introduction générale

À la veille de la révolution industrielle, un homme consommait environ 30 GJ par an ; il consomme aujourd'hui plus de 200 GJ par an dans les pays développés¹. Simultanément, la population mondiale a augmenté d'un facteur 6,6 entre 1800 et 2007². En particulier, entre 1950 et 2000, la consommation énergétique mondiale a augmenté d'un facteur 5,3, passant de 74 EJ à 390 EJ (Exajoule, soit 10^{18} joules) (voir le tableau suivant). Dans cette énergie qualifiée de technique³, environ 10% sont issus d'une source énergétique renouvelable et plus de 80 % proviennent de combustibles fossiles (voir le tableau suivant).

Ces ordres de grandeurs nous renseignent sur ce que peut peser notre vie actuelle en termes matériels, mais ne nous donnent pas une idée concrète de notre impact sur la biosphère. La croissance de la consommation de combustibles fossiles engendre en effet un déséquilibre entre les stocks et les flux de substances, comme le carbone dégagé lors de la combustion, cause majeure de l'altération des cycles biogéochimiques et du changement climatique (Smil, 2008). De plus, la croissance de la consommation de combustibles fossiles qui permet la production d'intrants chimiques pour l'agriculture a un impact considérable sur la productivité biologique qu'elle contribue à faire augmenter (Vitousek et al., 1986) ; le rapport entre la consommation de combustibles fossiles (incluant la consommation pour la machine agricole et le chauffage) et la production biologique primaire du secteur agricole mondial passe de 117-140 ‰ à 195 ‰ entre 1970 et 2000, s'élevant à 12,8 EJ pour 2000 (32% du total des 40 EJ de la production primaire effectuée par l'homme) (tableau suivant I.1). La communauté scientifique s'accorde aujourd'hui sur une émission de 6,5 Gt de CO₂ par an liée à la combustion d'énergie fossile, soit environ 12 % de la production primaire annuelle de l'écosystème terrestre⁴. En termes énergétiques, la

¹ La consommation par habitant et par an à la période préindustrielle dans des pays riches se situait entre 20 et 40 GJ/hab/an (Grubler, 2004, Smil, 2008). La consommation moyenne d'énergie primaire par habitant et par an des pays de l'OCDE atteint 4,70 tonnes d'équivalent pétrole selon l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA, 2008b, p. 48-49).

² La population mondiale était d'un milliard en 1800, selon Grubler (2004). Population mondiale en 2007 selon *Population Reference Bureau* (PRB, 2007, p. 7).

³ L'énergie utilisée dans le système énergétique technique pour produire le travail mécanique, la chaleur pour le chauffage des locaux, la préparation alimentaire, la lumière et le traitement des informations. Voir la section 2.1 pour plus de détails.

⁴ « *La production primaire brute représente la quantité totale de substances élaborées par photosynthèse au cours d'une année par les plantes autotrophes d'un peuplement, ramenée à l'hectare ou au mètre carré, et exprimée en général en unités de poids (t/hab/an)* » (Otto, 1998, p. 122) ; Donnée de 2000, selon

consommation de combustibles fossiles représente environ 20 % de la production primaire de 1333 – 2000 Exajoules (EJ égale à 10^{18} Joules) (Smil, 2008). Compte tenu de la durée du cycle de formation des combustibles fossiles qui est égale à plusieurs milliers de fois celle du cycle de formation de la biomasse végétale (Holland, Turekian, 2010), le rapport entre ces deux consommations est en fait du même ordre de grandeur si l'on prend en considération leur temps de régénération.

Tableau I.1. La production mondiale de l'écosystème terrestre comparée à la consommation énergétique technique mondiale entre 1950 et 2000

| | Productivité primaire (PPN) de l'écosystème terrestre en Gt C | Productivité primaire (PPN) de l'écosystème terrestre en EJ | Biomasse récoltée par l'homme en EJ (d) | Consommation énergétique technique primaire mondiale en EJ | Consommation mondiale de combustibles fossiles en EJ (e) | Consommation mondiale de combustibles fossiles /PPN terrestre (‰) | Apport énergétique anthropique à l'agro-écosystème en EJ |
|------|---|---|---|--|--|---|--|
| 1950 | - | - | 12,0 | 102 | | - | 1,5 |
| 1970 | 46 – 55 | 1512-1808 | 25,0 (b) | 247 | 211 (a) | 117-140 | - |
| 1980 | 56 | 1840 | - | 317 | 269 | 146 | - |
| 2000 | 56,06 | 1842 | 40,0 | 432 | 359 | 195 | 12,8 |

Source : Smil, 2008, Vooyoys, 1979 (pour la valeur minimale, cité par : Ajtay et al., 2011), Likens, 1975 (pour la valeur maximale, cité par : Ajtay et al., 2011), Vitousek, 1986 (123,4 Pg convertis par le facteur de 0,45 tonne de carbone et 15 gigajoules par tonne de biomasse végétale en matière sèche (Smil, 2008)), U. S. Energy Information Administration, 2006, (a) on considère que la consommation de l'énergie nucléaire est quasi nulle en 1970, (b) donnée de 1975

Rôle de la ville dans le processus global d'altération des cycles naturels

Les indicateurs physico-chimiques donnés par Will Steffen et Paul Cruzten (Concentration de CO₂, NO₂, CH₄) montrent que les changements majeurs de l'environnement planétaire ont commencé durant la deuxième moitié du XVIII^e siècle et s'accélérent depuis la fin de la Deuxième Guerre mondiale, période correspondant à l'industrialisation, à la croissance de la population mondiale, et à la croissance de la consommation de tout type de ressources telles que l'eau, la biomasse forestière, le carburant, etc (Steffen et al., 2011). Le processus planétaire

Smil (2008). Ce chiffre s'élève à 7,9 Gt C, soit 29 milliards de tonnes de CO₂ en 2008 (Commissariat général au développement durable, 2010).

d'urbanisation et la diffusion du mode de vie urbain coïncident-ils avec l'accélération des changements globaux ? L'urbanisation est en effet considérée « parmi les signes distinctifs les plus importants du XXe siècle »¹ : alors que seulement 10% de la population globale était constituée de citadins vers 1900, ce taux dépasse aujourd'hui les 50% et augmentera probablement encore dans les cinquante ans à venir (UN population division, 2006, Grimm et al., 2008). La croissance de la population urbaine et l'urbanisation à l'échelle planétaire sont donc considérées comme un des déterminants du changement de l'environnement dont les effets sont locaux, régionaux, voire planétaires.

Le rôle joué par la ville dans les processus de changements globaux est en effet expliqué de façon directe et indirecte, d'une part par la consommation directe de combustibles fossiles et autres matières ainsi que par l'émission de rejets locaux, et d'autre part par la demande en énergie et en matière en amont qui se traduit par une pression environnementale sur le milieu naturel et rural pour l'extraction de matières premières et pour les activités industrielles. Quant aux phénomènes, ils sont multiples tant en nature qu'en portée, du local au global : pollution atmosphérique locale, îlots de chaleur, changements d'usage et de couverture des sols, transformation des cycles biogéochimiques, du climat, de l'hydrosystème et altération de la biodiversité (Grimm et al., 2008).

Ressources naturelles, sociétés, technique

Au delà des questions biophysiques et en particulier des grands cycles biogéochimiques, on s'intéresse ainsi aux modes d'interactions entre sociétés et nature et à leur évolution, telle qu'évoquée à travers la notion de biosphère par l'un des fondateurs de l'écologie scientifique, Vernadski². La question de la dimension historique dans l'interaction entre les sociétés humaines et la biosphère est mise en avant notamment par Martinez-Alier (1987) et par Fischer-Kowalski et Haberl (2007). Durant les deux dernières décennies, des études qualitatives et quantitatives empiriques, notamment à l'échelle nationale, se sont multipliées afin de comprendre les processus socioécologiques³. La notion de système socioécologique, ou d'anthroposystème en France, est proposée pour mettre l'accent sur la dimension biophysique

¹ « Among the greatest distinctions of the twentieth century were its powerful twin surges of population growth and urbanization » (MacNeill, 2001, p. 269)

² Voir le chapitre 1

³ Pour des études quantitatives, voir *Special issue of Ecological economics* dédié à l'histoire de l'environnement volume 41 (2): en particulier les articles de Krausmann, Haberl, 2002, p. 177-201, Schandl, Schulz, 2002, p. 203-221.; Pour une histoire de l'environnement, voir les ouvrages de Siefertle (2001) et de MacNeill (2001).

des sociétés humaines et sur la coévolution entre les sociétés et l'environnement physique. La théorisation de la transition socioécologique est entreprise par le groupe de recherche en Ecologie sociale (Fischer-Kowalski, Haberl, 2007) qui définit celle-ci comme un processus qui implique un changement majeur de l'anthroposystème (système socioécologique), qualifié comme un état nouveau de la société dans son rapport à la biosphère, dont le cycle est probablement plus long que celui de la transition du système sociotechnique¹. Dans cette théorie, les sols apparaissent comme l'outil et le moyen d'interaction entre les sociétés humaines et la biosphère. Le changement d'utilisation des sols joue par conséquent un rôle d'indicateur de ce rapport société-nature dans le système socioécologique et de déterminant dans le changement du métabolisme social. En considérant que nous sommes dans une phase d'études ayant pour but de comprendre la nature et la logique des interactions entre les sociétés et la biosphère, les questions suivantes se posent, qui n'ont pas encore été explorées dans le champ des études socioécologiques :

- Dans un premier temps, quelle est la variabilité spatiale, voire territoriale des phénomènes observés à grande échelle ?
- Dans un deuxième temps, quels sont la place et le rôle du système technique ou technologique en tant qu'outil de manipulation, de modification et de compréhension (symbolique et scientifique) de la biosphère ?

En effet, on constate sans peine que la ville et la société urbaine sont différentes de la campagne et de la société agricole en termes spatiaux et matériels. Compte tenu de sa définition biophysique du point de vue historique, la ville est tributaire de milieux ruraux et d'écosystèmes naturels situés à l'extérieur du périmètre urbain². De fait, la ville et son environnement biophysique, dans lequel elle se ravitaille en ressources naturelles, sont spatialement dissociés. De plus, compte tenu de l'urbanisation s'effectuant spatialement de façon inégale, par exemple en France durant le XIXe et le XXe siècle, il existe probablement des temporalités différentes du point de vue de la diffusion technique et culturelle dans les villes.

¹ « The notion of transition implies a major change – not incremental adjustments or improvements, but a qualitatively new state of the system » (Fischer-Kowalski, Haberl, 2007, p.1).

² On reprend la définition de la ville donnée par Paul Claval (1974). Il constate la difficulté de définir une ville selon des critères morphologiques en annonçant qu'« Il est difficile de satisfaire d'une multiplicité aussi grande de critères ». Néanmoins, « Le seul trait commun... », qui distingue une ville d'autres espaces selon lui, « ... c'est celui qui résulte de la faible part de l'activité consacrée à la production alimentaire ... La ville dépend en effet, en matière alimentaire, d'un support extérieur ». Il désigne « la faible part de l'activité consacrée... » comme la caractéristique de la ville. En revanche, il n'exclut pas la possibilité d'existence d'une ville qui se compose majoritairement d'habitants agriculteurs, en citant notamment des exemples de villes italiennes.

Du point de vue écologique, les villes et les milieux naturels et ruraux les approvisionnant en substances essentielles, souvent spatialement voisins, ont eu historiquement des liens physiques, sociaux et politiques étroits. Ces constats ne forment probablement pas une théorie générale, mais sont attestés par de nombreux cas empiriques¹. Le modèle de Von Thünen est l'un des modèles spatiaux les plus connus décrivant la ville et ses milieux ruraux et naturels dans leur ensemble. Ce modèle initialement proposé au XIXe siècle réapparaît dans les dernières décennies pour comprendre – ou renforcer – le rôle de l'hinterland rural en matière d'approvisionnement alimentaire de la ville dans la géographie économique (voir Block, 2003, Peet, 1969). Bien que ce modèle repose sur de nombreuses hypothèses simplificatrices, il est considéré comme utile pour observer l'évolution du milieu, pour étudier les facteurs déterminants et leurs relations, et en particulier le mécanisme par lequel l'évolution des apports techniques et économiques influence l'évolution de la géographie de l'approvisionnement. Il peut ainsi servir comme outil de compréhension de l'organisation et de l'évolution spatiale biophysique du milieu rural-urbain en fonction de celles des contextes technicoéconomiques.

Revenons à la question des systèmes techniques. Si la ville est dissociée de son environnement naturel, comment et par quels moyens interagit-elle avec son environnement biophysique et qu'est-ce qui détermine la perception qu'ont les sociétés urbaines de leur environnement ? Cette question se pose, puisque plus les sociétés sont développées en termes technique et économique, moins elles interagissent directement avec la biosphère à travers l'usage des sols. C'est ce que l'on observe dans les sociétés qui se caractérisent par la mécanisation et plus généralement l'industrialisation agricoles, et par la diminution de la population rurale. Dans le cas de la ville, cette interaction passe par des infrastructures urbaines et extra-urbaines, qui font partie d'un système sociotechnique. On entend ici par système sociotechnique non seulement une série d'infrastructures physiques et d'équipements technologiques, mais aussi les acteurs organisés et les individus impliqués dans la fourniture et l'utilisation des services, les règles et les normes institutionnelles pour le fonctionnement du système, les valeurs culturelles et les ressources financières pour les construire et les entretenir (Moss, 2009). Il est important d'établir un lien entre ces systèmes sociotechniques et l'approvisionnement et la consommation énergétique de la ville. La démarche nécessite une approche multiscalaire, puisque l'échelle de la consommation de la ville est locale, tandis que l'échelle de ces grandes infrastructures s'étend

¹ Voir notamment des cas d'études sur l'empreinte environnementale urbaine sur le long terme, les articles parus dans le volume 12 (2) de la revue *Regional Environmental Change*, notamment l'Introduction de l'issue spéciale sous le titre de « History of the urban environmental imprint: introduction to a multidisciplinary approach to the long-term relationships between Western cities and their hinterland » (Billen et al., 2012).

aujourd'hui à l'international. De plus, la ville elle-même ainsi que ces infrastructures sont dynamiques dans le temps.

Concept de métabolisme territorial comme outil d'analyse

Les études socioécologiques locales sont encore rares (citons néanmoins le cas de Vienne et de Linköping (Krausmann, 2006, Schmid Neset et al., 2008). Elles nécessitent des efforts méthodologiques importants. L'ambition de cette thèse est à la fois de contribuer à des cas d'études empiriques dans le domaine de l'écologie territoriale telle que définie par Barles, soit « l'analyse des consommations d'énergie et de matières d'un territoire donné et de leur circulation au sein de celui-ci qu'elle emprunte à la théorie des écosystèmes » (Barles in : Merlin, Choay, 2010) et de proposer des dispositifs méthodologiques adaptés à des études de cas locales et à long terme, puisqu'on tente de démontrer qu'il est possible de travailler à un niveau fin de l'échelle spatiale, inférieur à l'échelle nationale à laquelle on trouve de plus nombreux exemples de recherche (Krausmann, Haberl, 2002, Schandl, Schulz, 2002).

Nous avons utilisé la notion de métabolisme territorial pour signifier à la fois les flux de matières et d'énergie et l'échange de ceux-ci entre un territoire et son environnement biophysique. Le terme « métabolisme » est employé dans la recherche scientifique, notamment dans le domaine de l'écologie industrielle et de l'économie écologique, pour mettre l'accent sur la dimension matérielle de la société humaine¹. La notion de métabolisme territorial qu'on emploie dans cette thèse par la suite implique, hors ces aspects biophysiques et historiques, la spatialité du métabolisme et la spécificité de territoires en termes d'interactions biophysiques. Alors que des études de cas sur le métabolisme social ou industriel sont majoritairement réalisées à l'échelle nationale, échelle classique de décision économique et politique, on met l'accent sur l'importance de la compréhension du métabolisme territorial, échelle inférieure à la première. Cette notion vise à comprendre ces interactions et à faire une analyse à l'échelle des gouvernances locales émergeant actuellement et étant considérées comme importantes pour la maîtrise de l'environnement².

¹ On explique plus en détail cette notion dans le chapitre 1.

² En France, la législation réaffirme - depuis la loi fondatrice de 1906 qui définit la compétence de la collectivité en matière des réseaux urbains - la collectivité en tant que l'organisme compétent en matière de gestion de l'énergie : la loi du 10 février 2000 sur la production et distribution d'énergie et la loi de programme du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique (dite loi POPE). (Poupeau, 2009). Pour la question et l'enjeu de la gouvernance locale, voir l'article de Collier, Lofstedt (1997).

La consommation d'un territoire se caractérise en effet selon ses déterminants socio-éco-spatiaux, urbain, rural, voire périurbain (Barles, 2009a). On fait l'hypothèse que la consommation urbaine peut se distinguer de la consommation rurale, voire de la consommation périurbaine. Du fait qu'un territoire inclut plusieurs espaces hétérogènes, le métabolisme territorial peut inclure le métabolisme urbain et rural ou des métabolismes de fragments territoriaux (industriel, périurbain) et peut avoir certaines tendances plus caractéristiques en fonction de l'organisation spécifique spatiale, sociale et industrielle de chaque territoire. Le métabolisme territorial met ainsi l'accent sur des effets différenciés dans l'espace. Il peut se caractériser par le rapport entre la consommation directe, qui entraîne l'altération de l'environnement local, et la consommation indirecte, qui entraîne des impacts indirects à une échelle supérieure, régionale, voire globale.

La consommation urbaine est considérée comme une donnée sociale et biophysique permettant d'observer et de décrire à la fois la dimension écologique de la ville, en termes de quantité et de type de ressources consommées, et sa dimension sociale en termes de consommation d'un type de produit (ou de ressources énergétiques) et d'organisation collective de son approvisionnement.

L'énergie comme objet de recherche possède des avantages ainsi que des inconvénients. L'énergie, étant un indicateur synthétique, permet de faire une analyse à travers le temps et l'espace. Cependant, l'énergie est une propriété physique et non une chose et se définit comme suit : « la propriété d'un système – sa capacité de travail. L'énergie et le travail ont la même unité : le joule (J). Il est commode de distinguer l'énergie entre l'énergie cinétique (énergie du mouvement) et l'énergie potentielle (énergie « emmagasinée »). Il existe différentes formes d'énergie (chimique, électrique, nucléaire, etc.); la seule différence réelle est dans le système d'études. Par exemple, l'énergie chimique est l'énergie cinétique et celle potentielle d'électrons dans un composé chimique¹ » (Daintith, Rennie, 2005, p. 85). Cette propriété se manifeste sous différentes formes (chaleur, mouvement, etc.) et différents vecteurs. De plus, elle peut faire l'objet de transformations et par conséquent être exprimée sous forme de source énergétique (énergie primaire) ou d'énergie secondaire ; d'énergie finale ou d'énergie utile². Il en résulte aussi une grande complexité du système sociotechnique dédié à l'énergie, qu'il faudra analyser.

¹ « *A property of a system - its capacity to do work. Energy and work have the same unit: the joule (J). It is convenient to divide energy into kinetic energy (energy of motion) and potential energy ('stored' energy). Names are given to many different forms of energy (chemical, electrical, nuclear, etc.); the only real difference lies in the system under discussion. For example, chemical energy is the kinetic and potential energies of electrons in a chemical compound* », traduction personnelle.

² On explique la notion de source énergétique et d'énergie dans le chapitre 2.

Cas d'études

Il est probablement trop tôt pour réaliser une synthèse et un schéma général de transition des villes en termes socioécologiques. L'enjeu majeur de ce travail est d'expliquer et de comprendre les processus de transition énergétique au travers d'une étude de cas.

Paris et son agglomération possèdent une place privilégiée parmi les villes françaises voire mondiales dans la recherche sur les interactions à long terme entre la société urbaine et la biosphère. L'agglomération parisienne en tant que capitale de la France a été en tête de la croissance urbaine et industrielle depuis le début du XIXe siècle. Plusieurs auteurs ont montré assez tôt les impacts économiques et environnementaux résultant de sa consommation sur le milieu rural et forestier (Le bon de Ferrussac, 1824). La consommation directe du territoire fut ainsi une préoccupation majeure de l'autorité publique locale et nationale. La capitale est par conséquent particulièrement surveillée, mesurée et étudiée jusqu'au milieu du XXe siècle afin d'organiser et de sécuriser l'approvisionnement, notamment en denrées alimentaires principales et en combustibles (Barles, 2009b). En termes énergétiques, si la consommation directe est connue par l'administration publique, la consommation indirecte, ainsi que les dispositifs qui y sont liés, est connue par les données des entreprises locales. On constate notamment que l'histoire d'entreprises énergétiques est explorée abondamment dans les années 1990 et 2000, et les sources sur les dispositifs techniques intermédiaires sont particulièrement bien identifiées¹.

Structure de la thèse

Ce document est organisé en six chapitres, qui distinguent deux phases, la première portant sur une réflexion d'ordre méthodologique (chapitres 1 à 3), la seconde consistant en l'exposé des résultats principaux (chapitres 4 à 6) ».

Le chapitre 1. Écologie urbaine et énergie a pour but de faire un état de la recherche sur l'écologie de la ville depuis 1960 jusqu'à nos jours. En termes pratiques, en lien avec cette introduction, il définit les notions principales utilisées dans la thèse relatives à l'écologie et à l'écologie territoriale, telles que le métabolisme social et territorial, l'anthroposystème, et la transition socioécologique. En termes scientifiques, il s'agit de définir le champ d'études et le positionnement de la recherche.

¹ Voir le chapitre 3.

Le chapitre 2. Méthodologie : bilan de matière et d'énergie et empreinte environnementale discute la méthodologie. La notion de métabolisme repose sur l'identification de flux et de stocks biophysiques qui impliquent une analyse de flux de matières et d'énergie. La méthode d'Analyse de flux de matières (AFM, MFA en anglais) est une méthode normalisée en ce qui concerne la définition de périmètres et l'ensemble des indicateurs. La méthode de l'Analyse de flux de matières et d'énergie (AFME, MEFA en anglais) est une variante de l'AFM qui utilise à la fois les unités de masse et d'énergie pour le bilan, concernant uniquement les matières à contenu énergétique (energy rich material) (Haberl, 2001a). L'adaptation à l'échelle locale de la méthode d'AFM est discutée et réalisée par Barles (2009a) avec le cas d'étude de Paris et de l'Île-de-France en 2003. Ce chapitre discute la condition d'application locale de ces méthodes et définit les méthodes et les indicateurs utilisés dans nos cas d'études.

Le chapitre 3. Consommation énergétique parisienne : périmètre, population et données historiques et statistiques sur la consommation énergétique, XIXe – XXIe siècles vise à définir les périmètres d'études en termes de population concernée et de limites spatiales. De plus, on cherche à présenter et discuter les données historiques, techniques et statistiques mobilisées et la méthode d'interprétation, de compilation et de traitement de ces données. Ces données statistiques ou techniques sont, de notre point de vue, des indicateurs précieux permettant de comprendre le niveau d'appropriation de l'énergie.

Le chapitre 4. Matières premières et géographie des secteurs de transformation concerne les convertisseurs énergétiques, qui font partie du métabolisme industriel, lié à l'approvisionnement en source énergétique pour la ville. On essaie d'observer leur métabolisme industriel en lien avec le changement de ressources (matières premières) à l'intérieur des secteurs de la transformation. La structure du métabolisme de la ville en termes de flux directs et indirects est déterminée par le métabolisme industriel des secteurs, en particulier la localisation géographique des secteurs de transformations énergétiques : localisation des unités de production et diffusion des réseaux de distribution.

Le chapitre 5. Bilan de l'énergie et des matières expose les résultats en ce qui concerne le métabolisme parisien entre 1801 et 2006. En utilisant les indicateurs de consommation énergétique finale, de consommation directe du territoire et de demande totale de matières et d'énergie, on observe à la fois la quantité d'énergie disponible pour la consommation parisienne et de sources énergétiques directement et indirectement mobilisées par le territoire¹. La

¹ Des flux directs et indirects, voir le chapitre 2.

comparaison temporelle s'effectue pour le territoire de la ville de Paris entre 1801 et 2006. Ensuite, la comparaison spatiale se fait entre la consommation du centre-ville, de la proche banlieue et de l'espace périphérique de l'agglomération. On met notamment l'accent sur la spécificité du métabolisme selon différents territoires dans la même agglomération et les interactions entre ces derniers liées aux processus de croissance de l'agglomération urbaine.

Dans le chapitre 6. Aires d'approvisionnement énergétique de la région parisienne : XIXe – XXe siècles, on examine la notion d'empreinte environnementale en particulier pour le cas de la consommation d'énergie pour son système technique. La notion d'empreinte environnementale, dans l'écologie, renvoie en effet au concept de flux et de stocks biogéochimiques substantiels élémentaires (P, S, C, N) ou bien à la surface nourricière pour les aliments (Billen et al., 2009). En revanche, pour l'énergie technique et en particulier pour une analyse historique, il est difficile d'adopter cette approche, puisqu'il ne s'agit pas d'une substance ou d'une matière comme cela a été évoqué plus haut. Néanmoins, la notion d'empreinte relève ainsi de la notion d'appropriation d'écosystèmes naturels. De ce point de vue, on se concentre sur le moyen d'appropriation des ressources énergétiques par la ville, qu'on définit comme le système d'approvisionnement énergétique technique. Des milieux à l'intérieur de l'agglomération comme à l'extérieur de celle-ci où s'installent les réseaux physiques et les unités industrielles sont en effet durablement marqués par leurs impacts considérables, qui font partie des impacts directs et indirects qu'engendre la ville pour son approvisionnement énergétique.

Chapitre 1. Ecologie urbaine et énergie

1.1. Introduction

Durant la deuxième moitié du XXe siècle, le développement de la science de l'écologie apporte un regard nouveau sur la relation entre la ville et les ressources naturelles. L'approche écosystémique de la ville, autrement dit l'étude du métabolisme urbain, se développe à partir des années 1960. Elle essaie en particulier d'expliquer le lien entre le système naturel et le système urbain en termes de matière et en énergie. Elle est fondée sur la théorie des écosystèmes et se focalise sur l'analyse de flux de matière et d'énergie. Au début, dans les années 1960 et 1970, on s'intéressait à quantifier ces flux et à les caractériser en lien avec le système urbain. Depuis les années 1990, la question des transitions socio-naturelles ou socioécologiques se pose de plus en plus. Observer le changement du métabolisme dans le temps a pour but d'expliquer cette transition. On s'intéresse notamment à expliquer l'évolution du lien entre la société (ou la ville), les ressources naturelles et l'environnement.

Ce chapitre a pour objet d'explorer le champ théorique de l'écologie en particulier en ce qui concerne la ville. Il s'agit précisément d'expliquer la théorie de l'écologie de la ville et son évolution depuis sa naissance dans les années 1960. Le chapitre vise à réaliser un état de lieux non exhaustif en évoquant des publications et des organisations scientifiques importantes autour des concepts de métabolisme urbain (des années 1960 et 1970, notamment), de métabolisme industriel, de métabolisme social et de métabolisme territorial. On va expliquer brièvement dans la section suivante 1.2 les trois concepts principaux, la biosphère, l'écosystème et le métabolisme qu'on évoque et utilise dans cette thèse. La section 1.3. explique le contexte d'émergence du concept de métabolisme urbain au cours des années 1960 et 1970 en mettant l'accent sur la question des flux d'énergie. La section 1.4 présente le concept de métabolisme industriel. On parle notamment du développement méthodologique de l'écologie industrielle et de l'extension de celle-ci à l'échelle régionale et urbaine. La section 1.5 discute la théorie récente du métabolisme de la société et de la ville en lien particulièrement avec la théorie de la transition socioécologique.

1.2. Concepts de biosphère, d'écosystème et de flux d'énergie et de matière

1.2.1. Du concept de la biosphère à l'analyse de flux d'énergie et de matière

La science de l'écologie est née au XIXe siècle. C'est cependant au début du XXe siècle que des communautés scientifiques dédiées à l'écologie se fondent et que des concepts fondamentaux tels que la biosphère et l'écosystème sont introduits. À cette période, deux idées principales apparaissent sur les êtres vivants et leur environnement. La première est qu'une communauté vivante forme un ensemble et possède un fonctionnement qui n'est pas une simple juxtaposition de ceux des individus. La deuxième est que cette communauté établit une relation spécifique avec son environnement notamment pour obtenir sa nourriture (Ricklefs, Miller, 2005). Au cours des années 1920, le concept de biosphère est né avec le géochimiste Vladimir Vernadski (2002)¹. Il développe la notion abstraite d'un ensemble des composants biologiques et géologiques de la Terre, proposée par le géologue Eduard Suess. Il conceptualise la partie extérieure de la planète Terre, qui comprend les organismes vivants et les composants géologiques (la pédosphère), comme un ensemble des matières. Cette dernière joue le rôle de source de transformation de l'énergie solaire en une énergie libre (*free energy*) qui permet de former les organismes vivants et de transformer la pédosphère.² Un peu plus tard, le concept d'écosystème est proposé par le botaniste Arthur Tansley (1935)³. Selon la théorie systémique, l'écosystème constitue « une entité à part entière qui a une propriété différente d'une somme ou d'une superposition de chaque élément » (Levêque, 2001, début du chapitre 3.2). À sa naissance, le concept est théorique et abstrait, et est adopté pour comprendre le fonctionnement de l'ensemble formé par la communauté végétale et son environnement physique.

¹ Pour expliquer le concept de la biosphère et des flux d'énergie et de matière, on distingue l'ouvrage de C. Levêque, 2001, *Écologie: De l'écosystème à la biosphère*, Paris, Dunod, 502 p, et de J.-P. Deléage, 1991, *Histoire de l'écologie : une science de l'homme et de la nature*, Paris, La Découverte, 330 p.

² Selon l'expression de Vernadski, la biosphère est "*the outer layer of the Earth must, therefore not be considered as a region of matter alone, but also as a region of energy and a source of transformation of the planet. To a great extent, exogenous cosmic forces shape the face of the Earth, and as a result, the biosphere differs historically from other parts of the planet*", Vernadski selon la citation de Levêque (2001). Selon Levêque, cette notion est née du croisement de la géologie (sa discipline initiale), la biochimie, notamment développée en France et en Allemagne par J-B Boussinault, J. Leibig, et la physique (thermodynamie) du XIXe siècle.

³ Au début du XXe siècle, on voit la naissance de la Société Britannique d'Écologie avec Arthur Tansley comme président, qui succède aux Comité Britannique des Végétations. Le but de sa création est d'avoir une vision plus large de la recherche que celle de l'étude des communautés végétales. Voir, The National Archives. [s.d.]. *British Ecological Society*. Catalogue of British Ecological Society GB 1858 BES, p. 38. [réf. du 5 juillet 2011], Format PDF :

<http://www.nationalarchives.gov.uk/nra/onlinelists/GB1858%20BES.pdf>

Les notions de biosphère et d'écosystème ont par la suite évolué. Cette évolution va de pair avec l'élargissement des objets d'études et avec l'intégration d'autres disciplines dans l'écologie. Après la Deuxième Guerre mondiale, l'écologie connaît une diversification de ses domaines de recherche, notamment par l'intégration de l'agronomie et de la climatologie (Burgess, non daté). Le concept de biosphère est précisé : on la définit comme l'ensemble biotique (biome) et abiotique, qui comprend les êtres vivants et la pédosphère, de même l'hydrosphère et l'atmosphère (Levêque, 2001). L'écosystème quant à lui désigne un fragment de la biosphère plus ou moins autonome, quelle que soit la taille du système¹. La division de la biosphère en sous-ensembles permet aux écologues de travailler plus facilement. Le but est de saisir le fonctionnement d'ensemble de l'écosystème planétaire à travers l'étude d'écosystèmes élémentaires. Durant la deuxième moitié du XXe siècle, le terme écosystème devient courant dans la littérature scientifique, tant dans l'écologie naturaliste que dans d'autres disciplines. Les lacs, les bassins-versants et les rivières en particulier deviennent des objets de recherche privilégiés des écologues, notamment pour tracer le flux de nutriments et de substances dissoutes dans l'eau (Odum et al, 1953). L'écosystème urbain et l'écosystème industriel se situent ainsi et initialement en dehors du champ classique de l'écologie scientifique. La notion contemporaine d'« écosystème » est donnée par Likens. Selon lui, l'écosystème se définit comme une unité géographique délimitée qui comprend les éléments biotiques et abiotiques². En effet, la délimitation d'un écosystème est difficile, car la frontière d'un écosystème fonctionnel est floue. On explique notamment que ce phénomène est issu du dynamisme des espèces et de leur environnement dans le temps et dans l'espace. Il est donc difficile de cartographier et de schématiser un écosystème, alors qu'il l'est beaucoup moins de schématiser les flux d'énergie et de matière. En pratique, la délimitation d'un écosystème se fait souvent de manière opérationnelle en fonction des processus étudiés ou des questions posées. Par conséquent, l'analyse de flux de matière et d'énergie pour une entité géographique définie prend une grande importance dans l'écologie.

Le concept de flux d'énergie apparaît également durant la première moitié du XXe siècle et est devenu fondamental pour expliquer le métabolisme d'un organisme vivant. D'une part, l'adoption de ce concept dans l'écologie enrichit le vocabulaire de l'écologie, notamment par celui de l'économie : production, consommation, croissance, rendement et budget énergétique. D'autre part, il influence la naissance de l'écologie des écosystèmes qui représente une des branches majeures de l'écologie moderne. A l'origine, le concept de flux d'énergie était une

¹ On reviendra sur ce point dans la section suivante.

² « [...]spatially explicit unit of the earth that includes all of the organisms, along with all components of the abiotic environment within its boundary » (Likens, 1995, p. 9).

notion abstraite et contribuait surtout, au sein de la biologie, à comprendre le fonctionnement physiologique d'un organisme vivant. Pendant la première moitié du XXe siècle, Lotka applique la thermodynamique à l'étude de l'écosystème par analogie entre le fonctionnement de la planète et celui de la machine (Ricklefs, Miller, 2005). Il considère que « la taille d'un système et la vitesse des transformations en son sein sont déterminées en fonction de certains principes thermodynamiques » (Ricklefs, Miller, 2005, p. 176). L'adoption de ce postulat a pour but d'expliquer la croissance de la population d'une communauté vivante. Il donne notamment la possibilité de calculer la productivité et l'efficacité du système sur une population donnée. Au milieu du XXe siècle, grâce à Lindeman, ce concept est étendu à la chaîne alimentaire¹. Selon lui, le cycle trophique est un cycle fondamental qui assure le transfert de matière et d'énergie dans l'écosystème, des producteurs aux consommateurs et aux décomposeurs. L'énergie ici est l'unité de mesure du fonctionnement d'un écosystème, notamment pour calculer la productivité (différence entre la production primaire brute et la dépense par la respiration, qui correspond à la quantité disponible pour le niveau trophique supérieur) et l'efficacité (le rendement, ratio de la production d'un niveau trophique supérieur à un niveau trophique inférieur) du système dans une chaîne trophique. Cette approche se diffuse dans l'écologie au cours de la décennie suivante, notamment grâce aux frères Odum (Deléage, 1991).

Formalisée dans les années 1950 par les frères Eugene Odum et Howard T. Odum, l'écologie des écosystèmes est fondée notamment sur la théorie des écosystèmes, qui accorde une place majeure à l'analyse des flux de matière et d'énergie. E. Odum contribue à l'élaboration de cette théorie, en améliorant notamment la compréhension du fonctionnement de l'écosystème par une approche holistique. Son frère, H. T. Odum développe la méthode de l'analyse de flux de matière et d'énergie. Selon cette théorie, l'écosystème se structure en effet par les cycles biogéochimiques de matière et d'énergie, qui expliquent le processus et le mécanisme de production, de transfert de matière organique, de décomposition et de minéralisation. Ensuite, on regroupe et attribue les rôles de producteur, décomposeur, fixateur d'azote aux différents agents dans le système (des populations microbiennes, végétales ou animales) sur la base de ces processus (Levêque, 2001). En 1956, H. T. Odum trace le diagramme de flux d'énergie et de matière d'une rivière en état stationnaire sur la base de l'étude du cas de Silver Springs en Floride (figure 1.1). Ce diagramme devient la référence la plus importante de l'analyse de flux d'énergie et de matière dans les années suivantes.

¹ Lindeman propose un système de la relation générale de cycle alimentaire du système lacustre, voir Lindeman, 1942.

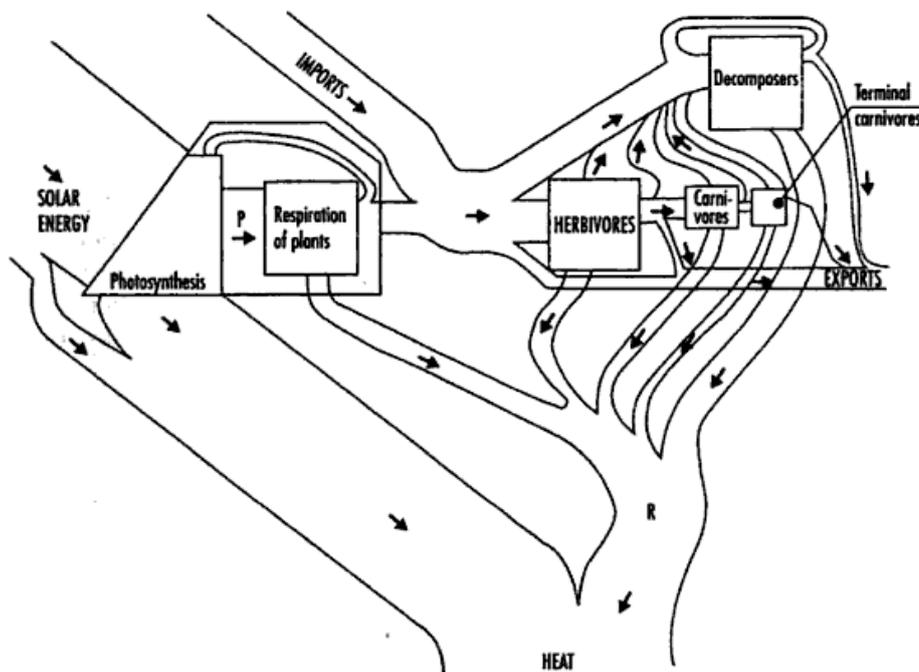


Figure 1.1. Flux d'énergie et de matière dans l'approche tropodynamique de H.T. ODUM.

Source : ODUM 1956, cité par : Deléage, 1991, p.139.

1.2.2. Flux d'énergie et de matière dans le système planétaire

Selon Vernadski, l'énergie disponible sur la Terre est ainsi en quasi-totalité issue du bilan d'entrée et de sortie de l'énergie solaire à l'exception de l'énergie géothermique issue de la radiation du noyau et de la croûte terrestre et de l'énergie nucléaire¹. Dans la biosphère, cette énergie disponible possède de multiples formes (chimique, thermique, électrique, gravitationnelle, etc.), qui conditionnent sa qualité finale. Le cycle de l'énergie se déroule dans un système dissipatif et ouvert, du moins qui ne se ferme pas à l'échelle planétaire, dans lequel la matière joue un rôle d'assimilateur par la photosynthèse, de transformateur par la chaîne alimentaire et de vecteur (stockage et transport) de l'énergie (Levêque, 2001). L'émergence du concept d'énergie biologique étend la notion d'énergie auparavant limitée au système technique qui s'intéresse en particulier à l'énergie utile produite².

¹ Pour le bilan de l'énergie solaire qui atteint la Terre, ERBE (Earth Radiation Budget Experiment). 2005. The Earth Radiation Budget Experiment. NASA <http://asd-www.larc.nasa.gov/erbe/ASDerbe.html>; pour l'énergie géothermique, vers 2000, 0,5 % de la production d'électricité du monde est assuré par cette énergie géothermique, selon Smil (2002).

² Voir la section 1.3 et 1.4.

Le métabolisme désigne le processus de transfert d'énergie à travers différentes matières dans la physiologie végétale et animale. Lorsque l'on parle de l'énergie métabolisée ou de l'énergie métabolisable, se pose la question de l'énergie utile ou utilisée pour le fonctionnement métabolique d'un organisme vivant, par opposition à la perte ou à la fraction excrétée. La production désigne quant à elle l'énergie stockée dans cet organisme et qui est disponible pour un autre organisme à un niveau trophique supérieur. Comme le montre le schéma suivant (figure 1.2), la production primaire dans l'écologie est le résultat du processus d'assimilation de l'énergie solaire par la photosynthèse¹, avec laquelle un organisme végétal synthétise de manière autonome des molécules riches en énergie (il est donc appelé autotrophe). La production primaire brute (PPB) mesure l'activité de la photosynthèse alors que la production primaire nette (PPN) désigne la différence entre la production primaire brute et l'énergie utilisée pour la respiration des plantes. La quantité de matière et d'énergie produite est ensuite évaluée en carbone, en matière sèche ou en énergie stockée. Cette dernière est évaluée par son pouvoir calorifique qui peut être déterminé théoriquement par son contenu en certaines substances (en carbone par exemple) ou expérimentalement dans une bombe calorimétrique (Chatzimpiros, 2011). La production est souvent exprimée en quantité de masse rapportée au volume (tC/m³, tMS/m³ (matière sèche (MS)) ou en unité de surface (tC/ hectare, tMS/hectare, Mcal/hectare). La productivité est définie comme la production sur un temps donné (par an par exemple) (Levêque, 2001).

Pour les animaux, l'expression d'énergie métabolisée (ou métabolisable) est utilisée pour désigner la fraction d'énergie disponible pour le fonctionnement métabolique animal (ME : *metabolized energy*) qui est la différence entre l'énergie brute (IE, Ingested Energy, autrement dit le pouvoir calorifique des aliments ingérés) et la fraction excrétée par les fèces, les urines et les gaz métaboliques². Pour la production secondaire dans l'organisme hétérotrophe (herbivore, carnivore), il est difficile de standardiser la méthode du fait de la complexité des chaînes trophiques. Néanmoins, dans la science animale et dans la gestion d'un cheptel, on calcule communément la productivité biologique par la comparaison entre la quantité de consommation de matière première (la phytomasse) et celle de production de matière carnée des animaux obtenue sur un temps donné (Levêque, 2001).

¹ La fraction de l'énergie solaire qui est assimilée est de l'ordre de 2% selon l'analyse énergétique du champ de maïs de Transeau (1926).

² Ce processus forme une cascade de flux énergétiques avec de nombreuses pertes (FAO, 2003, Merrill, Watt, 1973).

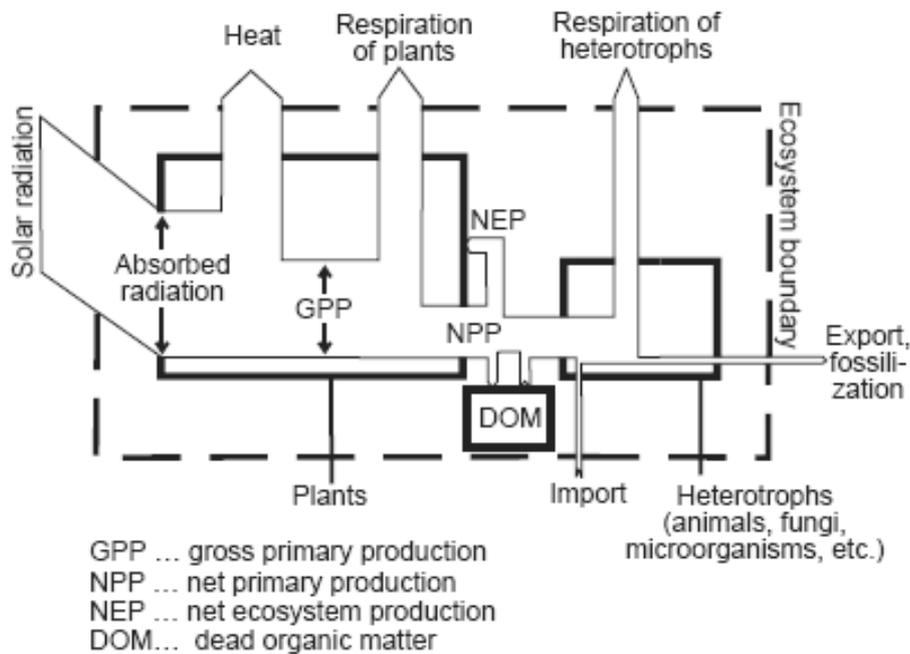


Figure 1.2. Diagramme schématique de la tropodynamie de flux d'énergie écologique. Source : Haberl et al. 2004. (Gross primary production (GPP) : production primaire brute (PPB), Net primary production (NPP) : production primaire nette (PPN), dead organic matter (DOM) : matière organique morte (MOM))

Chez Lindeman, le métabolisme énergétique est expliqué de manière linéaire dans la chaîne alimentaire, de l'autotrophe à l'hétérotrophe du niveau supérieur. Dans le domaine de l'écologie scientifique, la productivité (autrement dit l'efficacité de production (E)) est mesurée par la quantité de biomasse produite par une unité spatiale (P/S : production par unité spatiale) sur un temps (T) donné. Elle comprend par conséquent des variables temporelles et spatiales ($P=B/(T \times S)$) ; où B représente la biomasse, S la surface et T le temps ; voir la section précédente) (Levêque, 2001). La théorie des écosystèmes a notamment pour but de comprendre le fonctionnement du système énergétique et des matières en lien avec la productivité de la biosphère. Dans l'écologie, la productivité n'est pas la même selon les différentes sources énergétiques, la biomasse agricole et forestière et les combustibles fossiles, car ces sources énergétiques ont un cycle de production différent : le cycle de formation des combustibles fossiles est très long (équivalent à plusieurs milliards d'années de photosynthèse), sa productivité écologique est théoriquement plus faible que celle des végétaux, voire tend vers zéro.

Appropriation humaine de la production primaire nette (*HANPP*)

L'indicateur emblématique HANPP est mesure le niveau d'anthropisation de l'écosystème planétaire, qui est largement à l'origine des travaux sur l'empreinte écologique et l'empreinte environnementale. Après de longues années de recherche (depuis les années 1960) pendant lesquelles les efforts sont menés pour déterminer la part d'anthropisation dans l'écosystème planétaire (de la productivité biologique de la planète), Vitousek, Enrich(s) et Matson proposent un nouvel indicateur dans les années 1980 : l'Appropriation humaine de la production primaire nette (HANPP suite au nom anglais *Human appropriation of net primary production*). Cet indicateur a pour objet de mesurer le niveau de la domination humaine sur l'écosystème naturel et il porte sur l'ensemble des impacts humains sur la productivité biologique. Il comprend la part de la biomasse utilisée (*NPP used ou harvested*) et détruite (*NPP destroyed*) par l'homme et est égale à la différence entre la production totale potentielle primaire nette et celle qui reste dans les écosystèmes. Ainsi, l'indicateur comprend la part de la biomasse pour la nourriture et d'autres usages tels que l'usage thermique (*fuel use*) et ou l'usage de matière (pour la construction par exemple). Il peut être exprimé en flux de matière (kg de matière sèche), en flux de substance (kg C) et en flux énergétique (joule).

1.3. Émergence du concept de métabolisme urbain (1950 – 1981)

Depuis les années 1960, l'objet de l'écologie s'est élargi, avec notamment un intérêt pour l'analyse de l'impact humain sur les écosystèmes naturels. Jusqu'aux années 1960, néanmoins, l'étude des écosystèmes se faisait sans une théorie unifiée et une organisation scientifique coordonnée (Levêque, 2001). En 1964, à l'initiative du Conseil International de l'Union Scientifique (*International Council of Scientific Unions*) et de l'Union Internationale de la Science Biologique (*International Union of Biological Science*), le Programme International Biologique (IBP, acronyme en anglais) est lancé pour dix ans¹. Le programme définit les grands objectifs de l'écologie scientifique. Elle a pour objet d'apporter les connaissances notamment

¹ National Academy of Sciences (NAS), International Biological Program, [en ligne] [réf. du 15 déc. 2012], Disponible sur la toile : http://www7.nationalacademies.org/archives/International_Biological_Program.html#P299_15278.

sur 1) le changement de l'environnement causé par l'homme, 2) la productivité biologique de la planète, 3) l'accroissement de la productivité biologique au profit de la société humaine et 4) l'adaptabilité de la société humaine au changement (Smith, 1968). Le programme n'atteint pas tous les objectifs qui sont annoncés, mais contribue surtout à la connaissance des grandes catégories des biomes, notamment à celle de leur productivité biologique et des flux de matière et d'énergie qui les caractérisent¹.

L'année suivante, on remarque la publication de l'article, « *The metabolism of the city* » par Abel Wolman, ingénieur spécialisé en eau et en assainissement (Wolman, 1965)². Avant la publication de cet article, Wolman participe (en 1962) à la réalisation d'un inventaire des ressources naturelles des Etats-Unis initié par l'Académie des Sciences Américaine. Il soulève dans son rapport le problème de la consommation croissante d'eau aux États-Unis (Wolman, 1962). L'expression « métabolisme urbain » n'était pas employée ; néanmoins son approche était déjà holistique puisqu'il analysait les flux d'eau depuis la précipitation jusqu'aux usages finaux. Il simule ensuite le besoin métabolique (*the metabolic requirement*) d'une ville américaine fictive d'un million d'habitants en eau, en alimentation et en énergie et montre que la consommation urbaine d'eau occupe une part essentielle du besoin métabolique (figure 1.3). L'article mentionne la notion de métabolisme de la ville de manière explicite comme suit: « *The metabolic requirements of a city can be defined as all the materials and commodities needed to sustain the city's inhabitants at home, at work and at play* ».

Cependant, il ne cherche pas à aller loin dans la conceptualisation du métabolisme urbain. En analysant le flux d'entrée et de sortie des matières, il montre simplement l'utilité de l'approche systémique de la consommation urbaine de ressources surtout en eau. Selon lui, les villes affrontent trois problèmes métaboliques majeurs qui deviennent de plus en plus aigus en parallèle avec leur croissance. Ce sont : 1) l'approvisionnement en eau, 2) l'évacuation efficace des eaux usées, et 3) le contrôle de la pollution atmosphérique. Sur la base de la réflexion sur l'approvisionnement en eau, il soulève le problème de la dépendance de l'extérieur et de la répartition de ressources entre les villes américaines. Selon lui, la ville en croissance tend à être de plus en plus dépendante de l'extérieur pour son approvisionnement en eau au profit de sa population. La publication de Wolman a un impact important et est référencée dans les années suivantes dans des ouvrages qui soulèvent le problème de l'environnement dans les métropoles

¹ La formation des groupes végétaux en fonction des conditions géomorphoclimatiques telles que les savanes, les steppes. (Levêque, 2001)

² Le même article a été publié l'année suivante en 1966 sous forme de recueil d'articles, dans le livre intitulé, *Cities* : A. Wolman, 1966, "The metabolism of cities", in *Cities* : a Scientific American Book. New-York, Alfred A Knopf. 211 p.

notamment pour évoquer la croissance de la consommation d'eau et des rejets d'eaux usées (Berger, 1978, Mahood, Angus, 1969). Pour Wolman, l'énergie n'est pas un problème central dans la question « métabolique ». Sur l'énergie, son approche reste limitée à celle de l'ingénieur urbain qui s'intéresse au problème de la pollution atmosphérique dans la ville.

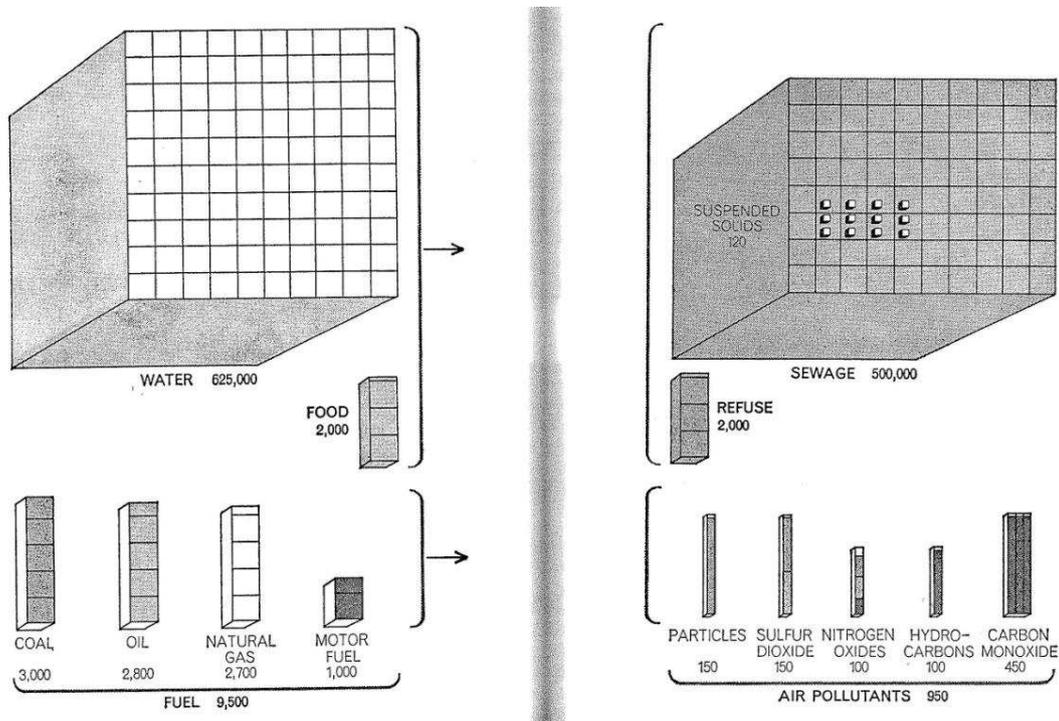


Figure 1.3. Le métabolisme de la ville selon Wolman. Source : Wolman, 1966.

La question de la rareté de ressource énergétique est soulevée à l'échelle globale depuis les années 1960. Une série de publications importantes apparaissent, au sujet de la croissance démographique, de la surexploitation de ressources naturelles et de la dégradation de l'environnement¹. Un regard alarmiste souligne le fait que la société développée est dans une phase d'inefficacité écologique en passant du bénéfice à la perte dans l'utilisation de ressources naturelles renouvelables et non renouvelables : le système est contre-productif². L'énergie apparaît comme une problématique centrale dans ce débat. On souligne d'une part le niveau de

¹ Parmi eux, le plus important est le livre d'Ehrlich « *The population Bomb* » publié en 1968, selon Deléage (1991) ; Enrich écrit un article sur la population, la surexploitation des ressources dans Science en 1971 (Ehrlich, Holdren, 1971); voir également le rapport, réalisé pour le Club de Rome et réunissant de nombreux scientifiques, sur la croissance de la population et la rareté de ressources naturelles dans le site du Club de Rome : <http://www.clubofrome.org/?p=326>.; Ayres and Kneese (1969), "Production, Consumption, and Externalities", The American Economic Review (AER), 59(3), 282 - 97., selon la citation de Fischer-Kowalski (1998).

² « *Diminishing return* », selon l'expression d'Enrich, Enrich, Holdren (1971, p. 1213).

la consommation par habitant d'énergie non renouvelable (fossile) de plus en plus élevée dans les pays développés. D'autre part, on signale le budget énergétique excédentaire dans le système de production agricole et alimentaire industrialisé¹. Cette question est associée à la question éthique, avec d'une part la répartition inégale des ressources naturelles entre le monde développé et le monde sous-développé (en développement), d'autre part la pauvreté dans le monde sous-développé (en lien surtout avec la question de la malnutrition). On évoque ensuite la possibilité de l'accroissement de la demande en ressources naturelles avec l'augmentation de la population et l'amélioration du niveau de vie dans les pays sous-développés.

Pour donner suite au Programme International Biologique (IBP), en 1968, l'UNESCO organise la « Conférence internationale sur l'utilisation rationnelle et la conservation des ressources de la biosphère ». L'UNESCO prépare simultanément un programme international de recherche et d'action à long terme. La conclusion de la conférence traduit une vision optimiste face à l'alarmisme évoqué précédemment et donne les objectifs du programme de recherche qui va venir quelques années après : « *La Conférence, au contraire, a estimé que l'on pouvait concilier les besoins des hommes avec la préservation de la nature et que la seule attitude réaliste était celle d'une « utilisation rationnelle » des ressources naturelles, ...* » (Batisse, 1969, p. 5). En 1971, l'UNESCO lance un programme intergouvernemental de recherche intitulé « l'Homme et la Biosphère » (programme MAB, du nom anglais du programme, *Man and Biosphere program*). L'objectif du programme MAB est d'« développer les bases scientifiques de l'utilisation rationnelle et de la conservation des ressources de la biosphère pour améliorer la relation globale entre l'homme et l'environnement ; pour prévoir les conséquences des actions d'aujourd'hui sur le monde de demain et ainsi accroître les capacités humaines à gérer efficacement les ressources naturelles de la biosphère » (MAP²). Pour ce faire, le programme propose notamment de faire une étude de l'écologie humaine avec une approche holistique et interdisciplinaire, en incluant des scientifiques et des experts de divers domaines³. Dans le programme, le projet 11 « *Ecological Aspect of Urban systems with particular emphasis on energy utilization* » concerne particulièrement la ville. Il s'intéresse au métabolisme urbain en se focalisant sur la question des flux d'énergie (Kennea, 1975, p. 11).

¹ Voir l'article d'Ehrlich et de Holdren (1971). La notion du budget énergétique dans l'agriculture est très similaire de celle de *Energy Return on Investment (EROI)* de Pimentel (Pimentel, Pimentel 2008)

² Site internet de l'UNESCO, *l'histoire du MAP*, [en ligne] [réf. du 5 oct. 2011]: <http://www.unesco.org/new/fr/natural-sciences/environment/ecological-sciences/man-and-biosphere-programme/mab40/infocus-archive/history/w1-potted-history/>

³ L'UNESCO affiche pour une première fois explicitement l'écologie en particulier l'écologie humaine comme une science interdisciplinaire (M'Bow, 1981).

Il faudrait noter également que la théorie de flux d'énergie issue de l'écologie des écosystèmes a eu une influence très large sur divers domaines au cours des années 1970. On observe une vague d'études sur *Energy Analysis* (l'analyse de l'énergie) pendant cette décennie. L'analyse de l'énergie s'intéresse particulièrement à l'efficacité d'un système énergétique qui est exprimée en ratio sortie/entrée, autrement dit son budget énergétique, dans n'importe quel domaine. L'EA généralise les termes tels que l'énergie brute, l'énergie nette, le contenu énergétique, l'énergie directe et indirecte. L'IFIAS (*International Federation of Institutes for Advanced Study*) en particulier joue un rôle essentiel. Elle mobilise des scientifiques de diverses disciplines et officialise l'expression analyse de l'énergie (Chapman, Science Faculty, 1975, Roberts, 1975, Nilsson, Kristoferson, 1976). Entre 1974 et 1975, deux conférences sont tenues par elle, donnant l'occasion de faire participer des économistes, des écologues, des agronomes, des physiciens, à la réflexion sur l'énergie et sa valeur, notamment en dehors du système industriel. L'IFIAS se donne un objectif méthodologique et vise notamment à établir une convention pour la comptabilisation générale de l'énergie dans les statistiques économiques. Elle propose également la notion de « Demande Totale d'Énergie » (Total Energy Requirement). Cette dernière se définit comme la quantité totale d'énergie d'un système énergétique donné dans n'importe quel domaine d'études tel que le système économique, la production industrielle et agricole. Dans cette vague, on trouve Odum, Pimentel, Chapman et Leach¹. En France, l'analyse de l'énergie est utilisée pour mesurer l'efficacité écologique du système de production agricole sous l'influence de la recherche de Pimentel, un des pionniers de l'analyse de l'énergie dans l'agriculture (Pimentel, Pimentel, 2008)². L'existence d'une valeur énergétique en dehors du système économique soulevée par l'Analyse de l'Energie influence également la réflexion sur le système énergétique industriel en France. On reconnaît le fait que le système énergétique industriel est dépendant du système économique, car la disponibilité énergétique du système industriel est fortement dépendante de la disponibilité technologique de chaque économie (Le Goff, 1979).

Au cours des années 1970, une abondante littérature sur « l'écosystème urbain » se développe non seulement à l'initiative de l'UNESCO, mais aussi en dehors du programme MAB. Paul Duvigneaud publie ainsi une étude sur l'écosystème bruxellois en 1974 (Barles, 2004, Duvigneaud, 1980, cité par : Kennedy et al., 2007). L'analyse de flux de matière et d'énergie y

¹ On ajoute l'article de G. Leach sur l'analyse énergétique (Leach, 1975).

² Une synthèse de sa recherche se trouve dans l'ouvrage intitulé « *Food, Energy and Society* » (Pimentel, Pimentel, 2008) ; Pour l'exemple de l'analyse de l'énergie dans l'agroécosystème, voir notamment : J.-P. Deléage, 1978, « L'analyse éco-énergétique des écosystèmes ruraux », *Economie rurale* 127. P. 27-30. ; Aux débuts des années 1980, l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie (actuel l'ADEME) initie notamment ce type de l'analyse pour le secteur agricole (Observatoire de l'énergie, 1984, P 92-95).

est des plus complètes (figure 1.4). Du côté des entrées, on trouve les énergies fossiles, l'électricité et l'alimentation. En sortie, Duvigneaud calcule la quantité des rejets urbains : déchets, eaux usées, émissions polluantes. Il établit aussi le bilan d'eau et d'énergie solaire et quantifie la biomasse animale et végétale qui constitue la ville. De plus, il porte une attention particulière aux liens existant entre ces flux et le système urbain d'alimentation en eau et d'évacuation des eaux usées et des déchets. Il met notamment l' « écosystème urbain » au cœur du problème de la surexploitation de la ressource (Barles, 2004).

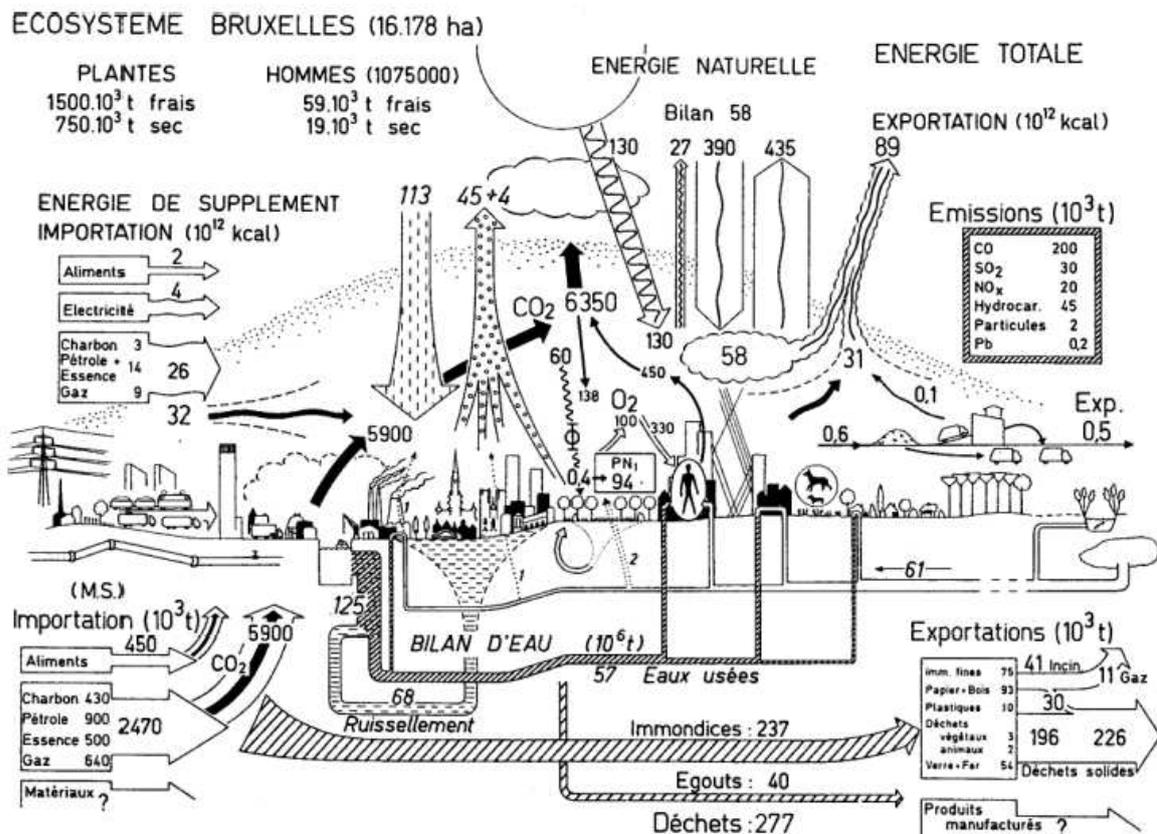


Figure 1.4. Écosystème bruxellois selon Duvigneaud en 1974. Source : Duvigneaud, 1980, cité par : Kennedy et al., 2007.

A partir de 1975, l'UNESCO affiche son ambition d'associer recherche et action en reformulant le projet 11 par « *Integrated ecological studies of human settlements (including urban systems) as a basis for planning and decision-making* » (Barles, 2004, p. 88). Dans le rapport à mi-parcours du MAB en 1976, on conclut que la ville est un écosystème comparable à un écosystème naturel et que cette comparaison aide à comprendre le fonctionnement d'un système urbain (UNESCO, UNEP, 1976). Au début des années 1980, l'Unesco comptait plus de cent

pays et un millier de projets participant au programme (M'Bow, 1981). On trouve ainsi une abondante production scientifique sur le sujet du métabolisme urbain. On peut citer deux études de cas menées dans le cadre du projet 11 : Hong Kong et la région de Francfort-sur-le-Main. Ces études essaient notamment de conceptualiser les flux de matière et d'énergie de la ville en lien avec le système urbain de consommation et de production. L'étude de cas de Hong Kong est menée par la biologiste Stephen Boyden du Groupe de biologie urbaine de l'école de médecine John Curtin de l'Université Nationale d'Australie. Celle de Francfort-sur-le-Main est pilotée par le Groupe d'étude de Munich pour la Biologie et l'Environnement. Les projets apportent une connaissance scientifique des flux physiques de la ville. Le cas de Hong Kong montre l'exploitation considérable des ressources par la ville d'une part, et l'importance des émissions des substances polluantes d'autre part (figure 1.5). Le groupe d'étude de Munich soulève en particulier la complexité des flux d'énergie due à la complexité du système urbain de production, de transformation, de consommation et des rejets dans une agglomération (figure 1.6). On essaie ensuite d'établir un lien entre l'évolution historique de la ville et les flux d'énergie. Selon la synthèse des études, la ville suit deux étapes principales dans sa croissance. D'abord, la cité primitive connaît une croissance de population grâce à la production excédentaire d'énergie de la biomasse agricole (l'énergie dite somatique). Ensuite, la maîtrise des énergies fossiles (l'énergie extrasomatique), base de l'industrialisation moderne, permet la croissance de la ville moderne¹.

On découvre ainsi la particularité de la ville en termes de flux d'énergie et de matière. Pour une communauté végétale ou animale, une entité géographique délimitée serait à la fois le lieu d'habitat, d'extraction de ressources (nourriture) et de rejets des déchets, alors que pour une société urbaine, les trois activités peuvent s'effectuer dans des lieux différents. Par conséquent, la ville a un environnement direct et un environnement indirect. L'équipe de Hong Kong par exemple l'appelle le second environnement (Environment II, par rapport à Environment I qui est direct) (Boyden et al., 1981). L'équipe de Munich le nomme *hinterland* (M'Bow, 1981). La présence de l'environnement indirect est considérée comme une des caractéristiques des flux urbains. En particulier, l'éloignement de l'arrière-pays pour le ravitaillement alimentaire qui va de pair avec la croissance de la ville se traduit par « la fragilité et la vulnérabilité de l'écosystème urbain » (Boyden, Celecia, 1981, p. 24). Pour le cas de Hong Kong, on ajoute un diagnostic pathologique en mettant l'accent sur certaines maladies mentales, appelées « le mal des grandes villes (névroses, fatigue physique et psychique, maladies psychosomatiques en général) » (Boyden, Celecia, 1981, p. 26) provoquées par le surpeuplement, les gratte-ciels

1 L'énergie somatique (endosomatique chez Lotka) et extrasomatique (exosomatique chez Lotka), suite à l'expression de Boyen et al. (1981).

denses, la circulation automobile continue et la pollution atmosphérique. On désigne ensuite la ville comme un écosystème parasite (Barles, 2004).

Ces études contribuent à l'apport méthodologique et la connaissance des flux urbains (notamment quantitatifs en débit annuel). Néanmoins, la faiblesse théorique issue de la méconnaissance du milieu urbain en tant qu'interface entre la société et l'écosystème naturel conduit à ignorer la dimension humaine et sociale cruciale dans le milieu urbain (Beaucire, 1985, Emelianoff, 2000-2001). Le milieu urbain en effet se forme par l'interaction entre divers facteurs socioéconomiques et des facteurs naturels. De plus, dans le milieu urbain, il existe une stratégie anthropique de gestion des flux qui est indissociable du cycle de la nature urbaine¹. Le rôle de la spécialisation des espaces urbains ne peut pas non plus être ignoré, car le type de flux se caractérise selon la fonction attribuée ou selon la centralité. Malgré la critique sévère, on peut retenir au moins deux éléments essentiels de ces études. D'une part, les flux anthropiques constituent une partie essentielle du métabolisme urbain. D'autre part, l'environnement indirect est considéré à la fois comme une particularité et comme la fragilité d'un « écosystème urbain ».

Cette période très fournie est suivie d'une éclipse en ce qui concerne le métabolisme et ce jusqu'au milieu des années 1990 où une nouvelle vague d'études du métabolisme urbain et régional verra le jour (Kennedy, Cuddihy, Engel-Yan, 2007)². Entre-temps, l'emploi du terme « métabolisme » devient abondant dans l'industrie.

¹ Par l'exemple de l'espace de décharge des déchets. Le centre-ville et la banlieue n'ont pas le même type de flux (Pickett et al., 1997).

² Voir la fin de la section suivante.

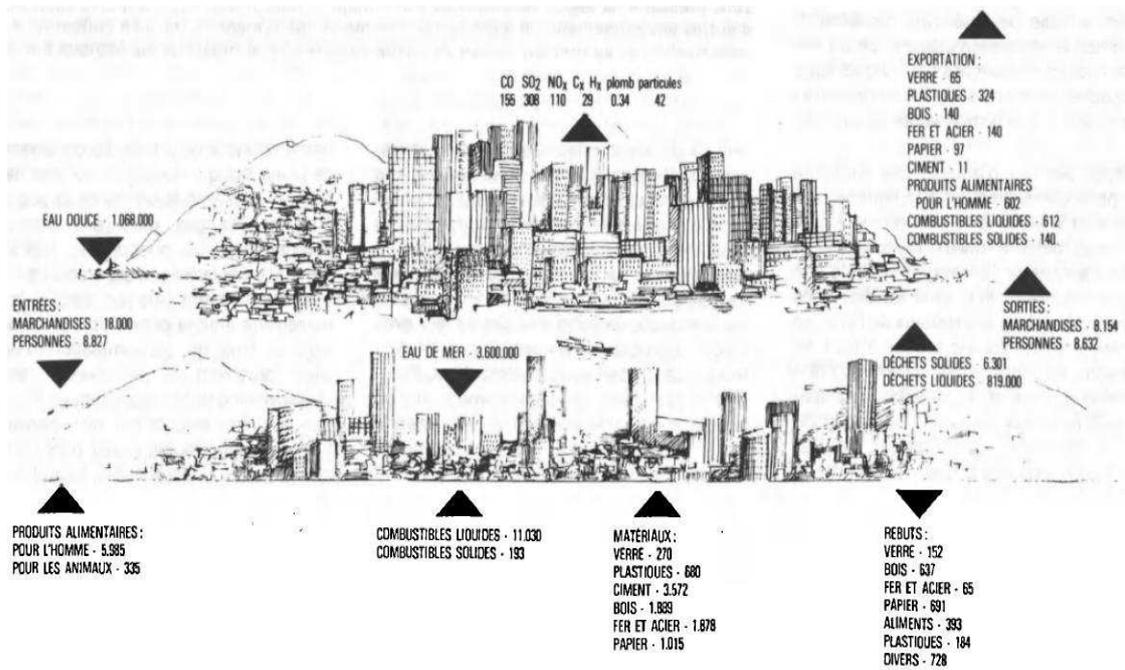


Figure 1.5. Le Métabolisme de Hong Kong dans les années 1970. Source : M'Bow, 1981.

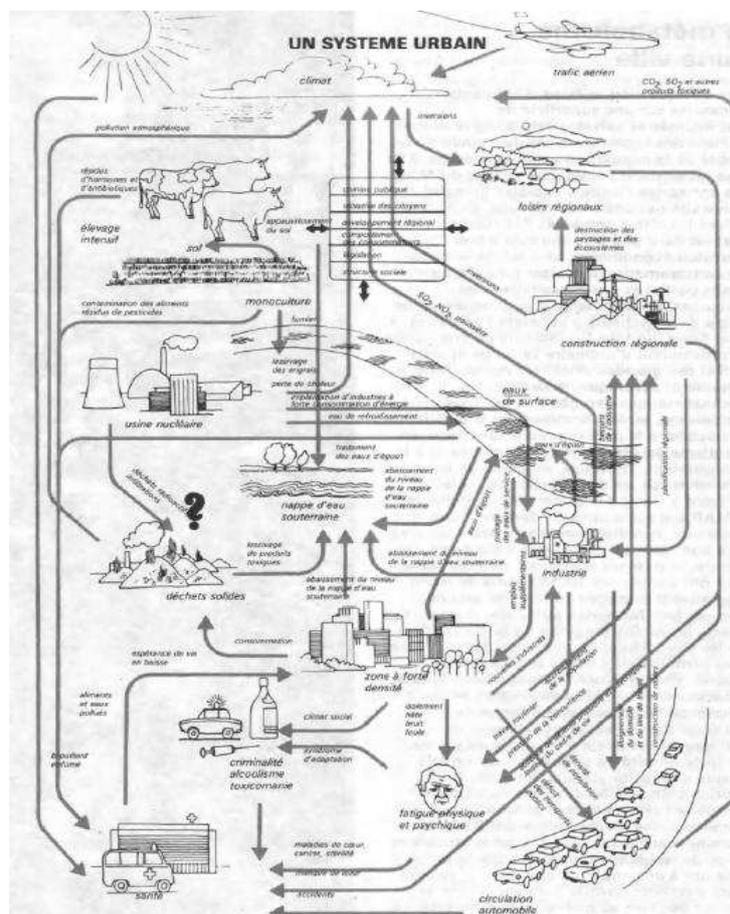


Figure 1.6. Le Métabolisme de la Ville de Francfort-sur-le Main et son hinterland. Source : Boyden & Celecia, 1981.

1.4. Du métabolisme industriel au métabolisme de la société industrielle (1983-2007)

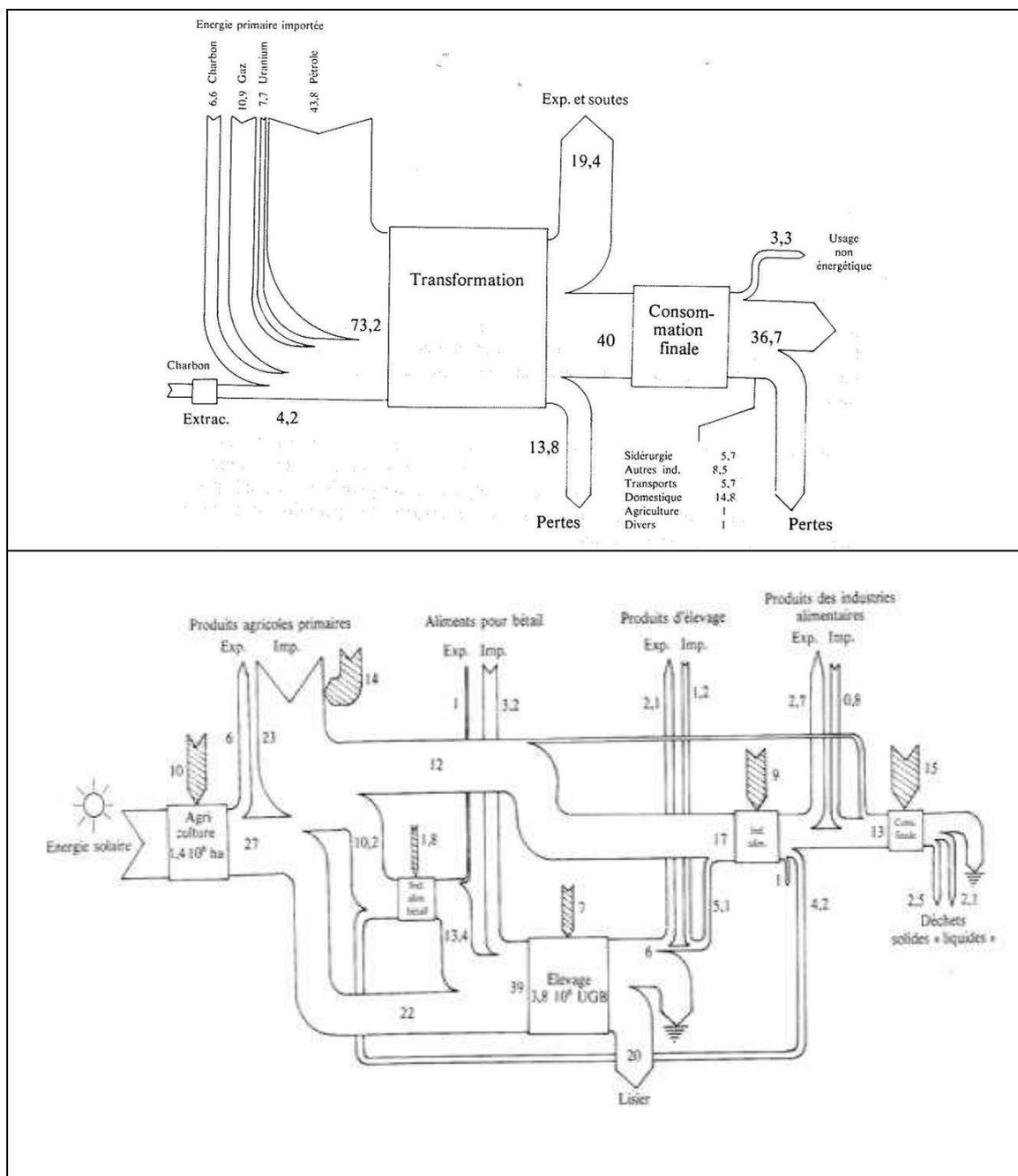
1.4.1. Ecologie industrielle

Le concept de métabolisme industriel est né à la même époque que celui de métabolisme urbain¹. La métaphore du métabolisme industriel est utilisée couramment dans les années 1970 comme le montrent les articles scientifiques qui mettent la technologie et le développement industriel en lien avec l'écologie. Dans les études du métabolisme urbain, l'industrie est considérée comme un secteur important en matière de flux d'entrée et de sortie. Cependant, l'écologie industrielle n'a pas la même approche que l'écologie urbaine. Lorsque l'écologie urbaine cherche surtout à conceptualiser la ville et la société humaine en tant qu'écosystème, l'écologie industrielle va directement à la pratique en associant la question du métabolisme à la stratégie de gestion des déchets et des rejets polluants. Le paradigme d'une nouvelle industrie apparaît dans les titres de quelques articles publiés dans les années 1970: « *Zéro pollution for Industry* », « *Waste Minimization through Industrial Complexes* », « *Careless Technology : Ecology and International Development* » (Erkman 1998, p. 44).

En 1983, une étude sur « l'écosystème industriel » belge est réalisée par la réunion de chimistes, d'économistes et d'ingénieurs. Elle relie la question des flux au système industriel, aux chaînes de production, de transformation, de consommation et aux rejets. Elle fait une analyse du système industriel flux par flux (fer, verre, plomb, flux d'alimentation dans l'industrie agroalimentaire, flux de l'industrie du bois) (Billen et al., 1983). On y montre l'intérêt d'une approche écosystémique pour une stratégie industrielle plus économe en matière et en énergie. Selon cette étude, les trois enjeux majeurs des flux apparaissent issus de : 1) l'ouverture du système dans un contexte d'échange international qui accroît la dépendance extérieure et qui favorise l'écoulement de la production intérieure vers l'extérieur, 2) la spécialisation d'une activité spécifique dans une filière successive et par conséquent, cette activité est beaucoup plus développée que les autres et par conséquent elle favorise l'importation de l'extérieur, et 3) la désarticulation des filières traitant le même type de flux et qui étaient auparavant complémentaires. L'exemple des filières de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de l'élevage montre bien cette désarticulation, car elles constituaient un système complémentaire lorsque l'élevage utilisait les déchets (ou coproduits) de l'agriculture et vice versa. Ce diagnostic est

¹ Pour une histoire de l'écologie industrielle, voir l'ouvrage d'Erkman (1998), intitulé, « Vers une écologie industrielle : comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper-industrielle ».

intéressant au regard de la notion de déchets. Ces derniers n'ont pas vraiment de sens dans le système traditionnel lorsque ceux d'une activité sont utilisés comme la matière première d'une autre.



L'écologie industrielle est mise en place surtout par des ingénieurs et elle a avant tout une finalité pratique. Durant les années 1980, la politique internationale de l'environnement concorde également avec la recherche un nouveau système industriel¹. De plus, en 1982, l'écologie industrielle est mise en application à Kalundborg, ville danoise industrielle qui expérimente l'échange des déchets entre les industries de proximité, et crée une « symbiose industrielle » (Brings Jacobsen, 2006). Cette expression désigne le système constitué par des industries qui échangent leurs déchets (les déchets de l'une devenant les matières premières de l'autre), privilégiant ainsi un bouclage partiel de la circulation des matières².

Au cours des années 1990, l'écologie industrielle affirme son statut scientifique, notamment par la reconnaissance de l'Académie des Sciences des Etats-Unis et grâce à la publication abondante par des scientifiques reconnus à l'échelle internationale (Erkman, 1998)³. Pendant cette période, le concept de métabolisme industriel s'élargit à l'ensemble du système économique. L'analogie organiciste, bien qu'elle fasse toujours l'objet de débats, est jugée utile dans le monde scientifique dans la mesure où elle est utilisée pour créer un nouveau paradigme industriel et du système économique. Le but est de créer un système des matières bouclé dans toutes les chaînes d'activités industrielles et économiques et de minimiser non seulement les prélèvements de ressources mais aussi les rejets vers l'environnement. Dans leur publication de 1994, Ayres, Simonis reconnaissent que le système économique, dont tous les systèmes industriels font partie, se comporte selon le mécanisme régulateur du métabolisme dans la mesure où celui-ci (le métabolisme) désigne l'ensemble des processus physiques de conversion de matière, d'énergie et de main-d'œuvre en produit final et en déchets (Ayres, Simonis, 1994). L'écologie industrielle reconnaît que l'analogie organiciste n'est pas parfaite. Néanmoins, selon Frosch et Gallopoulos, dans une perspective de stratégie économique, l'industrie devrait imiter son analogue biologique: « l'analogie entre le concept d'écosystème industriel et celui d'écosystème biologique n'est pas parfait, mais on gagnerait beaucoup à ce que le système

¹ Notamment, la publication du rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement des Nations Unies (WCED en anglais), *Notre avenir à tous* (Rapport dit Brundtland). [en ligne] [réf. du 08 sept. 2011]. Disponible sur la toile : <http://www.v1.agora21.org/dd/rapport-brundtland.html>.

² Pour des exemples de réalisation, voir Erkman S. 2001. « L'écologie industrielle, une stratégie de développement », *Le Débat*, 2001/1 n° 113, p. 106-121. DOI : 10.3917/deba.113.0106

³ Notamment Ayre et Gallopoulos : Un colloque sur l'écologie industrielle a été tenu à l'Académie de la Science, National Academy of Sciences, Proceedings, February 1 1992, An NAS colloquium on industrial ecology in May, 1991 including papers by industry, government and academic contributors, 2101 Constitution Avenue NW Washington DC 20418 Sales: 202-334-2525.

industriel imite les meilleurs aspects de l'analogie biologique »¹ (cité par : Jelinski et al., 1992).

Au début des années 1990, Brunner et Baccini conceptualisent le système économique régional à travers la théorie de l'écosystème. Ils définissent l'anthroposphère comme suit: « *Anthroposphere and environment form a geographically defined open system called the « regional economy ». The subsystem environment comprises the compartments soil, water and air. [...] The environmental compartments serve not only as sources of energy and matter for the anthroposphere, but are also short [...] or long-term[...] sinks for its residual fluxes* » (Baccini, Brunner, 1991, p. 10, 11). Brunner et Baccini démontrent ensuite l'intérêt de l'analyse des flux de matière sur une région fictive nommée « METALAND » qui a quatre fonctions principales en lien avec les flux de matière : 1) nourrir, 2) laver, 3) résider et travailler, et 4) transporter et communiquer qui correspondent chacune aux flux 1) d'alimentation, 2) de l'eau et des produits chimiques et du papier appliqués pour la fabrication des produits d'hygiène, 3) des biens de consommation 4) de l'énergie et des matériaux pour la fabrication des matériels roulants et pour la construction des infrastructures de transports.

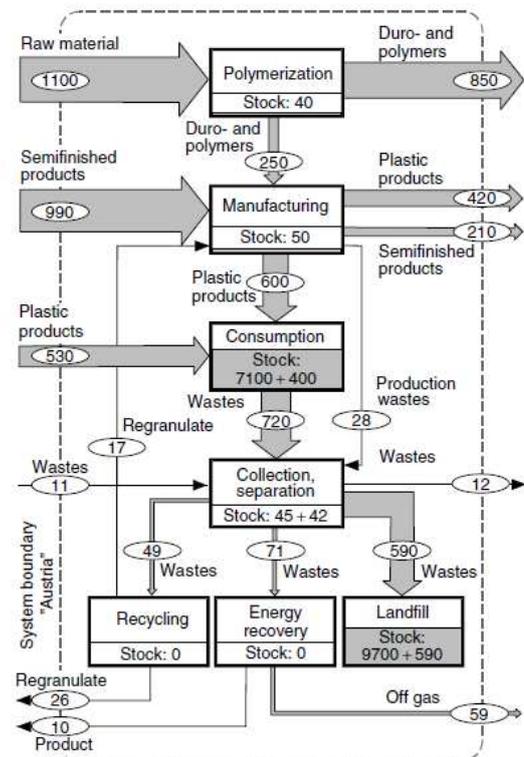
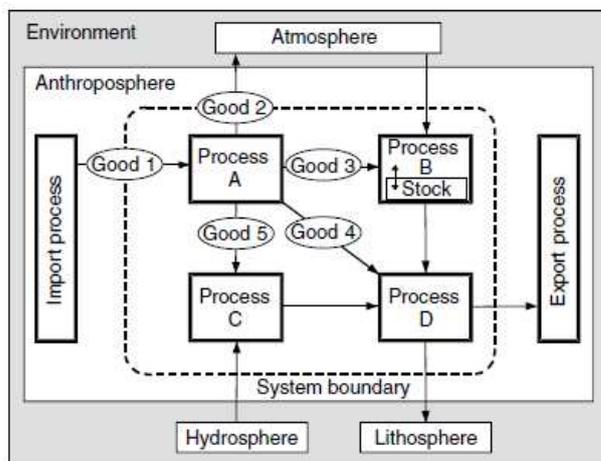


Figure 1.8. Le métabolisme de l'Anthroposphère (gauche) et l'exemple d'analyse des flux de plastique (à droite). Source : Brunner, Rechberger, 2006.

¹ « *The analogy between the industrial ecosystem concept and the biological ecosystem is not perfect, but much could be gained if the industrial system were to mimic the best features of the biological analogue.* », traduction personnelle.

Depuis la fin des années 1990, on observe une nouvelle vague d'études du métabolisme de la ville surtout par extension de l'écologie industrielle. Ces études se focalisent sur la quantification des flux de matière et d'énergie entrant dans et sortant d'un système urbain (délimité géographiquement). Il s'agit notamment de lier ces flux aux activités économiques, et en particulier en amont au système d'approvisionnement (de production et de transformation), de consommation (des ménages), et en aval au système d'évacuation (les rejets vers l'assainissement, la centrale d'électricité, etc.). En 1997, en prolongement de la théorisation de l'Anthroposphère, Brunner fait une étude du métabolisme de la région *Lowlands* de la Suisse et publie l'article intitulé, « *A city's metabolism : Towards the sustainable development of urban systems* » (Baccini, 1997). Il se réfère explicitement à l'étude du métabolisme urbain. Il s'agit de définir le niveau de la consommation, par habitant et par an, en tonne et en Giga Joule, de quatre matières principales : l'eau, la biomasse, les matériaux de la construction et l'énergie. Ensuite, ces résultats sont utilisés comme indicateurs principaux pour évaluer la durabilité en comparaison de la productivité de la région en ressources naturelles (Baccini, 1997, in : Richter, Weiland, 2011, Baccini, 1996).

Plusieurs études du métabolisme urbain sont réalisées après l'étude de Baccini. L'une d'entre elles réactualise le métabolisme de Hong Kong pour l'année de 1997 et analyse l'évolution du niveau d'entrée et de sortie des matières de la ville en comparaison à 1971 (Warren-Rhodes, Koenig, 2001). En 2007, un article est publié dans le *Journal of Industrial Ecology*, dédié à la synthèse d'études antérieures du métabolisme urbain. L'article essaie de comparer le métabolisme de différentes villes et d'observer l'évolution du métabolisme urbain dans le temps. Selon cet article, les études de cas réalisées après 1999 sont les suivantes: Sydney (1999), Vienne (2000), Hong Kong (2001), Cape Town (2002), Londres (2002 et 2003) et Toronto (2003). En outre, il est intéressant d'observer le profil des auteurs de ces études de cas. Dans les années 1960 et 1970, ce sont des écologues, des botanistes et des biologistes qui faisaient l'analyse du métabolisme de la ville. Dans les études de cas citées, ce sont des ingénieurs en génie civil, des urbanistes et des géographes.

Au cours des années 2000, le métabolisme urbain inspiré de l'écologie industrielle se présente comme un outil d'aide à la décision pour les collectivités territoriales. Le terme de métabolisme devient relativement fréquent dans les recherches urbaines, dans les projets urbains et dans le domaine de la planification territoriale ; son emploi est quelquefois métaphorique, quelquefois

plus littéral¹. On peut citer l'exemple du Canton de Genève qui, directement inspiré par l'écologie industrielle, décide de réaliser une analyse de flux de matière de son territoire en 2001. Il adopte la méthode d'analyse de flux de matière développée par Brunner et Baccini pour connaître la quantité de flux entrant et sortant du territoire et celle du stock éventuellement valorisable, dans le but de déterminer les priorités d'actions publiques en matière de l'environnement.

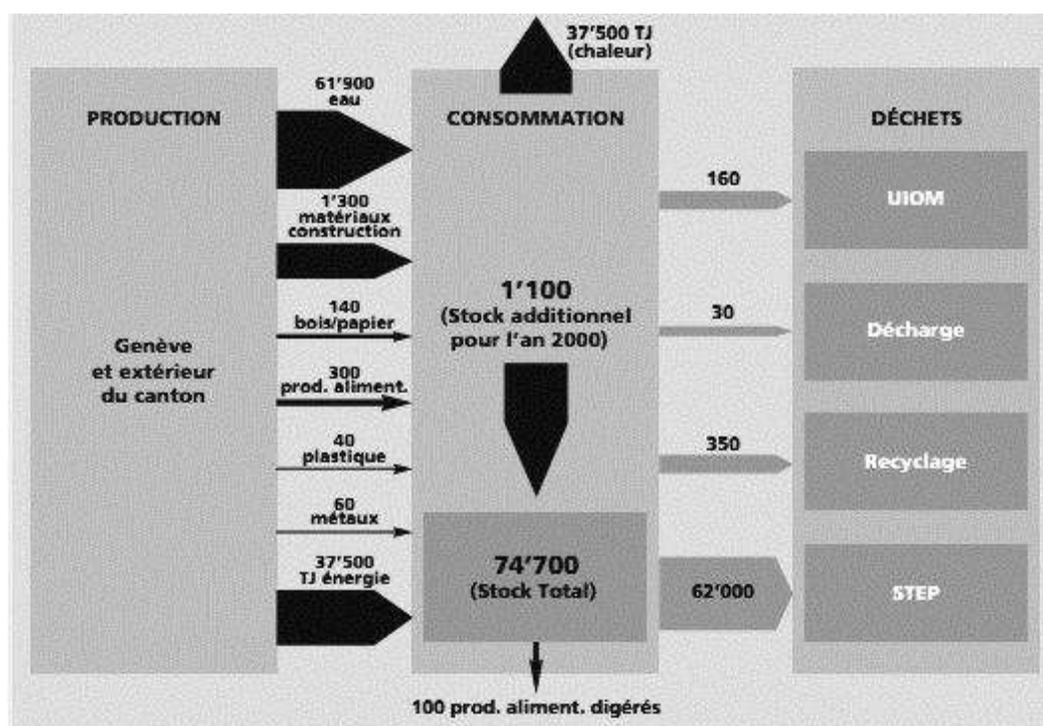


Figure 1.9. Le flux de matière du Canton de Genève, en milliers de tonnes par an en 2000.

Source : GEDEC, p. 20.

Depuis les années 2000, la finalité pratique de cette approche suscite l'intérêt des acteurs du territoire et conduit à réaliser quelques projets appliquant l'écologie industrielle pour la gestion industrielle (notamment la symbiose industrielle dans des parcs industriels) et urbaine (notamment en lien avec des projets de recyclage et de production des énergies renouvelables). Depuis les années 1970, l'amélioration méthodologique (en particulier dans la modélisation et la quantification) de l'écologie industrielle a permis d'identifier les flux importants et de les quantifier. Notamment, le développement des modèles est remarquable qui mettent en lien les

¹ Pour l'exemple d'un projet fortement inspiré, le cas de Hammarby Sjöstad (Pandis, Brandt, 2010). Pour des projets d'urbanisme utilisant le terme de façon métaphorique (Kasioumi, 2010). La DIACT (Délégation Interministérielle à l'Aménagement et à la Compétitivité des Territoires) le présente comme outil d'aide à la décision pour les territoires (DIACT, 2005, p. 35-38).

flux physiques et le système industriel et urbain de production, de consommation et de rejets. Néanmoins, le statut de l'écologie industrielle dans le paysage scientifique pose question¹. Une critique est soulevée notamment sur la place de l'énergie. L'énergie est considérée comme la question cruciale dans l'écologie en lien avec la reproductivité (le renouvellement des ressources) et les cycles de matière (le rendement énergétique ; *energy return*) des écosystèmes, alors qu'elle n'est présentée que marginalement dans l'écologie industrielle, qui, par sa dénomination même, renvoie directement à l'écologie naturaliste (O'Rourke et al., 1996).

1.4.2. Economie écologique

L'économie écologique émerge à la même période que l'écologie industrielle. Elle contribue en particulier à la réflexion sur le rôle de l'énergie dans une perspective historique et aide notamment à étendre le concept d'énergie auparavant centré sur l'énergie technique utilisée pour le fonctionnement industriel, et par conséquent sur les combustibles fossiles. Le champ d'étude de l'écologie économique s'étend sur d'autres objets que l'énergie. Néanmoins, dans cette section, on se concentre sur cette notion structurante de l'économie écologique.

L'écologie scientifique met en évidence la quantité d'énergie disponible pour la croissance d'une population. Néanmoins, lorsque l'on applique la théorie des écosystèmes à la société humaine, la nature des flux, en termes de mode de production, de transformation et de consommation, n'est pas expliquée de manière suffisante. L'énergie n'est pas destinée au seul usage alimentaire. Dans la consommation humaine, en dehors du besoin physiologique, la demande énergétique pour le fonctionnement industriel, pour le chauffage, pour les déplacements, etc, est importante. En effet, cette demande constitue une part essentielle de la consommation totale d'énergie de la société industrielle développée. On reconnaît, au cours des années 1960 et 1970, l'importance du métabolisme social, c'est-à-dire le rôle des besoins matériels et énergétiques de la société humaine pour maintenir son fonctionnement économique et industriel (Vivien, 2007, Ayres, Simonis, 1994). Dans les années 1980, le concept de métabolisme social est étudié par Martinez-Alier dans une perspective historique (Martinez-

¹ La question est de savoir si l'écologie industrielle constitue une science. Elle est aujourd'hui consciente du fait d'avoir dépassé l'étape d'adoption de l'analogie organiciste. La communauté scientifique de l'écologie industrielle essaie d'améliorer le cadre théorique et méthodologique (notamment en dehors de la quantification de la modélisation de flux qui sont actuellement centrales dans la recherche). Voir les deux articles suivants : Isenmann, 2003; ISIE, 2001, Inaugural Meeting of the International Society for Industrial Ecology (ISIE) The Science and Culture of industrial Ecology ISIE 2001, 12-14 November 2001, Leiden (The Netherlands) on the web, https://kluedo.ub.uni-kl.de/files/1328/fue_6.pdf.

Alier, 1987). Il met en avant l'importance du concept de bioénergie dans l'économie écologique notamment dans sa genèse entre la fin du XIXe siècle au début du XXe siècle. Les lignes qui suivent présentent les éléments essentiels mis en avant par cet auteur.

Le concept de métabolisme énergétique est inhérent à la notion de bioénergie (*bioenergetics, agricultural energetics*) dont l'origine date de la fin du XIXe siècle. Podolinsky (Hornborg et al., 2007), influencé par l'analyse du cycle des nutriments des biochimistes, notamment J.-V. Liebig et J-B. Boussingault, réalise un bilan de production énergétique de la biomasse pour la France pour l'année 1870 afin de connaître la productivité de son économie (Podolinsky, 1880, cité par : Martinez-Alier, 1987). La productivité d'une économie (d'un pays), selon Podolinsky, est mesurée par le bilan entre l'assimilation des flux énergétiques solaires (production de la phytomasse) et la dissipation de ceux-ci (utilisation). Selon sa thèse, le métabolisme social vise avant tout à comprendre le processus d'échanges énergétiques historiques entre les sociétés humaines et la biosphère. Le bilan énergétique de Podolinsky et son idée de bioéconomie (appelée aujourd'hui économie biophysique ou économie écologique) se retrouvent pendant la première moitié du XXe siècle. Du point de vue de l'économie biophysique, les différentes ressources énergétiques n'ont pas la même valeur. La production de la biomasse est considérée comme l'utilisation des flux énergétiques solaires (le revenu énergétique), alors que celle de l'énergie fossile est une dissipation (dépense du capital énergétique)¹, puisque la valeur énergétique de cette dernière est équivalente à des millénaires de photosynthèse. La notion de production ici est inhérente à celle de régénération de matières (molécules) riches en énergie par l'assimilation de l'énergie solaire (énergie exogène). Par conséquent, les autres activités ne sont que celles de transformation et d'utilisation. Le concept d'énergie biologique de Boussignault² et l'analyse énergétique de Podolinsky influencent Vernadski à travers les notions de biosphère et de géochimie (Martinez-Alier, 1987). Par la suite, Lotka développe la théorie de Vernadski de la croissance démographique en lien avec la disponibilité énergétique et la formalise mathématiquement³. Lotka propose ainsi le concept d'énergie métabolisée par la société humaine pour expliquer le métabolisme énergétique humain. Selon Lotka, l'énergie métabolisée par la société humaine est constituée de deux types d'énergie : l'énergie endosomatique (énergie nutritive pour le fonctionnement physiologique humain) et l'énergie exosomatique (énergie métabolisée par la société en dehors du corps humain). Ce concept de Lotka est directement cité

¹ Les expressions entre parenthèses sont de Frederick Soddy (1924), selon la citation de (Cleveland, in : Mayumi, Gowdy, 1999).

² Boussignault estime qu'environ 1 à 2 % de l'énergie solaire est assimilée par les plantes (Vernadski, 2002).

³ Vernadski exprime dans son ouvrage la nécessité d'une quantification des vies sur la croûte terrestre. (Vernadski, 2002)

dans les études du métabolisme urbain des années 1960 et 1970 (voir le chapitre 1, section 2). Ainsi, l'idée de la productivité en termes énergétiques de Podolinsky se trouve également dans les études d'Odum et de Pimentel depuis les années 1960. Pimentel propose par exemple l'indicateur EROI (*Energy Return on Investment*) centré sur l'analyse énergétique des activités de production agricole sur une surface donnée (par hectare de terre), dans le but de mesurer l'efficacité écologique énergétique à l'échelle microéconomique¹.

Dans les études des années 1960 et 1970 sur le métabolisme urbain, le concept de métabolisme énergétique n'est pas expliqué dans une approche d'écologie scientifique et ni de biologie, puisque la croissance de la consommation d'énergie exosomatique fait partie du fait social, et relève donc, comme l'affirme Martinez-Alier, des sciences humaines et sociales². Du point de vue de l'économie biophysique, le *biométabolisme* (métabolisme endosomatique) est associé au travail humain. Il peut être exprimé en quantité d'énergie de biomasse alimentaire nécessaire pour produire ce travail, et il a un impact social et écologique. Le *technométabolisme* désigne, lui, la demande énergétique hors besoin énergétique physiologique de l'homme pour son système énergétique technique et industriel. Selon Fischer-Kowalski, le développement du concept de métabolisme a également eu lieu dans les sciences sociales depuis les années 1950 (de près, sinon depuis le XIXe siècle de loin), notamment dans les domaines de la sociologie environnementale, de l'anthropologie écologique ou culturelle, et de la géographie environnementale (Fischer-Kowalski, 1998). Dans ces études, on considère notamment l'énergie comme un facteur déterminant du développement des sociétés : citons par exemple les études portant sur les liens entre surplus énergétique (alimentaire) et développement social ou entre disponibilité énergétique et limite des activités humaines (Cottrell, 2009). Ici, le métabolisme énergétique se définit comme la quantité totale d'énergie métabolisée par les sociétés humaines (« *total amount of energy 'metabolized' by society* ») (Haberl, 2001). L'écologie sociale adopte cette approche de l'économie biophysique³ et accorde une importance au métabolisme énergétique, qui fait partie des éléments les plus explicatifs du processus historique d'introduction des flux anthropiques dans l'écosystème naturel par la société humaine⁴.

¹ Voir le chapitre 1. Section 1.2.

² « *human species has genetic instruments regarding endosomatic energy use, but not for exosomatic energy use, which can only be explained by history, politics, economics, culture, and technology* », selon Martinez-Alier (1987, p. 99-116).

³ « L'économie biophysique » est issue de l'expression d'Ayre et Cleveland, et signifie l'étude de la monétarisation du service écologique.

⁴ Voir les deux issues spéciales sur le sujet du métabolisme social, le volume 22 et 23, publiées dans le journal scientifique, *Population and Environment*, par exemple : Giampietro, Mayumi, 2000, Fischer-Kowalski, Amann, 2001.

1.5. Métabolisme de la société : Transition socioécologique

1.5.1. Métabolisme social

L'écologie sociale est née dans les années 1990¹. Face au concept de métabolisme industriel, elle propose celui de « métabolisme social » par extension de l'écologie industrielle à l'ensemble de la société industrielle. Elle vise notamment à comprendre « les trajectoires socioécologique » i. e. la dynamique des interactions société-nature. Pour ce faire, elle propose un modèle interactif et dynamique associant société et nature, dans lequel la dimension spatio-temporelle est particulièrement mise en avant. Selon Fischer-Kowalski, qui est largement à l'origine de ce courant, la dimension temporelle et le processus historique dans l'étude du métabolisme social expliquent la construction réciproque de l'environnement entre le domaine biophysique (« nature » d'un côté) et le domaine symbolique (« culture », de l'autre côté) (Fischer Kowalski, Haberl, 2007, p. 11). La dimension spatiale, expliquée notamment par le changement d'usage du sol, est un facteur du changement du cycle du carbone et du cycle des flux d'énergie. La recherche est organisée principalement selon les trois axes : 1) l'analyse à long terme des flux de matière et d'énergie (*social metabolism*), récemment valorisée à travers des publications notamment dans le *Journal of Ecological Economics*² ; 2) l'analyse du changement d'usage du sol, financée par le programme international de recherche *Land Use Land Cover Change (LULC)*³ ; 3) le développement du cadre théorique du « métabolisme social », de la « Transition socioécologique » et de la « Résilience » en collaboration avec le réseau de recherche, *Resilience Alliance*. Un effort est fait également pour prendre en compte la dimension historique en lien avec le premier axe de recherche. L'indicateur d'Appropriation Humaine de la Production Primaire Nette (HANPP, suite au nom anglais *Human Appropriation of Net Primary Production*) mesure la quantité de flux anthropiques et est issue des résultats du premier et du deuxième axes de leur recherche (voir l'encadré, fin de la section 1.2).

Du point de vue de la méthodologie, l'écologie sociale intègre des démarches de l'écologie des écosystèmes, de l'écologie du paysage, de l'écologie industrielle, et est basée sur l'analyse des

¹On parle ici notamment de l'écologie sociale menée par Marina Fischer-Kowalski de l'institut de l'écologie sociale en Autriche.

² Les articles cités de Krausmann, Haberl (2002) et de Schandl, Schulz (2002)

³ La présentation du programme se trouve sur le site du *global land project* [en ligne] [réf. du 18 oct. 2011]: <http://globallandproject.org/background.shtml>

flux d'énergie et de matière et celle du changement d'usage du sol. Le concept de métabolisme social reconnaît que la société humaine est soumise aux processus biophysique et chimique. La circulation des matières et de l'énergie s'effectue dans la chaîne trophique (entre la phytomasse, la biomasse animale et l'homme), comme dans l'industrie pour la fabrication des machines et des artefacts en général. L'énergie est considérée, de ce point de vue, comme étant une fraction métabolisée, c'est-à-dire comme la part des ressources naturelles appropriée par la société humaine pour tout usage énergétique. Ce dernier se définit au sens large du terme, sur la base de la théorie des écosystèmes, selon les lois thermodynamique et trophodynamique (Giampietro, 1997, selon Haberl, 2001b).

La conceptualisation de l'énergie comme la fraction de l'énergie métabolisée était déjà proposée par l'écologie urbaine dans les années 1960 et de 1970¹. Néanmoins, on s'arrêtait à la quantification de cette fraction, en soulignant la part croissante de l'énergie exosomatique dans la ville, sans aller plus loin dans l'analyse énergétique de l'écosystème urbain et des facteurs de changement de son métabolisme. Selon l'écologie sociale, considérer l'énergie comme la fraction métabolisée de l'énergie par la société humaine est utile pour comprendre le processus d'introduction des flux d'énergie anthropique dans l'écosystème naturel. La place de l'énergie est centrale pour une lecture des interactions entre société et nature et de l'évolution de celles-ci dans le temps, qui nécessite par ailleurs une approche historique sur le long terme². Les différentes sociétés peuvent par exemple se distinguer selon leur niveau d'appropriation énergétique : appropriation primaire dans le cas de la société chasseur-cueilleur, colonisation de la nature (écorégulation) de la société agricole, appropriation de l'énergie du stock (combustibles fossiles) de la société industrielle (Fischer-Kowalski, 1998, Krausmann, Haberl, 2002).

Selon Sieferle, l'historien le plus souvent référencé par l'écologie sociale, le régime écologique est déterminé par le mode d'extraction des ressources énergétiques par les sociétés en lien avec l'utilisation de la ressource sol. Dans la société agricole, le sol constitue finalement une ressource primaire qui fournit différents types d'énergie de qualités finales différentes : la biomasse forestière pour la production de l'énergie thermique et la biomasse végétale pour la production du travail humain et animal (Sieferle, 2001). Dans cette optique, le système agraire (*agrarian solar energy system*) est un système socio-naturel au sein duquel on maintient un

¹ Selon Boyden et al. (1981), elle se divise en deux grandes parties : l'énergie somatique (qui suit la loi de la trophodynamie) et l'énergie extrasomatique (qui suit la loi de la thermodynamie).

² Voir l'Introduction de la section spéciale de *Ecological Economics* (volume 41) dédiée à l'histoire de l'environnement, intitulée, « Special Section: European Environmental History and Ecological Economics" (Martinez-Alier, Schandl, 2002, p. 175-176).

équilibre subtil entre la croissance démographique, la technique agricole (mécanique et biochimique¹) et la main-d'œuvre pour maintenir la productivité de l'agroécosystème et la fertilité du sol (Fischer-Kowalski, Haberl, 2007, p. 15). La transition énergétique de la biomasse à l'énergie fossile est expliquée par le fait de la société agricole dépasse sa capacité de charge (*carrying capacity*) pour son approvisionnement en énergie en raison de la croissance démographique. Le changement du régime énergétique de la biomasse au charbon, selon lui, allège le stress environnemental exercé sur le sol et permet davantage de croissance démographique. La théorie de la substitution indique donc qu'il y a substitution de la surface agricole et forestière par la surface virtuelle économisée grâce à l'utilisation du charbon. Sieferle explique d'une part le changement d'un système social qui était dépendant du sol vers un système plus indépendant ; il montre d'autre part le changement de la forme (ou stratégie) d'anthropisation par la transition énergétique. Lorsque la biomasse était une ressource majeure, la stratégie d'anthropisation se faisait par le moyen de l'agriculture et de la sylviculture. Les énergies fossiles libèrent la limite de la croissance de la société dépendant du sol, sa capacité porteuse écologique.

L'enjeu est de comprendre et d'expliquer la transition énergétique dans le cadre de la théorie de la transition socioécologique. On cherche à expliquer d'une part le processus socio-économique et d'autre part le processus naturel. Pour expliquer le processus de transition socioécologique, on se base sur la théorie systémique appliquée à l'écosystème naturel. Selon Fischer-Kowalski et Haberl, le passage d'un système à un autre signifie celui d'un équilibre dynamique à un autre. Le système se définit de manière qualitative, notamment par l'interaction des agents sociaux et naturels. Lorsque le système arrive au-delà d'un seuil (*threshold*), la transition s'effectue très rapidement, il y a alors changement de régime (*regime shift*). Le changement de régime est suivi par une période de perturbation (*disturbance*), qui comprend des changements imprévisibles. Le système est soumis ensuite à l'étape de la résilience, processus d'adaptation (Fischer-Kowalski, Haberl, 2007, p 4). Ce processus, selon eux, s'effectue sur un temps long qui correspond au temps du changement de mode de subsistance, tel que la révolution néolithique et la révolution industrielle (Fischer-Kowalski, Haberl, 2007, p 14). Dans les années 2000, l'écologie sociale propose un réseau de recherche sur la transition socioécologique de long terme (*LTSER*, suite au nom anglais, *Long-Term SocioEcological Research*). Il a pour but de promouvoir la recherche à

¹ La technique biochimique signifie ici la technique de la fertilisation sans la discipline de la biochimie qui est née durant le XIXe siècle.

long terme sur la dynamique du socioécosystème pour notamment comprendre le processus de transition¹.

La plus grande partie de la recherche reste de nature quantitative. L'analyse du processus de transition dans les études de cas est systématique. L'utilisation d'indicateurs précis et quantifiables prend une importance majeure dans la recherche, d'un côté avec des indicateurs socio-économiques (PIB, investissement énergétique dans le système agricole, exprimé en joule d'énergie fossile), d'un autre côté avec des indicateurs de flux physiques (la demande totale d'énergie et de matière). L'HANPP est utilisée comme l'indicateur synthétique. Selon Fischer-Kowalski, l'analyse des flux de matière et d'énergie (MEFA suite au nom anglais de la méthode, *Material and Energy Flow Analysis*) est un outil permettant la description de la transition socioécologique et des interactions société-nature. Il permet de décrire la dimension biophysique de la société par analogie entre la société humaine et l'écosystème naturel. L'échelle de la recherche est souvent nationale, voire internationale. L'exception serait l'étude de cas du métabolisme de la ville de Vienne, qui sert comme base de la comparaison avec d'autres études à l'échelle supérieure².

1.5.2. Recherche d'un modèle du système interactif société-nature en France.

Depuis les années 1970, le concept de métabolisme s'élargit à la ville, à l'industrie, et enfin à tout le système économique. Ainsi, au cours des années 1990, cette idée s'étend à l'ensemble de la société industrielle, dont la plus grande partie de la société développée et en développement fait partie (Barles, 2010, Fischer-Kowalski, 1998). La compréhension de l'écosystème humain s'améliore. On passe de l'assimilation de la société humaine à un écosystème naturel, à la compréhension du système complexe formé par les sociétés et la nature, avec ses nombreuses rétroactions entre environnement physique et société³. Cette amélioration est réalisée en parallèle avec la multiplication des études mettant en œuvre l'approche écosystémique. On rappelle par ailleurs que dans les années 1950, l'étude des flux de matière et d'énergie se faisait en considérant l'écosystème en état statique, et était souvent exprimée sous la forme d'un bilan

¹ Fischer-Kowalski et Haberl (2007) publient un ouvrage intitulé « Socio ecological transition and global change » qui est une synthèse de dizaines d'années de recherche sur le sujet (Fischer-Kowalski, Haberl, 2007) ; Pour le cadre théorique, voir également l'article de Haberl intitulé, « From LTER to LTSER: Conceptualizing the Socioeconomic Dimension of Long-term Socioecological Research. Ecology and Society » (Haberl et al., 2006), disponible sur la toile : <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art13/>

² Notamment voir le chapitre 5, « *The local base of the historical agrarian- industrial transition and the interaction between scale* » de l'ouvrage de Fischer-Kowalski et de Haberl (2007, p. 116-138).

³ Voir la section précédente 1.3.

sur un temps relativement court (Odum, 1953). Depuis les années 1970, on a commencé à reconnaître l'aspect fondamental du dynamisme spatiotemporel dans les écosystèmes, leurs caractères d'interdépendance et leur ouverture relative. Notamment, la théorie générale des systèmes a eu un impact important dans l'étude des écosystèmes.¹

Autour de 1980, un réseau de recherche baptisé Long-Term Ecological Research (LTER) se met en place aux États-Unis (Haberl et al., 2006). À la période suivante, certains chercheurs des LTER montrent également que la complexité de l'écosystème est liée à son interaction avec les écosystèmes voisins (Levêque, 2001). En France, des Programmes de Recherche sur l'Environnement sont lancés depuis la fin des années 1970. Ils jouent un rôle important dans la construction du cadre théorique dans l'étude de l'environnement et dans l'écologie interdisciplinaire. L'environnement est considéré comme « un champ de la recherche et d'action à définir » (Pavé, 2001). Le Programme Interdisciplinaire de recherche sur l'environnement (PIREN) est lancé en 1978 en parallèle avec la recherche internationale sur l'écologie (notamment le MAB et l'IBP) (Jollivet, 2001). Dès la création du programme, l'interdisciplinarité est au cœur des enjeux et l'on affirme également qu'il s'agit d'un programme de recherche à moyen et long terme. Le but est « d'établir des faits relevant de la connaissance fondamentale des milieux, nécessaire à la gestion et à la prévision en matière d'environnement » (Jollivet, 2001, non paginé)². Le premier cycle du programme (1978-1980) porte notamment sur le milieu rural en tant qu'interface entre la société humaine et l'écosystème naturel. L'orientation de la recherche française sur l'environnement montre dès lors une évolution importante. Au début, on s'intéressait aux cycles physiques, biogéochimiques, puis l'intérêt se porte de plus en plus sur l'interface entre le système physique et la société (Pavé, 2001). On cherche ainsi de nouveaux concepts et modèles qui expliquent le système interactif formé par la société humaine et la nature.

En 1990, est lancé un nouveau programme de recherche, le Programme Environnement (PE) sur la même ligne de la recherche, puis, en 1994, le Programme Interdisciplinaire de Recherche sur Environnement, Vie et Sociétés (PIREVS). Dans le cadre du PIREVS, la dimension temporelle et spatiale de la question écologique est en particulier mise en avant. On s'intéresse d'une part à une modélisation dynamique (temporelle et spatiale) géo et biophysique, d'autre part, à la

¹ Pour l'approche écosystémique, voir l'article de Holling, paru en 1973, intitulé, « *Resilience and stability of Ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics* » ; voir également la citation de Ficher-Kowalski, Haberl (2007, p. 4-5).

² Marc Jollivet, « Un exemple d'interdisciplinarité au CNRS : le PIREN (1979-1989) », *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], 4 | 2001, mis en ligne le 20 juin 2007, consulté le 19 septembre 2011. URL : <http://histoire-cnrs.revues.org/3092> ; DOI : 10.4000/histoire-cnrs.3092.

dimension historique. La dimension historique inclut notamment la question des acteurs sociaux et de l'interaction entre la société humaine et le changement des cycles physicochimiques. En particulier, la perception de l'environnement par les acteurs sociaux est considérée comme indissociable de la question de l'environnement physique. On essaie ainsi de théoriser le système interactif Société-Nature, et d'inventer un concept qui explique la dualité de l'environnement humain dans ses dimensions biophysique et sociale. Un nouveau concept est proposé pour désigner l'écosystème humain par C. Levêque. L'Anthroposystème (« *Socioecological systems* » en anglais) se définit comme un « système interactif entre deux ensembles constitués par un (ou des) sociosystème(s) et un (ou des) écosystème(s) naturel(s) ou artificialisé(s) s'inscrivant dans un espace géographique donné et évoluant avec le temps » (Levêque, Van Der Leeuw, 2003, cité par : Vivien, Muxart, 2011, p. 42). L'«espace géographique » ensuite se définit comme « un terme général qui doit être compris au sens d'unité territoriale, plus ou moins vaste, occupée, utilisée, exploitée et transformée par un individu, un groupe social ou, plus généralement, par une société humaine au cours du temps » (Levêque et al., 2003). Cette définition renvoie à un modèle d'interaction et de coévolution du sociosystème (culturel et immatériel) et de l'écosystème naturel (physique et matériel). Ainsi, comprendre le fonctionnement de l'anthroposystème et surveiller son évolution obligent à avoir un regard croisé des sciences humaines et sociales et des sciences naturelles.

L'étude de l'anthroposystème repose ainsi sur une lecture du temps qui est le résultat de temporalités multiples qui sont à la fois naturelles et sociales (Mathieu, 1997). Cela signifie que les processus caractéristiques de l'anthroposystème sont issus de l'articulation entre les temporalités naturelles (climatique, géologique, par exemple) et les temporalités humaines (révolution technique, crise et accident historique). De ce point de vue, les aménagements du territoire, par exemple, sont considérés comme des processus et des preuves évidentes du « long façonnement des milieux naturels par les sociétés » (Mathieu, 1997, p. 68). La méthode d'étude proposée est donc d'identifier les différentes temporalités, de les observer. Il s'agit en effet d'établir un lien entre le cycle (ou le processus) naturel et le cycle (ou le processus) de l'aménagement humain. Cette méthode nécessite de faire un appel à certaines disciplines qui problématisent la temporalité, et surtout la longue durée. L'approche peut être historique et archéologique, mais aussi biochimique ou géochimique à long terme. Au cours des années 1990, l'analyse du cycle naturel (souvent pour une substance ou une matière) en lien avec le cycle de l'aménagement d'une entité géographique prend une importance telle que le cycle d'azote en lien avec le changement d'usage agricole du sol et le cycle de l'aménagement hydraulique en lien avec la modification du cycle de l'eau (Barrue, Rodriguez, 1997, Benoit et

al., 2003)¹. En particulier, l'histoire de l'environnement² émerge et est proposée d'une part en tant que champ interdisciplinaire entre l'histoire de la nature et l'histoire sociale, économique et politique (voir Garnier, 2006, 2010, Schott et al., 2005). D'autre part, elle sert comme un outil d'étude de l'anthroposystème pour comprendre les interactions société-nature. Ces démarches sont illustrées en France par les travaux du PIREN et du PIREVS et affirmées dans les années 1990.

1.5.3. Ecologie territoriale

Dans les années 2000, en France, le concept de « métabolisme territorial » est proposé dans ce contexte, en même temps que celui d'écologie territoriale » (Barles in : Merlin, Choay, 2010). On s'intéresse dans ce cadre à la question du métabolisme de la ville (Barles et al., non daté)³. Néanmoins, le terme de « territorial » évoque la question des échelles et des unités géographiques fonctionnelles selon les enjeux environnementaux, tout en ayant pour but de ne pas limiter l'approche spatialisée du métabolisme à la ville. Il renvoie par ailleurs à la question des acteurs et de la gouvernance des flux. Selon Barles, la dimension urbaine de flux est centrale dans la question du métabolisme, qui n'est pas suffisamment abordée par l'écologie industrielle et par l'écologie sociale (Barles, 2007). La ville joue un rôle considérable dans la mobilisation directe et indirecte des ressources énergétiques et de matières (Barles, 2010). La conséquence est importante en amont compte tenu de la consommation indirecte des ressources, et en aval en raison de l'émission des déchets. La recherche est alors organisée selon trois axes principaux. Ce sont : 1) la quantification du métabolisme urbain pour comprendre les interactions entre la ville et son milieu naturel, l'observation de son évolution dans le temps, comme la caractérisation du métabolisme selon les différents espaces urbains, 2) l'observation des conséquences du métabolisme en termes d'empreintes environnementales, selon les matières et selon les substances considérées, 3) l'analyse du processus de l'anthropisation à long terme des milieux urbains en lien avec les cycles d'urbanisation et de planification urbaine.

¹ Voir : Acte de colloque Journées PIREVS – *Les temps de l'environnement*, Toulouse 5/6/7 nov. 1997. ; Piren Seine, *rapport d'activité 2002*, [en ligne] [réf. du 20 May 2009], Disponible sur la toile : <http://www.sisyphes.upmc.fr/piren/book/713>.

² On parle ici de l'histoire de l'environnement en Europe qui apparaît dans les années 1990, qui différencie son approche de celle de l'histoire de l'environnement qui est née aux Etats-Unis dans les années 1960. La dernière s'est focalisée surtout sur le sujet de la « nature sauvage », et de la « conservation » de celle-ci., Selon ENS, Séminaire « Histoire climat », Association d'histoire moderne et contemporain, Le 11 octobre 2010, ENS, Amphithéâtre Rataud.

³ Voir notamment l'article : Barles et al. [s. d.], « Ville et fonctionnement du bassin de la Seine : matériaux de construction, sol, énergie, alimentation. Contribution à une écologie territoriale ». In : *Programme PIREN-Seine : Ville et fonctionnement du bassin de la Seine*, PIREN-Seine, Phase V – Rapport de synthèse 2007-2010.

Enfin, 4) ces questions s'associent à la question de la gestion des flux et des acteurs. Dans une perspective de mise en action de la recherche, la question de la proximité est considérée comme déterminante afin d'ouvrir la possibilité d'innovations locales en matière de dématérialisation et de décarbonisation. On associe ainsi le dysfonctionnement des flux à la question des acteurs, institutions, politiques et techniques à l'origine de ces flux (Barles, 2007).

Par ailleurs, l'histoire de l'empreinte environnementale des villes sur le long terme a donné lieu à un colloque international avec divers cas d'études de villes occidentales, telles que Paris, Vienne, Londres, New-York, Athènes, Bruxelles, Providence, Barcelone. *L'hinterland*, terme proposé initialement par Von Thünen, est proposé comme une notion qui permet de comprendre la structure du territoire rural ou extracteur en relation avec le territoire urbain. Le métabolisme urbain ne s'auto-entretient pas, mais dépend du métabolisme de milieux extracteurs ou du métabolisme rural¹.

1.6. Conclusion

On observe une amélioration significative durant le XXe siècle de la connaissance scientifique relative au fonctionnement de l'écosystème et à l'influence humaine sur celui-ci. L'écologie scientifique connaît une évolution importante en particulier après 1950. Dans les années 1960 et 1970, la question énergétique s'est posée en lien avec celle de l'épuisement des ressources à l'échelle de l'écosystème planétaire et à une échelle temporelle longue. Dans cette perspective, la ville occupe une place centrale. On met en évidence l'urbanisation accélérée et la consommation croissante de ressources énergétiques. Une importante production scientifique se développe au cours des années 1960 et 1970 sur la question des ressources et des flux énergétiques dans une perspective très large qui inclut différents domaines d'études. Celle du métabolisme urbain est introduite durant cette période et contribue à améliorer la connaissance scientifique des flux d'énergie de la ville. Néanmoins, elle reçoit une critique importante compte tenu de la faiblesse théorique et de la méconnaissance du système social qui interagit avec le système naturel. Depuis, la conceptualisation des flux de matière et d'énergie et la méthode de quantification des flux ont connu des progrès importants. D'autre part, on mène une recherche scientifique plus fondamentale pour expliquer les interactions et la coévolution entre la société humaine et l'écosystème naturel. L'écologie sociale s'intéresse en particulier à la question de la transition socioécologique. Elle essaie de théoriser la société humaine comme un « système

¹ Voir le volume 12, issue 2 de la revue, *Regional Environmental Change*.

socioécologique » qui est doté d'un « métabolisme social ». En France, on propose un modèle d'« anthroposystème » pour expliquer l'interrelation entre le système social, l'écosystème naturel et les milieux. On cherche ensuite à expliquer le processus de formation d'un anthroposystème dans une dimension spatiotemporelle. En France, l'écologie territoriale est proposée dans le but de comprendre les interrelations entre la société urbaine et ses milieux.

Chapitre 2. Méthodologie : bilan de matière et d'énergie

2.1. Préalable : système énergétique, énergie, source et ressource

Énergie technique et énergie biologique

L'énergie technique désigne les sources énergétiques et leurs produits énergétiques secondaires¹ qui sont utilisés dans le système énergétique technique pour produire le travail mécanique, la chaleur pour le chauffage des locaux, la préparation alimentaire, la lumière et le traitement des informations, c'est-à-dire les combustibles fossiles et fissiles, le gaz naturel, l'énergie hydraulique et éolienne, mais également le biogaz, la biomasse forestière, etc. Alors que l'énergie technique est définie selon son usage final « technique », l'énergie biologique est définie selon sa propriété biochimique et est quantifiée selon le contenu énergétique de la biomasse, en matière sèche et en pouvoir calorifique. L'énergie biologique signifie celle qui est stockée dans les sources énergétiques de la biomasse et est évaluée selon le pouvoir calorifique potentiel de la matière sèche. Cette énergie biologique ne se limite pas à un seul usage, mais produit à la fois de l'énergie nutritive et de l'énergie technique.

La source énergétique, l'énergie secondaire, l'énergie finale et utile

L'énergie dans la statistique énergétique désigne différentes formes d'énergie quel que soit leur degré de transformation. Selon le degré de transformation, on désigne les sources énergétiques primaires qui ne sont soumises à aucune transformation ni séparation des matières, c'est-à-dire, directement extraites ou captée, tels que la houille, le lignite et le pétrole brut (UN, 1982, Observatoire d'énergie, 1985). Quant à l'électricité issue directement des sources primaires telle que l'éolien, le solaire, la géothermie, l'hydraulique, elle est classée comme énergie primaire selon les sources². L'énergie secondaire comprend l'énergie dérivée des combustibles fossiles,

¹ En anglais, *energy carrier* : tous les produits énergétiques destinés à la consommation.

² Elle est classée ainsi par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), néanmoins, la statistique énergétique européenne propose de classer l'électricité dans l'énergie secondaire. C'est la raison pour laquelle la classification de l'électricité est souvent confuse entre énergie primaire et énergie secondaire (Øvergaard, 2008).

fissiles et de la biomasse, et l'énergie fabriquée à partir de cette dernière (électricité), comme le montre le tableau suivant.

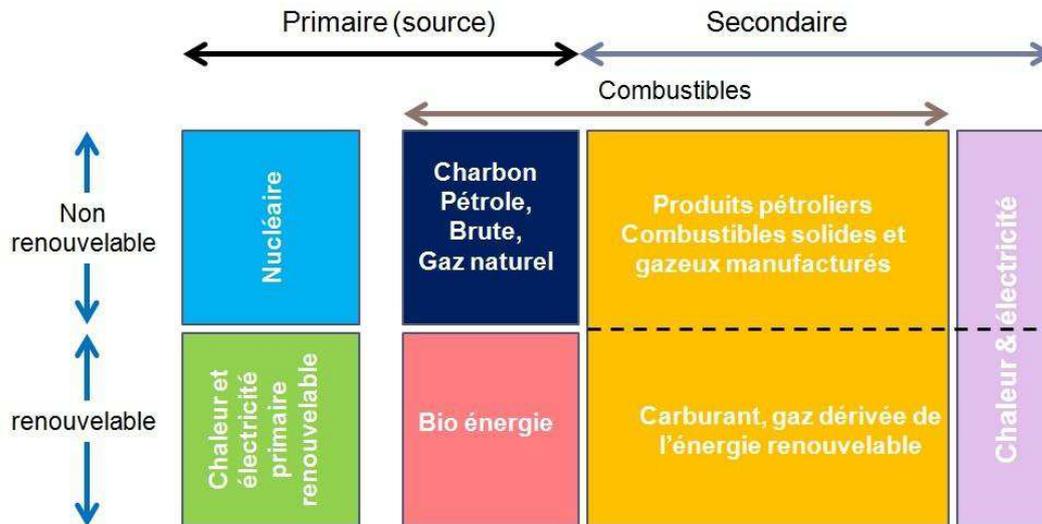


Figure 2.1. Table de classification d'énergie.

Source : Treanton, 2008.

La consommation énergétique finale correspond à la quantité de produits énergétiques livrés aux consommateurs finaux, quantité définie selon la nomenclature économique et la nomenclature énergétique¹, et qui n'inclut pas logiquement le secteur dit énergétique considéré comme secteur intermédiaire, celui de la fabrication d'énergie, telle que la raffinerie et les industries de l'électricité et du gaz.

Système énergétique

En langage courant, l'énergie renvoie à l'énergie technique, à ses sources énergétiques primaires et aux produits énergétiques. Le système énergétique technique est l'ensemble des dispositifs techniques permettant l'approvisionnement des produits énergétiques, de l'amont (extraction) à l'aval (usage final). Il a pour objet de produire l'énergie technique. Ce système énergétique technique connaît une évolution importante parallèle à l'évolution du niveau d'appropriation des différentes sources énergétiques par la société industrielle. Citons par exemple l'évolution du système énergétique technique dans l'organisation internationale de normalisation (ISO) (Grob, 2003). En 1947, dès sa création, les combustibles fossiles, charbon et pétrole et leurs produits dérivés, sont l'objet d'une définition par l'ISO. En 1956 on inclut dans cette définition l'énergie

¹ (Nomenclature d'activités économiques pour l'étude des livraisons et consommations d'énergie) NCE, nomenclature d'activités française (NAF).

nucléaire, puis l'énergie thermique solaire en 1980, et enfin les diverses sources énergétiques renouvelables (biomasse, éolienne, géothermique, hydrogène, etc.) dans les années 1990.

Si l'on élargit cette notion de système énergétique à l'échelle planétaire, le rôle des végétaux est, comme le souligne Vernadski, primordial dans l'équilibre du système et dans la production primaire. Dans l'écosystème naturel, l'énergie solaire est une source énergétique primaire indispensable pour la survie et pour la productivité des organismes vivants. Cette énergie biologique se renouvelle chaque année en quantité quasi constante (Smil, 2008). Cette ressource est présente dans la biosphère et est utilisée différemment selon les contextes techno-économique et socio-politique. De ce fait, du point de vue de l'économie écologique, l'agriculture ou l'agroécosystème est perçu comme secteur énergétique de production d'énergie primaire. Les combustibles fossiles connaissent en effet un cycle de formation constant, mais très long qui est égal à plusieurs milliers de fois celui du cycle de formation de la biomasse végétale (Heinrich et al., 2010, p. 91). Selon certains écologues, la surexploitation de l'énergie du stock (combustibles fossiles) conduit par conséquent à un déséquilibre du système énergétique planétaire qui s'exprime par la perturbation du cycle du carbone - déséquilibre entre le stockage du carbone biologique et le déstockage du carbone fossile qui est une cause majeure du changement climatique - et entraîne des crises dans le système énergétique technique (Debeir, Deléage, 1986, Smil, 2008).

2.2. Analyse des flux de matières et d'énergie

2.2.1. Perspective de long terme du métabolisme énergétique urbain

Ce chapitre introduit les deux prochains chapitres d'analyse portant sur le métabolisme énergétique parisien entre les XIXe et XXe siècles. On tente en effet d'établir un schéma de fonctionnement de la ville selon l'approche écologique et de quantifier ce fonctionnement par l'expression des flux énergétiques. Dans le contexte historique, la ressource énergétique appropriée par la ville a évolué en termes de quantité totale et de qualité, ainsi que de type de ressource. Cette évolution conduit au changement du système énergétique et ce dernier s'opère du fait de divers facteurs politiques, techniques, économiques et écologiques. De ce point de vue, l'histoire de la consommation énergétique urbaine est intimement liée à celle des techniques d'approvisionnement, au-delà de l'identification de la ressource énergétique par les sociétés concernées. La consommation d'une source énergétique pour la société urbaine serait déterminée par le facteur technique (disponibilité et choix d'une source énergétique et efficacité

du système de conversion ou du convertisseur) et socio-économique (évolution du besoin en termes de qualité, en chaleur, en force, en lumière, etc.).

Dans notre travail de thèse, notre intérêt majeur porte d'abord sur les ressources en amont mobilisées pour l'approvisionnement de la ville en énergie, variable écologique, ensuite sur la mutation effectuée dans les convertisseurs d'énergie au cours de chaque période caractéristique, variable économique et technique, et enfin sur la consommation urbaine d'énergie dans ses diverses formes finales, variable sociale. De plus, on s'intéresse à définir l'espace géographique qui participe au ravitaillement en énergie de Paris, c'est-à-dire les lieux de provenance de l'énergie primaire en tant que milieu participant à l'alimentation en ressource naturelle d'une ville tributaire, et les lieux où se situent les convertisseurs d'énergie, l'industrie énergétique. Ces conversions peuvent être opérées au sein ou à l'extérieur du territoire (Paris) et la part respective des deux et la géographie des secteurs (convertisseur) peuvent changer dans le temps selon le contexte industriel intra ou extra urbain et selon le contexte écologique, notamment la mutation dans les ressources naturelles, et selon la distribution finale de l'énergie. On s'intéresse à toutes les matières qui concourent à l'approvisionnement et à la consommation énergétique urbaine. Par conséquent, notre bilan va comprendre toutes les matières riches en énergie : combustibles fossiles, fissiles, énergie primaire renouvelable, biomasse forestière et agricole utilisée pour l'usage technique et nutritif. Le bilan réalisé est divisé en deux : 1) bilan de l'énergie technique hors biomasse et 2) bilan de l'énergie de la biomasse, énergie biologique (voir la section suivante 2.3). Le rôle de l'énergie issue de la biomasse végétale est considéré comme étant important dans l'histoire de l'énergie urbaine (UN, 1982 ; Martinez-Alier, 2007) : cette question est posée en particulier du point de vue de la substitution entre cette énergie et l'énergie fossile dans le processus de transition énergétique. D'autre part, on considère cette énergie comme un gisement sous-exploité (ressource extraite inutilisée et diverses pertes) en termes de prospective de gestion de cette ressource. On essaie par la suite de formaliser une méthode d'analyse et de présenter les indicateurs principaux que l'on utilisera pour étudier le métabolisme énergétique urbain et son évolution dans le temps.

2.2.2. Analyse des flux de matières et d'énergie : méthode de référence

Au sens large, l'analyse des flux de matière et d'énergie est une méthode d'analyse du débit des matières et d'énergie au sein d'un ensemble consécutif de chaînes d'extraction, de transformation, de fabrication, de consommation, de recyclage et de décharge de matières (Ayres, Ayres, 2002). Le compte des flux est réalisé en unité physique : en tonne en général et

en joule pour l'énergie technique dans certains cas (Ngo, Pataki, 2008). L'objectif de cette analyse est de comprendre la structure et le fonctionnement du métabolisme social et industriel et les échanges entre la société et la biosphère ou entre l'industrie et la biosphère (Ayres, 2002). De manière générale, on distingue l'Analyse des Flux de Matières de l'Analyse de Cycle de Vie, ainsi que des tableaux Input-output, méthodes voisines dans leur objet, mais différentes dans leur expression. Une grande partie de l'histoire de la méthodologie de l'Analyse des flux de matières et d'énergie est tracée par Fischer-Kowalski dans deux articles, publiés dans le *Journal of Industrial Ecology* (Fischer-Kowalski, 1998, Fischer-Kowalski, W. Hüttler, 1999). Le développement de la méthodologie est engagé depuis les années de 1990 (Bringezu et al., 1997), notamment en termes d'harmonisation. Cette harmonisation permet de multiplier les études de cas et de les comparer entre eux. On peut citer l'exemple du manuel de l'Analyse des flux de matières publié au début des années 2000, ainsi que la standardisation de la méthode faite par l'Eurostat (Ayres, Ayres, 2002).

De manière générale, l'Analyse des flux de matières (AFM) comprend l'Analyse des flux de substances (AFS ou *SFA* : du nom anglais de *Substance flow analysis*) et l'Analyse des flux de matières brutes (AFMB). L'AFS se réalise dans une approche physico-chimique et s'intéresse à analyser notamment certaines substances critiques du point de vue de leurs impacts environnementaux, par exemple le carbone ou le plomb. L'AFMB a pour objet d'établir un bilan des matières en termes de quantité de matières brutes et est réalisée à l'échelle macro-économique. L'AFM est également appelée économie physique et est utile pour évaluer le niveau de consommation de matière d'une société. Elle s'intéresse à la fois aux consommations directes et indirectes. Ces méthodes sont appliquées dans plusieurs études de cas à différentes échelles : globale, nationale, régionale, urbaine, fonctionnelle. L'AFM se focalise sur un système socio-économique et vise à donner une vision d'ensemble de la matérialité des sociétés, voire à contribuer à la définition de politiques en faveur de la dématérialisation. Actuellement, le bilan de matières brutes de chaque pays est réalisé et réactualisé dans le cadre de l'analyse des flux de matières par des organismes scientifiques qui font partie de la communauté de l'écologie industrielle depuis les années 2000¹. Il existe également d'autres méthodes, comme le montrent les exemples de l'analyse des flux de matières et d'énergie de l'Autriche et de la Californie (Krausmann, Haberl, 2000, Ngo, Pataki, 2008). Le premier cas est une analyse des flux de matières et d'énergie pour toutes les matières ayant un potentiel énergétique, quand bien même leur usage ne serait pas énergétique (par exemple le bois de construction) en joule. Le

¹ SERI (Sustainable Europe Research Institute).

deuxième cas est une analyse des matières en deux unités physiques : joule pour l'énergie technique et tonne pour les autres matières.

En théorie, dans le cas d'une analyse à l'échelle globale (planétaire), toutes les matières se conservent. Les flux ne sortent donc pas du périmètre d'étude. Citons par exemple l'analyse du cycle global de l'azote ou du carbone. En revanche, si l'on essaie de faire une analyse à l'échelle inférieure, l'écart entre le périmètre d'étude et la frontière du système des flux physiques devient problématique en termes de flux indirects. En effet, les flux de matières liés à la consommation d'une population délimitée géographiquement ne se limitent pas au périmètre d'étude de cette population (Fischer-Kowalski, 1998). De ce fait, la méthode de l'AFM distingue le périmètre spatial d'étude, qui est administratif, de la frontière du système des flux de matières, qui inclut l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement et d'élimination ou d'exportation des matières.¹ Le système des flux de matières est généralement plus étendu que le périmètre d'étude. Par ailleurs, « l'environnement local » correspond à l'environnement physique au sein de ce périmètre administratif.

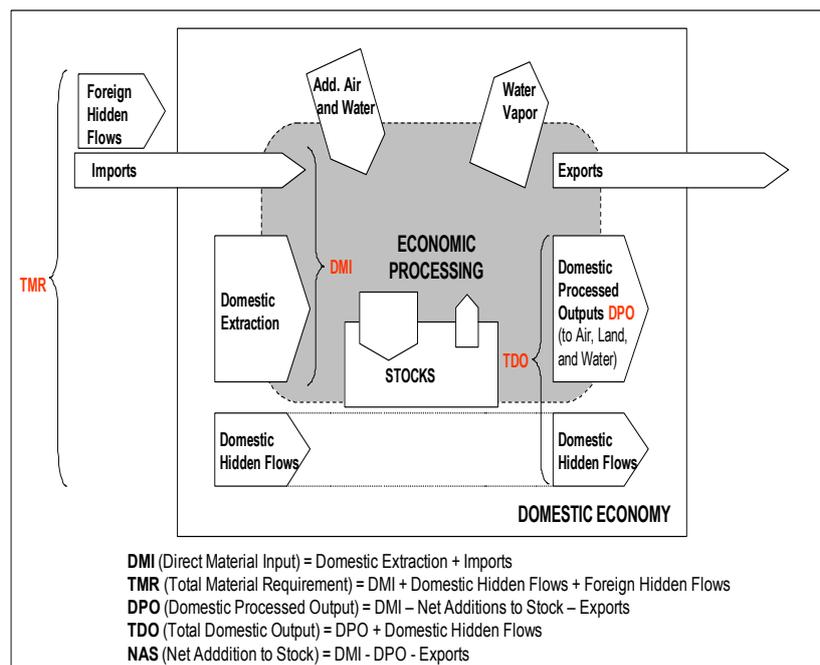


Figure 2.2. Schéma de l'Analyse des flux de matières. Source : Eurostat, 2001. (L'AFME utilise presque les mêmes indicateurs. On expliquera ces indicateurs dans la section suivante 2.3).

¹ La méthode est utilisée souvent dans les études de cas à l'échelle nationale et elle utilise la statistique nationale de production, d'importation, d'exportation. (Voir Weisz et al., 2006, Bringezu et al., 1997).

L'AFM distingue également l'impact économique et environnemental local de celui sur le reste du monde. La méthode s'intéresse ainsi à la fois à la quantité de matières concernée directement par le fonctionnement de cette entité administrative (flux local) et à celle des matières qui ne la concernent pas directement (flux indirect du reste du monde), mais qui ont été mises en jeu ailleurs par son fonctionnement¹. La ressource disponible dans le périmètre d'étude se distingue entre celle extraite de son environnement local et celle importée de l'extérieur du périmètre (reste du monde). Ensuite, ces deux types de flux peuvent encore être divisés en deux types : les flux utilisés et les flux inutilisés, c'est-à-dire ceux qui sont comptés et ceux qui ne sont pas comptés dans la statistique économique comme une production. Parmi ces flux inutilisés, on peut citer les déchets des minerais et les résidus agricoles laissés dans les champs, matières qui ne possèdent pas de chaîne industrielle de valorisation. Lorsque l'on croise ces critères, on obtient différents types de flux comme le montre le tableau suivant.

Tableau 2.1. Types de flux d'entrée dans l'AFM

| Chaîne de produits | Utilisé et inutilisé | Local (domestique) ou reste du monde | Type de flux |
|----------------------|----------------------|--------------------------------------|---|
| Directe | Utilisé | Local | Extraction locale utilisée |
| Inexistante | Inutilisé | Local | Extraction locale inutilisée |
| Directe | Utilisé | Local | Importation |
| Indirecte (en amont) | Utilisé | RdM | Flux indirects associés à l'importation |
| Indirecte (en amont) | Inutilisé | RdM | |

Source : Eurostat, 2001 (RdM : Reste du Monde).

Néanmoins, l'estimation des flux indirects et inutilisés demande des données qui ne font pas l'objet de la statistique publique. De ce fait, la base de données sur les flux des matières, qui comprend les flux utilisés et inutilisés à l'échelle nationale, s'est développée progressivement, notamment grâce à la communauté de l'écologie industrielle et de l'analyse du cycle de vie².

Le métabolisme de la société industrielle est décomposé en métabolisme des sous-systèmes de fabrication (extraction, transformation, consommation, décharge, etc.) et des sous-systèmes de

¹ On utilise l'expression « ce qui n'entre pas dans l'économie» (Eurostat, 2001).

² Le SERI (Sustainable Europe Research Institute) possède une base de données en ligne des flux de matières qui comprend la consommation directe et indirecte des matières à l'échelle nationale, construite en collaboration avec le Wuppertal Institute. Ce dernier propose l'indicateur MISP (*Material Intensity Per Service Unit*) et évalue la quantité de matière qui existe en amont d'un produit. Pour obtenir le MISP pour un produit, on utilise l'analyse de cycle de vie. On peut également obtenir cet indicateur pour un produit agrégé en utilisant la méthode macro-économique.

la biosphère (hydrosphère, pédosphère et atmosphère). On les nomme compartiments socio-économiques pour les premiers et compartiments de la biosphère pour les seconds. Ce découpage en compartiments socio-économiques a pour objet de révéler la cascade des flux et de faciliter l'analyse de flux et de processus complexes. Ce découpage est notamment utilisé pour faire des diagnostics de flux dans les chaînes industrielles : extraction, transformation, distribution, etc. En complément, la division de la biosphère en trois compartiments permet d'évaluer les impacts environnementaux en aval dans les trois sphères physiques : atmosphère, pédosphère et hydrosphère (air, eau et sol pour la méthode Eurostat) (voir fig. 2.3)¹.

L'analyse des flux de matière est assez bien documentée concernant les conventions méthodologiques : définition des termes et délimitation du système des flux. En revanche, à l'échelle urbaine, les flux indirects de matière et d'énergie sont primordiaux si l'on considère les flux d'importations qui occupent une part essentielle de la consommation urbaine. L'origine des flux entrants et de leurs flux amont associés dépassent largement le périmètre spatial de la ville. Par conséquent, l'analyse des flux de matière demande l'inventaire des flux indirects (utilisés et inutilisés de l'extérieur) qui sont générés en dehors du périmètre d'étude.

2.2.3. Bilan de l'énergie technique

Le bilan énergétique (BE) est un bilan de l'énergie technique, il s'agit d'un bilan des matières appartenant à la catégorie des produits énergétiques, le gaz, l'électricité, le charbon, les produits pétroliers, etc., en valeur énergétique, souvent en tonne équivalent pétrole. Ces produits énergétiques correspondent aux flux énergétiques commerciaux utilisés pour le fonctionnement industriel à l'intérieur d'un périmètre d'étude, qui est souvent un pays. Cette méthode s'intéresse occasionnellement au bilan à l'échelle régionale (RARE, 2004). Le bilan énergétique est en effet une compilation statistique selon un ensemble de conventions concernant le périmètre d'étude, la frontière du système énergétique, les unités du compte et les coefficients d'équivalence². À l'échelle internationale, c'est l'Agence internationale de l'énergie qui prend en charge également l'harmonisation de la méthode et son actualisation. Ainsi, elle joue un rôle de collecte et de publication des données relatives à la consommation et à la transformation de l'énergie. A l'échelle nationale, en France, c'est l'Observatoire de l'énergie au sein de la Direction générale de l'énergie et des matières premières (DGEMP jusqu'en 2009, actuellement

¹ Voir également, Baccini, Brunner, 1991

² A l'échelle nationale. A l'échelle régionale en effet, il n'y a pas vraiment de convention. Les statistiques énergétiques régionales présentent la consommation totale finale et la consommation finale par secteur.

coordonnée par le SOeS) qui prend le relais de la collecte et de publication de la statistique nationale de l'énergie, et qui établit un bilan de l'énergie pour la France.

Le bilan énergétique à l'échelle régionale et nationale en particulier s'intéresse à la quantité totale d'énergie nécessaire pour l'approvisionnement primaire en énergie pour un territoire et, au niveau technique, notamment à l'efficacité du système de conversion d'énergie primaire en énergie finale dans le secteur de l'électricité et du gaz, par exemple. Les deux indicateurs principaux dans le système du Bilan énergétique sont l'Approvisionnement énergétique total primaire (AETP ; en anglais *TPES, Total Primary Energy Supply*) et la Consommation énergétique finale totale (CEFT ; en anglais *TFEC, Total Final Energy Consumption*). Lorsque le premier indicateur mesure la quantité totale d'énergie disponible dans un périmètre d'étude donné, le deuxième évalue la quantité totale d'énergie disponible pour les consommateurs finaux en considérant le rendement de transformation et de distribution des énergies secondaires (gaz manufacturé et électricité, par exemple). Citons l'exemple du bilan de l'énergie technique de la France pour 2007. Ce bilan montre les flux énergétiques à partir de la quantité totale énergétique disponible pour la France en 2007 (en Approvisionnement total d'énergie primaire) ainsi que la perte énergétique dans la conversion entre l'énergie primaire et l'énergie finale. La consommation énergétique finale correspond à la quantité disponible pour les consommateurs finaux (à ne pas confondre avec l'énergie utile, qui dépend du rendement des appareils utilisés par les consommateurs : appareils de chauffage ou de cuisson dans un logement par exemple).

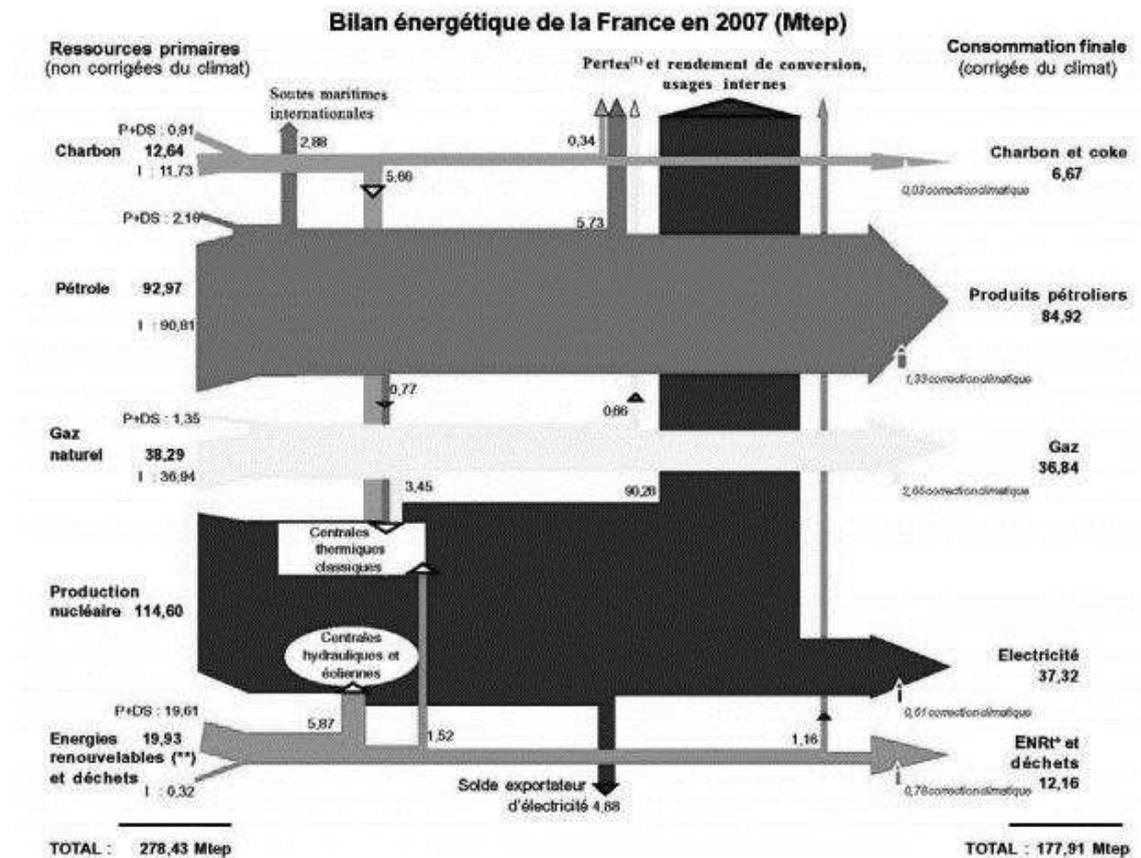


Figure 2.3. Représentation du bilan énergétique de la France en 2007. Source : DGEMP, 2008, 31 p.

Dans la méthode conventionnelle utilisée dans la statistique énergétique de la France (DGEMP) et internationale (Agence Internationale de l'énergie), la frontière du système énergétique est limitée par le périmètre d'étude et correspond à un périmètre utilisé pour la statistique énergétique : l'enquête sur la livraison et le transport d'énergie, dont le grain le plus fin est le département dans le cas de la France¹. La méthode s'intéresse à la consommation des activités économiques, par exemple, les secteurs du transport, du résidentiel-tertiaire, de l'agriculture, de l'industrie. Les secteurs sont définis dans le cas de la France selon la nomenclature NCE (Nomenclature d'activités économiques pour l'étude des livraisons et consommations d'énergie)². Le bilan énergétique concerne uniquement les flux de production et de consommation qui ont lieu dans la limite du périmètre d'étude. Il ne s'intéresse par conséquent qu'aux pertes liées à la transformation et au transport qui interviennent au sein du périmètre

¹ SITRAM (Système d'information sur les transports de marchandises), 2006, Base de données du Ministère de Transport (MEDDEM, www.statistiques.equipement.gouv.fr/). ; Données de la distribution des carburants issue du Comité professionnel du pétrole (CPDP).

² NCE (Nomenclature d'activités économiques pour l'étude des livraisons et consommations d'énergie).

d'étude concerné. La distinction entre les produits finis et les matières premières n'existe pas au moment de l'entrée et de la sortie du périmètre, ainsi que la notion de flux inutilisés. De ce fait, cette méthode omet une part importante des flux mis en jeu, c'est-à-dire, les flux d'énergie indirects associés à l'extraction et à l'importation.¹

Lorsqu'on applique cette méthode à une ville, puisque l'énergie est issue de et pour sa plus grande partie transformée hors de la capitale, les flux indirects sont engendrés : 1) par les activités d'extraction qui sont exercées en dehors des limites de la capitale, 2) par les activités de transformation qui se situent-elles aussi partiellement en dehors des limites de la capitale (flux dissipatifs (pertes de conversion) issus des usines électriques par exemple). Les flux indirects par exemple qui correspondent à 1 KWh de consommation énergétique parisienne peuvent être évalués en considérant le rendement de transformation et de distribution des énergies secondaires des secteurs de transformation énergétique approvisionnant Paris. De ce fait, dans l'AFM, on distingue les flux de matière première, et ceux de produits finis et semi-finis, puisque les premiers n'ont pas la même valeur en termes d'équivalence en matière brute et en énergie primaire.

2.3. Définition de la méthode utilisée dans cette thèse

2.3.1. Cadre d'analyse et indicateurs

Périmètres

Le périmètre d'étude désigne un périmètre délimité géographiquement pour étudier la consommation finale énergétique urbaine, dans ce travail de thèse, la ville de Paris, ce qu'on va appeler par la suite « territoire ». Il représente à la fois sa dimension biophysique, qu'on va appeler « environnement local » et sa dimension économique et sociale, qu'on va appeler « économie ». L'expression « demande énergétique totale » signifie la demande énergétique totale du système énergétique considéré (Roberts, 1975). Le système énergétique qui concerne le « territoire » comprend les dispositifs techniques destinés à sa consommation énergétique finale, y compris ceux qui permettent la transformation, le transport et l'extraction en amont. Par conséquent, sa limite varie dans le temps en fonction de l'évolution du système lui-même. On va appeler cette limite par la suite la frontière du système énergétique. Tous les dispositifs techniques destinés à la consommation énergétique finale d'une ville existent à l'intérieur de son territoire. En revanche, ceux qui concernent la transformation, le transport et l'extraction

¹ On expliquera plus précisément dans les pages suivantes p. 71 – 74.

peuvent se situer à l'extérieur du territoire, en particulier dans le cas d'une ville. Par conséquent, les pertes énergétiques lors de la séparation et de la transformation existent à l'intérieur et en dehors du territoire. En termes d'impacts environnementaux, la distinction entre les pertes locales et extérieures au territoire permet de mesurer l'effet différé dans l'espace de la consommation énergétique urbaine.

Indicateurs

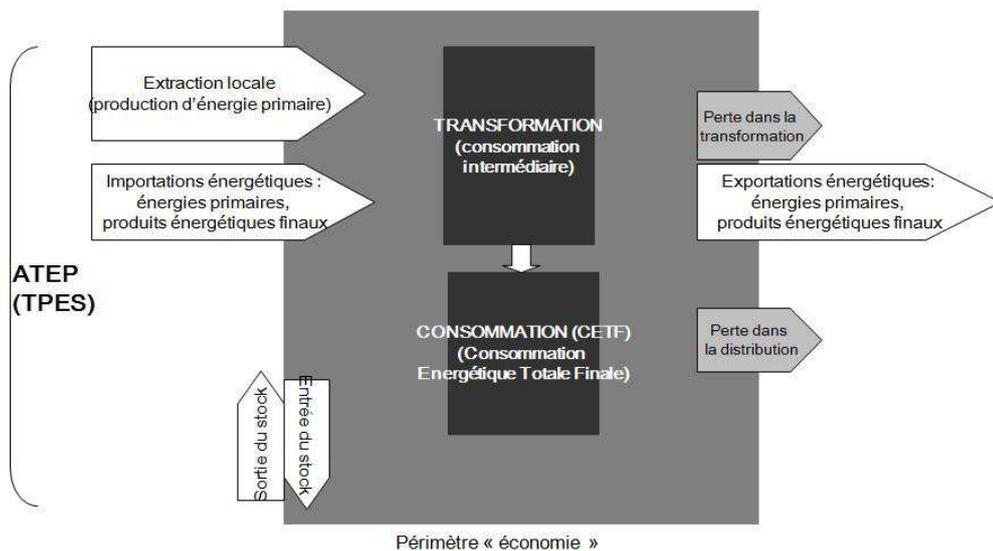
Notre méthode du bilan énergétique est basée sur celle de l'analyse des flux de matière (AFM) (Eurostat, 2001, Layke et al., 2000), notamment pour le choix des indicateurs, puisque cette méthode permet d'évaluer les flux énergétiques en amont de la consommation d'énergie pour un périmètre d'étude. On se base également sur la méthode du bilan énergétique (BE) pour obtenir les coefficients de conversion entre l'énergie primaire et l'énergie finale. On s'intéresse à analyser la consommation urbaine énergétique par les trois indicateurs principaux : 1) consommation énergétique finale totale comme définie ci-dessus (CEFT) (tableau 2.2), 2) entrée énergétique totale, qui comprend la consommation finale énergétique urbaine et la perte énergétique intra-urbaine (EET) et 3) demande énergétique totale (DET) qui comprend la consommation énergétique finale et les pertes énergétiques intra et extra urbaines qui sont associées à l'approvisionnement en énergie.

Pour obtenir ces trois indicateurs principaux, la distinction entre l'énergie primaire et l'énergie secondaire parmi les flux d'entrée et de sortie est indispensable pour le traitement des données issues des statistiques énergétiques et leur compilation selon notre méthode d'analyse. La figure suivante montre la méthode de la décomposition des flux à l'entrée et à la sortie. On distingue l'énergie selon le niveau de transformation à l'entrée et à la sortie en source énergétique primaire et énergie secondaire. Cette distinction a pour but d'évaluer la consommation des produits énergétiques secondaires en source énergétique primaire équivalente. La méthode d'équivalence consiste à évaluer les flux indirects en amont et comprend deux étapes : perte à la transformation (équivalent en produits primaires) et perte à l'extraction (équivalent en quantité totale d'extraction). Ces flux sont ensuite étudiés par rapport à la limite du territoire. Tous les flux qui sont concernés directement par le fonctionnement du territoire sont qualifiés de « locaux »¹. Ceux qu'on appelle flux indirects sont les flux qui ne concernent pas directement le territoire, mais qui sont mis en jeu par son fonctionnement en amont de la chaîne d'approvisionnement. Donc, comme le montre la figure suivante, les flux d'extraction locale des

¹ Le terme « local » a été utilisé par préférence au terme « domestique » qui est utilisé pour une analyse à l'échelle macroéconomique, mais peut être source de confusion.

sources énergétiques primaires sont décomposés en : extraction locale utilisée et extraction locale inutilisée¹ (flux cachés intérieurs) ; les flux d'importation en provenance d'autres régions et pays se décomposent en importation d'énergie primaire et secondaire.

Les figures suivantes sont faites en particulier pour comparer la frontière du système du bilan énergétique normalisé par l'AIE (fig. 2.4) à celui de l'analyse des flux de matières utilisées dans ce travail (fig. 2.5). La frontière du système énergétique d'un bilan énergétique correspond à un périmètre administratif (périmètre « économie » de la méthode de l'analyse des flux de matières de l'Eurostat (2001). En revanche, l'Analyse des flux de matières reconnaît que le système énergétique associé à l'approvisionnement d'un territoire peut exister en dehors de son périmètre.



Atep...Approvisionnement totale énergétique primaire (*TPES : Total Primary Energy Supply*) = Extraction locale + Importations énergétiques + - stock

CEFT...Consommation Énergétique Finale Totale (*TFEC : Total Final Energy Consumption*) = Energies livrées aux secteurs de consommation finale

Figure 2.4. Schéma du bilan énergétique en comparaison avec l'Analyse des flux de matières

Source : schéma, dans cette thèse, adaptée de l'Eurostat, 2001 et de Layke et al., 2000.

((Stock : Quantité de l'entrée est exprimé en moins (-) et de la sortie est exprimé en plus (+) sur une unité de temps donnée, souvent pour un an (p. ex., stock de combustibles). Nous avons ignoré cette quantité négligeable.)

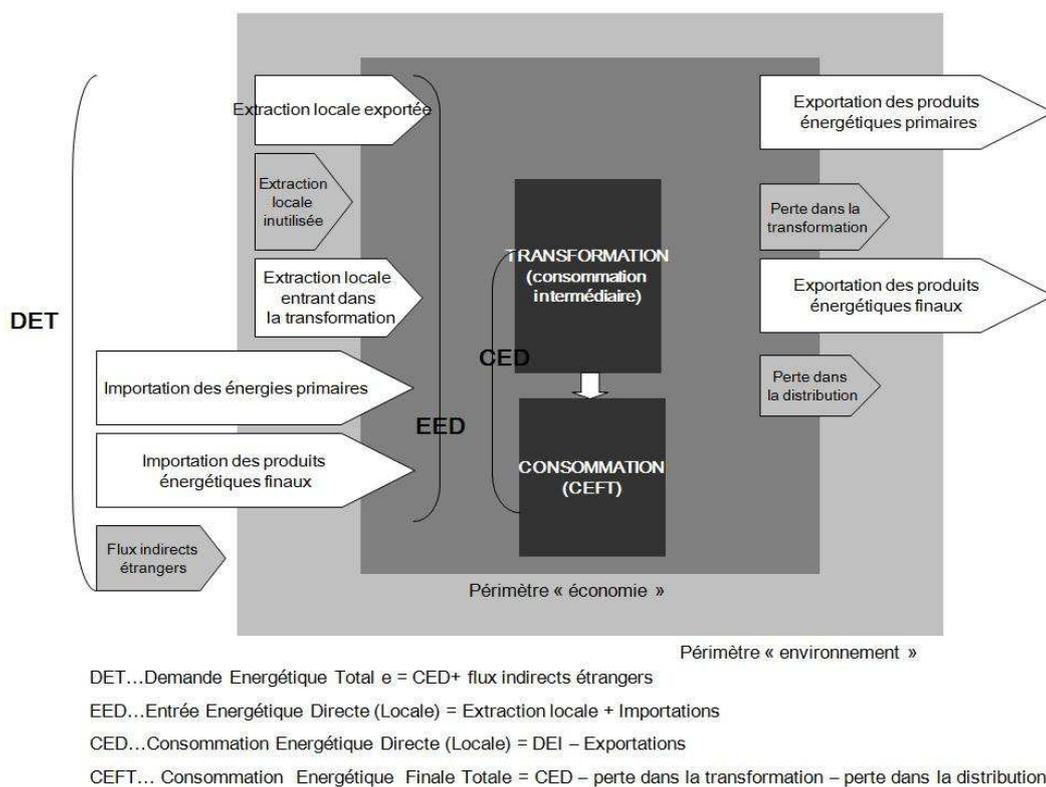


Figure 2.5. Schéma de l'analyse des flux de matières et d'énergie utilisée dans la thèse.

Source : cette étude, adapté de Layke et al., 2000, Krausmann et al., 2004 et de Haberl, 2001a.

Tableau 2.2. Relevé des indicateurs synthétiques

| | | |
|--|--------------------|--|
| Consommation énergétique finale totale | CEFT | définie comme la somme de quantité livrée aux consommateurs finaux, qui sont définis selon la nomenclature NCE (voir la section 2.3.4 |
| Consommation énergétique directe : a | CED | EED – exportation |
| Entrée énergétique directe | EED (EDM ; DMI) | Importation + Extraction locale utilisée |
| Entrée énergétique totale | EET (ETM ; TMI) | Importation + Extraction locale + Extraction locale inutilisée (flux cachés locaux) + Flux indirects associés aux importations |
| Demande énergétique totale | DET | = entrée énergétique directe (EED) + Extraction locale inutilisée (Domestic Hidden Flows) + Flux indirects associés aux importations (Foreign Hidden Flows) + Exportations |

Source : EUROSTAT, 2001, Haberl, 2001a (a : correspond à l'Approvisionnement total primaire du bilan énergétique).

Les flux indirects associés aux importations prennent en compte non seulement l'équivalent primaire de l'extraction inutilisée, mais aussi l'équivalent en énergie primaire des produits énergétiques secondaires importés, en considérant les pertes à la transformation et à la distribution par réseaux. On considère que ces flux indirects sont mesurés par l'écart entre la Demande énergétique totale et la Consommation énergétique directe locale (DET - CED). Cependant, l'écart entre la Consommation énergétique directe (CED) et la Consommation énergétique finale totale (CEFT) (CED - CEFT) correspond à la perte énergétique à l'intérieur du territoire. La perte totale correspond donc à l'écart entre la DET et la CEFT (DET - CEFT). La perte dans la transformation et dans la distribution lorsqu'elle est faite localement est incluse dans la Consommation énergétique directe. Lorsqu'elle est faite à l'extérieur du territoire, elle est incluse dans la Demande énergétique totale et non dans la Consommation énergétique directe. Cependant, il est difficile de connaître la part de la perte au réseau réalisée à l'intérieur du territoire et à l'extérieur, et nous l'avons par conséquent incluse uniquement dans la DET et non dans la CED.

Le stock n'est pas l'objet d'une considération particulière dans notre cas, car le bilan entre l'entrée et la sortie du stock est considéré comme nul. Par conséquent, on estime que le bilan physique d'entrée et de sortie est identique à ceux de consommation directe des matières et d'énergie (CDM, CED). On va discuter cette hypothèse et sa validité dans le chapitre suivant.

La méthode d'équivalence est utilisée à deux titres dans notre étude. D'une part, on a besoin de coefficients d'équivalence : 1) entre les matières brutes et les produits consommés, 2) entre les matières extraites et utilisées. D'autre part, il est nécessaire de comparer les différentes sources énergétiques primaires et leurs énergies secondaires confondues en utilisant la même unité pour obtenir les indicateurs cités plus haut (CED, DET, CEFT).

2.3.2. Flux d'énergie technique et biologique

Énergie technique

L'approvisionnement énergétique technique repose sur différentes filières en amont et en aval. La chaîne de fabrication peut être analysée selon les filières industrielles liées aux activités d'extraction, de transport, de transformation, de distribution et de consommation finale. Ces filières d'approvisionnement sont présentées de manière simple dans la méthode du bilan énergétique. L'énergie primaire est le flux qui se situe avant le secteur de transformation (dans

la figure suivante). Dans le secteur de transformation (1) dans la figure suivante), la conversion énergétique est faite entre une source énergétique primaire et ses énergies secondaires (des combustibles fossiles à l'électricité et au gaz manufacturé). L'énergie finale correspond au flux à la sortie du secteur de transformation après déduction de la perte à la distribution. Les deux types de flux vont être analysés de manière systématique et quantitative par les indicateurs qu'on a définis précédemment. Le secteur de conversion entre l'énergie finale et l'énergie utile (2) dans la figure suivante) correspond à des dispositifs techniques individuels (appareil domestique, véhicule, machine pour la fabrication industrielle). Ceci permet de distinguer l'énergie utile de l'énergie finale. Dans le cadre de cette thèse, le bilan s'arrête à l'énergie finale, l'étude de l'énergie utile nécessitant une méthodologie différente, basée sur une approche ascendante, qui devrait faire l'objet d'un travail approfondi.

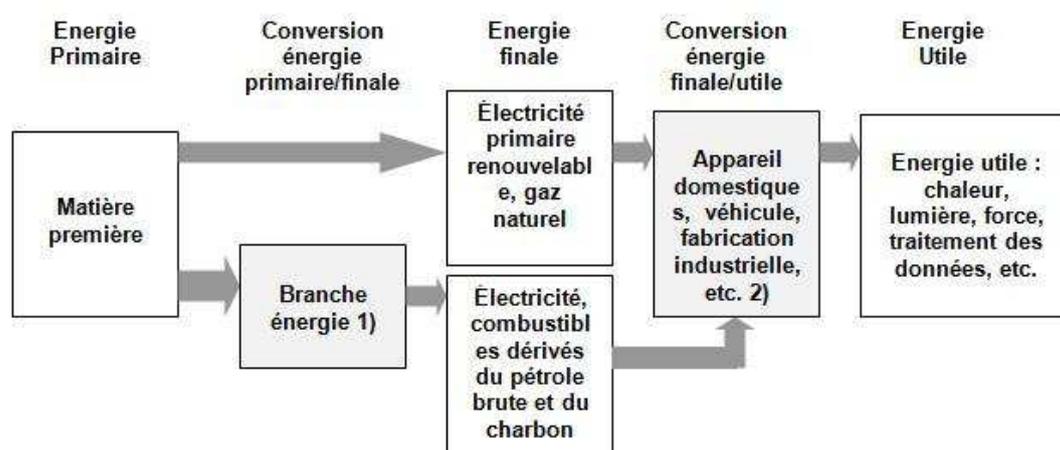


Figure 2.6. Chaîne de l'approvisionnement de l'énergie technique (en gris, secteurs de transformation ou de conversion énergétique). Source : adaptation et simplification du schéma proposé par Haberl, 2001a.

Dans le cas des combustibles fossiles, la consommation énergétique finale mélange les produits énergétiques secondaires tels que l'électricité et le gaz manufacturé, et les sources énergétiques primaires et leurs produits dérivés tels que la houille, le coke et les produits pétroliers. Dans le cas de l'électricité, du gaz manufacturé (dérivé de la houille) et de la vapeur du chauffage urbain, leur conversion en quantité des combustibles primaires (en pouvoir calorifique) nécessite l'utilisation de coefficients de conversion en primaire et la connaissance de leurs sources énergétiques primaires en amont (mix énergétique) qui varie fortement dans le temps. Ces coefficients de conversion en primaire doivent prendre en compte le rendement de production et de distribution énergétique qui augmente en général dans le temps pour une même

technologie. En revanche, le mix énergétique dans le secteur de la production électrique et du gaz manufacturé est une valeur qui n'a pas de tendance et qui change selon la condition d'approvisionnement en source énergétique. Ces coefficients doivent être définis pour les produits énergétiques consommés dans Paris pour toute la période considérée pour l'analyse. Dans le cas des sources énergétiques renouvelables autres que les combustibles, telles que l'énergie hydraulique, éolienne et solaire active (photovoltaïque, thermique), on utilisera le concept d' « équivalent primaire à la production » pour évaluer la quantité énergétique produite : par exemple, pour l'énergie hydraulique, on compte la quantité d'énergie brute¹ produite à la centrale et non l'énergie potentielle et cinétique de l'eau. Dans le cas de l'électricité nucléaire, on évalue la quantité selon le pouvoir calorifique produit à la centrale, communément calculé en postulant un rendement de production électrique de 33%. Pour tous types de sources énergétiques issues de la biomasse, on va suivre le principe d'analyse de l'énergie biologique défini dans les pages suivantes, *énergie biologique*.

Le bilan énergétique technique qu'on va établir a pour objet d'évaluer la quantité totale des sources énergétiques entrant et consommée dans et de la ville (en DET). Cette quantité doit être évaluée (convertie) en joule et en pouvoir calorifique supérieur en amont. L'utilisation du joule en PCS (pouvoir calorifique supérieur) permet d'évaluer le potentiel énergétique maximal théorique d'une matière en termes d'énergie, qui correspond à l'énergie dégagée lors de sa combustion parfaite dans une bombe calorimétrique, et s'applique par conséquent aux combustibles (NRC, 2001). Ce qui nous intéresse est d'évaluer la quantité de la ressource énergétique potentielle pour l'approvisionnement en matières riches en énergie pour la ville, et non la quantité d'énergie obtenue au stade final, ce qui est ainsi plus comparable à l'énergie biologique. Le choix du joule comme unité de compte a pour objet d'éviter d'utiliser une unité d'équivalence, qui demande souvent un arbitrage dans la définition de la valeur énergétique de toutes les autres ressources par rapport à un vecteur (ressource) énergétique central (pour la société). La Tonne équivalent pétrole (TEP) et la Tonne équivalent charbon (TEC) en sont des exemples. En outre, le calcul en Pouvoir calorifique supérieur (PCS) permet d'isoler certaines variables techniques liées à l'amélioration des conditions de combustion (chauffage par chaudière à gaz à condensation qui permet de récupérer la chaleur latente perdue auparavant, par exemple) ou des conditions de stockage². Ces dernières méritent une analyse à part entière.

¹ Se distingue de la production nette qui désigne la production après soustraction de la consommation interne d'une centrale.

² Notamment dans le cas du bois, la valeur calorifique obtenue est très variable selon l'humidité, par conséquent selon les conditions de combustion et de stockage. Elle reflète parfois les caractéristiques techniques des appareils et change en parallèle avec leur amélioration.

On va discuter ces variables de manière quantitative et qualitative dans la partie consacrée aux résultats (chapitres 3 et 4)¹.

On essaie par la suite de formaliser la méthode d'analyse de flux d'énergie technique selon la structure de données disponibles sur la consommation parisienne et francilienne. Le périmètre de données pour la consommation finale est administratif (ville, département ou région selon la période), tandis que les données de la consommation de combustibles et de production ou de distribution d'énergie secondaire s'organisent à l'échelle de l'entreprise correspondante. De ce fait, on se base sur les données de la consommation totale de combustibles de chaque périmètre géographique considéré : ville de Paris, banlieue du département de la Seine (petite couronne à partir de 1967) et départements périphériques de l'Île-de-France (grande couronne à partir de 1967). L'énergie primaire (la demande totale énergétique) pour Paris et pour l'Île-de-France est obtenue par la comparaison entre le bilan (d'entrée de combustibles et de sortie d'énergie secondaire) de chaque secteur de transformation (du gaz, de l'électricité, et de la vapeur) et la consommation d'énergie secondaire de chaque territoire (Paris, la banlieue, les départements périphériques, voir également la figure 5.1). La perte énergétique qui est déterminée selon le rendement de production et de distribution aux réseaux de chaque secteur de transformation est répartie au prorata de la consommation d'énergie finale de chaque territoire. Par conséquent, la consommation finale unitaire en kg/hab/an est différente selon le périmètre de chaque territoire.

¹ Le rapport entre le pouvoir calorifique inférieur et le pouvoir calorifique supérieur pour chaque type de combustible est renseigné dans la méthode du bilan énergétique et par conséquent se trouve dans des documents statistiques officiels de l'ONU (UN, 1987), de l'Agence internationale de l'énergie (IEA, 2004) ou de l'Eurostat.

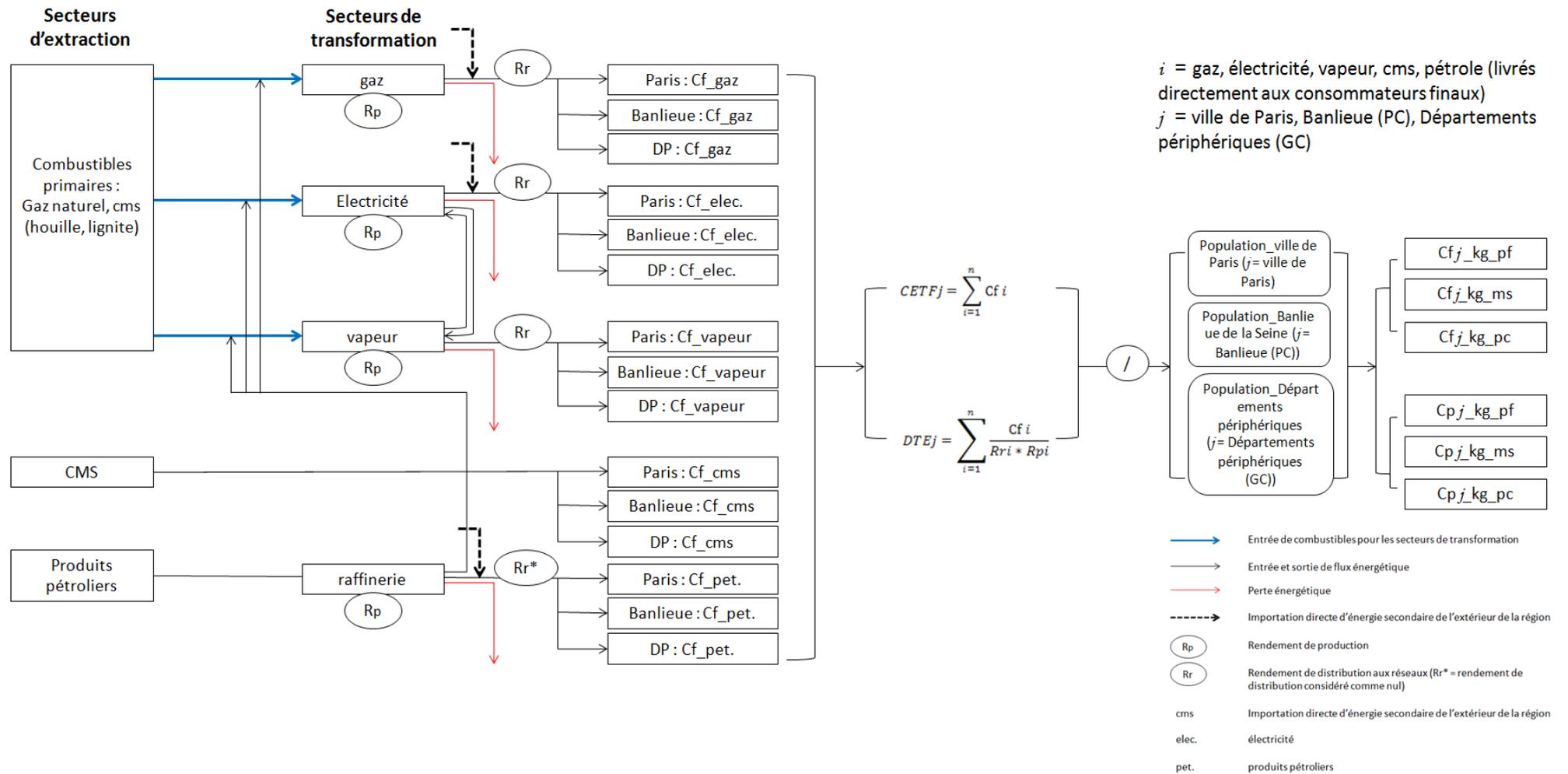


Figure 2.7. Schéma d'analyse de flux d'énergie technique selon les périmètres d'études : ville de Paris, banlieue et départements périphériques. Source : cette thèse.

Biomasse forestière

Dans la méthode de l'Analyse de flux de matières de l'Eurostat, l'extraction locale inclut l'« extraction locale utilisée » et l'« extraction locale non utilisée ». Dans le cas de la production de la biomasse forestière, on fait la distinction entre la croissance naturelle du bois (production primaire) et le bois récolté (production primaire récoltée). Dans ce cas, se pose problème de la comptabilité, puisque pour la biomasse agricole (voir pages suivantes), on inclut les résidus agricoles laissés au champ dans l'extraction totale. À titre d'exemple, le rapport entre la récolte et la production primaire de l'Île-de-France ne se situe qu'à environ 20 % (AGRESTE, 2007b, AGRESTE, 2008b). Selon la méthode de l'Eurostat, l'extraction locale inclut seulement la part du bois récolté et les résidus liés aux activités de sciage et non la totalité de la production primaire. C'est probablement la raison pour laquelle les activités agricoles et leur production primaire sont considérées comme activités de production anthropiques, alors que la production primaire du bois est considérée comme production naturelle sans ou peu d'intervention humaine. De ce fait, dans le cas de la biomasse forestière, on omet la perte à l'extraction.

On évalue cependant la perte de conversion entre le bois et le charbon de bois qui est considérable puisque le rapport entre l'énergie primaire et l'énergie finale se situe entre 4 et 5 (Woronoff, 1990). Le pouvoir calorifique du bois change en effet considérablement selon l'humidité. De manière générale, on suppose une humidité de 20 à 25 % pour évaluer son pouvoir calorifique inférieur. Dans notre cas d'étude, on suppose que le bois consommé à Paris a une humidité de 20 % pour calculer sa masse volumique en kg de matière par m³, sa densité en kg de matière sèche par m³, et enfin son pouvoir calorifique. On distingue trois catégories de bois selon les données disponibles pour la consommation parisienne. La biomasse agricole destinée à la fabrication de biocarburants n'a pas été étudiée, puisque sa production n'est pas significative à l'échelle régionale pour la période considérée.

Biomasse agricole et biomasse issue d'élevage

Dans le cas de la biomasse agricole, le bilan énergétique ne fait pas l'objet d'une méthode conventionnelle. Dans la littérature scientifique, il existe plusieurs démarches issues de domaines différents (écologie scientifique, agronomie, physiologie végétale, animale, science animale), qui sont souvent complémentaires. Le choix d'une méthode dépend de l'échelle et de l'objectif d'analyse. Dans notre cas, on s'intéresse au potentiel de la biomasse en termes énergétique et de matière et à la totalité de la même ressource contiguë (céréale : céréale, farine,

pain) mobilisée pour l'approvisionnement final de produit. Il s'agit ainsi de connaître la part de la biomasse en matière et en énergie dans la consommation totale des sources énergétiques de la ville et son évolution dans le temps en lien avec la transition énergétique de Paris. Cependant, les flux de la biomasse dans le système industriel sont complexes en raison du nombre important de produits mis en jeu et du changement de forme de ces produits à la sortie. Un flux d'extraction peut se diriger vers plusieurs secteurs de transformation et ces derniers peuvent fournir divers sous-produits à plusieurs consommateurs finaux : produits qui changent d'une catégorie à une autre après la transformation tels que le jus de fruits ou de légumes classés comme boisson, l'huile alimentaire et le tourteau fourrager issus de légumes ou de fruits oléagineux. Par conséquent, il est difficile d'attribuer les pertes de matières et d'énergie (lors de l'extraction ou de la transformation) à chaque sous-produit final. Si l'on considère l'échelle spatiale et temporelle de notre travail, la question de l'allocation des pertes et celle de l'équivalence devient plus complexe, puisque la plupart des flux existent en amont et en dehors de notre périmètre d'étude. Dans ces conditions, on se base sur la méthode du bilan alimentaire élaborée par Haberl (2001a) et par Aleklett et al. (2010) afin d'établir un bilan de la biomasse agricole.

La méthode citée résulte d'une extension et de la modification de la méthode de bilan alimentaire qui est utilisée par la FAO depuis les années 1960, ainsi que par l'Eurostat et par l'Agreste aujourd'hui pour établir le bilan alimentaire et pour connaître la disponibilité alimentaire d'un territoire. La méthode de Haberl et Aleklett adopte une approche scientifique au regard de la perte écologique, d'énergie et de matière, dans l'ensemble des ressources de la biomasse. La statistique publique agricole comptabilise en effet uniquement la production utile de la biomasse au sens économique, puisque sa comptabilité commence à la production commercialisée, tandis que dans la science écologique et dans la méthode de l'Analyse de flux de matières, l'extraction renvoie à la production primaire de la biomasse végétale communément calculée comme la production primaire au dessus du sol (*above ground primary production*) (Haberl, 2001a). De plus, la statistique publique agricole ne fait pas la distinction entre la production de biomasse végétale et celle de biomasse animale et ses sous-produits tels que la viande, le lait et l'œuf, tandis que dans l'écologie scientifique, la biomasse animale est considérée comme une production secondaire (voir le chapitre 1). L'avantage du fait d'appliquer la méthode de Haberl et Aleklett - puisqu'elle est une extension de la méthode de bilan alimentaire de l'Agreste, l'Eurostat et la FAO - est que les rendements industriels sont connus dans le bilan alimentaire à l'échelle nationale : pour la France, ces rendements tels que

le taux d'extraction d'huile, le taux de mouture, sont connus pour la période entre 1996-1998 et pour 2007 (FAO, 2003, AGRESTE, 2010).

Pour comprendre la méthode, il faut regarder les pertes énergétiques et de matière dans la chaîne d'approvisionnement de la biomasse agricole. À l'extraction de la biomasse agricole, les flux non comptabilisés constituent une perte de matière et d'énergie majeure (Smil, 1999). Par conséquent, la quantité d'extraction que l'on doit évaluer comprend la production commercialisée mentionnée dans la statistique et la part non comptabilisée qui inclut les résidus agricoles, l'autoconsommation des agriculteurs et les semences, sachant que la méthode du bilan de la FAO calcule la disponibilité alimentaire en incluant les semences, mais ne comprend pas les résidus agricoles qui sont importants notamment pour les produits céréaliers, protéagineux et oléagineux¹. Néanmoins dans la physiologie végétale, dans l'écologie et occasionnellement dans l'agronomie, la partie non commercialisable est prise en compte, afin notamment de mesurer l'efficacité de la reproduction biologique d'une plante céréalière et lorsqu'on s'intéresse au bilan ou au cycle d'une substance, le carbone par exemple (Bolinder et al., 1996). La perte au stock et au transport comptée renseignée par FAO est très faible, puisque elle ne concerne pas les déchets produits dans la chaîne de distribution (marché ou supermarché). Nous avons ignoré cette quantité due à la difficulté d'obtenir les données historiques sur le sujet et considéré que la perte la plus importante est la perte trophique (pour la production des produits animaux) et les résidus agricoles non utilisés.

On adopte trois variables qui influencent la quantité primaire de l'alimentation. Ces trois variables sont (voir les chiffres dans la figure suivante) : 1) la perte qui est égale à la différence entre la production biologique totale, et la production agronomique, et qui est définie par l'Indice de Récolte (« Indice de récolte » dans la figure suivante), 2) la perte à l'industrie agroalimentaire (IAA), définie par le coefficient d'extraction (« Co_extraction » dans la figure suivante), et 3) la perte dans la chaîne trophique qui est égale à la différence entre la production de biomasse destinée à l'alimentation du bétail et la production secondaire destinée à la consommation humaine (l'indice de conversion des aliments (égal à $1/FCR$: *Feed Conversion Ratio*, « Co_fourrage » dans la figure suivante). Tous les coefficients utilisés font l'objet d'une discussion plus approfondie et se présentent à la fin du chapitre 4.

¹ La consommation pour la semence est renseignée indépendamment de la production commercialisée et n'est pas comprise dans la production au regard de la statistique agricole.

Matière sèche et contenu énergétique

La biomasse a une teneur en eau pouvant aller de 10 à 90%. Par conséquent, son contenu en matière sèche et son pouvoir calorifique varient considérablement selon la teneur en eau. Dans le cas des légumes et des fruits, par exemple, le contenu d'eau est important, d'où une faible teneur en carbone et en azote et un faible pouvoir calorifique. Il convient donc de convertir la biomasse consommée en matière sèche pour rendre plus comparables les différents groupes d'aliments. Lorsqu'on obtient la biomasse en matière sèche, dans le cas de la biomasse végétale, son pouvoir calorifique ne varie pas de façon significative et s'étend de 15 à 18 GJ par tonne de matière sèche.

Énergie et matière dans les résidus agricoles

L'indice de Récolte (IR), « Harvest Index », est défini comme le rapport de la masse totale des grains récoltés à la masse d'une plante entière en matière sèche. Il est communément calculé à partir de la masse de paille et de grain pour obtenir la quantité totale de la production biologique au-dessus de la terre (total above-ground biological production). Par conséquent, il convient d'adopter cet indice pour obtenir la quantité totale de la biomasse récoltée en termes de productivité biologique (voir le chapitre 4, section 4.4).

Rendements industriels pour les produits finaux et indices de conversion d'aliments pour la production secondaire

Les produits transformés issus de l'industrie agroalimentaire, qui font partie des produits les plus consommés à Paris, tels que le pain, la pâtisserie, l'huile alimentaire, le sucre, nécessitent des coefficients de conversion en produits primaires frais, qui seront ensuite convertis en produits primaires en matière sèche. Une autre perte importante de matière intervient dans la chaîne trophique du fait de la différence entre la production primaire (biomasse végétale agricole) et secondaire (biomasse animale). Le rapport de la consommation de matières premières fourragères à la production d'un produit secondaire animal est exprimé par le ratio de conversion d'aliments et ce rapport détermine inversement l'indice de conversion des aliments (FCR), communément calculé comme kg de produits agricoles en matière sèche consommés comme fourrage d'un animal par rapport au produit final en matière fraîche tel que la viande, et le lait (Smil, 1999, Vitousek et al., 1986). Dans le cas de Paris, cette perte de matière en matière

sèche et d'énergie est identifiée par une étude historique sur la consommation de la viande de la capitale réalisée dans le cadre de thèse de Petros Chatzimpiros (2011), sur laquelle qu'on s'appuie pour définir la consommation primaire de biomasse végétale associée à la consommation des produits animaux.

Extraction locale

Dans le cas d'extraction locale de la biomasse végétale agricole, l'extraction locale inclut l'extraction locale utilisée et celle non utilisée. Cette dernière est en effet distinguée entre trois types de matières, les résidus récoltés, paille récoltée par exemple pour un usage fourrager ou énergétique, les résidus laissés au champ pour un usage agronomique (fertilisation du sol) et les résidus non utilisés. Dans le résultat qu'on présentera ultérieurement, l'extraction locale inclut donc ces résidus.

Consommation finale

On considère que la consommation finale correspond à la quantité d'aliments livrée aux ménages qui est distinguée par le besoin énergétique physiologique en termes d'énergie brute ingérée, i. e. au besoin calorifique annuel. L'approche adoptée pour analyser les flux d'énergie de biomasse est ascendante, puisque les données sur la consommation alimentaire s'organisent en kg/hab/an de produit frais. On essaie comme le montre la figure suivante d'obtenir la consommation unitaire primaire, ainsi que la consommation totale du périmètre d'étude à partir de cette consommation unitaire. Par conséquent, cette approche est basée sur une hypothèse d'uniformité de consommation à l'échelle de l'agglomération. Rappelons que pour l'énergie technique cette hypothèse n'est pas retenue. De ce fait, la comparaison entre la consommation d'énergie technique et la consommation d'énergie alimentaire sera faite seulement pour la consommation parisienne.

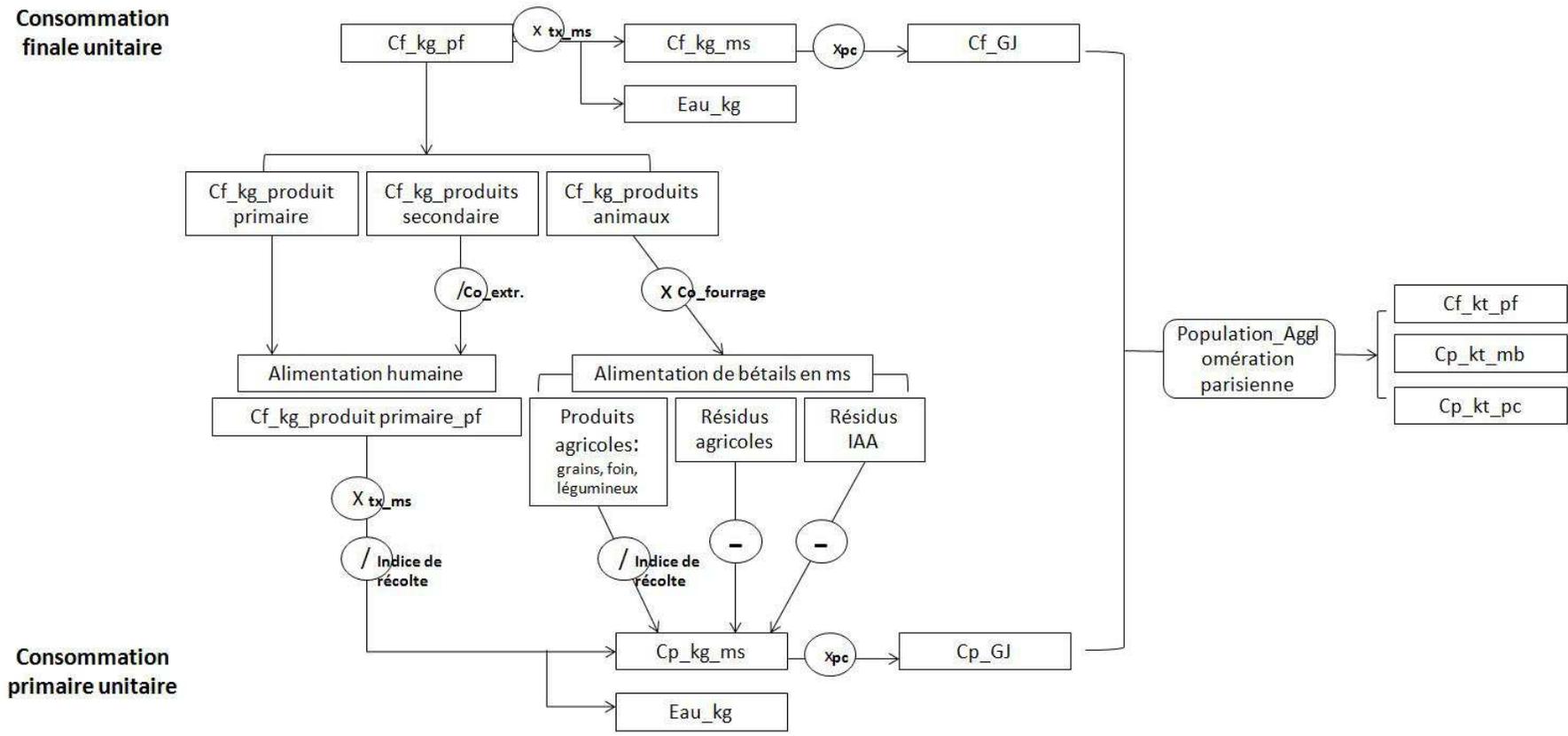


Figure 2.8. Schéma d'analyse de l'énergie biologique (en gris, secteurs de conversion énergétique). Source : cette thèse. (Cp : consommation primaire, Cf : consommation finale, pf : produit frais, ms : en matière sèche, mb : en masse brute, pc : en pouvoir calorifique (énergie brute), le reste dans le texte).

Consommation directe de matières (CDM) et Consommation énergétique directe (CED)

La consommation directe de matières et d'énergie d'un territoire inclut différents produits dont le degré de transformation est différent : une tonne de l'huile et une tonne du grain oléagineux n'ont pas le même équivalent plante oléagineux (équivalent primaire) et ils entrent en même temps dans un territoire. Dans ce cas, on évalue la consommation directe du territoire en termes de matière en kg/ha/an et en termes énergétique en GJ EB/hab/an des produits sans considérer leur forme finale ou primaire.

Demande totale de matières (DTM) et Demande énergétique totale (DET)

Puisqu'une partie des résidus agricoles et des résidus issus de l'industrie agroalimentaire est utilisée pour l'alimentation du bétail, se pose le problème du double compte (voir la figure précédente 2.8) ; cette partie doit donc être soustraite lorsqu'on évalue la Demande totale de matières (DTM) et la Demande énergétique totale (DET). C'est notamment l'exemple de la paille utilisée par le fourrage des chevaux urbains dans Paris au XIXe siècle, et du son et des issues de la meunerie utilisés pour l'alimentation du bétail. Dans le cas de la consommation indirecte de matière première faite pour l'usage des chevaux urbains dans Paris, le pouvoir calorifique (énergie brute) de ces fourrages est considéré comme l'énergie primaire, tandis que la force produite par les chevaux est considérée comme l'énergie finale technique. Dans le cas des produits agricoles destinés à l'usage de transport, carburants tels que l'ester méthylique et l'éthanol produits à partir de l'huile oléagineuse et de l'éthanol de blé, ils sont évalués en termes de pouvoir calorifique de sa matière sèche (en énergie brute). Par ailleurs, l'huile oléagineuse consommée pour l'éclairage dans Paris au XIXe siècle est ignorée dans notre étude, puisque cette consommation est très faible - environ 0,3 % de la quantité totale de matière combustible consommée à Paris en 1820 – ce qui signifie que la part de cette consommation diminue encore après cette date, puisque l'huile végétale pour l'éclairage est remplacée par le gaz manufacturé durant la première moitié du XIXe siècle (Willot, 1999).

2.4. Données de transport de marchandises et méthode de traitement

2.4.1. Données de transport de marchandises

Cette section présente les données de transport de marchandises SITRAM (Système d'Information sur les Transports de Marchandises) et leur traitement. SITRAM est utilisé pour

analyser l'évolution spatiale du bassin d'approvisionnement en énergie technique de Paris en 2006 dans le chapitre 6.

La base SITRAM rassemble des données issues de l'enquête nationale du transport routier de marchandises (TRM), de données sur le transport routier européen (TRM européen), et issues des fichiers de la navigation intérieure (VNF), de la Société Nationale des Chemins de fer français (SNCF), et des Douanes¹. La base SITRAM possède quatre variables principales : le mode de transport, la nature du transport, l'origine et la destination des marchandises transportées, la nature des marchandises transportées (selon la nomenclature NST).

Tableau 2.3. Variables de la base SITRAM

| <i>Groupe de variables</i> | <i>Variables</i> | <i>Typologie de variables</i> |
|--|------------------------------|-------------------------------|
| Nature du transport | nature du transport | numérique |
| | L nature du transport | caractères |
| Origine et destination des marchandises transportées | département de chargement | numéraires |
| | L dpt de chargement | caractères |
| | Région de chargement | numéraires |
| | L rég de chargement | caractères |
| | département de déchargement | numéraires |
| | L dpt de déchargement | caractères |
| | Région de déchargement | numéraires |
| | L rég de déchargement | caractères |
| Mode de transport | Mode de transport | numéraires |
| | L mode de transport | caractères |
| Nature des marchandises transportées | Position | numéraires |
| | L position | caractères |
| Résultats d'enquête | Tonnes redressées | numéraires |
| | Tonnes kilomètres redressées | numéraires |
| | Valeur (KEuros) | numéraires |

Source : ministère de transport.

(les résultats des enquêtes sont exprimés en *tonnes redressées*, en *tonnes kilomètres redressées* et en *valeur en millier d'euros* (tableau précédent 6.4), ce qui permet d'établir une matrice d'origine et de destination entre les départements français et les pays étrangers selon 176 postes incluant plus de 50 produits agricoles et alimentaires et 10 produits de combustibles fossiles.)

¹ L'enquête de TRM nationale est réalisée sur des camions chargés de plus de 3,5 t de PTAC (poids total autorisé en charge) et immatriculés en France. Les données de TRM européennes la complètent.

2.4.2. Traitement de données de transport marchandise, SITRAM, pour l'analyse du bassin d'approvisionnement énergétique de Paris en 2006

Pour les produits énergétiques français, on travaille à l'échelle régionale, puisque l'analyse à l'échelle départementale a peu de sens pour 2006, compte tenu du fait qu'une part essentielle des produits proviennent de l'étranger et que la base PEGASE sur l'extraction des produits primaires énergétiques qui complète la base SITRAM s'organise par région. Pour conduire l'analyse à l'échelle régionale, on agrège les données de SITRAM en créant deux nouvelles variables, *région de charge* et *région de décharge*, qui agrègent les données départementales. La base nous permet de faire une analyse de l'origine et de la destination des produits, mais elle recense uniquement le lieu de dernier chargement qui ne correspond pas forcément à l'origine réelle des produits : les produits qui sont importés via les ports maritimes (en grande partie) et les aéroports (dans une moindre mesure) européens proviennent souvent de l'extérieur de l'Union européenne. De ce fait, certains produits sont susceptibles d'être issus de flux de transit. C'est notamment le cas de la Belgique et de la Hollande qui disposent d'importants ports maritimes approvisionnant l'agglomération parisienne. Le tableau suivant montre la couverture des différentes bases que l'on utilise selon l'origine et la destination des produits pour les produits énergétiques. Des données de l'Eurostat complètent une partie de la matrice, notamment en ce qui concerne les flux entre les pays membres européens.

La variable d'origine que l'on utilise est numérique et est appelée *région de charge*. Cette variable inclut les flux issus de régions françaises et ceux de pays étrangers. Pour les flux sortants, la variable de destination inclut également ces deux types de flux. Le type de flux est connu selon la variable *Position* et la quantité est connue selon la variable *Tonnes redressées*. Les flux entrants et sortants étant connus en masse, pour connaître l'apport énergétique de chaque origine, il convient de les convertir en valeur calorifique. On crée donc une nouvelle variable qui correspond à l'apport énergétique de chaque territoire et qui est obtenue à partir de coefficients d'équivalence qui correspondent à chaque groupe de produits agrégés comme le montre le tableau suivant.

Tableau 2.4. Sources des données utilisées pour la matrice origine et destination des produits énergétiques consommés dans la région Île-de-France

| O\D | Régions françaises (11- 94) | Pays de l'UE | Pays hors de l'UE |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|
| Régions françaises (11- 94) | SITRAM | SITRAM | SITRAM |
| Pays de l'UE | SITRAM | Eurostat | Eurostat |
| Pays hors de l'UE | SITRAM | Eurostat | Non considéré * |

(les flux de provenance des pays hors Union européenne (EU) vers les pays de l'UE sont considérés comme directs.)

Tableau 2.5. Coefficients pondérateurs utilisés pour évaluer les combustibles enregistrés dans la base SITRAM en termes énergétiques

| | GJ/tonne | Coefficients pondérateurs | Code position correspondant dans la base SITRAM | Remarque |
|---|----------|---------------------------|---|--|
| Houille | 26 | 0,88 | 211, 213 | - |
| Coke de houille | 28 | 0,95 | 231, 233 | - |
| Agglomérés et briquettes de lignite | 32 | 1,09 | 223 | - |
| Lignite et produits de récupération | 17 | 0,58 | 221, 224 | - |
| Tonne équivalente de charbon | 29,4 | 1,00 | 2 | a |
| Pétrole brut, gazole/fioul domestique, produits à usages non énergétiques | 42 | 1 | 310, 325, 341, 343, 349 | Pétrole brut, gazole, fioul domestique, produits à usages non énergétiques |
| GPL | 46 | 1,095 | 330 | GPL |
| Essence moteur et carburacteur | 44 | 1,048 | 321, 323, | Essence moteur et carburacteur |
| Fioul lourd | 40 | 0,952 | 327 | Fioul lourd |
| Coke de pétrole | 32 | 0,762 | | Coke de pétrole |

Source : cette thèse. ((a) pour les flux de marchandises ferroviaires de la SNCF, les «combustibles

minéraux" sont tous confondus avec différents sous-produits.)

Les provenances étant extrêmement variées, nous avons ignoré celles qui représentent moins de 0,5 % de l'ensemble pour la cartographie de flux, ainsi que pour obtenir les distances moyenne et maximale qu'on présentera dans le chapitre 6. La part en % de la contribution de chaque territoire dans l'approvisionnement énergétique de l'Île-de-France est donc évaluée en termes énergétique pour chaque groupe de produits et est ensuite pondérée selon la part de chaque groupe d'énergie (charbon de terre, produits pétroliers, combustibles fissiles, etc.) dans la demande totale énergétique de Paris (voir le chapitre 6).

Nous avons utilisé la méthode de traitement des données de SITRAM présentée par Billen (Billen et al. 2012). Parmi les produits entrants, les produits exportés et consommés sur place n'étant pas connus, nous avons fait l'hypothèse que les produits importés et ceux extraits localement sont mélangés parfaitement et consommés. La part de contribution de chaque territoire d'origine de produits est donc déterminée au prorata de la quantité des produits importés et extraits localement en Île-de-France. La base SITRAM renseigne le lieu du dernier chargement. Ce dernier est le territoire fournissant directement les combustibles (pétrole, charbon) (flux $I(0,1)$ et $I(0,2)$ dans la figure 2.9) à la région Île-de-France (0 dans la figure 2.9). Appelons ces origines *origines de premier ordre* ($r_1(a,i)$ dans la figure 2.9). Les flux internes de chaque territoire (région) ($I(i,i)$) sont remplacés par l'extraction énergétique ($P(i)$) issue des données de PEGASE pour la France et de l'Eurostat (Eurostat, 2007) pour les pays membres de l'Union européenne. La part de contribution de chaque territoire est définie par les flux entrant de chaque origine sur les flux totaux entrant plus l'extraction locale de l'Île-de-France, comme l'indique la figure 2.9) :

$$\{r_1(a,i)\} = \{I(a,i) / \sum_{i=0}^n I(a,i)\}$$

$r_1(a,i)$ égale à la part de contribution de chaque territoire *de premier ordre* pour l'approvisionnement de l'Île-de-France en combustibles (charbon de terre ou pétrole)

où a égale à 0 (à l'analyse de premier ordre), notre territoire d'analyse, Île-de-France,

$r_1(a,j)$ égale à la part de contribution de chaque territoire pour l’approvisionnement de l’Île-de-France en combustibles (charbon de terre ou pétrole),

$I(a,i)$ égale à l’extraction locale en Île-de-France ($I(0,0)$) ou à l’importation d’origine i ($I(0,i)$),

$\sum_{i=0}^n I(a,i)$ égale à la somme de l’importation et de l’extraction locale en Île-de-France

Néanmoins, l’origine réelle des produits devrait se situer en amont, car ils n’ont fait que transiter par la région du dernier chargement. Ce sont en particulier la région Haute-Normandie (le port du Havre) et les Pays de la Loire (port de Donges) dans le territoire français. Dans le cas des pays européens non producteurs (notamment la Belgique), on analyse les origines d’approvisionnement de *deuxième ordre* en utilisant les données de l’Eurostat sur l’échange des combustibles entre les pays européens et avec les pays étrangers hors Union européenne (voir les données utilisées pour établir la matrice d’origine-destination dans le tableau 2.2). Le calcul s’opère selon la formule présentée dans la figure suivante d’*analyse de deuxième ordre* ($\{r_2(a,i)\}$). Par ailleurs, on a exclu les échanges entre les pays hors Union européenne et considéré les territoires qui approvisionnent l’UE comme la première origine.

$$\{r_2(a,i)\} = \left\{ \left[\sum_{k=all.o} (I^*(a,k) \cdot r_1(k,i)) \right] / \sum_{j=all.o} (I^*(a,j)) \right\}.$$

$r_2(a,i)$ égale à la part de contribution de chaque territoire *de deuxième ordre* pour l’approvisionnement de l’Île-de-France en combustibles (charbon de terre ou pétrole)

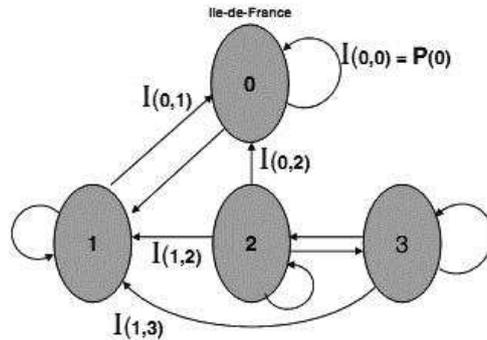
où a égale à 0 (à l’analyse de premier ordre), notre territoire d’analyse, Île-de-France,

k est le territoire de transit fournissant indirectement les combustibles,

$r_1(k,i)$ égale à la part de contribution de chaque territoire i pour l’approvisionnement en combustible du territoire de k ,

$I(a,k)$ égale à l’extraction locale en Île-de-France ($I(0,0)$) ou à l’importation d’origine k ($I(0,k)$),

$\sum_{i=0}^n I(a,i)$ égale à la somme de l'importation et de l'extraction locale en Île-de-France.



$$\{r_1(a,i)\} = \left\{ \frac{I^*(a,i)}{\sum_{j=\text{all } \alpha} (I^*(a,j))} \right\}$$

with $0 \leq r_1 \leq 1$ and $\sum_i r_1(a,i) = 1$.

----- analyse de premier ordre

$$\{r_2(a,i)\} = \left\{ \left[\sum_{k=\text{all } \alpha} (I^*(a,k) \cdot r_1(k,i)) \right] / \sum_{j=\text{all } \alpha} (I^*(a,j)) \right\}$$

----- analyse de deuxième ordre

Figure 2.9. Logique de calcul d'origine des produits importés dans la région Île-de-France.

Source : Billen et al. 2012. (r1 : part de contribution de chaque territoire

d'approvisionnement de premier ordre, r2 : part de contribution de chaque territoire

d'approvisionnement de deuxième ordre).

Distance d'approvisionnement

On s'intéresse à la distance d'approvisionnement en énergie depuis différentes origines et à son évolution dans le temps. La distance qu'on calcule est la distance moyenne pondérée de la part de chaque origine en pouvoir calorifique. La distance est physique, et correspond à la distance minimale entre deux points. Afin de distinguer la distance physique de la distance réelle de transports que l'on discutera dans le chapitre 6, on utilisera le terme de « distance physique », et de « distance réelle parcourue ». La distance calculée entre Paris et chaque département est cartésienne. Par rapport à la distance physique réelle (distance orthodromique qui prend en compte la sphéricité de la terre), ce calcul crée un écart qui devient de plus en plus important

lorsqu'un département s'éloigne de Paris. Toutefois, on considère que cet écart est non significatif. Dans le cas de la Corse par exemple, département le plus éloigné de Paris (si l'on excepte les DOM), il s'élève à 12 % pour une distance cartésienne de 690 km – sachant que la Corse a très peu d'importance dans l'approvisionnement de Paris et que la Seine-Maritime représente une part essentielle dans son approvisionnement en produits énergétiques.

Le calcul de la distance orthodromique d entre Paris et les différents pays du monde est fait à l'aide de la formule suivante :

$$D = \arccos(\sin a \cdot \sin b) + (\cos a \cdot b \cdot \cos |c|)$$

$$d = r \cdot D$$

$$r = 110$$

$$d = 110 \cdot [\arccos(\sin a \cdot \sin b) + (\cos a \cdot b \cdot \cos |c|)]$$

(Le rayon moyen de la terre correspond à 6371 km, entre 6353 et 6384km, donc 1 degré (une minute d'arc) correspond environ à 110 km.)

Où a et b sont les latitudes de deux points entre lesquels on souhaite obtenir la distance orthodromique, c est égal à la différence entre les longitudes de ces deux points, D égale à l'angle entre a et b en degré.

Les coordonnées géographiques de chaque pays sont obtenues sur le site de la CIA (Central Intelligence Agency) (2010). Ces coordonnées étant celles du centre de chaque pays, la détermination de la distance physique entre Paris et certains pays particulièrement vastes tels que les États-Unis, le Canada, la Russie reste peu précise. Nous avons néanmoins ignoré ce problème faute d'autres informations. Pour obtenir la distance moyenne, la pondération est faite selon l'importance de l'apport énergétique de chaque origine en termes de pouvoir calorifique inférieur (et non de masse), ensuite selon la représentativité de chaque source énergétique dans la demande totale énergétique de Paris.

Modes de transport

Les modes de transport pour le XIXe siècle désignent les modes de transport des produits arrivés dans la région parisienne. Le transport de marchandise est alors quasi unimodal¹. Néanmoins, dans le cas de 1965 et de 2006, il est difficile de déterminer la part exacte de chaque mode de transport en raison de la croissance de la distance d’approvisionnement et de la part grandissante des produits importés qui empruntent souvent plusieurs modes de transport. De ce fait, pour ces années, le mode de transport retenu est celui qui correspond au transport de plus longue distance. On considère donc le mode de transport de la première origine pour les produits importés. Par exemple, pour les produits pétroliers, ceux qui arrivent par pipeline dans la région parisienne sont considérés comme produits importés par voie maritime et arrivés à des ports maritimes en France avant d’être injectés dans les pipelines approvisionnant Paris. La part de produits empruntant les pipelines est donc celle du gaz naturel importé directement par canalisation. L’uranium importé est considéré comme importé entièrement par la voie maritime. L’énergie primaire, hydraulique notamment, importée directement par un réseau technique dans la région parisienne est mise à part (catégorie *Autres*). L’énergie obtenue issue de l’incinération des déchets est considérée importée à 100% par la route en considérant le transport entre les lieux de ramassage et les usines d’incinération. Néanmoins, pour certains produits recensés dans la base SITRAM, notamment ceux qui empruntent la route, il est difficile d’identifier le mode initial de transport. On considère donc cette part de transport routier comme le mode principal de transport de tous les trajets.

2.4.3. Série temporelle pour l’énergie technique et l’ajustement de la variable climatique

On constitue la série longue de la consommation de la ville de Paris entre 1801 et 2006 (chapitre 5, section 5.6). La période lacunaire entre 1965 et 2006 est complétée par l’interpolation des deux valeurs connues et dont la consommation est ajustée selon la rigueur d’hiver afin d’enlever la variable climatique. Cette dernière joue un rôle important dans la variation de la consommation, notamment d’énergie thermique (chauffage), et par conséquent dans la consommation de combustibles utilisés pour le chauffage domestique ainsi que pour les industries : le fioul et le charbon de terre. La série longue de la température moyenne est issue d’un projet communautaire qui a constitué une base de données climatique centenaire,

¹ Voir le chapitre 6

*European climate assessment & Dataset (ECA&D) project*¹. Dans le cadre de ce projet, on collecte les données de température moyenne, minimale et maximale journalière de 3314 stations météorologiques dans 61 pays, dont la France (via Météo France). Les données de température de Paris qui sont disponibles dans cette base sont issues de la station Montsouris et sont enregistrées depuis le 1^{er} janvier 1900. Nous avons utilisé une partie de ces données entre 1946 et 2004, dernière année disponible dans la base, puisque les données contemporaines depuis 1951 sont disponibles uniquement tous les 4 ou 5 ans voir plus. Pour obtenir le DJU (Degré de jour unifié), indicateur montrant le besoin d'énergie thermique en fonction de la rigueur climatique, on évalue le cumul de différence entre la température moyenne journalière et celle de référence (17 °C) de la période de l'année qui va de janvier à mai et d'octobre à décembre (inclus), c'est-à-dire faisant partie d'une « saison de chauffe » (de janvier à mai et d'octobre à décembre (inclus)). Le but de cet exercice est d'ajuster la consommation de chaque combustible et d'électricité selon la part sensible du climat qui est définie périodiquement par l'Observatoire de l'énergie (actuellement SOES rattaché au ministère CGDD), afin d'effacer la variable climatique et d'interpoler pour obtenir les valeurs pour les périodes lacunaires, et ensuite réajuster ces derniers résultats aux valeurs réelles qu'on veut obtenir.

$$CR = CC \times (1 + p \times (r - 1))$$

où CC est la consommation corrigée d'une énergie donnée pour un secteur donné, CR est la consommation réelle correspondante, p est la part de la consommation sensible au climat, r est l'indice de rigueur de l'année $r = DJU / DJUm$, DJU égale à la somme des degrés-jours de la période de l'année qui va de janvier à mai et d'octobre à décembre (inclus), c'est-à-dire faisant partie d'une « saison de chauffe », DJUm égale au DJU d'une année moyenne (2 061 pour la période trentenaire 1976-2005²)

Les parts sensibles au climat sont différentes selon le secteur (résidentiel-tertiaire, industriel) (voir le tableau 2.6). Elles sont actualisées périodiquement et égales à des valeurs présentés dans le tableau suivant 2.6 depuis 2001. Cependant, la consommation sectorielle de Paris n'étant pas connue, nous supposons que la consommation résidentielle et tertiaire est une consommation

¹ Disponible sur la toile [en ligne][11 juin 2009] : <http://eca.knmi.nl/>.

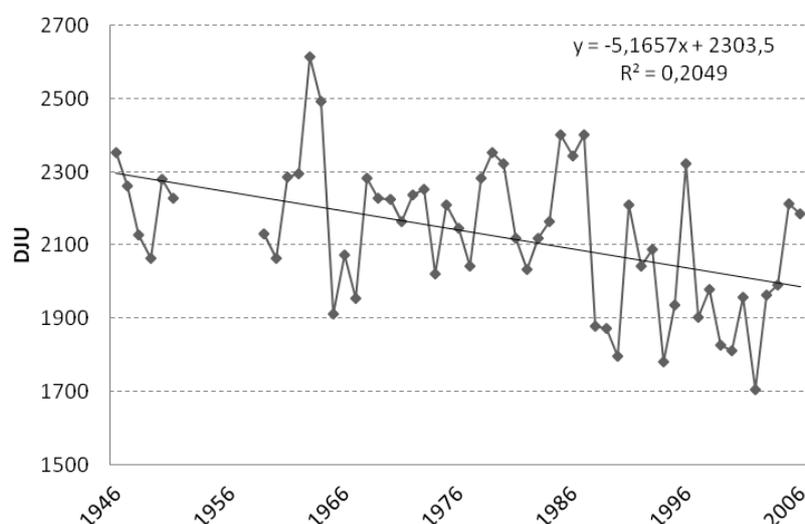
² Pour la période trentenaire entre 1961 et 1990, le DJU se situe à 2050 (RARE, 2004). Cependant, l'écart entre la consommation de gaz 1969 -1976 corrigée du climat avec le DJU 2061 et celle avec le DJU 2050 étant très faible (0 % à arrondi à 1), nous avons appliqué le DJU 2061 pour la consommation de gaz entre 1969 et 2006.

principale de Paris. La méthode a été utilisée uniquement pour la période après 1969 pour le gaz et après 1980 pour la vapeur qui connaît une période lacunaire importante. La part sensible au climat pour la vapeur est assimilée à celle de bois et de pompe à chaleur, soit 70% (tableau 2.6)¹. La figure suivante 2.10 montre le DJU calculé pour Paris qui est utilisé pour la base de calcul : le DJU connaît une baisse de 2227 à 1877 en moyenne selon la ligne de tendance linéaire.

Tableau 2.6. Parts sensibles au climat en % dans la consommation du secteur industrie et résidentiel-tertiaire selon les énergies

| % | Industrie | Résidentiel-tertiaire |
|-------------------------------|-----------|-----------------------|
| Electricité | 0 | 17 |
| Gaz | 17 | 70 |
| Pétrole | 10 | 60 |
| Combustibles minéraux solides | 0 | 75 |
| Bois et pompes à chaleur | 0 | 70 |

Source : DGEMP [25 juin 2009].



| | |
|--|--------|
| DJU moyen de la période, 1959-2006 | 2118 |
| DJU moyen de la période, 1967-2005 (Trentenaire) | 2067 |
| DJU moyen de la période 1946-1951, 1959-2005 | 2129 |
| Nombre des valeurs manquantes pour la période 1946-2004 (dans la base) | 30 |
| % des valeurs manquantes pour la période 1946-2004 (dans la base) | 0,14 % |

Figure 2.10. Degré de jour unifié calculé pour Paris (température de référence égale à 17°C).

Source : dans le texte.

¹ RARE (2004) donne 75 % pour la part sensible au climat pour l'énergie renouvelable.

2.5. Conclusion

Le concept de métabolisme est né pour expliquer l'interaction entre les ressources naturelles et les sociétés. Si les ressources naturelles sont présentes dans la biosphère, parmi celles-ci, le type et la quantité de sources énergétiques appropriées par les sociétés urbaines et leurs usages finaux seront les résultats de divers facteurs sociaux, économiques, politiques et techniques. L'analyse à long terme de ces flux vise à décrypter ces processus d'appropriation des ressources énergétiques par les sociétés. La méthode que nous avons adoptée a pour but de quantifier les sources énergétiques primaires exploitées par la ville, autrement dit les matières qui concourent pour divers usages énergétiques, nutritif et technique : biomasse forestière, agricole et combustible fossile et fissile. À l'échelle urbaine, la question des flux indirects, engendrée notamment par les mutations de la localisation de la production et de la transformation, est importante et mérite une analyse plus approfondie. On essaie de quantifier ces flux indirects associés à la consommation énergétique (sous forme) finale par la ville. Notre méthode est basée sur l'analyse des flux de matières pour obtenir les indicateurs principaux et vise à quantifier l'énergie primaire consommée en amont pour l'approvisionnement d'énergie finale de la ville. La dimension géographique est primordiale en termes d'impacts environnementaux, et la distinction entre les pertes locales et extérieures au territoire permet de mesurer l'effet différé dans l'espace de la consommation énergétique urbaine. Cet effet est en effet déterminant dans le mode d'appropriation de questions environnementales et dans la décision de stratégie d'anthropisation (urbanisation) de la ville (Barles, 2010). La consommation totale de ressources faite par la ville est mesurée par l'indicateur de la Demande énergétique totale. Ensuite, on compare cette quantité à celle des sources énergétiques disponibles dans la ville (mesurée par la Consommation énergétique directe) et à celle de consommation finale (mesurée par la Consommation énergétique finale totale). On considère que les flux indirects sont mesurés par la différence entre la Demande énergétique totale et la Consommation énergétique directe (DET – CED). La perte énergétique totale pour la consommation finale est mesurée par la différence entre la Demande énergétique totale et la Consommation énergétique finale totale (DET – CEFT).

Chapitre 3. Consommation énergétique parisienne : périmètre, population et données historiques et statistiques sur la consommation énergétique, XIXe – XXIe siècles

3.1. Périmètre d'étude, population et méthode

Périmètre d'étude et population

Notre étude vise à analyser le métabolisme énergétique de la ville de Paris entre 1801 et 2006, période comparable à celles étudiées dans les cas de Vienne et de l'Angleterre (Krausmann, 2006, Schandl, Schulz, 2002). Cependant le Paris de 1801 n'est pas le Paris d'aujourd'hui. En effet, entre 1801 et 2006, la population de la ville est passée de 575 800 à 2 181 400 habitants et son agglomération atteint aujourd'hui presque 11 millions d'habitants. De plus, la ville de Paris occupait une surface d'environ 3 600 hectares au début du XIXe siècle et elle s'étale aujourd'hui sur 10 540 hectares. Cette extension urbaine et démographique engendre des difficultés liées, d'une part, au périmètre changeant de la ville de Paris, et d'autre part à la représentativité d'une étude qui se limiterait à une entité administrative dont son agglomération déborde largement.

L'extension urbaine durant les XIXe et XXe siècles s'est déroulée en plusieurs étapes. Le plus grand changement en termes de surface et de population se produit en 1860 lorsque la limite administrative du territoire est passée du mur de Fermiers généraux à l'enceinte de Thiers, Paris couvrant alors 7 802 ha. Ce nouveau périmètre inclut ainsi une partie des terres et de la population des communes voisines, telles que Belleville, Montmartre, Neuilly, Ivry, et Bercy, qui constituent actuellement les arrondissements 12 à 20 de Paris¹ (voir la figure 1). Ensuite, durant la première moitié du XXe siècle, Paris s'étend sur le terrain de la fortification de Thiers

¹ Avec une légère différence sur le territoire du 12^{ème} arrondissement qui comprend une partie du territoire de Paris avant 1860.

suite à sa démolition (1926, 8 622 ha), ainsi que sur le bois de Vincennes et le bois de Boulogne (1929, 10 516 ha), et gagne enfin le terrain de manœuvre d'Issy-les-Moulineaux (1954). Ce changement de périmètre administratif induit une difficulté technique, puisque nous dépendons de données qui sont collectées et organisées selon ce périmètre variable.

Pour notre étude, le changement majeur est 1860, car les autres modifications de périmètre ne sont pas significatives en termes de population, et par conséquent de consommation énergétique. En effet, le terrain des fortifications, le bois de Vincennes et le bois de Boulogne ne représentent pas une population et donc une consommation énergétique importantes. De ce fait, pour fixer notre périmètre d'étude sur une entité géographique, il nous faut élargir le périmètre de Paris en 1801 et inclure la population qui occupait le territoire entre le mur des Fermiers généraux et l'enceinte de Thiers pour la période entre 1801 et 1860. Cependant, la consommation énergétique et alimentaire en dehors du périmètre administratif de Paris est inconnue à cette époque, ne faisant l'objet d'aucun recensement. Il nous est donc nécessaire d'estimer la consommation du territoire et de la population à l'extérieur de Paris à partir de la consommation de la capitale. Cette estimation va néanmoins à l'encontre de notre hypothèse de base, qui se fonde sur la consommation énergétique différenciée d'un territoire selon sa situation géographique dans l'agglomération : centre-ville, périphérie, ou espace rural (voir le chapitre 1). Cette correction engendre donc une difficulté scientifique.

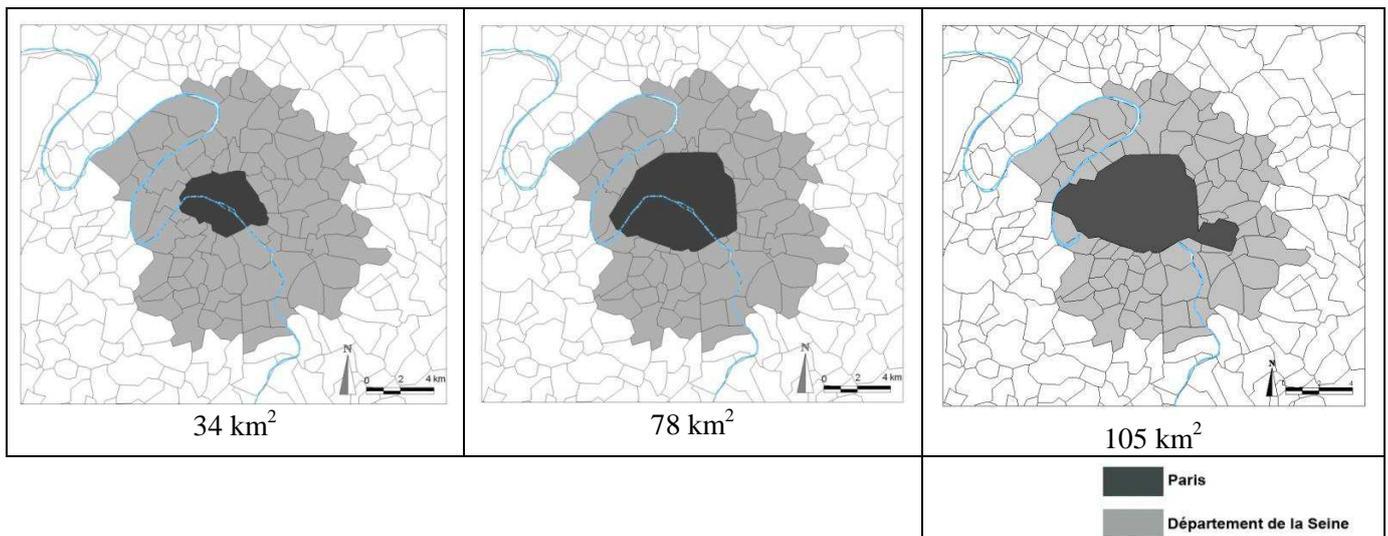


Figure 3.1. Périmètres administratifs de la ville de Paris avant 1860 (gauche), entre 1860 et 1929 (milieu) et aujourd'hui (droite). Source : cette thèse selon IAU, [en ligne] [réf. du 28 mars 2012] Disponible sur la toile : <http://www.iau-idf.fr> ; Observatoire du Grand Paris : <http://observatoiregrandparis.org/1830/01/01/limites-des-anciennes-communes-de-la-seine/>.

D'autre part, le choix d'une limitation de notre travail au périmètre administratif de la ville de Paris, du fait de la disponibilité de données anciennes sur la consommation énergétique, pose le problème de la représentativité de la consommation énergétique de ce territoire par rapport à la consommation énergétique totale de l'agglomération. Ce problème devient aigu à partir de la fin du XIXe siècle, le poids de la ville dans la population totale de l'agglomération diminuant avec la croissance démographique et l'extension spatiale de l'agglomération. En effet, au début du XIXe siècle, Paris représente presque 99% de la population agglomérée¹, alors qu'elle ne représente que 69 % de l'agglomération en 1921. L'agglomération qui dépassait le département de la Seine, depuis la première moitié du XXe siècle, atteint progressivement la région Île-de-France après 1945 en termes de population et d'espace urbanisé. L'évolution de la situation démographique de Paris et de la région Île-de-France au début des années 1950 montre une accélération de la croissance démographique et de l'extension urbaine. En effet, en 1951, Paris représente 56% de la population du département de la Seine et 40% de la population de l'Île-de-France. Entre 1954 et 1962, la population parisienne baisse, passant de 2,85 à 2,79 millions habitants. Cette baisse est cependant relativement faible par rapport à la période 1968-1975 où la population baisse de 2,59 à 2,29 millions d'habitants au profit de la croissance de la grande couronne (voir la figure 3.3 : l'écart entre la population Île-de-France et la petite couronne + Paris). La population de l'agglomération représente ainsi 129 % de la population du département de la Seine en 1962, contre 93 % en 1954 (figure 3.3). La population parisienne quant à elle ne représente plus qu'environ 28 % de la population de l'agglomération en 1968 et environ 20% aujourd'hui.

Une façon de contourner ces difficultés est de réaliser plusieurs bilans. D'une part, on s'intéresse à la consommation de la Ville de Paris en assumant son périmètre administratif changeant. Ce résultat est intéressant, puisqu'il n'inclut aucune hypothèse basée sur l'uniformité de la consommation énergétique et demeure au plus près des sources primaires. On appellera ce résultat la consommation énergétique de la *ville de Paris*. D'autre part, on s'intéresse à la consommation totale d'une entité géographique fixe, le territoire de la ville de Paris aujourd'hui. Rappelons que dans le domaine de l'écologie, et en particulier dans celui de l'écosystème écologique, les études s'attachent à une observation de l'évolution de flux de matière et d'énergie sur un périmètre spatial donné, qui est important en tant qu'objet de recherche. On

¹ On parlera de la notion d'agglomération que l'on vient d'utiliser et que l'on appliquera dans les deux pages suivantes.

essaie donc de faire un ajustement par l'estimation de la population présente dans le territoire annexé en 1860 avant cette date, ce dont on discutera par la suite. On appellera ce résultat la consommation de «Paris 2006». Ensuite, nous nous sommes intéressées à la mise en perspective de la consommation de la ville avec les autres territoires qui l'entourent et qui absorbent sa croissance démographique et industrielle. Nous dénommons ces territoires *petite couronne* et *grande couronne* (voir figure 3.2).

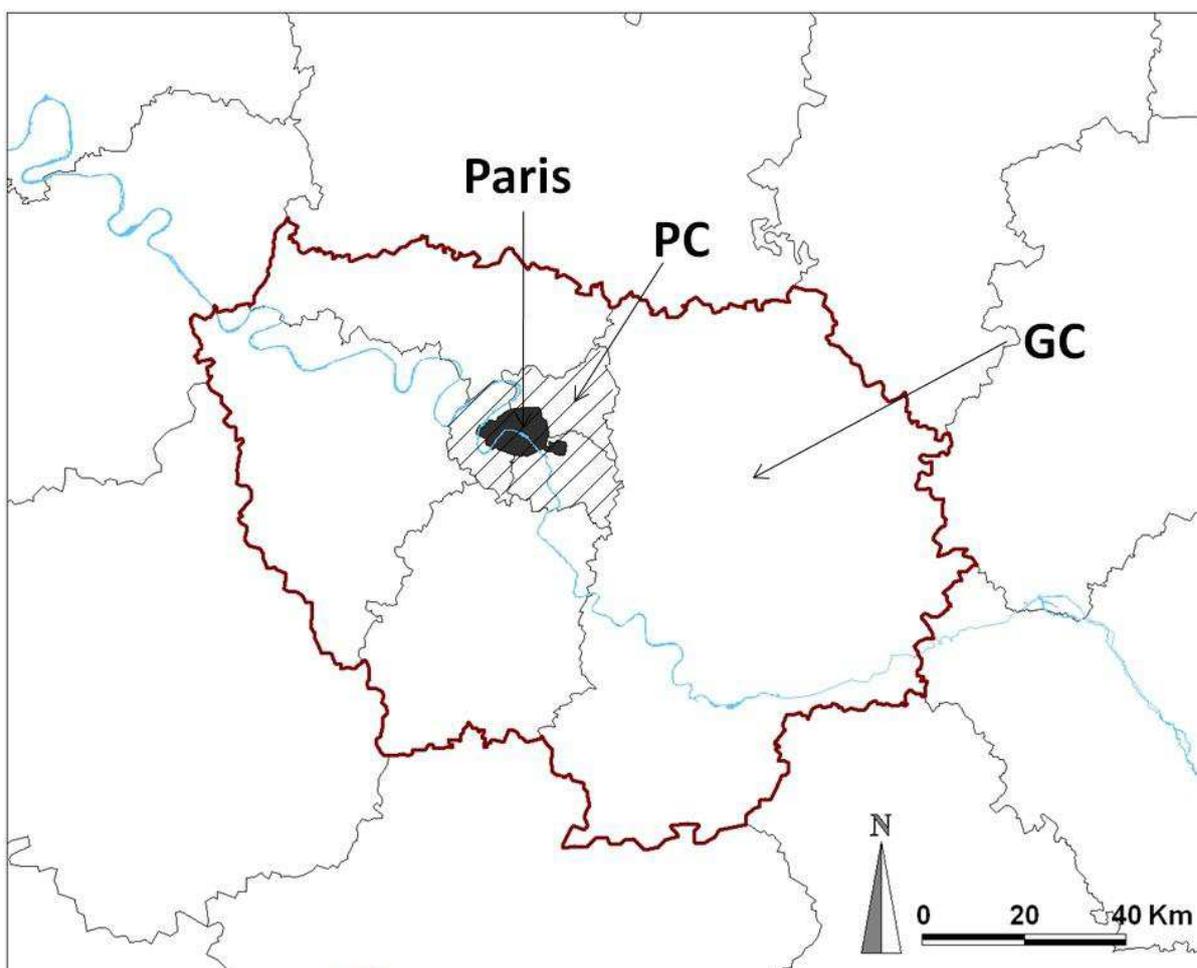


Figure 3.2. Territoires de Paris, de la petite couronne (PC) et de la grande couronne (GC).

Source : cette thèse.

Toutefois, comme dans le cas de la ville de Paris, le périmètre administratif de ces territoires est changeant. En effet, les limites de la petite couronne et de la grande couronne sont fixées lors de

la réorganisation de la région Île-de-France en 1964¹. Avant cette date, il existait trois départements dans la future région Île-de-France, les départements de la Seine, de la Seine-et-Oise et de la Seine-et-Marne. Le territoire du département de la Seine hors Paris est urbanisé depuis le milieu du XIXe siècle et connaît une forte industrialisation à partir de 1870. Sa consommation énergétique est liée à des activités industrielles et par conséquent à la consommation matérielle de la ville de Paris. On appellera sa consommation énergétique la consommation de la *banlieue* ; cette banlieue se limite donc au territoire du département de la Seine hors Paris. Ce territoire représente environ 43% du territoire de la petite couronne. En 1967, le département de la Seine-et-Oise est divisé en trois départements (Essonne, Yvelines, Val-d'Oise), et cède également une partie de son territoire à chacun des trois départements de la petite couronne (Val-de-Marne, Seine-Saint-Denis et Hauts-de-Seine) (voir la figure 3.2). Par conséquent, le territoire des deux anciens départements ne correspond pas exactement à celui de la grande couronne. On appellera leur consommation énergétique la consommation des *deux départements périphériques*. Après 1967, ces territoires vont être appelés petite couronne et grande couronne. La petite couronne comprend trois départements internes entourant Paris aujourd'hui : Val-de-Marne, Seine-Saint-Denis et Hauts-de-Seine. Ce territoire inclut le territoire de l'ancien département de la Seine qui comprenait Paris et est marqué par l'industrialisation qui s'est amorcée à la fin du XIXe siècle puis par la désindustrialisation des années 1960 et 1970. La grande couronne est le territoire incluant les quatre départements périphériques de la région: Seine-et-Marne, Essonne, Yvelines, Val-d'Oise. Elle correspond aux deux anciens départements de la Seine-et-Oise et de la Seine-et-Marne, territoires majoritairement ruraux.

Outre la consommation énergétique de chaque territoire que nous venons de définir, on cherche à comparer la consommation énergétique technique à la consommation alimentaire. Cependant, les données sur la consommation alimentaire avant 1943 n'existent que pour la ville de Paris. Après 1950, les données sur la consommation sont à l'échelle de la région Île-de-France. Comment peut-on passer de l'échelle de la ville à celle de la région ? Lorsqu'on prend la ville de Paris comme périmètre d'études, se pose le problème de la représentativité, ainsi que nous l'avons discuté. En revanche, si l'on prend la région Île-de-France comme périmètre d'analyse, ce qui correspond à peu près à l'agglomération aujourd'hui, on se rend compte que la majorité de ce territoire, notamment la grande couronne, est rurale jusqu'au milieu du XXe siècle, soit plus de la moitié de la période étudiée. La consommation alimentaire varie entre l'espace rural

¹ Entrée en vigueur le 1^{er} janvier en 1968.

et l'espace urbain, et le métabolisme rural ne se caractérise pas de la même manière que le métabolisme urbain (Billen et al., Chatzimpiros, 2011). Si l'on retient cette hypothèse et assume l'uniformité de la consommation alimentaire d'une population urbaine, il est nécessaire de définir la population urbaine pour notre cas d'étude.

En France, le recensement de la population à l'échelle de la commune est effectué depuis 1801¹. Depuis 1811, on définit pour chaque commune la population agglomérée, selon une enquête réalisée par le préfet à la commande du ministère de l'Intérieur (Dupeux, 1981). La population agglomérée est assimilée à la population urbaine et était estimée régulièrement. Si une commune possède une population agglomérée au chef-lieu qui dépasse 2000 habitants, cette commune est considérée comme étant une commune urbaine. La commune rurale est par conséquent définie de manière inverse². La population urbaine totale est calculée par la somme de la population totale municipale de chaque commune urbaine définie. En 1981, Dupeux a redéfini la population agglomérée pour son étude sur l'histoire de l'urbanisation de la France. Il fixe le seuil de 3000 habitants pour désigner une commune urbaine et prend seulement la population agglomérée de chaque commune urbaine pour estimer la population urbaine totale. Selon lui, le seuil de 3000 habitants est plus conforme pour définir la population agglomérée, puisqu'un grand nombre de bourgs entre dans la catégorie commune urbaine lorsqu'on choisit le seuil de 2000 habitants. Inversement, le seuil de 5000 habitants, qui a été utilisé comme seuil pour définir une commune urbaine à l'époque de la publication de Dupeux (1981), ne permet pas selon lui de prendre en compte un grand nombre de nouvelles villes émergentes. Dupeux critique ainsi la méthode pratiquée auparavant par le ministère de l'Intérieur et par l'INSEE (mais avec le seuil de 2000) pour estimer la population agglomérée (population totale municipale de communes urbaines) qui est une cause majeure de surestimation de la population urbaine. Le résultat de l'étude de Dupeux pour l'agglomération parisienne est présenté dans la figure suivante 3.3, et permet de suivre la croissance urbaine de la région parisienne en termes démographiques.

Cependant, il apparaît que la méthode de Dupeux saisit mal l'urbanisation après 1962, puisque l'écart entre la population urbaine définie par lui et la population de la région Île-de-France croît

¹ Lancé par le bureau de statistique du ministère de l'Intérieur puis par la Statistique générale de la France depuis 1840 et par l'INSEE depuis les années 1950 (La bibliothèque de l'Insee, 1969).

² Cette définition n'est pas retenue à partir du recensement de 1990, selon Journal Officiel du Sénat du 10/12/1992, p. 2738, *Mode de calcul de la population dite " agglomérée " des communes*, [en ligne] [réf. du 28 mars 2012], Disponible sur la toile : <http://www.senat.fr/questions/base/1992/qSEQ920722144.html>.

entre 1962 et 1968, alors que c'est à cette période que la région Île-de-France connaît la plus grande croissance urbaine. De ce fait, l'INSEE a défini en 1962 l'*unité urbaine*, afin de mieux saisir la population urbaine. Elle est définie comme « une commune ou un ensemble de communes présentant une zone de bâti continu (pas de coupure de plus de 200 mètres entre deux constructions) qui compte au moins 2 000 habitants »¹. Cette unité urbaine pour la région parisienne est disponible à partir de 1968.

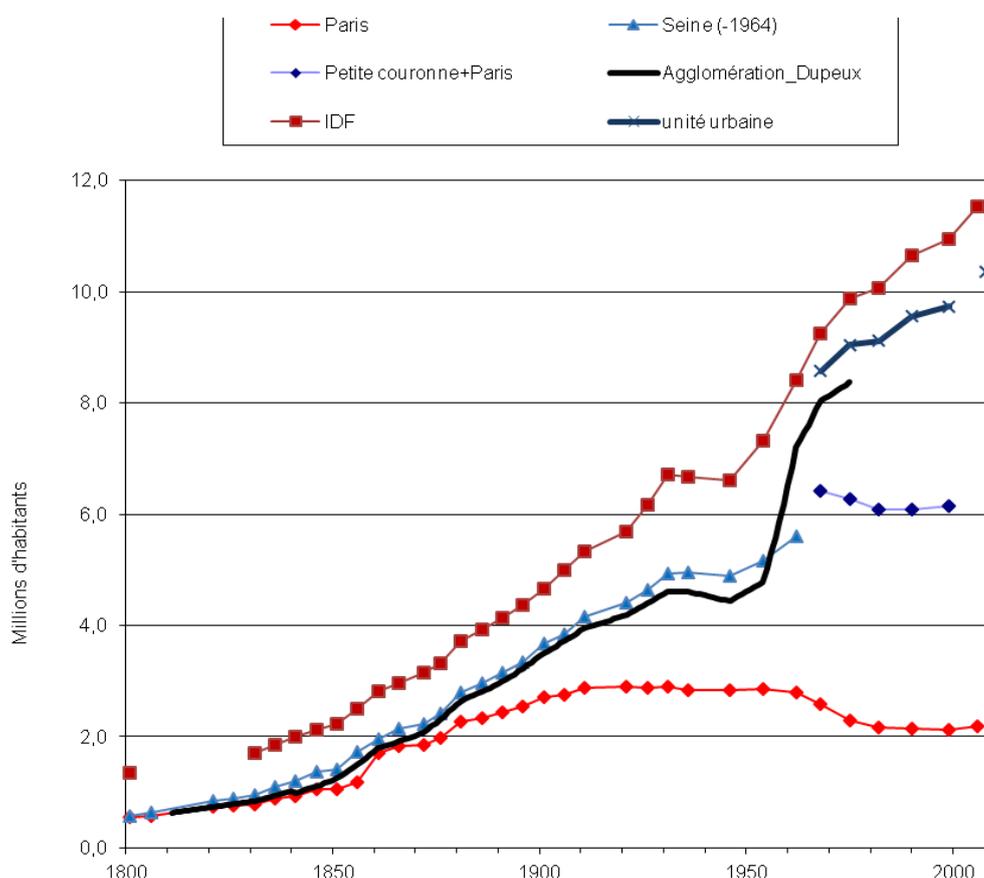


Figure 3.3. Population de la région Île-de-France selon différents périmètres entre 1801 et 2006. Source : INSEE. Recensement de la population à partir de 1801², Dupeux, 1981, INSEE. 2011, unité urbaine 2010, www.insee.fr.

¹ INSEE, [s. d.] *Unité urbaine*, [en ligne] [réf. du 3 sept. 2012], Disponible sur la toile : <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/unite-urbaine.htm>

² Données de la Statistique générale de la France (SGF), [en ligne] [05/04/2012] Disponible sur la toile : http://www.insee.fr/fr/insee-statistique-publique/bibliotheque/tableaux_sgf/tableaux.asp?domaine=terr

Méthode de correction

On essaie ici dans un premier temps de faire une correction de la population pour définir ultérieurement la consommation énergétique totale et la consommation énergétique par habitant du territoire de «Paris 2006». Dans un deuxième temps, on essaie de redéfinir la population agglomérée de Paris en considérant le périmètre de données concernant la consommation énergétique dont on dispose, c'est-à-dire, le périmètre administratif de Paris et des départements de la région Île-de-France (voir les sections suivantes).

Pour définir la population de «Paris 2006» pour la période comprise entre 1801 et 1860, nous avons relevé les données de recensements de la population communale de 1841 pour le département de la Seine. Nous avons classé les 24 communes annexées en 1860 en deux catégories pour obtenir la population de «Paris 2006» : 1) communes possédant de plus de 50 % de leur territoire annexés à la Ville de Paris, et 2) communes dont le territoire annexé n'atteint pas ce seuil. Pour la première catégorie de communes, on intègre la totalité de leur population à la population de «Paris 2006». Pour la deuxième, on intègre 50% de leur population à celle de «Paris 2006». Le seuil de 50% est arbitraire. Néanmoins, presque 30% des communes annexées en 1860 cèdent la quasi-totalité de leur territoire à Paris et environ 60% des communes cèdent plus de 50% de leur territoire à Paris. Le résultat du calcul sur la base du recensement de la population de 1841 équivaut à 107% de la population agglomérée selon l'étude de Dupeux (voir la figure suivante). Cet écart est compréhensible, compte tenu des nombreuses communes (33% du total) possédant moins de 3000 habitants en 1841¹. Nous avons donc tracé une courbe de la croissance de la population de «Paris 2006» qui passe par trois points entre la population de 1821, la population de 1841 obtenue et la population de 1861, qui sera utilisée pour la base de calcul de la consommation énergétique totale de la Ville. Nous allons affecter la consommation par habitant de la ville de Paris à cette population. Nous discuterons de la validité de cette hypothèse dans la section suivante (3.2.2.).

¹ Même si l'on ne connaît pas la part de la population agglomérée dans cette population municipale totale.

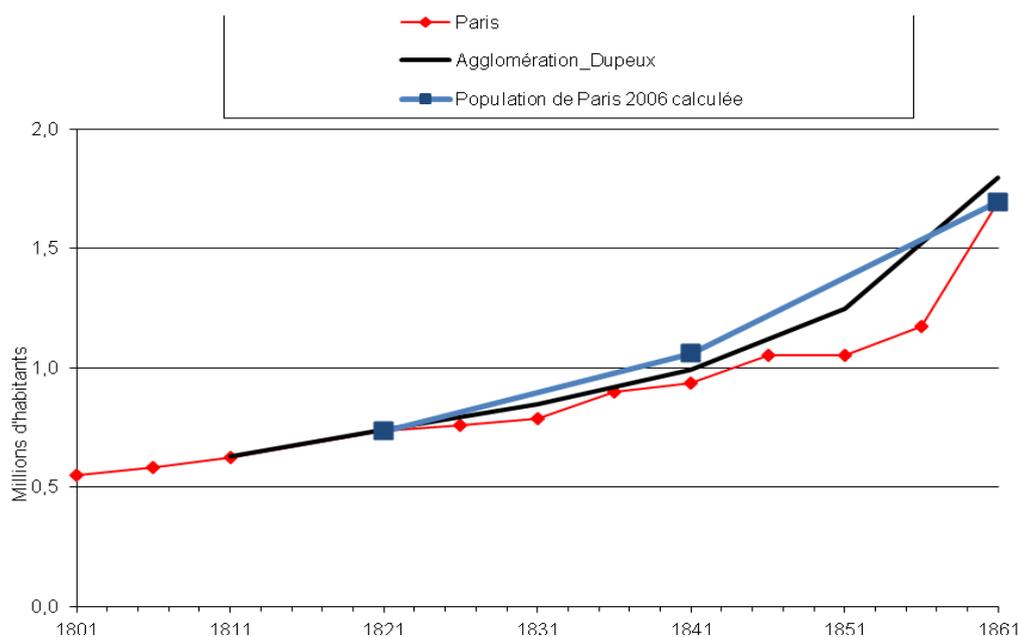


Figure 3.4. Population de Paris 2006 définie pour la période entre 1821-1861. Source : le texte.

Ensuite, pour définir la population agglomérée pour notre étude, on revient aux courbes de population présentées précédemment dans la figure 3.3. Comme indiqué, nous ne possédons de données sur la consommation énergétique qu'à l'échelle du périmètre administratif. Il faut donc adapter à l'échelle de l'agglomération parisienne les données pour définir sa consommation énergétique. Nous avons défini un territoire administratif représentatif de l'étendue occupé par l'agglomération parisienne. Les courbes de population selon différents périmètres administratifs nous montrent que la population agglomérée correspond approximativement au périmètre de Paris 2006 (corrigé) jusqu'en 1860. Ensuite, la population du département de la Seine s'approche de la population agglomérée de Dupeux pour la période entre 1876 et 1954. Enfin, la population agglomérée devient approximativement la population de la région Île-de-France à partir de 1968. On suppose donc qu'un territoire administratif peut représenter la consommation énergétique de l'ensemble de l'agglomération parisienne comme le montre la figure suivante.



Figure 3.5. Désignation de l'agglomération selon le découpage administratif (en gris : périodes de transition)

Entre 1801 et 1861, on assimile la consommation énergétique de Paris 2006 à la consommation énergétique de son agglomération. Ensuite entre 1876 et 1964, on assimile la consommation énergétique du département de la Seine à la consommation énergétique de l'agglomération parisienne. Enfin, entre 1968 et 2006, on assimile la consommation énergétique de la région Île-de-France à la consommation énergétique de l'agglomération parisienne. Les deux périodes entre 1861 et 1876 et entre 1954 et 1968 sont considérées comme des périodes de transition d'échelle par la croissance démographique et l'extension urbaine ; la première période est marquée par l'extension urbaine de la ville de Paris au département de la Seine ; la deuxième période est marquée par l'extension urbaine du département de la Seine à la région Île-de-France.

3.2. Consommation énergétique parisienne, 1801-1950

L'inventaire des consommations exprimées en masse constitue le préalable à l'analyse de substances en matière sèche et à l'analyse énergétique en pouvoir calorifique. On s'intéresse à déterminer la consommation parisienne totale de ressources énergétiques en quantité, en kilotonne ou en kilogramme, ainsi qu'aux types de sources consommées selon la période : biomasse agricole, forestière, combustible fossile. Identifier les sources de données relatives à la consommation urbaine et en faire un inventaire est en effet le préalable de toute démarche d'analyse de flux de matières. Pour les combustibles fossiles entre 1801 et 1943, on s'appuie principalement sur les registres de l'octroi de Paris et sur des sources secondaires issues de travaux d'historiens portant sur les entreprises énergétiques parisiennes.

Tableau 3.1. Sources de données principales pour la consommation de combustibles et d'énergie secondaire entre 1801 et 1950

| | 1800-1850 | 1850-1900 | 1900-1950 |
|-------------------------------|--|---|--|
| Entrée de combustibles | | | |
| Charbon de terre | Octoi Chap. IV. Combustibles-Charbon de terre et tourbe carbonisée | Octoi Chap. IV. Combustibles-Charbon de terre et tourbe carbonisée Statistique de l'industrie minérale, 1848 SGF, Annuaire statistique de la France, série entre 1878 et 1899 | Octoi Chap. IV. Combustibles-Charbon de terre et tourbe carbonisée SGF, Annuaire statistique, série entre 1900 et 1951 |
| Bois et charbon de bois | Octoi Chap. IV. Combustibles - Bois à brûler d'essence dure - Bois à brûler d'essence tendre - Menuise de bois dur ou de bois blanc et fagots, etc. - Cotrets, menuise et fagots de toute espèce - Charbon de bois, Poussier de charbon de bois, etc. Compte de Chabrol, 1829 Backouche, 2001 | Octoi Chap. IV. Combustibles - Bois à brûler d'essence dure - Bois à brûler d'essence tendre - Menuise de bois dur ou de bois blanc et fagots, etc. - Cotrets, menuise et fagots de toute espèce - Charbon de bois, Poussier de charbon de bois, etc. | Octoi Chap. IV. Combustibles - Bois à brûler d'essence dure - Bois à brûler d'essence tendre - Menuise de bois dur ou de bois blanc et fagots, etc. - Cotrets, menuise et fagots de toute espèce - Charbon de bois, Poussier de charbon de bois, etc. |
| Énergie secondaire | | | |
| Gaz | Barjot et al., 1991 Sources originales : Archives de Paris, Cotes: V. 801 1 à 1620 (archives de la compagnie parisienne du gaz entre 1802-1927) | Barjot et al., 1991 Sources originales : Williot, 1999 A. COND (GDF) b4155, A.COND. 1606-1611(rapports aux AG.), A. COND. B4157 (citées par Barjot 1991) Archives de Paris, Cotes: V. 801 1 à 1620 (archives de la compagnie parisienne du gaz entre 1802-1927) | Barjot et al., 1991 Sources originales : Archives de Paris, Cotes: V. 801 1 à 1620 (archives de la compagnie parisienne du gaz entre 1802-1927) |
| Électricité | | | Malégarie, 1947, pp. 497 - 509. |

3.2.1. Consommation parisienne de combustibles selon l'octroi de Paris, 1801-1943

La reprise du droit d'octroi en 1798, droit de perception de taxes sur les marchandises, permet à la ville de Paris de financer les dépenses municipales (Compte de Chabrol, 1821)¹. L'octroi de Paris nous intéresse particulièrement, en raison de la continuité de la série de données qui nous permet de suivre dans le temps l'évolution de la consommation parisienne². Toutefois, les données sur la consommation de combustibles issues de l'octroi correspondent à la consommation de la ville de Paris, et non de son agglomération³. Quoi qu'il en soit, l'octroi de Paris est une source de données précieuse pour connaître la consommation parisienne *intramuros* jusqu'en 1943. Il existait cependant divers arrangements concernant l'importation de matières premières, et donc de combustibles, sous forme de contrats et de forfaits entre l'autorité de l'octroi et les entreprises parisiennes, notamment les industries et les entrepôts installés à Paris *intramuros* (Cochin, 1883). De ce fait, les relevés de l'octroi sur les combustibles de Paris diffèrent probablement certaines années de la consommation réelle due à l'entrée ou la sortie du stock de combustibles. De plus, la consommation comptée peut être la consommation finale et/ou la consommation directe, puisque des usines à gaz existent à Paris depuis 1818. Ces usines consomment du charbon de terre et produisent du gaz de houille, dit gaz de ville. Bien entendu, il faudrait confronter les données sur la consommation de combustibles issues de l'octroi à des données issues de sources différentes, telles que l'arrivage permettant de connaître l'importation de la région de combustibles, ainsi que des données sur la consommation de combustibles par les autres départements : de la Seine, de la Seine-et-Marne et de la Seine-et-Oise. Deux questions se posent :

- Est-il possible de distinguer la consommation énergétique finale de la consommation d'énergie directe par l'étude de l'évolution des règles de taxation de l'octroi sur l'entrée de matières premières ou par la confrontation des données de l'octroi concernant des combustibles à des données issues d'autres sources (documents statistiques anciens et littérature historique) ?

¹ En 1798, Paris obtient le droit de perception de taxes sur les marchandises qui a été supprimé par l'Assemblée nationale en 1791 par la loi AN, AD XVI 71, loi qui ordonne la perception d'un octroi pour l'acquit des dépenses locales de la commune de Paris, 27 vendémiaire an VII (18 octobre 1798) (Feugère, 1904).

² En citant Louis Chevalier (Claustre, 2000-2001).

³ On discutera de cette notion dans la sous-section suivante.

- Si la consommation de la ville de Paris issue de l'octroi ne représente pas la consommation totale urbaine de l'agglomération parisienne, comment estimer cette dernière ?

Entre 1801 et 1859, le droit d'octroi de Paris est une taxe sur certaines matières premières et produits qui franchissent le mur d'enceinte de Paris par le biais des offices d'octroi¹. Il convient donc d'identifier les données correspondantes. Cependant, la compagnie parisienne du gaz obtient exceptionnellement à partir de 1856, date de l'accord du monopole par la ville, un droit qui la dispense du droit d'octroi pour la houille importée. La compagnie paye seulement une redevance à la caisse municipale pour la vente de gaz de houille, par mètre cube de gaz consommé dans Paris, ainsi que pour la vente de ses produits, notamment le coke qui est, lui, compté par l'octroi dans le chapitre concernant le charbon de terre (tableau 3.2)². De ce fait, à partir de 1856, la compagnie du gaz de Paris ne paie pas de droit d'octroi mais une redevance pour la vente de son gaz à Paris, qui n'est donc pas compté par l'octroi, lorsque les usines à gaz sont situées dans Paris, à l'intérieur de l'enceinte des Fermiers généraux. Néanmoins, ses sous-produits (coke et goudron) font l'objet de l'octroi lorsqu'ils sont consommés à Paris (Cochin, 1883). Le goudron est utilisé comme matière première et est compté dans le chapitre « liquide ». Le coke est regroupé dans le chapitre « combustible » avec la houille et l'anhracite. On verra que cette règle exceptionnelle appliquée à la compagnie parisienne du gaz s'étend à toutes les industries après 1860. En effet, après l'extension de Paris en 1860 et le recul du mur d'enceinte, l'octroi change profondément son système de taxation.

En 1859, la Ville de Paris accorde dans les zones qui seront annexées l'année suivante un délai de sept ans avant l'application des taxes d'octroi aux industriels et elle donne le droit « d'entrepôt à domicile »³ pour une durée de dix ans aux gros marchands en activité au 1er janvier 1859 (Claustre, 2000-2001). Les matières premières concernées par le droit d'entrepôt à domicile ne sont désormais taxées par l'octroi que pour les quantités livrées dans Paris et destinées à la consommation locale (Cochin, 1883). Ce droit d'« entrepôt à domicile » s'applique aux dépôts de combustibles et de matières premières approvisionnant Paris. Entre le

¹ Certaines matières premières et certains produits peuvent être exemptés de l'octroi, selon la décision de l'administration.

² Selon le traité passé entre la ville de Paris et la Compagnie Parisienne de l'Éclairage et du Chauffage par le Gaz, lorsque la ville crée sa compagnie municipale et donne le monopole pour la distribution du gaz à Paris (Williot, 1999, Cochin, 1883).

³ Les magasins en gros existants font entrer leurs marchandises en franchise dans Paris, et ne payent de taxes qu'à raison de celles qui sont livrées à la consommation intérieure (Claustre, 2000-2001).

31 décembre 1867 et le 1^{er} juin 1870, un régime intermédiaire est appliqué. Il s'agit d'un abonnement basé sur les moyennes de droit sur tous les combustibles et les matières premières, dont la somme est déterminée par le conseil municipal et arrêtée par le préfet. En 1870, le conseil municipal établit définitivement le droit d'« entrepôt à domicile » pour tous les usiniers et marchands en gros de l'intérieur de la ville comme pour ceux des zones annexées (De Saint-Julien, Gustave Bienaymé, 1887). Cependant, la contestation de la part des industriels entraîne l'autorité de l'octroi de Paris à établir un nouveau régime au début de l'année 1873. Un système de perception différencié avec trois dispositifs est créé : « reconnaissance à la sortie aux compensations de l'entrée » destinée aux produits réexportés, « abonnement sur les combustibles » destiné aux fabricants industriels (pour les gros consommateurs), et « entrepôt de matières premières et de produits fabriqués » (Claustre, 2000-2001).

Jusqu'en 1859, selon le régime de l'octroi de Paris, les matières premières recensées sont celles qui sont entrées dans Paris, ce qui signifie que ces matières peuvent éventuellement être vendues ensuite pour l'extérieur de Paris. Entre 1860 et 1870, la quantité recensée ne correspond ni à la consommation finale de Paris ni à la consommation directe, puisque les entrepôts qui s'installent après 1859 payent le droit d'octroi jusqu'en 1867 pour tous leurs achats de combustibles, que ceux-ci soient destinés à une consommation dans Paris ou à l'extérieur. Il est donc probable que durant cette période, les activités de stockage de combustibles et de matières premières aient été préférablement installées en banlieue pour échapper à la taxe.

Entre 1868 et le 1^{er} juin 1870, les données renseignées par l'octroi ne portent pas véritablement sur la consommation énergétique finale ni sur la consommation directe d'énergie, du fait de l'abonnement à des matières premières et du droit d'entrepôt à domicile appliqués partiellement aux entreprises dans Paris. Entre le 1^{er} juin 1870 et 1872, le registre de l'octroi correspond enfin à la consommation parisienne. Mais les années 1870 et 1871 sont une période de guerre, et on ne peut accorder que peu de crédit aux données de l'octroi (Claustre, 2000-2001). Après 1873, avec les dispositifs d'abonnement, d'entrepôt à domicile et de reconnaissance à la sortie aux compensations de l'entrée, il semble que l'octroi compte toute la consommation, qu'elle soit forfaitaire ou pas. Dans le cas du paiement forfaitaire, les données reflètent la consommation parisienne moyenne de combustibles sur plusieurs années, et la quantité enregistrée chaque année ne reflète pas la consommation parisienne exacte.

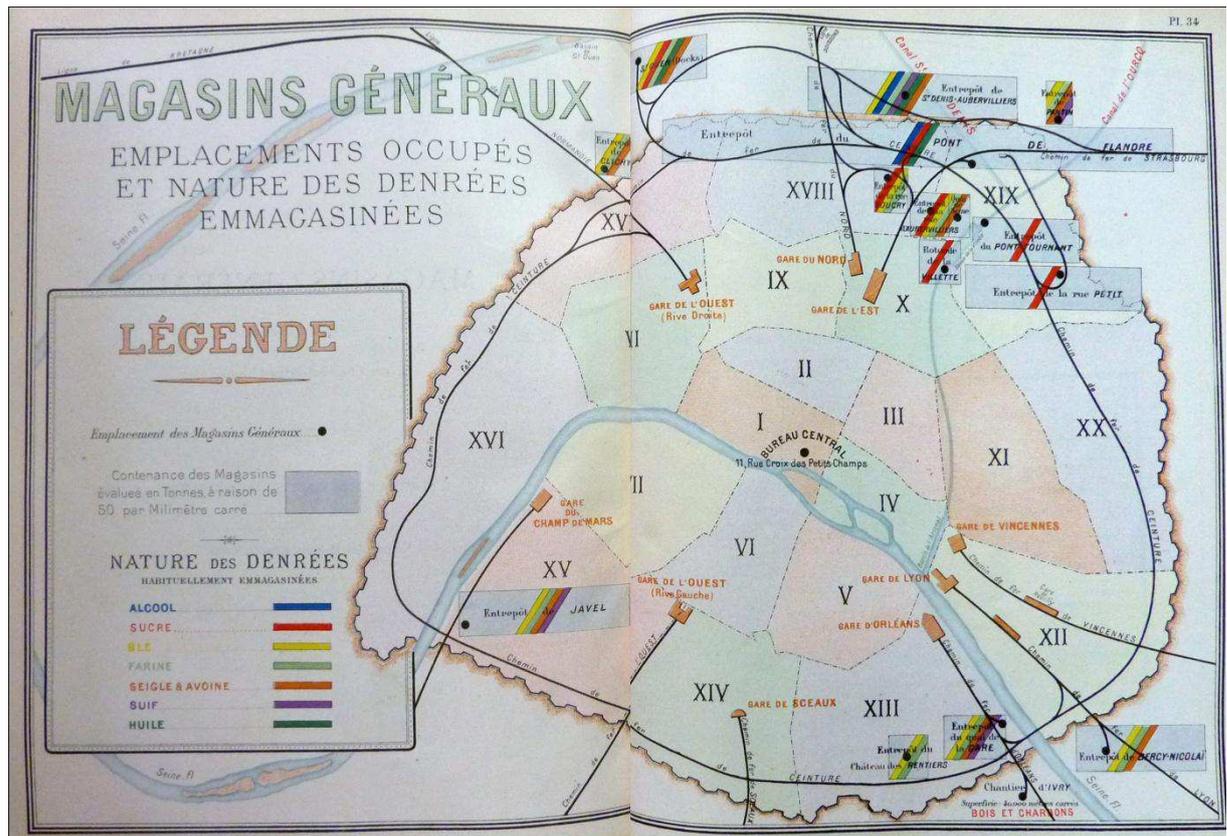


Figure 3.6. Les magasins généraux existant en 1893. Source : Préfecture du département de la Seine, 1894.

3.2.2. Données complémentaires

Outre les données issues de l'octroi, nous nous intéressons à des données complémentaires pour estimer la consommation de l'extérieur de Paris. Pour le bois, outre les données de l'octroi, des données sur l'arrivage sont disponibles. Le transport de combustibles notamment par la voie d'eau fait l'objet de contrôles de l'inspection de la navigation sous l'ordre du préfet de Police (Backouche, 2000) dont des enregistrements sont consignés dans les archives de la préfecture de Police. Entre 1803 et 1818, on dispose ainsi d'une série continue de données sur l'arrivage qui est renseigné pour tous les types de combustibles (bois, charbon de bois et charbon de terre) (Archives de la préfecture de Police, DA 43). Ensuite, pour l'année 1826, l'arrivage de bois est connu parmi la quantité d'arrivage de toutes les matières relevées par le *recueil de statistiques*

de la ville de Paris et du département de la Seine, publié en 1829 (Compte de Chabrol, 1829)¹. Cependant, pour l'année 1845, on ne dispose de données que sur l'arrivage de bois par voie d'eau². Parmi les données sur l'arrivage de bois entre 1803 et 1818, nous avons relevé l'arrivage de bois et de charbon de bois pour 1808 et 1810. On compare ces données avec celles de 1826 et de 1845.

Néanmoins, cette comparaison n'est pas simple, à cause de la part de transport routier non connue et qui demande par conséquent de procéder à certaines hypothèses. De plus, les sources citées sont peu comparables, puisque les données y sont exprimées soit en stère (cas de l'octroi de Paris), ou soit en nombre de bateaux et en tonne (données de l'arrivage de combustibles). De plus, pour estimer la consommation unitaire en kg/hab/an, il faut définir la zone de redistribution. On essaiera donc d'estimer la consommation par habitant par an de l'extérieur de Paris à partir de facteurs de conversion supposés qui seront présentés dans la sous-section suivante.

L'arrivage par la route n'est connu qu'en 1826 par le *recueil de statistiques de la ville de Paris et du département de la Seine*, publié en 1829. L'importation de bois à Paris se fait de façon quasi exclusive par voie d'eau pendant plusieurs siècles, à l'exception du charbon de bois. Cependant, au début du XIXe siècle, une pénurie de bois engendre la hausse de son coût qui engendre à son tour le recours au transport routier pour l'importation de bois dans Paris. Dans ce contexte, le transport routier de bois joue un rôle de variable d'ajustement, lorsque l'approvisionnement en bois est en difficulté. Ce moyen de transport représente 15% en volume du bois de feu entré dans Paris en 1826 (Compte de Chabrol, 1829). La part de transport routier, qui semble trop élevée, est compréhensible, compte tenu de la crise du bois qui dure depuis la fin du XVIIIe siècle jusqu'aux années 1830. Il est néanmoins difficile d'imaginer que le taux d'arrivage par la route ait pu dépasser ce chiffre car son prix par tonne kilomètre est très élevé par rapport au transport par voie d'eau (D'Avenel, 1919). Nous considérons que durant la première moitié du XIXe siècle, ce moyen de transport représente par conséquent une part marginale dans l'approvisionnement total en bois de la région parisienne. Cependant, après 1850, c'est l'arrivage par voie d'eau qui n'est plus représentatif dans l'approvisionnement total

¹ *Recherches statistiques sur la Ville de Paris et le département de la Seine* sont Instaurés en 1802 (Compte de Chabrol, 1829) et fournissent des données qui permettent de connaître la consommation et l'importation de combustibles et de produits à Paris.

² Fond MBCSH (Le Musée de la *batellerie* de Conflans-Sainte-Honorine). 1891. Fond Carivenc, boîte 143, Tableau des arrivages depuis 1845, par marchandises principales, p5., cité par : Backouche, 2000.

en bois, puisque le contexte du transport de marchandises évolue considérablement avec l'extension du chemin de fer (Badré, 1978, Jacqmin, 1868).

L'utilisation de ces données pose encore un problème du fait de la méconnaissance de la zone de redistribution du bois arrivé à Paris. En effet, l'arrivage correspond à l'importation, et lorsque la destination n'est pas connue, on ne peut pas affecter la quantité importée à une population hors Paris. Cependant, compte tenu du coût élevé du transport du bois durant la première moitié du XIXe siècle, la zone de redistribution n'est probablement pas étendue. De ce fait, on considère que le bois arrivé dans la région parisienne est majoritairement destiné à l'agglomération parisienne. Pour la part du transport routier dans le transport total, on suppose que le taux de 15% est une valeur maximale pour la première moitié du XIXe siècle et qu'il varie entre 5 (par défaut) et 14% (Compte de Chabrol, 1829). On affecte ensuite ces données à la population de l'agglomération définie par Dupeux et à celle de Paris 2006 calculée pour obtenir la consommation par habitant en kg/hab/an. Ensuite, on compare ces consommations hypothétiques à celles de la consommation de la ville de Paris pour vérifier si l'écart n'est pas trop important entre les trois valeurs : la consommation unitaire de la ville de Paris, celle de son agglomération et celle de Paris 2006 en kg/hab/an. La comparaison est effectuée pour trois dates : 1808, 1810, 1826 et 1845.

Dans le cas du charbon de terre, la consommation de ce produit à l'extérieur de Paris est connue à partir de 1838 par les données issues de la statistique de l'industrie minérale disponibles pour 1838 et 1845¹. Avant cette date, nous ne disposons pas de données exactes sur la consommation de charbon de terre en dehors de la ville de Paris. Ces données correspondent à la consommation de charbon de terre en quintal (100 kg) du département de la Seine et celle des deux autres départements périphériques de la Seine et de la Seine-et-Oise. Par ailleurs, la consommation départementale présentée dans la statistique de l'industrie minérale et de l'annuaire statistique de la France ne distingue pas la consommation finale et la consommation intermédiaire pour produire l'énergie secondaire. De ce fait, on considère que cette consommation correspond à la consommation directe énergétique, et inclut par conséquent le charbon de terre consommé pour la production de gaz et d'électricité.

¹ En particulier, le tome 15 constitue un résumé des travaux statistiques de l'Administration des Mines publié en 1847 (Ministère des Travaux publics, 1847) qui présente un bref historique de l'approvisionnement de la France en charbon de terre et des données sur la production et de la consommation de minerais et de charbon de terre par département

Pour la deuxième moitié du XIXe siècle, nous avons relevé des données de l'Annuaire statistique de la France sur la consommation de charbon de terre des trois départements de la région Île-de-France, Seine, Seine-et-Marne et Seine-et-Oise, pour certaines années entre 1878 et 1911 (voir le chapitre 5). Pour cette période, l'Annuaire statistique de la France fournit des données sur la production et la consommation de combustibles par département. Néanmoins, dans les éditions postérieures à 1911, la consommation de combustibles n'est connue que pour la France¹. Ces données sur la consommation de charbon de terre sont précieuses pour estimer la consommation unitaire pour l'agglomération parisienne (du département de la Seine à cette période) et pour mettre en perspective la consommation selon les différents territoires de l'agglomération parisienne (Paris, Seine et les départements périphériques).

Mesures et unités, 1801-1943

Le changement d'unité dans le compte de l'énergie est intéressant car il montre l'amélioration générale de la technique de mesure des combustibles que l'on exprime désormais en quantités de chaleur et de force. De plus, c'est un indicateur fort qui témoigne de la préoccupation croissante de la ville envers une source énergétique spécifique en lui accordant une valeur socio-économique. Les unités de compte pour le charbon de terre sont très diverses selon les sources de données (octroi de Paris, entreprises minières, compagnie du gaz). Durant le XIXe siècle, on s'intéresse de plus en plus à établir un rapport mathématique entre le pouvoir calorifique des combustibles et la force motrice produite par les machines (voir Coriolis, 1844 [1^{ère} éd. en 1829], Carnot, 1824). Néanmoins, cette amélioration de la connaissance énergétique reste cantonnée à l'échelle microéconomique. Dans le cadre de l'octroi, jusqu'en 1943, on mesure toujours les quantités de combustibles en volume ou en masse. Certaines unités volumiques connaissent une évolution, en particulier le bois de cotrets et de fagots qui change d'unité de mesure entre 1831 et 1832, passant de 100 fagots au stère. En 1854, l'octroi de Paris connaît un changement d'unité particulier, lorsqu'il adopte le système métrique. Le charbon de terre change d'unité de mesure du volume (voie de 2 hectolitres) au quintal métrique au cours de l'année 1854. Le bois et le charbon de bois changent d'unités de compte, bien que toujours exprimées en volume. Ce changement nécessite de connaître la masse volumique de certains produits auparavant exprimés en volume (ou en unités comme les fagots) pour les convertir en masse.

¹ C'est notamment le cas du département de la Seine, on discutera de la production et de la consommation d'énergie secondaire dans le chapitre suivant.

On exprime ici la consommation parisienne de bois en tonne et en kilogramme afin de la rendre comparable avec celle des autres matières. Pour ce faire, le facteur de conversion entre la masse volumique et l'humidité hypothétique doit être défini selon les essences. Selon le manuel de l'octroi, on distingue dans le bois de feu deux grandes familles selon les essences : le bois dur et le bois blanc, appelé aussi bois tendre (Bonnet, 1874). La distinction entre le bois de menuise et le cotret dans l'octroi se fait selon la circonférence des bûches et non selon les essences, puisque leur mélange était en pratique fréquent. Pour le bois de feu, de manière générale, on compte entre 20 et 25 % d'humidité (Pecllet, 1844). Le calcul conventionnel issu de la littérature récente propose trois familles d'essences pour évaluer la masse volumique et le pouvoir calorifique (Annexe 1). Lorsque la matière sèche (masse volumique à taux d'humidité de 0 %) est connue pour chaque famille d'essence (650 kg/m³ pour le bois dur, 550 kg/ m³ pour le bois moyen et 450 kg/ m³ pour le bois tendre), la masse volumique augmente selon le taux d'humidité en pourcentage ainsi que l'établit la relation arithmétique suivante :

$$\text{Masse volumique en kg / m}^3 \text{ en } E\% \text{ d'humidité } (Mv(E \%)) = Mv(0 \%) \times (1 + E / (100 - E))$$

(Mv(0 %) : Masse volumique de bois à 0% d'humidité) (Annexe 1).

Néanmoins, les données sur la masse volumique issues de l'Observatoire de l'énergie de la DGEMP s'organisent en trois familles d'essences (bois dur, bois tendre, bois moyen), alors que nous n'avons que deux familles d'essences dans les données de l'octroi : le bois dur de l'octroi correspond au bois dur de cette première source, tandis que le bois blanc ou tendre de l'octroi correspond à plusieurs essences et regroupe le bois dur et le bois moyen définis par l'Observatoire de l'énergie-DGEMP (Voir l'annexe 1).

Pour la masse volumique en matière sèche, on adopte par conséquent des valeurs de 650 kg/ m³ pour le bois dur, et de 500 kg/ m³ pour le bois tendre, valeur moyenne entre celle du bois moyen et celle du bois tendre définie par l'Observatoire de l'énergie-DGEMP, bien que le bois tendre de l'octroi comprenne plusieurs essences et que l'on ne dispose pas de moyen de connaître les essences exactes de bois de feu consommées à Paris, ainsi que leurs proportions¹. De plus, pour la consommation de Paris issue de l'octroi, on applique un taux d'humidité de 20%, faute de

¹ Néanmoins, selon l'ADEME (2001), la masse volumique en matière sèche de bois de feu consommé en France ne varie pas considérablement.

connaissance précise sur l'humidité du bois consommé. En effet, nous ne sommes pas en mesure d'évaluer la variation annuelle de cette valeur sur deux siècles.

Pour les cotrets et les fagots, on adopte la même valeur que pour le bois de feu à faible densité (350 kg/m^3), valeur moyenne entre 250 et 450 kg/m^3 , puisque la diminution de la circonférence du bois engendre plus de vides dans un volume donné, et donc la diminution de la masse volumique et celle du pouvoir calorifique (Briane, Doat, 1985).

Tableau 3.1.2. Masse volumique et pouvoir calorifique selon les essences et selon l'humidité

| Teneur en eau | A 0 % | | | A 20% | |
|----------------------|--------------------------------------|-------|------|--------------------------------------|-------|
| | Masse volumique en kg/stère | GJ/st | GJ/t | Masse volumique en kg/stère | GJ/st |
| Bois dur | 650 | 11,7 | 18,1 | 810 | 11,7 |
| Bois moyen et tendre | 500 | 9,0 | 18,1 | 625 | 9,0 |
| Autres bois | 350 | 6,3 | 18,1 | 438 | 6,3 |

Source : Observatoire de l'Energie-DGEMP, en ligne, [2009] <http://www.developpement-durable.gouv.fr/energie/statisti/tbb/note-methodologique.htm> ; ADEME. 2001. Mesure des caractéristiques des combustibles bois. Juillet.

Dans le cas du charbon de bois, l'octroi distingue le charbon de bois de sa poussière. Cette dernière désigne les morceaux qui n'atteignent pas les dimensions fixées par l'administration parisienne pour pouvoir être considérés comme du charbon (Bonnet, 1872, Bonnet, 1874). La poussière est faite de morceaux de charbon qui se sont brisés pendant le transport, et a une moins bonne qualité de combustion. Dans cette étude, on choisit de regrouper les deux produits comptés dans l'octroi et d'appliquer une masse volumique de 220 kg/m^3 (22 kg/hl). Cette masse volumique est donnée par Peclet lorsqu'il cherche à calculer l'économie d'énergie en calorie obtenue par unité de divers combustibles consommés à Paris au cours du XIXe siècle¹. Dans le cas du charbon de bois, la variation de la masse volumique selon l'humidité est moins importante que pour le bois (UN, 1987). Par contre, selon les essences, la densité se situe entre 170 et 260 kg/m^3 (Peclet, 1844). En considérant que les essences les plus utilisées pour produire du charbon de bois étaient le pin, de masse volumique $200\text{-}210 \text{ kg/m}^3$, et le chêne, soit $219\text{-}255$

¹ Briane et Doat (1985) donnent 200 kg/m^3 de masse volumique moyenne.

kg/m³, la valeur donnée par Pecllet semble raisonnable. En considérant la part de la consommation dans l'ensemble des catégories de produits, les erreurs pouvant provenir du calcul de la masse volumique du charbon de bois ne sont pas considérables.

Tableau 3.2. Facteurs de conversion utilisés pour l'octroi

| Chapitres et postes | Unité initiale | Nouvelle unité | Équivalence | Date du changement |
|--|----------------|----------------|---------------------------|--------------------|
| Chap. IV. Combustibles, Bois à brûler d'essence dure | Stère | Stère | 810 kg/st | - |
| Chap. IV. Combustibles, Bois à brûler d'essence tendre | Stère | Stère | 625 kg/st | - |
| Chap. IV. Combustibles, Cotterets de bois dur | Stère | Stère | 438 kg/st | - |
| Chap. IV. Combustibles, Menuise de bois dur ou de bois blanc et fagots, etc. | 100 fagots | Stère | 24 stère = 100 fagots (a) | 1832 |
| Chap. IV. Combustibles, Cotrets, menuise et fagots de toute espèce | Stère | Stère | 438 kg/st | - |
| Chap. IV. Combustibles, Charbon de terre et tourbe carbonisée | Voie de 2 hl | 100 kg | 1 voie de 2hl=160kg (b) | 1854 |
| Chap. IV. Combustibles, Charbon de bois, Chap. IV. Combustibles, Poussier de charbon de bois, etc. | Voie de 2 hl | Hl | 22 kg/hl | 1840 |

Source : (a) Le rapport entre stère et fagots est calculé par comparaison entre la donnée sur la consommation en kg en 1832 connue et celle en stère estimée à partir de l'extrapolation des données précédentes (en stères). (b) Selon De Saint-Julien, Gustave Bienaymé, 1887, 1 hl est égal à 80 kg (en hectolitre ras) selon le régime de l'octroi. 1 hectolitre comble est considéré comme pesant 100 – 125 kg (selon le type de charbon, Pecllet 1844) et 80 kg pour l'hectolitre ras selon Pecllet (1844) et Chevalier (non daté).

Par ailleurs, si la propriété physique du charbon de terre, ainsi que sa masse volumique, ne varient pas considérablement selon l'humidité, ses divers produits consommés (houille, lignite, coke) peuvent, eux, changer. De ce fait, la quantité de carbone ainsi que le pouvoir calorifique peuvent varier selon la composition des produits. On retient que le charbon de terre a une densité apparente (la masse volumique apparente y compris la porosité) d'environ 0,7 à 0,8. Sa

densité (hors porosité) se situe entre 1,1 et 1,5 et sa teneur en carbone entre 0,81 et 0,98 pour la matière minérale sèche¹. La quantité de charbon est exprimée en volume, souvent en hectolitre, ou bien en « voie » dans les sources du XIXe siècle. L'unité de « voie » est une unité différente pour le charbon de terre et pour le bois : lorsque la voie représente deux stères de bois, la voie de 15 hectolitres est utilisée pour le charbon dans les mines et dans le commerce de gros et est équivalente à 1000 - 1200 kg (Bélézé, 1882, Chevalier, non daté). Un hectolitre peut être ras ou comble. La masse volumique du charbon de terre est diverse selon les origines du charbon et varie entre 100 et 125 kilogrammes par hectolitre (masse volumique de 1 à 1,25) et sa densité expérimentée dans les laboratoires est d'environ 1,3 (Pecllet, 1844). Les unités utilisées par l'octroi sont la voie de 2 hectolitres jusqu'en 1853, et le quintal métrique (100 kg) après 1854. Différents documents datant du XIXe siècle montrent qu'un hectolitre de l'octroi pèse 80 kg (De Saint-Julien, Gustave Bienaymé, 1887). De Saint-Julien et Gustave Bienaymé (1887) indiquent ce facteur de conversion pour expliquer l'équivalence entre la masse en kg et le volume en hl adoptée lors du passage au quintal métrique pour le charbon de terre dans l'octroi en 1854. On retient donc 80 kilogrammes par hectolitre de charbon de terre compté par l'octroi pour la conversion en masse.

En outre, certaines données sur l'arrivage par voie d'eau issues de la préfecture de police sont exprimées en nombre de train de bois, en stère et en tonne. On essaie de les convertir en tonne. Selon une source qui date de la fin du XVIIIe siècle², un train se composait soit d'environ 40 cordes (40 cordes égalent à 2 voies et ¼ et 2 voies égalent à 2 stères), c'est-à-dire environ 180 stères. Pour l'estimation en masse, il nous manque également l'information sur les essences qui composent les trains. Jusqu'en 1845, la consommation de Paris occupe certainement une part essentielle de l'arrivage puisque sa population représente 95% de celle de son agglomération. On retient donc l'hypothèse que les essences qui composent les trains de bois sont celles du bois consommé à Paris. On applique les mêmes proportions de bois (bois tendre, bois dur et autre bois³) ainsi que les mêmes facteurs de conversion définis pour le bois de feu enregistré par l'octroi aux trains de bois (Backouche, 2000).

¹ Le contenu d'eau entre 7-18% selon AIE (2004), densité (sans porosité, non de carbone) de charbon, selon Encyclopædia Britannica [en ligne] [réf. du 7 mars 2012] Disponible sur la toile : <http://www.britannica.com/>

² Barles, communication orale

³ On excepte les cotrets et les fagots pour convertir le train de bois en tonne, puisque le train de bois n'est pas composé de cotrets et de fagots.

3.2.3. Consommation d'énergie secondaire

Une partie des données relatives à la consommation urbaine énergétique, en particulier l'énergie distribuée par les réseaux physiques (gaz et électricité), ne font pas l'objet du compte de l'octroi. Cependant, les données sur la consommation d'énergie secondaire de Paris sont relativement abondantes. L'histoire de l'installation des entreprises de transformation énergétique commence par la localisation des premières usines à gaz à Paris en 1819 et l'histoire de l'électricité commence dans les années 1890. La consommation de gaz et d'électricité est connue par les travaux d'historiens sur les entreprises énergétiques installées à Paris avant la nationalisation énergétique de 1946. Ces données sont éditées dans la série de l'INSEE et de « l'Annuaire statistique de l'économie française aux XIXe et XXe siècles » par la Presse de l'École Normale Supérieure (INSEE, 1966). Cette dernière série se compose de trois volumes¹, dont le volume 2 est dédié à la consommation énergétique de la France et est dirigé par Dominique Barjot et al. (1991).

Consommation de gaz de houille

L'ouvrage de Barjot et al. présente les données de consommation des matières premières et de la distribution d'énergie secondaire des industries gazières parisiennes issues d'études de Beznard pour les six compagnies existant entre 1819 et 1855 (Mustar, 1984). Le même type d'information existe dans l'étude de Williot sur la Compagnie Parisienne d'Éclairage et de Chauffage par le Gaz (CPECG) en activité entre 1856 et 1905. Ensuite, les données sur la distribution de gaz à Paris sont connues par les archives de la Société du Gaz de Paris (SGP)² présentée dans le même ouvrage. Les principales sources de données pour la consommation finale de gaz issues des entreprises de gaz citées couvrent la période 1821-1950, soit une série quasi continue (Williot, 1999).

Cependant, ces ouvrages s'inscrivant dans le champ de l'histoire des entreprises, les données présentées sont souvent établies à l'échelle des compagnies concernées. De ce fait, leur utilisation demande une précaution liée au périmètre de ces entreprises et à son évolution. Par exemple, « la consommation parisienne » peut être la consommation de la région parisienne ou de la ville de Paris, selon le territoire desservi par la compagnie étudiée. Donc, il convient de

¹ Voir pour les notes et la discussion sur cette série, in : Verley 1992

² Dossiers b4155 et 1611 des archives du Gaz de Paris conservées par GDF, aux Archives du Gaz de France ou Archives Condorcet. (Barjot et al., 1991)

vérifier ces données à l'aide des travaux des historiens, des rapports municipaux ou des publications des entreprises. Ainsi, la compatibilité relative au périmètre de ces données est à vérifier avec l'octroi pour obtenir la consommation énergétique finale de Paris, puisque les historiens témoignent de divers types de conventions qui existaient entre la Ville de Paris et les entreprises sous forme de régimes spéciaux (voir la section 3.2) (Bonnet, 1872, Bonnet, 1874, De Saint-Julien, Gustave Bienaymé, 1887, Claustre, 2000-2001, Cochin, 1883).

Entre 1819 et 1836, six compagnies de gaz de houille s'installent dans Paris (Mustar, 1984). La production de ces six compagnies de gaz est destinée à la Ville de Paris. La consommation de la banlieue était faible jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle. Les consommations de combustibles et de distribution de gaz sont disponibles à partir de 1821 et jusqu'en 1855, date à laquelle la concession est accordée à la Compagnie Parisienne, une des six compagnies de gaz de la région parisienne. La Compagnie Parisienne d'Eclairage et de Chauffage par le Gaz (CPECG) existe donc à partir de 1856. Les données sur la consommation de gaz à Paris qui sont présentées en mètre cube s'organisent à trois échelles: la consommation de la Ville de Paris, celle de la banlieue avant 1860 et celle de la banlieue après 1860. Après la fin de la concession de la CPECG, la Société du Gaz de Paris (SGP) devient concessionnaire. Les données sur la consommation sont présentées sans précision de périmètre. Celui-ci ne peut être vérifié qu'en croisant ces données avec les données sur la consommation issues de la CPECG jusqu'en 1905 et les données de Gaz de France entre 1947 et 1951.

De manière générale, lorsque la consommation d'un type d'énergie secondaire débute à Paris, les données sur cette énergie sont rares jusqu'à ce que cette consommation devienne importante¹. Ce problème se pose dans toutes les consommations d'énergie secondaire. De même, lorsque la consommation diminue, la statistique publique se désintéresse de la comptabilisation de cette énergie. Bien qu'on estime que la consommation est faible, notamment par rapport à la consommation totale, on n'est parfois pas en mesure d'évaluer le début et la fin de série de la consommation d'énergie secondaire. On dépend par conséquent de l'histoire de chaque énergie pour évaluer la date approximative du début et de la fin de la consommation et pour estimer la quantité par interpolation et régression. Le premier cas (interpolation) est utilisé notamment lorsqu'on ne trouve pas d'informations relatives à la consommation entre la date approximative du début de la consommation et celle du début de la

¹ Entre 5 et 7% de la consommation totale énergétique. On en parlera dans le chapitre 5, qui regroupe les résultats.

série statistique. Le deuxième cas (régression) est utilisé lorsqu'on trouve les informations entre les deux dates et lorsqu'on peut estimer certains points sur la courbe de la consommation.

La consommation finale de gaz à Paris commence au début du XIXe siècle et se poursuit jusqu'à aujourd'hui. Les données des entreprises et celles issues des statistiques officielles ont leurs propres unités de mesure. Les données entre 1838 et 1950 sont exprimées en volume (en m^3), qui doit être converti pour être compatible avec les données portant sur après 1951. L'unité en volume nécessite un facteur de conversion entre le volume et la masse et un autre facteur de conversion entre la masse et le pouvoir calorifique. La densité du gaz de houille est connue par deux sources principales. D'une part, une source ancienne qui date de 1860 présente la densité du gaz de houille comme égale à $0,4 \text{ kg/m}^3$. Les expérimentations présentées dans cet ouvrage datent du début du XIXe siècle (Clegg, 1860). D'autre part, la densité est obtenue à partir d'informations sur le rendement de la production du gaz en m^3 par tonne de houille distillée et de la proportion approximative de la production de gaz en masse. La première est relativement constante pour le gaz de la houille consommé à Paris avec 297 m^3 par tonne de houille distillée en moyenne entre 1863 et 1919 (Williot, 1999). Lorsque la part du gaz est d'environ 12% (ASVP 1880), la densité se situe à environ $0,52 \text{ kg/m}^3$. La densité indiquée par la première source a un écart de $-0,12$ (-23% par rapport à la deuxième), qui est probablement du fait d'une technologie qui n'est pas encore mature. La première source présente les expérimentations faites au début du XIXe siècle, la deuxième date de 1880, date à laquelle la technologie est mature en termes de rendement de production de gaz par cornue¹. Cette densité est comparable avec celle du gaz naturel de $0,785 \text{ kg/m}^3$. Ainsi, le gaz de houille connaît un pouvoir calorifique moins important que celui du gaz naturel. Nous avons choisi arbitrairement la densité de $0,52 \text{ kg/m}^3$ de gaz pour l'ensemble de la période de consommation du gaz de houille à Paris. On considère que l'imprécision n'est pas importante pour la période avant 1863, puisque la consommation de gaz n'était pas significative.

Le gaz issu de la distillation de la houille donne environ 48% de dihydrogène, 36% de méthane et une petite part de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone (CO : 8 % et CO₂ : 5 %). Le pouvoir calorifique du gaz manufacturé se situe entre 4,9 à 5,2 kWh/ m^3 , environ la moitié de celui du gaz naturel, équivalent à entre 17 640 et 18 720 kJ/ m^3 donc 4220 et 4478 kcal/ m^3 en PCS. Le coefficient officiel issu de l'ONU (UN, 1987, p. 35) donne un pouvoir calorifique

¹ A partir des années 1870, le rendement de la production de gaz par cornue atteint quasiment une valeur maximale, selon Williot (1999).

inférieur de 4200 kcal/m³ pour le gaz de ville et de cokerie, qui correspond à peu près à la même valeur en comptant 8% d'écart entre le pouvoir calorifique inférieur et le pouvoir calorifique supérieur. Néanmoins, le pouvoir calorifique indiqué au XIXe siècle est de 5200 Kcal/m³¹. Cependant aucune source ne se trouve sur l'évolution de la densité du gaz manufacturé dans la région Île-de-France. En revanche, on dispose du pouvoir calorifique du gaz à l'échelle nationale pour la première moitié du XXe siècle. Le pouvoir calorifique officiel en France connaît une variation importante entre 1924 et 1954 où il passe de 3500 kcal/m³ à 4900 kcal/m³. Cependant, si l'on excepte la période de la guerre entre 1939 et 1945, le pouvoir calorifique à cette période varie moins et se situe entre 4700 et 4900 kcal/m³. Nous supposons que la hausse de la valeur calorifique est due à la hausse de la densité du gaz ou bien au changement de la méthode de distillation. En conclusion, pour le gaz, on retient les capacités calorifiques obtenues par l'interpolation des valeurs de 5200 kcal/m³ pour 1820, la valeur moyenne du gaz national entre 1924 et 1953 (4800 kcal/m³) et la valeur de l'ONU pour 1980 (4500 kcal/m³).

Consommation d'électricité

La consommation d'électricité débute en 1889 à Paris. Pendant la décennie suivante, plusieurs compagnies se forment dans la capitale. Cependant, la consommation exacte dans Paris et dans la région Île-de-France n'est pas connue avant 1913. La seule information qui permet d'estimer la consommation parisienne est la puissance installée des industries électriques issue d'une étude sur la géographie industrielle de Paris et de la banlieue pour la fin du XIXe siècle (Daumas, Payen, 1976). Les données sur la consommation d'électricité à Paris de 1913 à 1945 sont présentées dans l'étude de Malégarie (1947) sur l'évolution des secteurs électriques dans la région parisienne durant la première moitié du XXe siècle, qui comprend des données sur la consommation issues de la Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité (CPDE)². La consommation d'électricité en dehors de Paris est issue de l'Annuaire statistique de la SGF (SGF 1910, 1923, 1928, 1938), qui permet de connaître la consommation d'électricité par département pour la région Île-de-France. Toutefois, cette consommation de la région Île-de-France en dehors de Paris concerne majoritairement l'autoproduction et l'autoconsommation

¹ Selon le calcul de Pecllet (1844) avec la densité de gaz selon les données de CPECG (ASVP, 1880) et de Clegg (1860) de 0,40.

² Malégarie (1947) s'intéresse à l'évolution des réseaux électriques et du contexte d'approvisionnement en électricité dans la région Île-de-France suite à l'extension des réseaux durant la première moitié du XXe siècle.

d'électricité par l'industrie, c'est-à-dire la production d'électricité par les industries pour leur consommation interne sur place sans connexion aux réseaux.

A la différence du cas du gaz de houille, l'utilisation de données issues de la CPDE ne pose aucun problème de périmètre, puisque l'installation d'usines électriques au début du XXe siècle est réalisée uniquement dans la petite couronne. En termes d'unité, étant exprimée en MWh, la consommation d'électricité à Paris est facile à convertir en GJ (1 MWh = 3,6 GJ).

Consommation de vapeur

L'histoire du chauffage urbain commence avec la création de la Compagnie Parisienne du Chauffage Urbain en 1927¹. Néanmoins, la consommation parisienne de cette énergie n'est pas importante avant 1951. Nous parlerons de cette énergie secondaire dans la section suivante.

3.3. Consommation énergétique parisienne, 1951-2006

La situation énergétique de la région Île-de-France – le terme « énergétique » est plus approprié pour cette période – a profondément changé depuis le début du XIXe siècle en parallèle avec la croissance de la consommation d'énergie secondaire et avec l'apparition d'une nouvelle source énergétique. L'électricité change le mode de vie des citoyens dans la région (en termes d'équipements ménagers et de confort) et fait émerger la notion d'énergie primaire et d'énergie secondaire. Le pétrole a quant à lui un impact sur les processus d'urbanisation de la région durant l'entre deux guerres par l'allongement des déplacements domicile-travail (Payen, 1977). Après 1945, ces phénomènes se diffusent à l'ensemble de la région.

3.3.1. Données entre 1951 et 1970

Entre 1943, date de suppression de l'octroi de Paris, et 1949, la consommation énergétique de Paris est connue seulement pour le gaz et pour l'électricité. Les données sur la consommation de gaz dans la région Île-de-France sont issues des archives de Gaz de France et celles sur la

¹ Lors de l'attribution de la concession à la Compagnie Parisienne du Chauffage Urbain créée par l'émanation du groupe Empain-Schneider., selon la CPCU, [en ligne] [réf. du 24 mars 2012] : www.cpcu.fr

consommation d'électricité de l'annuaire statistique de la France de 1966¹. Cependant, la consommation de combustibles n'est pas connue avant 1951, très probablement en raison de la réorganisation du service statistique et de la création de l'INSEE². De plus, les données sur la consommation de pétrole n'ont pas été fournies systématiquement avant la création du Comité professionnel du pétrole (CPDP), association professionnelle groupant les sociétés françaises productrices et distributrices de produits pétroliers³.

Dans le contexte d'extension de l'agglomération parisienne très rapide entre 1951 et 1970, les observateurs se désintéressent de la consommation de la ville de Paris entre 1951 et 1965. Pour le gaz, la production est faite quasi entièrement dans le département de la Seine qui représente 98,65% de la production de la région parisienne, parmi lesquels 100% sont produits en banlieue en 1960⁴. Quant à la consommation de produits pétroliers, c'est également le département de la Seine qui représente la plus grande part de la consommation totale de la région parisienne (INSEE, 1959).

Les sources de données principales pour la période comprise entre 1951 et 1968 sont la série trimestrielle des *Bulletins régionaux de statistique* de la direction régionale de Paris de l'INSEE ; la consommation de gaz, d'électricité, de charbon de terre et de produits pétroliers est recueillie dans la section *Industrie* ; la consommation énergétique industrielle est présentée en sept secteurs par département⁵. La consommation de combustibles (pétrole, charbon de terre et gaz) est connue seulement à l'échelle départementale, à l'exception de l'électricité pour laquelle on s'intéresse à la consommation de la ville de Paris. Ces documents statistiques rassemblent des données issues de fournisseurs énergétiques nationaux (GDF, EDF, Charbonnage de France) créés en 1946 et du Comité professionnel du pétrole.

Les bulletins de la période 1951-1959 collectent des données sur la consommation à l'échelle de *la région parisienne* composée par les trois départements de la Seine, de la Seine-et-Oise et de la Seine-et-Marne. Entre 1959 et 1961, l'INSEE inclut le département de l'Oise pour le recueil

¹ Version rétrospective depuis le début du XIXe siècle jusqu'à la date de la publication.

² La publication avant la date est faite par la Statistique générale de la France (SGF) créée en 1840 (La bibliothèque de l'Insee, 1969)

³ CPDP, *Généralités du CPDP*, [en ligne] [réf. du 24 mars 2012], Format PDF : http://www.cdpd.org/sites/www.cdpd.org/files/generalites_cdpd/cdpd_1962.pdf. ; La consommation de pétrole de la France est connue par une étude de Peyret et de Courau (1935)

⁴ Dans Paris, il n'existe plus d'usines à gaz (voir le chapitre suivant).

⁵ En 1951, la première enquête sur la consommation énergétique industrielle a eu lieu, selon l'INSEE, [en ligne] [réf. du 5 mars 2012] Disponible sur la toile : www.insee.fr.

de données sur la consommation parisienne suite à un décret qui définit une entité administrative, appelée le District de Paris pour l'agglomération parisienne (INSEE, 1959). Le bulletin pour 1966-1970 change encore le périmètre de recueil de la statistique énergétique selon la réorganisation départementale et la création de la région Île-de-France en 1967¹. La ville de Paris obtient à partir de cette première date le statut de département et des données sur sa consommation énergétique sont de nouveau consignées.

Parmi la publication de la direction régionale de l'INSEE, le bulletin de 1960 s'intéresse particulièrement à l'évolution de la croissance des produits pétroliers entre 1951 et 1958. Un autre document statistique de synthèse est publié en 1965 au titre de *l'Annuaire statistique abrégé de la région parisienne* et rassemble des données sur la consommation et la production de combustibles, ainsi que de gaz et d'électricité entre 1946 et 1964. Nous avons relevé les données relatives à la consommation de combustibles de la région Île-de-France, connue par département, mais nous avons excepté des données sur la consommation énergétique du département de l'Oise, qui ne concerne pas notre périmètre d'étude tel que défini dans la section 3.1.

Comme nous l'avons signalé, la distinction entre la consommation énergétique finale et la consommation énergétique directe n'existait pas dans le recensement de combustibles par l'octroi de Paris. Il en va de même dans la documentation statistique entre 1951 et 1959. C'est à partir de 1959 que l'on distingue la consommation énergétique finale de la consommation d'EDF et de GDF. Par conséquent, à partir de 1959, la quantité de combustibles de charbon de terre et de produits pétroliers livrée aux consommateurs finaux est mise à part dans les documents statistiques. Nous allons donc présenter des données sur la consommation énergétique incluant la consommation intermédiaire entre 1951 et 1959 et des données sur la consommation énergétique hors consommation d'EDF et de GDF entre 1959 et 1970.

3.3.2. Données entre 1970 et 2006

On distingue les sources de données sur la consommation énergétique entre avant et après 1970. Au cours des années 1970, il semble que la statistique énergétique se systématise avant de se

¹ La réorganisation de la région parisienne entraîne une modification de l'administration territoriale sur le département de la Seine et le département de l'Oise et est prévue par la loi du 10 juillet 1964 entrée en vigueur au 1er janvier 1968. Les statistiques pour les nouveaux départements sont disponibles déjà à partir de 1966 (INSEE, 1966-1970).

stabiliser ; la notion de flux est plus ancrée dans la statistique qui distingue désormais clairement la consommation énergétique primaire de la consommation énergétique finale. Après 1970, les sources de données principales sur la consommation de combustibles et d'électricité sont au nombre de deux : 1) la publication de l'Observatoire de l'énergie qui donne la consommation à l'échelle régionale, et 2) la publication de la direction régionale Île-de-France de l'INSEE.

Parmi les documents statistiques, le *Tableau économique de l'Île-de-France* publié en 1978, année du début du deuxième choc pétrolier, récapitule la consommation énergétique de la région Île-de-France entre 1950 et 1976 et la consommation énergétique par département entre 1970 et 1976. Il présente également les premiers travaux statistiques du Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie (CEREN) (INSEE, 1978). Le CEREN est un organisme de regroupement d'intérêt économique rassemblant entre autres des fournisseurs et distributeurs d'électricité et de gaz¹. L'étude du CEREN présente pour la première fois la fraction sectorielle de la consommation finale énergétique, exprimée en kilotonne d'équivalent pétrole, pour la région et par département, et selon cinq secteurs : industrie, bâtiment & travaux publics, agriculture, transports, et résidentiel & petite industrie. Elle distingue la consommation finale énergétique de la *consommation apparente énergétique*, qui signifie la consommation directe énergétique (voir le chapitre 2). Ainsi, le CEREN réalise une enquête sur la consommation énergétique finale pour la première fois en 1983, portant sur l'année 1982 et selon les secteurs cités. De plus, la création de l'Observatoire de l'énergie en 1982 (Observatoire de l'énergie, 1985) au sein de la Direction générale de l'énergie et des matières premières (DGEMP) attachée au ministère de l'Industrie entraîne une révision de la méthode statistique énergétique. Une publication de la statistique énergétique régionale réalisée en 1984 apporte par ailleurs une vision d'ensemble des flux : approvisionnement en énergie, consommation énergétique et production d'énergie secondaire². C'est notamment à partir de cette date, qu'un dispositif d'automatisation dans le traitement des données énergétiques est mis en place. Il concerne l'unité et les équivalences, mais également la collecte, le traitement et la communication de la statistique énergétique. À partir de cette date, la publication et la révision des coefficients d'équivalence deviennent officielles et régulières³. Au fur et à mesure, la base de données

¹ EDF, GDF lors de la création, ainsi que RTE, rGDF aujourd'hui.

² Qui succède à la mission confiée auparavant au Commissariat du Plan, selon Observatoire de l'énergie (1984).

³ La révision a eu lieu deux fois depuis la création de l'Observatoire de l'énergie, en 1983 et en 2002.

statistiques énergétiques de la France, PEGASE, est constituée. Cette base présente les données sur l'énergie à l'échelle nationale et régionale.

Par ailleurs, l'apparition de la notion de consommation finale conduit à des écarts dans les consommations évaluées par différents documents statistiques au cours de la période de transition de la méthode de la statistique énergétique, entre 1970 et le début des années 1980. C'est la raison pour laquelle dans certaines publications peut régner une certaine confusion entre la livraison et la consommation finale, lorsqu'elles ne sont pas présentées de façon suffisamment explicites.

3.3.3. Unités et mesures

La consommation dans les publications datant d'avant 1970 est exprimée en unité physique en masse ou en volume, c'est-à-dire en tonne pour le charbon de terre et en tonne et en m³ pour le pétrole selon différents produits (en m³ pour les carburants automobiles et en tonne pour les fiouls). L'énergie secondaire est exprimée en unité physique énergétique en MWh pour l'électricité et en *mégathermie* (1 thermie est égale à 1 millions de calories) pour la consommation de gaz. Après 1970, les publications évaluent la consommation énergétique finale totale et la consommation énergétique par combustible en tonne d'équivalent pétrole (tep) par département. L'utilisation de données exprimées en tep demande d'identifier le facteur d'équivalence entre l'unité physique et la tonne d'équivalent pétrole pour chaque type d'énergie.

Les facteurs de conversion (densité de matière, densité énergétique) présentés dans le tableau suivant 3.3 sont utilisés pour obtenir la consommation de combustibles et sont tirés de la DGEMP-Observatoire de l'énergie (1984, 1985).

Tableau 3.3. Densité et densité énergétique des combustibles

| Nom | Type | Etat | Densité moyenne (kg/l) | MJ PCI/kg moy. (GJ PCI/t) | MJ PCS /kg moy. (GJ PCI/t) | Coefficient PCS/PCI |
|---|-----------------------|--------|------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|
| Gaz naturel | combustible gazeux | à 15°C | 0,000753 | 47,97 | 52,77 | 1,10 |
| Charbon | combustible solide | - | 0,750000 | 28,00 | 29,40 | 1,05 |
| Pétrole brut, gazole/fioul domestique, produits à usages non énergétiques | combustibles liquides | - | 0,853000 | 42,00 | 44,10 | 1,05 |
| Essence motrice et carburacteur | combustible liquide | - | 0,366000 | 44,00 | 47,08 | 1,07 |
| Fioul domestique | combustible liquide | - | 0,840000 | 42,00 | 42,80 | 1,07 |
| Fioul lourd | combustible liquide | - | 0,786000 | 40,00 | 42,80 | 1,07 |
| GPL | combustible liquide | - | 0,585000 | 46,00 | 49,68 | 1,08 |

Source : UN, 1987, Observatoire de l'énergie-DGEMP [en ligne][réf. du 6 mai 2009].

3.3.4. Consommation parisienne de chauffage urbain jusqu'en 2006

Comme évoqué brièvement plus haut, tant que la consommation de cette énergie n'a pas été importante, la statistique publique ne s'y est pas intéressée, ce qui est le cas de la consommation de vapeur représentant une faible part à l'échelle nationale. Jusqu'en 2006, la consommation de vapeur n'a pas été traitée dans la statistique énergétique comme une consommation d'énergie secondaire spécifique, ce qui signifie que la consommation de combustibles pour produire cette énergie est comptabilisée en tant que consommation énergétique finale et non en prenant en compte le pouvoir calorifique de la vapeur distribuée. Par conséquent, lorsqu'il existe une perte énergétique importante dans ce secteur, ce mode de comptabilité entraîne une surestimation de la consommation énergétique finale.

Paris est une des rares villes qui s'approvisionne autant en vapeur dans la consommation énergétique finale totale. Cette consommation devient plus importante après 1970 (Kim, Barles, 2012). La consommation de vapeur dans Paris est par conséquent relativement bien connue. Les

données sont disponibles à partir de 1930 grâce à une étude sur l'histoire du chauffage urbain en France, dont la Compagnie parisienne de chauffage urbain (CPCU) constitue le sujet principal (Raoult, 2007). De plus, les données techniques sur la consommation de combustibles, les chaufferies et les réseaux ont été publiées en 1955 par la CPCU (1955), ce qui permet de connaître l'évolution de la consommation parisienne entre 1930 et 1954. Raoult (2007) présente les données sur la consommation pour 1958, entre 1968 et 1980, et entre 1997 et 2002. Une revue publiée par la compagnie (Degré CPCU) est une source complémentaire pour connaître la situation de la consommation de combustibles et de la distribution de chaleur. La CPCU est le concessionnaire unique pour la distribution à Paris. Néanmoins, il existe des mini réseaux de chaleur et de froid dans la région, même si leur production est marginale par rapport à la distribution de la CPCU. Ces données sont disponibles à partir de 2002 par le réseau ViaSéva, association de gestionnaires de réseaux de chaleur.

La production de vapeur issue de la CPCU est la plupart de temps destinée à la ville de Paris. Au cours des années 1990, les réseaux de la CPCU s'étendent dans la petite couronne. En 2000, ils alimentent dix communes voisines de Paris (APUR, 2006). Toutefois, Paris reste le consommateur principal de la chaleur issue du chauffage urbain. La consommation parisienne représente en effet 90 % du total de la chaleur distribuée de la CPCU¹.

Les données sur la consommation de vapeur à Paris sont exprimées en kilotonne de vapeur produite en net ou en quantité distribuée dans la même unité. Il est important de noter que les pertes principales dans le procédé de fabrication se font dans les chaufferies et les canalisations. Par conséquent, la production nette signifie la quantité sortie de chaufferie et disponible pour la vente (au contraire de la production brute qui comprend la perte dans les chaufferies). Elle comprend par conséquent la quantité éventuelle de perte dans les réseaux. Quant au pouvoir calorifique de la vapeur, en 1954, la quantité livrée au réseau était de 770 000 tonnes, soit 466 000 millions de kilocalories, ce qui représente 2,5 GJ/tonne, ou 0,70 MWh PCI/tonne de vapeur consommée (tableau 3.4). Cependant, les rapports annuels plus récents de la CPCU, ceux de 2002 et de 2005 en particulier, donnent une valeur plus élevée de 2,7 GJ par tonne de vapeur. L'écart de 0,2 GJ entre le pouvoir calorifique issu d'une source de données ancienne et cette source actuelle est probablement issu d'une amélioration technique². Nous avons affecté le

¹ Cour des comptes. 2009. Le service public de chauffage urbain de la ville de Paris. Février. p. 315-346.

² Notamment, amélioration du réseau, voir chapitre 4.

pouvoir calorifique de 2,5 GJ/tonne aux données antérieures à 1954 et celui de 2,7 GJ/tonne aux données postérieures.

Tableau 3.4. Pouvoir calorifique de la tonne de vapeur produite par la CPCU

| | GJ/tonne | MWh PCS/tonne |
|--------------------|----------|------------------|
| CPCU 1954 | 2,5 | 0,70 |
| CPCU 2002- 2006 | 2,7 | 0,76 |

Source : CPCU, 2002, 2005, 2006.

3.4. Consommation parisienne de biomasse agricole, 1801- 2006

3.4.1. Consommation de biomasse alimentaire entre 1801 et 1943

Pour la collecte et la compilation de données sur la consommation alimentaire, on constate d'abord la difficulté liée au périmètre des données. Les données sur la consommation alimentaire dont on dispose entre le début du XIXe siècle et le milieu du XXe siècle sont à l'échelle de la ville de Paris, alors que les données récentes (après 1969) sont à l'échelle de la région Île-de-France. Ceci pose un problème notamment pour estimer la consommation alimentaire de la banlieue hors Paris. Compte tenu de la rareté des données, nous allons comparer la consommation de la biomasse alimentaire et de fourrages à la consommation de l'énergie technique uniquement à l'échelle de la ville de Paris.

Outre le problème lié au périmètre, la discontinuité et l'hétérogénéité de données s'avèrent fortes. En effet, en termes de continuité, la plus grande rupture a lieu au milieu du XXe siècle et on ne dispose pas de données sur la consommation alimentaire entre le début du XXe siècle et 1968. De plus, les données anciennes ne se caractérisent pas de façon identique aux données récentes en termes techniques. Les données anciennes correspondent à la disponibilité alimentaire, qui est basée sur le bilan d'entrée et de sortie de matière d'un territoire. De ce fait, la disponibilité alimentaire peut inclure la perte éventuelle de matières lors du transport et du stockage au sein du périmètre d'étude avant qu'un produit ne soit distribué à des consommateurs finaux. Par conséquent, la disponibilité alimentaire est toujours plus élevée que la consommation mesurée chez les consommateurs finaux (chez les ménages) par le moyen

d'enquêtes. Cette dernière méthode est utilisée pour estimer la consommation alimentaire de ménages par l'INSEE entre 1969 et 1991 (voir la sous-section suivante).

L'inventaire de la consommation alimentaire parisienne pour la période entre 1801 et 1914 est tiré d'une étude historique portant sur les flux d'azote alimentaire de Paris dans le cadre du programme de recherche PIREN-Seine, notamment pour la consommation de céréales, de la viande et de produits laitiers, dont les deux premiers produits sont des principales denrées alimentaires du XIXe siècle (Chatzimpiros, 2011, Barles, 2012)¹. Cette source nous donne directement des données et des références bibliographiques pour la consommation parisienne alimentaire du XIXe siècle jusqu'au début du XXe siècle². Les principales données mobilisées par cette étude sont issues de l'octroi, notamment pour la consommation de viande, de poisson et de fruits de mer, de produits laitiers (fromage, beurre) et d'huile. Elle recourt à la littérature ancienne pour certaines denrées alimentaires principales non taxées par l'octroi telles que les céréales, les pommes de terre (racine et tubercule), les fruits, les légumes et le lait et pour certaines autres pour lesquelles les données de l'octroi sont très lacunaires, telles que le sucre.

La consommation de produits céréaliers dans Paris est connue entre 1810 et 1904 par Barles (2012). Des données sur la consommation de pain et de farine sont issues principalement de l'octroi de Paris, ainsi que des archives de la préfecture de police et de sources anciennes qui comptabilisent l'importation de la farine destinée à la consommation et à la vente de pain de boulangeries parisiennes. Nous avons cependant omis la consommation d'autres produits céréaliers tels que les pâtes alimentaires, le vermicelle, le riz, la pâtisserie et la biscotterie, leur consommation étant faible par rapport au pain et à la farine pour cette période³. La consommation pour les autres catégories de produits est connue seulement pour l'année de 1820, 1854, et de 1896 (Barles, 2012). Au début du XXe siècle, Benoiston de Châteauneuf réalise une étude sur la consommation alimentaire parisienne pour l'année 1820. Par la suite, ce type d'approche est reproduit par Husson en 1856. Ce dernier estime la consommation alimentaire de

¹ Voir également, S. Barles, [s.d.], *Nourrir la ville : Consommation alimentaire et circulation de l'azote, Paris, 1801-1914*, [en ligne] [réf. du 11 mars 2012], Disponible sur la toile : http://www.sisyphes.upmc.fr/piren/webfm_send/246 ;

² Husson, 1856, *Les consommations de Paris*, Paris, Guillaumin et Cie., 492 p. ; L.-F. Benoiston de Châteauneuf, 1821, *Recherches sur les consommations en tout genre de la ville de Paris en 1817 comparées avec ce qu'elles étaient en 1789*, Paris, Martinet, 168 p.

³ Ils ne deviendront importants que durant le XXe siècle. A titre d'exemple, ces produits représentent 14% des produits céréaliers en 1969, selon l'enquête alimentaire de l'INSEE. (voir la sous-section suivante).

Paris à partir de l'importation de produits alimentaires (pomme de terre, riz, fruits et légumes) et de la production des industries agroalimentaires (vermicelle, sucre).

La consommation de la viande, le poste essentiel de la consommation parisienne après les céréales, est connue par l'octroi de Paris dont les données constituent une série quasi continue entre 1801 et 1943. Le fourrage est un autre poste essentiel du droit d'octroi divisé en quatre sous catégories : foin, orge, paille et avoine¹. Ces données sur la consommation de la viande et de fourrages de Paris sont connues en tonne par an et en kg par an et par habitant par la même étude (Barles, 2012).

En dehors des sources citées ci-dessus, à l'échelle nationale on dispose des données sur la consommation alimentaire issues des travaux de Toutain (1992), qui présente la disponibilité alimentaire moyenne nationale. Par ailleurs, les données sur la ration alimentaire renseignent la consommation alimentaire en gramme par jour par habitant, telles que celles issues de l'étude de Dauphin et Pézerat sur la ration journalière de Paris pour la période 1851-1873. Ces sources sont mobilisées pour estimer notamment certains produits pour lesquels les données sont très lacunaires, tels que le sucre et l'huile.

À l'exception de la consommation de viande et de céréales qui constituent une série quasi continue ou sont constitués en série, la consommation des autres produits alimentaires ne permet pas d'obtenir des séries continues dues à l'hétérogénéité des données, à leurs lacunes importantes ou encore au recensement incomplet de l'octroi. De ce fait, nous avons défini leur consommation, pour trois dates. On utilise l'étude de Benoiston de Châteauneuf pour le début du XIXe siècle et celle de Husson pour le milieu du XIXe siècle. Pour la fin du XIXe siècle, on recourt principalement aux rapports annuels sur les services municipaux de l'approvisionnement de Paris établis par la préfecture de la Seine (Préfecture du département de la Seine. 1894)². Ils nous renseignent sur les apports des principales denrées alimentaires dans les marchés parisiens qui étaient soumis au droit d'octroi et estiment ainsi la consommation à partir du droit d'abri pour les fruits et légumes. Nous avons relevé uniquement la consommation de 1892 et de 1896, sachant que la consommation sur cette période ne change guère. En revanche, la variation annuelle de la consommation par habitant observée est due à la condition climatique des lieux de provenance des produits. Seule la consommation de volaille (+9 %) et de poisson (+ 13 %)

¹ Pour le nombre de vaches, selon Barles (2007).

² Ce rapport publié entre 1892 et 1896 est consultable à la bibliothèque nationale de France. Le rapport sur l'année de 1892 récapitule des données à partir de 1887.

montre une légère tendance à la hausse, mais peu significative dans la consommation totale par habitant par an. Nous avons donc pris les données sur la consommation de 1896 pour la consommation parisienne pour la fin du XIXe siècle.

3.4.2. Données après 1969

Pour les données récentes, on recourt à des enquêtes de l'INSEE réalisées entre 1969 et 1991. L'enquête alimentaire de l'INSEE est réalisée notamment dans le but de connaître la consommation alimentaire selon les catégories socio-professionnelles et selon les zones géographiques (selon les différentes agglomérations urbaines françaises, zones urbaines et agricoles) (INSEE, 1996). Ces données sont disponibles pour la région parisienne à partir de 1969 et jusqu'en 1991 et sont exprimées à la fois en valeurs physique et monétaire. Elles permettent donc de connaître la consommation par habitant en masse (kg/hab/an). Cependant, selon l'INSEE, le résultat de l'enquête alimentaire est globalement une sous-estimation de la consommation alimentaire, puisque l'enquête se base sur les repas pris à domicile (voir la fin de la section). De plus, certains produits tels que le sucre et l'huile connaissent une sous-estimation, puisque ces produits peuvent être consommés sans que l'on connaisse leur quantité exacte¹. En revanche, les résultats permettent de comparer l'évolution du comportement alimentaire lorsqu'on possède une série annuelle longue.

L'INSEE détermine également la disponibilité alimentaire issue du bilan entre la production agricole annuelle nationale, les importations, les exportations et les variations interannuelles des stocks². En ce qui concerne les produits transformés tels que l'huile et le sucre, la disponibilité alimentaire inclut seulement les produits secondaires et non leurs produits primaires. La disponibilité alimentaire est définie de la manière suivante (FAO, 2001) :

$$\text{Disponibilité alimentaire humaine} = \text{Production}^3 + \text{importation} - \text{exportation} + \text{stocks} - (\text{alimentation animale} + \text{ensemencement} + \text{déchets} + \text{transformation})$$

¹ Etant mélangé dans divers produits fabriqués : pâtisserie, pâte, etc.

² AGRESTE, *Données en ligne* [en ligne] [réf. du 08 juin 2010] Disponible sur la toile : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/page-d-accueil/article/donnees-en-ligne>.

³ Signifie l'offre intérieure ou l'approvisionnement national (*domestic supply*). Elle inclut à la fois le produit primaire et le produit secondaire.

La disponibilité est par conséquent supérieure à la consommation finale, puisque cette première comprend les pertes diverses dans les chaînes de distribution et lors des stockages. De plus, la consommation alimentaire issue de l'enquête de l'INSEE présente beaucoup d'écarts par rapport aux données anciennes citées, puisque ces dernières correspondent peu ou prou à la disponibilité alimentaire à l'échelle de Paris. La consommation alimentaire de Paris au XIXe siècle se situe probablement entre la consommation finale et la disponibilité alimentaire dans la mesure où elle n'inclut pas la perte dans les industries agroalimentaires lorsque les produits sont fabriqués à l'extérieur de Paris, mais inclut la perte dans les marchés alimentaires à Paris. Par ailleurs, cette perte est probablement faible, compte tenu du fait que les produits non conformes sont revendus sur place par l'intermédiaire un marché amiable (Préfecture du département de la Seine, 1894).

Par ailleurs, la sous-estimation de l'enquête de l'INSEE est probablement plus importante pour les principaux produits énergétiques, tels que les céréales et la viande, compte tenu de l'importance des repas hors domicile et de l'alimentation nomade sous forme de sandwich, pizza, etc (CREDOC, 2000). Dans le cas des céréales et de la viande, l'écart entre la disponibilité et la consommation est considérable, puisque la part de produits plus élaborés est importante dans ces catégories de produits¹. L'écart entre la consommation issue de l'enquête alimentaire et la disponibilité alimentaire s'élève à 50% en quantité d'azote pour 1991 (Chatzimpiros, 2011).

Tableau 3.5. Rapport entre la disponibilité alimentaire et la consommation finale entre 1969 et 1991 en France

| | Rapport entre la disponibilité alimentaire et la consommation finale |
|------|--|
| 1969 | 1,23 |
| 1980 | 1,41 |
| 1985 | 1,87 |
| 1991 | 2,00 |

Source : INSEE, enquête alimentaire, voir le texte ; Barles S. 2008. 5.3. Le métabolisme urbain : L'azote, XIXe XXe siècle. (Rapport du PIREN-Seine) pour la comparaison entre la disponibilité alimentaire et la consommation finale totale en gN/hab/j en 1970, 1980, 1985 (données nationales en kg) ; Chatzimpiros, 2011.

¹ Notamment la catégorie d'aliments non classables tels que les plats cuisinés, les condiments, les vinaigres, les sauces préparées, les produits laitiers frais, les aliments diététiques et pour bébés..

En fin du compte, nous avons préféré utiliser les données locales issues de l'enquête de l'INSEE, puisque la sous-estimation de l'enquête auprès des ménages semble moins importante que la surestimation probable lorsqu'on utilise la disponibilité alimentaire de la France par rapport à la consommation finale alimentaire de la ville de Paris qu'on souhaite obtenir. De plus, ce choix semble pertinent, puisqu'on s'intéresse à distinguer la consommation finale, la consommation directe et la demande totale de matières et d'énergie. Nous allons donc seulement additionner les repas hors domicile qui ne sont pas inclus dans les données retenues.

Cependant, nous ne sommes pas en mesure de connaître la consommation des ménages pour les repas hors domicile, qui n'est connue qu'en termes de dépense monétaire des ménages. Selon l'INSEE, la part des dépenses hors domicile dans le budget alimentaire total passe de 11% à 20% entre 1969 et 1991. Cette part semble rester stable après 1991, puisque l'enquête récente sur le comportement alimentaire montre que « 75 % des adultes déjeunent à la maison et que 88 % y dînent. Au total, les repas hors domicile représentent 19 % des dépenses alimentaires » (CREDOC, 2000, cité par : Caillavet, Nichèle, 2002). Faute d'autres moyens, nous allons affecter cette part proportionnellement au résultat qu'on obtiendra ultérieurement. De fait, les résultats obtenus en termes de consommation finale totale et de demande totale énergétique de la biomasse alimentaire en GJ/hab/an (dans le chapitre 5) et en kg/hab/an (dans le chapitre 6) seront réévalués par le coefficient de correction défini comme le montre le tableau suivant.

Tableau 3.6. % du budget des ménages pour le repas hors domicile et coefficients d'ajustement de repas hors domicile utilisés pour la période entre 1971 et 1991

| | en % budget ménages | Coefficient de correction | source |
|------|---------------------------|---------------------------------|--------|
| 1969 | 11 % | 1,11 | a |
| 1971 | 13 % | 1,13 | b |
| 1981 | 16 % | 1,16 | b |
| 1983 | 18 % | 1,18 | b |
| 1991 | 20 % | 1,20 | a |
| 1995 | 19 % | 1,19 | c |

Source : a. INSEE, 1984, INSEE, 1994, c. CREDOC, 2000, cité par : Caillavet, Nichèle, 2002, b. Interpolation.

3.4.3. Détermination du pouvoir calorifique

Le concept d'énergie dans l'alimentation, qu'elle soit animale ou humaine, est développé depuis les années 1970 par la FAO et Merrill notamment du point de vue de la sécurité alimentaire et de la planification nutritionnelle, ainsi que par le Conseil national scientifique des Etats-Unis (*NRC : National Research Council*) (voir FAO, 2001, Merrill, Watt, 1973, FAO, 2006, NRC, 2000). Depuis 1980, l'étude bioénergétique au sens large du terme de la production biologique devient plus abondante. D'après ces travaux, l'énergie de la biomasse est évaluée de plusieurs manières. La quantité d'énergie brute (EB), est la quantité totale d'énergie contenue dans l'aliment, avant la perte par les fèces (l'énergie brute devient alors l'énergie digestible (ED)), puis par le gaz et l'urine, ce qui donne l'énergie métabolisable (EM). En revanche, si l'on évalue la quantité énergétique totale en termes de production biologique, l'énergie brute est plus adaptée. Ainsi, cette dernière est plus comparable avec l'énergie technique. L'EM et l'ED varient selon différents types d'animaux, notamment selon le type gastrique, puisqu'ils dépendent du taux d'énergie et de matières digestibles et excrétées (NRC, 1998) (voir le chapitre 2). De plus, le même type de biomasse végétale peut avoir différentes valeurs énergétiques selon son usage final : alimentation humaine ou animale et usage énergétique technique (carburant automobile, par exemple). A titre d'exemple, la consommation parisienne d'avoine utilisée pour le fourrage de chevaux peut être évaluée en pouvoir calorifique lors de la combustion à 19 GJ/t ms, en énergie métabolisable par les chevaux à 14,6 GJ/t, et en énergie motrice produite par les chevaux à 0,76 GJ¹.

Le calcul du pouvoir calorifique, appelé énergie brute (EB), de chaque type de matière correspond à l'énergie dégagée lors de sa combustion parfaite dans une bombe calorimétrique. Cette quantité est également définie théoriquement selon le contenu des nutriments, car elle dépend de la teneur en hydrocarbures (dont le pouvoir calorifique est 3,7 kcal/gr pour le glucose et 4,2 kcal/gr pour l'amidon), en matières grasses (9,4 kcal/gr) et en protéines (5,6 kcal/gr) (Chatzimpiros, 2011). L'énergie brute (EB) de la biomasse végétale ne varie pas de manière significative, allant de 16 à 19 GJ par tonne de matière sèche. Toutefois, elle varie fortement en termes de cal/g (ou GJ/t) de produit, compte tenu de la variation importante de la teneur en eau

¹ Selon Krasmann et Haberl (2002), 4% du rendement de la force motrice produite à la consommation de fourrages en EB. 5% en comparaison de la force motrice produite par un cheval ordinaire en France au début du XIXe siècle à la ration journalière couramment admise de 15 L d'avoine/jr (en comptant 8h de travail par jour et la masse volumique de 0,75 kg/L d'avoine) : production de la force motrice par le cheval, selon Coriolis (1844), ration journalière de chevaux selon Barles (2006).

des produits agricoles et alimentaires. Pour déterminer l'énergie brute de la biomasse végétale, il est donc important de définir la teneur en eau, ou de façon inverse le taux de matière sèche, de chaque produit comme le montre le tableau 3.7. Par ailleurs, l'énergie brute de la biomasse animale et de produits finis (tels que le sucre, l'huile) peut avoir une valeur plus élevée du fait de son contenu important en matière grasse et en protéine.

Les deux tableaux suivants montrent les valeurs choisies selon les grands groupes d'aliments que nous avons définis et seront utilisés comme base de calcul ; le tableau 3.7 définit le taux de matière sèche appliqué et le tableau 3.8 définit l'énergie brute. Dans le cas où le contenu calorifique du produit final est très différent de celui du produit brut, les deux valeurs sont indiquées (par exemple pour les oléagineux, on indique le contenu énergétique de l'huile). Dans le cas où pour certains produits tels que le cacao, le café, le coton et le tabac, l'énergie brute n'est pas trouvée dans les références citées ci-dessous, on affecte par défaut 18 GJ/t de matière sèche. Enfin, l'énergie brute de produits agricoles et alimentaires frais est définie selon le taux de matière sèche de ces produits.

Tableau 3.7. Taux de matière sèche pour les produits alimentaires

| CATEGORIE DE PRODUITS | Type de produits | Sous catégorie | Taux de matière sèche appliquée | Source |
|--------------------------|------------------|---|---------------------------------|--------|
| CEREALES | x | Plante entière | 0,85 | * |
| | 0 | Grain | 0,85 | a |
| | 1 | Farine | 0,85 | f |
| | 1 | Autres produits à base de céréales | 0,80 | f |
| | 2 | Bière | 0,92 | f |
| | 3 | Son | 0,89 | c |
| RACINES ET TUBERCULES | x | Plante entière | 0,20 | * |
| | 0 | Pomme de terre | 0,20 | d |
| CULTURE SACHARIFERE | 0 | Betterave sucrière | 0,30 | c |
| | 1 | Sucre | 1,00 | f |
| | 3 | Pulpe de betterave | 0,91 | c |
| PROTEAGINEUX | x | Plante entière | 0,86 | * |
| | 0 | Grain | 0,86 | a |
| OLÉAGINEUX | | Plante entière | 0,92 | * |
| | 0 | Grain oléagineux | 0,91 | a |
| | 1 | Huile | 1,00 | f |
| | 3 | Tourteaux et résidus de l'extraction des huiles végétales | 0,89 | c |
| FRUITS ET LÉGUMES | 0 | Légumes | 0,10 | d |
| | 0 | Fruits et noix | 0,15 | d |
| | 2 | Vin | 0,10 | f |
| VIANDES | - | Viande bovin | 0,43 | c |
| | - | Viande porcine | 0,43 | c |
| | - | Autres viandes | 0,43 | c |
| LAIT, LAITIERS ET OEUFS | 0 | Lait | 0,12 | c |
| | 1 | Beurre, fromage | 0,84 | d |
| | 0 | Œufs | 0,24 | d |
| POISSON ET FRUITS DE MER | 0 | Poisson et fruits de mer | 0,20 | b |

Source : (a) AGRESTE, en ligne, www.agreste.fr, (b) Boyd, 1982, (c) Chatzimpiros, 2011, (d) Nielsen, 2010, (e) Portail de la betterave sucrière, en ligne : www.labetterave.fr, (f) Plateforme web d'analyse nutritionnelle, en ligne : <http://www.composition-des-aliments.fr>.

(0 : considéré comme produit non soumis à la transformation, 1 : considéré comme produit soumis à la transformation, 2 : considéré comme produit soumis à la transformation et sorti vers d'autres secteurs (par exemple, malt pour la bière), 3 : résidus agroalimentaires et agricoles extraits lors de l'évaluation en produit primaire, *la valeur de produit agricole primaire est reprise.)

Tableau 3.8 Pouvoir calorifique de chaque groupe d'aliments en matière sèche

| | | cal/g | EB GJ/tonne de MS |
|--------------------------|-------------------|-------|-------------------|
| PRODUITS CEREALIERS | Blé, pâtisserie | 4 579 | 19 |
| | Riz | 4 390 | 18 |
| PROTEAGINEUX | Protéagineux : a | 4579 | 19 |
| OLEAGINEUX | Oléagineux | 3 716 | 16 |
| | Huile alimentaire | 9 470 | 38 |
| RACINE ET TUBERCULE | Pomme de terre | 4 500 | 19 |
| CULTURES SACCHARIFERES | Sucre | 3 960 | 17 |
| VIANDE | Bœuf | 6 507 | 27 |
| | Porc | 7 835 | 33 |
| | Volaille | 6 310 | 26 |
| LAITIER | Lait bovin | 5 653 | 23,7 |
| | Beurre, fromage | 8 832 | 37 |
| OEUFS | Œuf | 7 103 | 30 |
| POISSON ET FRUITS DE MER | Poisson | 6 317 | 26 |
| LEGUMES ET FRUITS | Légume frais | 4 195 | 18 |
| | Fruit frais | 4 389 | 18 |

Source : MERRILL, 1973, p6., p. 10 ; Smil, 1999, p 300, Nielsen, 2010, p. 88, Chatzimpiros, 2011, p 167. (Le pouvoir calorifique de l'huile varie entre 37,0 et 38,5 pour l'huile de colza, de tournesol et d'Arachide et pour le sucre, celui du sucre de canne.) (a : la valeur de blé est reprise).

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord discuté les périmètres d'analyse, qui sont déterminés par rapport aux données disponibles. Nous avons ensuite exploré les données historiques et techniques disponibles. De manière générale, le périmètre des données sur la consommation de

la ville ou d'une région correspond au périmètre administratif selon lequel une enquête est réalisée et des données collectées. Face à cette contrainte liée à la disponibilité de données, nous avons déterminé approximativement le périmètre de l'agglomération parisienne selon la croissance de la population. Nous avons ainsi considéré que le périmètre de l'agglomération s'étend et correspond à : la ville de Paris entre 1801-1861, le département de la Seine entre 1876 et 1964, et la région Île-de-France entre 1968 et 2006.

Ensuite, nous avons discuté des données disponibles pour connaître la consommation de l'agglomération parisienne. On constate que la naissance de la notion d'« énergie » et la montée de l'« énergie secondaire » jouent un rôle important dans l'évolution des données de la consommation énergétique. Ces données sont en effet très hétérogènes selon les sources mais aussi selon les périodes. Ainsi, les données sur la consommation de combustibles deviennent progressivement les données sur la consommation énergétique. La distinction entre la consommation finale et la consommation intermédiaire est faite progressivement durant les années 1950 et 1960. Enfin, la statistique énergétique et le bilan de l'énergie deviennent importants à partir des années 1970. Quant aux sources de données, trois sources principales existent: 1) les données issues du registre de l'administration municipale, octroi de Paris, 2) les données des entreprises énergétiques issues d'inventaires d'historiens, 3) les données issues de la statistique locale et de la base de données énergétiques nationale.

Pour la consommation de la biomasse, la discontinuité et l'hétérogénéité de données s'avèrent fortes. Parmi des données, entre 1801 et le milieu du XXe siècle, nous avons identifié l'étude de Barles (2002, 2007) pour la consommation des produits végétaux et des fourrages et celle de Chatzimpiros (2011) pour des produits animaux. Nous avons complété ces données avec la littérature ancienne (Husson, 1856, Préfecture du département de la Seine, 1894) et contemporaine (Toutain, 1992). Pour la période récente, des enquêtes alimentaires de l'INSEE sont mobilisables pour identifier la consommation alimentaire des ménages franciliens en kg/hab/an. Cependant, ces données n'incluant pas les repas hors domicile, on effectue une correction en utilisant des coefficients budgétaires des repas hors domiciles de l'INSEE pour déterminer la consommation unitaire de Paris.

Chapitre 4. Matières premières et géographie des secteurs de transformation

4.1. Introduction

Le secteur de la transformation avec son métabolisme industriel met en relation le métabolisme urbain, du côté des consommateurs urbains, et le métabolisme rural, du côté des producteurs agricoles et de l'extraction de minerais. L'industrie de transformation agricole, et notamment la meunerie, est un secteur vieux de plusieurs siècles et il constitue dans la région Île-de-France le principal autoprodacteur-autoconsommateur d'énergie technique issue de sources énergétiques éoliennes et hydrauliques jusqu'au milieu du XIXe siècle. Le développement du secteur énergétique proprement dit remonte seulement au début du XIXe siècle à Paris, la consommation de gaz de houille datant du début du XIXe siècle, celle d'électricité de la fin du XIXe siècle, et celle de vapeur du début du XXe siècle. La consommation dite intermédiaire est destinée à la fabrication d'énergie secondaire, et la transformation de matières premières pour la fabrication de gaz, d'électricité et de vapeur permet de distribuer cette énergie secondaire à des consommateurs dits finaux. Cette transformation nécessite des usines de fabrication dont l'installation résulte de divers facteurs sociopolitique, techno-économique et environnemental.

L'énergie distribuée par un réseau physique qui est construit en sous-sol ou sous forme aérienne sur la voirie implique généralement une coordination par les autorités locales avant et lors de la construction, pour la mise en place d'un système de contrôle (Caron, 1990). Il s'agit pour les autorités en effet d'éviter les risques technologiques d'explosion ou de fuite, et d'assurer une gestion commune entre les réseaux. De ce fait, Paris place très rapidement les entreprises énergétiques sous son contrôle. Les six compagnies de fabrication et de distribution de gaz se voient chacune accorder une concession divisant ainsi la ville en six secteurs. Ce dispositif est aboli en 1856, date à laquelle la ville accorde un monopole à une seule entreprise concessionnaire (Compagnie Parisienne devenue plus tard Compagnie Parisienne d'Eclairage et de Chauffage par le Gaz). De même, à la fin du XIXe siècle, lorsque les entreprises souhaitent

distribuer de l'électricité, Paris donne un droit de concession à six compagnies de distribution électrique (Malégarie, 1947). Au début du XXe siècle, ces compagnies disparaissent par la création d'une seule compagnie concessionnaire appelée Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité en 1913. De plus, à partir de 1927, la ville dispose d'une entreprise de distribution de vapeur, appelée Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain.

Ce chapitre a pour objet de déterminer les coefficients techniques pour la production d'énergie secondaire consommée par la ville de Paris et par son agglomération. Pour ce faire, on s'appuie sur les données issues de ces entreprises de fabrication et de distribution énergétique. On s'intéresse ainsi à la géographie des secteurs par rapport au périmètre spatial d'étude, facteurs différenciés du métabolisme industriel et territorial. En termes techniques, l'étude sur la localisation des installations liées à la fourniture énergétique permet d'allouer la perte énergétique selon nos périmètres d'études lorsqu'on s'intéresse à la consommation directe énergétique.

4.2. Géographie des secteurs de transformation

Le périmètre spatial d'une entreprise énergétique est en effet déterminé par ses clients et son réseau et ne correspond pas au périmètre administratif. De ce fait, il ne se limite pas spatialement et s'étend en parallèle avec l'extension des réseaux. Dans le cas de l'Île-de-France, les secteurs énergétiques, qui restaient cantonnés à la région durant le XIXe siècle, s'étendent vers l'extérieur au cours du XXe siècle. Le périmètre spatial de chaque secteur énergétique doit donc être comparé au périmètre administratif au sein duquel les données sur la consommation du territoire sont collectées. De ce fait, il est nécessaire de spatialiser chaque secteur, et en particulier de distinguer la perte énergétique réalisée à l'intérieur et à l'extérieur du territoire.

Si le métabolisme industriel se différencie dans l'espace par rapport à la consommation urbaine, observera-t-on une certaine tendance à l'externalisation de ce métabolisme en lien avec la géographie industrielle des secteurs énergétiques ? Quels sont les éléments structurant un secteur énergétique : le réseau d'approvisionnement en matière première, les locaux pour le stockage, les unités de production, le réseau de distribution ? Comment l'évolution géographique des secteurs de transformation énergétique influence-t-elle la consommation

urbaine ? Quels sont les logiques et les stratégies des entreprises en matière d'investissement nouveau et de renouvellement des unités existantes et d'extension des réseaux de distribution ?

4.2.1. Secteur gazier de la région Île-de-France

Entre 1801 et 1880

Les usines des six compagnies gazières existant dans l'agglomération parisienne ont été construites de la fin des années 1810 aux années 1820. La localisation de ces usines connaît peu de changement jusqu'en 1856, date à laquelle la ville de Paris accorde un monopole à l'une de ces six compagnies : la Compagnie Parisienne portant par la suite le nom de Compagnie Parisienne d'Eclairage et de Chauffage par le Gaz (CPECG). Les usines sont installées à proximité des consommateurs, la perte à la distribution étant importante. Les premières tuyauteries pour le réseau sont en effet réalisées en bois et connaissent une perte de plus de 20% (Williot, 1999). Par conséquent, une partie des usines s'installe dans la ville de Paris et le reste derrière le mur d'Octroi. En revanche, une certaine distance vis-à-vis de l'habitat est assurée par une taille d'îlot relativement importante. La première usine à gaz Trudaine est édifée en 1819 et occupe un terrain de 1760 m², dans le but d'éloigner les ateliers de fabrication de l'habitat en raison des contraintes de sécurité et du besoin d'espaces pour stocker les matières premières, la houille, le coke, le sable, le bois, les chaux, etc¹.

Avant 1856, la quantité réelle de combustibles consommée par chaque usine est mal connue. Cette connaissance nous est cependant nécessaire pour distinguer la consommation intermédiaire à l'intérieur de la ville de Paris et celle à l'extérieur de la ville. En revanche, on connaît la production de gaz par compagnie et le nombre de cornues (chaufferie pour la distillation de la houille) implantées par usine sur quelques dates, comme le montre la figure suivante. Ceci est, selon Daumas et Payen (1976), le seul indicateur sur la puissance installée. Les données sur la production horaire de gaz organisées selon le périmètre des six entreprises ne sont pas utilisables, puisque la Compagnie Anglaise notamment a une usine dans Paris et une autre hors du mur d'Octroi. On ne peut pas assimiler la production de gaz à la consommation de combustibles, puisque cette dernière dépend du rendement de la production. Néanmoins, ce sont

¹ Toutefois, en considérant la taille des îlots parisiens pour les activités diverses hors habitat, les usines n'occupaient pas encore une grande place dans Paris. A titre d'exemple, l'Hôpital Général occupe 28 hectares et l'École militaire 78 hectares (Williot, 1999).

les seuls indicateurs dont on dispose pour spatialiser les données et ils seront retenus faute de mieux, en gardant présent à l'esprit les erreurs qu'ils sont susceptibles d'engendrer.

Pour l'année 1828, nous avons utilisé les données sur le nombre de cornues par usine. La part de charbon consommée à l'intérieur de Paris dans la consommation totale des compagnies est ainsi de 71%. Pour 1841, nous devons considérer trois cas de figure : les compagnies dont toutes les installations sont à l'extérieur de Paris pour lesquelles la question du double compte ne se pose pas ; celles dont toutes les installations sont à l'intérieur de Paris (Lacarrière, Française : Poissonnière et Grand Prieuré), pour lesquelles elle doit être prise en compte ; et enfin la Compagnie anglaise, qui possède des installations à l'extérieur de Paris et une usine à l'intérieur (usine Trudaine). Dans ce dernier cas on pondère la production de gaz de cette compagnie par la part de la puissance installée dans Paris (en nombre de cornues), soit 0,45, afin de régler le problème des doubles comptes. La part de charbon destiné à la production interne à la ville dans la consommation totale de l'industrie gazière est ainsi de 62 %. En 1858, cette part devient nulle suite à la décision en 1855 de fermer progressivement les trois usines à l'intérieur de l'enceinte des Fermiers Généraux. Cependant en 1860 ces usines sont de nouveau incluses suite à l'extension du périmètre de Paris du mur des Fermiers Généraux à l'enceinte de Thiers. Cette extension fait augmenter la part de production à l'intérieur de la ville de Paris qui atteint 90 % en 1880, comme le montre le tableau suivant. En effet, entre 1859 et 1880, l'industrie gazière tend à se développer rapidement dans les zones annexées en 1860, ainsi qu'en banlieue du département de la Seine par l'ouverture de l'usine de la Villette et par l'acquisition des usines en banlieue possédées par la Compagnie du Nord et de l'Est (usines de Boulogne, Batignolles, Saint-Denis et de Maisons-Alfort) (Annexe 2).

Tableau 4.1. Part de la consommation de charbon de terre à l'intérieur de Paris sur la consommation totale de l'industrie gazière entre 1828 et 1880 (%).

| % | Paris | Hors Paris | Remarques |
|------|-------|------------|-------------------------------------|
| 1828 | 71 | 29 | en nombre de cornues |
| 1841 | 62 | 38 | en production du gaz |
| 1858 | 0 | 100 | en consommation de charbon de terre |
| 1880 | 90 | 10 | en consommation de charbon de terre |

Source : Barjot et al., 1991; Williot, 1999, p. 87, p. 373-374. (En 1858, le nombre de cornues devient nul suite à la fermeture des usines à l'intérieur du mur des Fermiers Généraux.)

Pendant la première moitié du XXe siècle, le développement du secteur gazier parisien reste toujours régional. Une deuxième mutation géographique importante est néanmoins amorcée dans les années 1920. Les réseaux s'étendent notamment par le développement dans Paris des Habitations à Bon Marché (HBM) équipées de l'eau chaude et du chauffage (Sébillotte, 1928). A cette période, les usines à gaz à l'intérieur de la ville de Paris tendent à fermer. La plupart de la production se fait alors en banlieue de la Seine, qui est ainsi marquée par un paysage industriel remarquable. A partir de 1950, ce territoire produit presque la totalité du gaz manufacturé de la région. La part de production en banlieue dans la production totale de la région parisienne passe en effet de 67% en 1950 à 100% en 1958 (INSEE, 1965). Cette géographie reste sans grande évolution jusqu'en 1959, notamment par rapport aux industries électriques qui développent très rapidement leurs réseaux (Williot, 1999). Le secteur du gaz ne se développe qu'après 1960 avec une véritable logique de réseaux, notamment à la suite de l'importation de gaz naturel (gaz de Laq, puis gaz algérien) qui entraîne la fermeture de toutes les usines à gaz situées dans la région parisienne au cours des années 1960¹. Ces dernières années se caractérisent donc par la mutation du secteur tant dans la région parisienne qu'à l'extérieur de la région : extension des réseaux, disparition du gaz manufacturé au profit du gaz naturel et installation de nouveaux locaux pour le stockage et pour la compression et décompression dans la région.

¹ On cite notamment l'interconnexion et la commande centrale (dite *dispatching*) qui caractérise l'extension rapide des réseaux électriques (Larroque, 1997, Williot, 2003). Voir la section suivante.

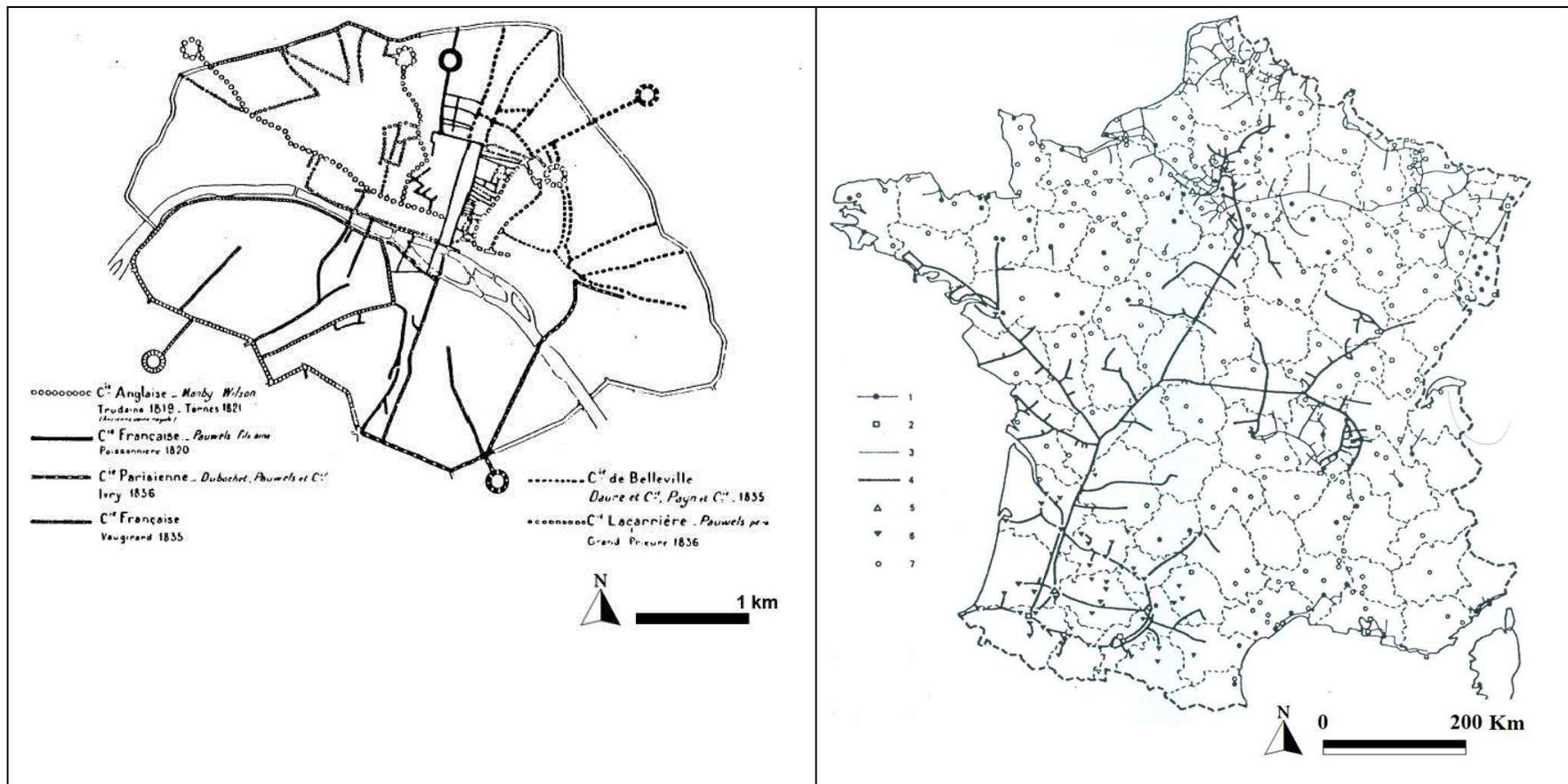


Figure 4.1. Plan schématique du réseau de distribution de gaz et de l'emplacement des six usines dans Paris en 1836 (gauche), schéma des réseaux de gaz en France en 1964 (droite). Source : Masse, 1914, cité par : Mustar, 1984, Beltran, 1992, p. 33.

(légende : 1. Distribution de gaz manufacturé par Gaz de France (cercle noir : usine à gaz), 2. Cokerie ou raffinerie fournisseuse de gaz, 3. Canalisation de gaz manufacturé et de gaz de raffinerie, 4. Canalisation de transport de gaz naturel, 5. Stockage souterrain, 6. Distribution publique alimentée en gaz naturel porté, 7. Distribution publique alimentée en propane)

4.2.2. Secteur de l'électricité dans la région Île-de-France

La production électrique à Paris commence surtout au sein des industries autoconsommatrices au cours de la deuxième moitié du XIXe siècle. Durant cette période, de nombreux producteurs industriels d'électricité existent à l'intérieur de la ville de Paris (Daumas et al., 1996). Cette production est soumise rapidement au contrôle des autorités locales, du fait du besoin croissant de production d'électricité résultant de la demande croissante des habitants (Beltran, 1995, cité par : Woronoff, 1998). La ville de Paris accorde une concession pour la distribution électrique à six compagnies qui divisent ainsi la ville en six secteurs selon leur périmètre de distribution entre 1889 et 1907 (Malégarie, 1947). L'une des ces compagnies est municipale et produit l'électricité destinée à l'éclairage des Halles et de l'Opéra. A partir de 1907, ces six compagnies connaissent une période de regroupement jusqu'à ce que soit constituée une entreprise concessionnaire unique en 1913. La Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité assure sa production à l'aide de deux usines majeures à Saint-Ouen et à Issy et de deux usines d'appoint à Saint-Denis et à Asnières (triphase) entre 1914 et 1920 ; la puissance nominale disponible atteint alors 81 MW (y compris les usines d'appoint). Le développement du secteur électrique est réalisé très rapidement entre le début de l'organisation de l'entreprise municipale en 1907 et la veille de la Seconde Guerre mondiale en 1938. Le nombre d'abonnés s'élève ainsi à plus 1,2 millions vers 1938. La diffusion de cette énergie dans Paris ne prend donc qu'un demi-siècle pour atteindre ce dernier record. La diffusion du réseau électrique est ainsi deux fois plus rapide que celle du réseau de gaz qui prend presque un siècle, comme l'illustre la figure 4.1.1.

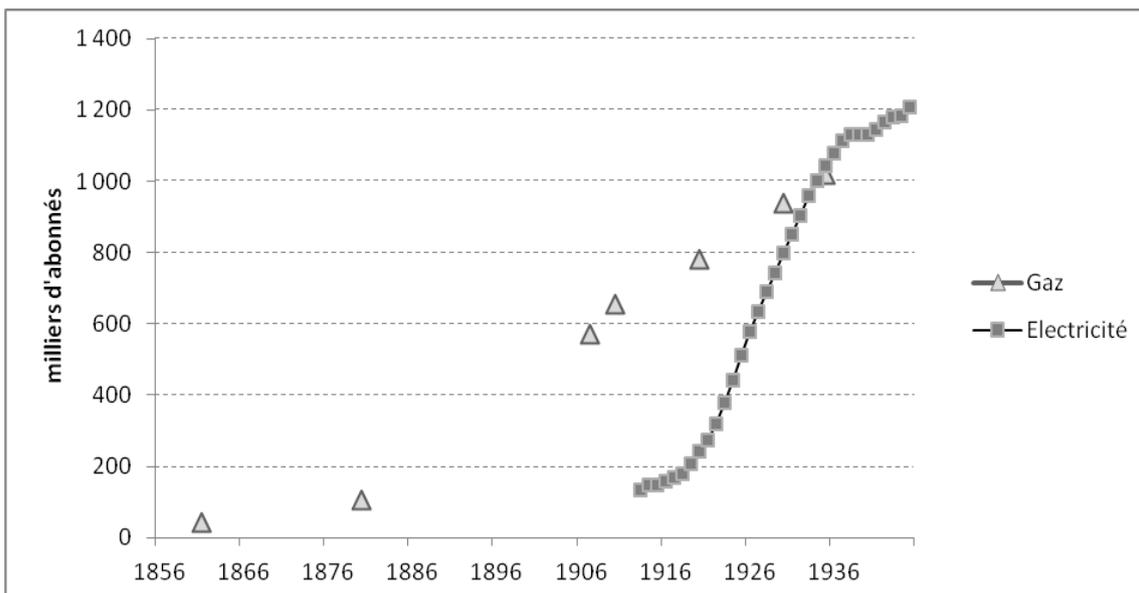


Figure 4.1.2. Nombre d'abonnés au gaz et à l'électricité à Paris. Source : Williot, 1999, Barjot et al., 1991, Malégarie, 1947.

(le nombre d'abonnés en 1861 et de 1880 étant issues de la CPECG, il inclut les abonnés de la banlieue. Néanmoins, compte tenu de la consommation de gaz très faible en banlieue avant 1880, on assimile le nombre total d'abonnés de la compagnie à celui de Paris)

Après la Seconde Guerre Mondiale en 1946, les secteurs énergétiques (charbon et électricité) connaissent un changement important suite à la décision de leur nationalisation qui conduira par la suite à regrouper plus d'un millier d'entreprises de production et de distribution d'électricité (1^{er} plan quinquennal dit Plan Monnet prolongé jusqu'en 1952). Cette unification financière, réalisée dans une situation de pénurie après la guerre, inclut aussi une unification des réseaux, qui a été déjà entreprise partiellement durant l'entre deux guerres¹.

Durant la période 1946 - 1968, les usines électriques se trouvent toutes dans la banlieue de Paris, le long de la Seine, pour faciliter la décharge des matières premières, mais également pour utiliser l'eau de la Seine pour produire la vapeur (Daumas, 1976, Larroque, 1997). La puissance cumulée s'élève à 1304 MW en 1946. Entre 1946 et 1963, la géographie du secteur électrique connaît peu de changement dans le département de la Seine (voir le tableau 4.6). Les nouvelles usines sont surtout installées dans les départements périphériques dont la production dépasse légèrement celle du département de la Seine (tableau suivant). En revanche, entre 1950

¹ On rappelle l'interconnexion des réseaux électriques amorcée durant les années 1920 (Malégarie, 1947).

et 1963, la part de la production d'électricité du département de la Seine par rapport à la production régionale baisse de 48% à 21%, alors que la production totale régionale double presque, passant de 4805 GWh à 8184 GWh au cours de la même période (figure 4.7), cette production étant assurée surtout par les usines situées dans les deux départements périphériques.

Tableau 4.2. Usines électriques dans la région Île-de-France en 1963

| Usine | Départements | Production | Puissance maximale |
|--------------------|----------------|------------|--------------------|
| Unité | | GWh | MW |
| Porcheville | Seine et Oise | 1977 | 468 |
| Montereau | Seine et Marne | 1410 | 234 |
| Champagne | Seine et Oise | 1331 | 240 |
| Vaires | Seine et Marne | 1194 | 240 |
| Arrighi II – Vitry | Seine | 879 | 222 |
| Gennevilliers HP | Seine | 706 | 325 |
| Saint-Ouen | Seine | 236 | 240 |
| Saint-Denis II | Seine | 202 | 270 |
| Arrighi I – Vitry | Seine | 152 | 225 |
| Diverses | Seine | 97 | n.d. |
| Total | | 8184 | 2464 |

Source : « Production individuelle des usines thermiques de la région en 1964 », INSEE. 1965. Annuaire statistique abrégé de la région parisienne. Paris, INSEE, Direction régionale de Paris. XI-304 p.

La part de la production électrique du département de la Seine sur la production électrique de la région Île-de-France n'a guère changé depuis. En effet, au cours des années 1990, quelques sites de production qui avaient été arrêtés dans les années 1980 et 1990 ont rouverts, fonctionnant désormais en cogénération. Ce sont les exemples des centrales de Vaires et de Vitry. En 2007, les centrales thermiques en cogénération dans la petite couronne produisent 1489 GWh sur la production totale thermique d'environ 6500 GWh, soit environ 23% de la production totale régionale.

4.2.3. Secteur de la production de vapeur

En 1946, la Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain fonctionne grâce à la vapeur produite par son unique chaufferie de Bercy et à la vapeur achetée à l'usine de Traitement Industriel des

Résidus Urbains (TIRU) et à l'usine d'Electricité de France à Ivry. En termes de développement des chaufferies, deux étapes se distinguent. La première, jusqu'au milieu des années 1970, se fait par l'accompagnement du programme de rénovation de la ville de Paris suite à la désindustrialisation des années 1960. A titre d'exemple, les opérations d'aménagement du Front de Seine, du quartier sud du 13e arrondissement de Paris et du quartier de Montparnasse, qui sont les grands travaux d'aménagement de cette période, intègrent le chauffage central par vapeur de la CPCU (Raoult, 2007). Le chauffage urbain bénéficie d'un contexte technique et législatif favorable. Il est en effet facile à mettre en œuvre dans des zones denses d'habitat collectif¹, et présente des atouts indéniables, dit-on, dans le cadre de la lutte contre la pollution atmosphérique. Les chaufferies de la CPCU se développent rapidement depuis les années 1960. L'acquisition de terrains dans la ville de Paris est relativement facile, notamment dans le contexte de désindustrialisation de la ville. Les chaufferies de Grenelle et de Vaugirard sont en fonction à partir de 1960, celle de la Villette à partir de 1965 et celle de Bichat à partir de 1970, puis celle du Kremlin-Bicêtre à partir de 1975.

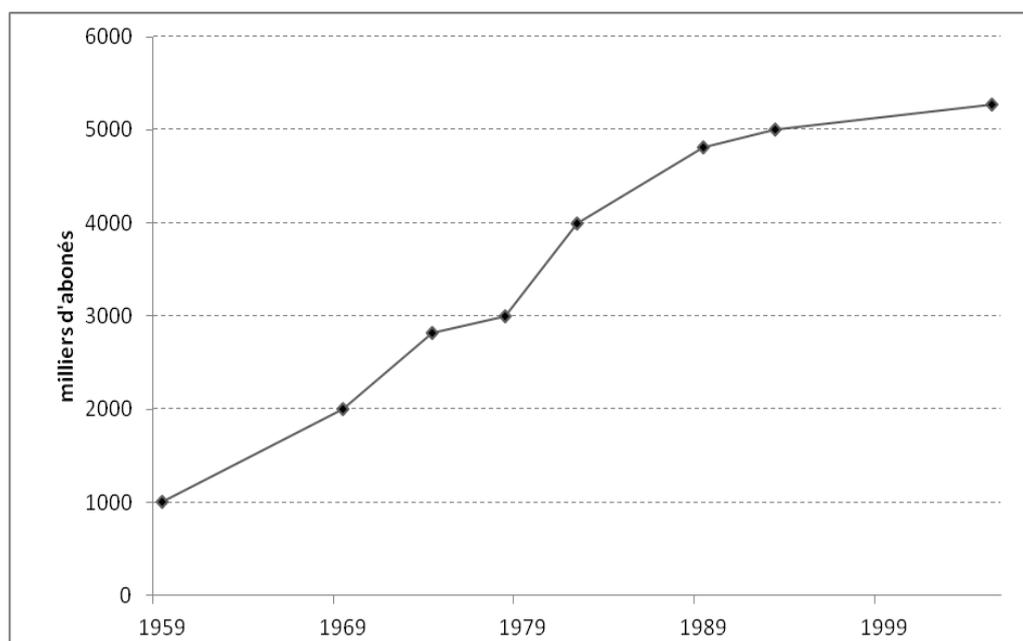


Figure 4.1.3. Nombre d'abonnés au chauffage urbain entre 1959 et 2005. Source : CPCU, 1994, site Internet de la CPCU [en ligne] [réf. du 8 oct. 2012] : www.cpcu.fr.

¹ L'installation de sous-stations est facile sous une voirie et le chauffage sans cheminée à tous les étages est un élément favorable pour les immeubles collectifs de grande hauteur.

Les années 1960 sont marquées par l'investissement dans les chaudières fonctionnant au fioul lourd, ce qui permet l'augmentation de la capacité de production en tonne par heure de vapeur par chaudière, avec des valeurs de 75 t/h dans le cas de la chaufferie de Grenelle et de Bercy, puis de 150 t/h pour les sixième et septième chaudières de Bercy et les deux chaudières de Vaugirard. Quant aux équipements du Sycotom dont la production de vapeur commence dès le début du XXe siècle, les quatre usines d'incinération d'Issy-les-Moulineaux, de Saint-Ouen, d'Ivry et de Romainville sont en fonction jusqu'aux années 1980. La rénovation des usines a lieu entre le milieu des années 1950 et le milieu des années 1960.

Tableau 4.3. État des chaudières de la CPCU et du Sycotom entre 1965 et 1969.

| Chaufferie | Commune | Date de la première mise en service | Date de la rénovation des sites | Département | Capacité de production de vapeur en t/h | Capacité de production de vapeur à la pointe en MW : a | Combustibles |
|-------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------|---|--|----------------------------|
| Bercy | Paris | 1930 | 1961, 1963, 1967 | 75 | 525 | 682 | Charbon, fioul |
| Grenelle | Paris | - | 1963, 1968 | 75 | 375 | 487 | Fioul |
| Vaugirard | Paris | 1964 | - | 75 | 150 | 195 | Fioul |
| La Villette | Paris | 1965 | - | 75 | 175 (dont 25 d'appoint) | 227 | Charbon avec appoint fioul |
| TIRU 1 | Issy-les-Moulineaux | 1922 | 1965 | 92 | | | Incineration des déchets |
| TIRU 2 | Ivry-sur-Seine | 1922 | 1969 | 94 | | | Incineration des déchets |
| TIRU 3 | Saint-Ouen | 1922 | 1954 | 93 | | | Incineration des déchets |
| TIRU 4 | Romainville | 1922 | | 93 | | | Incineration des déchets |

Source : Raoult, 2007; TIRU <http://www.tiru.fr>; IAU, 2005 (a. 1MW équivaut à 1,18 kth/h et correspond à la livraison de vapeur de 0,77 t/h à la pointe selon Raoult (2007, p. 160)).

La seconde étape de l'évolution du secteur n'est pas issue de la volonté de l'entreprise mais a été causée par la hausse du prix du pétrole d'un facteur 10 durant les années 1970¹, tandis que les équipements essentiels de l'entreprise fonctionnaient à partir de ce combustible devenu très cher. Autour de 1980, les installations changent alors de matière première. Le charbon est relancé par la construction de chaufferies au charbon sur le site de Saint-Ouen (Saint-Ouen I), mises en service en 1981 et en 1990 (Saint-Ouen II) (Raoult, 2007). Ce site acquiert une plus grande capacité de production de vapeur, avec deux unités de 300 t/h et contribue à produire une part essentielle de la vapeur consommée dans Paris jusqu'à la prochaine étape de changement des équipements en faveur du gaz naturel. Après 1990, des équipements de production en cogénération par gaz naturel sont installés dans d'anciens sites de production de la CPCU (site de Saint-Ouen II et Saint-Ouen III) et par l'acquisition de l'ancien site de production électrique d'EDF à Vitry. Par ailleurs, la CPCU étend son réseau en dehors de Paris en desservant quatre communes voisines de la ville (APUR, 2006).

Tableau 4.4. Production de la CPCU en 2006.

| Unité | Vapeur livrée | | | Pouvoir calorifique MWh/tonne vapeur | Production électrique GWh | Production totale (thermique et électrique) GWh |
|-----------------------------------|---------------|-------|------|--|------------------------------|---|
| | Tonne | GWh | PJ | | | |
| Vitry cogé | 1 146 | 866 | 3,1 | 0,76 | 427 | 1 294 |
| Saint-Ouen III cogé | 877 | 663 | 2,4 | 0,76 | 445 | 1 107 |
| Saint-Ouen I gaz | 248 | 188 | 0,7 | 0,76 | 0 | 188 |
| Saint-Ouen II charbon | 1 789 | 1 353 | 4,9 | 0,76 | 18 | 1 370 |
| Vaugirard | 594 | 449 | 1,6 | 0,76 | 0 | 449 |
| Grenelle | 366 | 277 | 1 | 0,76 | 0 | 277 |
| Bercy | 237 | 179 | 0,6 | 0,76 | 0 | 179 |
| Ivry | 224 | 169 | 0,6 | 0,76 | 0 | 169 |
| La Villette | 0 | 0 | 0 | 0,75 | 0 | 0 |
| KB | 0 | 0 | 0 | 0,75 | 0 | 0 |
| Total (sauf indication contraire) | 5481 | 4144 | 14,9 | 0,76 (moyenne) | 890 | 5033 |

Source : Vapeur livrée et électricité produite d'après CPCU (2006).

¹ Le prix nominal d'un baril du pétrole était environ 3 -3,5 \$/baril avant 1973 devient 35 \$/baril en 1980., US Oil information, prix nominal. [en ligne] [réf. du 9 jan. 2009], disponible sur la toile : <http://www.eia.gov/>.



Figure 4.1.4. Plan du réseau et des usines de la CPCU en 1937 (gauche) et Plan de réseaux de chauffage urbain à Paris et en petite couronne en 2000-2001 (droite). Source : CPCU, 1937. Plan du réseau de la CPCU en 1937, 56 p., Li276/pl, cité par : Gallo, 2006, vol. II., p. 328. ; APUR, 2006, p. 6.

4.3. Des combustibles à l'énergie : techniques de transformation énergétique dans la région Île-de-France

En termes de technique de production énergétique, le procédé de fabrication de gaz manufacturé de houille se différencie de la technique de génération électrique. Le premier est un procédé de distillation de matière utilisé depuis le XVIII^e siècle et qui connaît peu de changement jusqu'au milieu du XIX^e siècle (DAUMAS et al., 1996). Cette technique consistant en la séparation de matières, la production est tant énergétique que matérielle. Quant à la génération électrique, il s'agit d'une conversion énergétique. Le procédé classique (hors cogénération) consiste à produire une énergie mécanique à partir de l'énergie chimique des combustibles, qui sont soit des matières premières (houille, lignite), soit leurs sous-produits issus d'une filière carbochimique (coke) ou pétrochimique (fioul lourd). Des combustibles sont brûlés dans un foyer qui chauffe une chaudière génératrice de vapeur, ensuite cette vapeur fait tourner une turbine qui génère une énergie mécanique ou électrique. La vapeur d'eau utilisée est recyclée dans un condenseur où la plupart de la perte énergétique est effectuée (figure 4.1.3). Dans ce procédé, les matières (combustibles) sont dissipées sous forme de déchets solides, liquides ou gazeux.

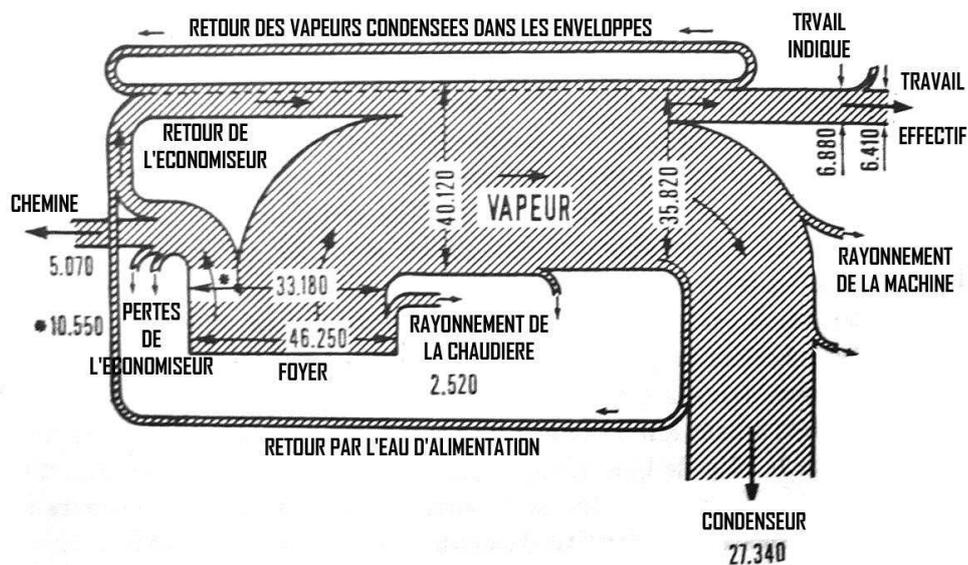


Figure 4.1.5. Bilan énergétique de la machine à vapeur à piston vers 1900 en calorie par minute.

Source : Bilan de l'utilisation de la chaleur par une machine à piston vers 1900, selon Daumas et al., 1996, p. 56.

4.3.1. Du charbon de terre au gaz

Le gaz de houille est la première énergie secondaire distribuée par un réseau physique de la période contemporaine. La technique de la distillation du charbon de bois et de la houille pour l'extraction de gaz est connue vers 1800. En Angleterre, cette technique est propice au développement de l'industrie de gaz de houille dès le début du XIXe siècle. A Paris, l'industrie gazière s'installe à partir de 1817. Cette industrie a été créée originellement pour produire le gaz d'éclairage public qui est souvent appelé gaz d'éclairage en raison de cette utilisation initiale au début du XIXe siècle, et parfois gaz hydrogène selon sa composition chimique, ou encore gaz de ville, par opposition au gaz naturel¹. Au milieu du XIXe siècle l'industrie gazière grandit avec la croissance de la consommation parisienne. Une véritable filière de chimie industrielle s'est ensuite développée autour de cette énergie au cours de la deuxième moitié du XIXe siècle, notamment l'industrie du goudron, fabriqué à partir de résidus de distillation de houille et utile pour l'industrie pharmaceutique et la construction, ainsi que l'industrie de l'azote utilisé pour fertiliser les terres.

On présentera par la suite les données techniques et géographiques concernant le secteur gazier de la région parisienne. En effet, le périmètre du secteur gazier était limité à la région Île-de-France jusqu'aux années 1960, puis à partir de 1970, le gaz consommé à Paris et dans la région Île-de-France est du gaz naturel importé². Dans cette section, on s'intéresse uniquement au gaz produit à partir de houille, le gaz naturel importé sera discuté dans la section suivante 4.4.

¹ En 1815, Paris dispose de moins de cinq mille lanternes. La première usine est construite dans le site de l'ancienne église de Saint-Louis pour éclairer le palais du Luxembourg, le théâtre de l'Odéon, et une partie du quartier de l'Odéon et de Saint-Germain (Guillerme, 2007).

² La conséquence géographique de ce changement de combustibles sera discutée dans la section suivante.

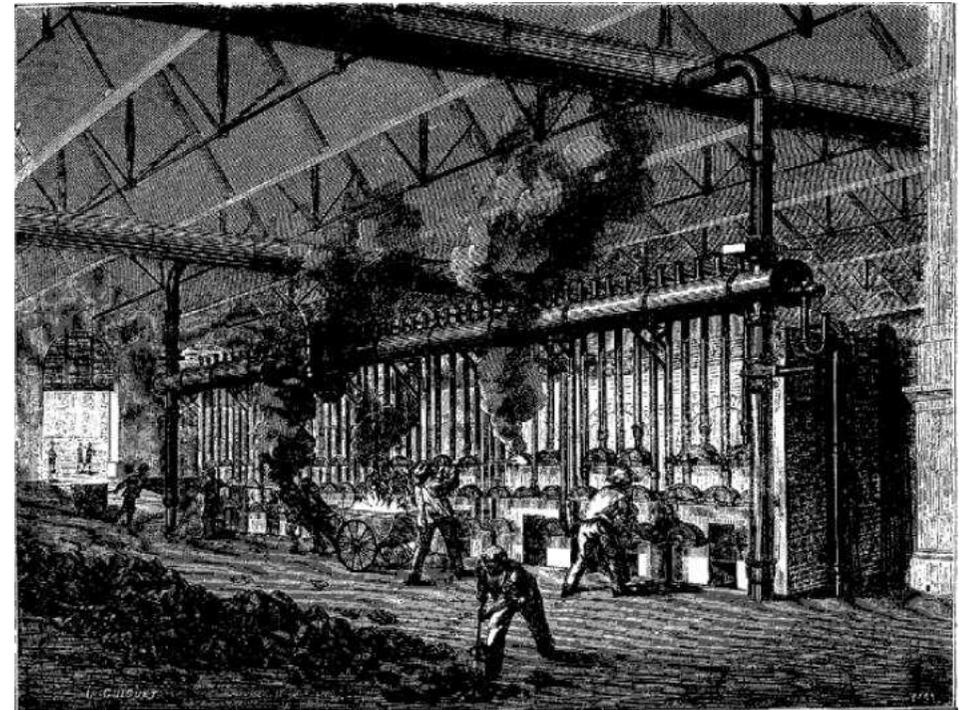
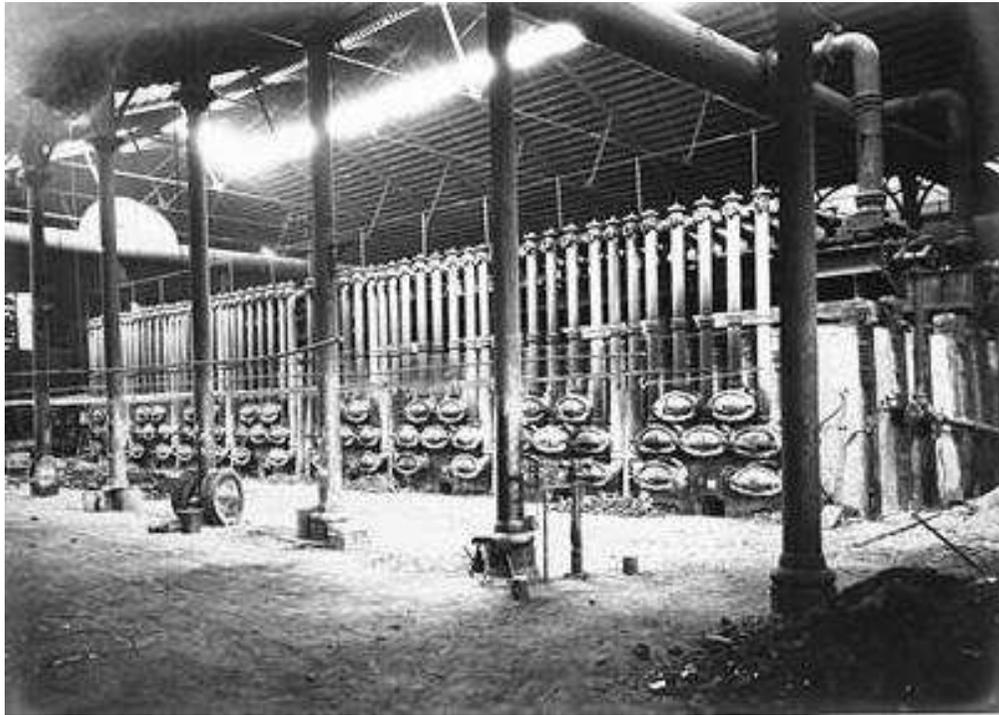


Figure 4.2. Atelier de distillation de l'usine à gaz de la Villette de la Compagnie Parisienne d'Eclairage et de Chauffage par le Gaz (CPECG) au milieu du XIXe siècle. Source : gauche - Fernique, 1878-1880, droite - Figuer, 1870, p. 136.

(les usines de la CPECG possèdent des groupes de 7 ou 8 cornues placées horizontalement. Le gaz sort des barillets (tuyaux directement liés aux cornues), emprunte des conduites de fonte (gros tuyaux placés au-dessus des barillets) avant d'arriver aux condenseurs où le gaz sera ensuite envoyé aux purificateurs pour être acheminé au gazomètre (réservoir))

La distillation de charbon de terre fournit le gaz, le coke, le goudron et des eaux ammoniacales, qui peuvent tous faire l'objet d'une utilisation énergétique et matérielle, si bien que la distillation de charbon de terre a un rendement de production énergétique et de matière proche de 100%. De ce fait, ce qui détermine l'économie d'énergie et de matières dans ce cas est la consommation de combustibles pour chauffer le four distillateur appelé cornue, ainsi que le taux de valorisation des sous-produits.

La première usine à gaz située à l'Hôpital St Louis consomme quasiment un tiers de la houille achetée pour le chauffage des cornues (32%)¹, le rendement de production atteignant donc au plus 68% (Williot, 1999). Avec une technologie plus mature vers 1850, selon S. Clegg (1860), la quantité d'énergie nécessaire pour la fabrication du gaz représentait environ 23 à 26 % de la quantité de houille distillée si l'on brûle du coke et 18 à 20% lorsqu'on utilise la houille². Toutefois, ce rendement ne suffit pas à déterminer le rendement énergétique proprement dit des installations. Durant le XIXe siècle, les sous produits énergétiques, le coke et le gaz ont d'abord été valorisés (Williot, 1999, Clegg, 1860), puis le goudron et les eaux ammoniacales trouvent peu à peu leurs débouchés durant la deuxième moitié du XIXe siècle (Barles, 2005).

Le tableau suivant compare le bilan des matières de la CPECG de 1880 à celui de l'Agence Internationale de l'Énergie et montre que 10 à 15 % des matières produites ont un usage non énergétique. Si l'on prend les chiffres de la CPECG comme valeurs de référence du procédé de fabrication, on peut schématiser le bilan de matières selon la figure suivante. Le rendement de production dépend donc de deux facteurs : la consommation de charbon de terre ou de coke produit pour le chauffage des distillateurs (cornue), qui est la variable technique, et le taux de valorisation des sous produits, qui est un facteur économique (existence d'une filière de valorisation). Par ailleurs, nous ne disposons pas de données sur la consommation interne de combustibles pour les activités de manutention. Néanmoins, nous supposons que celle-ci est très faible en raison de la mécanisation elle aussi faible jusqu'à la fin du XIXe siècle ; nous supposons que ces activités dépendent de la main-d'œuvre³.

¹ La charge de charbon de terre pour le chauffage est de 4708 francs, lorsque la charge de charbon de terre pour la distillation est de 9938 francs.

² Dans le cas de la houille de Newcastle vers 1850, 1 tonne de houille de Newcastle distillée produit environ 700kg de coke et on utilise 30-35% du coke produit pour le chauffage des cornues. (Clegg, 1860)

³ On discutera la consommation interne du secteur gazier plus loin.

Tableau 4.5. Sous-produits de la distillation de charbon de terre en % de la masse totale de la matière première

| | Coke | Gaz | Goudron | Huile légère | Eau | NH ₃ | Autres | Somme |
|----------------|------|------|---------|--------------|-------|-----------------|--------|-------|
| AIE (a) | 71,8 | 16,9 | 4,8 | 1,2 | 4,2 | 0,2 | 0,7 | 100 |
| CPECG 1880 (b) | 76,0 | 12,1 | 5,3 | - | 11,30 | - | - | 100 |

Source : (a) rendement général en masse de la production de coke à four selon l'AIE (2005), (b) ASVP 1880 (gaz de densité 0,4 kg/l selon Clegg (1860)).

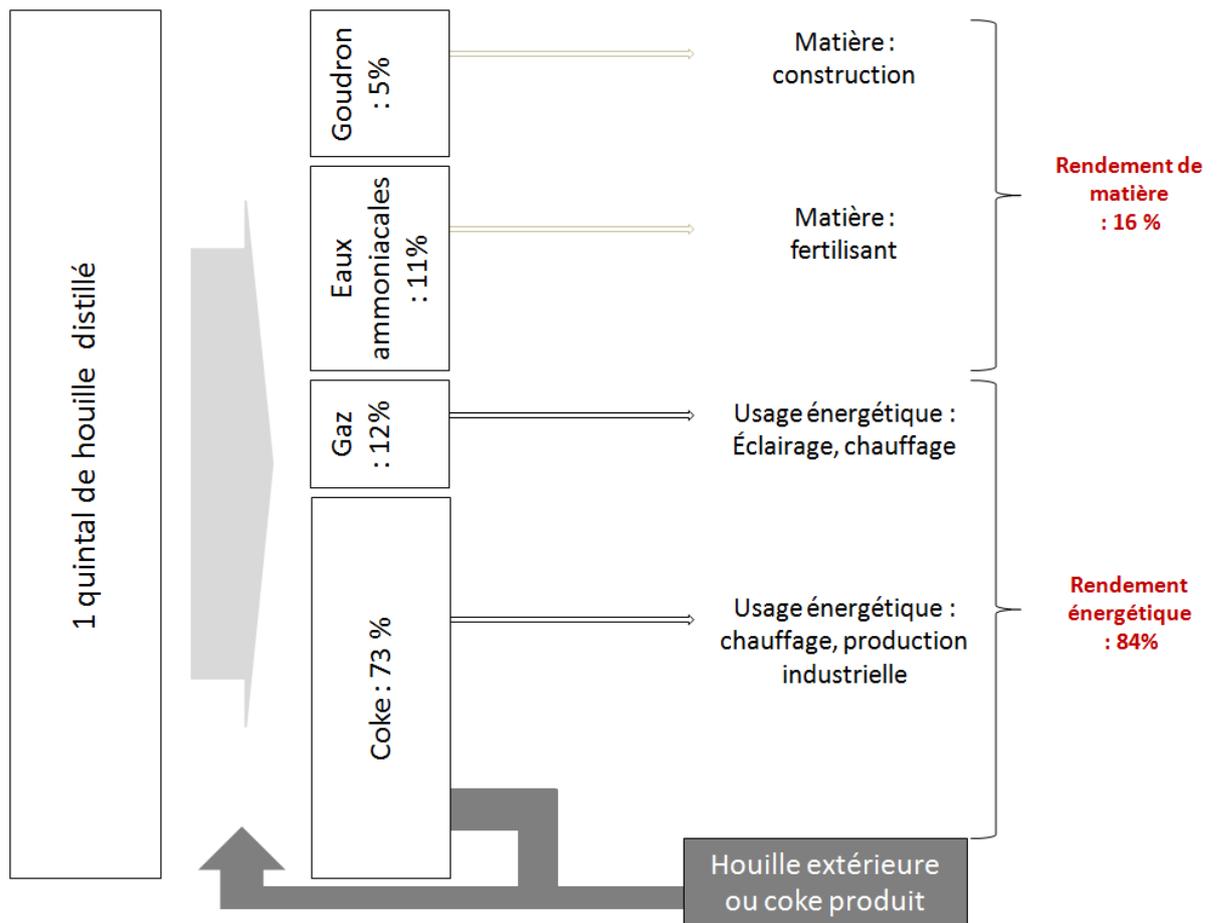


Figure 4.3. Bilan de matières de l'industrie du gaz de houille (les rendements indiqués sont calculés par rapport à la matière distillée. Ils n'incluent pas la houille ou le coke brûlé dans le foyer). Source: cette thèse selon Clegg, 1860, ASVP, 1880.

Lorsqu'il y a plusieurs sous-produits issus d'un même procédé industriel et que ces sous-produits sont destinés à différents consommateurs, la perte énergétique peut être allouée selon la part de produits en masse, en valeur énergétique ou en une certaine substance (comme le carbone) selon l'enjeu principal de la comptabilisation. Dans notre méthode, on responsabilise les consommateurs et alloue la perte énergétique au prorata de la consommation de différents sous-produits en termes de pouvoir calorifique (voir le chapitre 2). Dans le cas de l'industrie gazière parisienne, l'énergie finale du gaz était distribuée par le réseau et le consommateur est identifié ; presque tout le gaz produit est destiné à la ville de Paris jusqu'à la fin du XIXe siècle. En revanche, le coke était susceptible d'être vendu dans Paris et à l'extérieur de Paris ; cela rend difficile d'allouer la perte énergétique au consommateur. En effet, la quantité de coke vendue par les usines à gaz est comptabilisée par l'Octroi de Paris (voir le chapitre 3 section 3.2), mais il est difficile de connaître la part de la consommation de coke dans la consommation de charbon de terre, puisque l'Octroi regroupe le coke, la houille et l'antracite dans une même rubrique « combustibles, charbon de terre ».

Le coke produit par l'industrie gazière représente 30 % de la consommation directe de charbon de terre de la Seine en 1876, 20% au début du XXe siècle et 10% vers 1950. En Île-de-France, le coke et l'aggloméré représentent environ 23 - 27 % de la consommation finale de charbon de terre entre 1952 et 1957¹. Cette part chute à partir de 1957 jusqu'à environ 16 - 17 % entre 1960 et 1963, probablement du fait de la diminution de l'activité de l'industrie gazière dans la région. La houille représente en effet 99 % du charbon de terre (houille, coke, lignite tout confondu) importé en 2006 selon les données SITRAM. La consommation primaire (DET) de la ville de Paris ainsi que celle de la Seine varie également en fonction de la part de coke mélangé dans le charbon de terre. Supposons que la houille vaille 26 GJ PCI/t et le coke 28 GJ PCI/t, on observe le pouvoir calorifique *de charbon de terre* variant entre 26,1 et 26,6 GJ PCI/t dans le département de la Seine. Quant à la valeur énergétique primaire du charbon de terre, la consommation et l'exportation du coke non connues constituent une part non estimée de la perte énergétique liée à la consommation énergétique finale de Paris et engendre une sous-évaluation de la demande totale énergétique de la ville de Paris. Néanmoins, on a décidé de ne pas inclure cette perte dans la demande énergétique de Paris, puisque aucune donnée n'est disponible pour estimer la part de coke dans la consommation de charbon de terre. De plus, le coke peut être consommé en tant qu'énergie ou en tant que matière pour la métallurgie que l'on a exceptée

¹ Livraisons de combustible minéraux solides à l'industrie en kt, hors livraisons à Gaz de France, à Electricité de France et à la sidérurgie (INSEE, 1965).

dans notre analyse. De ce fait, nous avons préféré allouer la perte énergétique uniquement à la consommation de gaz manufacturé, soit environ 20%. En revanche, la perte énergétique liée à la production du coke est incluse dans la consommation énergétique directe et la demande énergétique totale du département de la Seine. Dans la statistique énergétique, on ne considère pas le charbon de terre comme énergie secondaire mais comme énergie primaire, probablement car il est difficile d'estimer la part des produits secondaires. En France, le pouvoir calorifique inférieur du charbon de terre est estimé à 28 GJ PCI/t (Observatoire de l'énergie, 1984). C'est probablement dû au mélange de différents produits dont le pouvoir calorifique est élevé tels que l'anhracite (29-30 GJ PCI/t) et la houille pour le coke (27-30 GJ PCI/t) (AIE, 2004, p. 180). On retient donc la valeur 28 GJ PCI/t comme valeur moyenne d'une tonne de charbon de terre. De même, les produits non énergétiques, le goudron et les produits azotés, qui représentent environ 15 % en termes de matière, sont exclus du calcul de la consommation finale énergétique et de la DET de la ville de Paris. Néanmoins, ces produits sont inclus dans la consommation directe énergétique de la Seine. Par ailleurs, les produits fertilisants issus des usines à gaz sont probablement exportés vers le milieu agricole.

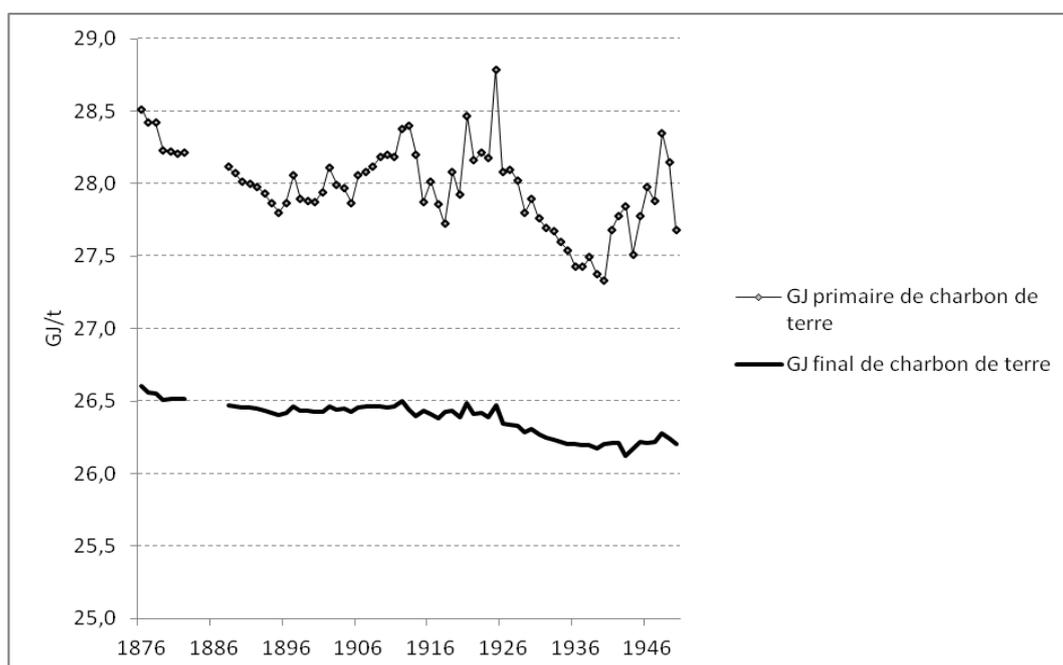


Figure 4.3.2. Pouvoir calorifique du charbon de terre estimé en termes de consommation énergétique finale et d'équivalent primaire en GJ/t de charbon de terre dans le département de la Seine entre 1876 et 1950. Source : cette thèse.

Tableau 4.6. Rendement de la production de gaz et de coke et des sous-produits par la consommation d'une tonne de houille selon différents produits au début du XIXe siècle

| Produit | Sous produits en unité propre | | | PCI en GJ | | | Production/consommation en % en termes de PCI | | | |
|---------|-------------------------------|------------|------------|-----------|-------|-------------|---|--------------------------------|------|---------|
| | M ³ de gaz | Hl de coke | Kg de coke | Gaz | Coke | Goudron : a | Production totale énergétique/ consommation énergétique | Coke produit/ charbon distillé | Gaz | Goudron |
| 1 | 216 | 18 | 720 | 4,43 | 20,16 | 1,9 | 1,02 | 0,76 | 0,17 | 0,07 |
| 2 | 241 | 22 | 880 | 4,94 | 24,64 | 1,9 | 1,21 | 0,78 | 0,16 | 0,06 |
| 3 | 252 | 19 | 760 | 5,17 | 21,28 | 1,9 | 1,09 | 0,75 | 0,18 | 0,07 |
| 4 | 258 | 17 | 680 | 5,29 | 19,04 | 1,9 | 1,01 | 0,73 | 0,20 | 0,07 |
| 5 | 263 | 18 | 720 | 5,39 | 20,16 | 1,9 | 1,06 | 0,73 | 0,20 | 0,07 |
| 6 | 283 | 20 | 800 | 5,80 | 22,40 | 1,9 | 1,16 | 0,74 | 0,19 | 0,06 |
| Moyenne | 252 | 19 | 760 | 5,17 | 21,28 | 1,9 | 1,09 | 0,75 | 0,18 | 0,07 |

Source : cette thèse à partir de données sur l'émission de gaz en m3 et sur la production de coke en hl par tonne de houille distillée, selon Pelouze, E. Traité de l'éclairage au gaz, Liège, Leroux et Cie., 1839, pl. XI A, Introduction, cité par : Williot, 1999, p. 90. (a : en supposant qu'il représente 5% du charbon consommé en termes de masse)

Rendement de la production de gaz entre 1856 et 1905

Revenons maintenant au rendement de la production de gaz vers 1821. La perte énergétique représente 32% de la consommation totale de houille. Il faut également inclure le taux de valorisation des sous-produits, goudron et eaux ammoniacales. Il n'existe alors que quelques compagnies qui parviennent à commercialiser toutes leurs productions de goudron et d'eaux ammoniacales (Williot, 1999). Par conséquent, on prend par défaut une hypothèse de valorisation nulle pour les matières, soit 11 % en masse¹. Entre 1844 et 1854, la part de l'autoconsommation de coke est de 35% pour la Compagnie Parisienne et pour la Compagnie de Belleville, 37 % pour la Compagnie Française, 41% pour la Compagnie de l'Ouest, 43% pour la Parisienne, et 50% pour la Lacarrière (figure suivante) (Williot, 1999). La perte liée au chauffage des cornues est calculée selon la proportion de la consommation de coke de chaque compagnie pondérée par la part de chaque compagnie dans la consommation totale parisienne. Une hypothèse implicite est que la proportion de la production de gaz lors de la distillation est la même pour toutes les compagnies. On obtient par le calcul, un rendement de production de 67 %, et si l'on compte une perte de 5 % correspondant aux matières non valorisées, on obtient un rendement de production de 62 % pour la période 1844-1854 (tableau suivant). Le rendement de production s'améliore durant les décennies suivantes, notamment après le monopole accordé à la CPECG, et ce grâce, en particulier, à l'augmentation de la charge unitaire des cornues, qui est exprimée en quantité de houille distillée dans chaque cornue pendant 6 heures, et constitue un indicateur de la technique de distillation (Cochin, 1883). Selon Cochin (1883), la charge de cornue autrefois ne dépassait guère 60 kg, atteint 78 kg en 1861, 108 kg en 1866, ensuite 127 kg en 1869. À partir de cette dernière date, la charge est à peu près stationnaire à 130 kg. L'amélioration de la charge de cornue signifie la diminution de la consommation de combustibles pour le chauffage de cornues (fig. suivante). Cette dernière induit donc l'amélioration du rendement de production dans les années 1860.

A la fin de la concession de la Compagnie Parisienne d'Eclairage et de Chauffage par le Gaz, la Société du Gaz de Paris obtient la concession de la distribution de gaz à Paris et en banlieue. Le rendement de production de gaz doit donc être tiré des données techniques de cette dernière compagnie. Néanmoins, nous ne possédons de données que pour la fin des années 1920. Selon

¹ Par rapport à la consommation de charbon pour le chauffage des cornues dans l'industrie gazière londonienne à la même période, la consommation des six usines à gaz de Paris est beaucoup plus élevée (CLEGG, 1860)

le rapport de l'ingénieur en chef adjoint de la Société du Gaz de Paris, Sébillotte (1928), à la fin des années 1920, la perte énergétique se situe à environ 25% sur l'ensemble des activités de fabrication de gaz qui se répartit en "5,44 % pour la distillation, 2,31% pour la fabrication de gaz à l'eau et de gaz de soufflage¹, 2,80% pour les besoins de l'usine (manutention, production de la force électrique) et 15,0 % pour la consommation de combustibles pour le chauffage de cornues ». Selon lui, la perte à la distillation de 5% atteint un niveau minimal, ainsi que celle de la fabrication de gaz à l'eau². En revanche, la perte pour les besoins de l'usine tend à augmenter, car la manutention se développe (Sébillotte, 1928). Selon lui, agir sur la perte énergétique de la compagnie ne se fait que par la diminution des combustibles consommés pour le chauffage des cornues. En effet, la compagnie développe de nouveaux dispositifs techniques en ce sens, d'une part par le remplacement des cornues horizontales par des cornues verticales plus économes en combustibles, d'autre part par l'installation de chaudières pour la récupération de la chaleur sortant des cheminées. A titre d'exemple, l'abattoir de la Villette est chauffé par la chaleur récupérée de l'usine à gaz de la Villette. Cependant, aucune donnée n'existe à notre connaissance pour les autres années sur le rendement de production de cette compagnie. Faute d'autres moyens, on complète les données sur le rendement de production par des données des industries gazières nationales présentées dans « l'Annuaire Statistique... »³. Selon les données des industries gazières de France, la sortie de *coke disponible pour la vente* se situait entre 22 et 50% de la houille consommée (en masse), alors que le rendement théorique de production du coke doit atteindre entre 72 et 76% en termes de masse (ASVP, 1880, AIE, 2005). Nous avons donc attribué la quantité non vendue du coke à la consommation pour le chauffage des cornues, qui se situe entre 25 et 58% (Annexe 3). Avec ce raisonnement, on peut obtenir un rendement de production de gaz de 87% en moyenne entre 1920 et 1945 en France et une valeur maximale qui se situe à 93% hors perte à la distillation, pour la fabrication de gaz à l'eau et pour la consommation interne de combustibles pour la production de la force motrice (10% pour le cas de la Société du Gaz de Paris). On considère donc que le rendement global de production dans les années 1920 se situe à 75% et s'élève jusqu'à 83 % en 1945. En revanche, on considère qu'après cette date il n'y a plus d'amélioration du rendement, vu notamment le contexte de cette industrie qui est en déclin après 1945, ce qui signifie également l'arrêt de l'investissement dans les équipements de production (Beltran, 1992).

¹ Gaz utilisé pour la glacerie et la soufflerie

² Il ne se développe qu'à la fin du XIXe siècle (Daumas, Payen, 1976).

³ Statistiques publiées par l'ATG dans : Aide-mémoire de l'industrie du gaz, Paris, 1953, p. 392, cité par : Barjot et al., 1991

Tableau 4.7. Détermination du rendement de production de gaz en % entre 1821 et 1945

| Année | Consommation du chauffage des cornues/charbon distillé | Perte à la distillation : matières non valorisées | Autres pertes : production de gaz à l'eau et de la force motrice | Rendement du chauffage | Rendement global de production | Echelle |
|-----------|--|---|--|------------------------|--------------------------------|-----------|
| 1821 | 32% | 11% | 0% | 62% | 51% | Régionale |
| 1844-1854 | 31% | 5% | 0% | 67% | 62% | Régionale |
| 1856 | 25% | 5% | 0% | 77% | 72% | Régionale |
| 1876 | 21% | 5% | 0% | 81% | 76% | Régionale |
| 1928 | 20% | 5% | 5% | 85% | 75% | Régionale |
| 1945 | 20% | 5% | 5% | 93% | 83% | Nationale |

Source : dans le texte.

Le rendement global des réseaux de distribution de gaz est tiré de la Compagnie Parisienne de Chauffage et d'Eclairage par le Gaz. En effet, le rendement de distribution est issu d'une différence entre deux valeurs : quantité de gaz produite à l'usine en termes de production nette (sortie de l'usine) et quantité distribuée, qui correspond à la quantité mesurée aux compteurs des clients ou facturée aux clients. Les données sont disponibles entre 1856 et 1904, en série quasi continue. Le rendement entre 1838 et 1930, années pour lesquelles les données manquent, est obtenu à partir de la tendance linéaire. Nous avons fait l'hypothèse que le réseau de gaz atteint son rendement maximal vers 1930, soit 0,97 comme montré dans la figure suivante.

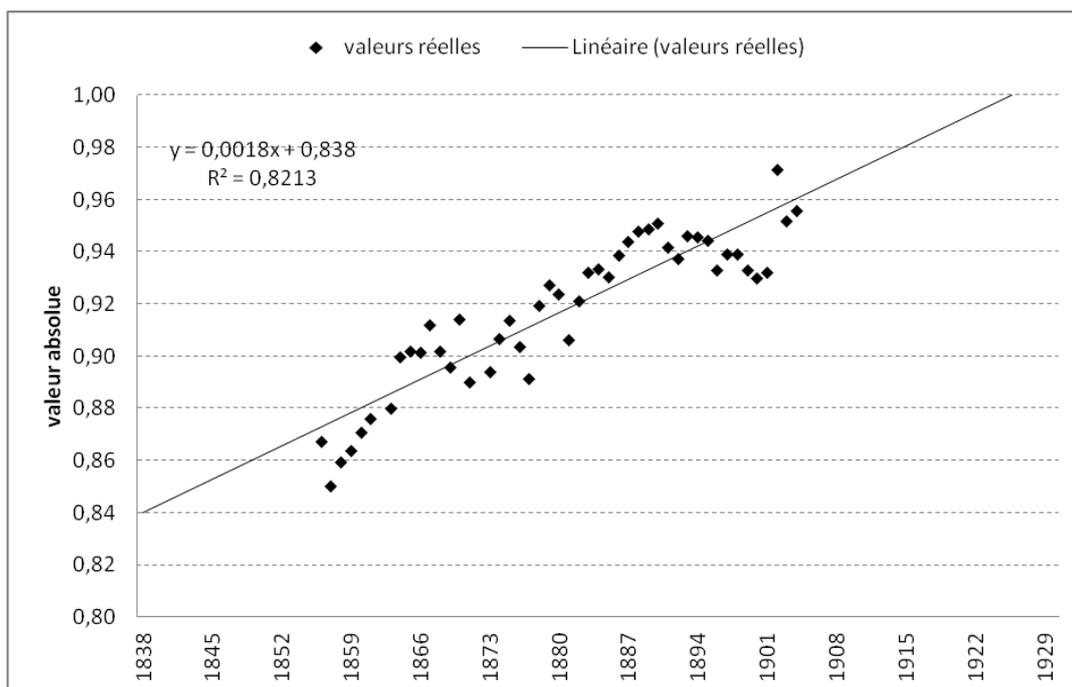


Figure 4.4. Rendements des réseaux de distribution de la CPECG entre 1856 et 1904 en valeur absolue. Source : dans le texte.

Rendement de production et des combustibles utilisés par Gaz de France entre 1951 et 1970

À partir de 1950, les données techniques de l'industrie du gaz de la région Île-de-France sont tirées de la direction régionale de Gaz de France et sont récapitulées par la direction de la région parisienne de l'INSEE (INSEE, 1965, INSEE, 1978)¹. Néanmoins, le rendement de production n'est pas connu par ces sources, puisqu'on renseigne seulement la production de gaz et non les autres matières (coke et autres) ; rappelons qu'on suppose que l'industrie du gaz a atteint son rendement maximal de production vers 1930. Nous nous sommes intéressés en particulier à la part de matières premières utilisées pour la production de gaz en Île-de-France. Toutefois, la direction régionale de Gaz de France depuis 1950 jusqu'en 1961 a un périmètre élargi qui comprend une partie du département de l'Oise selon ses réseaux de distribution étendus jusqu'au sud de l'Oise. Ce périmètre élargi rend difficile l'identification de la production effectuée dans la région Île-de-France, mais nous avons considéré que le rendement de production et la part de chaque source énergétique ne variaient pas au sein du périmètre couvert par la direction régionale de Gaz de France, que les installations soient internes ou externes à la région. Nous

¹ Voir également chapitre 3

avons relevé les données sur la consommation de combustibles de la direction régionale parisienne de Gaz de France pour la période entre 1950 et 1976, présentées dans les deux volumes de documents statistiques régionaux cités. Ces données sont présentées dans le tableau 4.8 de façon à suivre la part de chaque matière première dans la consommation totale des matières premières, calculée en GJ PCS.

Nous n'avons pas d'informations qui prouvent que le gaz a été ou n'a pas été produit à partir de produits pétroliers (GPL et fioul) avant 1945. En effet, la consommation de produits pétroliers représente 3% de la consommation totale de matières premières en 1950 (figure 4.5, droite). Etant donnée également la tendance à la croissance de ces produits, nous supposons que la consommation de produits pétroliers commence après 1945. La part de charbon devient nulle en 1966, alors que la part de produits pétroliers reste entre 5 et 10% entre 1970 et 1976. Nous ne disposons pas de données sur la part des produits pétroliers dans la production de gaz après 1976. Néanmoins, après le choc pétrolier dans les années 1970, la part du pétrole n'augmente très probablement pas dans le gaz. En 2005, la part du gaz industriel représente 2% dans l'ensemble du gaz consommé ; ce gaz est très probablement issu de la raffinerie, puisque la production de biogaz en France n'est pas encore importante. Nous avons appliqué la tendance de la production de la raffinerie à la part de produits pétroliers entre 1976 et 2006, et cette part se situe entre 2 et 10 %.

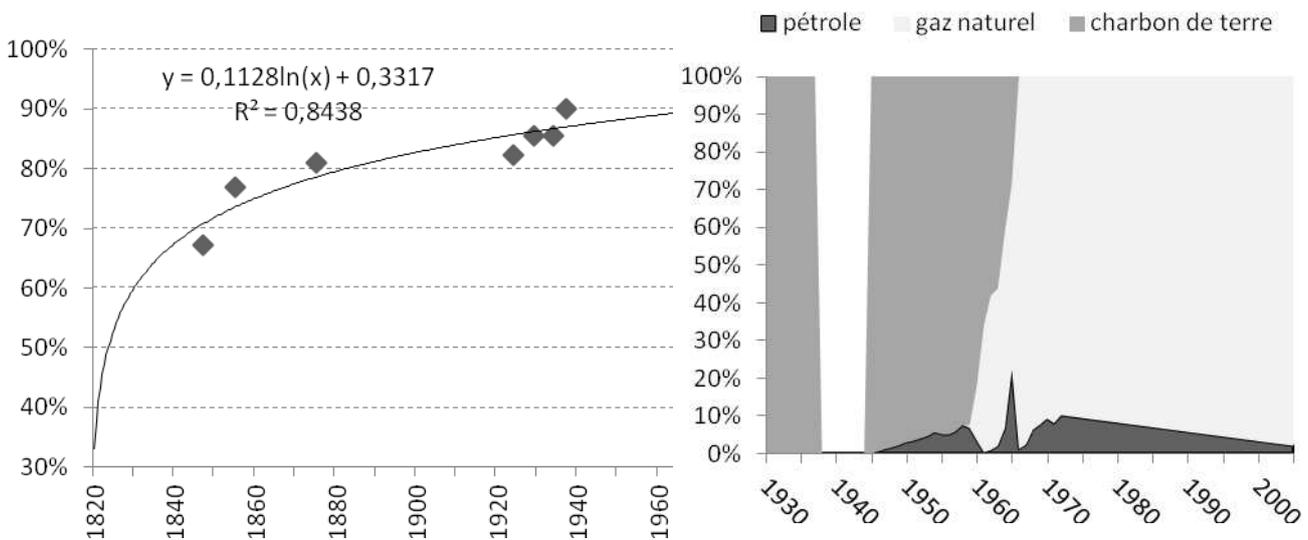


Figure 4.5. Rendement du gaz manufacturé, 1847-1937 (gauche) et part de la consommation des sources primaires par l'industrie gazière de l'Île-de-France, 1930-2000 (%) (droite).

Source : dans le texte.

(La perte énergétique liée à la consommation de gaz de raffinerie est considérée comme nulle. La perte de la raffinerie pétrolière est allouée entièrement aux sous-produits de pétrole.)

Tableau 4.8. Matières premières utilisées par Gaz de France de la région parisienne entre 1950 et 1976

| | Consommation de matières premières | | | | | Production de gaz | Consommation de matières premières en % | | | | |
|------|------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------|-------------|-------------------|---|---------|-------------|----------------------------|----------|
| | Houille | Coke pour le gaz d'appoint | Produits pétroliers liquides | Propane, butane | Gaz naturel | Gaz produit | Charbon de terre | Pétrole | Gaz naturel | MP pour le gaz manufacturé | Total MP |
| | Kt | Kt | Kt | Tonne | Mth | Mth | % | % | % | % | % |
| 1950 | 2305 | 174 | 46 | - | 0 | 5139 | 97% | 3% | 0% | 100% | 100% |
| 1955 | 2263 | 227 | 81 | 7,6 | 0 | 5192 | 95% | 5% | 0% | 100% | 100% |
| 1957 | 2437 | 238 | 101 | 5,4 | 0 | 5753 | 94% | 6% | 0% | 100% | 100% |
| 1960 | 1829 | 205 | 51 | 16,4 | 2321 | 5881 | 82% | 3% | 14% | 86% | 100% |
| 1961 | 1441 | 35 | 4 | 7,8 | 4845 | 6170 | 66% | 0% | 33% | 67% | 100% |
| 1962 | 1226 | 62 | 11 | 7,3 | 5934 | 7040 | 58% | 1% | 41% | 59% | 100% |
| 1963 | 1216 | 103 | 29 | 6,3 | 6416 | 7814 | 56% | 2% | 42% | 58% | 100% |
| 1964 | 808 | 27 | 82 | 4,4 | 6893 | 8016 | 41% | 7% | 52% | 48% | 100% |
| 1965 | 482 | 0 | 252 | 0 | 5623 | - | 28% | 22% | 49% | 51% | 100% |
| 1970 | 0 | 0 | 9 | 0 | 7736 | - | 0% | 1% | 99% | 1% | 100% |
| 1971 | 0 | 0 | 15 | 0 | 6453 | - | 0% | 2% | 98% | 2% | 100% |
| 1972 | 0 | 0 | 32 | 0 | 4791 | - | 0% | 6% | 94% | 6% | 100% |
| 1973 | 0 | 0 | 33 | 0 | 4016 | - | 0% | 8% | 92% | 8% | 100% |
| 1974 | 0 | 0 | 34 | 0 | 3353 | - | 0% | 9% | 91% | 9% | 100% |
| 1975 | 0 | 0 | 29 | 0 | 3325 | - | 0% | 8% | 92% | 8% | 100% |
| 1976 | 0 | 0 | 30 | 0 | 2666 | - | 0% | 10% | 90% | 10% | 100% |

Source : dans le texte (Parmi les différents gaz traités pour obtenir du gaz directement utilisable par l'utilisateur on inclut le gaz de pétrole liquéfié. Les données sur la consommation de matières premières dans l'industrie gazière comprennent le département de l'Oise entre 1951 et 1961.) (M: Million. le « gaz naturel » inclut le gaz de raffinerie de divers. Cependant, nous avons supposé que le gaz de raffinerie est nul.)

4.3.2. Electricité

De la fin du XIXe siècle jusqu'au début du XXe siècle, les équipements de production électrique sont extrêmement variés (Daumas et al., 1996). Ainsi, chaque compagnie possède ses propres réseaux qui sont également différents en termes techniques. Les données techniques sur ces installations sont peu connues hormis certaines données sur la tension et la puissance unitaire qui montrent l'évolution de la puissance électrique de la fin du XIXe siècle jusqu'au début du XXe. Depuis 1913, date de la création de la CPDE, les données techniques deviennent plus abondantes. Dans un premier temps, on s'intéresse à la consommation de combustibles et au type de source primaire pour la production électrique dans la région Île-de-France. Ensuite, on essaie de déterminer le rendement de production et de distribution électrique par la mise en parallèle de ces données techniques avec les données sur la consommation électrique traitée dans le chapitre précédent.

À la fin du XIXe siècle, comme dans le cas du gaz, les déterminants du rendement de production sont d'un côté la quantité de combustibles brûlée dans des chaudières (générateurs de vapeur) pour le fonctionnement de machines (turbines et alternateurs) et d'autre part la production d'électricité. Le rendement unitaire d'une machine s'exprime par le rapport entre la consommation de vapeur et la production de force en kg de vapeur par cheval heure. Lorsqu'on s'intéresse au rendement général exprimé par le rapport entre la consommation de combustibles et la production de force en kg de charbon de terre par cheval-heure, on considère à la fois la performance de la chaudière et celle de la machine (Daumas et al., 1996). Néanmoins, une usine électrique destinée à la distribution demande une consommation de force pour ses propres activités, et notamment pour la décharge et la manutention. On distingue donc la production brute de la production nette, et par conséquent le rendement brut du rendement net. Ce dernier est obtenu par soustraction de l'électricité consommée pour le fonctionnement de l'usine productrice : manutention, éclairage, etc. Cette dernière consommation dite consommation interne se situe entre 5 et 6 % de la production totale brute d'électricité, pour les données entre 1990 et 2008 issues de la comparaison entre la production thermique brute et la production nette d'électricité. Dans le cas des centrales hydrauliques, ce ratio se situe à environ 6-7 % ; on appliquera le ratio 5% pour la consommation interne des centrales thermiques et 7% pour les centrales hydrauliques sur toutes les périodes d'études, faute d'autre information.

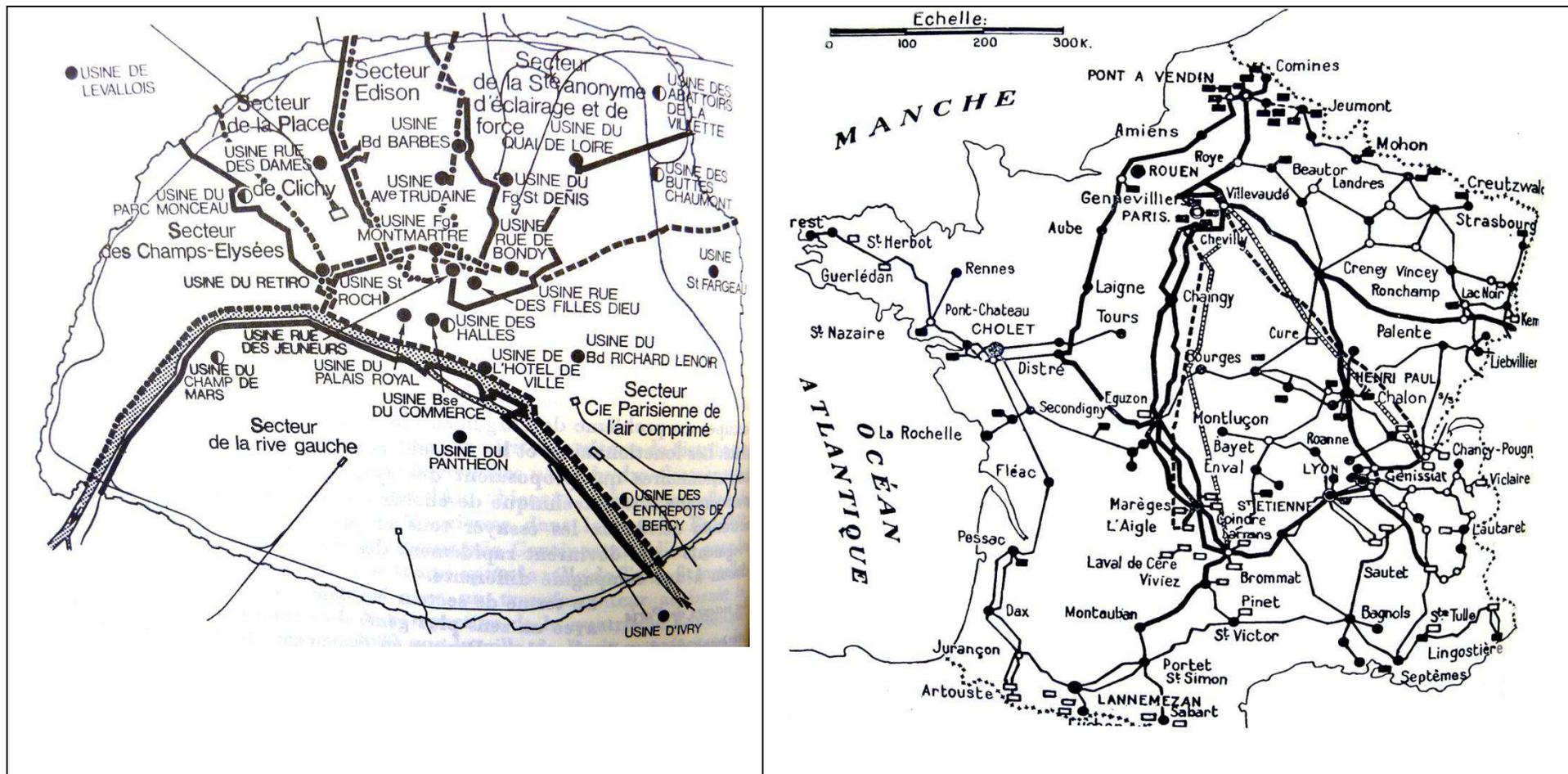


Figure 4.5.2. Les premiers secteurs de distribution électrique à Paris entre la fin du XIXe siècle et le début du XXe siècle (gauche, les usines des secteurs sont représentées par des points noirs, les usines municipales par des points noirs et blancs) et les réseaux de distribution électrique en France en 1945. Source : Daumas et al., 1996, p. 56, Malégarie, 1947.

Selon Malégarie (1947), au début du XXe siècle, le rendement thermique se situe à environ 10% « pour les meilleures installations ». Or l'écart entre le rendement thermique pour le fonctionnement de la machine à vapeur (rendement de la machine à vapeur plus le rendement des chaudières pour le chauffage) et le rendement thermique électrique est faible ; la perte est notable notamment dans le condenseur : elle était d'environ 70 % vers 1900 et est d'environ 50% aujourd'hui¹. Pour valider la valeur donnée par Malégarie, nous avons regardé l'évolution du rendement thermique depuis le début du XIXe siècle, dont nous allons déduire le rendement thermique électrique. Le tableau suivant, basé sur le traité de Coriolis, permet de comparer le rendement de production thermique des machines à vapeur françaises à celui de machines anglaises construites au début du XIXe siècle. Selon lui, les machines à vapeur construites au début du XIXe siècle en France et en Angleterre représentent entre 46 et 126 *travail en dynamode* (1 dynamode est égale à 9800 J) produit par la combustion d'un kg de charbon. Par conséquent, une machine construite au début du XIXe siècle connaît une perte calorifique de l'ordre de 96% et 98% en PCI (tableau 4.9).

Pour le milieu du XIX siècle, nous n'avons pas obtenu de données relatives au rendement thermique en France, mais pour l'Angleterre. Selon Jevon (1866), celui-ci se situe à environ 5%, bien qu'on puisse atteindre 8% avec une meilleure technologie et 11% au maximum avec une technologie « parfaite », comme le montre le tableau suivant (tableau 4.10). Selon Daumas et al. (1996), la puissance unitaire de la machine à vapeur croît de 75 à 2200 chevaux entre 1869 et 1912, et le rendement atteint 7 à 14% (1,4 kg/ch/h à 0,75 kg/ch/h). A Paris, on atteint environ 1000 chevaux (0,74 MW) vers 1900.

¹ La perte énergétique importante dans le cas de l'électricité par rapport à la machine à vapeur est principalement issue de la transmission de l'électricité par les réseaux et de la consommation interne des usines (en comparant entre le schéma de flux d'une machine à vapeur selon Daumas et al. (1996) et celui de l'usine de production d'électricité thermique selon Smil (2008)).

Tableau 4.9. Travail produit par une machine à vapeur par la combustion d'un kg de charbon, exprimé en dynamode

| Année | Pression en atmosphères | Travail produit par la combustion d'un kg de charbon, exprimé en dynamode | Rendement en % | Remarque |
|-----------------------------|-------------------------|---|----------------|--|
| - | de 3 à 4 | de 46 à 50 | 2 % | Machine à détente établie à Paris au Gros-Cailou, brûlant du charbon de terre d'Auvergne et de Blanzay |
| - | de 1 à 2 | 96 | 4 % | Machine établie à Londres pour élever de l'eau |
| 1811 | de 1 à 3 | 55 | 2 % | Pour l'ensemble des machines des mines de Cornouailles (en Angleterre), employées pour élever de l'eau |
| 1812 | | 64 | 3 % | |
| 1813 | | 70 | 3 % | |
| 1815 | | 73 | 3 % | |
| 1824 | | 97 | 4 % | Pour l'ensemble des machines des mines de Cornouailles (en Angleterre), sans distinction de machine, une grande partie étant à détente |
| 1825 | | 105 | 4 % | |
| 1826 | | 103 | 4 % | |
| 1827 | | 115 | 5 % | |
| 1828 | | 126 | 5 % | |
| vers la fin des années 1820 | 1 à 4 environ | de 54 à 108 | 2 % - 4% | Pour divers systèmes de machines qui se font vers fin 1820 en France suivant ce qu'annoncent les constructeurs |

Source : Coriolis, 1844.

Tableau 4.10. Rendement thermique selon trois hypothèses d'amélioration technologique

| Lbs | Kg | Rendement | Hypothèse |
|------|------|-----------|---|
| 4,00 | 1,81 | 5% | Machine à vapeur à double engin, technologie normale actuelle en bonne marche |
| 2,50 | 1,13 | 8% | Machine à vapeur à double engin, la même machine avec une technologie meilleure |
| 1,86 | 0,84 | 11% | Machine à vapeur à double engin, la même machine avec une technologie parfaite |

Source : Jevon, 1866. (kg/lbs = 0,454; Horse Power (HP) égal à 746 W1)

¹ 1CV français égale à 735,5 W

Dans les années 1920, le rendement thermique électrique calculé pour sept usines parisiennes donne un résultat de l'ordre de 14 et 25 % avec une valeur moyenne de 19 % ; ce rendement est dit brut et n'inclut pas les pertes liées au fonctionnement de l'usine, telles que la consommation de combustibles pour la manutention et le chauffage des locaux. La première installation des usines électriques de la CPDE est réalisée entre 1905 et 1931 (voir le tableau). Compte tenu de la tendance linéaire entre la valeur de Coriolis (3% en moyenne de 1825), de Jevon (5% en 1850) et celle moyenne des usines électriques parisiennes (17%), nous avons pris la valeur de 10% donnée par Malégarie pour le rendement thermique au début du XXe siècle, qui paraît également raisonnable par rapport aux cas présentés par les historiens des techniques.

Tableau 4.11. Rendement moyen en production brute des usines dans la région parisienne en 1945

| Usines | Année de mise en service de la première installation | Date de la dernière mise en service | Puissance totale installée (MW) | Consommation de charbon de terre (cal/kWh) | Rendement de production thermique à haute tension (H) et à basse tension (B) | Rendement moyen brut |
|----------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------|--|--|----------------------|
| Issy-les-Moulineaux | 1914 | 1922/1924 | 140 | 4600 | 0,19 H | 0,15 |
| | | 1929/1930 | | 6700 | 0,13 B | |
| St-Ouen | 1914 | 1922/1926 | 400 | 6000 | | 0,14 |
| St-Denis I | 1905 | 1928 | 79 | 3500 | | 0,17 |
| St-Denis II | 1933 | 1943 | 210 | 3500 | | 0,25 |
| Ivry | 1927 | 1930/1932 | 75 | 4750 | | 0,18 |
| Gennevilliers | 1921 | 1925/28 | 180 | 4400 | | 0,20 |
| Vitry-sud (Arrighi) | 1931 | 1926, 1930/1932 | 220 | 3700 | | 0,23 |
| Puissance totale/rendement moyen | | | 1304 | | | 0,19 |

Source : Malégarie, 1947 (le rendement moyen de 19% est pondéré par la puissance installée dans chaque usine).

L'extension des réseaux électriques commence dans les années 1930. Après la création d'Électricité de France (EDF) en 1946, le périmètre de la production et de la gestion du secteur électrique est identique à celui de l'entreprise. De plus, après 1960, le réseau s'étend en dehors de la France par l'interconnexion entre les réseaux européens. Néanmoins, on considère que l'installation des centrales dans la région Île-de-France a un impact environnemental qui est différencié de celui réalisé en dehors de la région. Par conséquent on discutera de l'installation (dans la section suivante) et du rendement de production et de distribution électrique de la région Île-de-France. Le rendement de production thermique pour l'électricité après 1945 sera ainsi discuté à deux échelles, régionale et nationale (hors région Île-de-France). Nous parlerons dans cette section du rendement de production et de distribution uniquement pour la région Île-de-France.

Entre 1945 et 1965, l'amélioration du rendement de production thermique est significative. L'EDF réalise une normalisation technique et une modernisation des centrales thermiques dont la mise en œuvre est suivie conjointement avec la Commission de l'énergie (Larroque, 1997). En particulier, sont construites progressivement des tranches de 110 MW au début des années 1950, de 125 MW entre 1955 et 1969, et de 250 MW entre 1961 et 1971. La puissance maximale cumulée s'élève à 2464 MW dans la région en 1963 (voir le tableau 4.2). Le tableau suivant montre l'amélioration du rendement thermique entre 1915 et 2005 ; les valeurs de 1915 et de 1945 sont issues du travail de Malégarie sur la CPDE ; les valeurs de 1965 et de 1975 sont calculées à partir de la consommation de combustibles et de la production de l'électricité issue de bulletins statistiques de la région parisienne de l'INSEE. Néanmoins, le rendement donné par Malégarie est exprimé en brut, c'est-à-dire que la production électrique est divisée par la quantité de combustibles entrée dans les chaudières, alors qu'après 1965, le rendement notamment national est exprimé en net, c'est-à-dire que l'électricité est comptée après la soustraction faite de celle consommée dans la centrale. Nous avons donc fait une correction pour transformer le rendement brut en rendement net de façon à homogénéiser l'ensemble des résultats.

Tableau 4.12. Rendement de production thermique dans la région Île-de-France entre 1915 et 2005

| Année | Rendement | Rendement corrigé en net | Source | Qualité des données | |
|-------|-----------|--------------------------|--|---------------------|--|
| 1 915 | 0,10 | 0,10 | Malégarie, 1947 | Régional | Hypothèse de progrès technologique du début du XXe siècle : le rendement maximal du début du siècle devient le rendement moyen vers 1915 (Malégarie, 1947) |
| 1 945 | 0,19 | 0,18 | Malégarie, 1947 | Régional | Valeur moyenne de rendement de toutes les usines parisiennes pondérées par leur puissance maximale de production (Malégarie, 1947) |
| 1 965 | 0,33 | 0,31 | Insee IDF | Régional | Rendement global des centrales thermiques de la région IDF |
| 1 975 | 0,38 | 0,36 | Insee IDF | Régional | Rendement global des centrales thermique de la région IDF |
| 2 005 | 0,41 | 0,39 | Observatoire de l'énergie, PEGASE (régional) | Régional | Rendement global des centrales thermiques de la région IDF (y compris la cogénération) |

Source : dans le texte.

En effet, le rendement de production, qui s'élève par paliers, traduit les transitions techniques connues par le secteur, de la chaufferie au charbon à celle combinée au charbon et au fioul depuis 1945, puis de la centrale thermique dite classique à celle de cogénération après 1990. C'est le cas spécifique de la région Île-de-France, puisqu'après 1975 les centrales électriques régionales tendent à fermer tandis que l'importation d'électricité croît très vite (figure 4.7). À l'échelle nationale, cette technologie (turbine à gaz) commence dans les années 1980. Durant les années 2000, l'amélioration du rendement de production est accomplie principalement par la diffusion de cette nouvelle technique de production (voir le chapitre 4.4).

Quant au rendement de distribution électrique, il varie selon les différentes tensions distribuées exprimées en volt. De manière générale, le rendement de distribution est supérieur pour les réseaux à haute tension. Au cours des années 1880, lors de la première expérimentation de « la transmission de la force par l'électricité » à courant continu à longue distance entre Creil et La Chapelle, soit 54 km, par Marcel Deprez, le rendement de distribution était d'environ 50%.

Durant la première moitié du XXe siècle, Paris possède des réseaux très mixtes en termes de type de ligne de transmission (monophasé, diphasé et triphasé) et de courant (continu, alternatif). De la fin du XIXe siècle au milieu du XXe siècle, les réseaux s'améliorent globalement par le développement du courant alternatif et du triphasé, ce qui signifie moins de pertes aux réseaux. À la fin du XIXe siècle, la distribution électrique se fait en 2,4 kV ou 3,0 kV, et la tension est abaissée à 110 V pour les consommateurs. En un demi-siècle, la tension sur les réseaux de distribution croît de 2,4 kV à 220 kV¹. Entre 1913 et 1946, les données sur le rendement de distribution électrique sont issues de la Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité relevées par Malégarie sur l'ensemble de la période de concession de cette compagnie. Nous avons seulement excepté quelques valeurs extrêmes, surtout basses, pour certaines années pendant la guerre de 1939-1945. Le rendement électrique atteint 86% en 1939 et 87% en 1941, la plupart de l'amélioration a été réalisée entre 1913 et 1930, ce qui correspond à la période d'extension des réseaux dans Paris.

Changement de combustibles entre 1945 et 1970: du charbon de terre au pétrole

La transition énergétique dans le secteur électrique commence après la seconde guerre mondiale. La plupart des centrales thermiques de la région Île-de-France qui sont construites depuis 1950 sont équipées d'une chaufferie au fioul avec une chaufferie au charbon. La consommation de combustibles et la production d'électricité thermique de la région Île-de-France sont connues par l'Annuaire statistique abrégé de la région parisienne de 1965 et par le Tableau économique de l'Île-de-France de l'INSEE de 1978, puis par la base PEGASE entre 2000 et 2005 ; ces données sont issues des mêmes sources de données que la consommation électrique (voir le chapitre 3).

¹ À titre de comparaison, dans les années 2000, la région Île-de-France dispose de réseaux de transport et de distribution allant de moins de 63 kV à 400 kV.



Figure 4.5.3. Matières premières employée pour la production d'électricité en Île-de-France entre 1910 et 2007 en %. Source : INSEE, 1978 (entre 1960-1976), INSEE 1982, 1983, 1984, 1986 (1979, 1980, 1981, 1982, 1986), PEGASE, 2008 (entre 2000-2007).

(Pour 1910-1945 : la production thermique par le charbon de terre atteint 100 %, avec une incertitude sur la date d'introduction de la production thermique par le pétrole, probablement réalisée entre 1945 et 1950 ; entre 1946 et 1960 : interpolation entre les parts de chaque combustible en 1945 et celles en 1960 ; la consommation de charbon de terre de l'EDF baisse entre 1950-1959, ce qui augmente très vraisemblablement celle de son substitut (pétrole) ; la relation entre les deux matières premières est également visible lors de crises pétrolières ; la consommation de charbon de terre augmente légèrement entre 1959 et 1965, très probablement en raison de la crise Suez, baisse entre 1965 et 1973 et augmente à partir de 1973, suite à la crise pétrolière de 1973)

4.3.3. Chauffage urbain

Les principales sources de données sur la consommation de la chaleur sont issues de la Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain (CPCU, 1955 ; *CPCU, 2000*, CPCU, 2005, 2006, 2007), distributeur de chaleur pour Paris et la petite couronne¹. La CPCU possède ses propres chaufferies alimentées par des combustibles tels que le charbon de terre, le fioul et le gaz naturel. Elle distribue également de la chaleur issue de l'incinération des déchets ménagers provenant des usines de la TIRU, gérée par le Syndicat intercommunal des ordures ménagères de l'agglomération parisienne (Syctom). Les sources mentionnent ainsi la part de vapeur livrée aux réseaux par les usines d'incinération des déchets sur la totalité de la vapeur distribuée par les réseaux.

Les facteurs déterminants du rendement de la production et de la distribution de chaleur sont la perte à la chaufferie et aux réseaux. Le rendement de production de la vapeur est obtenu à partir de données sur la consommation de combustibles et sur la production de vapeur. La production et la consommation de vapeur sont connues par différents indicateurs selon les sources de données : les combustibles consommés, la vapeur produite, celle livrée au réseau, et la vente de vapeur. La différence entre les combustibles consommés et la vapeur produite correspond à la perte à la chauffe d'eau et à la génération de vapeur². La différence entre la vapeur produite et celle livrée au réseau correspond donc à l'autoconsommation d'une chaufferie. La vapeur livrée est par conséquent égale à la production en nette. La différence entre la vapeur livrée aux réseaux et celle livrée aux clients (vente) correspond à la perte aux réseaux. La CPCU utilise la vapeur comme fluide pour transmettre la chaleur. Le réseau fonctionne en principe en circuit fermé : « *le fluide caloporteur partant de la centrale emprunte une canalisation "aller" et, après avoir transféré sa chaleur dans les sous-stations, revient à la centrale par une canalisation "retour" pour se réchauffer à nouveau* »³. Le compteur client fait partie de l'installation de raccordement et mesure la quantité d'eau chaude provenant de la condensation de la vapeur fournie. Par conséquent, l'énergie finale, en principe, est la chaleur effectivement livrée aux

¹ Voir également ADEME, 2005, APUR, 2006, VIASEVA : www.viaseva.org.

² La CPCU utilise la vapeur comme fluide, technique qui n'est plus utilisée aujourd'hui pour les réseaux de chaleur récents. La compagnie est en train de se tourner vers la technique de livraison de chaleur par eau chaude qui représente moins de pertes au réseau. Néanmoins, dans les réseaux de la CPCU jusqu'en 2006, la vapeur domine.

³ Définition du réseau de chaleur selon la Commission centrale des marchés, cité par : (Raoult, 2007, Introduction).

clients, qui dépend de la différence entre la température de la vapeur au moment de l'arrivée et celle de l'eau condensée au retour d'un immeuble. En revanche, on n'est pas en mesure de connaître la température exacte de la vapeur arrivée chez chaque abonné et de l'eau condensée au retour. L'énergie livrée aux clients est en effet considérée approximativement en comparaison entre la vapeur livrée et la température des eaux restituées, soit en moyenne 575 kcal/kg de vapeur livrée par la CPCU, ce qui correspond à l'énergie finale (Raoult, 2007, p. 160).

Les données sur le rendement du réseau de chaleur de la CPCU sont rarement disponibles. Les facteurs déterminants en sont la plus ou moins grande défaillance technique de réseaux physiques (nature de la tuyauterie, âge de réseaux), ainsi que la nature du fluide et la régulation entre la production et le besoin chez les clients. La CPCU utilise la technique de la vapeur qui connaît une plus grande perte de la distribution. En comparaison entre la chaleur vendue et celle livrée, on l'estime à 90 % vers 1990 (CPCU, 1991). Le rendement est variable et s'améliore dans le temps pour deux raisons. La croissance de la vente de vapeur améliore indirectement le rendement du réseau, puisque l'augmentation du débit nécessite un diamètre de tuyaux plus important qui augmente la portée de la vapeur et diminue la perte. Deuxièmement, le taux de la réutilisation d'eau chaude de retour (environ 60 °C), qui permet de réaliser une économie d'énergie, augmente depuis 1960. La fuite au réseau était en effet importante jusqu'aux années 1960. Le taux de restitution était de 54,4 % en 1960 et 67,6% en 1970 (Raoult, 2007, p. 233). Ce taux atteint désormais 80 % suite à la campagne de développement de la restitution durant les années 1970. A la décennie suivante, le réseau devient plus performant suite à l'installation du système de télésurveillance et à la rénovation du système de dispatching. Sur la base de données nationales¹ - le rendement des réseaux de chaleur en France se situe en moyenne à 89 % en 2002 – on conclut que le rendement de réseaux de chaleur se situe autour de 90 %. En revanche, les données historiques sur le rendement ne sont pas disponibles. Faute de mieux, on considère que le rendement de réseaux de chaleur de la CPCU est de 90 % et l'affecte pour toute la période pour obtenir la demande énergétique associée à la consommation de chaleur. On

¹ La perte au réseau de chaleur n'a pas fait l'objet d'une attention particulière, compte tenu de son avantage comparatif au gaz ou aux combustibles fossiles. Ces deux dernières énergies connaissent une perte énergétique importante lors de la conversion de l'énergie finale en énergie utile (de l'énergie chimique en énergie thermique), tandis que dans le chauffage urbain, la livraison est faite directement sous forme de chaleur. Par conséquent, l'énergie finale et l'énergie utile sont approximativement les mêmes. Il faut donc tenir en compte de cet avantage comparatif dans la comptabilité énergétique. Selon *Projet de loi portant engagement national pour l'environnement*, Site Sénat [réf. du 17 sept. 2011] Disponible sur la toile : <http://www.senat.fr/rap/108-552-1/108-552-158.html>

admet qu'il y a une sous-estimation dans la demande énergétique totale de Paris entraînée par ce calcul pour la période entre 1960 et 1990, mais qu'elle n'est pas importante, compte tenu de sa part relativement faible dans la consommation totale finale.

La consommation de combustibles pour la période avant 1950 est connue approximativement par l'histoire du chauffage urbain (Raoult, 2007). En 1942, 38 kilotonnes de charbon de terre ont été brûlées pour la production de 201 kilotonnes de vapeur, ce qui signifie un rendement de production de 45 %. En 1945, la CPCU consomme 20,75 kt de charbon de terre et 3 kt de fioul. En revanche, la livraison exacte de la vapeur n'est pas connue. De ce fait, on prend la valeur interpolée entre la vapeur livrée au réseau de 201 kt en 1942 et celle de 300 kt en 1947, soit 261 kt. Néanmoins, en 1945, la CPCU reçoit la vapeur depuis les usines de la TIRU et de l'usine électrique d'Ivry. La vapeur reçue par les usines d'incinération des ordures ménagères est connue comme représentant 18 % de la vapeur livrée par la CPCU (1955). Quant à la vapeur livrée par l'usine électrique d'Ivry, elle n'est pas connue. On dispose seulement de données sur le débit moyen de chaque fournisseur de vapeur entre 1950 et 1954. Dans le débit annuel total de 650 kt de vapeur, la production des chaufferies de la CPCU représente 400 kt, alors que la production de la TIRU reste à 80-90 kt, et celle de l'usine d'Ivry à 150 kt, avec une tendance à la hausse de la production de la chaufferie de la CPCU. Selon ces données, entre 1950 et 1954, la vapeur issue de l'usine électrique d'Ivry représente environ 24 %. Supposant que le débit de la vapeur sortant de l'usine d'Ivry reste constant entre 1945 et 1955, soit 150 kt, la part de vapeur de l'usine électrique d'Ivry s'élève à 34 % de la vapeur totale livrée par la CPCU en 1945 et la part de vapeur issue de l'usine de la TIRU représente 18%. Par conséquent, la vapeur issue des chaufferies de la CPCU représente 46%, avec un rendement de production des chaufferies d'environ 41% en 1945. Nous avons pris plutôt le rendement de 45% de 1942 comme valeur référentielle, puisque la part de vapeur issue de l'usine Ivry n'est pas exacte pour 1945. Pour 1953, ce rendement s'élève à 51%, puisqu'on produit 6 tonnes de vapeur par tonne de charbon de terre brûlé.

Le rendement de production n'est pas connu entre 1954 et 2001. Cette lacune de presque un demi-siècle nous gêne. En revanche, nous possédons des informations sur les chaufferies de la CPCU. Entre 1945 et 1959, la CPCU possédait une seule usine à Bercy. Dans les années 1960, la compagnie étend ses réseaux et sa clientèle dans Paris, notamment en parallèle avec la rénovation de la ville (Raoult, 2007). Elle construit de nouvelles usines alimentées par le fioul au cours des années 1960 pour répondre à la demande croissante de vapeur. Au cours de la

période qui suit les chocs pétroliers, les réseaux de la CPCU s'étendent davantage grâce à une politique énergétique favorisant les réseaux de chaleur (Raoult, 2007). Dans les années 1980, le CPCU relance les chaufferies au charbon. A partir de 1990, la compagnie met en marche les chaufferies de cogénération, qui sont toujours en expansion aujourd'hui. En effet, une chaufferie au charbon sans cogénération n'atteint qu'un rendement de l'ordre de 50%, alors qu'une chaufferie au fioul peut atteindre un rendement d'environ 90%. Le rendement de production peut aller au-delà de 90% avec la technique de cogénération. Nous avons donc fait une hypothèse selon laquelle le rendement de production de 45% est maintenu jusqu'en 1959 et est amélioré progressivement pour atteindre 90 % au moment où toutes les usines de la compagnie sont alimentées par le fioul, soit en 1973. Le rendement de production diminue dans les années 1970 par la remise en marche des chaufferies au charbon (Saint-Ouen I et Saint-Ouen II) et n'augmenterait pas avant 2000, lorsqu'on ouvre progressivement les chaufferies de cogénération, Saint-Ouen III et Vitry¹.

Tableau 4.12.2. Rendement de production et part de combustible dans la vapeur produite de la CPCU

| | Rendement hors OM | | Rendement global (OM 100% rendement) | Part de combustibles dans la vapeur produite | | | | |
|-----------|---|---|--------------------------------------|--|---------|-------------|------|-------|
| | Rendement de la vapeur en nette (sans cogénération) | Rendement global en nette (y compris la cogénération) | | OM | Charbon | Fioul lourd | Gaz | Total |
| 1942 | 0,51 | 0,51 | 0,60 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1945 | | | | 0 | 0,87 | 0,13 | 0 | 1 |
| 1953 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | | | | | |
| 1958 | | | | 0,28 | 0,38 | 0,34 | 0 | 1 |
| 1985 | | | | 0,30 | 0,52 | 0,18 | 0 | |
| 1991-1999 | | | | 0,48 | 0,39 | 0,13 | 0 | 1 |
| 2002 | 0,53 | 0,72 | 0,86 | 0,49 | 0,13 | 0,04 | 0,34 | 1 |
| 2005 | 0,53 | 0,73 | 0,85 | 0,44 | 0,22 | 0,07 | 0,28 | 1 |
| 2006 | | 0,82 | 0,82 | 0,35 | 0,21 | 0,17 | 0,27 | 1 |

Source : dans le texte.

¹ Ouverture au début des années 2000.

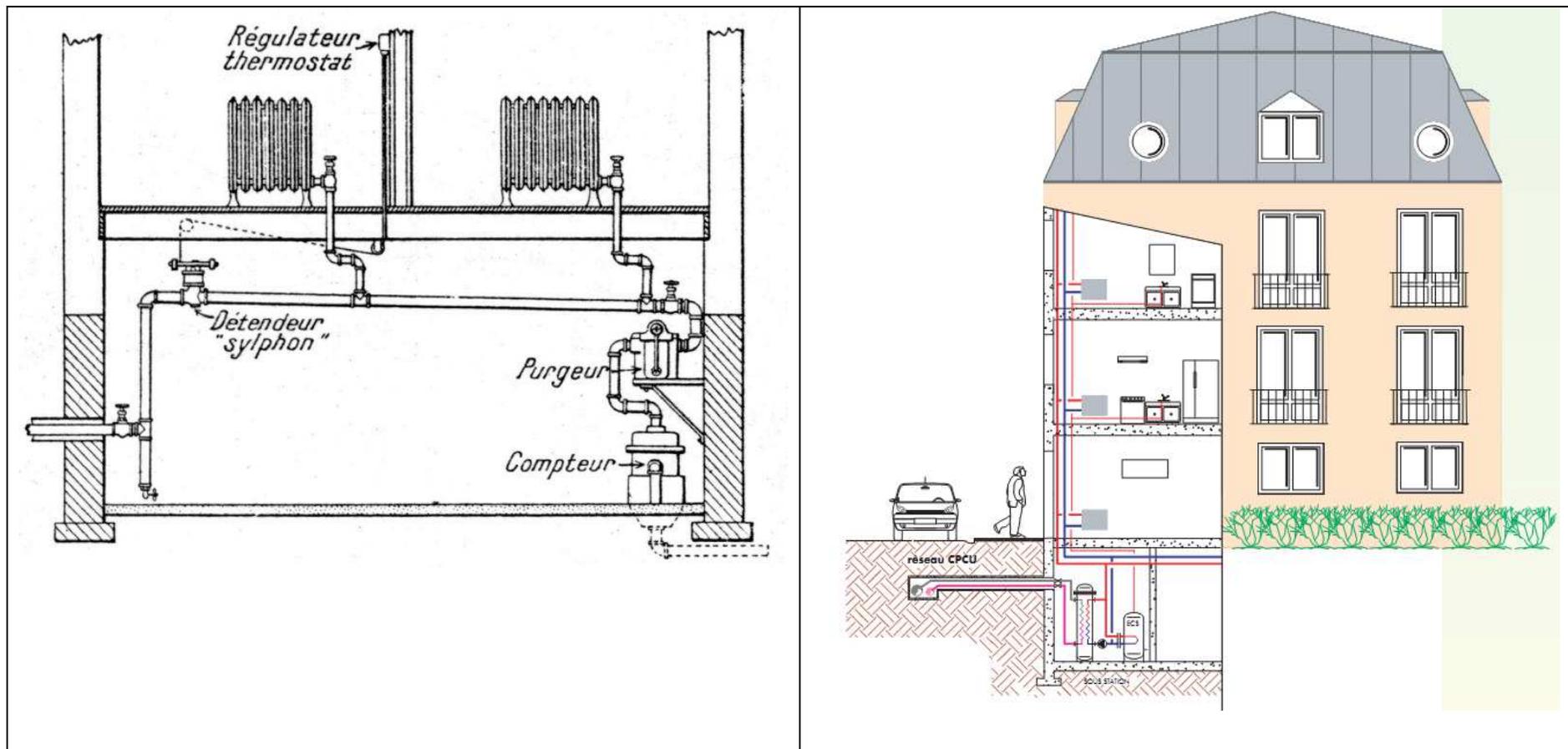


Figure 4.5.4. Schéma de raccordement au réseau de chauffage urbain: raccordement au réseau de chauffage urbain en 1918 (gauche), Coupe verticale de la sous-station de la CPCU en 2000 (droite). Source : Bousquet, 1918, p. 22, cité par : Gallo, 2006, CPCU, 2000.

(le fluide caloporteur (vapeur ou eau chaude) arrive depuis le réseau primaire de la CPCU jusqu'aux robinets d'arrêt du bâtiment, ici au sous-sol. Ce branchement (entre le réseau primaire et le réseau client) inclut une tuyauterie « aller » et une « retour ».)

L'EDF en Île-de-France produit également simultanément la vapeur et l'électricité. Selon notre principe d'allocation, on peut affecter la perte à chaque produit et à son consommateur, donc au prorata des productions de chaleur et d'électricité. On utilise cependant des données issues du producteur principal de la vapeur et de l'eau chaude du chauffage urbain, la CPCU. De ce fait, la chaleur livrée au réseau par la CPCU est mieux connue, mais la chaleur autoconsommée n'est pas toujours identifiée. Nous avons donc alloué la perte énergétique totale de la fabrication de la vapeur issue de la CPCU à la vapeur jusqu'à la fin des années 1980. A partir de 1990, nous avons alloué cette perte au prorata des productions de vapeur et d'électricité.

4.4. Coefficients primaires pour l'énergie importée de l'extérieur de la région Île-de-France

Electricité

Depuis 1930, les réseaux électriques locaux développés en France constituent peu à peu un réseau national. L'électricité produite à moyenne et à haute tension circule dans les réseaux et est consommée à un endroit non identifiable, qui dépend de la régulation instantanée des réseaux. En d'autres termes, il n'est pas possible de savoir d'où provient l'électricité qui est consommée en un point donné, et en particulier de distinguer, pour la consommation d'un territoire, ce qui est importé de ce qui est produit localement. Dans notre cas d'études, nous souhaitons définir la consommation de matières premières pour l'électricité consommée dans Paris et dans la région Île-de-France, ce qui repose sur deux hypothèses qui vont nous permettre de définir l'importation théorique : 1) seule l'électricité surproduite par la région est exportée à l'extérieur de celle-ci ; 2) la région importe la quantité qui correspond au déficit entre sa production disponible d'électricité et sa consommation finale régionale. L'électricité disponible pour la consommation finale régionale est définie comme la production électrique après la soustraction de la consommation interne des centrales et de la perte au réseau. En effet, pour la région Île-de-France, la production d'électricité disponible est toujours inférieure à la consommation régionale d'électricité comme le montre la figure 4.7. De ce fait, la région est toujours importatrice d'électricité à l'exception d'une année sur toute la période d'observation (voir la figure suivante). Quant au rendement de production d'électricité, on applique le rendement moyen de la production électrique régionale à l'électricité disponible dans la région

et le rendement moyen national à l'électricité importée de l'extérieur de la région (figure 4.7.2). La part de chaque source énergétique utilisée pour la production d'électricité en dehors de la région Île-de-France est définie selon la structure de la production d'électricité nationale par la pondération de chaque part de sources énergétiques à l'importation d'électricité régionale ; cela signifie que plus la part de l'importation électrique augmente dans la consommation régionale, plus le coefficient national (dit mix énergétique) pèse dans le calcul.

Les données sur la production électrique et sur la consommation de combustibles entre 1936 et 1950 sont issues de Barjot et al. (1991), puis entre 1950 et 1978, de Larroque (1997), ainsi que de l'Annuaire statistique de la France publié en 1985, qui présente la quantité de combustibles consommée pour la production électrique en France (INSEE, 1990a) (figure 4.6).

Comme évoqué précédemment, nous considérons que seul le déficit de l'électricité produite dans la région correspond à l'importation électrique (figure 4.7). Ensuite, sur la base de cette hypothèse, nous avons affecté proportionnellement le mix énergétique et le rendement de production électrique de la France à l'électricité importée et ceux de la région parisienne à l'électricité produite à l'intérieur de l'agglomération parisienne. Nous n'avons pas soustrait les matières premières consommées et l'électricité produite du secteur électrique de l'Île-de-France lors des calculs de mix énergétique et du rendement de production de l'électricité importée. C'est la raison pour laquelle entre 1946 et 1976, la part d'électricité importée est relativement faible. D'autre part entre 1976 et 2006, la part de l'électricité produite dans la région est faible par rapport à la production totale d'électricité de la France. On présente ci-après dans la figure 4.7 le rendement de production et le mix énergétique global de l'électricité consommée dans la région Île-de-France.

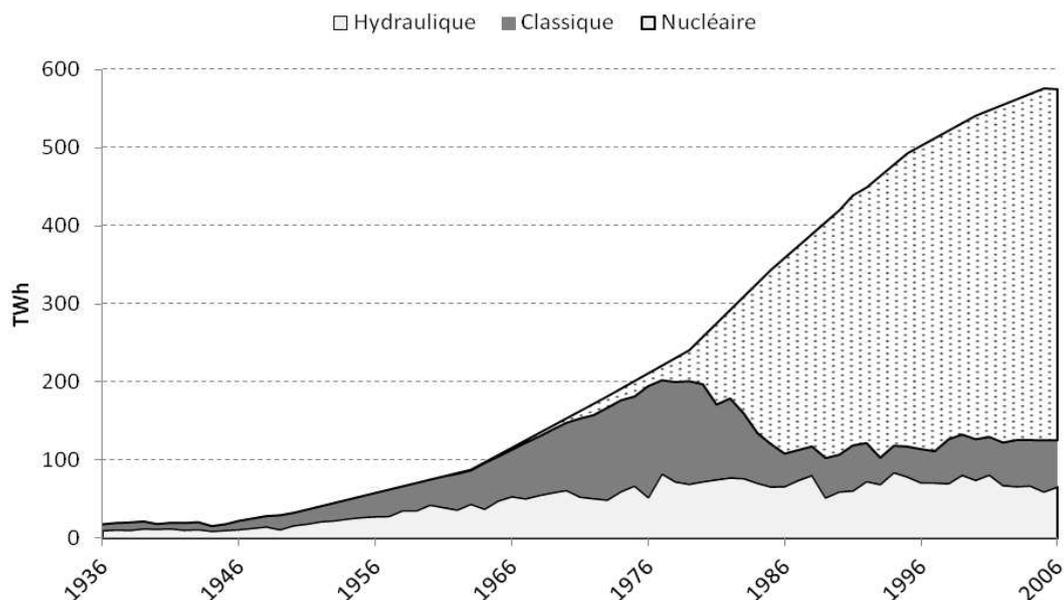


Figure 4.6. Structure de la production totale brute d'électricité de la France entre 1936 et 2006 (en TWh). Source : INSEE 1965, 1978, 1985, Larroque, 1997, DGEMP, 2007b.

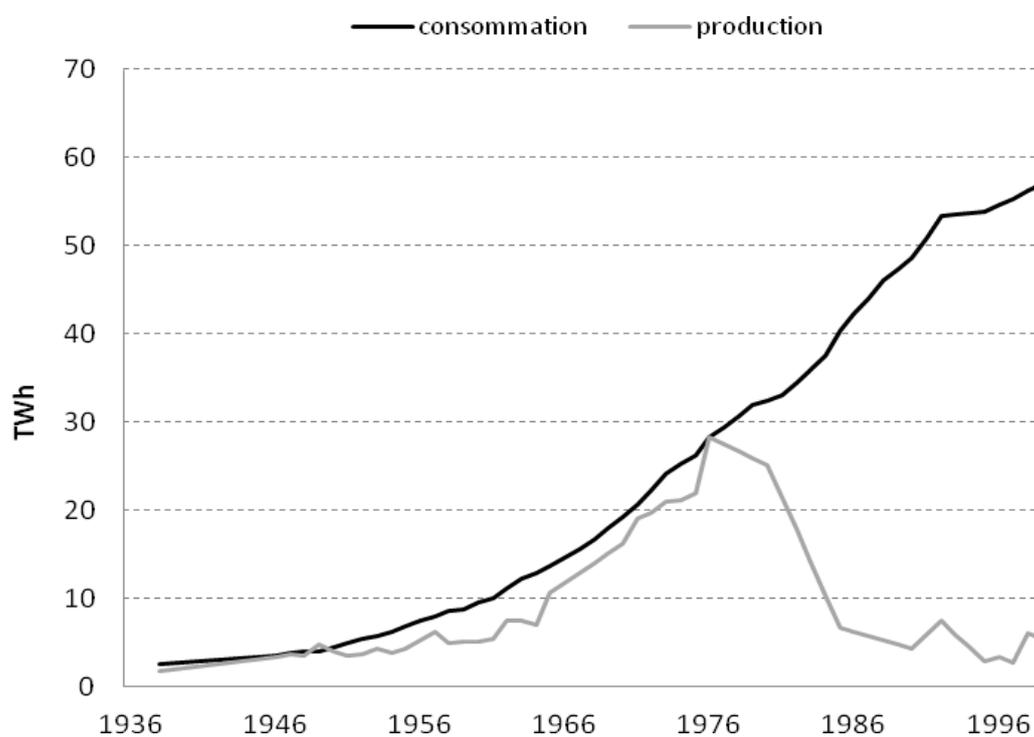


Figure 4.7. Consommation et production disponible de l'électricité dans la région parisienne entre 1938 et 2005 (en TWh). Source : dans le texte

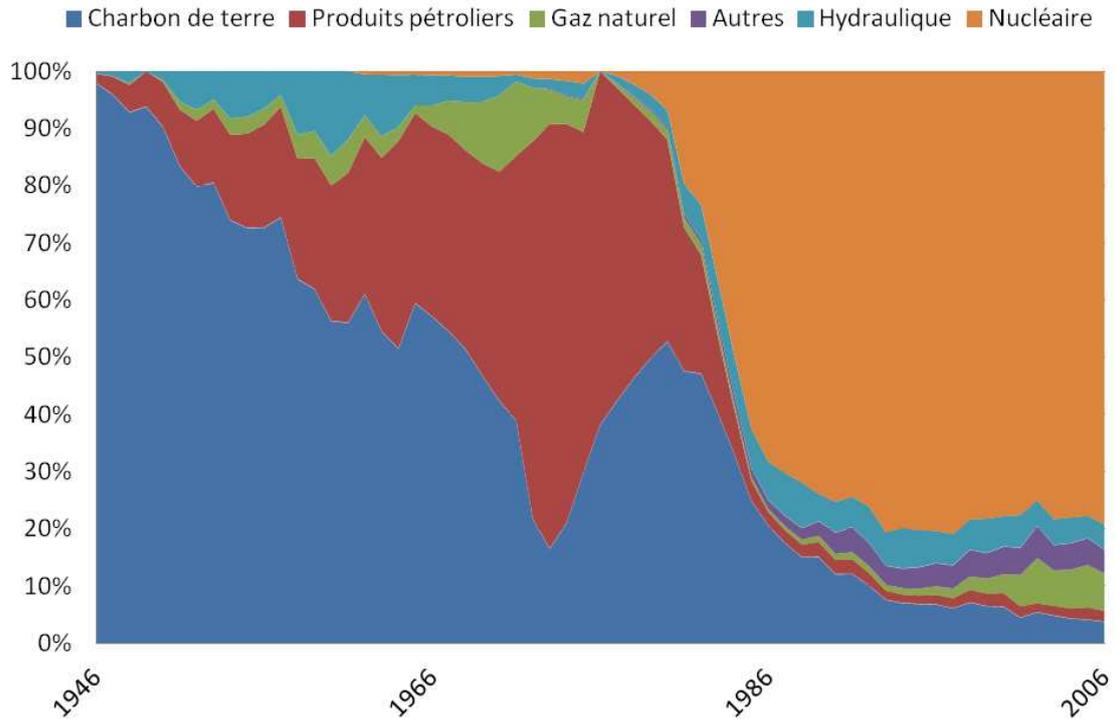


Figure 4.7.2. Mix énergétique de l'électricité consommée en Île-de-France (en considérant le mix d'électricité régionale et importée selon l'hypothèse faite). Source : cette thèse.

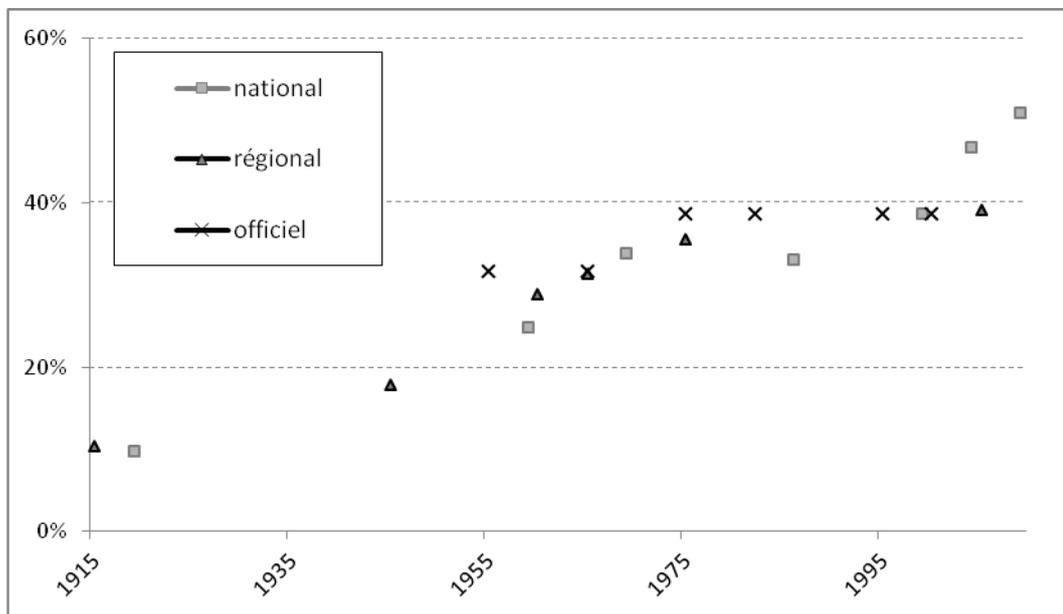


Figure 4.7.3. Rendements de production électrique entre 1915 et 2006. Source : cette thèse. selon des données de Malégarie, 1947, PEGASE (données de la consommation de combustibles et de la production d'électricité de l'Île-de-France), Observatoire de l'énergie, 1984a, INSEE, 1978, 1982, 1984.

4.5. Matière première et transformation de la biomasse

Cette sous section a pour but de décrire le métabolisme de la biomasse végétale dans le système actuel de production et de consommation alimentaire en France. On étudie ici quatre principaux produits agricoles consommés dans l'agglomération parisienne : céréales, betteraves sucrières, oléagineux et pommes de terre. Le but de cette étude est de connaître les facteurs déterminants les rendements des produits finaux alimentaires de ces quatre groupes de produits agricoles pour estimer la demande énergétique et de matière de la consommation finale.

4.5.1. Extraction de la biomasse

La statistique agricole ne porte que sur la production utile de biomasse au sens économique du terme. En revanche, la part de la production biologique végétale non valorisée (extraction non utilisée) présente de plus en plus d'intérêt en termes scientifiques et économiques : productivité biologique de l'écosystème d'une part, potentiel en matière et en énergie d'autre part¹. En effet, dans la physiologie végétale et dans l'agronomie dans une moindre mesure, la production biologique totale est prise en compte, notamment afin de mesurer l'efficacité de la reproduction biologique d'une plante. Dans ce cas, on calcule les flux physiques à travers une plante entière en matière sèche, en azote, en carbone ou en énergie (voir le chapitre 2). Le rendement biologique est donc différent du rendement agronomique (Bolinier et al., 1996).

La figure suivante montre le bilan de production et d'utilisation de céréales en France et est issu des données du bilan de céréales fourni par l'Agreste pour l'année 2007. Nous avons ajouté la part de matière non commercialisée (la quantité de paille) à ce bilan pour connaître la production biologique en amont. Il en résulte que le taux d'utilisation à des fins alimentaires pour l'homme représente 16% de la production commercialisée et à peine 10% de la production biologique totale, c'est-à-dire, sa production primaire nette (PPN ; *NPP*).

¹ Pendant longtemps, elle représente une quantité importante qui n'est pas prise en compte dans l'économie et son impact environnemental est sous-estimé (Smil, 1999).

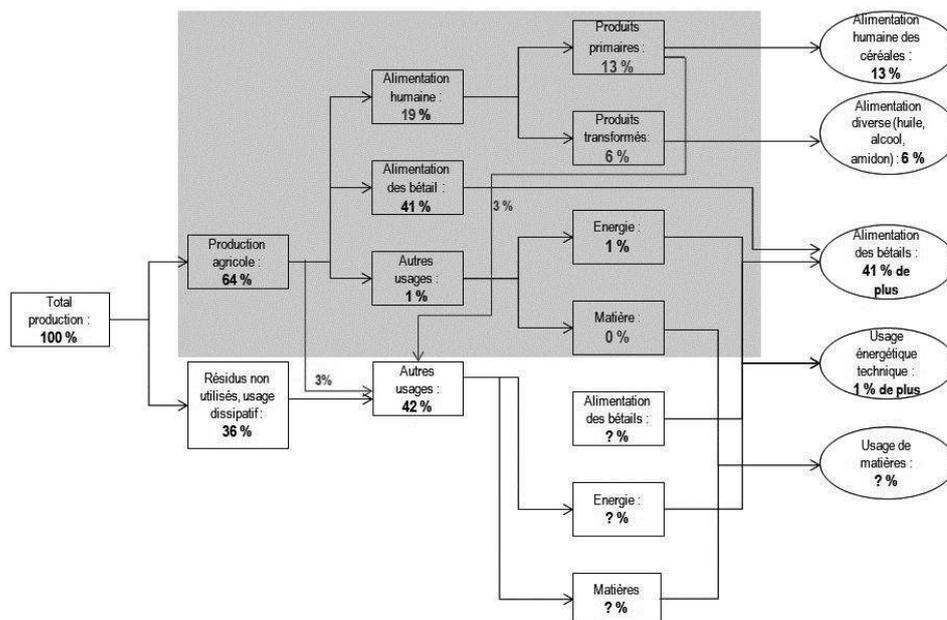


Figure 4.8. Chaîne de production et d'utilisation des céréales en France en 2007. Source : cette thèse selon les données de l'AGRESTE, 2009 Bilan de production et d'utilisation, céréale, (données pour 2007).

(la surface en gris désigne le champ couvert par la statistique officielle (Agreste, FAO) ; on a réévalué les données de l'Agreste en supposant que la production agricole représente 63 % de la production biologique totale, selon Risoud ; « Amidon » inclut l'amidon non alimentaire, faute de moyens de distinguer entre le produit alimentaire et celui non alimentaire.)

Indice de récolte (IDR)

L'indice de Récolte (IDR), « *Harvest Index* », est défini comme un rapport de la masse totale des grains récoltés à la masse d'une plante entière en matière sèche (Smil, 1999). Il est communément calculé à partir de la masse de paille et de grains (*total above-ground biological production*) comme suit¹ :

$$IDR = \frac{Mg}{Mr + Mg}$$

Où Mg est la masse de grain, et Mr la masse de paille.

¹La production biologique totale au-dessus de la surface du sol (*total above ground biological production*) sans compter la racine.

À partir de la production totale, on peut également définir le rendement de production biologique totale (*total above-ground biological production yield*), qui peut être défini comme suit :

$$Y_t = (M_r + M_g) \cdot ha^{-1}$$
$$= \frac{Y_g}{IDR}$$

Où Y_t représente le rendement de production biologique totale

Y_g représente le rendement de grain.

Cet indice varie selon le climat et le sol, ainsi que selon les espèces (Unkovich et al., 2010). Dans le cas des céréales, il se situe entre 0,4 et 0,6¹. Dans ce cas, un kilogramme de grain, en considérant sa productivité biologique totale en surface, représente 1,5 et 1,7 kg équivalent en matière brute sèche (MBS). On présente l'indice de récolte de différents produits agricoles selon différentes sources dans le tableau suivant 4.13.

L'indice de récolte issu de Smil est calculé en utilisant des données statistiques à partir de la quantité totale des résidus sur la biomasse totale extraite en additionnant ces derniers à la récolte de produits agricoles commercialisables. Néanmoins, les données de l'INRA sont issues de l'expérimentation directe sur un peuplement de plantes cultivées. Par ailleurs, la quantité de résidus théoriquement définie par cet indice n'est pas égale à la perte énergétique et de matière, compte tenu de la part d'usage dissipatif pour l'usage agricole, pour la restitution de carbone et de nutriment pour la fertilité du sol et de l'utilisation dans l'élevage notamment pour la litière. Cependant, compte tenu de la statistique actuelle, il est difficile de distinguer entre la perte dissipative et l'usage dissipatif. La statistique concernant le matériau de litière n'est pas assez fiable pour quantifier la quantité exacte de ce matériau dans l'élevage².

L'augmentation de l'IRD témoigne d'une amélioration du rendement agronomique (Unkovich et al., 2010). Selon la Statistique agricole de la France en 1908, l'IRD des céréales se situe alors en moyenne à 37 % à l'échelle nationale. Il est légèrement plus élevé en Île-de-France où il se

¹ L'indice de récolte (IDR), (*Harvest Index, HI*) proposé par Smil (1999, p. 300) pour les céréales est de 0,4 (tab 3) ; Voir également Hay, 1995 et Picard, 1991 (pour le maïs).

² Une part faible de paille récoltée est recensée dans la statistique agricole à partir de 2007. Cependant l'usage final de ce produit n'est pas connu.

situé à 39 %¹. L'amélioration du rendement agronomique semble en particulier avoir été réalisée après 1945 en termes d'IRD². Dans le cas de la région Île-de-France, l'IRD des céréales s'élève ainsi aujourd'hui à plus de 60 % (Risoud, 2000). L'IRD varie également selon la géographie. Dans le cas de la région Midi-Pyrénées, par exemple, l'IRD est encore plus élevée et se situe à 0,70. On retient donc 0,64 comme indice de récolte moyen pour les céréales pour l'Île-de-France.

Tableau 4.13. Indice de récolte selon diverse sources

| | Smil, 1999 | Wirsenius, 2000 | Risoud, 2000, Boyat et al. 1991 | Di Blasi et al., 1997 |
|----------------------------|------------|---|---------------------------------------|---|
| Unité | MS | MS | MS | Poids humide |
| Spécification géographique | Etats-Unis | Europe de l'ouest | France, nord | Italie |
| Céréale | 0,40 | 0,45 (riz, orge, maïs) ; 0,50 (blé) | 0,64 (blé) ; 0,47 (maïs) | 0,56 (orge) ; 0,59 (blé tendre, dur, avoine, riz) |
| Canne à sucre | 0,56 | - | - | - |
| Racine, tubercule | 0,40 | 0,50 (pomme de terre) | - | 0,71 (betterave sucrière, pomme de terre) |
| Légumes | 0,38 | - | | 0,29 (chou), 0,77 (tomate) |
| Fruits | 0,38 | - | | 0,83 (pêche) ; 0,91 (pomme, poire) (a) |
| Protéagineux | 0,49 | - | | 0,40 (grains légumineux) |
| Oléagineux | 0,52 | 0,35 (tournesol, palme, canola) ; 0,45 (soja, arachide) | | 0,33 (tournesol) |
| Autres cultures | 0,28 | | | |

Source : Smil, 1999, Risoud, 2000, Wirsenius, 2000. Oyat et al., 1991, cité par : Picard, 1991, Jölli, Giljum, 2005, Blasi et al., 1997. (a : Taille des arbres fruitiers)

¹ Statistique agricole en 1908.

² Unkovich et al. (2010) montrent une augmentation de l'IRD des céréales de 0,30 à 0,40 durant le XXe siècle en Australie. ; par exemple l'IRD pour le coton augmente de 0,20 à 0,30 entre 1900 et 1980 (National cotton council, 1990).

4.5.2. Filières de transformation des produits végétaux : taux d'extraction

Nous nous sommes tout d'abord intéressée à des données techniques sur la production des industries alimentaires pour connaître les facteurs multiplicatifs permettant d'obtenir la quantité de produits agricoles primaires correspondant à un produit fini consommé dans l'agglomération parisienne. En effet, ces facteurs multiplicatifs (coefficients d'extraction) dépendent des mutations techniques durant les XIXe et XXe siècles. De ce fait, on essaie d'obtenir ces coefficients d'extraction pour trois dates principales (début du XIXe siècle, fin du XIXe siècle et 2006-2007) en s'appuyant sur la littérature historique et contemporaine. Des données techniques sur le rendement des industries alimentaires sont fournies en grande partie par des syndicats professionnels ou par des offices agricoles : c'est le cas du Syndicat national des fabricants de sucre en France (SNFS), de l'Union générale des syndicats de la brasserie française (UGSBF), du syndicat professionnel pour la semoulerie et de l'Office National Interprofessionnel des Céréales (abrégé ONIC)¹. Ces syndicats professionnels datent de la fin du XIXe siècle et leurs annuaires sont des sources précieuses pour connaître l'état du nombre d'établissements et de la production industrielle. En revanche, ces données ont souvent des unités différentes et portent sur des étendues géographiques variables. Après 1950, ces syndicats professionnels demeurent les fournisseurs des données techniques. Toutefois, leurs données sont reprises par l'INSEE.

Pour la région Île-de-France, la série de bulletins de statistiques de la région parisienne, les mêmes que ceux qui ont été utilisés pour étudier l'énergie technique (voir le chapitre 3), récapitule quelques données sur les produits finis et sur le nombre d'établissements. Dans cette source, le nombre d'établissements est connu par département, pour la production de farine (meunerie), de sucre et d'alcool, alors qu'il n'est connu qu'à l'échelle régionale pour la biscotterie, la semoulerie et la brasserie entre 1950 et 1964. Néanmoins, à partir de 1991, l'Agreste rassemble les données sur la production commercialisée de l'ensemble des produits fabriqués par les industries agroalimentaires dans le but de fournir des données harmonisées et comparables entre les pays de la communauté européenne (AGRESTE, 2009b). Appelée enquête *Producom* (PRODUCTION COMMUNAUTAIRE), cette enquête renseigne la production des industries agroalimentaires en 43 grandes catégories et 409 sous catégories de produits. Ainsi,

¹ Entre autres, l'ONIC est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), voir http://www.ccomptes.fr/fr/CC/documents/CCFP/Bilan_reforme_offices_agricoles_et_ASP.pdf. ; INSEE, 1965

l'Agreste rassemble les données techniques sur le rendement de production (coefficient d'extraction) pour certains produits issus des syndicats et des offices agricoles précités.

Sur la base de ces données, nous avons défini des coefficients d'extraction de produits primaires pour un produit fini consommé pour chaque groupe d'aliments comme le montre le tableau 4.15. Ces coefficients d'extraction, comme indiqué dans le chapitre 2, correspondent à un rendement industriel. Les données historiques sont donc issues des syndicats professionnels de chaque filière d'industrie alimentaire directement ou indirectement par l'utilisation de sources de seconde main (Vivant, 1963, Schakenbourg, 2010, Knittel, 2007). Après 2007, ces coefficients d'extraction sont définis plus systématiquement par des organismes statistiques tels que l'Agreste et l'Eurostat ayant pour but d'établir un bilan de production et d'utilisation des produits agricoles harmonisé à l'échelle communautaire de l'Union Européenne.

Céréales

Pour les céréales, le coefficient d'extraction pour la meunerie représente la différence de matières entre le grain de céréales battu et la farine produite dans cette industrie¹. Ce coefficient connaît une légère augmentation au cours de notre période, où il passe de 65 % à 77 %, probablement en raison de l'amélioration de la technique de mouture². L'équivalence en céréales de produits finaux tels que la farine et le pain est obtenue, comme le montre le tableau suivant 4.15, à partir de rendements en farine (farine/céréale) par la multiplication de coefficients d'équivalence en farine du pain.

Oléagineux

Dans le cas des oléagineux, le taux d'extraction croît avec l'amélioration des techniques industrielles, mais également par la sélection des plantes oléagineuses cultivées. Selon la littérature du XIXe siècle, le taux d'extraction pour diverses huiles n'atteint pas alors 40%, par exemple entre 30 et 35% pour l'arachide, et le potentiel d'extraction reste de 8 à 10% dans les tourteaux (Figuié, 1873-1877). En comparaison, les coefficients d'extraction actuels de l'huile varient entre 35 et 45 % pour les grains d'oléagineux et se situent à environ 20 % pour le fruit

¹ La production de céréales est calculée sur la base de la quantité de grain battu à 15% d'humidité. Méthode pour Céréales, oléagineux et protéagineux (voir également le chapitre 3).

² Nous avons retenu la valeur moyenne située entre 65 et 70%, Enquête de moulin à céréale, Commission d'approvisionnement et de subsistance, 1851 ; pour la fin du XIXe siècle, selon Barles, 2007.

oléagineux (olive). De même, dans la région du nord, le taux d'extraction pour l'huile d'œillette n'atteignait au XIXe siècle qu'environ 28 à 29 %, alors qu'on extrait aujourd'hui environ 40% d'huile des grains oléagineux (AGRESTE, 2007a). Le coefficient d'extraction varie selon les espèces. Toutefois, la tendance de la consommation française d'huile par période montre une certaine préférence pour les grains oléagineux de haut rendement industriel (de taux d'extraction élevé). Dans la statistique agricole de la France de 1852 et de 1885, trois produits, le colza, la navette et l'œillette, occupent une place majeure dans les oléagineux : en particulier, le colza domine dans cette catégorie de produits (Ministère de l'agriculture, 1885). Dans les années 1960, la consommation française d'huile se fait essentiellement par l'huile d'arachide (60%)¹. L'huile de colza voit sa part augmenter depuis le début des années 1970 et l'huile de tournesol depuis les années 1980 ; l'importation d'huile de palme et de noix de coco, dont le taux d'extraction est très élevé, devient aussi importante. Dans les années 1990, les huiles de tournesol et de colza représentent environ 60% de la consommation française d'huile. Aujourd'hui, celle-ci se répartit entre trois types de produits, l'huile de colza, de tournesol et de palme, qui en représentent environ 70% et qui connaissent des taux d'extraction relativement élevés, situés entre 42 et 45 %. Nous n'avons pas de données exactes sur les produits oléagineux consommés à Paris. En revanche, compte tenu de la consommation nationale, nous avons adopté le coefficient de 42% comme taux d'extraction de l'huile pour 2006. Pour le début du XIXe siècle, on retient le taux de 30% selon les documents cités.

Betterave sucrière

Dans le cas de la sucrerie, le coefficient d'extraction représente la différence de matières entre la racine de betterave et le sucre produit. Le taux d'extraction varie selon la richesse en saccharose qui dépend des espèces et augmente avec l'amélioration de la technique de distillation². Le taux d'extraction, appelé également rendement industriel, est d'à peine 5% au début du XIXe siècle³. Au cours de la deuxième moitié du XIXe siècle, il s'élève à 7% grâce à l'amélioration technique de l'outillage et au perfectionnement de la technique de distillation. On atteint entre 7 et 10 % de rendement vers 1870 et ce premier taux (7%) a été fixé officiellement à partir de 1880 pour la perception de l'impôt de l'industrie sucrière, calculé sur la consommation de matières

¹ En termes de disponibilité alimentaire dont la définition a été discutée dans le chapitre 3, FAO, *Food Balance Sheets* 1961, 1962, 1972, 1982, 1992, 2002, 2005, [en ligne] [réf. du 4 déc. 2009], Disponible sur la toile : www.fao.org.

² La richesse en saccharose indique le rendement théorique maximal en sucre.

³ 5 kg de sucre (de bonne qualité) obtenus sur 100 kg de racines de betterave (Payen, 1832)

premières¹. A la fin du XIXe siècle, on adopte une espèce de betterave à haute teneur en saccharose (environ 15 à 17 %) et on généralise sa culture (Schnakenbourg, 2010). Aujourd'hui, le taux d'extraction du sucre atteint environ 15% (période 2000-2007), alors que le taux conventionnel se situe à 16%, ce qui signifie que la production industrielle de sucre en France atteint presque son rendement maximum (Agreste, 2007a).

Distillation de l'alcool industriel

La production d'éthanol issu de céréales ou de betterave et la production de l'ester méthylique d'huile végétale (EMHV), issues d'oléagineux et dénommés couramment biocarburants, se développent au cours des années 2000 en France. La consommation régionale renseignée dans la base PEGASE étant le pouvoir calorifique de ces produits finaux, valeur de l'éthanol et des huiles, il convient de connaître le taux d'extraction de ces produits pour définir la consommation en équivalent matière première et en équivalent énergétique primaire.

La distillation industrielle de l'alcool et de l'huile utilise différents types de biomasse, céréales, oléagineux, saccharifère : le blé, la betterave, le colza et le tournesol sont les produits les plus utilisés pour la production de l'alcool industriel. Dans le cas du rendement de la betterave, le taux d'extraction de l'alcool croît simultanément avec l'amélioration du rendement en sucre, puisque l'alcool de betterave (éthanol) est produit par la fermentation du sucre (Bonnet, Lorne 2009, Payen, 1861). Selon Payen, lorsqu'on extrait 5 à 7% de sucre, le taux de production d'alcool se situe entre 4,5 et 6 litres en alcool absolu (Payen, 1861), soit un taux d'extraction d'environ 0,045 et 0,060. Si l'on compare ces données à des données récentes, le rendement en alcool de la betterave dans la région Île-de-France se situe à environ 6 tonnes par hectare sur la base des données de 2007 (AGRESTE, 2008a). Cela signifie, en considérant le rendement de production agricole de 710 quintaux par hectare la même année, que le taux d'extraction d'alcool de betterave est de l'ordre de 0,085, soit un doublement en deux siècles. Pour le blé, le rendement en alcool est de 2 tonnes par hectare, alors que le rendement de production agricole est de 74 quintaux par hectare. Le taux d'extraction se situe donc à 0,270 pour l'alcool de blé. De même, dans le cas de l'huile de colza pour l'usage industriel (carburant), le rendement d'huile est de 1,4 tonne par hectare avec un taux d'extraction de 0,467.

¹ Le rendement légal du sucre de betterave en France était une mesure d'ordre stratégique et est utilisé également en Allemagne pour la même raison (Vivant, 1963, Schnakenbourg, 2010).

Tableau 4.14. Rendements de produits dits énergétiques en 2007

| | Rendement de biocarburant en tonne/hectare (a) | Rendement en tonne/hectare de produit agricole | Coefficient d'extraction en produit frais | Rendement énergétique en tep de carburant/ tonne de produits agricoles (b) | Remarque |
|----------------------------------|--|--|---|--|---|
| Alcool de betterave industrielle | 6,0 | 71,0 | 0,085 | 0,05 | Éthanol issu de betterave |
| Alcool de blé | 2,0 | 7,4 | 0,270 | 0,22 | Pour le rdt énergétique, éthanol issu de céréales |
| Huile de colza | 1,4 | 3,0 | 0,467 | 0,37 | Pour le rdt énergétique, EMHV oléagineux |

Source : a. Agreste, 2008a, b. Étude interne de l'Institut Français du Pétrole, selon Bonnet, Lorne, 2009 (Rdt : Rendement).

Tableau 4.15. Tableau de synthèse des coefficients d'extraction selon le principal type d'industrie alimentaire en Île-de-France (en matière fraîche)

| Secteur industrie alimentaire | Groupe d'aliments correspondant | Sous produits | Début XIXe | Fin XIX | 2006 |
|-------------------------------|---------------------------------|--|------------|---------|---------|
| Meunerie | Céréales | Farine (rendement en farine) (a) | 0,65 | 0,65 | 0,77 |
| | | Son (taux de blutage) | 0,35 | 0,35 | 0,23 |
| Boulangerie | Pain | Pain blanc en équivalent farine (b) | 1,28 | 1,28 | 1,54 |
| | | Pain blanc en équivalent céréale (c) = a X b | 0,83 | 0,83 | 1,19 |
| Sucrierie | Saccharifères | Sucre | 0,05 | 0,07 | 0,15 |
| | | Mélasses | - | - | 0,03 |
| | | Pulpe déshydratée à 90% d'humidité | - | - | 0,055 |
| Huilerie | Oléagineux | Huile | 0,30 | 0,38 | 0,42 |
| | | Tourteau, coques | 0,70 | 0,62 | 0,58 |
| Brasserie | Boisson alcoolisée | Céréales | 0,46 | 0,46 | 0,62 |
| Produits laitiers | Fromage, beurre | Fromage | | | 1,0 (c) |
| | Autres laitiers | Yaourt, lait gélifié | | | 1,0 (c) |

Source : a et b. pour 2006, Agreste, 2007, c. traitement comme sous produits du lait, pour le reste, dans le texte.

4.5.3. Matières premières consommées dans les filières de production de viande

La consommation de viande implique des flux de consommation indirecte de biomasse végétale, dont l'impact écologique est considérable. Cet impact croît avec la hausse de la consommation de ces produits (Smil, 2009). L'équivalent en matières premières est exprimé par l'indice de conversion d'aliments (FCR : *Feed Conversion Ratio*). Ce dernier mesure l'efficacité d'un animal en termes de conversion de fourrage en croissance, gain en poids vif, et est mesuré par l'entrée de fourrage en matière sèche par le gain de poids vif (NRC 1987). L'efficacité de conversion d'aliments est par conséquent exprimé par $\frac{1}{FCR} \times 100$ (en %). Par ailleurs, le facteur biologique est inférieur au facteur économique, puisque ce dernier inclut les pertes dues à la mortalité des animaux et au transport et par conséquent, le poids commercialisable d'un groupe d'animaux à la ferme est inférieur à la somme du poids de chaque animal.

L'équivalent en matières premières de la viande se situe entre 3 et 20 en pouvoir calorifique selon le type de viande et selon le procédé de production (Smil, 2009, Chatzimpiros, 2011). Toutefois, du fait que les animaux consomment à la fois des fourrages entiers et des sous-produits de transformation, l'évaluation de la consommation de viande en équivalent de biomasse végétale (en matière brute primaire) devient en partie un double compte avec l'évaluation de la consommation primaire de produits finaux végétaux (voir le chapitre 2) ; ce sont des résidus agricoles (paille), des coproduits (son) et des déchets issus des industries alimentaires (pulpe de betterave, pulpe de pomme de terre déshydratée, marc de raisin et de pomme, etc.) qui sont consommés. Ces matières doivent donc être soustraites pour éviter les doubles comptes (voir le chapitre 2).

La consommation de fourrages dans les filières de production de viande en France est étudiée dans le cadre du programme de recherche PIREN-Seine et de la thèse de Petros Chatzimpiros (2011). Il s'agit d'évaluer la consommation primaire et l'empreinte alimentaire pour les viandes porcine et bovine et pour le lait bovin qui constituent l'essentiel de la consommation parisienne de produits animaux. Les coefficients étudiés sont spatialisés à l'échelle régionale et pour trois dates principales : le début du XIXe, le début du XXe, et le début du XXIe siècle. L'unité principale est le Mcal de fourrages consommés par Mcal de carcasse obtenue en énergie brute (en pouvoir calorifique) et en tonne de matière sèche de fourrages consommés par tonne de carcasse obtenue. Nous allons présenter par la suite seulement un extrait de ces données pour des produits d'Île-de-France.

Tableau 4. 16. Coefficients primaires pour la consommation de produits animaux en Mcal de fourrage consommé par Mcal de carcasse obtenue et en tonne de fourrage par tonne de carcasse

| | Type de fourrages | Début XIXe | | Début XXe | | Début XXIe | |
|----------------|---------------------------------------|------------|----------------------------|-----------|----------------------------|------------|----------------------------|
| | | Mcal/Mcal | Tonne MS/tonne de produits | Mcal/Mcal | Tonne MS/tonne de produits | Mcal/Mcal | Tonne MS/tonne de produits |
| Viande bovine | Herbe | 21,2 | 16,8 | 6,8 | 5,4 | 10,1 | 8,0 |
| | Légumineuses | 8,3 | 7,0 | 8,5 | 7,2 | 1,9 | 1,6 |
| | Fourrages annuels | | | 3,3 | 2,6 | 5,4 | 4,2 |
| | Céréales | 1,5 | 1,2 | 3,3 | 2,6 | 2,4 | 1,8 |
| | Tourteaux | | | | | 0,5 | 0,4 |
| | Efficacité énergétique et de matières | 31,0 | 25,0 | 21,9 | 17,8 | 20,2 | 15,9 |
| Viande porcine | Céréales | 2,1 | 5,7 | 0,8 | 0,6 | 3,9 | 2,9 |
| | Racines | 3,1 | 2,4 | 6,7 | 5,3 | | |
| | Légumineuses | | | 1,0 | 0,8 | | |
| | Herbe | | | 1,3 | 1,0 | | |
| | Légumes secs | | | 0,6 | 0,5 | | |
| | Son de blé | 5,4 | | | | | |
| | Lait | 0,8 | 0,5 | | | | |
| | Tourteaux | | | 0,3 | 0,2 | 1,0 | 0,7 |
| | Efficacité énergétique et de matières | 11,4 | 8,5 | 10,7 | 8,4 | 4,9 | 3,6 |
| Lait bovin | Herbe | 5,5 | 5,5 | 5,1 | 5,1 | 0,5 | 0,5 |
| | Légumineuses | 2,7 | 2,7 | 2,5 | 2,5 | 0,1 | 0,1 |
| | Fourrages annuels | | | 1,3 | 1,3 | 2,8 | 2,8 |
| | Céréales | 1,3 | 1,3 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,3 |
| | Tourteaux | | | 0,0 | 0,0 | 1,1 | 1,1 |
| | Efficacité énergétique et de matières | 9,6 | 9,6 | 9,3 | 9,3 | 4,7 | 4,7 |

Source : Chatzimpiros, 2011.

La part de ces sous produits dans les aliments pour les animaux de ferme dépend de la production des industries alimentaires et de l'existence d'une filière de valorisation locale. Jusqu'au milieu du XXe siècle, la valorisation de ces produits était probablement systématique, compte tenu du fait que des grains fourragers (maïs, céréales pour le fourrage) n'étaient pas encore très importants et que le taux de valorisation des coproduits céréaliers et oléagineux était important (Académie d'Agriculture de France, 2005, Agreste, 2007c). Dans ce cas, la part de ces sous-produits serait déterminée par la production de chaque industrie alimentaire concernée, c'est-à-dire que la part de la pulpe croît simultanément avec la croissance de la production de sucre en France, par exemple. Ce n'est plus le cas au début du XXIe siècle où l'on importe de la pulpe de betterave comme on en exporte¹. Les filières ne s'organisent donc pas dans une logique d'économie de proximité. Pour cette part de résidus valorisés, nous disposons de données sur la consommation de matières premières utilisées pour la fabrication d'aliments pour le bétail issues de l'enquête Agreste entre 1973 et 2006 agrégées à l'échelle nationale. Pour 2006, cette consommation est connue à l'échelle régionale². La consommation indirecte de fourrages par la consommation de viande est majoritairement connue, et partiellement pour la valorisation de sous produits de transformation (notamment le tourteau). Dans le cas des céréales consommées pour la production de viande bovine dans le tableau 4.16., ils incluent les résidus de transformation issus de meunerie. Cette part n'étant pas connue, nous avons utilisé des données nationales de consommation de matières premières pour la fabrication d'aliments pour le bétail afin de soustraire la part de consommation de sous-produits de transformation faite pour la production de la viande consommée à Paris.

4.6. Conclusion

L'essor de l'énergie secondaire et la diversification des techniques de transformation énergétique sont marquants durant les XIXe et XXe siècles, de même qu'une amélioration significative des rendements de production et de distribution énergétique. Le gaz manufacturé pénètre chez les parisiens pour l'éclairage dès le début du XIXe siècle et peu à peu élargit ses marchés vers d'autres types d'usages tels que le chauffage et la force motrice industrielle. Quant à l'électricité, la possibilité de choix multiples en termes d'usage final entraîne une croissance

¹ Le portail de la betterave sucrière, [en ligne] [réf. du 7 oct. 2010], Disponible sur la toile : <http://www.labetterave.com/>

² Base de données datant du 2006 (AGRESTE, 2007c)

incessante du secteur depuis la fin du XIXe siècle. Le réseau de chauffage urbain, quant à lui, est conçu pour valoriser des déchets urbains devenus abondants dans Paris depuis la fin du XIXe siècle. Il connaît un essor durant les années 1950 – 1980. Ainsi, le rendement de production de gaz manufacturé croît de 65 à 90 % durant 1850-1950. Le rendement de production électrique s'élève de 10 à 50 % durant le XXe siècle. Par ailleurs, ces systèmes énergétiques techniques sont incorporés dans le sol de la ville ou apparaissent sous forme de réseaux aériens dans l'agglomération parisienne. Ils conduisent ainsi à un besoin croissant de gestion des voiries et de coordination des réseaux pour la municipalité.

Les réseaux physiques jouent un rôle important dans le métabolisme territorial de l'agglomération, puisqu'ils dissocient les lieux de consommation des lieux de production énergétique et par conséquent différencient considérablement les impacts environnementaux directs et indirects. De ce fait, le métabolisme industriel peut faire passer un certain nombre de flux de directs à indirects et vice versa selon la localisation géographique des centrales de production. Dans le cas de l'agglomération parisienne, on remarque une spécialisation du territoire de la banlieue de la Seine pour la production énergétique entre 1880 et 1970. La localisation des secteurs énergétiques est expliquée par une conjonction de facteurs politiques, techniques, spatiaux, environnementaux. L'amélioration de la performance des réseaux techniques permet aux entreprises de faire reculer leurs centrales de production des lieux de la consommation : cet effet reste modeste pour le gaz et pour la vapeur mais considérable pour l'électricité. Pour les entreprises, le besoin d'espace devient croissant en parallèle avec la croissance de la consommation qui nécessite d'augmenter la capacité de production et de stockage. La pression locale environnementale éloigne également les industries lourdes et polluantes vers l'extérieur de la ville. Ces trois facteurs semblent fonctionner de façon réciproque. L'urbanisation et la croissance de la population de l'agglomération durant les XIXe et XXe siècles seraient un facteur augmentant la concurrence spatiale entre la zone d'habitat et les zones industrielles.

Chapitre 5. Bilan de l'énergie et des matières

5.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus en lien avec le chapitre 3 pour les périmètres d'étude et pour les données de base pour la consommation finale, et avec le chapitre 4 pour les coefficients utilisés pour obtenir la consommation primaire. Les résultats sont présentés en masse d'une part et en énergie d'autre part : en milliers de tonnes/an et en kg/hab/an pour la première et en PJ PCS/an et en GJ PCS/hab/an pour la deuxième. Dans les sections 5.2 à 5.5 qui concernent chaque énergie et différents territoires, le résultat est exprimé en PJ PCI/an ou en GJ PCI/hab/an, tandis que dans le résultat d'ensemble de la section 5.6, le résultat est exprimé en PJ PCS/an et en GJ PCS/hab/an¹. Le bilan en masse est un indicateur du débit annuel de matières transportées pour l'approvisionnement énergétique de la ville. Ainsi, il permet d'estimer la dimension des infrastructures liées à cet approvisionnement en énergie. La valeur en matière sèche permet notamment de comparer la consommation de chaque groupe de la biomasse alimentaire. Le bilan en pouvoir calorifique permet de mesurer l'énergie disponible pour la consommation finale et primaire pour les habitants.

La section suivante 5.2 présente la consommation de combustibles de la ville de Paris tels qu'ils sont recensés par l'octroi en utilisant les facteurs de conversion de masse volumique déterminés dans le chapitre 3. La section 5.3 discute la consommation de l'agglomération parisienne selon la méthode définie dans le chapitre 3 (section 3.1). La section 5.4 a pour objet d'établir un bilan de matières et d'énergie des secteurs de transformation énergétiques régionaux et fait le lien avec la section 5.2 et la section 5.3 pour évaluer la consommation primaire énergétique de nos territoires. La section 5.5 présente ensuite le bilan alimentaire. Enfin, la section 5.6 vise à donner une vue d'ensemble sur le bilan de matières et d'énergies de nos territoires et discute ces résultats en lien avec l'urbanisation de la région Île-de-France et avec le changement dans les usages énergétiques finaux.

¹ PCS : pouvoir calorifique supérieur, PCI : pouvoir calorifique inférieur. L'écart entre PCS et PCI correspond à la chaleur latente perdue lors de la combustion (des combustibles tels que le charbon de terre, le pétrole et le gaz). Nous avons discuté le choix de l'unité du compte du joule en PCS dans la section 2.3.2.

5.2. Consommation de combustibles de la ville de Paris entre 1801 et 1943

5.2.1. Consommation de combustibles de la ville de Paris recensés par l'octroi

Dans cette sous-section, la consommation de combustibles de Paris issue de l'octroi est présentée « telle quelle ». Nous avons seulement enlevé les données comprises entre 1869 et 1871, 1914 et 1918, et 1939 et 1945, périodes de guerre, durant lesquelles les données de l'octroi ne représentent pas la consommation habituelle de la ville de Paris dans la figure de la consommation par habitant en kg/hab en moyenne décennale (figure 5.1), mais elles sont intéressantes à observer dans la courbe de la consommation totale par an (figure 5.2). A partir des données de l'octroi, la consommation moyenne décennale de chaque combustible est obtenue en kg/hab/an, comme le montre le tableau suivant. Compte tenu de la variation annuelle qui est extrêmement importante, on retient ces valeurs moyennes, qui sont plus représentatives, et que l'on va discuter.

Selon le résultat présenté dans le tableau suivant, sur l'ensemble des périodes durant lesquelles existe le registre de l'octroi entre 1801 et 1943, la consommation totale de tous les types de combustibles atteint une valeur maximale de 1643 kg/hab/an en 1804, la moyenne décennale de 1801-1810 se situant à 1356 kg/hab/an. Par la suite, les combustibles consommés à Paris ne cessent de diminuer en masse. La consommation est de 900 kg/hab/an en 1860, puis de 560 kg/hab/an en 1877, atteignant alors le niveau minimal de la période couverte par l'octroi, soit une baisse d'un facteur 2,3 en 76 ans. Quant aux sources énergétiques primaires, elles connaissent un changement important. La consommation de bois et de charbon de bois (dans la suite du texte, biomasse forestière) à Paris est estimée à 1572 kg/hab/an en moyenne décennale entre 1801 et 1810, soit 99 % de la consommation totale de combustible. La baisse n'est observée qu'après 1835, date qui correspond grosso modo à la fin de la crise du bois dans le bassin d'approvisionnement de Paris. La consommation de combustibles issus de la biomasse forestière tombe à 559 kg/hab/an en moyenne entre 1851 et 1860, soit une division quasiment d'un facteur trois en un demi-siècle. Par ailleurs, la consommation de charbon de bois occupe de plus en plus de place dans la biomasse forestière, s'élevant de 3,8 à 11,5 % entre les décennies 1801-1810 et 1851-1860. A la même période, la consommation de charbon de terre, quant à elle, s'élève de 19 kg/hab/an à 333 kg/hab/an, soit d'un facteur 17,5 durant un demi-siècle. C'est au cours des années 1850, que Paris consomme autant de charbon de terre que de combustibles issus de la biomasse forestière.

Tableau 5.1. Consommation de combustibles en moyenne décennale par habitant par an de la ville de Paris entre 1801 et 1943 selon l'octroi de Paris

| En kg/hab/an | Bois | | | | | | Charbon de terre | | Total | Taux de croissance annuel % |
|--------------|----------|-------------|--------|-----------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|-------|-----------------------------|
| Années | Bois dur | Bois tendre | Autres | Charbon de bois | Total (y.c. le charbon de bois) | taux de croissance annuel % | Charbon de terre | Taux de croissance annuel % | | |
| 1801 - 1810 | 1135 | 209 | 169 | 59 | 1572 | | 19 | | 1591 | |
| 1811 - 1820 | 989 | 110 | 134 | 60 | 1293 | -1.9 | 51 | 10.4 | 1344 | -1.7 |
| 1821 - 1830 | 935 | 136 | 117 | 63 | 1251 | -0.3 | 86 | 5.4 | 1337 | -0.1 |
| 1831 - 1840 | 698 | 108 | 113 | 65 | 984 | -2.4 | 113 | 2.8 | 1098 | -2.0 |
| 1841 - 1850 | 488 | 83 | 100 | 65 | 736 | -2.9 | 196 | 5.7 | 932 | -1.6 |
| 1851 - 1860 | 349 | 98 | 48 | 64 | 559 | -2.7 | 333 | 5.4 | 892 | -0.4 |
| 1861 - 1870 | 217 | 97 | 35 | 62 | 410 | -3.1 | 398 | 1.8 | 809 | -1.0 |
| 1871 - 1880 | 174 | 87 | 26 | 56 | 343 | -1.8 | 419 | 0.5 | 762 | -0.6 |
| 1881 - 1890 | 129 | 78 | 18 | 46 | 270 | -2.4 | 480 | 1.4 | 750 | -0.2 |
| 1891 - 1900 | 92 | 65 | 12 | 31 | 200 | -3.0 | 583 | 2.0 | 783 | 0.4 |
| 1901 - 1910 | 71 | 62 | 7 | 15 | 155 | -2.5 | 611 | 0.5 | 765 | -0.2 |
| 1911 - 1920 | 62 | 47 | 3 | 8 | 122 | -2.4 | 624 | 0.2 | 745 | -0.3 |
| 1921 - 1930 | 67 | 31 | 0 | 6 | 104 | -1.6 | 615 | -0.1 | 719 | -0.4 |
| 1931 - 1940 | 24 | 17 | 0 | 3 | 44 | -8.2 | 742 | 1.9 | 787 | 0.9 |

Source : dans le chapitre 3 (Les données de l'octroi pour le charbon de terre existent à partir de 1803. Les données entre 1869 et 1871, entre 1914 et 1918, et entre 1939 et 1943 ne sont pas prises en compte.).

Le changement de combustible entraîne en effet une économie de matière d'un facteur 3,3 dans la consommation en kg par habitant par an entre la décennie 1801-1810 et 1871-1880. Cette diminution a été rendue possible grâce au gain énergétique par tonne de matière transportée, puisque le bois a un pouvoir calorifique compris entre 6 et 12 GJ par tonne (pour un taux d'humidité de 20%), alors que le pouvoir calorifique du charbon de terre est compris entre 18 et 30 GJ PCS par tonne de matière, soit plus de 3 fois plus de quantité énergétique obtenue par tonne de matière. Néanmoins, cette diminution est contrebalancée par une croissance démographique de Paris d'un facteur 3,7 entre 1801 et 1877. La consommation totale par an de combustibles reste comprise entre 0,71 et 1,13 million de tonnes par an entre 1801 et 1855 (Figure 5.1). Puis, entre 1855 et 1910, elle croît de 1,13 à 2,04 millions de tonne en termes de consommation totale par an avec une consommation totale par habitant relativement stable d'une valeur moyenne variant entre 719 et 787 kg/hab/an. Par ailleurs, la chute de la consommation de charbon de terre, qui passe à 324 kt en 1859, est probablement liée à l'importation de charbon de terre destiné aux usines à gaz qui n'est pas comptée par l'octroi à partir de cette date (voir la figure 5.2). On regardera son effet dans la section 5.4. Toutefois, l'élargissement du périmètre de Paris en 1860 n'a pas d'effet significatif sur la consommation totale de combustibles en kg par habitant par an, consommation s'élevant à 674 kg/hab/an en 1860.

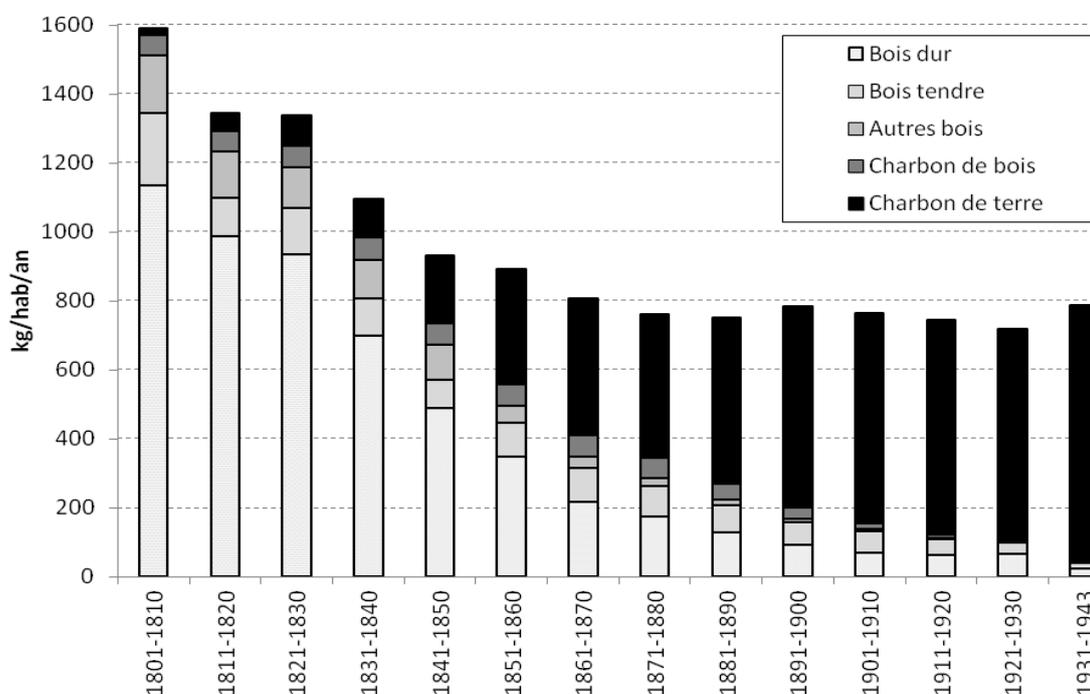


Figure 5.1. Structure de la consommation de combustibles de la ville de Paris. Source : Octroi de Paris, dans le texte du chapitre 3.

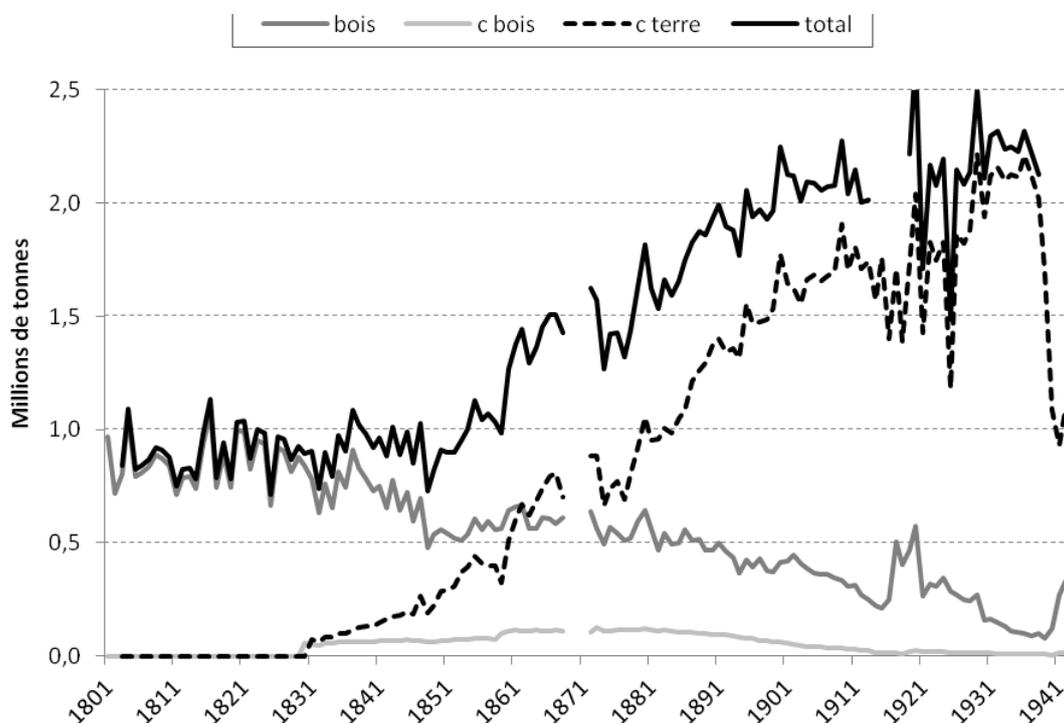


Figure 5.2. Consommation de combustibles de la ville de Paris recensée par l'octroi en kg/hab/an (haut) et en kt/an (bas). Source : Octroi de Paris, dans le texte du chapitre 3.

5.2.2. Estimation de la consommation parisienne selon le périmètre de «Paris 2006»¹

Essayons maintenant d'estimer la consommation de combustibles pour le périmètre de «Paris 2006» comme défini précédemment dans le chapitre 3. En 1848, la population de la ville de Paris dépasse un million d'habitants. La population située alors à l'extérieur de la ville de Paris, mais à l'intérieur du périmètre de «Paris 2006», résidant entre l'enceinte des Fermiers Généraux et le mur de Thiers, compte 166 000 habitants, soit 14 % de la population de «Paris 2006». Pour estimer la consommation de cette population, on a distingué les données de l'arrivage du bois

¹ Population de «Paris 2006» désigne la population résidant dans le périmètre actuel de la ville de Paris (voir chapitre 3).

entre 1808 et 1845 (voir le chapitre 3) Durant la première moitié du XIXe siècle, l'arrivage en tonnage ne change guère et se situe environ à 1 million de tonnes. La consommation parisienne de bois en tonnage total par an ne baisse non plus jusqu'en 1829. L'écart entre l'arrivage et la consommation parisienne de bois en kt/an devient important à partir de 1829 sauf sur certaines années entre 1836 et 1838, en raison de la hausse ponctuelle de la consommation parisienne de ce produit. Après 1838, l'écart montre une tendance plus claire à la hausse (figure 5.3). Comme évoqué plus haut, les données sur l'arrivage du bois dont nous disposons ne sont pas utilisables lorsque la destination n'est pas connue (voir le chapitre 3, section 3.2). De ce fait, on affecte cet arrivage à la population selon différents périmètres pour comparer la consommation en kg/hab/an. Si l'on divise cette quantité par la population agglomérée de Dupeux, on obtient 1257 kg/hab/an en 1825 et 1368 kg/hab/an en 1845 (tableau suivant 5.2). Cette hausse est douteuse, puisque la consommation parisienne à l'intérieur du mur d'octroi diminue de 1251 kg/hab/an à 736kg/hab/an. Lorsque l'on divise ces arrivages par la population du département, la consommation par habitant par an se situe à 1031 kg/hab/an pour 1825 et 743 kg/hab/an pour 1845, sur la base de l'hypothèse d'une part de bois entré par la route de 7%, part de transport connue pour 1828. Si l'on effectue le même calcul avec la population de «Paris 2006» corrigée, on obtient 1136 et 831 kg/hab/an respectivement pour 1825 et pour 1845, la consommation de la banlieue avant 1860 en kg/hab/an étant alors un peu plus élevée que celle de la ville de Paris. Ce résultat est compréhensible, puisqu'il existait peu de population en dehors de Paris en 1825, alors qu'en 1845, la population de la zone annexée à Paris en 1860 devient plus importante (voir la figure 3.4 dans le chapitre 3).

Quelle valeur retenir pour la consommation en kg/hab/an pour «Paris 2006» au cours de cette période ? En tenant compte de l'urbanisation qui la caractérise, la consommation totale finale unitaire pour ce territoire devrait augmenter, plutôt que diminuer en termes énergétique. La consommation de bois en kg/hab/an sera donc définie selon l'existence et la disponibilité d'un autre combustible de substitution. Toutefois, ce territoire n'était pas entièrement urbanisé, mais incluait des terrains agricoles et une population agricole lors de l'extension en 1860¹. Par conséquent, la consommation ne doit pas être élevée par rapport à la consommation en kg/hab/an de la ville de Paris. Quant au substitut, comme nous allons le voir dans les pages suivantes, il n'est pas encore utilisé par les habitants de ce territoire et la consommation finale de charbon de terre de la banlieue avant 1860 est nulle. Nous avons donc retenu la valeur de l'arrivage divisée par la population de «Paris 2006» et affecté la consommation en kg/hab/an

¹Le territoire de Paris 2006 est presque entièrement urbanisé en 1870 (Lecoin, 1977).

pour la population résidant dans le périmètre de Paris 2006 pour la période entre 1825 et 1845 (tableau 5.2). Entre 1845 et 1860, la consommation par habitant par an est obtenue par l'interpolation de cette valeur obtenue pour 1845 et la consommation par habitant par an de la ville de Paris de 1860.

Dans le cas du charbon de terre, les données issues de la Statistique de l'industrie minérale et des appareils à vapeur indiquent précisément la consommation selon le département, ce qui donne une consommation en kg/hab/an pour 1838 et 1845 pour «Paris 2006» (ainsi que pour l'agglomération parisienne) (tableau 5.3). Rappelons que ces données incluent la consommation des usines à gaz, qui n'est pas une consommation réalisée directement par les habitants. De ce fait, le charbon de terre consommé par les industries gazières doit être soustrait de la consommation de la ville de Paris et de la banlieue en considérant leur localisation (voir le chapitre 4). En 1838 et en 1845, la consommation de charbon de terre de la ville de Paris se situe respectivement à 125,4 kt/an et 195,3 kt/an, alors que la consommation du même produit dans le département de la Seine se situe à 132,9 kt/an et 210,3 kt/an aux mêmes années respectivement. Compte tenu de la consommation du charbon de terre de l'industrie gazière, qui est plus importante que l'écart entre les consommations de Paris et de la Seine, le calcul de la consommation finale en kg/hab/an pour la banlieue donne des résultats négatifs (tableau suivant). On suppose que ce résultat est dû à notre méthode d'estimation de la consommation de charbon de terre du secteur gazier à l'intérieur de la ville de Paris et à l'extérieur de la ville suite à une interpolation entre deux valeurs, ou selon la part de consommation dans chaque territoire (de Paris et de la banlieue) estimée selon leur puissance installée (en nombre de cornues, voir le tableau 4.1). L'écart produit entre la consommation de la banlieue, obtenue par la statistique et par l'enregistrement de l'administration, et le charbon distillé en banlieue, estimé selon la méthode présentée dans le chapitre 4, se situe à 30% pour 1838 et à 33 % pour 1845. La consommation totale de combustibles du secteur gazier étant connue, nous avons attribué le charbon importé en banlieue entièrement au secteur gazier et corrigé la part de charbon distillé dans la ville de Paris et en banlieue pour 1838 et pour 1845 comme le montre le tableau suivant. Par conséquent, la consommation finale de charbon de terre pour la population résidant dans le territoire de la banlieue avant 1860 devient nulle.

Tableau 5.2. Arrivage de bois comparé à la consommation de Paris recensée par l'octroi entre 1808 et 1845

| | Arrivage total | Octroi | Octroi_moyenne décennale non compris le charbon de bois | Octroi/arrivage | Arrivage/population de la Seine | Arrivage/population agglomérée de Dupeux | Arrivage/population de «Paris 2006» (valeurs choisies pour la consommation de Paris 2006) | (Arrivage- conso parisienne du bois)/populat ion de la Banlieue avant 1860 | Ecart entre la consommation de la banlieue avant 1860 et celle de Paris (Conso. de la banlieue par rapport à la conso. Parisienne) |
|-------|----------------|--------|---|-----------------|------------------------------------|--|---|--|--|
| | (7% route) | | | (7% route) | | | | | |
| unité | Kt | kt | kg/hab/an | % | kg/hab/an | kg/hab/an | | kg/hab/an | % |
| 1808 | | | 1513 | 91% | | 1273 | | | |
| 1825 | 908,2 | 695,9 | 919 | 70% | 1031 | 1257 | 1136 | 1746 | 90% |
| 1845 | 987,8 | 648,6 | 671 | 53% | 743 | 1368 | 831 | 1132 | 69% |

Source : dans le chapitre 3

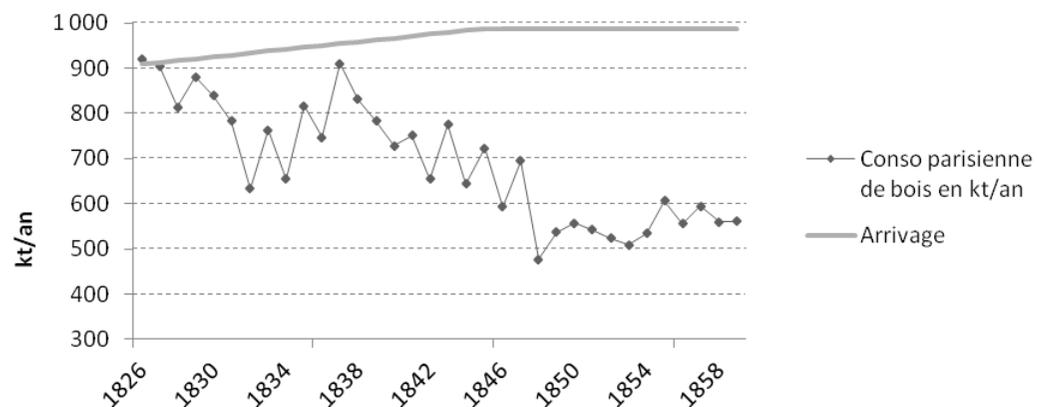


Figure 5.3. Consommation parisienne de bois selon l'octroi comparée à l'arrivage en kt/an entre 1826 et 1860. Source : dans le texte

Tableau 5.3. Consommation de charbon de terre de Paris et de la Seine entre 1825 et 1845

| | Consommation parisienne selon l'octroi : A | Seine : B | Seine – Paris : B – A | Consommation du secteur gazier, valeurs interpolées : C | | | Consommation finale unitaire parisienne : (A – C1) /population de la ville de Paris | Consommation finale unitaire de la banlieue : ((B-A) – C2)/ population de la banlieue avant 1860 | Consommation du secteur gazier corrigée | |
|-------|--|-----------|-----------------------|---|---|------------------------------------|---|--|---|---|
| | | | | totale | Dont consommation à l'intérieur de Paris : C1 | Dont consommation en banlieue : C2 | | | Part de consommation à l'intérieur de la ville de Paris | Part de consommation à l'extérieur de la ville de Paris |
| Unité | Kt | kt | kt | kt | kt (%) | kt (%) | kg/hab/an | kg/hab/an | kt (%) | kt (%) |
| 1825 | 59,8 | 83,9 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1838 | 125,4 | 132,9 | 7,5 | 17,2 | 19,1(64%) | 10,7 (36%) | 116,3 | -0,01 | 22,3 (75%) | 7,5 (25%) |
| 1845 | 195,3 | 210,3 | 15,1 | 26,8 | 32,9 (59%) | 22,6 (41%) | 157,8 | -0,01 | 40,4 (73%) | 15,1 (27%) |

Source : dans le texte. (la banlieue avant 1860 est la zone annexée à Paris en 1860 ; la consommation du secteur gazier en 1845 est une valeur moyenne entre 1843-1847).

5.3. Consommation énergétique du département de la Seine entre le début du XIXe siècle et 1967

5.3.1. Consommation de charbon de terre du département de la Seine entre 1838 et 1967

Selon les données issues de l'octroi, à partir de la décennie de 1861-1870, le taux de croissance annuel de la consommation de charbon de terre par habitant par an diminue et de façon plus considérable à partir de décennie de 1871-1880 (tableau 5.2). En effet, la délocalisation d'entreprises parisiennes vers la banlieue ainsi que la création de nouvelles entreprises hors les murs de Paris sont nombreuses au cours des années 1870 (Daumas, 1976). Cette délocalisation accompagne certainement l'extension d'ateliers, de locaux de stockage de combustibles, ainsi que une augmentation de la puissance des machines. Nous interrogeons donc la consommation effectuée à l'extérieur de la ville de Paris en lien avec l'industrialisation et l'urbanisation de la banlieue dans l'agglomération parisienne. Nous avons déjà distingué les données sur la consommation de charbon de terre issues de l'Annuaire de la statistique de la France (voir le chapitre 3, section 3.2.2). Toutefois, la consommation du bois qui n'est pas connue reste encore à estimer pour ce territoire à partir de 1876 pour estimer la consommation de l'agglomération parisienne.

Revenons à la situation d'approvisionnement en bois au milieu du XIXe siècle. Le développement de réseaux de chemin de fer commence en effet dans les années 1830 (dès l'ouverture de la ligne Paris-Orléans). À partir de 1845, l'arrivage du bois par la voie d'eau diminue, de façon considérable à partir de 1855. À l'inverse, l'importation de charbon de terre devient importante à Paris. Depuis le milieu des années 1860, le prix de transport de charbon de terre par tonne kilomètre pour le chemin de fer arrive en effet au même niveau que celui de la voie d'eau dans le bassin de la Seine (Kim, Barles, 2012). De plus, la découverte des mines de charbon dans le Nord-Pas-de-Calais et leur exploitation commencée en 1851 changent la situation de l'approvisionnement de Paris en faveur de charbon de terre ; les échanges de ce produit durant les années 1860 entre Paris et la région du nord (le Nord-Pas-de-Calais et la Belgique) ne cessent de croître (Minard, 1858-1861). Dans cette situation d'approvisionnement de Paris dans les années 1850 et 1860, qu'arrive-t-il à la consommation de bois en banlieue ? Dans Paris, la consommation de bois, notamment celle de bois dur diminue considérablement (voir figure 5.1) en raison notamment du changement de mode de chauffage domestique,

d'abord dans les classes plus aisées, qui peuvent se permettre l'investissement couteux correspondant (Badré, 1978). Il est donc plausible que le chauffage au charbon en banlieue ne devienne courant qu'à partir du milieu du XIXe siècle.

L'approvisionnement en charbon de la banlieue ne fait pas l'objet d'une organisation spécifique, car l'approvisionnement de la région parisienne en tout type de produit avait pour but d'assurer la consommation de la capitale et non celle de la banlieue. La diminution de la consommation domestique de bois est probablement arrivée en banlieue à partir de 1850, vu le rythme croissant de la consommation de charbon de terre. Cette hypothèse est vraisemblable (voir la page suivante). Néanmoins, de quel ordre de grandeur la consommation de la banlieue diminue-t-elle ? Dans Paris, le bois connaît un déclin définitif durant la deuxième moitié du XIXe siècle et sa part retombe en dessous de 50% dans la consommation totale d'énergie technique à partir des années 1870. A l'échelle de l'agglomération, la transition de combustibles entre le bois et le charbon de terre dans les industries semble s'être accomplie à cette période. Nous avons donc fait l'hypothèse que la consommation du bois par habitant par an à partir de 1876 est homogène sur l'ensemble de l'agglomération parisienne.

La consommation de charbon de terre dans le département de la Seine, quant à elle, s'élève de 2 millions de tonnes à 5,3 millions de tonnes entre 1878 et 1909 (figure 5.3). La quantité de charbon de terre consommée par les secteurs du gaz et de l'électricité est soustraite pour obtenir et discuter la consommation finale de charbon de terre pour le département de la Seine (voir la section 5.4). Comme indiqué plus haut, dès 1861, lors de l'extension de la ville de Paris, l'agglomération s'étend en dehors du mur d'enceinte de Thiers et l'urbanisation en banlieue s'accélère. Comme le montre le tableau 5.4, dès 1878, la consommation en kg par habitant par an de combustibles de la banlieue dépasse la consommation de la ville de Paris. Entre 1878 et 1882, l'écart entre la consommation de la banlieue et la consommation de la ville de Paris augmente de 178 à 331%. En 1878, la consommation de charbon de terre de l'industrie gazière représente environ un quart de la consommation directe du département de la Seine (figure 5.3). En revanche, en 1882 et 1883, la consommation finale en GJ/hab/an de la banlieue croît de façon considérable (figure 5.4). La population augmente avec un taux de croissance annuel de 3 à 4 % durant les années 1870 et 1880. Toutefois, elle ne représentait que 16 à 18% de celle du département dans les années 1870. Il est donc difficile de penser que cette part de la consommation pour la population de la banlieue est destinée seulement au secteur domestique. Il est aussi difficile de distinguer la consommation domestique et tertiaire de celle de l'industrie. De plus, la statistique sur la consommation directe du département n'existe plus après 1911. Le seul indicateur qui donne une idée de la consommation de combustible faite par l'industrie est la

force industrielle produite en masse de vapeur et en électricité exprimée en MW, d'après l'enquête réalisée durant le XIXe siècle (SGF, 1910, 1928, 1938). Toutefois, sans connaître le rendement exact de toutes les installations, il est impossible d'estimer cette consommation.

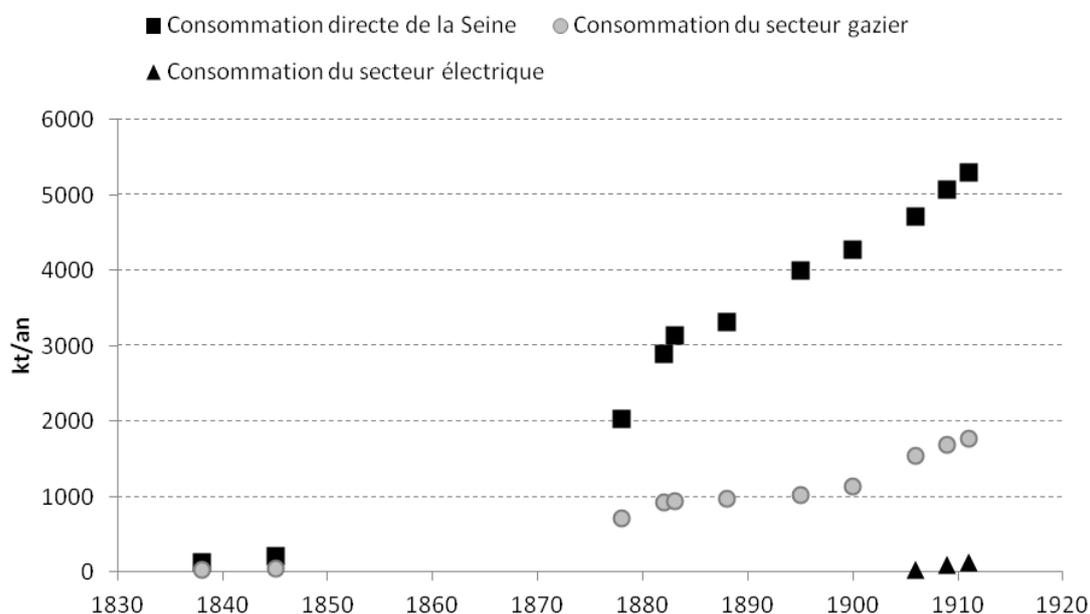


Figure 5.3. Consommation directe de charbon de terre comparée à la consommation intermédiaire du secteur gazier et électrique dans le département de la Seine entre 1838 et 1911. Source : dans le texte

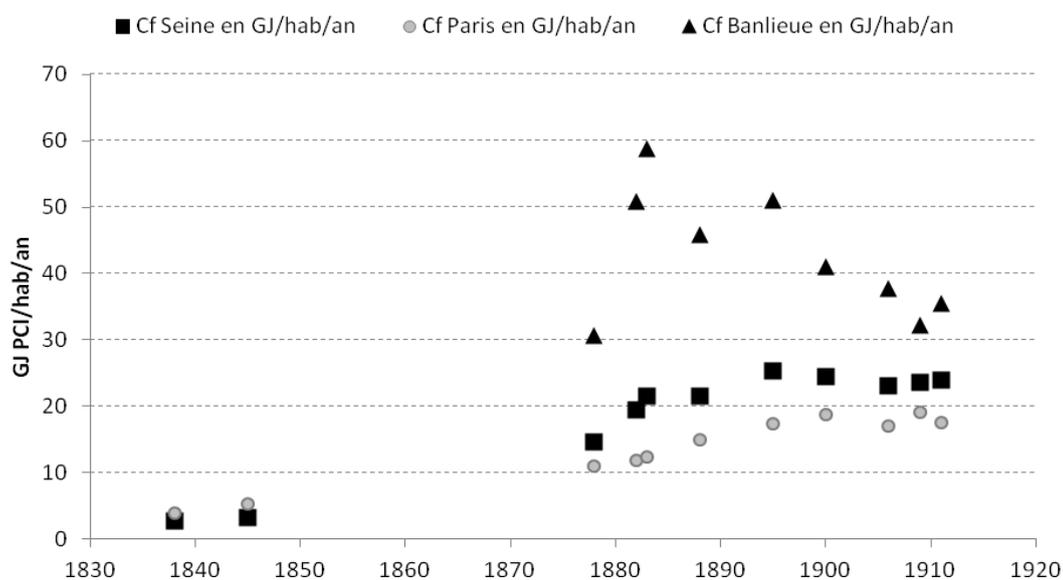


Figure 5.4. Consommation finale (Cf) de charbon de terre de la Seine, de Paris et de la banlieue entre 1838 et 1911. Source : dans le texte

Tableau 5.4. Importation, consommation finale et intermédiaire de charbon de terre de la banlieue et de la Seine comparées à la consommation parisienne en kt/an, kg/hab/an et en GJ/hab/an entre 1838 et 1911 (Écart entre Seine et Paris : consommation de la Seine par rapport à celle de Paris, écart entre Banlieue et Paris : consommation de la banlieue par rapport à celle de Paris)

| Année | Consommation directe de la Seine | Consommation intermédiaire | | Consommation finale | | | | | |
|-------|----------------------------------|--|---|-------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------------|
| | kt | kt de houille distillée dans le secteur du gaz | kt de houille consommée par le secteur électrique | kg/hab/an de la Seine corrigé | Paris GJ/hab/an | Banlieue GJ/hab/an | Seine GJ/hab/an | Écart entre Seine et Paris | Écart entre Banlieue et Paris |
| 1838 | 133 | 27 | | 94 | 3,8 | | 2,6 | | |
| 1845 | 210 | 55 | | 117 | 5,3 | | 3,3 | | |
| 1878 | 2037 | 707 | | 520 | 11 | 30,6 | 14,5 | 32% | 178% |
| 1882 | 2885 | 927 | | 692 | 11,8 | 50,9 | 19,4 | 64% | 331% |
| 1883 | 3132 | 935 | | 768 | 12,4 | 58,7 | 21,5 | 74% | 375% |
| 1888 | 3309 | 977 | | 769 | 14,9 | 45,9 | 21,5 | 44% | 207% |
| 1895 | 4004 | 1 016 | | 906 | 17,4 | 51 | 25,4 | 46% | 193% |
| 1900 | 4282 | 1 133 | | 875 | 18,8 | 41 | 24,5 | 30% | 118% |
| 1906 | 4709 | 1 540 | 31 | 824 | 17 | 37,8 | 23,1 | 36% | 123% |
| 1909 | 5074 | 1 685 | 90 | 841 | 19 | 32,3 | 23,6 | 24% | 70% |
| 1911 | 5306 | 1 766 | 129 | 852 | 17,5 | 35,5 | 23,9 | 36% | 103% |

Source : dans le texte

Les données sur la production industrielle, comme le montre la figure suivante, incluent la vapeur et l'électricité produite par les industries en Île-de-France selon les départements. Par ailleurs, la consommation d'électricité inclut l'électricité produite et consommée sur place, ainsi que l'électricité distribuée par les réseaux. Par conséquent, la figure suivante représente la consommation industrielle de charbon de terre (livré à l'industrie) et l'électricité achetée par l'industrie. Pour évaluer la production de la force industrielle dans l'agglomération parisienne et pour comparer entre Paris, la Seine et la région Île-de-France, nous avons comparé la statistique industrielle de 1910¹, 1928 et de 1938 (incluant le secteur électrique) aux données sur la

¹ Les données de 1909 (SGF, 1910) ne présentent que la production de force motrice par la vapeur et non par l'électricité. Cependant, nous avons ignoré cette quantité, puisque la production d'électricité dans la

production de vapeur issue de Daumas (1976) ; il s'agit d'un résultat d'études plus complètes basées sur Bottin¹. Nous avons fait une hypothèse de 6 h de fonctionnement par jour et 280 jours de travail par an pour convertir la puissance exprimée en chevaux-vapeur en énergie produite en GWh (1CV français égal à 735,5 W) (figure 5.5). Néanmoins, nous avons écarté/retiré la force produite par les moteurs au gaz, puisque les données disponibles concernent uniquement la production dans Paris et qu'elles sont très éparées ; la force produite est quasi nulle en 1888 et devient environ 15% de la force totale produite à Paris au début du XXe siècle ; à l'échelle de l'agglomération, on considère que la production de la force motrice industrielle par les moteurs au gaz est faible, puisque l'électricité apparaît comme énergie principale pour la production motrice durant la première moitié du XXe siècle (voir la sous section suivante). La part de la force industrielle (vapeur plus électricité incluant la force locomotive) produite dans le département de la Seine sur la production totale de la force en Île-de-France s'élève de 77 % à 94 % entre 1909 et 1926, et représente 94 % en 1936. L'électricité en particulier est produite majoritairement en banlieue de la Seine. Le département de la Seine assure en effet 99 % de la production régionale d'électricité durant cette période.

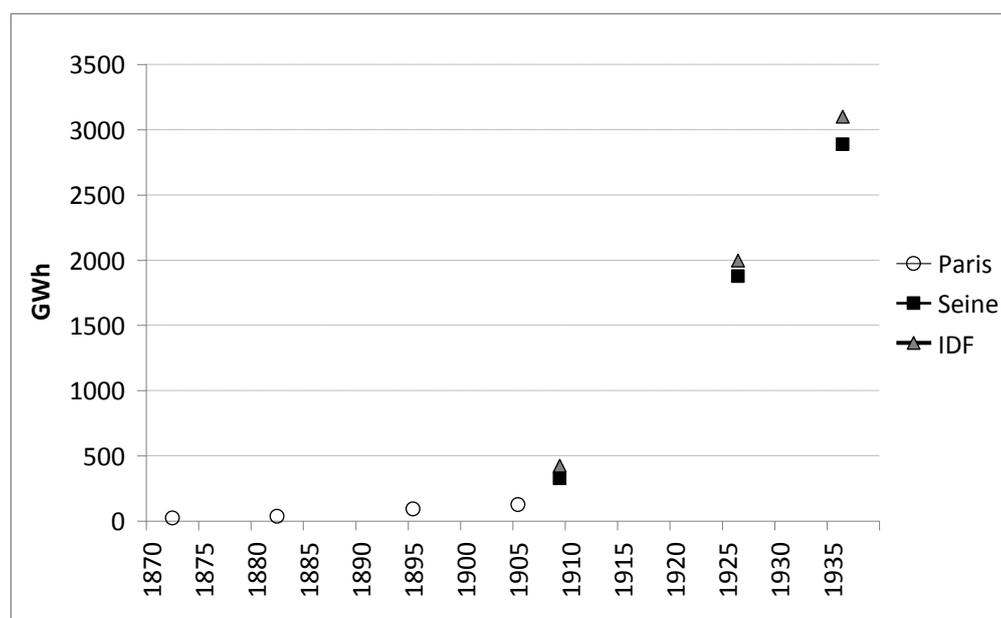


Figure 5.5. Production industrielle de vapeur et d'électricité dans la région Île-de-France.

Source : Daumas 1976, SGF, 1910, 1928, 1938.

Seine représente encore une faible part en 1905 et que la production hors Seine n'est probablement pas encore importante à cette période.

¹ Bottin est un annuaire du commerce et de l'industrie précisant la raison sociale, le nombre d'employés et la force motrice installée. Le résultat est présenté dans le tableau 46 de l'annuaire « Répartition des machines à vapeur dans Paris » 1972-1905 ; le tableau 48 présente le nombre de moteurs fonctionnant au gaz d'éclairage (Daumas 1976, p. 368, 370).

On essaie d'estimer par la suite la consommation industrielle de charbon de terre faite par l'industrie à partir de la production industrielle de la force. Les rendements moyens de production thermique sont supposés identiques à ceux présentés dans le chapitre 4 pour le secteur électrique thermique de la région parisienne. Ce n'est évidemment qu'une estimation, car le rendement thermique de toutes les installations industrielles peut varier. La consommation d'électricité non connue pour 1909 est obtenue par interpolation des valeurs de la CPDE en 1905 et 1913.

Selon le rendement thermique moyen supposé, la consommation de charbon de terre peut varier extrêmement, notamment après 1926. Quelle amélioration le département de la Seine a-t-il obtenue en termes d'efficacité énergétique durant cette période entre 1926 et 1945 ? Selon certains textes contemporains, l'entre-deux-guerres connaît une amélioration de rendement énergétique remarquable. Toutefois, ces textes ne donnent que des données spécifiques pour une usine ou pour une installation (machine à vapeur) et non des données générales pour la ville de Paris ou pour la région Île-de-France.

Tableau 5.5. Ecart de la consommation unitaire en GJ/hab/an pour le charbon de terre entre Paris et le département de la Seine

| Année | Rendement de production thermique supposé | | Charbon de terre consommé | | | | | | Consommation unitaire industrielle (électricité non inclus) | |
|-------|---|------|---------------------------|-----|----------------------|------|---------------------------------------|------|---|------|
| | | | Total charbon de terre | | Production de vapeur | | Dont pour la production d'électricité | | | |
| | moy | max | moy | min | moy | min | moy | min | moy | max |
| | absolu | | kt | | | | | | GJ/hab/an | |
| 1882 | 0,07 | - | 5 | - | 0 | - | - | - | 0,06 | - |
| 1895 | 0,08 | - | 12 | - | 0 | - | - | - | 0,13 | - |
| 1905 | 0,10 | - | 16 | - | 0 | - | - | - | 0,16 | - |
| 1909 | 0,10 | 0,07 | 100 | 100 | 419 | 419 | 320 | 320 | 5,14 | 7,34 |
| 1926 | 0,14 | 0,15 | 425 | 387 | 1766 | 1607 | 1340 | 1220 | 2,65 | 2,41 |
| 1936 | 0,16 | 0,25 | 1173 | 748 | 2328 | 1485 | 1155 | 737 | 6,65 | 4,24 |

Source : dans le texte (moy : valeur moyenne, max : valeur maximale) (la production d'électricité de la Seine en 1909 non connue est obtenue par l'interpolation des deux valeurs entre 1905 et 1923.).



Figure 5.6. Consommation finale de charbon de terre pour la production industrielle estimée pour le département de la Seine. Source : dans le texte

Pour estimer la consommation finale de charbon de terre pour la période non renseignée (1912-1953), on a regardé la tendance de consommation de charbon de terre entre le milieu du XIXe siècle et le milieu du XXe siècle pour la Seine. Nous essayons donc de comparer la consommation finale et la consommation directe de charbon de terre. Qu'apprend-on dans cette courbe ? Malgré la lacune importante des données entre 1911 et 1951, on observe, comme le montre la figure 5.7, que la consommation finale par habitant par an tend à se stabiliser entre 1887 et 1911 puis entre 1951 et 1959 avec une valeur entre 20,0 et 25,4 GJ/hab/an (figure 5.7). En revanche, la consommation directe par habitant par an continue à augmenter. Que signifie cet écart croissant entre la consommation finale et la consommation directe ? Pour identifier la nature de cet écart, il suffit de regarder la consommation de gaz et d'électricité de Paris et de la banlieue entre la fin du XIXe siècle et le milieu du XXe siècle (figure 5.7.2). La consommation finale de charbon de terre baisse probablement au profit du gaz et de l'électricité. Cette hypothèse est vraisemblable pour deux raisons principales. D'une part, le réseau de gaz d'éclairage et de chauffage s'étend en banlieue et commence à desservir la population résidant en dehors du mur d'octroi. D'autre part, l'autoproduction-autoconsommation d'électricité par l'industrie diminue, l'autorité locale et les entreprises concessionnaires de distribution (l'Union des secteurs et la CPDE) encourageant l'achat d'électricité du réseau qu'ils développent (Caron, 1990).

Nous avons considéré que la consommation unitaire de charbon de terre du secteur résidentiel et tertiaire devient uniforme dans le territoire de la Seine vers 1900, ce qui est vraisemblable compte tenu du fait que l'écart entre les consommations de charbon de terre de la Seine et de Paris reste relativement stable, entre 22 et 28 %, entre 1897 et 1909 et que l'écart entre la production des forces motrices industrielles de la Seine et celle de Paris se situe approximativement au même niveau au début du XXe siècle. Par la suite, on essaie d'obtenir la consommation finale ainsi que la consommation directe de charbon de terre de la Seine. L'hypothèse est que la part de la croissance de la consommation de charbon de terre y est due à la croissance de la consommation industrielle. Pour obtenir la consommation finale de charbon de terre de la Seine, on additionne la consommation finale industrielle de charbon de terre supposée, comme le montre la figure 5.6, à la consommation unitaire de Paris. La consommation directe de charbon de terre de la Seine est obtenue par l'addition de la consommation intermédiaire faite par le secteur électrique et gazier à la consommation finale. Selon le résultat, comme le montre la figure suivante 5.7.2, la consommation finale de charbon de terre s'élève de 3,4 à 5,2 Mt entre 1909 et 1936. Elle retombe à 4,4 Mt en 1951. La consommation directe de charbon de terre connaît une tendance à la hausse quasi linéaire entre 1978 et 1951, à l'exception de la période de la guerre entre 1939 et 1945. Entre 1911 et 1951, la consommation directe de la Seine augmente de 5,3 à 11,0 Mt.

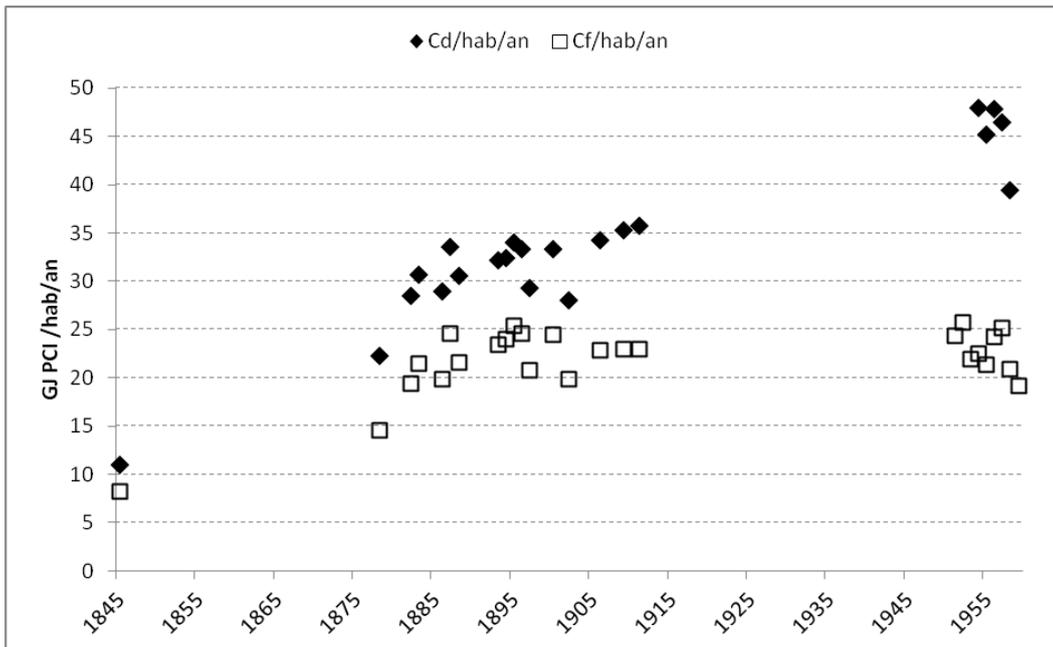


Figure 5.7. Consommation finale et directe de charbon de terre du département de la Seine en GJ PCI/hab/an entre 1845 et 1959 (Cd : consommation énergétique directe, Cf : consommation énergétique finale). Source : dans le texte

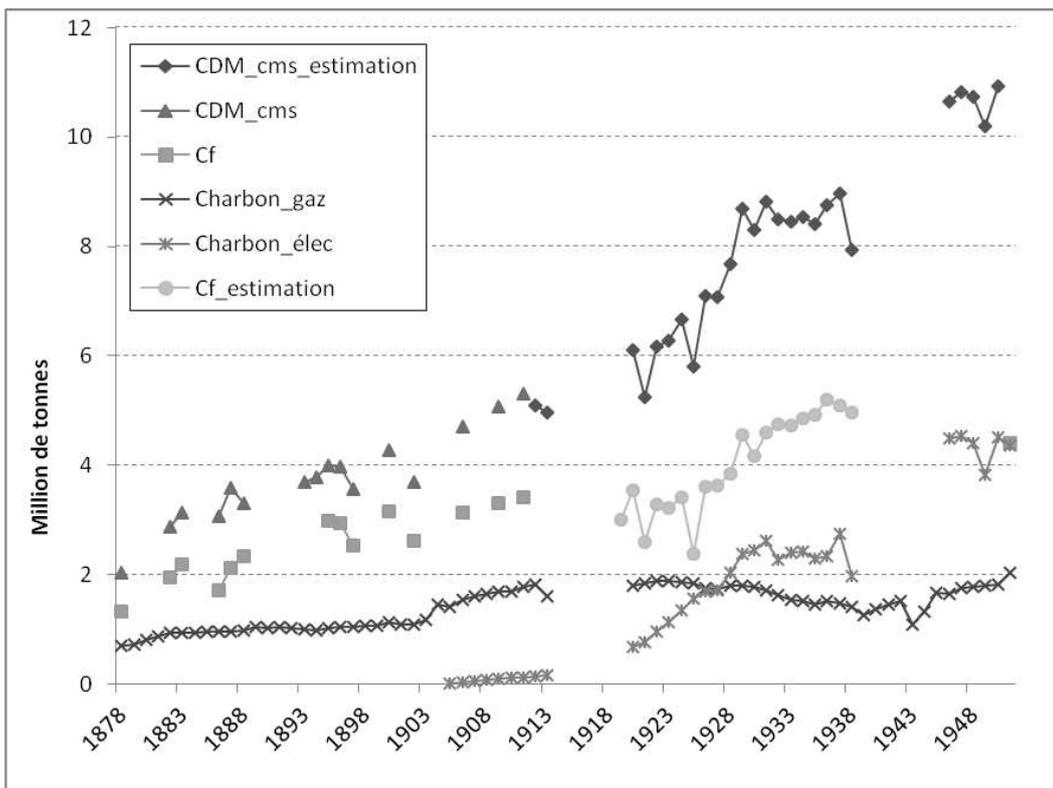


Figure 5.7.2. Consommation directe comparée à la consommation finale et à la consommation intermédiaire (du secteur gazier et électrique) de charbon de terre de la Seine en millions de tonnes/an entre 1845 et 1959. (CDM : consommation directe de matière). Source : dans le texte

5.3.2. Consommation de gaz et d'électricité du département de la Seine entre 1838 et 1969

Consommation de gaz

Le gaz devient une énergie secondaire courante pour la ville de Paris durant la deuxième moitié du XIXe siècle. La consommation de gaz en banlieue augmente plus tardivement, peu à peu depuis les années 1860, et représente 10% de la consommation totale de gaz du département de la Seine à la fin du XIXe siècle. Comme indiqué dans le chapitre 3, la série de la distribution du gaz de la CPECG (Compagnie parisienne d'éclairage et de chauffage par le gaz) est constituée pour la consommation de Paris et de la banlieue (voir le chapitre 4), qui permet de suivre la consommation spatialisée de cette énergie. Toutefois, pour la période postérieure à 1904, après la lacune entre 1899 et 1904, fin de la concession de la CPECG, on ne possède que des données de consommation de Paris issues de la Société du Gaz de Paris. Entre 1923 et 1945, la consommation de gaz chute à Paris, tandis que les données sur la consommation finale de la banlieue, qui s'arrêtent en 1899, montrent une croissance importante de cette énergie. Les données sur la consommation du gaz en banlieue ne réapparaissent qu'en 1947. La part de sa consommation par rapport à la totalité du département de la Seine est de 10% en 1898 au moment de l'arrêt de la série, et de 63% en 1947 au moment de sa reprise. Ensuite cette part ne cesse d'augmenter et représente 66 % en 1951 puis 69 % en 1954. On suppose donc que la période 1899-1946 est elle aussi caractérisée par une croissance tendancielle de la consommation de gaz. De plus, selon la littérature, son développement s'accélère notamment dans la période de l'entre-deux-guerres en parallèle avec la construction de logements d'HBM¹ équipés du gaz, de l'eau et de l'électricité en banlieue (Sébillotte, 1928, Dumont, 1991). Nous avons donc complété cette lacune selon une tendance de croissance exponentielle entre 1899 et 1960 (dans la figure 5.8).

¹ Habitations bon marché (HBM).

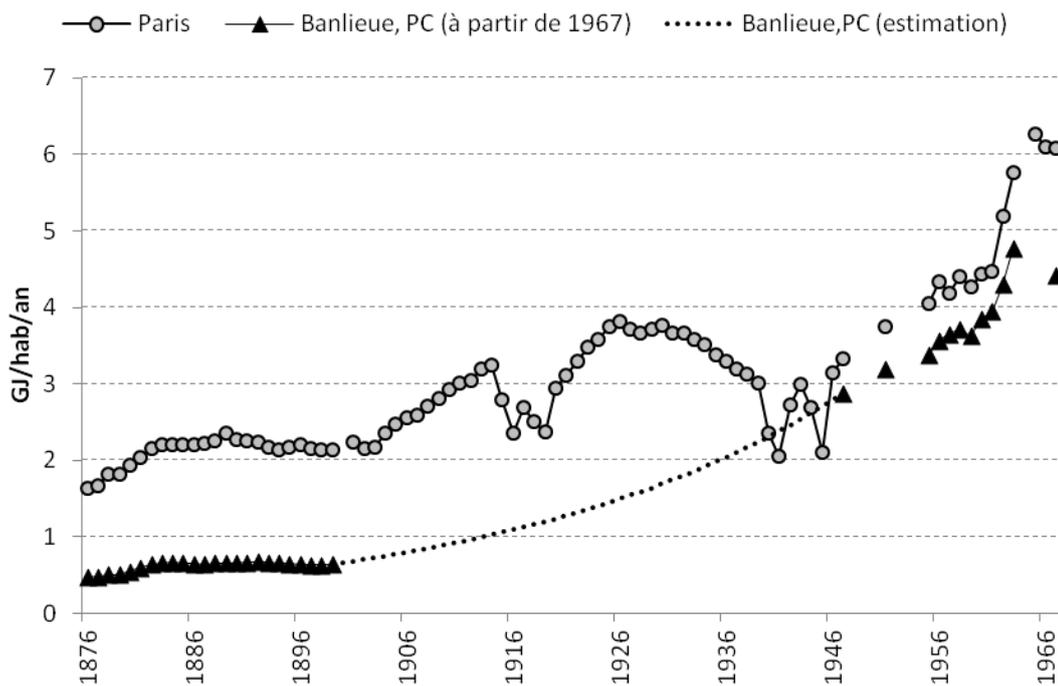


Figure 5.8. Consommation finale de gaz de Paris, de la banlieue et de la Seine en GJ/hab/an entre 1876 et 1967. Source : dans le texte, chapitre 3.

Jusqu'en 1950, la quasi-totalité du gaz est produite par distillation du charbon de terre. La croissance de consommation du gaz dans le département de la Seine résulte donc de la consommation croissante de ce combustible par le secteur gazier. Le rendement de la production de gaz manufacturé et la part de combustible du secteur étant connus (dans le chapitre 4), la consommation de combustibles du secteur gazier du département de la Seine est estimée. La chute de la consommation de combustibles du secteur vient après 1923. La raison principale de cette diminution est la baisse de la consommation de la ville de Paris, autrefois gros consommateur de gaz, au profit de l'électricité : la consommation des établissements publics représentait entre 17 et 20 % dans la consommation totale du gaz entre 1860 et 1900, part qui chute après 1900 (Williot, 1999). Malgré la croissance de la consommation de gaz en banlieue, la baisse entre le milieu des années 1920 et 1945 est continue. De plus, pendant la guerre, l'approvisionnement en combustible devient plus difficile.

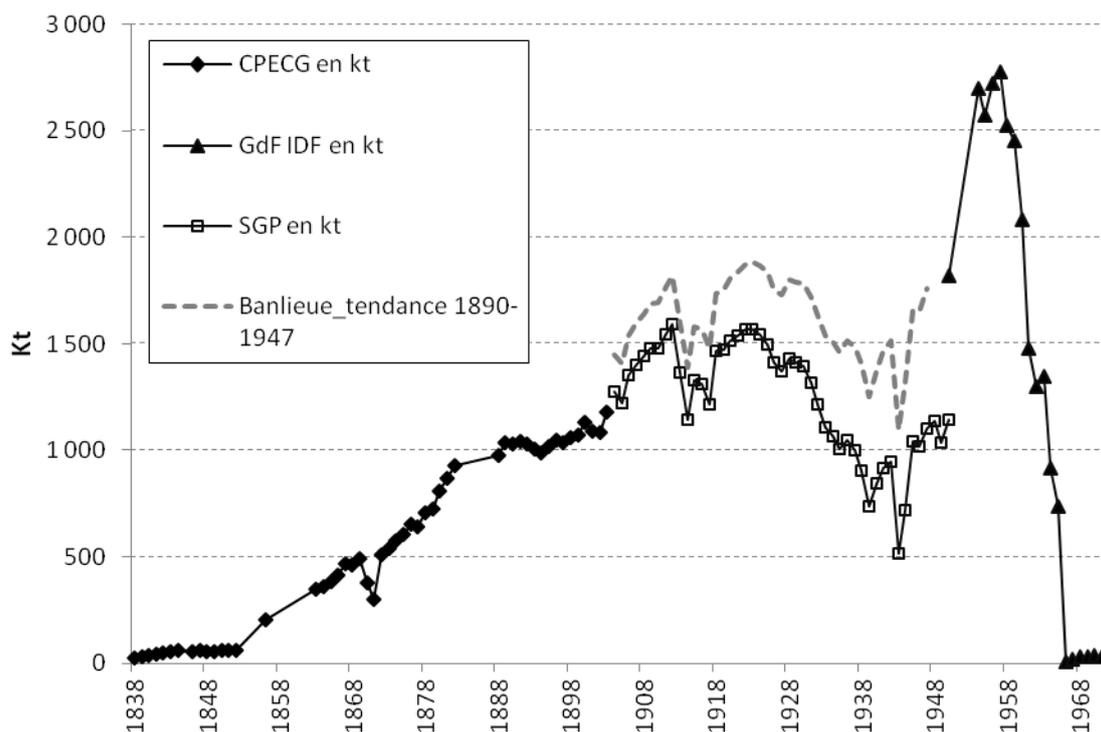


Figure 5.9. Consommation des combustibles par le secteur gazier en kt/an dans le département de la Seine entre 1838 et 1969. Source : dans le texte, chapitre 4.

(Nous avons excepté le combustible importé, le gaz naturel notamment qui croît depuis 1959 ; CPECG en kt : consommation de combustibles faite par la CPECG ; SGP en kt : consommation de combustible de la SGP en kt ; GdF IDF en kt : Consommation de combustibles de Gaz de France en kt ; Banlieue_tendance 1890-1947 : consommation de la banlieue non comptée dans la statistique des compagnies et estimée par la consommation unitaire de la banlieue comme le montre la figure 6.8.)

Consommation d'électricité

L'électricité suit cette tendance d'expansion spatiale durant la première moitié du XXe siècle. Dans la région parisienne, entre la fin du XIXe et le début du XXe siècle, l'autoconsommation et l'autoproduction électrique par les industries sont relativement importantes ((Daumas, 1996). Cette autoproduction tend à diminuer à la période suivante. En 1923, 63 % de l'électricité consommée en Île-de-France est distribuée par le réseau, ce qui signifie que les 37% restant sont produits et consommés sur place par l'industrie (SGF, 1925). Ce taux baisse en 1936 à 15% (SGF, 1938). Que signifie cette baisse de l'autoproduction ?

Selon Daumas (1996), jusqu'au début du XXe siècle, les machines industrielles pour la production énergétique étaient robustes, avec une durée de vie pouvant aller jusqu'à un demi-siècle. Le renouvellement du parc ancien, construit entre 1870 et 1890, en faveur de machines plus performantes explique donc partiellement l'amélioration du rendement entre 1920 et 1939. L'organisation du secteur électrique en 1907, suite à la création de la CPDE, joue un rôle important pour la distribution électrique. Par ailleurs, depuis les années 1920, le réseau électrique s'interconnecte et le secteur électrique croît en taille afin de profiter des économies d'échelle dans une situation où la perte énergétique est considérable (Woronoff, 1998). Rappelons qu'au début du XXe siècle, le rendement de production ne se situait qu'à 10 % (voir le chapitre 4). Le rendement de production devrait donc s'améliorer dans les années 1920 et 1930, compte tenu de la période de la guerre entre 1914 et 1919. Par conséquent, il est plausible que l'achat de l'électricité devienne de moins en moins cher par rapport à la production sur place. Cette production est très probablement localisée en banlieue, puisque la production d'électricité en 1926 dans le département de la Seine est déjà très importante et l'installation de l'industrie en particulier énergétique se fait essentiellement en banlieue, à proximité du canal et du chemin de fer, pour faciliter l'approvisionnement en combustibles. La consommation d'électricité domestique et commerciale se répand progressivement dans les années 1920 et 1930 à Paris (Malégarie, 1947). En revanche, pour la banlieue, cette consommation devient courante plus tardivement dans les années 1950 et 1960.

Regardons maintenant l'évolution de consommation d'électricité de Paris, de la banlieue et de la Seine. On ne possède que deux valeurs pour le département de la Seine durant la première moitié du XXe siècle, tandis que la série est quasi continue pour Paris. Qu'apprend-on dans le tableau suivant ? L'écart de la consommation de Paris par rapport à celle de la Seine en GJ/hab/an (toutes tensions confondues) se situe à 98 % en 1926. Cet écart diminue à 41% en 1936, en raison de la haute demande parisienne entre les deux guerres, tandis que la consommation de la banlieue reste quasi constante. L'écart diminue encore après 1951, passe de 14 à 16 % entre 1959 et 1960, puis atteint entre 9 et 11 % entre 1963 et 1964, ce qui montre la croissance de consommation de l'électricité en banlieue. Par ailleurs, la consommation en GJ/hab/an pour la Seine en 1967 diminue en raison du changement de périmètre de la banlieue en petite couronne. Vu la tendance, on considère que la consommation d'électricité restait environ de 2 GJ/hab/an pour la banlieue entre 1926 et 1936. On additionne donc la consommation de la banlieue de 2 GJ/hab/an en 1926 et en 1936 à la consommation parisienne pour obtenir celle de la Seine. Pour le reste des années entre 1919 et 1939, on a comblé la

lacune avec les valeurs de la consommation en GJ/hab/an de la banlieue interpolée à partir de ces deux valeurs. Après 1946, la consommation de la banlieue tend à croître. Au milieu des années 1950, le taux de raccordement des ménages à l'électricité devient ainsi quasi homogène dans Paris et en banlieue : en 1954, à Paris et en banlieue, plus de 95 % des ménages sont raccordés (INSEE, 1966-1970). Pour la consommation d'électricité après 1946, on considère que l'écart est produit par la croissance de consommation d'électricité en banlieue à cette période et que cet écart tend à croître entre 1946 et 1965. On a donc obtenu les écarts de la consommation entre Paris et la banlieue à partir de la ligne de tendance linéaire des données connues, comme le montre le tableau suivant 5.6, de façon à obtenir la consommation d'électricité de la Seine.

Tableau 5.6. Consommation d'électricité de Paris et de la banlieue, et du département de la Seine entre 1923 et 1964.

| GJ/hab/an | Paris | Banlieue | Seine | Écart entre la consommation de la Seine et celle de Paris : Seine rapport à Paris |
|-----------|-------|----------|-------|---|
| 1926 | 0,56 | 2,00 | 1,11 | 98% |
| 1936 | 0,99 | 1,95 | 1,40 | 41% |
| 1959 | 3,65 | 4,90 | 4,18 | 14% |
| 1960 | 3,81 | 5,02 | 4,40 | 16% |
| 1963 | 4,83 | 6,22 | 5,36 | 11% |
| 1964 | 5,17 | 6,39 | 5,62 | 9% |
| 1967 | 5,78 | 6,78 | 5,59 | -3 % |

Source : dans le texte

Quant à la consommation intermédiaire de charbon de terre pour la production d'électricité, de 1905 au milieu des années 1960, la quasi-totalité de l'électricité est produite dans le département de la Seine. Par conséquent, la quasi-totalité du charbon de terre est brûlée en banlieue, alors que les habitants consommaient une partie seulement de l'électricité produite. Jusqu'en 1945, l'électricité est produite à partir de charbon de terre. Le changement de matières premières, du charbon de terre au pétrole, s'est effectué en parallèle avec l'installation de nouvelles usines thermiques équipées de générateurs fonctionnant au fioul. L'amélioration du rendement est ainsi remarquable avec ce renouvellement du parc électrique. Selon les données sur la consommation de combustibles et la production d'électricité dans les centrales en Île-de-France, on produit de plus en plus d'électricité en consommant quasiment la même quantité de combustibles qu'auparavant (comparer les figures 5.8 et 5.9). Nous avons donc estimé, comme

le montre la figure suivante 5.11, la consommation intermédiaire de charbon de terre à partir du rendement de production et du mix énergétique présenté dans le chapitre 4.

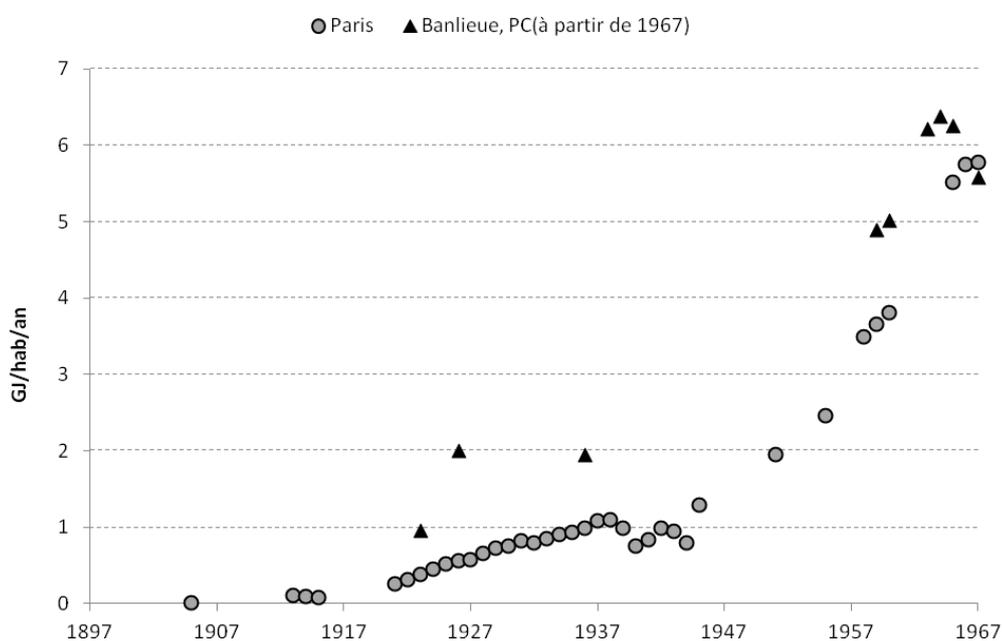


Figure 5.10. Consommation d'électricité de Paris et de la Banlieue en GJ/hab/an entre 1905 et 1967. Source : dans le texte, chapitre 3.

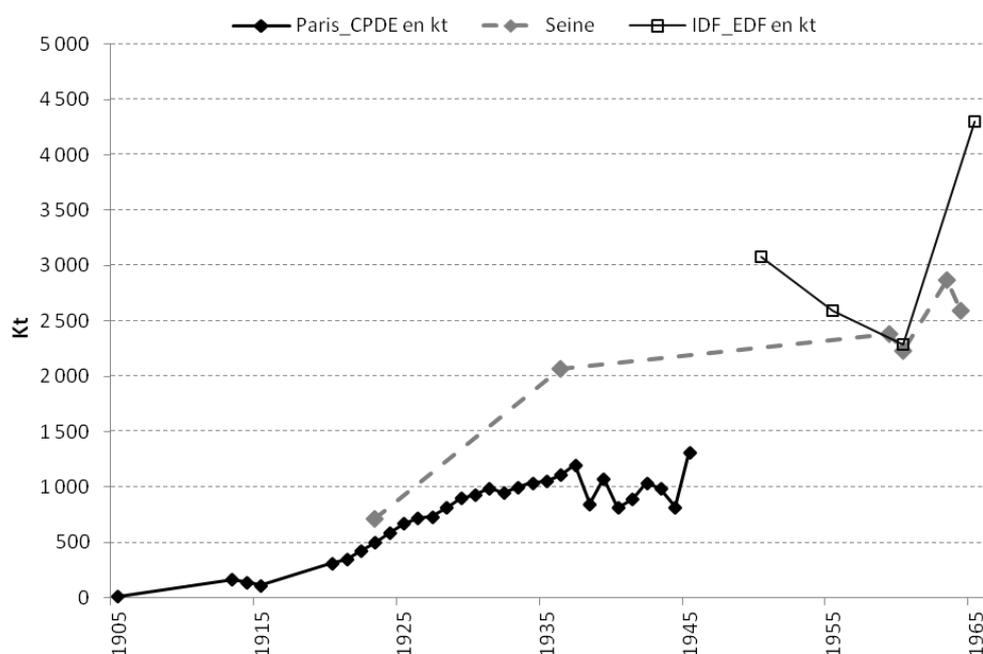


Figure 5. 11. Consommation des combustibles en kt/an du secteur électrique en Île-de-France entre 1905 et 1967. Source : dans le texte, chapitre 4.

(Paris_CPDE en kt : Consommation de combustibles faite par la CPDE pour la distribution à Paris, Seine: consommation de Paris et de la banlieue non comptée dans la statistique des compagnies et est estimée par la consommation unitaire de la banlieue comme le montre la figure 6.8, IDF_EDF en kt : consommation de combustibles faite dans les centrales thermiques EDF de la région Île-de-France en kt.) (la consommation totale des combustibles dans les centrales d'EDF en Île-de-France baisse entre 1950 et 1960 suite au changement de combustible en faveur du pétrole)

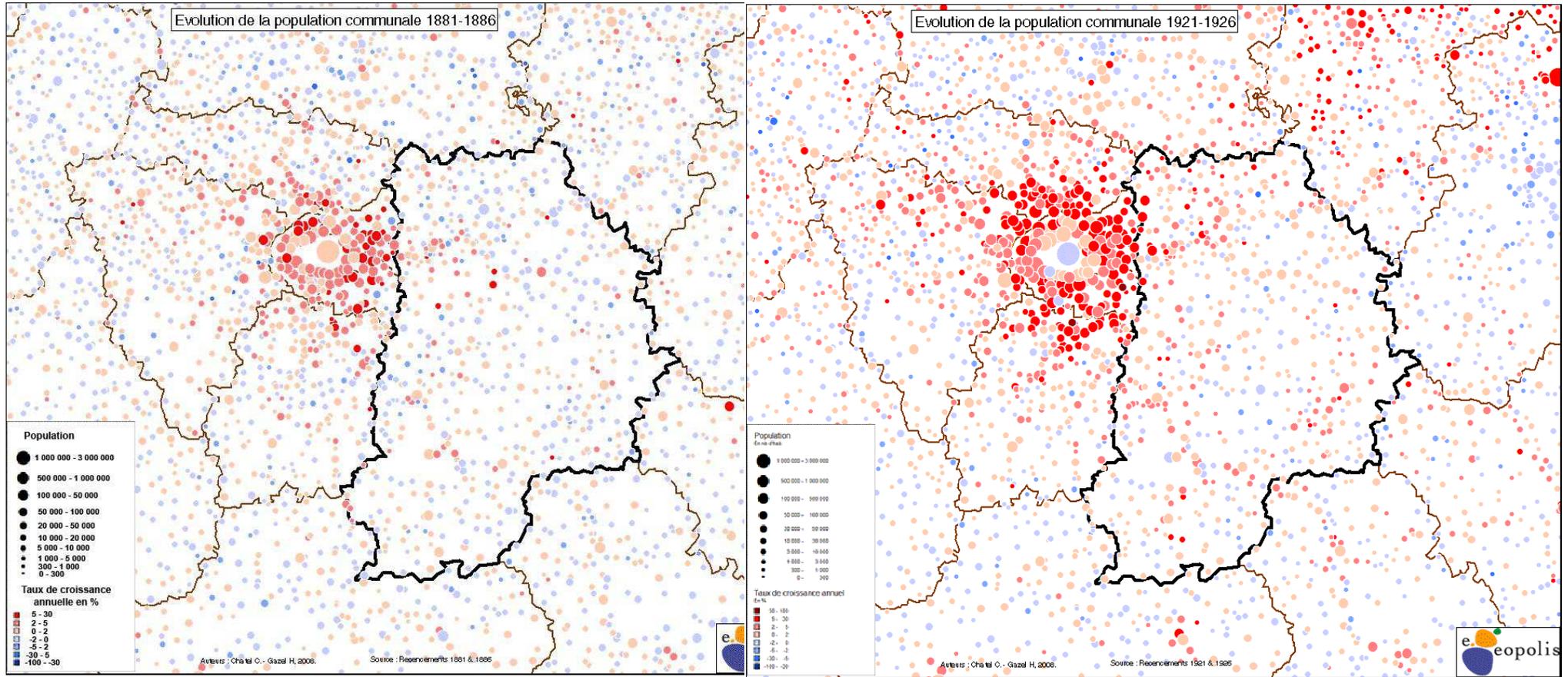
5.4. Consommation énergétique de la région Île-de-France du milieu du XXe siècle jusqu'en 2006

5.4.1. Consommation des départements périphériques de la région Île-de-France depuis le milieu du XIXe siècle au milieu du XXe siècle

La consommation de la Seine-et-Oise et de la Seine-et-Marne n'est pas encore incluse dans la consommation de l'agglomération parisienne pour le XIXe siècle ; l'urbanisation de l'agglomération parisienne atteint approximativement la limite administrative du département de la Seine en 1907 (Lecoin, 1977). Toutefois, on observe cette consommation pour comprendre la croissance énergétique depuis le milieu du XIXe siècle. Dans le cas des deux départements périphériques, Seine-et-Oise et Seine-et-Marne, la croissance de la population ne s'amorce qu'à la fin du XIXe siècle. Le critère de continuité urbaine ne permet pas non plus d'inclure ces territoires dans l'agglomération parisienne. Rappelons que le seuil de la population agglomérée (5000 habitants) n'inclut pas, selon Dupeux (1981), les bourgs ruraux, les petites villes qui se développent au XIXe siècle. Toutefois, certains bourgs ruraux connaissent un rythme de croissance important depuis les années 1880. Le taux de croissance annuel de la population y dépasse 5 %, notamment à proximité de Paris (figure suivante 5.10). La consommation de combustibles des départements périphériques croît avec un taux annuel de 10,4 % entre 1838 et 1845, puis de 22,9 % entre 1845 et 1885. Il est par conséquent difficile de mettre en parallèle la croissance de la population et celle de la consommation de charbon de terre dans ces territoires. La population est majoritairement rurale et industrielle, les activités industrielles étant liées à la transformation de matières premières issues de la biomasse agricole : la mouture, la filature et la fabrication sucrière durant la première moitié du XIXe siècle (Bernard, 1953, Compte de Chabrol, 1829). En particulier, le département de la Seine-et-Oise connaît des activités industrielles ayant un lien important avec l'approvisionnement en divers produits industriels de

Paris ; elle est l'un des départements dotés de la puissance industrielle la plus importante en termes de nombre de moulins à céréales fonctionnant avec l'énergie hydraulique au début du XIXe siècle (AN F²⁰ 296, AN F²⁰ 633). Durant la deuxième moitié du XIXe siècle, ces industries changent très probablement leur source énergétique, passant de l'énergie hydraulique au charbon de terre¹. Toutefois, l'urbanisation dans ces territoires ne commence qu'au cours des années 1920, d'abord en Seine-et-Oise. En effet, dans la courbe de la population des différents territoires d'Île-de-France (figure 3.3 dans le chapitre 3), l'écart croissant durant la première moitié du XXe siècle entre la population de la Seine et celle de l'Île-de-France est principalement dû à la croissance démographique du département de la Seine-et-Oise, notamment dans le territoire contigu à la Seine (figure 5.12 en haut à droite). La Seine-et-Marne ne connaît une urbanisation et une industrialisation qu'après 1945 (figure 5.12 – deux figures en bas).

¹ L'enquête industrielle de 1861-1865 montre le début de la pénétration de moulin à vapeur dans la région Île-de-France (SGF, 1873).



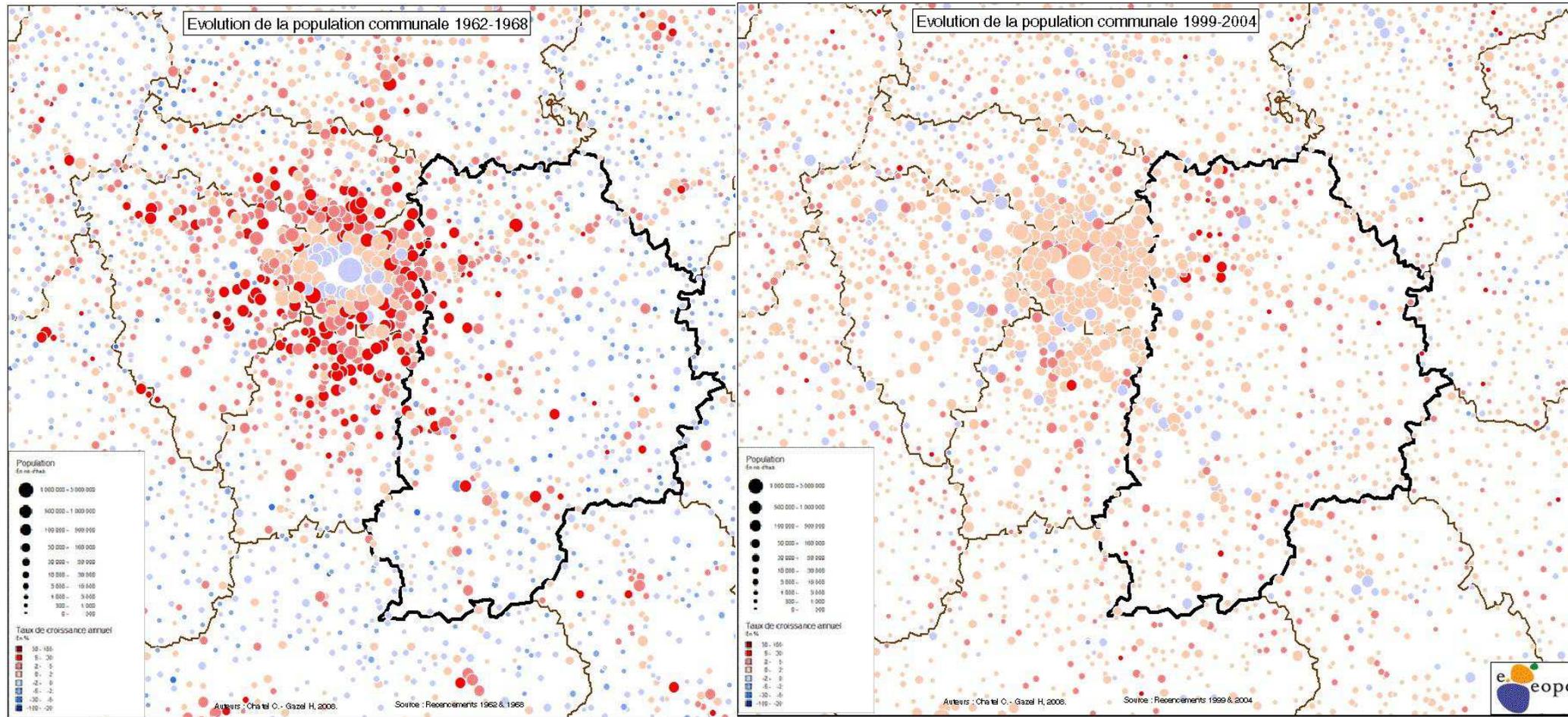


Figure 5.12. Évolution de la population communale entre 1881 et 1886 (en haut à gauche), entre 1921 et 1926 (en haut à droite), entre 1962 et 1968 (en bas à gauche) et entre 1999 et 2004 (en bas à droite). Source : Geopolis, www.geopolis.fr (carte reçue à la demande, et non disponible en ligne).

Revenons à la consommation de charbon de terre dans ces territoires. La consommation directe de charbon de terre dans les deux départements se situe entre 16 et 26 % de la consommation totale de la région Île-de-France, sans avoir une tendance à la hausse ou basse (tableau 5.7). Toutefois, cette consommation croît de façon considérable, de 469 à 2558 kt, entre 1845 et 1878. Quant à la consommation finale par habitant par an, elle montre une croissance importante depuis 1878 par rapport à la période précédente : elle ne se situait qu'à 1,9 GJ/hab/an en 1838 et à 2,8 GJ/hab/an en 1845. Cette consommation atteint presque 30 GJ/hab/an en 1882. Rappelons que la consommation finale de la banlieue de la Seine était de 50,9 GJ/hab/an la même année. La consommation des départements périphérique dépasse 30 GJ/hab/an à la fin du XIXe siècle, tandis que la consommation en GJ/hab/an de la Seine se situe entre 43 et 51 GJ/hab/an à la même période. Dans les départements périphériques, la population n'étant pas encore importante, la croissance de la consommation de combustible par habitant par an est un signe de l'industrialisation.

Après la Première guerre mondiale, la région Île-de-France connaît un changement important en termes d'urbanisation et de consommation énergétique. Bien que nous ne disposions pas de données relatives à la consommation hors Paris, il est possible d'entrevoir la croissance de la consommation industrielle des trois départements grâce aux données sur la production de la force industrielle (figure 5.5). Toutefois, la production industrielle du département de la Seine occupe une part essentielle de la production de force industrielle et d'électricité des trois départements à cette période.

Tableau 5.7. Consommation de charbon de terre de Paris et de la banlieue entre 1838 et 1911 (IDF : Île-de-France, SEO : Seine-et-Oise, SEM : Seine-et-Marne)

| | Île-de-France | | | | | Départements périphériques | | | | |
|-------|----------------------|---------|-------|---|---------------------|----------------------------|--|----------------|---------------|--|
| | Consommation directe | | | | Consommation finale | | Consommation finale | | | |
| Unité | IDF | Dont | Dont | Part de consommation de départements périphériques (SEO+SEM)/IDF | IDF | | Taux de croissance annuel de consommation en kg/hab/an | IDF hors Seine | | Taux de croissance annuel de consommation en kg/hab/an |
| | kt | SEO | SEM | | kg/hab/an | GJ PCI/hab/an | | kg/hab/an | GJ PCI/hab/an | |
| 1838 | 255,8 | 32,0 | 19,9 | 20 | 134 | 3,8 | - | 67 | 1,9 | - |
| 1845 | 469,1 | 54,0 | 23,4 | 16 | 224 | 6,3 | 8% | 101 | 2,8 | 6% |
| 1878 | 2558,4 | 338 | 183,7 | 20 | 532 | 14,9 | 3% | 568 | 15,9 | 5% |
| 1882 | 3882,1 | 713,2 | 284,2 | 26 | 785 | 22,0 | 10% | 1065 | 29,8 | 17% |
| 1883 | 4161,0 | 741,3 | 287,5 | 25 | 847 | 23,7 | 8% | 1088 | 30,5 | 2% |
| 1888 | 4155,9 | 248,0 | 598,7 | 20 | 793 | 22,2 | -1% | 865 | 24,2 | -4% |
| 1895 | 5219,4 | - | - | - | 973 | 27,2 | 3% | 1192 | 33,4 | 5% |
| 1909 | 6622,2 | 1 336,6 | 212,1 | 23 | 968 | 27,1 | 0% | 1429 | 40,0 | 1% |
| 1911 | 6907,7 | 1266,7 | 334,5 | 23 | 988 | 27,7 | 1% | 1522 | 42,6 | 3% |

Source : dans le texte (La consommation finale est la consommation directe soustraite de la consommation intermédiaire du secteur du gaz et de l'électricité de la Seine (voir le tableau 5.4), sachant que la consommation intermédiaire de gaz et d'électricité dans les départements périphériques est quasi nulle.)

5.4.2. Croissance de consommation des départements périphériques de la région Île-de-France depuis le milieu du XIXe siècle jusqu'en 2006

Consommation de charbon de terre et de pétrole

L'accélération de l'urbanisation est bien illustrée par le *Cahier de l'IAURIF* de 1974 dédié à l'urbanisation historique de la région parisienne depuis le début du XIXe siècle (Lecoin, 1977), dont le but est de montrer la consommation de sol et l'expansion urbaine de la région Île-de-France. Il analyse *le mode d'urbanisation* caractérisé par la densité en nombre d'habitants par hectare de terre urbanisée. Si l'urbanisation de Paris est très dense avec une densité moyenne de 270 à 370 habitants par hectare pendant entre 1851 et 1974, l'urbanisation de la petite couronne se traduit par une augmentation de la densité de 55 à 92 hab/ha entre 1839 et 1974, mais avec une tendance à l'augmentation depuis le début du XXe siècle. L'urbanisation de la grande couronne commencée au début du XXe siècle a une densité ne dépassant pas 55 hab/ha à la même période, pouvant descendre jusqu'à une trentaine de personnes par hectare. Entre 1946 et 1962, la croissance de la population de la Seine-et-Oise retrouve le rythme de la période l'avant-guerre¹. La population augmente d'un facteur 1,62 en 16 ans, atteignant presque 2,3 millions d'habitants. Quant à la population de la Seine-et-Marne, la croissance est plus modeste, mais importante ; sa population passe de 0,407 million à 0,604 million d'habitants entre 1946 et 1962.

Après la seconde guerre mondiale, la région Île-de-France est encore très dépendante du charbon de terre. Cependant, les nouveaux combustibles apparus depuis le début du siècle connaissent un rythme de croissance très important en particulier après 1950. La lacune des données sur la consommation de produits pétroliers pour la première moitié du XXe siècle rend difficile de faire une lecture complète. En revanche, on peut résumer, selon les données nationales, quelques tendances dans cette consommation. Les produits pétroliers sont introduits durant la deuxième moitié du XIXe siècle². La consommation devient significative dans l'entre-deux-guerres. Cette consommation se faisait essentiellement pour le carburant automobile et

¹ Le taux de croissance annuelle moyenne de la population de la Seine-et-Oise atteint 2,9 %, tandis que celle de la Seine reste en dessous d'1% à la même période. Les données historiques sur la population départementale sont issues de la SGF, téléchargeables sur le site de l'INSEE, *Population des départements depuis 1801 (dans leurs limites actuelles)*http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?ref_id=asfpopulation, [en ligne] [24 sept. 2009].

² Dans les annuaires statistiques de la France datant de 1926 (SGF, 1926), le résumé rétrospectif de la consommation de combustibles à l'échelle nationale est disponible pour la période entre 1878 et 1926.

l'huile de graissage, et dans une moindre mesure pour des produits à usage chimique et pharmaceutique: 63% pour l'essence automobile et le gazole, 30% pour l'huile de graissage et le pétrole lampant et 7 % pour le fioul en termes de tonnage dans la consommation totale de pétrole en 1925 (Peyret, Courau, 1935, Musset, 1959, Barjot et al., 1991). Les produits de fioul sont consommés d'abord dans le secteur industriel, le chauffage au fioul étant introduit avant la seconde guerre mondiale. Toutefois, la croissance de consommation de ce produit devient significative entre 1946 et 1972¹.

Dès le début des années 1950, la consommation de produits pétroliers, notamment de fioul, croît plus rapidement, tandis que la consommation de charbon de terre du département de la Seine est stabilisée à partir de 1951 et que la chute de cette consommation n'est observée qu'après 1958. Après 1946, la transition pour le chauffage des locaux domestiques et industriels dans la région Île-de-France se fait essentiellement entre le charbon de terre et le fioul. Compte tenu de la consommation industrielle de fioul domestique et léger qui représente environ 43 % de la consommation de ces produits, la consommation totale de tout type de fioul (léger, domestique et lourd) concerne essentiellement l'industrie (61 % en termes de tonnage en 1965). Toutefois, la tendance à la hausse de consommation de fioul domestique montre que la transition en termes d'énergie thermique dans les ménages et dans l'industrie est profonde dans les années 1960. On ne dispose pas de données pour la région Île-de-France sur ce sujet. Toutefois, les données nationales sur le type de combustibles utilisés dans les logements équipés d'un chauffage central montrent qu'en 1968, lors du recensement de la population de l'INSEE, 16,4% des logements possèdent un chauffage au mazout parmi les 34,2 % de logements équipés d'un chauffage central, ce qui représente donc 48,0% des logements dont le type de chauffage est connu, car pour le reste des logements (équipés d'un chauffage individuel), le type d'énergie utilisé n'est pas connu. Selon notre expérience ce résultat nous fait supposer que la part de chauffage au fioul serait plus élevée pour la région Île-de-France, puisqu'elle était généralement la première dans le pays à bénéficier des nouvelles technologies, en particulier concernant l'énergie.

¹ Dans la région Île-de-France, au milieu des années 1960, l'industrie consommait environ un tiers du fioul domestique et deux tiers de fioul léger et la totalité de fioul lourd (INSEE, 1965).

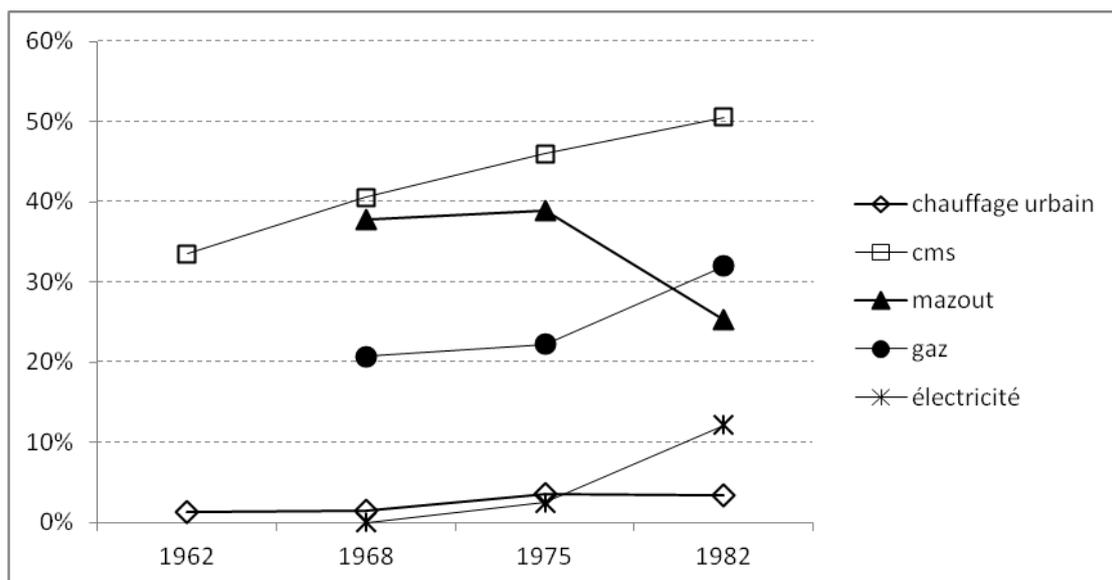


Figure 5.13. Répartition des résidences principales selon le type de combustibles utilisés pour le chauffage dans les logements équipés d'un chauffage central en France (type de combustible inconnu pour les logements sans chauffage central). Source : Observatoire de l'énergie, 1984.

(Le type de chauffage au charbon en 1962 est la part de chauffage au charbon de terre dans le chauffage central individuel (immeuble seul). Pour le reste des logements, le type de chauffage n'est pas connu ; cms (combustibles minéraux solides: charbon de terre).

L'évolution de la consommation de différents produits pétroliers entre 1951 et 1967, comme le montre la figure suivante, traduit le développement inégal de ce produit au sein de la région. Alors que la consommation de carburants (incluant l'essence automobile, le supercarburant et le gazole) se situe quasiment au même niveau sur tous les territoires de la région Île-de-France dans les années 1950, la consommation de fioul dans le département de la Seine croît avec un rythme plus rapide que celui de la région. L'augmentation du fioul domestique et du fioul lourd dans le département est quasiment parallèle, la part de fioul domestique étant néanmoins un peu plus élevée que celle du fioul domestique à la fin des années 1950. À partir de 1958, la croissance du fioul dans la Seine devient plus modeste, alors qu'à l'échelle de la région Île-de-France, à partir de 1961, le rythme de croissance change. Notons qu'à partir du début des années 1960, la désindustrialisation de la région Île-de-France et le transfert des industries vers la province sont engagés. Cette croissance n'est donc pas le signe de l'industrialisation, mais

correspond à la croissance de la consommation de ce produit dans les secteurs domestique et tertiaire.

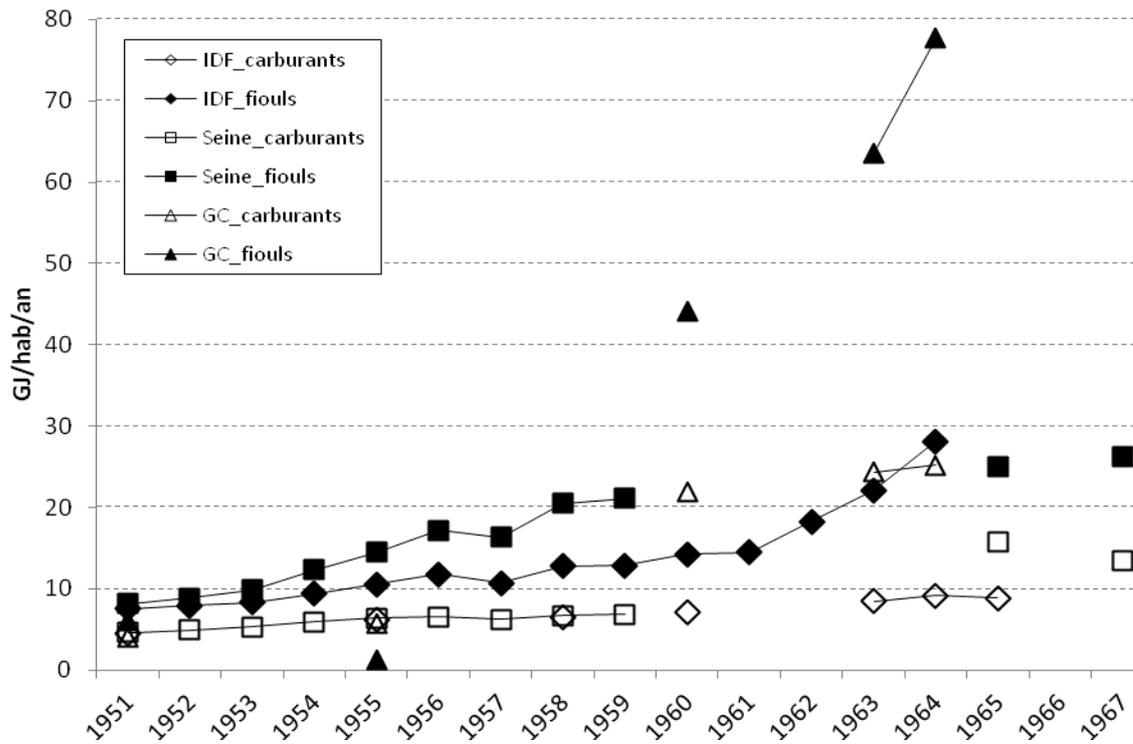


Figure 5.14. Consommation de produits pétroliers en kt/an dans la région Île-de-France selon le type de produits entre 1951 et 2007 (hors consommation de carburacteur). Source : dans le texte, chapitre 3.

Consommation de gaz

Le gaz connaît également une consommation croissante dans le territoire de la Grande Couronne au cours des années 1960 (figure suivante), alors qu'il était diffusé marginalement dans ce territoire durant la première moitié du XXe siècle, autour notamment de cokeries et de petites usines possédant de petits réseaux (voir chapitre 4, figure 4.1). La hausse de la consommation de gaz dans ce territoire concerne en fait le gaz naturel et non le gaz manufacturé. Les matières premières dans l'industrie gazière connaissent un changement durant les années 1950 ; le gaz pétrolier (GPL) pénètre d'abord dans les réseaux de gaz (figure 4.4). Néanmoins, l'approvisionnement de ce combustible n'est pas très régulier et connaît une fluctuation très probablement due à la crise d'approvisionnement en pétrole depuis 1956 (crise

de Suez) et au changement de politique d’approvisionnement vers le gaz naturel de Lacq. Lorsque le gaz naturel pénètre dans le gaz consommé par Paris et par la région Île-de-France, les réseaux de gaz ne sont plus régionaux ; l’industrie gazière met fin à ses activités de production au cours des années 1960 et le gaz naturel croît très vite dans l’approvisionnement total en gaz durant les années 1960 (INSEE, 1978, Williot, 2003). L’introduction de cette énergie dans Paris engendre une reprise de sa consommation selon un rythme de croissance forte dès le début des années 1960 pour les départements périphériques et pour Paris après 1967. Cette nouvelle énergie ensuite apparaît comme un substitut dans le chauffage domestique et industriel dans les années 1970 et 1980, lorsque le prix du pétrole devient très couteux (voir chapitre 6).

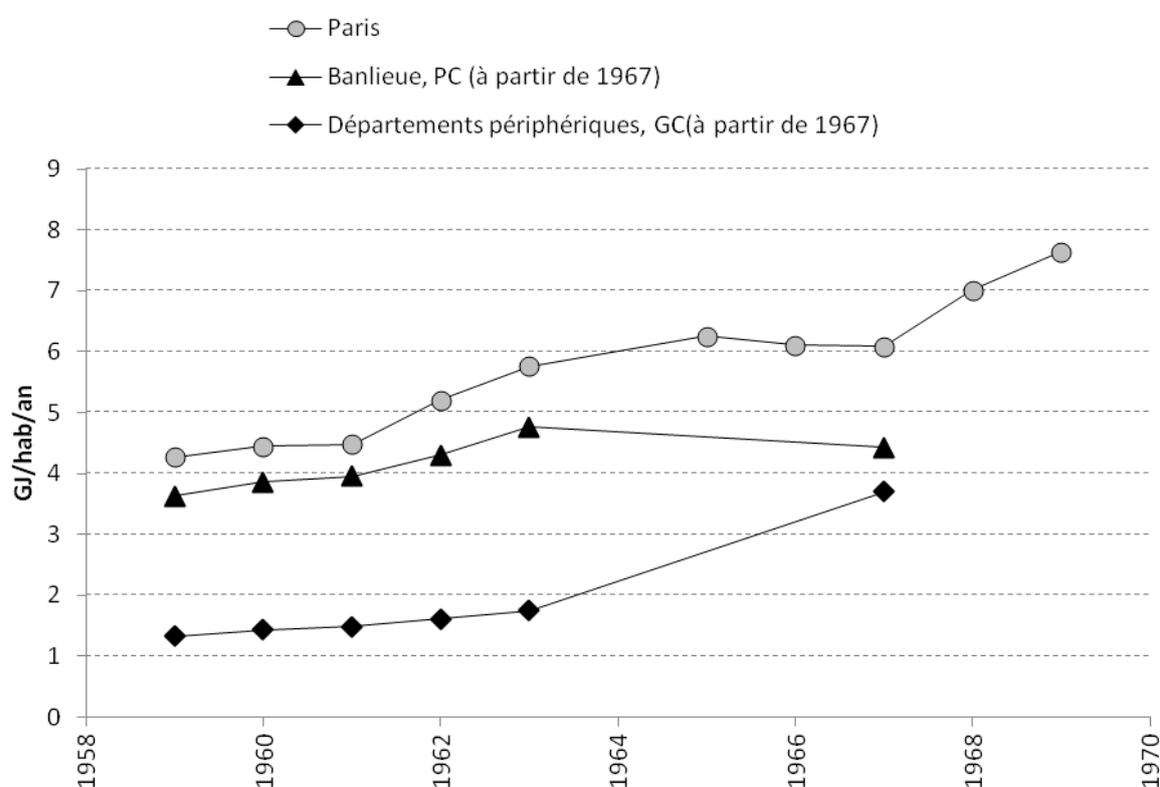


Figure 5.15. Consommation finale de gaz en GJ/hab/an selon les territoires définis entre 1958 et 1972. Source : dans le texte

Consommation d'électricité

Quant à l'électricité, il semble que la diffusion de cette énergie après 1951 ne suive pas le même rythme que le gaz, puisque ce dernier a pris un siècle pour se diffuser sur presque l'ensemble du département de la Seine, alors que l'électricité est déjà présente chez plus de 95% des ménages du département au milieu des années 1950, l'extension du réseau électrique ayant été réalisée en un demi-siècle¹. Ainsi, le taux d'équipement des ménages est aussi élevé dans les départements ruraux à la même période et la consommation de l'électricité de basse tension est plus élevée dans la grande couronne que dans la banlieue. La consommation d'électricité de basse tension de la banlieue reste relativement stable entre 1963 et 1967 (figure 5.16 haute). En revanche, la consommation totale d'électricité (de toute tension) (figure 5.16 en bas) diminue entre 1964 et 1967. Cette baisse étant due à la diminution de la consommation d'électricité industrielle (de haute tension), elle est très probablement entraînée par la désindustrialisation de la région parisienne engagée durant les années 1960 (Merlin, 2002). Il faudrait également noter que cette baisse est probablement entraînée par le changement du périmètre administratif de la banlieue à la petite couronne en 1967 ; la petite couronne inclut une partie du territoire de la Seine-et-Oise qui reste agricole.

¹ Nous parlons de la période pour laquelle la consommation d'énergie (gaz et électricité) est visible dans la courbe de la consommation totale. Elle ne comprend pas la période de découverte scientifique et d'organisation de filière de chaque énergie durant laquelle la consommation est très peu visible.

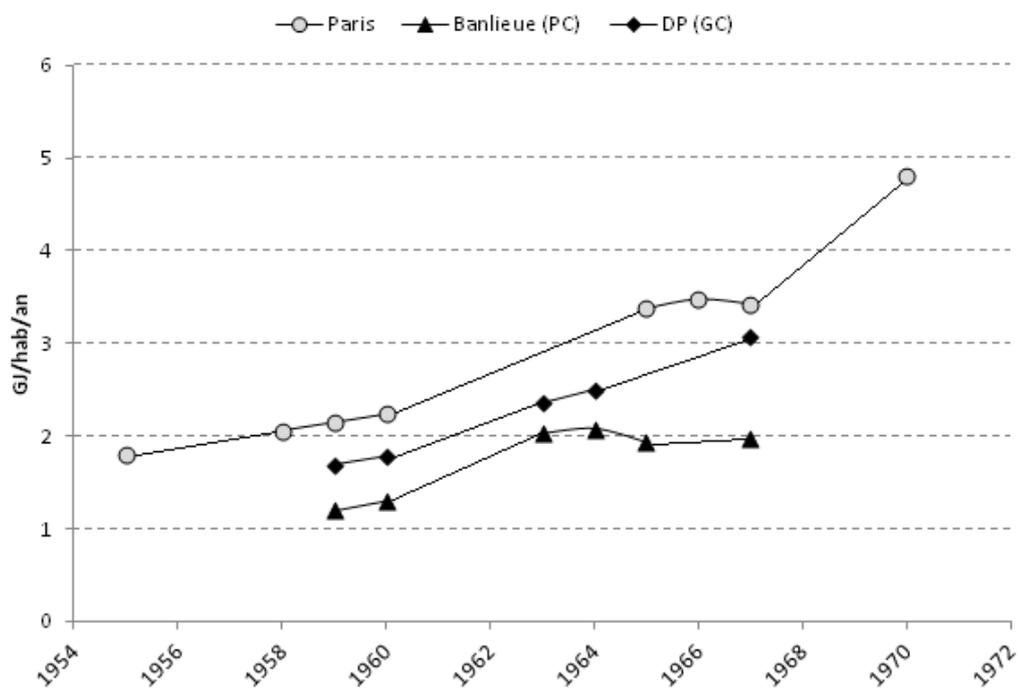


Figure 5.15.2. Consommation finale d'électricité de basse tension en GJ/hab/an selon les territoires définis entre 1958 et 1972. Source : dans le texte

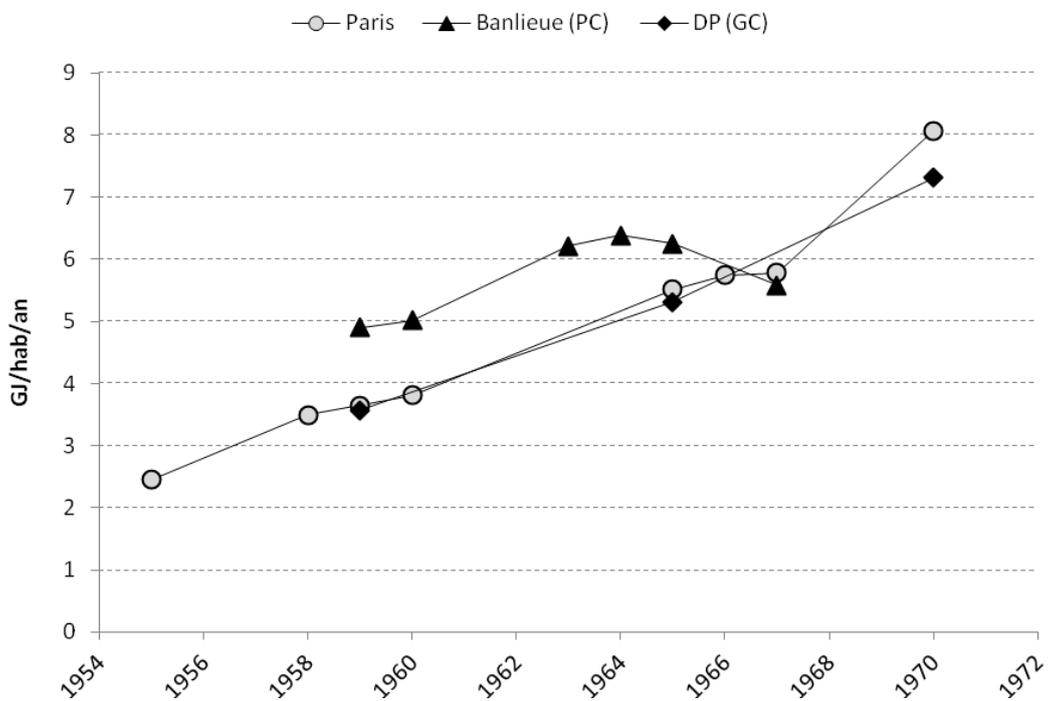


Figure 5.16. Consommation finale d'électricité de toutes tensions en GJ/hab/an selon les territoires définis entre 1958 et 1972. Source : dans le texte

Cette hausse de consommation d'électricité accompagne évidemment la consommation de combustibles du secteur électrique de la région Île-de-France. Depuis le milieu des années 1960, la consommation électrique dans la région croît à un rythme plus élevé que la période précédente de même que la consommation de combustibles du secteur électrique. Celle-ci augmente de 3434 à 7880 kt entre 1964 et 1971 ; cette croissance ne s'arrête qu'après 1976. Après avoir atteint son niveau maximal, soit 1,2 millions de tonnes de charbon de terre et de fioul lourd, la consommation de combustibles des centrales thermiques franciliennes retombe en 1985 presque au même niveau qu'en 1964. Cette diminution est réalisée sans diminution de la consommation finale d'électricité de la région et est contrebalancée par l'importation de l'électricité depuis l'extérieur de la région. Notons que le bilan de production et de consommation de l'électricité avant 1976 est quasi équilibré (voir chapitre 4). Ainsi, la production régionale d'électricité, qui représentait 12 à 15% de l'électricité nationale entre 1965 et 1976, retombe à 1% de la production nationale dans les années 2000.

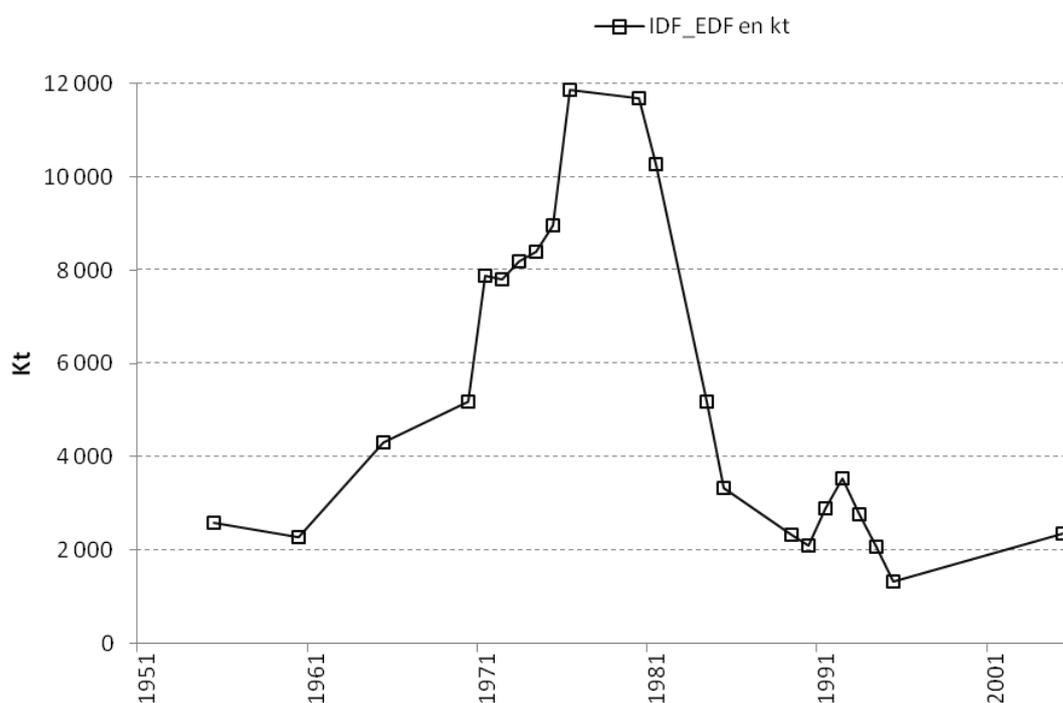


Figure 5.17. Consommation de combustibles (charbon de terre plus fioul) de la région parisienne en kt/an entre 1951 et 2006. Source : dans le texte, chapitre 4.

Consommation de chaleur de chauffage urbain

La consommation de chauffage urbain se faisait uniquement dans Paris jusqu'en 1990. Le réseau de chaleur se développe alors en dehors de Paris et s'étend dans la petite couronne. La consommation de chaleur de Paris étant connue, on va comparer cette consommation à celle de la région Île-de-France issue de la base de données EIDER. Ces données montrent la consommation importante de chaleur de chauffage urbain à Paris qui s'élève à 9,2 GJ/hab/an dès la fin des années 1970, tandis que dans le territoire hors Paris, cette consommation est quasi nulle entre 1990 et 1997 et se situe autour de 2 et 3 GJ/hab/an.

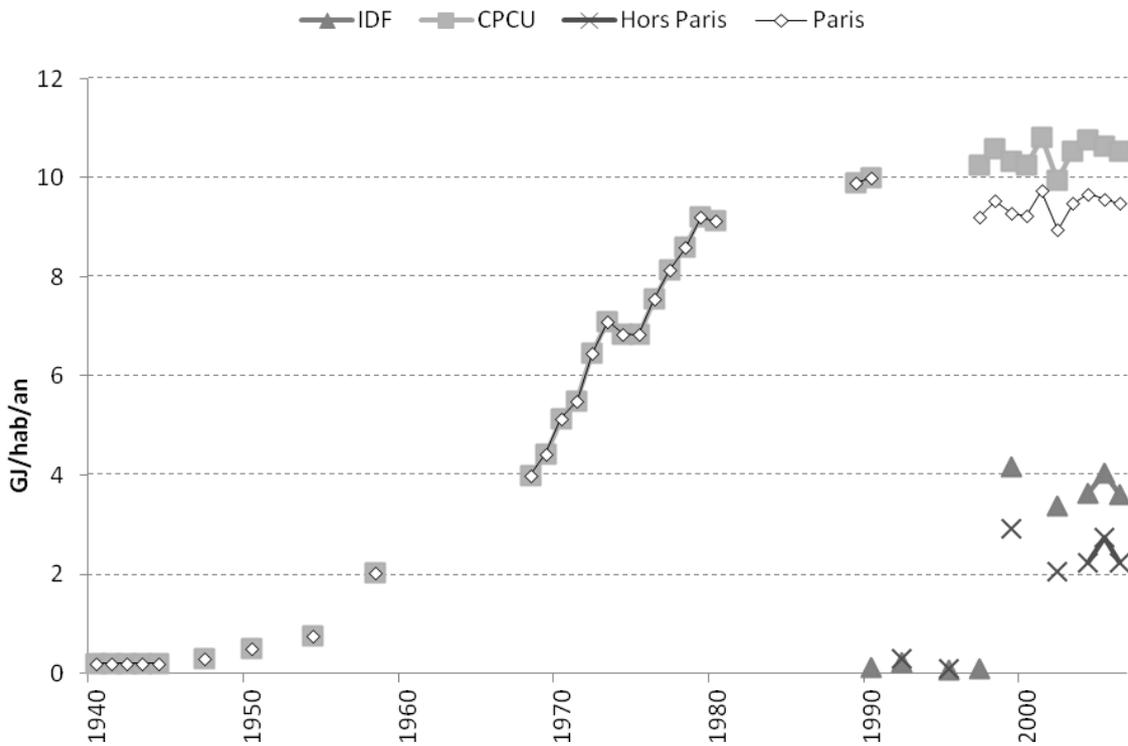


Figure 5. 18. Consommation de vapeur de l'agglomération parisienne, distribuée par la CPCU entre 1940 et 2006 en GJ/hab/an. Source : dans le texte

La consommation intermédiaire des combustibles de la CPCU est connue. La production de vapeur est principalement réalisée à partir de charbon de terre jusqu'en 1940. Dès 1945, la part de fioul lourd dans les matières premières consommées dans ce secteur s'élève à 12 %. Ce taux ne cesse d'augmenter jusqu'au milieu des années 1970 et atteint environ 70 % en termes d'énergie finale. La consommation croissante de vapeur à Paris et la préférence de la ville pour

cette énergie sont évidemment des raisons essentielles de l'évolution de ce secteur (voir chapitre 4). Néanmoins, la part de charbon de terre et de pétrole consommés dans ce secteur reste relativement faible par rapport aux secteurs régionaux du gaz et de l'électricité dont la consommation maximale s'élève respectivement à 2,8 millions de tonnes au milieu des années 1950 et 12 millions de tonnes au milieu des années 1970. Dans les années 1960 et 1970, lorsque la compagnie fonctionne principalement par les chaufferies au fioul installées dans Paris, la part de la production de vapeur hors Paris dépend de la vapeur reçue par la TIRU. De même, dans les années 1980, lorsque la CPCU relance les chaufferies au charbon de Saint-Ouen, la part de la production dépend de la croissance de la production des chaufferies au charbon et de la vapeur issue de l'incinération des déchets. La lacune de la série de données sur la part des combustibles dans ce secteur et l'estimation par interpolation créent une incertitude dans la consommation totale de combustibles jusqu'à la fin des années 1970. Néanmoins, on suppose que cette incertitude est relativement faible dans le résultat d'ensemble, du fait de la faible consommation finale de cette énergie jusqu'en 1961 : moins de 5 % de la consommation finale totale d'énergie technique. Après cette date, compte tenu de la croissance du secteur notamment par la construction de chaufferies au fioul (tableau 4.3), on suppose que la part de fioul augmente, et ce jusqu'aux années 1970. Après 1980, la consommation de combustible dans ce secteur connaît des transformations. En effet, la consommation de charbon de terre croît entre 1980 et 1991, où elle représente environ 40 %. La part de fioul diminue au rythme de la croissance du charbon de terre, puisque la part de la vapeur issue de l'incinération reste relativement stable (50% de la vapeur produite) et puisque le gaz naturel n'a pas encore pénétré dans ce secteur. Dans les années 1990, cette tendance est maintenue, tandis que, dans les années 2000, on observe de nouvelles transformations. D'une part, un changement de combustible est effectué du charbon de terre vers le gaz naturel. D'autre part, la croissance de la distribution de la vapeur reste modeste, alors que la production totale d'énergie secondaire augmente grâce au renouvellement du parc en cogénération au gaz naturel.

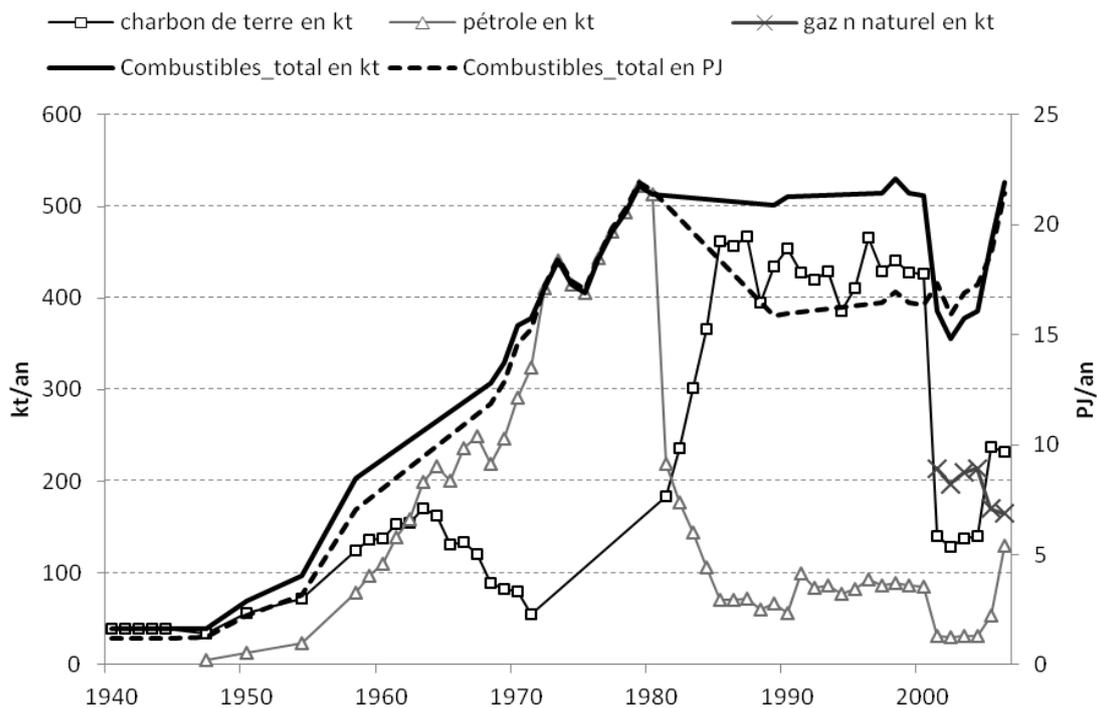


Figure 5.18.2. Consommation de matières premières de la CPCU entre 1940 et 2006 en kt/an (axe vertical gauche) et en PJ/an (axe vertical droit). Source : dans le texte du chapitre 3.

5.4.3 Consommation énergétique totale finale de l'agglomération parisienne

Consommation énergétique totale finale de la région Île-de-France entre 1955 et 2006

Comme observé plus haut, au cours des années 1950 et 1960, le niveau de la consommation finale de gaz, d'électricité et de pétrole de la grande couronne atteint approximativement le même niveau que Paris et la banlieue. Cette croissance entraîne une augmentation de la consommation de l'agglomération parisienne. Pour connaître la consommation énergétique finale unitaire de l'agglomération, on recourt à des données sur la consommation énergétique finale de l'Île-de-France. Comme le montre le tableau suivant 5.8, la consommation de l'Île-de-France est relativement bien identifiée pour chaque type d'énergie finale à l'exception de la consommation de carburacteur et de bois. La consommation de bois étant très faible, nous l'avons ignorée pour la période entre 1955 et 1987. Ensuite, on a affecté la consommation unitaire moyenne de bois entre 1990 et 2002 à la consommation de la période lacunaire entre 2002 et 2006.

Quant à la consommation de carburéacteur, les données issues de la CPDP (Comité professionnel du pétrole) n'incluent pas le carburéacteur et la base de données PEGASE ne présente pas cette consommation avant 2008. Ce produit utilisé majoritairement par l'aviation représentait une consommation quasi nulle en termes de pourcentage dans la totalité des produits pétroliers consommés dans la région durant les années 1950 et 1970. La consommation de ce produit augmente depuis 1980 et représente environ 20 % de l'ensemble en 1990, presque un tiers en 1999 et environ la moitié en 2006 (voir le tableau suivant) (IAURIF, 2005). Néanmoins, la consommation de ce produit n'étant pas connue pour les périodes comprises entre 1966 et 1989 et entre 1991 et 2005, on essaie d'estimer cette consommation.

La consommation de carburéacteur d'un appareil dépend du type d'appareil et du type de vol (long courrier, court ou moyen courrier). Dans le cas de la consommation énergétique d'un aéroport, où un appareil fait le plein, elle dépend des deux variables précédentes et en plus du trafic aérien. On dispose de données sur le nombre de mouvements aériens (un mouvement est égal à un décollage ou à un atterrissage) de chaque aéroport civil de la région parisienne qui sont quasi continues pour la période comprise entre 1955 et 2006 (figure 5.18.3- gauche). Selon ces données, comme le montre la figure 5.18.3, les mouvements aériens en Île-de-France croissent de façon quasi exponentielle entre 1961 et 1972, période du développement de l'aéroport Orly. Ensuite, ils connaissent une période de stabilisation entre 1973 et 1985, lors des crises pétrolières. De 1986 à 2000, ils croissent à nouveau de façon exponentielle grâce au développement de l'aéroport de Roissy. La corrélation étant forte ($R=0,96$) entre le nombre de mouvements aériens et la consommation de carburéacteur, nous avons obtenu la consommation de carburéacteur à partir du nombre de mouvements aérien par la formule suivante, comme le montre la figure 5.18.3 : $y = 0,0085x - 993,01$.

Tableau 5.8. Consommation finale de combustibles en kg/hab/an de la région Île-de-France entre 1955 et 2005 (Les données sur la consommation finale sont continues entre 1951 et le juin 1968 par les bulletins trimestriels de l'INSEE, 1952-1965, 1966-1970, qu'on présente ici en partie. Elles sont ensuite disponibles tous les 1 à 5 ans depuis 1971)

| Kg/hab/an | Charbon tous secteurs | Produits pétroliers | Dont Carburéacteur | Gaz naturel | Bois |
|-----------|-----------------------|---------------------|--------------------|-------------|------|
| 1955 | 1926 | 399 | - | 63 | - |
| 1960 | 1648 | 513 | - | 68 | - |
| 1965 | 539 | 912 | 2 | 105 | - |
| 1967 | 447 | 945 | - | 98 | - |
| 1971 | - | 1010 | - | 143 | - |
| 1976 | 449 | 1104 | - | 222 | - |
| 1979 | - | 1174 | - | 320 | - |
| 1981 | 504 | 1265 | - | 344 | - |
| 1987 | - | 1007 | - | | - |
| 1990 | 22 | 1067 | 253 | 409 | 0,24 |
| 1992 | 13 | 1104 | 297 | 439 | 0,27 |
| 1995 | 9 | 1128 | 324 | 425 | 0,23 |
| 1997 | 5 | 1141 | 349 | 459 | 0,21 |
| 1999 | 4 | 1153 | 404 | 469 | 0,20 |
| 2002 | 5 | 1085 | - | 496 | 0,16 |
| 2004 | 2 | 1105 | - | 497 | - |
| 2005 | 4 | 1084 | - | 492 | - |
| 2006 | 4 | 1073 | 499 | 516 | - |

Source : Combustibles fossiles, selon INSEE, 1952-1965, p. 9, INSEE, 1959, p. 12-13, DRIRE, 2001, INSEE, 1966-1970, p.4, 8, 12 ; Bois de feu selon, PEGASE ; Carburéacteur selon INSEE, 1952-1965, EIDER, IAURIF, 2005, p. 1 (La consommation de charbon de terre n'inclut pas la consommation dans la sidérurgie qui était entre 2-3 kt/an entre 1950 et 1963.)

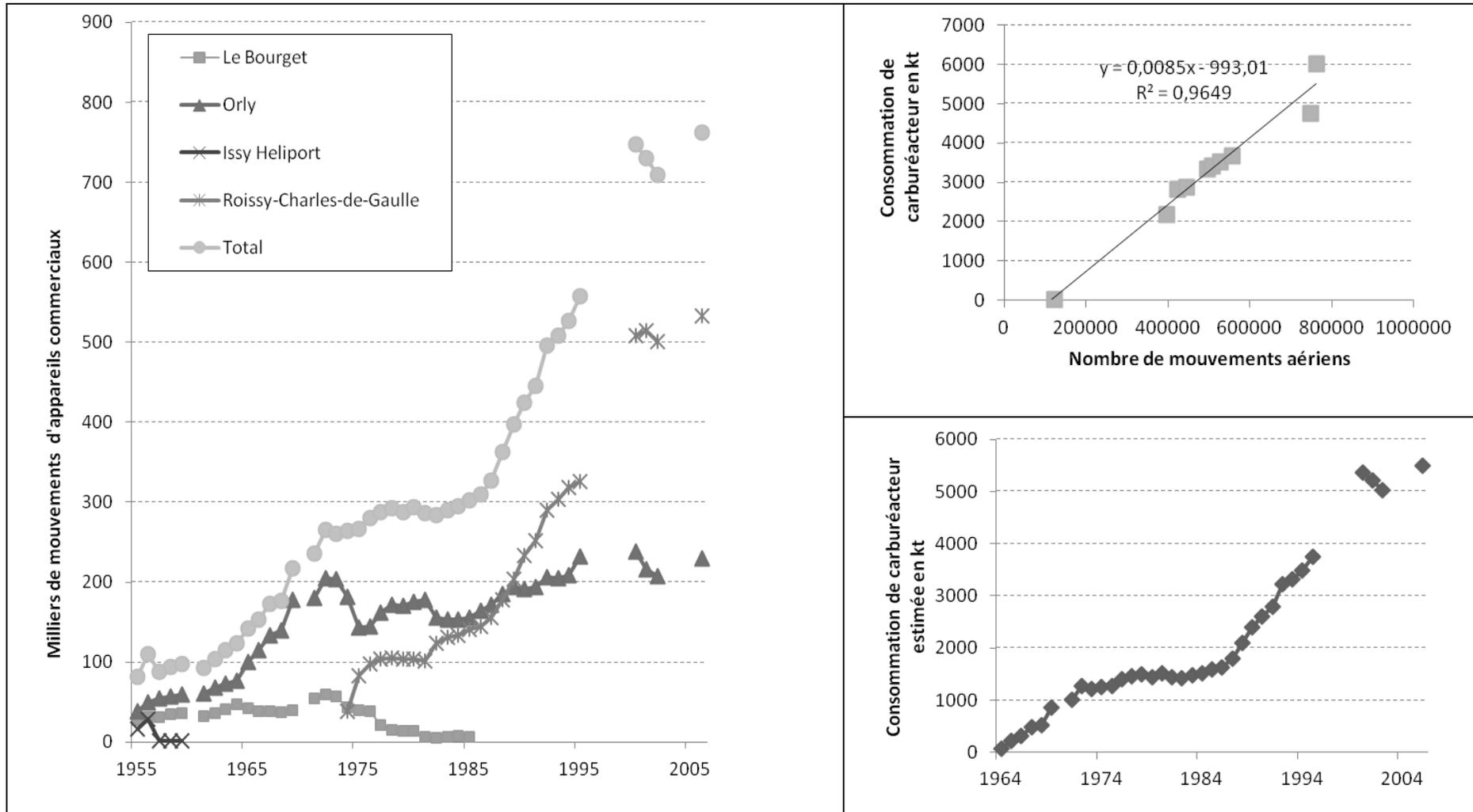


Figure 5.18.3 Mouvements aériens en milliers de mouvements d'appareils commerciaux (gauche), test de corrélation entre le nombre de mouvements aériens et la consommation de carburacteur (droite haute) et consommation de carburacteur estimée de la région Île-de-France (droite basse).
 Source : Ministère des Travaux publics, des Transports et du tourisme (relevé des données publiées en 1960, 1965, 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1997, 2004.)

Consommation de produits pétroliers de Paris entre 1955 et 2006

L'enquête de livraison sur les produits de fioul (domestique et lourd) se fait sur des sources de consommation qui sont fixes, telles que les postes chauffage, eau chaude et éclairage : elles sont attachées au bâtiment. En revanche, la consommation pour le transport est, elle, mobile. Dans ce cas, le périmètre spatial pose problème, puisque le lieu de livraison des combustibles n'est pas toujours identique à celui de la consommation. De ce fait, la consommation de produits pétroliers de carburant, de supercarburant, de gazole utilisés pour le transport a un périmètre statistique ouvert. Ce problème s'accroît dans la région, d'une part en parallèle avec l'accroissement de la mobilité personnelle et des produits, d'autre part à cause du départ des stations de carburants vers l'extérieur de l'agglomération. Le deuxième cas de figure se présente dans la région Île-de-France à partir de 1980. En effet, l'éloignement des stations-service du centre-ville vers les grandes surfaces est une tendance nationale (DRIRE, 2001). De ce fait, les statistiques sur la vente de produits pétroliers issues du comité professionnel du pétrole (CPDP) représentent de moins en moins la consommation réelle d'un territoire. Ce problème s'accroît lorsqu'on étudie la consommation de carburant à une échelle spatiale inférieure, telle que le département. Cette dégradation de la statistique de la livraison des produits de carburant pour le transport après 1980 nécessite une méthode de correction.

Si l'on observe la tendance régionale de consommation de carburant, une valeur maximale de 25,2 GJ/hab/an est atteinte entre 1971 et 1979. Ensuite, la consommation baisse jusqu'à 18,9 GJ/hab/an en 1991. Puis, à partir de 1991, cette consommation reste relativement stable et varie entre 19,3 et 20,2GJ/hab/an, alors que le gazole croît au dépend du supercarburant. La chute de la consommation de ces produits à Paris en kg/hab/an après 1987 est douteuse, en raison de ce qui a été évoqué précédemment. De ce fait, nous avons fixé la consommation de carburants en GJ/hab/an de 1987 jusqu'en 2006, ce qui donne un résultat approximatif à la consommation de ces produits en petite couronne.

5.5. Consommation finale et primaire de biomasse alimentaire

5.5.1. Consommation de fourrages des chevaux à Paris entre 1801 et 1943

À Paris, la force motrice produite par les chevaux fait partie de l'énergie mécanique essentielle au transport urbain. Les fourrages pour ces animaux étant un poste essentiel du droit d'octroi de Paris, la série est quasi continue sans lacune importante. Entre 1801 et 1859, la consommation de fourrages se situe entre 109 et 124 kt/an, alors qu'en 1860, lors de l'extension du mur d'octroi de Paris, elle élève à 339 kt/an. Elle atteint 579 kt/an, soit 9,3 PJ/an en 1890. Si l'on rapporte cette consommation totale par an à la population de la ville de Paris, entre 1801 et 1830, la consommation unitaire de fourrages en kg/hab/an varie entre 190 et 260 kg/hab/an, avec une valeur moyenne trentenaire de 217 kg/hab/an sans tendance à la hausse ni à la baisse. Puis, la consommation unitaire chute à 155 kg/hab/an entre 1831 et 1860, avant de reprendre le même niveau qu'entre 1801 et 1830, avec 207 kg/hab/an. Par ailleurs, la consommation totale pour le périmètre de «Paris 2006» et pour l'agglomération parisienne ne peut pas être obtenue à partir de la consommation unitaire en kg/hab/an, puisqu'elle dépend du nombre de chevaux et non de la population.

Nous avons donc collecté des données sur le nombre de chevaux issus principalement de Bouchet, de Dupin et de la Statistique agricole de la France de 1886 et de 1908. Le nombre de chevaux par département fait partie du recensement agricole à partir de la fin du XIXe siècle. On dispose de ces données depuis 1885. Avant cette date, on estimait le nombre de chevaux selon leur ration¹. La Statistique agricole de la France inclut par ailleurs les chevaux parisiens qui, de fait, ne font pas partie des animaux de ferme. À Paris, cet animal est destiné au transport privé et collectif et est possédé par des particuliers et par des compagnies d'omnibus. Par la combinaison de ces sources, on peut estimer l'évolution du nombre de chevaux urbains dans Paris et dans le département de la Seine entre le début du XIXe et le début du XXe siècle. Il s'élève à Paris de 17 000 en 1820 à 70 000 en 1885 puis 78 000 au début du XXe siècle, sa valeur maximale. Selon l'octroi de Paris, les fourrages pour les chevaux représentent une croissance d'un facteur trois durant le XIXe siècle en termes de consommation totale en kt de produits. Dans le département de la Seine, simultanément, on passe de 40 000 chevaux en 1824 à presque 100 000 chevaux au début du XXe siècle.

¹ Le recensement du nombre de chevaux commence en 1872 en prévision d'une guerre éventuelle.

Les chevaux requièrent une quantité importante de fourrages. Le transport et le stockage de cette nourriture occupent alors une grande partie de la gestion des flux et de l'espace en milieu urbain (McShane, Tarr, 2007). La croissance de nombre de chevaux urbains se traduit par conséquent par un impact écologique considérable pour l'extraction et le transport de matières fourragères, puisque cet animal peut consommer 11,25 kg d'avoine par jour, soit environ 4,1 tonnes par an. L'équivalence s'établit donc entre les différents fourrages en considérant la qualité nutritive de chaque type de fourrage (avoine, orge, paille de froment, etc.)¹. Sans rentrer dans le détail, on va seulement établir une équivalence entre la quantité de matière première par tête de chevaux en comparaison entre la consommation recensée par l'octroi et le nombre de chevaux estimés et recensés par l'administration comme le montre le tableau suivant. On va utiliser ces ratios pour estimer la consommation pour Paris 2006 et pour l'agglomération parisienne. Entre 1825 et 1860, on ne dispose pas de données sur le nombre de chevaux pour la population des zones annexées de 1860 (population de 2006 moins la population de la ville de Paris). De ce fait, on essaie d'estimer le nombre de chevaux en utilisant le ratio issu du nombre moyen de chevaux par 100 habitants de 2,2, valeur moyenne de 2,3 de 1820 et de 2,1 de 1850 pour Paris 2006. Pour la consommation de l'agglomération, on utilise la ration des chevaux obtenue à partir de 1876 jusqu'en 1912 en supposant que cette consommation diminue de manière linéaire jusqu'en 1940 comme dans le cas de Paris (sauf la période de guerres, qu'on exclut des données) (voir la figure. 5.17).

Tableau 5.11. Consommation de fourrage par tête de chevaux à Paris entre 1850 et 1912

| | kg/tête | GJ EB/tête |
|------|---------|------------|
| 1850 | 5980 | 95 |
| 1874 | 6868 | 109 |
| 1885 | 6377 | 101 |
| 1906 | 5731 | 91 |
| 1912 | 6504 | 104 |

Source : dans le texte

¹ Par exemple, le chimiste Jean-Baptiste Boussignault s'intéresse particulièrement à cette question du bilan de matière dans la vache et dans le cheval (Stafford, 2010). Selon Cardini (1845, p. 540-546.) les fourrages peuvent être quantifiés selon les « qualités nutritives de certains fourrages et rapports entre eux ».

Par ailleurs, la composition des fourrages est intéressante du point de vue de la valorisation énergétique des résidus agricoles. Les fourrages sont divisés en trois catégories de produits : grains de céréales (avoine et orge), foin et paille. Dans la composition des fourrages, sur toute la période concernée par l’octroi, l’avoine et la paille représentent chacune entre 30 et 45% des fourrages totaux, le foin entre 20 et 30%, et l’orge reste marginale. Lorsque la consommation de foin diminue jusqu’au début du XXe siècle passant de 30% à 20% de tous les fourrages enregistrés par l’octroi, l’avoine augmente de 30% à 40% pour la même période. La paille, quant à elle, occupe 35 à 45% de tous les fourrages sans marquer de tendance à la baisse ou à la hausse. Elle assurait une valorisation d’environ 20 à 40 % en poids des résidus susceptibles d’être produits pour l’approvisionnement de Paris en céréales. Les résidus (paille) valorisés doivent être soustraits de la consommation totale primaire dans le bilan d’ensemble (voir la section 5.6). De ce fait, l’augmentation de la part de l’avoine dans la consommation totale de fourrage se traduit par une augmentation du coût énergétique de l’alimentation animale.

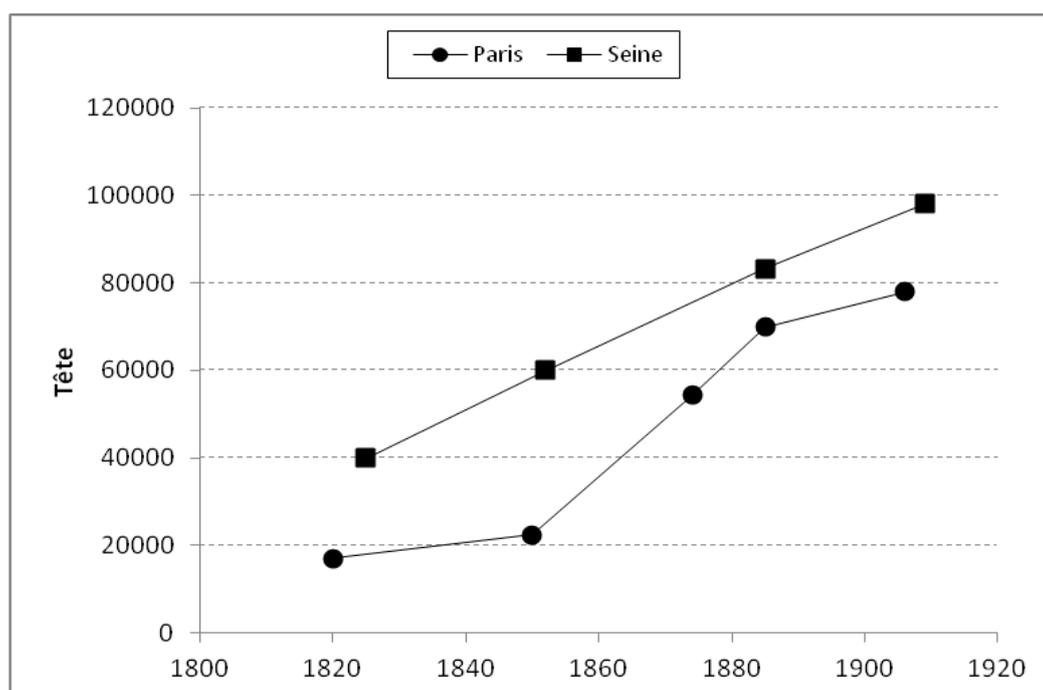


Figure 5.19. Nombre des chevaux à Paris et dans le département de la Seine, 1820-1920.

Source : Bouchet, 1993, Dupin, 1827, Barles, 2007 ; Ministère de l’agriculture, 1886 ;
Ministère de l’agriculture, 1908.

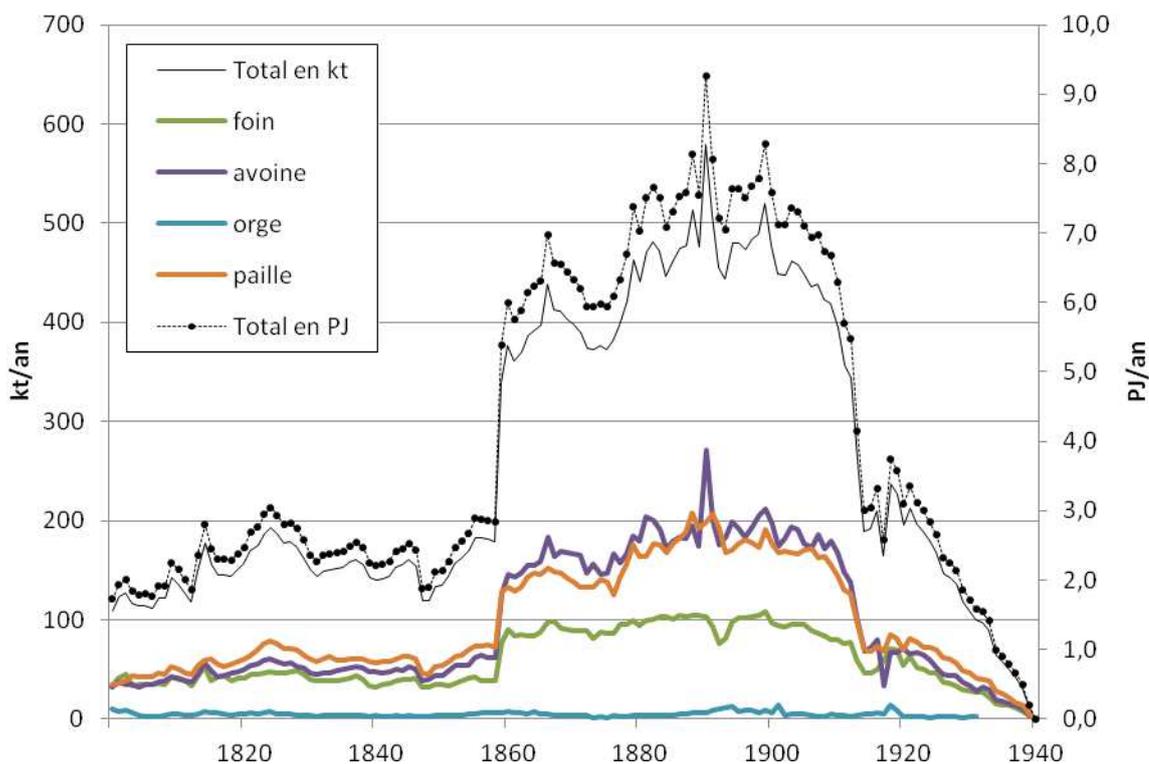


Figure 5.19.2. Consommation en kt/an de fourrage de la ville de Paris. Source : dans le texte

5.5.2. Consommation finale de biomasse alimentaire

Dans la consommation énergétique totale finale, la consommation de biomasse alimentaire finale ne varie pas considérablement, compte tenu du fait que le besoin alimentaire journalier est relativement constant à court terme et malgré l'évolution à long terme du régime alimentaire. En revanche, la prise calorifique journalière d'un Français connaît une hausse durant le XIXe siècle de 2700kcal/pers/j à 3400 kcal/per/j, ensuite il retombe à 2500 cal/per/j durant le XXe siècle, essentiellement en raison de la baisse des glucides au profit des lipides¹. D'après une étude historique de la consommation d'énergie à long terme de la ville de Vienne, la part de la

¹ La diminution générale des glucides au profit des lipides est issue de la substitution des produits végétaux (céréales, légumes secs) par les produits animaux (viande, corps gras) qui ont une valeur calorifique plus élevée en kcal par gramme (Combris, Soler, 2011). ; Les données présentées étant obtenues à partir d'études de Toutain et des données issues de la FAO, la consommation correspond à la disponibilité alimentaire. ; Dans l'article de Combris et Soler (2011), la consommation journalière d'un Français est exprimée en Calories/personne/jour. 1 "grande" Calorie, unité pour l'énergie nutritionnelle, est égale à 4,186 kJ, tandis que 1 calorie thermochimique est égale à 4,184 joules. L'écart entre 1 Calorie et 1 kcal étant très faible, nous considérons que 1 Calorie est égale à 1 kcal. Voir Hargrove (2007).

consommation énergétique de l'alimentation représente environ 5 à 10 % de la consommation énergétique finale totale, y compris les combustibles et l'électricité (Krausmann, 2006).

Produits végétaux

La consommation alimentaire finale d'aliments d'origine végétale inclut des produits consommés sous forme de produits agricoles primaires tels que la pomme de terre, les fruits et les légumes et des produits plus élaborés tels que le sucre et l'huile. Dans le cas de Paris, les principaux groupes d'aliments, parmi ceux que nous avons définis dans le chapitre précédent, sont les céréales, les racines et tubercules et les oléagineux en termes de consommation en kg de produits frais par habitant par an. Ces trois groupes d'aliments représentent à eux seuls 53 % de la consommation totale des produits végétaux en produit frais pour 1820 (74 % en termes de matière sèche). En particulier, les céréales occupent une place majeure, 39 % des aliments végétaux en produits frais et 64 % en matière sèche en 1820¹. Les 14 % restants se partagent entre les racines et tubercules, le sucre et l'huile alimentaire. Ces produits tendent à voir leur part diminuer, mais restent toujours des produits majeurs. Des données sur la consommation du sucre à Paris issus de l'octroi sont très lacunaires. Nous avons donc utilisé les données nationales issues de Toutain (1992). Dans le cas de la consommation d'huile alimentaire recensée par l'octroi, elle varie entre 7,3 et 11,2 kg/hab/an à la période entre 1823 et 1869 sans une tendance de hausse ou de baisse. La lacune importante de série de l'octroi rend difficile à déterminer la consommation de ce produit pour les autres années. De ce fait, nous avons utilisé la valeur moyenne de 10 kg/hab/an pour la deuxième moitié du XIXe siècle. Ainsi, des données sur la consommation de pomme de terre durant la deuxième moitié du XIXe siècle sont douteuses. En particulier, la disparité entre la valeur moyenne nationale et la valeur issue de la ration journalière de Paris est trop importante. Les sources de données anciennes indiquent une valeur faible, alors que la disponibilité alimentaire croît durant le XIXe siècle : 33,9 kg/hab/an pour 1820, puis 35,7 kg/hab/an en 1854. De ce fait, nous avons choisi la disponibilité moyenne nationale de Toutain de 104 kg/hab/an pour la deuxième moitié du XIXe siècle. Les données sur la consommation de fruits et légumes sont aussi rares qu'incertaines : elle n'est connue pour 1854. Selon l'étude d'Husson, elle s'élève à 790 g/j/hab, soit 288 kg/hab/an. Notons que la consommation unitaire issue de l'enquête de l'INSEE pour la région parisienne pour le XXe siècle ne se situe qu'à environ 100 kg/hab/an. En effet, la consommation dont parle Husson inclut l'autoconsommation, les conserves, les pertes éventuelles au marché, quelques fruits oléagineux, qui peuvent faire augmenter la consommation annuelle (voir le chapitre 3). Des

¹Excepté la boisson.

ouvrages contemporains, tels que Toutain (1992) et Aron (1965), accentuent notre doute. Selon Aron, la consommation de fruits et de légumes à Paris en 1820 était de 300 g/pers/j, soit 110 kg/hab/an (Aron, 1965, cité par Barles, 2012). Selon Toutain, la disponibilité de ces produits est de 100 kg/hab/an pour 1855–1904. Selon l’estimation de la préfecture de la Seine (Préfecture du département de la Seine, 1894), la consommation de fruits et légumes de Paris se situe entre 88 et 94 kg/hab/an entre 1892 et 1893¹. Vu que la consommation de ces produits après 1971 tend à diminuer selon l’enquête de l’INSEE, nous avons conclu que la consommation finale se situe plutôt à environ 100 kg/hab/an.

On présente par la suite la base de données utilisée pour le calcul de la consommation alimentaire en produits frais. Pour 1869, la consommation de 1896 a été reprise pour la plupart de produits. Néanmoins, la consommation de produits principaux tels que les céréales et la viande (sous-section suivante) est corrigée selon les données de l’octroi et la thèse de Chatzimpiros (2011).

Tableau 5.9. La consommation alimentaire de produits végétaux de Paris entre 1820 et 1896, en kg/hab/an

| kg/hab/an | céréale | légume sec | huile alimentaire | sucre | pomme de terre | fruits et légumes | Total |
|-----------|---------|------------|-------------------|-------|----------------|-------------------|-------|
| 1820 | 116,2 | 30,3 | 2,1 | 7,3 | 33,7 | 109,5 | 299,1 |
| 1854 | 107,5 | 7,4 | 15,9 | 11,3 | 23,0 | 100,0 | 265,1 |
| 1869 | 97,6 | 8,4 : a | 10,0: b | 27,0 | 104,0 | 100,0 | 347,0 |
| 1896 | 95,2 | 8,4 : a | 10,0: b | 27,0 | 104,0 | 100,0 | 344,6 |
| 1971 | 53,3 | 29,3 | 10,7 | 34,9 | 56,3 | 111,5 | 296,0 |
| 1981 | 46,6 | 26,8 | 9,2 | 20,7 | 39,4 | 90,2 | 232,9 |
| 1983 | 39,9 | 25,8 | 8,8 | 19,2 | 35,9 | 89,6 | 219,2 |
| 1991 | 47,0 | 26,7 | 8,2 | 15,7 | 23,4 | 87,3 | 208,3 |

Source : dans le texte (a. Ration moyenne nationale pour la deuxième moitié du XIXe siècle, environ 3% de la consommation totale de produits végétaux pour 1869 et 4% pour 1896. b. rapport d’approvisionnement 1896.)

¹ Estimation de la préfecture à partir des données sur le nombre des voitures et des places délibérées pour les fruits et légumes au marché des Halles (400 kg/voiture ou 150 kg/place délibérée).

Produits animaux

La consommation de poissons et de fruits de mer se situe à 8 kg/hab/an pour 1820 et à 12kg/hab/an pour 1854, selon Benoison de Chateauneuf et Husson. La consommation de ces produits en 1889 est connue par le rapport d’approvisionnement de département de la Seine (voir le chapitre 3). La consommation donnée par Foville semble très basse, bien que la tendance de la consommation de ce produit montre une hausse durant le XIXe siècle. La consommation de viande bovine, porcine, de mouton et de lait provient de Chatzimpiros (2011). Pour la consommation d’autres viandes telles que la volaille et le gibier pour le XIXe siècle, elle est complétée par les sources anciennes citées précédemment (Benoiston de Châteauneuf et Husson). Pour la consommation de viande de mouton à partir de 1971, qui n’est pas incluse dans la base de l’INSEE est estimée à partir de la base bilan alimentaire de la France de la FAO. Selon ces données, la consommation de viande de mouton se situe à entre 3 et 5 % de l’ensemble de viandes entre 1961 et 1992¹. Nous avons donc défini la consommation d’*Autres viandes* par l’addition de la consommation de la viande volaille connue à la consommation de la viande de mouton supposée (4 % pour 1971, 1981 et 5 % en 1991).

Tableau 5.10. La consommation alimentaire de produits animaux de la région Île-de-France entre 1820 et 1991 (base de données non corrigée)

| kg/hab/an | Viande | Dont | | | Poisson | Œufs | Beurre, fromage | Lait |
|-----------|--------|-------|--------|----------------|---------|------|-----------------|------|
| | totale | Bovin | Porcin | Autres viandes | | (a) | | (b) |
| 1820 | 68 | 48 | 10 | 18 | 8 | 5 | 6 | 8 |
| 1854 | 64 | 46 | 5 | 21 | 12 | 1 | 4 | 8 |
| 1869 | 75 | 51 | 9 | 25 | 11 | 2 | 4 | 8 |
| 1896 | 74 | 50 | 12 | 21 | 11 | 10 | 11 | 10 |
| 1971 | 56 | 23 | 0 | 18 | 7 | 8 | 23 | 69 |
| 1981 | 57 | 21 | 0 | 20 | 8 | 8 | 22 | 64 |
| 1983 | 52 | 19 | 0 | 18 | 7 | 7 | 21 | 64 |
| 1991 | 46 | 15 | 0 | 16 | 8 | 6 | 21 | 60 |

Source : texte

(a) Densité du lait de 1,032, 20 œufs pèsent 1 kg, selon l’octroi de Paris.

(b) à partir de 1971 le lait comprend les yaourts et le lait gélifié dont la masse volumique est considérée comme étant de 0.125kg/unité, sur la base du yaourt nature de DANONE.

¹ Nous avons relevé des données de 1961, 1972, 1982 et 2002. , en ligne : www.fao.org.

²*Milk Composition & Synthesis Resource Library*, University of Illinois, [en ligne] [réf. du 13 jan 2012], Disponible sur la toile : <http://classes.ansci.illinois.edu/ansc438/milkcompsynth/milkcompsynthresources.html>.

Consommation unitaire finale de biomasse alimentaire

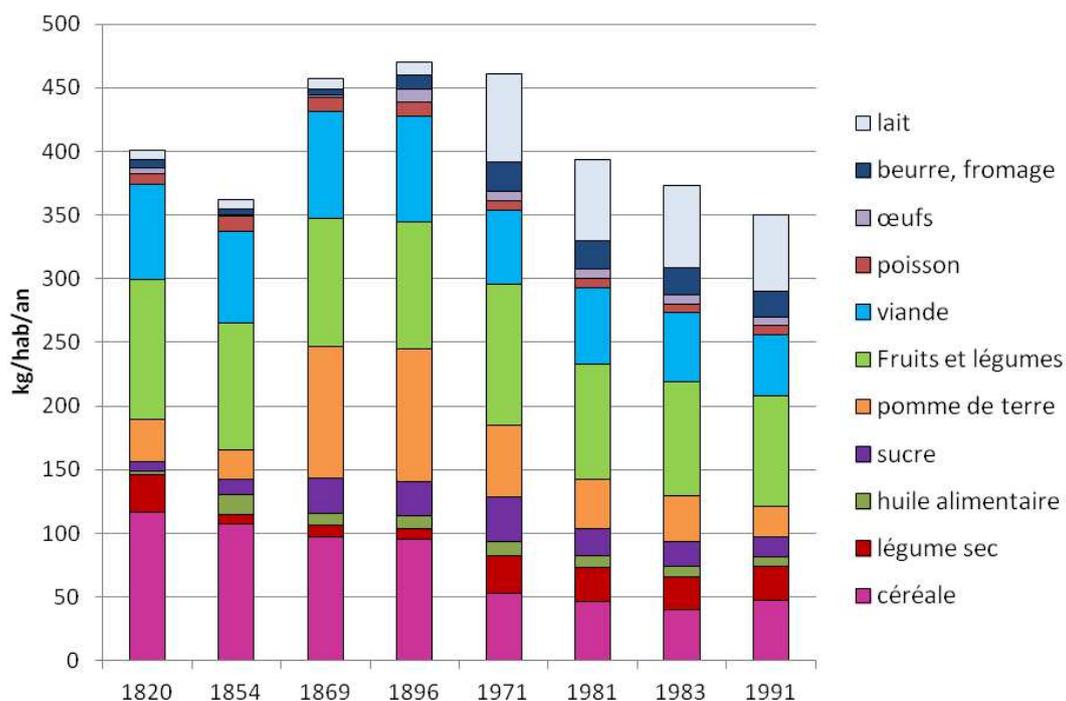
Les résultats de la consommation alimentaire totale par habitant sont présentés en termes de poids de produit frais, de matière sèche et de GJ dans les tableaux 5.10 et 5.11. Pour constituer une série comparable à celle de l'énergie technique entre 1801 et 2006, on a affecté la consommation alimentaire de 1820 à toute la période comprise entre 1801 et 1820. De même, la consommation de 1991 est affectée à la période 1991-2006. Pour le reste des années, la consommation alimentaire finale non connue, les valeurs sont obtenues par l'interpolation entre chaque consommation connue.

Le résultat en kg de produit frais/hab/an montre une consommation alimentaire totale finale qui tombe de 401 à 362 kg/hab/an entre 1820 et 1854. La consommation totale finale alimentaire ensuite s'élève de 362 à 469 kg/hab/an entre 1854 et 1896. Entre 1896 et 1971, l'évolution en termes de quantité de consommation totale finale alimentaire reste modeste, tandis que la part de chaque groupe d'aliments change dans la consommation totale. On remarque la baisse de la consommation unitaire en kg/hab/an dans trois groupes d'aliments : pomme de terre, céréales et viande, et la hausse dans cinq groupes, légumes secs, sucre, fruits et légumes et lait et produits laitiers. La consommation finale retombe de 450 à 383 kg/hab/an entre 1971 et 1991. L'évolution reste plus modeste pendant le XIXe. La diminution progressive de la consommation finale alimentaire est ainsi observée entre 1971 et 1991 et concerne notamment les groupes d'aliments traditionnels : pomme de terre, sucre, légumes secs et céréales. En revanche, la baisse de consommation de fruits et légumes est probablement due au fait que la boisson et d'autres produits plus élaborés (confiserie, etc.) n'ont pas été comptés. La consommation totale finale baisse de 196 à 180 kg ms/hab/an entre 1820 et 1854 et augmente jusqu'à 209 kg ms/hab/an en 1896. Ensuite, la consommation totale unitaire tombe à 155 kg ms/hab/an en 1991, soit une baisse de - 35 % entre 1896 et 1991. En termes d'énergie, la consommation finale se situe à environ 4,1 GJ/hab/an en 1820 et 1854 (tableau 5.10.2, figure 5.19.3 basse). Ensuite, la consommation finale totale en GJ/hab/an s'élève jusqu'à 4,6 GJ/hab/an en 1896, principalement à cause de la viande, de la pomme de terre, du sucre et des produits laitiers (par comparaison avec 1820 et 1854). Une baisse est ensuite observée entre 1896 et 1991, de l'ordre de - 22% de 4,6 GJ/hab/an à 3,6 GJ/hab/an, ce qui est relativement moins important par rapport à la baisse dans la consommation finale totale en matière sèche à la même période.

Tableau 5.10. 2. La consommation alimentaire parisienne en GJ/hab/an et en kcal/hab/an entre 1820 et 1991

| | GJ/hab/an | kcal/hab/jr (1 cal = 4,184 j) | kcal/hab/jr (1 cal = 4,186 j) |
|------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1820 | 4,14 | 2714 | 2713 |
| 1854 | 4,06 | 2656 | 2655 |
| 1869 | 4,43 | 2898 | 2897 |
| 1896 | 4,63 | 3035 | 3033 |
| 1971 | 4,36 | 2858 | 2857 |
| 1981 | 3,79 | 2481 | 2480 |
| 1991 | 3,60 | 2356 | 2355 |

Source : cette thèse.



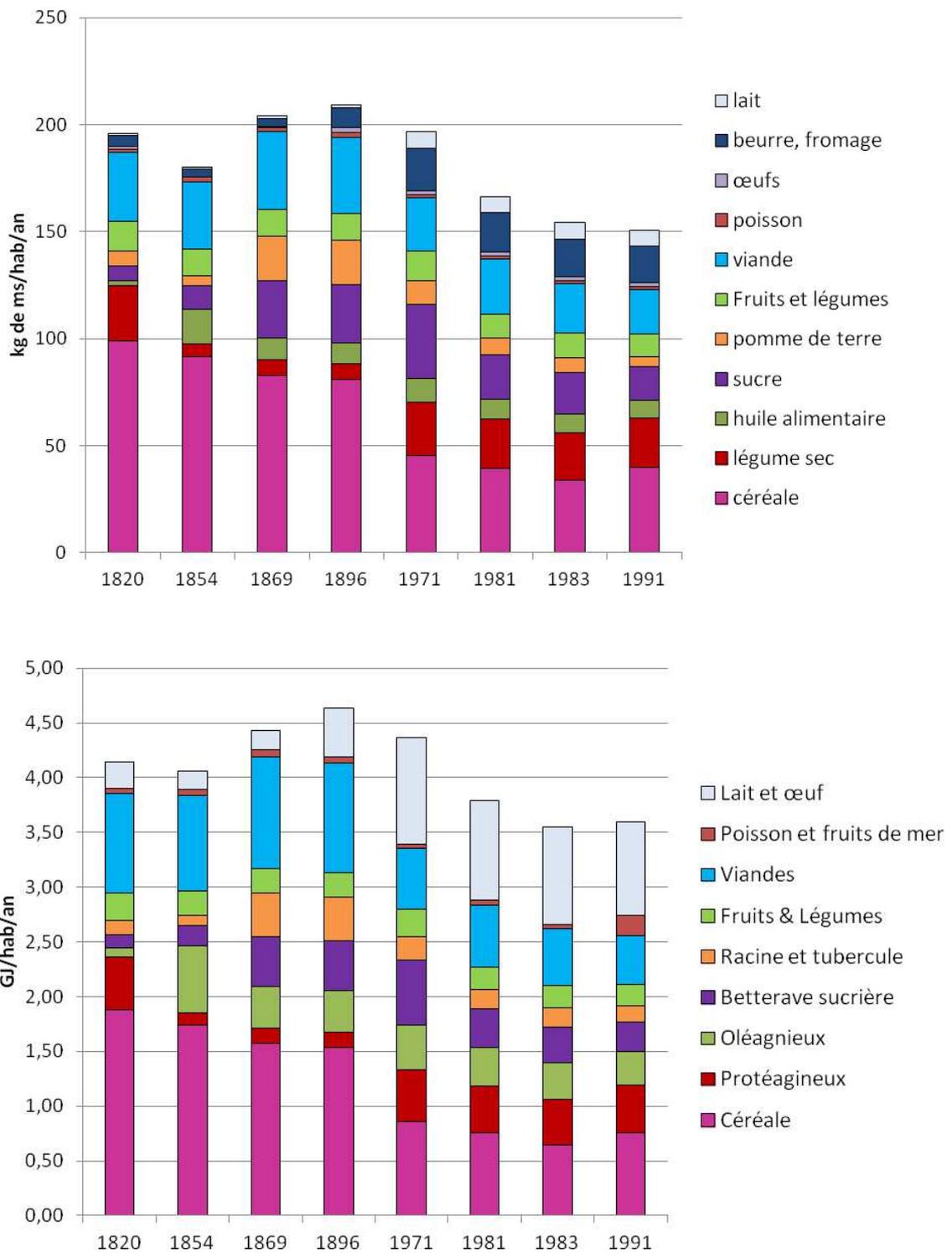


Figure 5.19.3. Consommation finale alimentaire de Paris et de la région Île-de-France entre 1820 et 1991 en kg de produits frais/hab/an(en haut), en kg de MS /hab/an (au milieu) et en GJ/hab/an (en bas). Source : cette thèse.

5.5.3. Consommation primaire de biomasse alimentaire

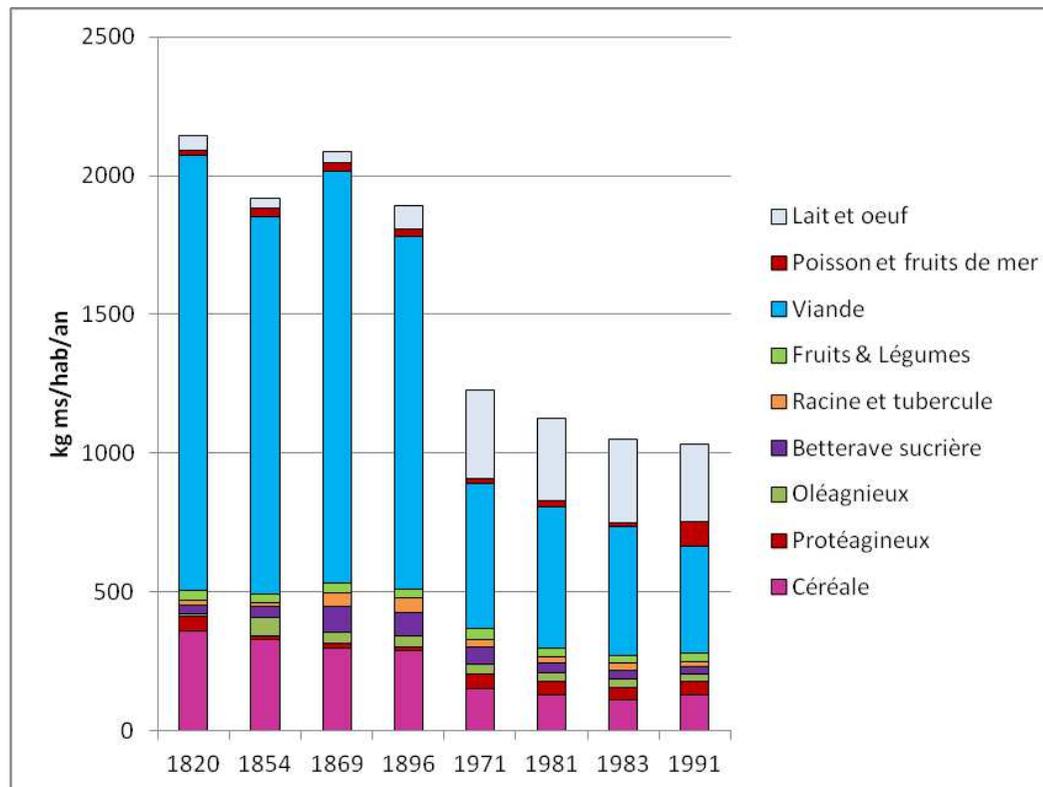
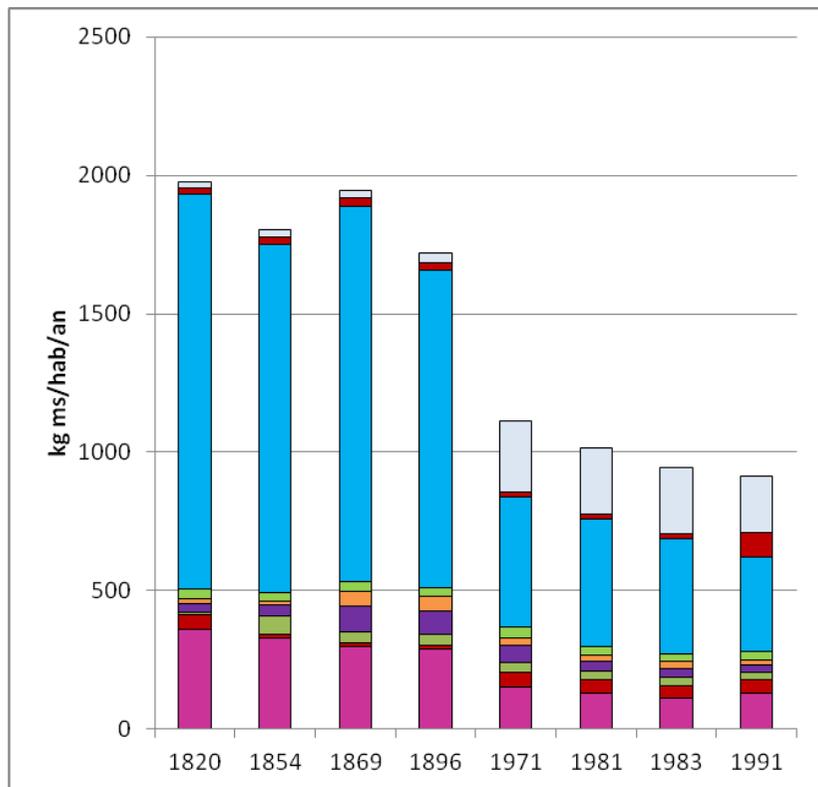
Dans cette sous-section, on évalue la consommation primaire alimentaire selon la méthode présentée dans le chapitre 2 et selon les coefficients présentés dans le chapitre 4. Nous avons suivi trois étapes pour obtenir le résultat : 1) convertir la consommation finale de biomasse alimentaire végétale en kg/hab/an de produit frais en produit primaire en utilisant les coefficients d'extraction présentés dans le chapitre 4, ce qui donne la consommation finale en kg/hab/an de produits frais agricoles primaires ; ensuite 2) convertir la consommation de produits de biomasse alimentaire animale en utilisant le facteur de conversion d'aliments pour les animaux, ce qui donne l'équivalent fourrager (kg MS/hab/an) de la consommation de viande et de lait ; enfin 3) convertir la consommation finale de biomasse végétale et la consommation indirecte de fourrages en matière primaire brute incluant les résidus agricoles. Dans cette dernière étape, les résidus agricoles tels que la paille et les résidus issus des industries agroalimentaires (les tourteaux, la pulpe de betterave, le son de céréale) sont soustraits du résultat de la consommation primaire brute de l'alimentation en biomasse végétale pour éviter un double compte (voir la figure 5.2 et le chapitre 3). La consommation primaire est exprimée en kg ms/hab/an et en GJ/hab/an.

Selon les résultats obtenus, la consommation primaire à la fois en kg MS/hab/an et GJ/hab/an est distinguée de façon remarquable pour le XIXe et pour le XXe siècle. La première remarque est que la consommation de produits d'origine animale se traduit par une augmentation considérable du volume total de matières végétales mobilisées pour l'élevage, en raison de l'efficacité de conversion, intrinsèquement faible, des fourrages en viande et en lait (voir le chapitre 2). La consommation alimentaire finale primaire en kg MS/hab/an tombe de 1975 à 1804 kg MS/hab/an entre 1820 et 1854, due principalement de la diminution de la consommation indirecte de matière première associée à la consommation de viande (figure suivante en haut). Au fait, durant le XIXe siècle, la consommation de viande en termes de quantité et de types de viande consommée influence considérablement à la consommation primaire, puisque la consommation de tous types de viandes représente entre 67 et 72% dans la consommation totale primaire en kg ms/hab/an. La diminution de la consommation primaire entre 1820 et 1854 est principalement liée à la baisse de cette consommation à Paris (voir le tableau 5.11). De même manière, la consommation qui croît de 1804 à 1946 kg MS/hab/an entre 1854 et 1869 est principalement due à la hausse de la consommation de viande de 64 à 75 kg MS/hab/an. Toutefois, la diminution de consommation primaire de 1946 à 1719 kg MS/hab/an

entre 1869 et 1896 est due au changement de la part de viandes consommées à Paris, principalement due à la hausse de la part de viande porcine dans l'ensemble de viande consommée. Cette dernière connaît un rendement en matières plus élevée, de l'ordre de 2,5 et 3 fois (non compris les résidus valorisés) durant le XIXe siècle par rapport à la viande bovine et de mouton. Pour le XXe siècle, la consommation primaire en kg MS/hab/an diminue de façon considérable. Entre 1896 et 1971, la consommation totale alimentaire primaire diminue de 1719 à 1114 kg MS/hab/an, soit 35% de baisse sur 95 ans. La baisse de la consommation au XXe siècle est donc due à la fois à l'évolution des techniques agricoles, c'est-à-dire l'amélioration considérable de rendement de production, notamment pour les produits carnés, et à des facteurs socioéconomiques, tels que le changement de régime alimentaire. Au titre d'exemple, le rendement en fourrage s'élève de 4 % à 6% en tonne de carcasses obtenues (y compris les résidus) par tonne de fourrage consommé en matière sèche et le rendement de production de la viande porcine s'élève de 12 % à 27 % (y compris les résidus) entre le début du XIXe siècle et aujourd'hui (Chatzimpiros, 2011).

En termes de consommation alimentaire primaire en GJ/hab/an, la diminution de consommation primaire est encore considérable entre les XIX et XXe siècles. Par exemple, entre 1820 et 1991, la consommation en kg MS/hab/an a diminué d'un facteur de 2,2, alors que la consommation en GJ/hab/an à la même période diminue d'un facteur de 2,5. La consommation primaire en GJ/hab/an est comprise entre 27,4 et 30,8 GJ/hab/an au XIXe siècle, alors qu'elle est comprise entre 12,1 et 15,6 GJ/hab/an au siècle suivant. Il est néanmoins difficile de dire que le rendement écologique s'améliore du XIXe au XXe siècle, ce principalement par trois raisons. La première est la croissance de la population. Lorsque le rendement est amélioré d'un facteur de 2,5, la croissance de la population de l'agglomération parisienne est d'un facteur de l'ordre de 19 à 21 : le premier si l'on compare la population de Paris de 1801 à la population de l'unité urbaine de 2008 et le deuxième si l'on compare la population de Paris de 1801 à la population de l'Île-de-France de 2006. La seconde raison est que la consommation de matières premières fourragères exprimée en kg MS/hab/an et en GJ/hab/an exclut la consommation de surface agricole et celle d'intrants divers. A titre d'exemple, la vache est alimentée à 15 à 20 % par la prairie naturelle au XIXe siècle, alors qu'aujourd'hui elle est alimentée pour environ 43% par les produits agricoles divers tels que les céréales, les fourrages annuels, les légumineuses : 62% de céréales, 7 % de racine de tubercule¹.

¹ Donnée de 2005, selon le bilan alimentaire de la FAO, en ligne, [16 déc. 2011] : www.fao.org



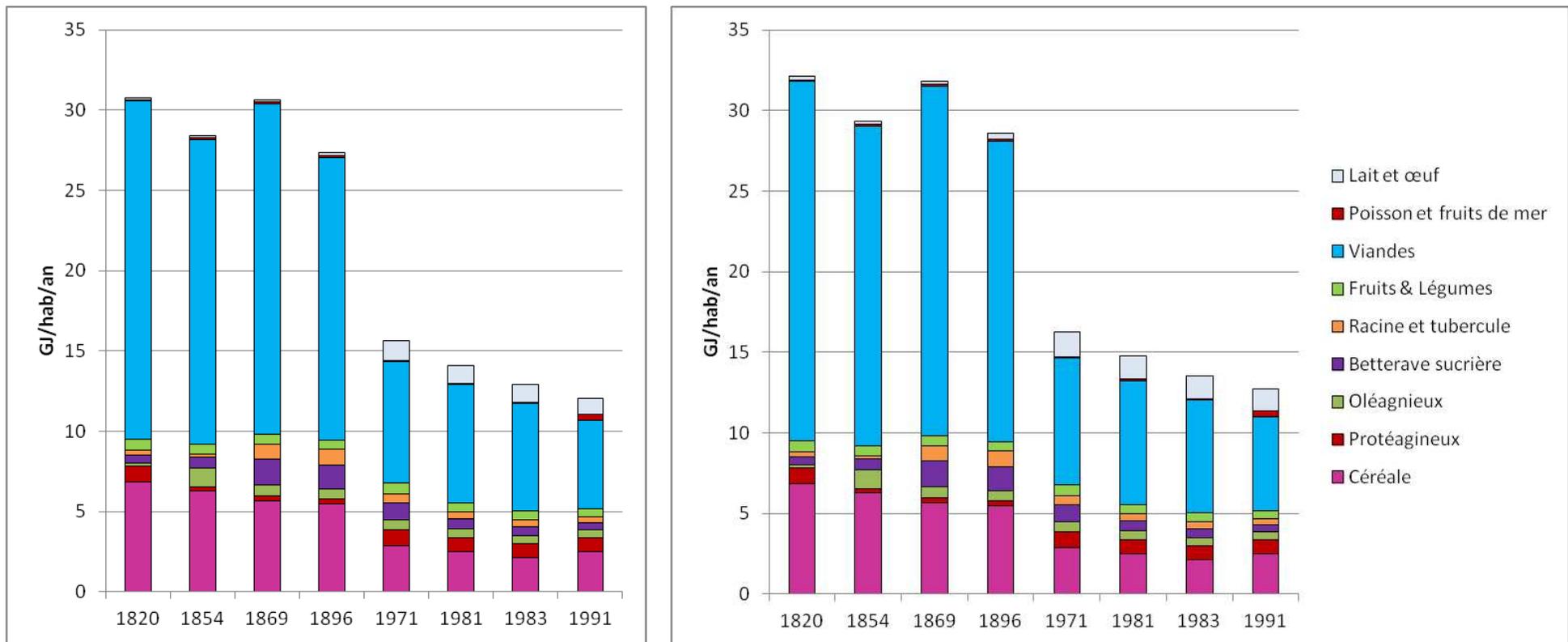


Figure 5.19.4. Consommation primaire alimentaire en kg de MS/hab/an (haut) et en GJ/hab/an (bas) (Les figures à gauche n'incluent pas les résidus qui correspondent à un double compte, les figures à droite incluent les résidus.). Source : cette thèse.

5.6. Vue d'ensemble et discussion

5.6.1. Consommation énergétique de la ville de Paris

Malgré certaines périodes lacunaires, les résultats obtenus selon les données collectées précédemment traduisent bien l'évolution de la consommation parisienne. Quatre périodes se distinguent ainsi :

- 1) entre 1801 et 1850, où la consommation en GJ/hab/an connaît une baisse de 24 à 19 GJ/hab/an en termes de consommation énergétique finale totale (CEFT par la suite) et de 63 à 54 GJ/hab/an en termes de demande énergétique totale (DET par la suite) ;
- 2) entre 1851 et 1913, période au cours de laquelle la consommation parisienne se stabilise avec environ 25 GJ/hab/an en termes de CEFT et environ 53 GJ/hab/an en termes de DET moyenne ;
- 3) entre 1920 et 1967, période au cours de laquelle la consommation parisienne en GJ/hab/an en termes de CEFT connaît un rythme de croissance remarquable au profit de la consommation de produits pétroliers, de 26 à 68 GJ/hab/an, soit 162 % de croissance ;
- 4) entre 1967 et 2006, période marquée par un retour à la stabilité avec la valeur moyenne de 70 GJ/hab/an en termes de CEFT et 125 GJ/hab/an en termes de DET. En termes de consommation énergétique finale totale, on remarque une période de crise entre 1973 et 1981 suivie par une stabilisation à partir des années 1980.

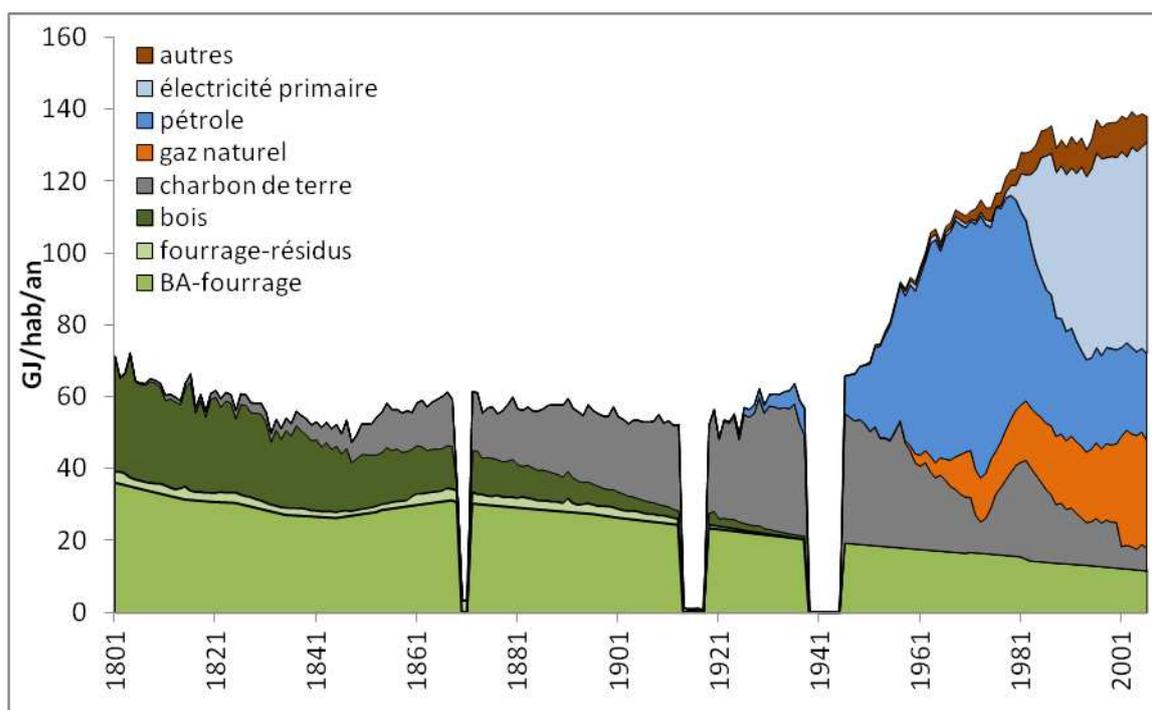
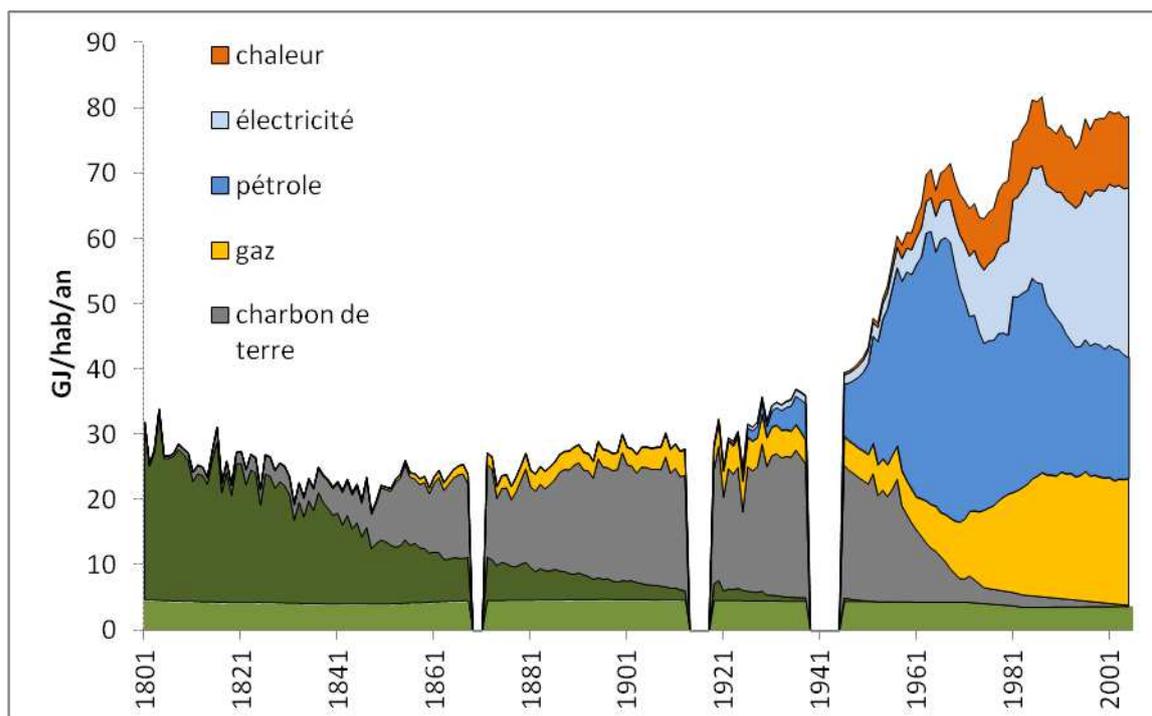


Figure 5.20. Consommation énergétique finale totale (haut) et Demande énergétique totale (bas) de la ville de Paris en GJ PCS/hab/an entre 1801-2006. Source : cette thèse.

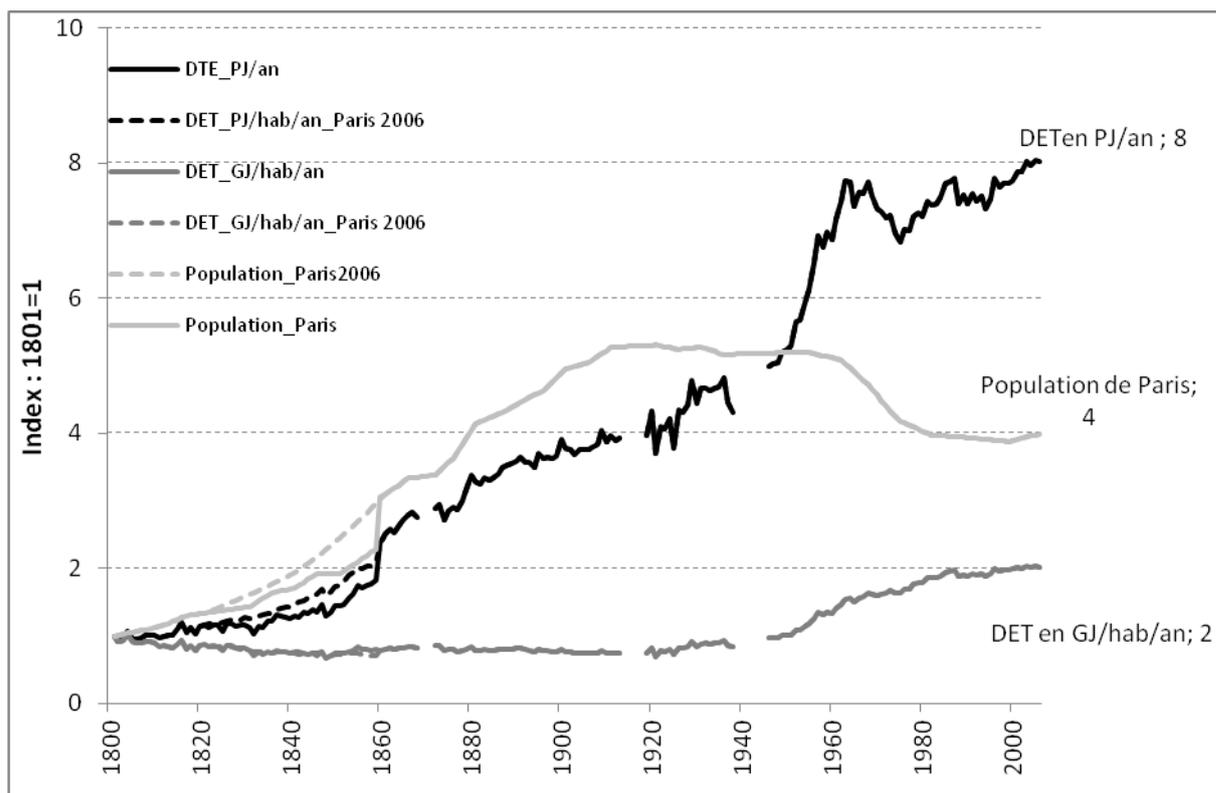


Figure 5.20.2. Comparaison entre la population, la demande énergétique totale en PJ/an et celle par habitant en GJ/hab/an de la ville de Paris et de Paris 2006 entre 1801 et 2006, avec un indice 1801 égal à 1. Source : cette thèse.

Période de stabilité relative de la consommation énergétique unitaire entre 1801 et 1919

La disponibilité finale d'énergie dépend de la situation d'approvisionnement, l'abondance des sources primaires et de l'efficacité de leur conversion en énergie utile. De ce point de vue, la diminution de l'intensité énergétique parisienne pendant la première moitié du XIXe siècle semble être compréhensible. La crise du bois persiste jusqu'aux années 1830. La situation d'approvisionnement en charbon de terre est régularisée progressivement entre 1830 et 1850 en parallèle avec la réalisation de travaux sur les voies navigables¹. Entre 1801 et 1850, la situation énergétique à l'intérieur de la ville connaît des transformations importantes. Citons l'adoption de nouvelles techniques telles que la machine à vapeur et l'éclairage par le gaz au cours des années 1810. La consommation de charbon de terre progresse lentement. Pourtant, la

¹ Des travaux d'infrastructures sont engagés dans les années 1820 (Guillaume, 1991). On discute l'approvisionnement en matière première dans le chapitre 6.

consommation de bois tombe avec un rythme plus important. C'est en effet à cette période, que plusieurs innovations techniques et politiques en matière d'approvisionnement et d'économies d'énergie ont eu lieu, notamment face à la crise du bois. Celle-ci conduit à promouvoir des innovations locales. En particulier, les économies réalisées dans les systèmes de chauffage aurait eu un impact considérable, compte tenu de sa part essentielle dans la consommation totale énergétique ; plusieurs textes montrent que des améliorations importantes ont été réalisées durant la première moitié du XIXe siècle dans les appareils de chauffage domestique et militaire (dans les casernes) (Guillaume, 1992, Gallo, 2006). L'amélioration du rendement des appareils semble s'être conjuguée avec le changement de combustibles en faveur du charbon de terre dont la densité énergétique en GJ/t est quasiment deux fois plus élevée. La consommation unitaire moyenne décennale par habitant par an diminue ainsi de 1,6 t/hab/an à 0,9 t/hab/an entre 1801 et 1850 et la consommation unitaire en GJ/hab/an baisse encore de 29 à 23 GJ/hab/an. En revanche, cette baisse est contrebalancée par la forte croissance démographique de Paris ; Paris double sa population pendant la première moitié du XIXe siècle. La conjonction entre la diminution de la consommation unitaire et la croissance de la population entraîne une certaine stabilité dans la consommation totale finale de combustible de la ville de Paris en termes de tonnage (kt/an) avec une valeur moyenne de 848 kt/an entre 1801 et 1850 (voir la figure 5.2). Toutefois, compte tenu du changement de combustible, la consommation énergétique de la capitale augmente de 1,0 PJ/an à 1,4 PJ/an entre 1801 et 1850, soit une augmentation de 40 %. Après 1850, les conditions d'approvisionnement changent considérablement avec le chemin de fer ; le maillage des réseaux devient dense dès les années 1860, notamment dans le bassin de la Seine. L'ouverture du chemin de fer donne en effet une nouvelle dimension au débit annuel du charbon de terre acheminé à Paris. Entre 1851 et 1900, une tendance à la hausse dans la consommation finale en GJ/hab/an est observée. Toutefois, la consommation unitaire de Paris montre une remarquable stabilité avec une valeur moyenne de 25 GJ/hab/an en termes de consommation énergétique finale et avec 53 GJ/hab/an en termes de demande énergétique totale. Par ailleurs, le contexte industriel parisien provoque une mutation géographique importante qui débute dans les années 1860 et s'accélère dans les années 1870. C'est en effet à cette période que la croissance de la consommation annuelle unitaire a lieu à l'échelle du département de la Seine, ceci en raison du développement industriel de la banlieue, qui fera l'objet de la sous-section suivante.

Période de croissance entre 1920 et 1967

La consommation unitaire de Paris en GJ/hab/an croît de façon quasiment exponentielle entre 1920 et 1967, bien que la période de guerre entre 1939 et 1945 brouille la lecture de cette tendance. Dans les années 1920 et 1930, deux éléments essentiels sont à prendre en compte pour comprendre la croissance de la consommation. D'une part, on constate l'apparition du pétrole qui joue un rôle important dans la hausse de la consommation unitaire. D'autre part, on remarque le développement de l'énergie secondaire et la diversité en termes de choix énergétiques dans les combustibles fossiles. En effet, la hausse de la consommation unitaire par habitant par an entre 1920 et 1938 est soutenue par deux sources énergétiques primaires : le charbon de terre et le pétrole, auxquelles s'ajoutent le gaz et l'électricité en tant qu'énergie secondaire transformée à partir de ces premières.

Entre 1945 et la fin des années 1960, la consommation énergétique annuelle unitaire de Paris connaît une période de croissance très rapide. Elle passe de 50 GJ/hab/an vers 1960 à 70 GJ/hab/an à la fin des années 1960. Cette croissance est soutenue très visiblement par la hausse de la consommation de produits pétroliers. Celle-ci est réalisée dans la consommation énergétique finale, c'est-à-dire dans la consommation de fuel pour l'usage thermique et de carburant pour les transports. De plus, la part de ces produits dans la demande énergétique totale augmente du fait de la croissance de la consommation électrique de Paris et de la transition énergétique effectuée dans le secteur électrique. Si la transition entre la biomasse fourragère et le carburant automobile marque le début de la transition énergétique entre le charbon de terre et les produits pétroliers, le changement de mode de chauffage marque les années entre 1946 et 1973. À l'inverse, le charbon de terre connaît un déclin au cours des années 1950. La part de charbon de terre, qui représentait environ 90 % de la demande énergétique technique totale, baisse ainsi en dessous de 50 % au cours des années 1950.

Période de stabilisation entre 1967 et 2006

Entre 1967 et 2006, la consommation finale par habitant par an connaît une période d'instabilité avec une forte chute durant les années 1970 suivie d'une reprise importante entre 1980 et le milieu des années 1980. Cette fluctuation est due principalement à la consommation de produits pétroliers et aux crises internationales que connaissent ces produits. Si les données les

concernant sont incertaines ¹, on constate cependant le fait que la hausse quasiment exponentielle de leur consommation entre 1920 et 1967 cesse vers 1980 et est suivie d'une forte chute jusqu'au milieu des années 1990, la consommation étant divisée par deux (figure 5.20).

Cependant, la demande énergétique totale par habitant par an augmente régulièrement entre 1967 et le milieu des années 1990 avec la croissance de la consommation unitaire d'électricité. Celle-ci joue en effet un rôle de substitut au pétrole durant la crise pétrolière des années 1970 qui entraîne notamment la transition entre énergie fossile et énergie nucléaire. Ensuite, la consommation d'électricité croît également par l'essor des produits basés sur l'usage spécifique de l'électricité (équipements électroménagers, audiovisuels et électroniques)². Enfin, la diminution de la consommation des combustibles fossiles au profit des combustibles fissiles s'accompagne d'une stabilisation de la DET/hab/an entre le milieu des années 1990 et 2006.

En termes de demande énergétique totale par an, après la croissance exponentielle de 1920-1960, on observe une stabilisation à partir de 1960, comme le montre l'analyse par indice dans la figure 5.20. Cette stabilisation s'explique par plusieurs facteurs : dépopulation de la ville de Paris durant les années 1960 et 1970, chute de la consommation finale de produits pétroliers, et croissance métropolitaine, à l'extérieur de la ville qu'on discute dans la sous-section 5.6.4.

5.6.2. Changement de ressources

On peut caractériser l'industrialisation comme la mécanisation du travail, notamment par la montée en puissance de systèmes techniques alimentés par les combustibles fossiles. A Paris, s'il l'on considère la date d'adoption de la machine à vapeur, c'est au début du XIXe siècle que l'industrialisation s'est amorcée. En revanche, si on la caractérise par la mise en service de chemins de fer, elle date dans la ville des années 1830. Cependant, jusqu'en 1870, la transition énergétique entre la biomasse forestière et le charbon de terre concerne principalement l'énergie thermique, dans la mesure où la force motrice industrielle est faible jusqu'à cette date (figure 5.5). De ce fait, on peut considérer que l'industrialisation commence réellement à Paris à partir

¹ On se réfère à la consommation des carburants automobiles, qui est une source de consommation énergétique mobile et qui entraîne par conséquent une incertitude, puisque la consommation recensée et la consommation réelle peuvent avoir un écart important. On a discuté ce point dans la section 5.3.

² On ne possède pas de données sur cette consommation pour Paris. Cependant, des données nationales montrent la croissance de la consommation de cette énergie, qui est liée au développement des appareils électroménagers et à la tertiarisation des activités industrielles. On peut supposer sans peine que cette consommation est importante pour Paris par rapport aux autres territoires.

de 1870 du point de vue de la force motrice industrielle qui augmente à partir de cette date, la part de charbon de terre s'élevant également de 25 à 40 % de la demande énergétique totale entre 1870 et 1911. La transition est effectuée simultanément dans le domaine du chauffage et de la production de force motrice industrielle.

Jusqu'en 1820, Paris consomme essentiellement de la biomasse. Entre 1821 et 1913, la part de biomasse dans la demande énergétique totale de Paris baisse de 97 % à 54 % comme le montre la figure précédente 5.20. La consommation unitaire de biomasse alimentaire et de fourrage restant relativement stable, la baisse concerne la consommation de biomasse forestière. Le charbon se substitue à cette dernière et connaît une croissance importante à partir des années 1820. Le charbon de terre est consommé sous des formes diverses et est destiné à différents types de clients. Il est en effet consommé sous forme de combustibles solides directement par les ménages, les industries et les commerces, ainsi que sous forme de combustible gazeux, distribué par le réseau. La part de chaque énergie change ainsi fortement entre 1820 et 1901 : la demande en bois de feu est divisée par 5,7 ; le charbon de terre croît d'un facteur 11,6. Par ailleurs, la transition dans le domaine du transport individuel a eu lieu vers 1900 entre les fourrages et le carburant automobile. Cependant, la conséquence reste limitée jusqu'au début du XXe siècle, compte tenu de l'état des matériels roulants (Barles 2006), et de l'importation de carburant (Peyret, Courau, 1935).

La demande énergétique totale de la ville au XXe siècle – on parle notamment de la situation énergétique après 1920 - montre une part très faible de la consommation de biomasse, notamment par rapport à la consommation de l'énergie fossile. D'une part, la diminution de la part de la consommation de biomasse est entraînée par trois facteurs principaux : 1) la baisse de la consommation finale unitaire de la biomasse, 2) le changement des produits animaux consommés, notamment la diminution de la part de produits animaux à bas rendement énergétique (viande bovine) en faveur de produits animaux à haut rendement énergétique (viande porcine, lait) - ainsi que l'amélioration du rendement de l'ensemble des élevages entre le XIXe et le XXIe siècle (chapitre 4, Chatzimpiros, 2011). D'autre part, la croissance de la consommation d'énergies fossiles fait baisser la part de la biomasse dans la demande énergétique totale. Durant le XXe siècle, la consommation d'énergie d'origine non biologique croît de 38 % à 91 %. La part de la biomasse diminue ainsi de 62 % à 9 % entre 1901 et 2000. Elle tombe à 8 % en 2006 et concerne uniquement l'alimentation.

Pour la production d'énergie technique, une transition importante est réalisée en faveur de combustibles fossiles ; on parle notamment de la croissance de la consommation de gaz et d'électricité et de l'apparition de carburants automobiles ; la situation de l'approvisionnement va en parallèle en faveur de l'importation de l'étranger des énergies fossiles (voir chapitre 6). La part de combustibles fossiles croît considérablement entre 1920 et 1967. A Paris, la consommation de produits pétroliers croît de façon remarquable, représentant 48 % de la demande énergétique totale durant les années 1950 et 67 % de cette dernière durant les années 1960. Dans cette croissance, la consommation finale de produits pétroliers joue un rôle important ainsi que la consommation d'électricité qui se traduit par une consommation de produits pétroliers de façon indirecte par le secteur électrique. On constate deux éléments remarquables dans cette croissance. La valeur maximale historique de la consommation de produits pétroliers de 73 GJ/hab/an en 1973, soit deux fois supérieure à la consommation de charbon de terre de 36 GJ/hab/an enregistrée en 1936. Ce combustible n'a donc pris qu'un demi-siècle pour atteindre son niveau maximal, sans grande rupture.

La demande énergétique totale par an restant relativement stable depuis 1960, on constate en particulier le changement de sources énergétiques entre 1980 et 2006. La baisse marquante est observée dans la consommation des deux combustibles fossiles de charbon de terre et de pétrole (*autres* dans la figure 5.20 en bas). A l'inverse, le gaz naturel et l'électricité primaire (nucléaire notamment) représentent une part de plus en plus importante depuis les années 1980. Néanmoins, la nature de la croissance est différente, puisque la croissance du gaz naturel concerne essentiellement la consommation finale faite directement par les Parisiens, tandis que la croissance de la consommation d'électricité primaire est due principalement à des changements dans le secteur électrique. Ces changements sont causés par deux facteurs principaux qui sont à l'extérieur de la ville de Paris. D'une part, le fonctionnement des centrales thermiques en Île-de-France, en petite couronne et en grande couronne, diminue fortement entre 1979 et 2006. D'autre part, l'électricité importée est produite majoritairement par les combustibles fissiles à l'extérieur de l'Île-de-France. Par ailleurs, la part de déchets croît dans la demande énergétique totale, grâce notamment à l'incitation locale qui encourage la diffusion de réseaux de chaleur et la valorisation énergétique des déchets, qui se fait encore dans les usines à l'extérieur de la ville de Paris.

5.6.3. Mise en parallèle du métabolisme énergétique des territoires de l'agglomération parisienne

L'observation de la consommation énergétique sur l'espace limité de Paris montre que les deux facteurs de croissance de la demande énergétique que sont l'intensité énergétique et la population fonctionnent avec une temporalité remarquablement distincte. En effet, si la population est un facteur déterminant de croissance entre 1801 et 1945, c'est l'intensité énergétique qui prime entre 1945 et 2006. Par ailleurs, entre 1980 et 2006, on remarque que les effets de la croissance de l'intensité énergétique en termes de consommation énergétique finale et de celle des flux indirects associés à l'importation énergétique, notamment celle d'électricité, fonctionnent simultanément.

Dans cette sous-section, on se concentre sur l'intensité énergétique de l'agglomération parisienne comparée à celle de Paris. De manière générale, le métabolisme d'une ville se caractérise par une forte intensité énergétique (en termes de consommation par habitant par an) par rapport au métabolisme territorial mesuré à l'échelle nationale (Grubler, 2004, Weisz, Steinberger, 2010). L'intensité énergétique (en GJ/hab/an ou ktep/hab/an) est un indicateur fréquemment utilisé dans le domaine de l'économie pour comparer des pays entre eux (OECD, 2005). On associe en particulier l'intensité énergétique au niveau de vie d'une société ou à l'efficacité d'une économie. Néanmoins, la signification de l'intensité énergétique est ambiguë lorsqu'on ne précise pas les contextes locaux, notamment économiques et industriels¹. Nous faisons par la suite une mise en parallèle de l'intensité énergétique entre Paris et son agglomération dans le but d'expliquer l'évolution urbaine en lien avec la consommation énergétique.

Consommation de l'agglomération parisienne

Le fait de considérer, selon notre méthode définie dans le chapitre 3 section 3.1, la région Île-de-France comme l'agglomération parisienne depuis la fin des années 1960 engendre une rupture importante durant les années 1960. Cette rupture est entraînée par la croissance rapide de la consommation énergétique des départements périphériques. On redéfinit donc le périmètre de l'agglomération et on le considère comme étant identique à celui de la région Île-de-France

¹ Une étude faite par le SERI sur l'intensité matérielle de chaque pays du monde (en termes t/hab/an) est intéressante de ce point de vue, puisqu'elle montre une possibilité de regrouper les pays selon leur d'intensité matérielle. Cette dernière est élevée notamment pour les pays en développement industriels qui consomment les matières et l'énergie principalement pour l'exportation vers les pays dits développés.

dès 1955. Il nous semble que cette redéfinition nous permet de mieux prendre en compte les espaces urbanisés en dehors de la Seine à partir de 1955 et d'inclure des flux énergétiques importants (figure 5. 21). L'évolution de la consommation de l'agglomération est observée dans la figure suivante. On peut y distinguer quatre périodes :

- 1) entre 1801 et 1861, où la consommation en GJ/hab/an connaît une stabilité remarquable en termes de consommation énergétique finale totale (CEFT/hab/an par la suite), tandis que la demande énergétique totale en GJ/hab/an (DET/hab/an par la suite) baisse de 71 à 58 GJ/hab/an ;
- 2) entre 1878 et 1913, période au cours de laquelle la CEFT de l'agglomération parisienne connaît une période de croissance de 22 à 34 GJ/hab/an entre 1876 et 1895, suivie ensuite par une baisse jusqu'à 28 GJ/hab/an en 1913. La DET moyenne s'élève de 53 à 62 GJ/hab/an entre 1876 et 1887, puis chute à 51 GJ/hab/an en 1913 ;
- 3) entre 1920 et 1979, période au cours de laquelle la consommation de l'agglomération parisienne en GJ/hab/an connaît un rythme de croissance quasi exponentielle en faveur de la consommation de produits pétroliers, qui représentent 62 % de la DET et 61 % de la CEFT en GJ/hab/an en 1979 ;
- 4) entre 1980 et 2006, où la consommation par habitant par an connaît une période de stabilisation, la consommation de 1980 et celle de 2006 étant approximativement égales. Entre 1980 et 1984, on remarque une chute de la consommation par habitant par an en termes de DET et de CEFT grâce à la baisse de la consommation de produits pétroliers, notamment celle de fiouls. Entre 1984 et 2006, la consommation par habitant par an connaît une légère reprise en faveur de l'électricité et du gaz. La CEFT s'élève ainsi de 98 à 106 GJ/hab/an et la DET de 143 à 153 GJ/hab/an.

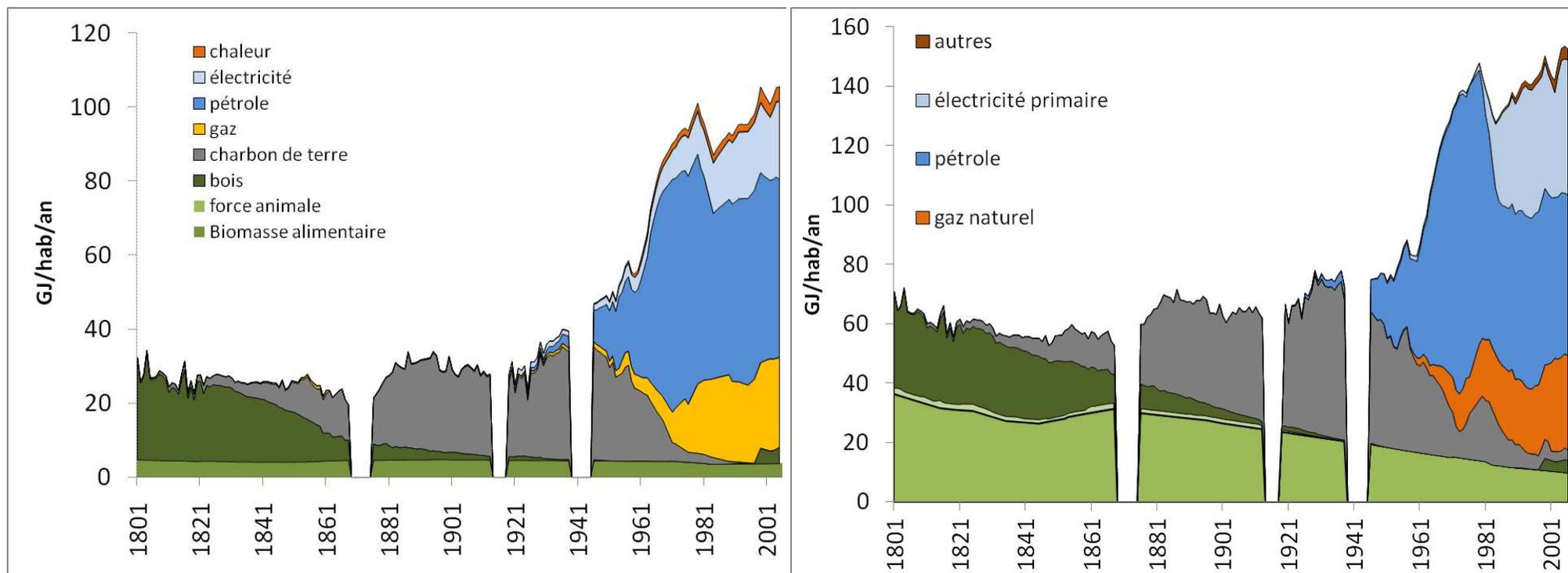


Figure 5. 21. Consommation énergétique finale totale (gauche) et demande totale énergétique en GJ PCS/hab/an (droite) de l'agglomération entre 1801 et 2006 (hors consommation de la sidérurgie). Source : cette thèse.

La consommation de l'agglomération présente certaines caractéristiques qui la distinguent de celle de Paris. Les données sur l'alimentation ne nous permettant pas de différencier les territoires d'étude, on compare par la suite uniquement leur consommation énergétique technique pour Paris, sa banlieue et leurs départements périphériques. Dans un premier temps, on remarque la croissance de la CEFT pendant les deux décennies 1870 et 1890, tandis que cette consommation reste stable à Paris. Dans un deuxième temps, la tendance à la croissance de la consommation de l'agglomération après 1955 se différencie de celle de Paris, puisque la consommation de produits pétroliers est plus importante dans le cas de l'agglomération, ce qui crée par conséquent une répartition différente de chaque énergie comme le montre la figure 5.21. On se concentre par la suite sur deux périodes : 1) entre 1878 et 1911 où l'intensité énergétique de l'agglomération s'écarte de celle de Paris, 2) entre 1955 et 1967, période au cours de laquelle l'intensité énergétique de Paris ainsi que celle de l'agglomération croissent en parallèle, mais où le niveau de croissance de l'intensité énergétique se différencie en banlieue et dans les départements périphériques.

Période d'industrialisation de la banlieue de la Seine entre 1878 et 1911

Vers 1870, la plupart des communes voisines de Paris forment des agglomérations par commune autour de leurs bourgs ruraux avec une densité de population relativement faible. L'urbanisation est réalisée de façon non contiguë à la ville de Paris. Au même moment, la ville de Paris voit son territoire devenir presque entièrement urbanisé, avec une densité de population forte de 250 hab/hectare. Les industries s'installent de plus en plus en dehors du mur d'octroi. Les années 1870-1880 se caractérisent ainsi par l'installation massive de l'industrie en banlieue, mouvement entraîné par une politique favorisant la délocalisation industrielle et par le souhait des industriels d'acquérir un plus grand espace et d'échapper au droit d'octroi. L'industrialisation réalisée en banlieue se caractérise par une mécanisation importante par rapport aux industries à Paris, de grandes industries mécanisées étant créées dès les années 1870, l'industrie de la construction mécanique électrique s'y installant notamment jusqu'en 1900 (Daumas, 1976).

La comparaison de la carte de la région parisienne de 1870 et de la Carte d'Etat-Major de 1906¹, montre que l'urbanisation hors Paris s'effectue entre ces deux dates à proximité de Paris et notamment entre les bourgs des communes avoisinant Paris et la ville. En 1881, selon la

¹ Carte de 1870 réalisée à partir de la carte des environs de Paris et Carte d'État Major de type de 1900 (Lecoin, 1977, Pinon, 2004)

Statistique générale de la France (SGF), la plupart des populations des communes de la Seine sont classées comme population agglomérée¹, et la part de la population agglomérée de Paris résidant hors Paris croît de 14 % à 25 % entre 1881 et 1911 (Dupeux, 1981). Entre 1878 et 1882, l'agglomération parisienne connaît une hausse de son intensité énergétique, qui s'élève de 19 à 24 GJ/hab/an. Cette hausse est entraînée principalement par la croissance de l'intensité énergétique de la banlieue de 22 GJ/hab/an à 43 GJ/hab/an à la même période. Le territoire hors l'enceinte de Thiers restant très peu urbanisé jusqu'en 1870 et la population étant encore faible dans ce territoire (entre 0,4 et 0,5 million d'habitants entre 1876 et 1881), on suppose que la hausse soudaine de l'intensité énergétique est due à l'industrialisation forte en banlieue entre 1878 et 1882. Entre 1881 et 1911, la population de la banlieue croît de 0,5 à 1,3 million d'habitants. En 1911, l'intensité énergétique de la banlieue retombe à 24 GJ/hab/an, c'est-à-dire au même niveau qu'à Paris.

Période de croissance urbaine dans la grande couronne entre 1955 et 1967

L'urbanisation de la région parisienne après la Deuxième Guerre mondiale est caractérisée par la dédensification des tissus urbains. La hausse de la motorisation dans un contexte général de croissance des revenus des ménages et de faible coût de l'énergie (Beaucire, 1995) auraient une influence importante sur le changement de la morphologie urbaine (Lecoin, 1977).

Trois éléments essentiels marquent la période 1955-1967. Dans un premier temps, à partir de 1953, la politique de logement favorise la construction nouvelle de logements dotés d'équipements sanitaires et de confort. Cette construction s'accélère à partir de 1958 dans le cadre des ZUP (zone à urbaniser par priorité, 1958 – 1969) (Merlin, Choay, 2000, p. 891) qui favorisent la diffusion spatiale des systèmes énergétiques ainsi que la transition vers le pétrole, puisque cette dernière énergie devient un combustible majeur pendant les années 1950. Dans un deuxième temps, la désindustrialisation de la région parisienne décidée en 1955 freine le rythme de la croissance industrielle (Marchand, 1993) et donc de l'énergie de ce secteur. Troisième élément à souligner : la croissance de la population et l'urbanisation sont réalisées dans les départements périphériques. Jusqu'en 1954, ces départements sont très ruraux et la population agglomérée de l'Île-de-France est approximativement égale à celle de la Seine. Entre 1954 et 1962, la population des départements périphériques s'élève de 2,2 à 2,8 millions d'habitants et

¹ On a discuté sa définition dans le chapitre 4.

la part de la population agglomérée dans la population totale de l'Île-de-France augmente ainsi de 67 à 86 %.

Entre 1955 et 1959, Paris connaît d'abord la croissance de l'intensité énergétique, tandis que celle de la banlieue et des départements périphériques connaît une légère baisse. L'intensité énergétique de l'agglomération ne connaît par conséquent qu'une légère hausse de 49 à 50 GJ/hab/an à la même période. Entre 1959 et 1965, l'intensité énergétique augmente simultanément dans les trois territoires, dans Paris, en banlieue et dans les départements périphériques. L'intensité énergétique de l'agglomération connaît par conséquent une hausse importante de 50 à 72 GJ/hab/an à la même période. A la période suivante, entre 1965 et 1967, l'intensité énergétique de la banlieue et de Paris reste relativement stable, tandis que celle des départements périphériques s'élève de 73 à 102 GJ/hab/an. Cette hausse entraîne une hausse de l'intensité énergétique de l'agglomération à 79 GJ/hab/an en 1967.

Comme cela a été évoqué plus haut, cette croissance de la consommation énergétique est engendrée par la hausse de la consommation des produits pétroliers. On remarque deux secteurs de consommation qui entraînent une croissance importante de l'intensité énergétique de l'agglomération. D'une part, le secteur du bâtiment joue un rôle important suite à l'amélioration du confort réalisée dans les logements et au changement de la typomorphologie urbaine qui auraient une influence importante sur la croissance de la consommation énergétique (voir Maïzia, 2007, Traisnel, 2001)¹: la surface habitable et le nombre de pièces par habitant sont accrus ; le confort thermique s'améliore ; la consommation de fioul de l'agglomération connaît ainsi une croissance d'un facteur 2,7 entre 1955 et 1964. D'autre part, la consommation pour le secteur des transports individuels devient remarquable : le taux de motorisation par ménage dépasse un véhicule par ménage vers 1960² ; la consommation des carburants par habitant par an croît ainsi d'un facteur 1,5 à la même période.

¹ La typomorphologie urbaine influence fortement la consommation énergétique : orientation, mitoyenneté, localisation d'un bâtiment au sein d'une agglomération urbaine.

² Dans le département de la Seine.

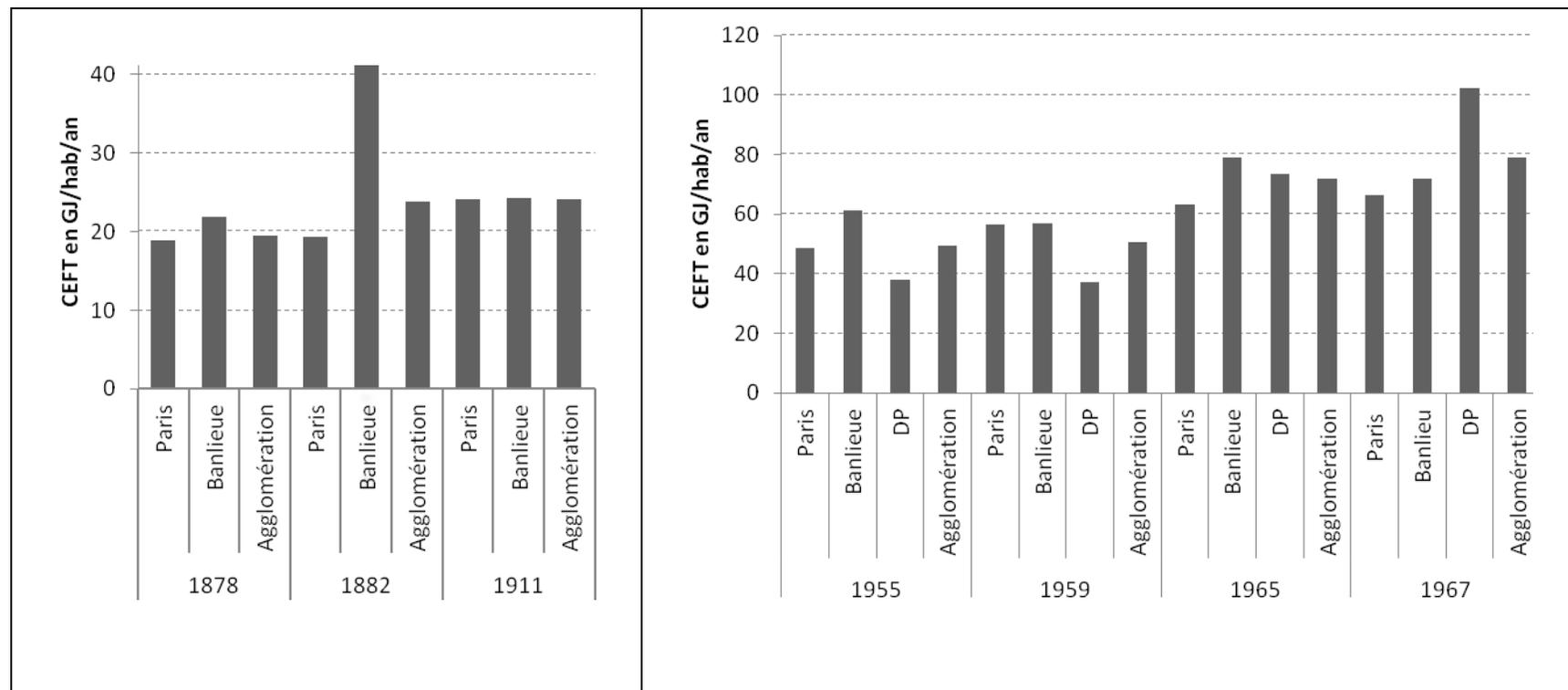


Figure 5.22. Intensité énergétique de Paris, de la banlieue et de l'agglomération en 1878, 1882 et 1911 (gauche), intensité énergétique de Paris, de la banlieue, des départements périphériques et de l'agglomération en 1955, 1959, 1965 et 1967 (droite). Source : dans le texte

5.7. Conclusion

L'évolution du métabolisme territorial parisien se différencie selon deux périodes distinctes : entre 1801 et 1913, période pendant laquelle la population est un facteur déterminant dans la croissance de la consommation énergétique, et entre 1920 et 2006 où le facteur déterminant devient l'intensité énergétique. Pendant la première période, la consommation unitaire de Paris montre une remarquable stabilité avec une valeur moyenne de 25 GJ/hab/an en termes de consommation énergétique finale et avec 53 GJ/hab/an en termes de demande énergétique totale. Entre 1920 et 1967, la consommation parisienne en GJ/hab/an connaît un rythme de croissance remarquable avec le développement de la consommation de produits pétroliers dans les secteurs de consommation finale ainsi que dans les secteurs intermédiaires. L'intensité énergétique s'élève de 26 à 68 GJ/hab/an. A la période suivante, entre 1967 et 2006, la consommation parisienne connaît une période de stabilisation avec la valeur moyenne de 70 GJ/hab/an en termes de CEFT et 125 GJ/hab/an en termes de DET. La croissance de l'intensité énergétique entraînée par l'introduction des énergies fossiles diminue la part de la biomasse dans la demande énergétique totale de la ville de 100 % à 54 % entre 1801 et 1913. Cette part tombe à 6 % de la DET de Paris en 2006.

Entre 1870 et 1955, la croissance de la population, l'industrialisation et l'amélioration du niveau de vie de la banlieue font croître progressivement la consommation énergétique technique de l'agglomération parisienne. L'intensité énergétique technique de la banlieue s'élevant à 43 GJ/hab/an en 1882 en termes de CEFT/hab/an, celle de l'agglomération croît ainsi à 24 GJ/hab/an. La période entre 1955 et 1967 est marquée par la croissance d'intensité énergétique des trois territoires de Paris, de la banlieue et des départements périphériques qui entraîne une croissance importante de l'intensité énergétique de l'agglomération. A la même période, cette dernière croît de 73 à 102 GJ/hab/an en CEFT/hab/an. Entre 1980 et 2006, l'intensité énergétique de l'agglomération connaît une période de stabilisation avec 100 GJ/hab/an en CEFT et 140 GJ/hab/an en DET.

Chapitre 6. Aires d’approvisionnement énergétique de la région parisienne : XIXe – XXIe siècles

6.1. Méthode et sources de données

Dans ce chapitre, on analysera l’évolution spatiale du bassin d’approvisionnement en énergie technique de la ville de Paris à quelques dates. Toutefois, le choix de ces dates est difficile, puisque les données sur le transport et les provenances des produits à l’échelle urbaine sont aussi rares qu’hétérogènes. Les données enregistrées par l’administration de l’octroi de Paris ne précisent pas les provenances des produits énergétiques. On recourt donc à diverses sources issues de travaux d’historiens et d’ingénieurs de l’époque. Le choix des dates se fait selon ces contraintes de disponibilité de données, qui ne sont malheureusement pas toujours aussi représentatives qu’on le souhaiterait au regard de l’évolution de la consommation de Paris. Avant de discuter des dates choisies et des sources de données utilisées pour déterminer la distance d’approvisionnement et les provenances de produits, il paraît utile de faire une mise en parallèle entre la situation de l’approvisionnement et la croissance de consommation parisienne. On revient ainsi sur l’évolution de consommation parisienne en utilisant cette fois-ci son expression en masse (kt/an et kg/hab/an), qui est un indicateur plus révélateur des contraintes de l’approvisionnement énergétique et des besoins en infrastructures de transport qu’il engendre¹.

Consommation de matières énergétiques de la ville de Paris en kg/hab/an et en kt/an

Entre 1801 et 1850, la ville maintient quasiment le même niveau de consommation de matières énergétiques. Cette stabilité est expliquée par trois facteurs principaux, la diminution de la consommation finale unitaire en kg/hab/an grâce notamment à l’amélioration du rendement énergétique dans les appareils domestiques et industriels comme le montre la figure 6.2 ; l’augmentation de la densité énergétique en GJ PCI/tonne de matière transportée (comme cela a

¹ Supposant que la réexpédition est faible pour Paris (voir le chapitre 3).

été discuté dans le chapitre 5) ; et la contrainte spatiale sachant que le périmètre de la ville est limité par le mur d'enceinte des Fermiers généraux et que l'urbanisation à l'intérieur de l'enceinte a atteint son maximum avant l'extension de 1860. De ce fait, l'expansion spatiale de la ville en 1860 marque une rupture dans la croissance de consommation annuelle, qui passe brusquement de 1736 kt/an à 2509 kt/an, soit un facteur de 1,45. Entre 1855 et 1938, pendant presque un siècle, la consommation en kg/hab/an est extrêmement stable (voir la figure 6.2). L'importante diminution de la consommation unitaire et en masse de la biomasse forestière est un facteur majeur de cette stabilité, ainsi que la croissance relativement lente de la consommation unitaire et en masse de charbon de terre : celle-ci augmente d'un facteur 2,2 tandis que la consommation de la biomasse forestière diminue d'un facteur 16. En revanche, de l'année de l'extension en 1860 jusqu'en 1901, la consommation annuelle massique totale de matières énergétiques de Paris connaît une croissance importante. Elle se stabilise entre 1900 et 1938, avant une nouvelle période de croissance. Entre 1945 et la fin des années 1950, la consommation massique annuelle s'élève de 4000 kt/an à 5000 kt/an, dont les combustibles fossiles représentent une part essentielle. En particulier, entre 1956 et 1963, la consommation massique connaît un pic, avec une valeur d'environ 5000 kt/an, dont 3300 à 3500 kt/an pour les combustibles fossiles. La diminution de la consommation massique après 1963 et à partir de 1967, plus marquante, résulte simultanément de la diminution de la population de la ville de Paris et de celle de la consommation unitaire de combustibles. Cette diminution de consommation unitaire est à la fois due à la diminution de consommation de charbon de terre et à la stabilité de consommation des produits pétroliers. Elle est plus importante durant les années 1970 lors des crises pétrolières et s'affirme à partir du milieu des années 1980, lorsque la transition industrielle à Paris est achevée¹. Cette diminution est en fait contrebalancée par la croissance de consommation de produits énergétiques secondaires tels que la vapeur et l'électricité importée par des réseaux techniques de distribution qui ne se traduisent pas par des importations pondéreuses (voir les figures 6.1. et 6.2).

¹ Déclin de l'industrie lourde au profit du service, de la banque et assurance de l'industrie des télécommunications (APUR, 1980).

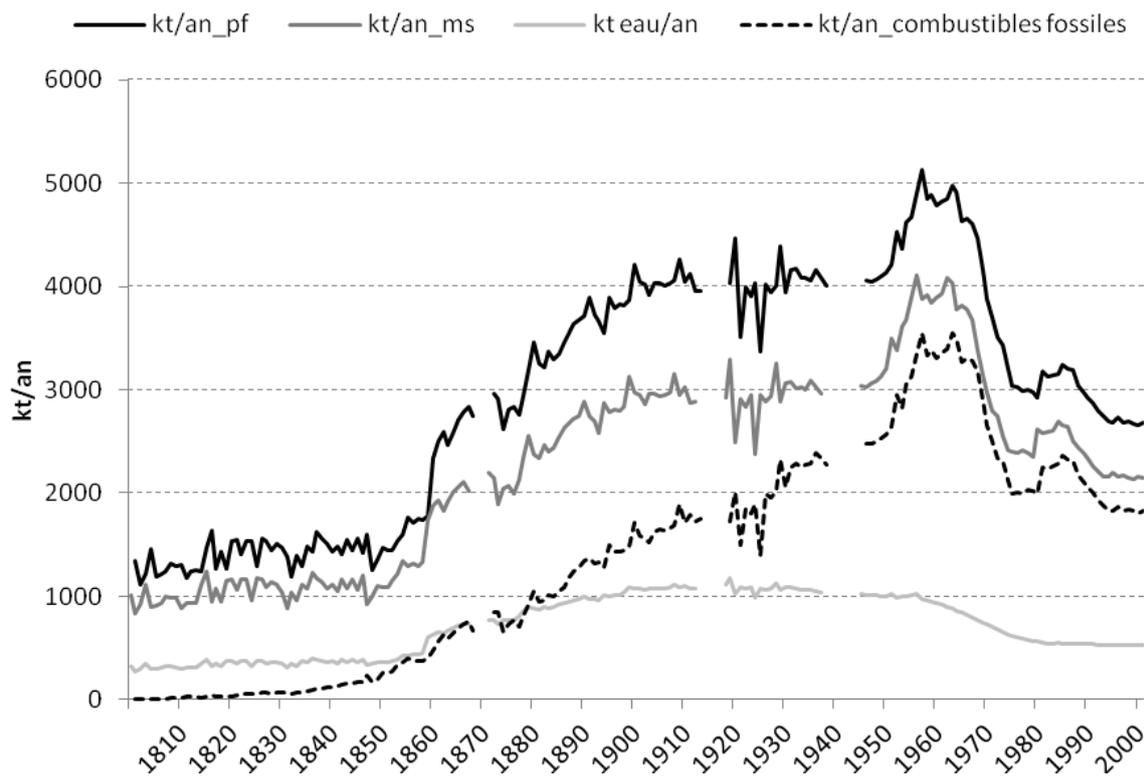


Figure 6.1. Consommation finale totale de produits énergétiques de Paris en kt/an entre 1801 et 2006 (y compris l'alimentation et les fourrages, hors vapeur et électricité). Source : cette thèse.

(kt/an_pf : kt/an de produits, kt/an_ms : kt/an de produits en matière sèche, kt/an_combustibles : kt/an de produits de combustibles)

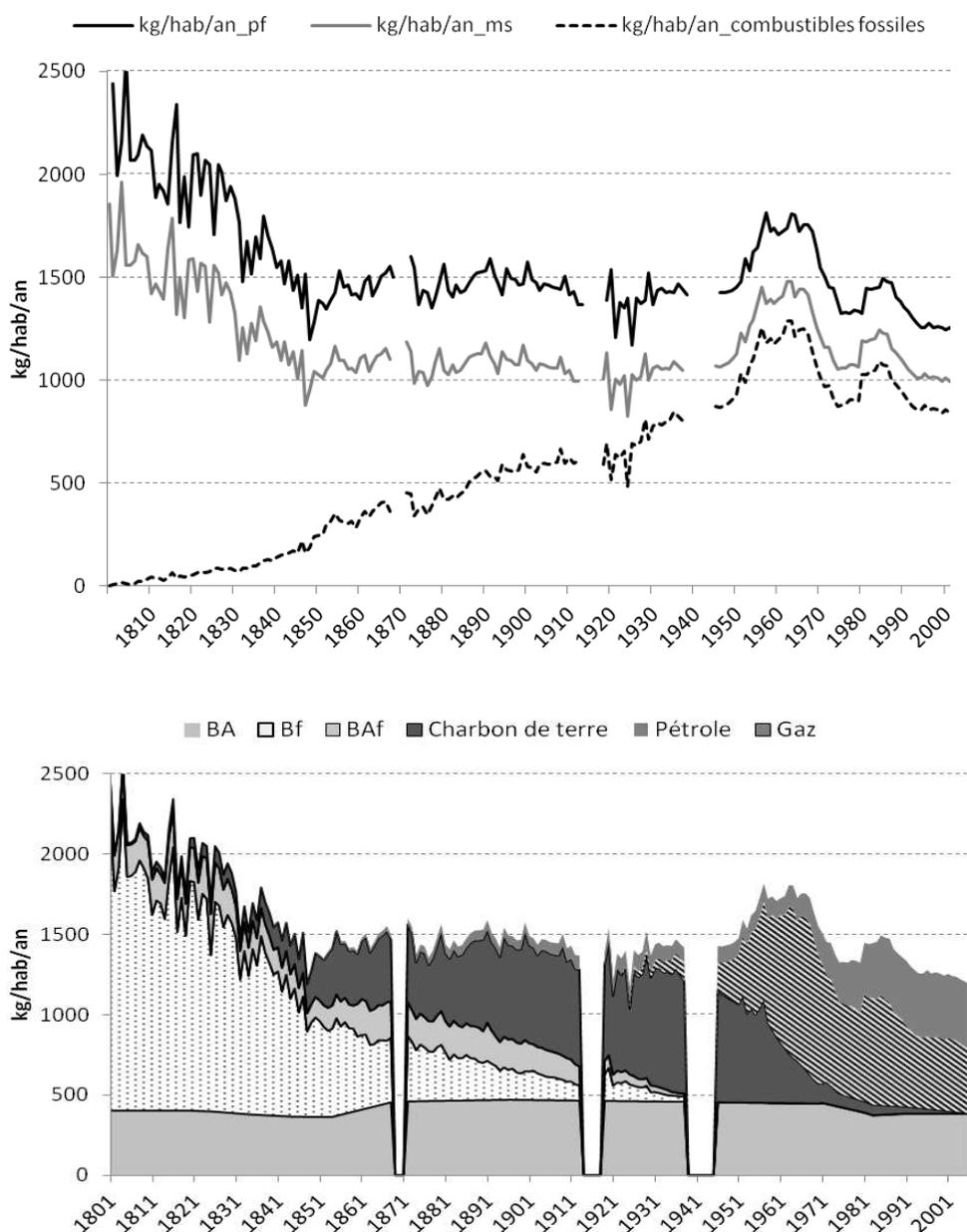


Figure 6.2 Consommation finale totale de produits énergétiques de Paris en kg/hab/an entre 1801 et 2006 (y compris l'alimentation et les fourrages, hors vapeur et électricité) : produits fossiles et non fossiles (haut), selon la catégorie de produits (bas). Source : cette thèse.

(dans la figure en haut : kt/an_pf : kt/an de produits, kt/an_ms : kt/an de produits en matière sèche, kt/an_combustibles ; dans la figure en bas : kt/an de produits de combustibles ; BA : biomasse agricole, Bf : biomasse forestière, BAf : biomasse agricole fourragère)

Choix des dates pour l'analyse du bassin d'approvisionnement en énergie

Le début du XIXe siècle constitue le point de départ de notre travail ; cette période est encore marquée par la forte dépendance aux produits forestiers (98 % dans les années 1800 en termes de consommation finale d'énergie technique), associée à une timide entrée du charbon de terre dans la consommation parisienne. Entre la fin du XVIIIe et le début du XIXe siècle, les origines des combustibles consommés à Paris sont connues selon des textes anciens ou contemporains. On distingue le rapport de Magin, inspecteur général de la Navigation, dont les données ont été reprises par Rézé dans son étude sur l'aménagement hydraulique du bassin de la Seine et qui renseigne sur les provenances du bois consommé pour la fin du XVIIIe siècle. Pour le charbon de terre, l'étude de Michel Chevalier (non daté)¹ est plus précise et le résumé en est repris par l'Annales des Mines (1832) et de Pecllet (1844). En revanche, la situation qu'il décrit date des années 1820, alors que le réseau d'approvisionnement est en pleine mutation. On essaie donc de supposer les origines du charbon de terre selon ces données et des données nationales de production par bassin, ainsi qu'à l'aide d'ouvrages qui témoignent de la situation des infrastructures de transport : l'état d'avancement des travaux de canaux joue notamment un rôle essentiel dans la mutation de l'approvisionnement de Paris jusqu'au milieu du XIXe siècle.

Pour la deuxième moitié du XIXe siècle, on dispose de données sur les provenances du charbon de terre issues de la Compagnie parisienne d'éclairage et de chauffage par le gaz (CPECG) pour 1856, 1865, 1879 et 1907 (Williot, 1999). La CPECG utilise environ un tiers du charbon de terre consommé par la région parisienne en 1878. La part de la CPECG dans la consommation de charbon de terre est probablement plus élevée avant cette date pour 1856 et 1865 où la consommation parisienne de ce produit est environ la même que le charbon distillé par la CPECG. On a complété ces données par la production nationale par bassin minier (voir la section suivante). En ce qui concerne l'approvisionnement en bois de Paris, il existe des données sur la production de la biomasse forestière par département exprimées en hectare d'exploitation pour la deuxième moitié du XIXe siècle qui sont issues d'études de Toutain (1992) sans que la destination en soit connue. Nous avons donc fait l'hypothèse que les origines du bois destiné à Paris ne changent pas pour la deuxième moitié du XIXe siècle. On discutera ce point et des erreurs qui peuvent se produire suite à cette hypothèse dans la section suivante 6.2.

¹ Ingénieur des Mines, Michel Chevalier écrit un article sur l'approvisionnement de Paris en charbon, publié dans les Annales de l'industrie française et étrangère. L'extrait de cet article se trouve simultanément dans Chevalier (non daté) et une petite partie dans Pecllet (1844). La situation de l'approvisionnement date plutôt des années 1820.

Pour le début du XXe siècle, on ne dispose pas de données sur les provenances des combustibles consommés dans la région parisienne, ce qui est regrettable, puisque les réseaux d’approvisionnement de la région parisienne, notamment durant l’entre-deux-guerres, ont connu des mutations importantes. On essaie donc de décrire la situation nationale de l’approvisionnement en charbon de terre, en produits pétroliers sans indicateur quantitatif comme pour les autres années d’observation. Par la suite, les années 1960 sont celles où la disponibilité de données est la plus remarquable. Ces années sont aussi intéressantes en termes de consommation de la région parisienne qui est en pleine croissance et par conséquent elles montrent la mutation du bassin d’approvisionnement qui en résulte (ou en est la cause). Enfin, 2006 est une année de référence plus récente de notre analyse. On dispose des données issues de la base SITRAM du ministère du Transport qui donne un résultat plus précis en termes de provenances des produits énergétiques consommés à Paris. Nous retenons donc les années 1800 et 1870 pour le XIXe siècle, ensuite les années 1960 pour le XXe siècle et 2006 comme la date plus récente représentative de la situation d’approvisionnement au début du XXIe siècle.

Méthode, sources de données et indicateurs utilisés

Pour donner une vision d’ensemble sur l’approvisionnement en énergie primaire de Paris à chaque date choisie, on a retenu plusieurs indicateurs : 1) la distance moyenne d’approvisionnement de chaque produit énergétique, 2) la distance moyenne de tous les produits pondérée par la demande énergétique totale de Paris, 3) la part de contribution de chaque provenance de chaque type de produit. On considère que, pour un produit énergétique primaire donné, il n’existe pas de différence de provenance, qu’il soit consommé dans la ville de Paris ou dans l’agglomération parisienne, puisque ces produits sont quasi entièrement importés et que le réseau d’approvisionnement ne s’organise pas différemment à l’échelle de l’agglomération parisienne (voir le chapitre 5). Toutefois, dans ces territoires, les types d’énergie primaire et secondaire consommée changent, si bien que la distance moyenne pondérée par la demande énergétique totale changera aussi selon les différents territoires. On analyse cette distance moyenne pondérée et la distance maximale d’approvisionnement en énergie technique pour la ville de Paris à chaque date choisie. L’énergie secondaire quant à elle connaît un bassin d’approvisionnement plus restreint que celui de l’énergie primaire. Il était en effet limité à la

région Île-de-France jusqu'au milieu du XXe siècle et à la France métropolitaine aujourd'hui¹. De ce fait, pour analyser les provenances de chaque type d'énergie secondaire, on calcule la contribution de chaque territoire, soit Paris, la petite couronne, la grande couronne, et l'extérieur de la région².

Pour le début du XIXe siècle, les années 1870, et l'année 1965, on dépend de données spécifiques issues de diverses sources imprimées. Elles sont complétées par des données issues de la statistique publique sur l'extraction et l'importation. L'évaluation de la distance d'approvisionnement et de la part de chaque provenance est donc très approximative pour ces dates. Néanmoins, cette approximation est aussi issue d'une analyse des conditions d'approvisionnement en termes économique-technique – développement des infrastructures notamment - et géographique – localisation des exploitations minières en France et ailleurs à chaque date. L'échelle spatiale d'analyse est le département pour les produits français et le pays pour les produits étranger. La distance est donc obtenue à ces échelles (distance entre Paris et chaque département, entre Paris et chaque pays d'approvisionnement). Pour 2006, année de référence la plus récente, on dispose des données issues de la base de transport de marchandises, SITRAM dont la méthode de traitements est expliquée dans le chapitre 2.

6.2. Bassin d'approvisionnement de Paris au début du XIXe siècle

Depuis plusieurs siècles, la pénurie du bois était récurrente à Paris, ainsi que la pression environnementale sur son bassin d'approvisionnement (Barles, 2009b). Notons que le premier train de bois par le système du flottage arrive à Paris en 1547 (Boissière, 1990). Avant l'adoption du flottage, l'aire d'approvisionnement ne s'étendait que sur quelques dizaines de kilomètres. Ce nouveau système de transport permet de l'étendre : l'extension se fait vers l'Oise, la Marne, l'Aube et leurs affluents et davantage encore vers le sud de l'Yonne. À la fin du XVIe siècle, le bassin d'approvisionnement en bois atteint environ 50 km depuis le centre de Paris, sauf vers le sud le long de l'Yonne où il s'étend jusqu'à Joigny, à 120 km de Paris. La

¹ On parle ici du bassin d'approvisionnement en termes d'importation nette. La France satisfait quasi entièrement son approvisionnement en électricité pour toute la période d'études. Elle devient récemment exportatrice d'électricité. En revanche, le réseau physique devient européen (voir le chapitre 4).

² Voir la section 6.5. Secteurs de transformation.

construction de canaux et l'aménagement de rivières navigables et d'autres ouvrages auxiliaires sont réalisés simultanément à cette extension.

Au cours de XVIII^e siècle, Paris entre dans une période de crise d'approvisionnement en bois, qui dure jusqu'aux années 1830 (Touzery, 1995). La consommation unitaire de bois en termes de consommation énergétique finale, si l'on exclut les deux valeurs très écartées de la moyenne entre 1734 et 1750, se situe entre 15 et 16 GJ/hab/an jusqu'en 1750, équivalent d'environ un stère et demi de bois de feu par habitant. Entre 1751 et 1754, cette consommation s'élève à 18 GJ/hab/an. Ensuite, entre 1775 et 1782, la consommation unitaire s'élève de 19 à 27 GJ/hab/an et en atteint la valeur maximale du siècle. Au total, pendant la période 1734-1789, la consommation unitaire parisienne de bois croît selon un taux annuel d'1,1 %, tandis que la consommation totale finale connaît une croissance annuelle de 0,8 %. La pression environnementale liée à cette croissance entraîne directement l'extension du bassin d'approvisionnement, qui connaît son plus grand développement et atteint vers le sud les forêts du Morvan à 200 km de Paris, comme le montre la figure suivante 6.3.

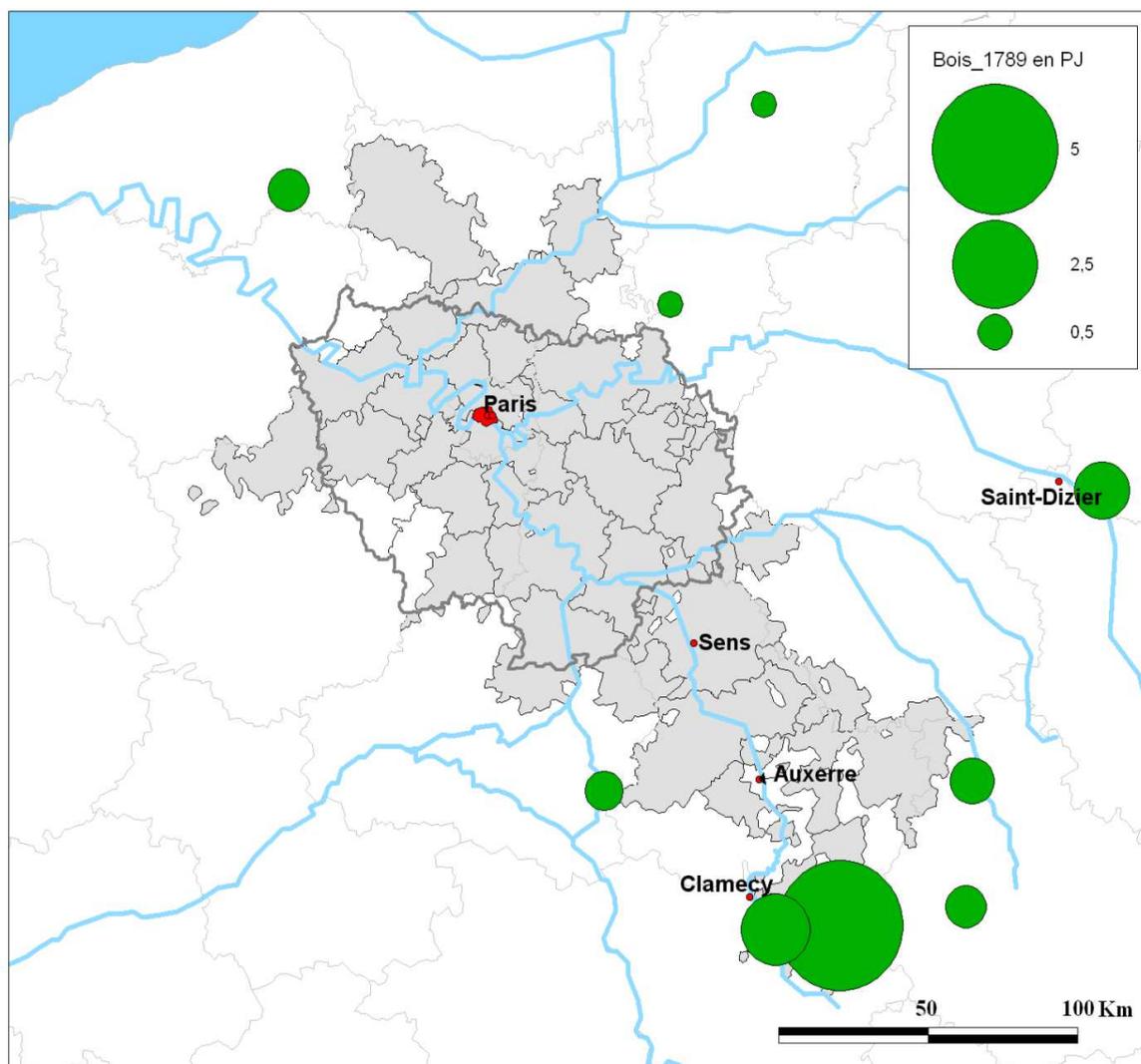


Figure 6.3. Origines de l’approvisionnement en bois de Paris en 1789 (la consommation totale parisienne de bois est d’environ 13 PJ/an à la fin des années 1780).

Source : cette thèse selon les données issues de Rapport relatif à l'approvisionnement de Paris en charbon et en bois. Arch Nat. H 1961, selon Rézé, 2002.

Les données issues de l'étude de Rézé (2002) dont la source originale est le rapport relatif à l'approvisionnement en bois de Paris par l'inspecteur général de navigation Magin portent sur les rivières dont est issu l'approvisionnement. On attribue donc la quantité de bois entrée dans Paris aux départements incluant les rivières et les affluents cités dans ce rapport¹. On considère que l'importation du bois de l'Île-de-France est marginale du fait de l'épuisement des ressources forestières (Boissière, 1990).

Afin d'affecter au mieux les importations de bois aux départements producteurs, on a procédé à trois estimations fondées sur trois hypothèses présentées dans le tableau suivant 6.1. Pour la première (appelée « base moyenne »), on répartit équitablement les quantités fournies par une rivière aux départements qu'elle traverse (hors région) ; pour la deuxième (appelée « base minimale »), on considère que tout le bois provient du département le plus proche de Paris (hors région) ; enfin, pour la troisième (appelée « base maximale »), on considère que tout le bois provient du département le plus éloigné. Ensuite, la distance moyenne est obtenue par la pondération des distances de chaque département de provenance. La distance moyenne d'approvisionnement calculée sur la base minimale est de 170 km, tandis que la distance moyenne sur la base moyenne de 190 km. Sur la base maximale, on obtient une distance moyenne qui ne dépasse pas 240 km. On accepte donc une distance moyenne d'approvisionnement en bois d'environ 200 km de Paris pour la fin du XVIIIe siècle ainsi que jusqu'au début du XIXe siècle et utilise cette valeur moyenne pour la comparer aux résultats des autres dates choisies.

¹ Service d'Administration Nationale des Données et des Référentiels sur l'Eau (Sandre), [en ligne] [réf. du 7 déc. 2011]. Disponible sur la toile : http://services.sandre.eaufrance.fr/Courdo/Fiche/client/fiche_courdo.php?CdSandre=---0010

Tableau 6.1. Distance depuis les lieux d'origine du bois consommé à Paris

| Nom des rivières | Stères | % | Départements concernés | Code département | Distance depuis Paris en km | Base moyenne | | Base minimale | | Base maximale | |
|------------------------|-----------|------|------------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| | | | | | | % | Distance pondérée en km | % | Distance pondérée en km | % | Distance pondérée en km |
| Haute Yonne | 538 000 | 47% | NIEVRE | 58 | 213 | 23% | 50 | 23% | 50 | 23% | 50 |
| | | | YONNE | 89 | 145 | 23% | 34 | 23% | 34 | 23% | 34 |
| Cure et Cousin | 173 000 | 15% | NIEVRE | 58 | 213 | 5% | 11 | 0% | 0 | 0% | 0 |
| | | | COTE-D'OR | 21 | 239 | 5% | 12 | 0% | 0 | 15% | 36 |
| | | | YONNE | 89 | 145 | 5% | 7 | 15% | 22 | 0% | 0 |
| Armançon | 67 000 | 6% | COTE-D'OR | 21 | 239 | 6% | 14 | 6% | 14 | 6% | 14 |
| Seine | 77 000 | 7% | COTE-D'OR | 21 | 239 | 3% | 8 | 0% | 0 | 7% | 16 |
| | | | AUBE | 10 | 144 | 3% | 5 | 7% | 10 | 0% | 0 |
| Loing, canal de Briare | 58 000 | 5% | LOIRET | 45 | 105 | 3% | 3 | 5% | 5 | 0% | 0 |
| | | | YONNE | 89 | 145 | 3% | 4 | 0% | 0 | 5% | 7 |
| Marne | 115 200 | 10% | HAUTE-MARNE | 52 | 230 | 5% | 12 | 10% | 23 | 0% | 0 |
| | | | MEUSE | 55 | 222 | 5% | 11 | 0% | 0 | 10% | 22 |
| Ourq | 28 800 | 3% | AISNE | 02 | 113 | 3% | 3 | 3% | 3 | 3% | 3 |
| Oise | 29 000 | 3% | AISNE | 02 | 113 | 1% | 1 | 3% | 3 | 0% | 0 |
| | | | OISE | 60 | 62 | 1% | 1 | 0% | 0 | 3% | 2 |
| Autres (dont Andelle) | 66 000 | 6% | SEINE-MARITIME | 76 | 136 | 3% | 4 | 6% | 8 | 0% | 0 |
| | | | EURE | 27 | 97 | 3% | 3 | 0% | 0 | 6% | 6 |
| Total | 1 152 000 | 100% | Distance moyenne | - | 165 | - | 181 | - | 171 | - | 189 |

Source : cette thèse.

On essaie par la suite d'obtenir la part de chaque mode de transport des combustibles consommés à Paris. Dans le cas du bois, les données dont on dispose s'étalent sur une vingtaine d'années sans qu'aucune d'entre elles ne soit complètement renseignée. La part de transport de charbon de bois est connue par les données de l'arrivage issues des archives de la préfecture de

police sur la période 1803-1818 (APP, D^A 43) alors que pour le bois la part de chaque mode de transport est connue uniquement pour 1825 avec le Comte de Chabrol (1829). Selon ces données, on remarque que le transport du bois dépend presque entièrement de la voie d'eau, ce qui est compréhensible considérant le prix du transport routier, très élevé durant le XIX^e siècle (Badré, 1978, D'Avenel, 1919). En 1825, 90 % du bois entrant dans Paris emprunte la voie d'eau. Parmi les différents produits, les cotrets et fagots d'une part et le charbon de bois d'autre part sont ceux qui empruntent le plus la voie de terre, soit 32 % des fagots et cotrets en 1825. Les données de la préfecture de police montrent que, en moyenne pour la période 1803-1825, seulement 60 % du charbon de bois entre dans Paris par voie d'eau, contre 40 % par voie de terre (tableau suivant 6.2). Toutefois, la variation annuelle est très importante et aucune tendance à la hausse ou à la baisse n'est observée entre 1803 et 1818.

On utilise ensuite la part de pouvoir calorifique de chaque sous-produit comme coefficient pondérateur pour obtenir la distance moyenne. Si l'on considère l'apport calorifique de chaque sous-produit de bois (tableau suivant 6.2) dans la demande énergétique totale de la ville de Paris, 84 % de l'approvisionnement en bois de Paris est assuré par le bois dur et tendre, 9 % par les fagots et cotrets, et le reste des 7 % par le charbon de bois. La pondération de la part des différents moyens de transport par l'apport calorifique de chaque sous-produit permet d'obtenir la part moyenne pondérée de chaque moyen de transport. Le résultat donne 86 % pour la voie d'eau et 14 % pour la voie de terre comme le montre le tableau suivant.

Tableau 6.2. Consommation des différentes catégories de bois sur la consommation totale finale de l'énergie de Paris, valeur moyenne entre 1801 et 1810 (%)

| Combustibles | Fleuve (%) | Route (%) | Total (%) | Apport calorifique de chaque sous-produit dans TER à Paris |
|------------------------|------------|-----------|-----------|--|
| Bois dur et bois blanc | 90 | 10 | 100 | 84 |
| Fagots | 68 | 32 | 100 | 9 |
| Charbon de bois | 60 | 40 | 100 | 7 |
| Total | 86 | 14 | 100 | 100 |

Source : Données sur la part de transport de chaque produit, selon Compte de Chabrol, 1829, cité par : BACKOUCHE, 1986.



Figure 6.4. Arrivée d'un train de bois à Paris : au port de l'Ecole à Paris au XVIIIe siècle. Source : Gravure de Demachy, Bibliothèque Nationale, cabinet des Etampes.

Le charbon de terre est connu depuis le XVIII^e siècle, mais il ne devient d'usage quotidien qu'au début du XIX^e siècle (Caron, 1990). Les provenances connues pour la période entre la fin du XVIII^e et le début du XIX^e siècle, selon la *Statistique de l'industrie minérale et des appareils à vapeur*, sont principalement les mines de Saint-Étienne, celles de l'Auvergne, et dans une moindre mesure celles de la Belgique et de l'Angleterre (Ministère des Travaux publics, 1847). La partie sud de la France approvisionne majoritairement Paris, Saint-Étienne y occupe une place majeure. N'ayant pas de connaissance des parts exactes de charbon de terre fournies par chaque origine citée, on recourt à des données sur la production nationale par bassin connue depuis le début du XIX^e siècle et à des données sur le nombre de bateaux passant sur le canal de jonction de Briare exprimée selon les provenances de ceux-ci. Les données sur la production de charbon de terre au début du XIX^e siècle en France confirment le poids essentiel du bassin minier de Saint-Étienne. Nous avons relevé ces données sur la production française de charbon de terre en 1811 afin d'observer les principaux bassins miniers producteurs au début du XIX^e siècle. Selon ces données, la production est partagée principalement par le bassin du Nord, de la Loire et de la Saône-et-Loire. En 1811, le premier bassin représente 35 % de la production totale française et les deux derniers 50% comme le montre le tableau suivant. Par ailleurs, le charbon de terre belge représente une part essentielle des produits importés.

Tableau 6.3. Production par bassin des combustibles minéraux solides en France en 1811

| Bassins | Quantité produite en kt | % |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------|
| Bassin du Nord | 269 | 35% |
| Bassin de Loire et de Saône-et-Loire | 387 | 50% |
| Bassin de Lorraine | 105 | 14% |
| Autres | 13 | 2% |
| Production totale en France | 774 | 100% |
| Belgique | 95 | 79% |
| Prusse et Bavière rhénanes | 25 | 21% |
| Importation totale en France | 120 | 100% |

Source : Barjot et al., 1991, INSEE, 1966, BRGM, , Charbonnage de France, en ligne : <http://webcdf.brgm.fr/> [en ligne] [ref. 20 juin 2012], Ministère des Travaux publics, 1839, p. 182.

La production de charbon de terre par bassin est connue. Les provenances de produits sont aussi déterminées par l'existence d'infrastructures de transport reliant la ville de Paris aux différentes mines susceptibles de l'approvisionner. Plusieurs ouvrages témoignent de la situation des

infrastructures de transport de ce combustible au début du XIXe siècle, tels ceux de Chevalier (non daté), Dutens (1829), D'Avenel (1919), Guillerme (1991). Selon eux, la politique de canalisation générale lancée à la fin du siècle précédent a peu avancé au début du XIXe siècle, si bien que jusqu'en 1810, la situation de l'approvisionnement ne change guère. Le canal de Saint-Quentin, important pour transporter le charbon de terre du nord, manque souvent d'eau et la navigation fluviale est quasi impossible. Le transport par la voie d'eau dans le bassin de la Seine n'est favorable par conséquent qu'en Seine amont, ce qui explique, selon Chevallier, la situation de domination du charbon de Saint-Étienne (relié à la Seine par le canal de Briare). La situation n'évolue qu'au cours des années 1810, d'abord par la pénétration de charbon de terre du Nord et de Mons avec la réouverture du canal de Saint-Quentin, ensuite l'inauguration de celui de Mons à Condé dans les années 1810 (Pinon, 2001, Nothomb, 1840, Chevalier, non daté)¹. A la période suivante, l'ouverture vers des bassins miniers du département du Nord et de Belgique raccourcit considérablement la distance d'approvisionnement, notamment en termes de distance réelle parcourue.

Pour déterminer les bassins d'approvisionnement et leurs parts en termes d'apport calorifique, on utilise les données sur la production française de charbon de terre en 1811, sachant que la production par bassin n'a pas beaucoup changé avant la découverte du gisement du département Pas-de-Calais qui fait se tourner l'approvisionnement de Paris vers le nord (y compris la Belgique). Étant donnée la production nationale, le charbon de terre vient entièrement des bassins de Loire et de Saône-et-Loire. Le charbon de Lorraine n'a pas encore pénétré le marché de Paris (Minard, 1858-1861). Du fait de la situation géographique des mines au début du XIXe siècle, le charbon de terre doit emprunter le canal de Briare. Toutefois, les données existantes datent du milieu des années 1820. Ces données issues de l'étude de Chevalier détaillent les réseaux d'approvisionnement en charbon de terre de Paris par la voie navigable². Parmi ces données, le nombre total de bateaux qui traversent le canal de jonction Briare allant vers le bassin de la Seine sont des données précieuses montrant les provenances de charbon de terre consommé à Paris. Le nombre total de bateaux vers le bassin de la Seine en 1825 est de 2 140,

¹ C'est une date approximative. La réouverture du canal de Saint-Quentin se fait en 1801, et il ne devient navigable que dans les années 1810 (selon Chevalier (non daté). Le canal de Mons à Condé est livré en 1814 en Belgique, non achevé dans la partie française (Nothomb, 1840). Selon ces documents, on suppose que la navigation entre Paris et la Belgique pour l'approvisionnement en charbon ne devient fluide que dans les années 1820.

² L'extrait de son article des *Annales de l'industrie française et étrangère* a été repris dans plusieurs revues, entre autres, on s'appuie sur la version conservée dans la bibliothèque nationale (BNF) non daté, mais plus détaillée. Parmi les textes datés, voir Chevalier, 1832, publié dans les *Annales des mines*.

dont 70 % en provenance de Saint-Étienne, 24 % de la Saône et Loire et le reste partagé entre l'Allier et la Nièvre qui représentent respectivement 3 % et 4 %. La question se pose évidemment de la destination de ces bateaux. En considérant la charge moyenne d'un bateau en tonnage donnée par Chevalier et Grangez, respectivement 85 ou 120 tonnes par bateau, le charbon passant le canal de Briare s'élève à 2,2 millions ou 3,2 millions de tonnes, tandis que la consommation de charbon de terre de Paris et de la banlieue ne compte que 0,84 million de tonnes en 1825, soit environ le tiers ou le quart. On fait l'hypothèse que les provenances du charbon destiné à Paris se répartissent de la même façon que celles de l'ensemble du charbon transporté sur le canal de Briare.

Tableau 6.4. Bateaux de charbon ayant emprunté le canal de Briare et lieux de chargement en 1825

| Origine - nom du bassin minier | Département de charge | Nombre de bateaux : a | Charge moyenne = 85 tonne : b | Charge moyenne = 120 tonne : c | Part |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------|
| Unité | Nom du département | En nb | En t | En t | % |
| St Étienne | Loire | 1 500 | 127 500 | 180 000 | 70% |
| Mouilns, Auvergne | Allier | 509 | 43 265 | 61 080 | 24% |
| Fins | Allier | - | - | | 0 % |
| Blanzay | Saône-et-Loire | 56 | 4 760 | 6 720 | 3 % |
| Epignac | Saône-et-Loire | - | - | | 0 % |
| Decize | Nièvre | 75 | 6 375 | 9 000 | 4 % |
| Total en tonne | - | 2 140 | 181 900 | 256 800 | 100 % |
| Total en hectolitre ras (1hl=80 kg) | - | - | 2 273 750 | 3 210 000 | 100 % |

Source : (a) Chevalier, non daté, p. 41-42, (b) charge moyenne à base minimum de 85 tonnes selon Grangez, 1855¹, (c) charge moyenne de 120 tonnes selon Chevalier, non daté².

¹ Au milieu du XIXe siècle, selon Grangez (1855), pour les bateaux en Haute-Seine, ceux qui viennent du sud (de l'Auvergne et de la Loire), ont une charge moyenne par bateau qui se situe entre 85 et 110 tonnes alors que celle des bateaux en Basse Seine était de 211 tonnes (toutes marchandises confondues).

² Charge moyenne dans le bassin de la Seine selon Chevalier (non daté). Il évalue ensuite que la profondeur d'eau de 1,30 m correspond à la navigation de la marchandise à la charge moyenne de 180 tonnes et la profondeur de 1, 65 m à la charge moyenne de 200-220 tonnes.

On essaie par la suite de comparer la situation d’approvisionnement en charbon de terre au début du XIXe siècle à celle de 1838 connue par la statistique de l’industrie minérale et des appareils à vapeur. En 1838, le charbon belge représente un pourcentage important dans l’approvisionnement de Paris, soit 42 %. Grâce à ces données, on obtient la distance moyenne, distance cartésienne pour les départements français (voir chapitre 2). La distance retenue entre Paris et la mine de Mons (en Belgique) est aussi la distance physique cartésienne, soit 220 km. En effet, la distance sphérique trigonométrique entre Paris et la Belgique atteint 500 km, alors que la provenance du charbon est connue précisément et se situe près de la frontière entre la France et la Belgique : il a donc paru plus judicieux de retenir la distance cartésienne, beaucoup plus satisfaisante.

Entre le début du XIXe siècle et 1838, le gain en termes de distance physique suite au changement de bassin d’approvisionnement représente 20 %. Le gain en termes de distance réelle parcourue s’élève à 21 % à la même période. L’effet du rétrécissement du bassin à cette période est d’abord le résultat de la part croissante de charbon belge et du Nord, mais également de la diminution de la part provenant de Saint-Étienne dans l’approvisionnement total de charbon de terre de Paris. Plus tard, au milieu du siècle, la découverte du gisement de charbon de terre du Pas-de-Calais achève de tourner Paris vers les bassins miniers du nord¹. Par ailleurs, le changement de bassin permet d’affecter le charbon de terre de Saint-Étienne et d’autres bassins du sud à la ville de Lyon dont la demande croît de plus en plus pour son développement industriel (Observations sur l’approvisionnement de Paris en combustible, 1816).

¹ La découverte du gisement du Nord-Pas-de-Calais, selon BRGM, *Sigminesfrance*, [réf. du 15 avril 2012], Format PDF : <http://sigminesfrance.brgm.fr/telechargement/substances/cha.pdf>. ; Des données sur la production sont disponibles à partir de 1851 dans l’annuaire statistique de l’INSEE de 1966, et également dans Barjot et al. (1991).

Tableau 6.5. Part d'approvisionnement en charbon de terre selon l'origine du charbon de terre entre 1810 et 1838

| | Part de contribution de chaque département | | Distance entre Paris et chaque département | | Écart entre Dc et Dr (Dr par rapport à la Dc en %) | Distance d'approvisionnement x parts de contribution de chaque département | | | |
|---------------------|--|------|--|--------------------|--|--|-----|------|-----|
| | Années 1800 | 1838 | Distance physique | Distance parcourue | | Années 1800 | | 1838 | |
| Origine | en % | en % | en km | en km | | Dc | Dr | Dc | Dr |
| Belgique | 0% | 42% | 220 | 355 | 61% | 0 | 0 | 91 | 148 |
| Nord | 0% | 16% | 200 | 312 | 56% | 0 | 0 | 31 | 49 |
| Loire | 70% | 15% | 370 | 552 | 49% | 259 | 387 | 55 | 82 |
| Saône-et-Loire | 3% | 5% | 300 | 325 | 8% | 8 | 9 | 14 | 15 |
| Nièvre | 4% | 17% | 210 | 377 | 80% | 7 | 13 | 35 | 64 |
| Allier | 24% | 4% | 280 | 608 | 117% | 67 | 145 | 11 | 24 |
| Provenance inconnue | 0% | 2% | - | - | | | | | |
| Total | 100% | 100% | | | | 340 | 550 | 240 | 380 |

Source : dans le texte

(Dc : Distance physique cartésienne en km entre Paris et chaque département arrondi à 10, Dr : Distance réelle parcourue (selon les données présentées dans l'ouvrage de Chevalier)).

Tableau 6.5.2. Tableau de synthèse de la part de contribution de chaque provenance et de la distance pondérée de l’approvisionnement en bois et en charbon de terre de Paris en km pour 1800

| Code du département | Nom du département | Bois | | Charbon de terre | |
|---------------------|--------------------|------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| | | % | Distance pondérée en km | % | Distance pondérée en km |
| 2 | AISNE | 4% | 3 | - | - |
| 3 | ALLIER | - | - | 24% | 67 |
| 10 | AUBE | 3% | 0 | - | - |
| 21 | COTE-D'OR | 14% | 66 | - | - |
| 27 | EURE | 3% | 6 | - | - |
| 42 | LOIRE | - | - | 70% | 259 |
| 45 | LOIRET | 3% | 0 | - | - |
| 52 | HAUTE-MARNE | 5% | 0 | - | - |
| 55 | MEUSE | 5% | 22 | 4% | 7 |
| 58 | NIEVRE | 28% | 49 | - | - |
| 60 | OISE | 1% | 2 | - | - |
| 71 | SAÔNE-ET-LOIRE | - | - | 3% | 8 |
| 76 | SEINE-MARITIME | 3% | 0 | - | - |
| 89 | YONNE | 31% | 43 | - | - |
| Total | | 100% | 190 | 100% | 340 |

Source : cette thèse.

6.3. Bassin d’approvisionnement de Paris du milieu du XIXe siècle au milieu du XXe siècle

6.3.1. Bassin d’approvisionnement de Paris pendant la deuxième moitié du XIXe siècle

Dans Paris, après 1820, les modalités de l’approvisionnement en combustibles changent considérablement, suite notamment à l’amélioration des voies navigables et au développement du chemin de fer. Quant au chemin de fer, la première ligne, Saint-Etienne-Andrézieux, est construite pour transporter le charbon de terre vers Paris durant les années 1830 (voir la figure 6.5 en bas à gauche). Le maillage du réseau devient de plus en plus dense et le trafic de bois et de charbon de terre devient fluide. Par conséquent, l’insécurité de l’approvisionnement disparaît

peu à peu à Paris. Par ailleurs, avec la croissance de la population et de la consommation parisienne de combustibles, la responsabilité de la municipalité devient considérable : en effet, *« le service de l'approvisionnement de Paris en combustible exige, en outre, près de six cents employés, tels que jurés compteurs, gardes de ports, chefs de pont et pertuis, qui sont distribués sur les bords des rivières du bassin de la Seine »* (Tarbé de Vauxclairs, 1835, p. 291).

A l'extérieur de la ville, le contexte de l'approvisionnement change avec l'inauguration de nouvelles lignes de chemin de fer et le développement du charbon de terre à l'échelle nationale. L'organisation de l'approvisionnement qui était auparavant locale devient nationale et par conséquent, la responsabilité de la municipalité parisienne en matière d'approvisionnement diminue. La loi de finances du 28 mars de 1848 qui remplace le commissaire général de l'approvisionnement de Paris, fonctionnaire municipal, par les inspecteurs principaux, fonctionnaires d'État, est la preuve manifeste de la réorganisation d'approvisionnement en France¹.

Durant les années 1860, on constate que le bois devient abondant dans les marchés de Paris, grâce à la baisse du prix du transport sur les voies navigables et sur les chemins de fer. Selon la carte dressée par l'ingénieur des Ponts et chaussées Minard (1858-1861) décrivant les trafics de charbon de terre sur l'ensemble du territoire français à la fin des années 1850, le trafic de combustibles sur les lignes de voies navigables et de chemins de fer dans la région du nord-est de Paris est considérable et est partagé par ces deux modes de transport. Il semble par ailleurs que les produits importés sont encore marginaux dans Paris. Le charbon de terre anglais et allemand arrive surtout dans des grandes villes portuaires et de frontière, telles que Nantes, Bordeaux et Strasbourg. Durant les années 1860, le prix du transport par le chemin de fer devient quasi égal au transport par la voie d'eau dans le bassin de la Seine (Gruner, Lan, 1861), tandis que des péages aux ports de marchandises sont encore appliqués sur les trafics de marchandises par la voie d'eau (D'Avenel, 1919). Des différences existent cependant entre les différentes lignes. Les lignes de voies navigables arrivant du sud à Paris ne sont plus concurrentielles vis-à-vis du chemin de fer, tandis que la voie navigable entre Paris et les mines

¹ À la tête de la fonction de la régulation d'approvisionnement est nommé un fonctionnaire municipal appelé commissaire général de l'approvisionnement de Paris et de la navigation à la période précédente à 1832 et est remplacé par deux inspecteurs principaux à partir de cette dernière date jusqu'à la suppression de ce service. Avant 1832, les inspecteurs principaux étaient sous les ordres immédiats du commissaire général de l'approvisionnement de Paris. Ces fonctionnaires sont par la suite nommés directement par l'administration des Ponts et chaussées. Selon "Inspecteurs de la navigation", in : Tarbé de Vauxclairs (1835, p. 291).

de charbon du bassin du nord (celles du Nord-Pas-de-Calais et de la Belgique) montre encore une performance meilleure que le chemin de fer (Jaquin, 1868).

Les années 1860 marquent le début d'une transition économique-technique importante en faveur du système industriel basé sur le combustible fossile, en l'occurrence le charbon de terre (Gruner, Lan, 1861). Le débit annuel qui croît n'est assuré que par la croissance de l'ensemble de la filière, de l'extraction minière de ce combustible à la consommation intermédiaire notamment par le gaz, et à la consommation finale industrielle et domestique. Les années 1870 montrent donc ce changement effectué lors de la décennie précédente. Ces années représentent ainsi le début d'une suprématie du chemin de fer, notamment pour le transport de marchandises comme le charbon de terre, ainsi que pour les produits agricoles. C'est aussi durant ces années que les combustibles importés arrivent à Paris.

On tente de déterminer les provenances de charbon de terre consommé à Paris ainsi que la distance moyenne d'approvisionnement correspondante pour les années 1870. Comme indiqué plus haut, la source principale sur l'origine des produits est issue de la compagnie du gaz (CPECG, selon Williot, 1999). Le charbon distillé par la compagnie représente environ un tiers de la consommation directe de ce produit à l'échelle du département. A l'échelle de la ville de Paris, en considérant que le gaz issu de ce charbon distillé est entièrement destiné à la ville de Paris, la part de charbon de la CPECG représente environ 60 % du charbon consommé directement et indirectement à Paris au milieu des années 1870. Pour le reste du charbon de terre, on fait l'hypothèse que le charbon de terre consommé à Paris est au prorata de l'extraction de charbon de terre par bassin minier approvisionnant Paris, connue par les données de la CPECG. Comme le montre le tableau suivant, le poids du bassin du nord, et en particulier celui des départements du Nord et du Pas-de-Calais, devient essentiel dans ces années. Les produits importés deviennent aussi importants et représentent environ 37 % de l'approvisionnement. La part de la Belgique dans l'approvisionnement total en charbon de terre de Paris diminue par rapport aux années précédentes (1800 et 1838), tandis que les provenances nouvelles telles que l'Angleterre et l'Allemagne représentent chacune 11 % de l'approvisionnement de Paris.

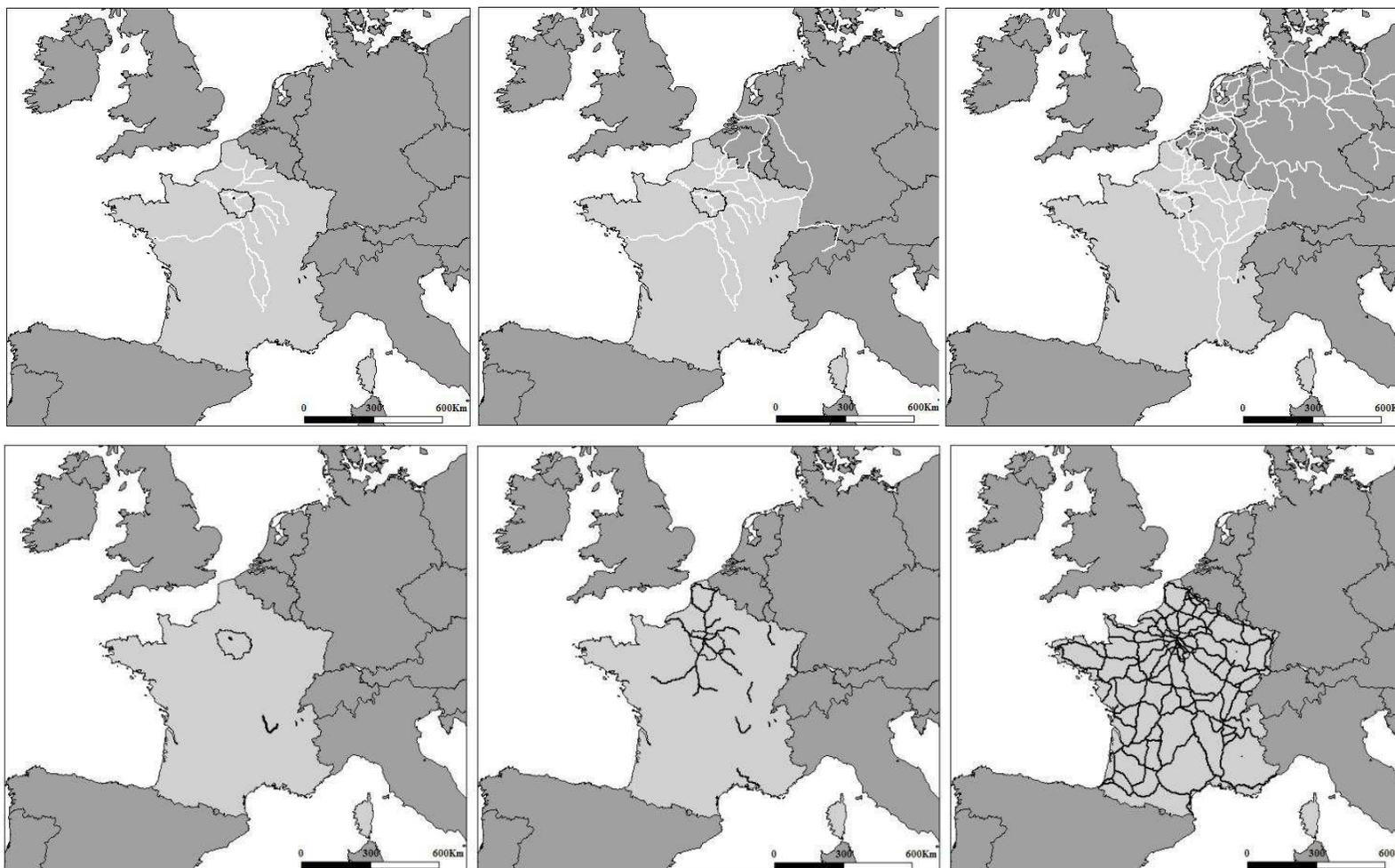


Figure 6.5. Voie navigable depuis le bassin de la Seine en 1800, 1870, 2007 (figures hautes), et réseaux de chemin de fer en France en 1837, 1850, 1870 (figures basses). Source : figures en haut cette thèse d'après Pinon, 2001, Renouard, 1960, VNF, 2007 (Pour les deux cartes précédentes en haut, on relève les tronçons des canaux dont les travaux ont été achevés aux années présentées selon Pinon. Les réseaux présentés sont uniquement ceux qui relient le bassin de la Seine pour le transport de marchandises.) ; figures en bas : cette thèse d'après Caron, 1997, INSEE, 1966 (lignes européennes exceptées).

Tableau 6.6. Estimation de % de chaque provenance dans le charbon de terre consommée à Paris pour les années 1870-1875

| Gaz manufacturé | | | Consommation finale de charbon de terre | | | Consommation totale de charbon de terre et de ses sous-produits | |
|--|---|---|--|--|---|---|---|
| Consommation intermédiaire du secteur gazier : A | | | Consommation finale de charbon de terre de Paris : B | | | A+B | |
| 16 PJ | 67% | % de chaque provenance sur la consommation totale de charbon de terre | 12 PJ | 33% | % de chaque provenance sur la consommation totale de charbon de terre | Sur la consommation totale de charbon de terre | |
| Département de provenance | % de chaque provenance sur la consommation totale du secteur gazier | | Département de provenance | % d'apport sur la consommation totale finale de charbon de terre | | Département de provenance | Part de provenance de chaque bassin (%) |
| Pas-de-Calais | 48% | 32% | Pas-de-Calais | 38% | 13% | Pas-de-Calais | 45% |
| Nord | 5% | 3% | Nord | 12% | 4% | Nord | 7% |
| Saône-et-Loire | 1% | 1% | Saône-et -Loire | 6% | 2% | Saône-et-Loire | 3% |
| Allemagne | 11% | 7% | Allemagne | 11% | 4% | Allemagne | 11% |
| Angleterre | 11% | 7% | Angleterre | 11% | 4% | Angleterre | 11% |
| Belgique | 15% | 10% | Belgique | 15% | 5% | Belgique | 15% |
| Total | 91% | 61% | Total | 94% | 31% | Total | 92% |

Source : dans le texte

Quant aux modes de transport, pour les produits du Nord, ils se répartissent équitablement entre fer et eau – le mode de transport pour le charbon belge n'étant pas connu, on a supposé une même répartition, puisque la distance physique et parcourue pour ces produits est quasiment la même. En revanche, pour les produits du Sud, notamment ceux du bassin de la Loire, nous avons affecté 100 % pour le chemin de fer, compte tenu de sa suprématie par rapport à la voie navigable depuis les années 1860. Par ailleurs, le transport des produits étrangers, qui parcourent de longues distances, est probablement assuré entièrement par la voie d'eau. Dans le cas du charbon de terre allemand, ce produit peut emprunter le chemin de fer Paris-Strasbourg et la voie fluviale reliant le bassin de la Seine au bassin du Rhin via le bassin du Rhône et de la Saône, mais les textes montrent que la voie ferrée est alors quasiment inutilisée à cette fin¹. La voie fluviale assure donc entièrement le transport du charbon de terre allemand. Le charbon anglais quant à lui emprunte la voie maritime jusqu'au Havre, puis la voie fluviale pour entrer dans Paris. On alloue donc la distance selon le mode de transport, soit 136 km de transport fluvial (distance physique Seine-Maritime – Paris) et 433 km de transport maritime (soit 569 km – distance physique Paris-Angleterre – moins 136 km). On affecte donc 76 % au transport maritime et 24 % au transport fluvial pour le charbon anglais. Ensuite, on affecte les provenances de charbon de terre connues pour 92 % des cas à l'ensemble du charbon de terre. Selon ce calcul, en moyenne, 57 % du charbon de terre consommé à Paris est transporté par voie fluviale, 40 % par chemin de fer, et 3 % par voie maritime.

Quant à l'approvisionnement en bois de Paris, peu de documents témoignent de sa situation durant la deuxième moitié du XIXe siècle. Selon Toutain (1992), à l'échelle nationale, l'exploitation forestière a peu évolué en termes de surface, alors que l'utilisation du bois pour l'usage énergétique diminue à la fin du XIXe siècle au profit des usages matériels (Toutain, 1992). Plusieurs textes notent l'activité soutenue du monde forestier au cours de la deuxième moitié du XIXe siècle, grâce à la diversification des débouchés, telle que la métallurgie, la fabrication de charbon de bois, ou le bois d'œuvre. La *Revue des eaux et forêts* de 1871, qui traite du mouvement des ports fluviaux d'approvisionnement de Paris, montre que presque la moitié du bois dur est issue de Clamecy, le premier grand port fluvial à la sortie des forêts du Morvan. Quant au bois emmené par le chemin de fer, on ne dispose d'aucune donnée comparable à celles de l'arrivage par la voie fluviale. On considère donc que les provenances d'approvisionnement en bois de Paris n'ont pas changé considérablement jusqu'au milieu des

¹ On suppose notamment en comparaison entre le débit de transport de charbon de terre entre Paris et Strasbourg au début des années 1860 (Minard, 1858-1861) et la situation après 1872 (D'Avenel, 1919).

années 1870, tandis que le mode de transport du bois et de ses sous-produits entrant dans Paris change dans ces années par rapport au début du siècle.

Considérant le mode de transport pour chaque produit au début du XIXe siècle, on constate que la part de transport par la voie fluviale est élevée pour le bois, tandis que pour les produits légers tels que les fagots et cotrets et le charbon de bois, la part de voie de terre est relativement importante. Pour le bois dur et tendre, environ 10 % emprunte la voie de terre en 1825, ce qui correspond approximativement à la part de bois tendre sur l'ensemble de bois dur et tendre (entre 8 et 14 % entre 1810 et 1830). Parmi les produits forestiers recensés dans l'octroi, le bois tendre, le charbon de bois et les cotrets et fagots, en l'occurrence les produits légers, tendent à voir leur part augmenter. En moyenne, durant les années 1870, la part de bois dur diminue et représente 51 %, tandis que le bois tendre augmente et atteint 25 %, les cotrets et fagots 8 % et le charbon de bois 16 % de l'ensemble de la biomasse forestière consommée à Paris en termes de masse. Ce changement de produits dans la consommation de la biomasse forestière est très probablement lié à la facilité en termes de transport. On suppose donc que le bois dur, dont la masse volumique est importante, est transporté par la voie fluviale, tandis que les produits légers faciles à transporter tels que le bois tendre, les cotrets et fagots, et le charbon de bois profitent du transport par le chemin de fer durant les années 1870. On a exclu le transport par la route, qui est cher et n'était qu'un moyen d'ajustement lorsque le transport par la voie fluviale était en difficulté au début du siècle. Par conséquent, selon notre hypothèse, la part pour la voie fluviale et pour le chemin de fer change avec l'évolution des produits consommés à Paris. En affectant la part de chaque mode de transport pour différents produits consommés à Paris, on obtient 68 % de produits affectés au transport par la voie fluviale et 24 % au transport par le chemin de fer.

Tableau 6.6.2. Tableau de synthèse de la part de contribution de chaque provenance et de la distance pondérée de l’approvisionnement en bois et en charbon de terre de Paris en km pour 1870-1880 (pour le bois, les valeurs de 1800 sont reprises)

| Code du département | Nom du département | Bois | | Charbon de terre | |
|---------------------|--------------------|-------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| | | % | Distance pondérée en km | % | Distance pondérée en km |
| 2 | AISNE | 4 % | 3 | - | - |
| 3 | ALLIER | - | - | - | - |
| 10 | AUBE | 3 % | 0 | - | - |
| 21 | COTE-D'OR | 14 % | 66 | - | - |
| 27 | EURE | 3 % | 6 | - | - |
| 42 | LOIRE | - | - | - | - |
| 45 | LOIRET | 3 % | 0 | - | - |
| 52 | HAUTE-MARNE | 5 % | 0 | - | - |
| 55 | MEUSE | 5 % | 22 | - | - |
| 58 | NIEVRE | 28 % | 49 | - | - |
| 59 | NORD | - | - | 10 % | 19 |
| 60 | OISE | 1 % | 2 | - | - |
| 62 | PAS-DE-CALAIS | - | - | 42 % | 75 |
| 71 | SAÔNE-ET-LOIRE | - | - | 4 % | 13 |
| 76 | SEINE-MARITIME | 3 % | 0 | - | - |
| 89 | YONNE | 31 % | 43 | - | - |
| 200 | BELGIQUE | - | - | 15 % | 75 |
| 610 | ROYAUME-UNI | - | - | 11 % | 63 |
| 1300 | ALLEMAGNE | - | - | 11 % | 92 |
| Total | | 100 % | 190 | 93 % | 338 |

Source : dans le texte

6.3.2. Bassin d’approvisionnement de Paris pendant la première moitié du XXe siècle

Dans cette section, on discute le bassin d’approvisionnement en charbon de terre et en pétrole connu à l’échelle nationale. Durant la première moitié du XXe siècle, le bassin d’approvisionnement en charbon de terre s’étend et atteint une échelle européenne suite à la croissance des produits importés d’Allemagne, majoritairement, et d’Angleterre dans une

moindre mesure. Quant au nouveau combustible apparu depuis la fin du dernier siècle à Paris, le pétrole, il dépend presque totalement de l'approvisionnement étranger. L'industrie électrique qui se développe dans la région parisienne influence la croissance de la consommation de charbon de terre. L'interconnexion réalisée à partir des années 1930 transporte l'énergie hydraulique à Paris depuis des régions productrices de montagne, les Alpes, le Massif Central et les Pyrénées. La logique de localisation géographique des secteurs de transformation connaît ainsi un changement important. Dans le cas du pétrole, en particulier, le secteur de transformation se localise près de ports maritimes ou fluviaux d'arrivage de ce produit, notamment au Havre et à Rouen dans la Basse Seine. On discutera par la suite plus en détail, d'abord le changement effectué dans le secteur d'approvisionnement en charbon de terre, dans le secteur électrique, puis dans le secteur pétrolier.

À partir de la fin du XIXe siècle, la pénurie d'approvisionnement en charbon de terre devient aiguë. L'amélioration des infrastructures de transport joue un rôle important dans la croissance des produits importés au cours de la deuxième moitié du XIXe siècle. De plus, la suppression de mesures protectionnistes, des taxes sur les ports, en 1880, favorise les produits lointains et étrangers. Durant la première moitié du XXe siècle, compte tenu de la proximité géographique par rapport à Paris et de l'importance de la production de charbon de terre de l'Angleterre et de l'Allemagne, ces produits deviennent probablement plus représentatifs dans l'ensemble des produits consommés à Paris. En particulier, la France obtient après la Première guerre mondiale, suite à l'accord signé dans le cadre du traité de Versailles, la propriété du bassin minier de la Sarre en Allemagne dont l'intérêt économique est important (Peyret, Courau, 1935). Alors que la Belgique est en train de diminuer sa production charbonnière, celle de l'Allemagne augmente jusqu'après la Deuxième guerre mondiale¹.

¹ Archive en ligne de l'Union européenne, [en ligne] [réf. du 3 déc. 2011], Disponible sur la toile : <http://www.ena.lu/>

Tableau 6.7. Production de houille dans l'espace de la Communauté du Charbon et de l'Acier en million de tonnes entre 1936 et 1958

| | Allemagne | Sarre | Belgique | France | Italie | Pays-Bas | Total Communauté* | Royaume-Uni : pour la comparaison |
|------|-----------|-------|----------|--------|--------|----------|-------------------|-----------------------------------|
| 1936 | 117 | 11,7 | 27,9 | 45,2 | 0,2 | 12,8 | 214,8 | |
| 1950 | 110,8 | 15,1 | 27,3 | 50,8 | 1 | 12,2 | 217,2 | |
| 1958 | 132,6 | 16,4 | 27,1 | 57,7 | 0,7 | 11,9 | 246,4 | 219 |

Source : Mémento de statistiques. [s.l.]: Office statistique des Communautés européennes, 1959 (in <http://www.ena.lu/>) ; Figaro 18. 11. 1958 pour le Royaume-Uni, présenté in <http://www.ena.lu/> (Le traité de la Communauté européenne du Charbon et de l'Acier (CECA) est signé en 1951 à Paris. Il réunit la France, l'Allemagne, l'Italie et les pays du Benelux dans une Communauté. Ce sont des statistiques rétrospectives de cette dernière.).

Comme cela a été évoqué plus haut, les départements périphériques de la région Île-de-France disposaient d'une énergie hydraulique importante durant le XIXe siècle. Durant la première moitié du XXe siècle, cette énergie réapparaît, mais sous une forme et des provenances très différentes. L'électricité hydraulique produite dans la région Île-de-France représente cependant une part très mineure. Le réseau électrique reste à l'échelle régionale jusqu'aux années 1930. L'extension et l'interconnexion des réseaux débutent durant les années 1930 et se poursuivent après la guerre de 1939-1945. Le mouvement d'interconnexion des réseaux électriques à l'échelle nationale est d'une part promu par l'électrification du chemin de fer et celle des régions rurales, et d'autre part par la croissance de la production d'électricité hydraulique de la France depuis les années 1930. Appelée la houille blanche, l'électricité hydraulique est alors en pleine expansion (Barjot et al., 1991). La production de cette électricité dépend du régime hydraulique et non du besoin pour la consommation finale. La technique de production dite au fil de l'eau utilisée à cette période et le caractère de cette énergie non stockable nécessitent une consommation immédiate, et donc l'interconnexion avec un marché de consommation dont le besoin est suffisant pour absorber au moment de la production cette énergie. La première interconnexion avec la région Île-de-France est ainsi réalisée en 1936 et permet d'importer l'électricité hydraulique produite au barrage du Sautet dans les Alpes et dans la centrale de Kembs sur le Rhin (Malégarie, 1947). Ensuite, après 1945, sont réalisées les interconnexions avec les barrages du Massif Central et des Pyrénées. Malégarie, dans son ouvrage consacré à l'histoire du développement du réseau électrique de la région parisienne, qualifie cette

transformation de réseaux électriques d'évolution fondamentale qui change le rôle des usines thermiques parisiennes, de producteurs centraux à *régulateurs* ou centrales *de pointe* en 1946. Toutefois, le développement de centrales thermiques dans la région parisienne après 1946 ne permet pas encore d'assumer cette qualification (voir le chapitre 4).

L'apparition du pétrole quant à lui fait évoluer considérablement le contexte de l'approvisionnement de Paris (Mercier in : Peyret, Courau, 1935). Durant les années 1920, les premières raffineries de Basse Seine sont construites le long de la voie fluviale entre les ports d'approvisionnement du Havre et de Rouen et la région parisienne. Le port du Havre en particulier devient le plus grand port d'approvisionnement en pétrole destiné à la région parisienne durant les années 1930 (Brunschwig in : Peyret, Courau, 1935) ; dans ce port, le pétrole représente plus de 80 % des flux totaux d'entrée et de sortie de matières (Musset, 1962). Le transport de produits pétroliers raffinés entre les raffineries normandes et la région parisienne est essentiellement assuré par voie navigable jusqu'au milieu du XXe siècle, ce qui est la raison principale de la localisation des raffineries en Normandie. Le premier projet de construction du pipeline Le Havre-Paris est déjà l'objet d'une étude dans les années 1920, néanmoins sans qu'elle se concrétise (Chové : in Peyret, Courau, 1935). Une technique exemplaire existe aux États-Unis et en Irak, mais jusqu'en 1934, la construction de pipelines n'est pas encore économiquement justifiée en France, puisque la consommation du pétrole n'est pas encore significative et que le transport fluvial est possible.

6.4. Bassin d'approvisionnement de Paris entre 1946 et 2006

6.4.1. Bassin d'approvisionnement de Paris entre 1946 et la fin des années 1960

Après 1946, la France fait face à un besoin de reconstruction après la guerre et de modernisation des industries et des infrastructures. Dans le cadre du plan de modernisation des infrastructures de transport pétrolier, la Commission de Modernisation (dite Plan Monnet) préconise l'adoption du pipeline en France (TRAPIL, 1963). L'enjeu de cette décision est de trouver un moyen de transport plus économique et techniquement sûr. Durant les années 1950, la croissance de la consommation pétrolière de la région parisienne entraîne le besoin d'une nouvelle technique de

transport massif. Ce besoin entraîne une reconstitution entière des quais du Havre¹. De plus, en 1951, la Société des transports pétroliers par pipeline (TRAPIL) est constituée pour mener des études techniques et se charger de la construction et de la distribution du pétrole, pour assurer l'approvisionnement entre les raffineries de Normandie et la région parisienne. Au début de la création de la société TRAPIL, une convention est établie pour éviter la récession du transport fluvial, qui était presque le seul moyen de transport pétrolier pour la région parisienne. Le transport par pipeline doit absorber uniquement le trafic au plus égal à l'accroissement de la consommation et assure notamment l'approvisionnement en pétrole pour la période hivernale durant laquelle le transport fluvial est difficile (TRAPIL, 1963). En revanche, la croissance de la consommation de l'agglomération parisienne modifie cette convention. Le pipeline transporte 304 kilotonnes de produits pétroliers vers la région parisienne en 1953. Entre 1953 et 1963, en une décennie, le débit annuel augmente d'un facteur dix, de 0,3 à 3,2 millions de tonnes. Il atteint ensuite 10 millions de tonnes en 1971 (tableau suivant) (TRAPIL, 1972). Simultanément, la ligne de 10'' (25 centimètres) de diamètre de pipeline construite et mise en service en 1953 atteint son point de saturation. En 1961, à peine dix ans après, une deuxième ligne de pipeline de diamètre 12'' (30 cm) est mise en service et double la canalisation entre la raffinerie de Gonfreville au Havre et le dépôt pétrolier de Saint-Ouen dans la région parisienne. Cette construction entraîne un prolongement de canalisation de tous types de lignes en cumul de 192 km à 1 004 km entre 1953 et 1973. La part de transport par pipeline croît ainsi de 33 % à 59 % entre 1955 et 1967.

¹ Le passage des chalands (un tonnage moyen de 465,5 tonnes par chaland de l'Union Normandie) rend également impossible la voie navigable, ce qui entraîne une restructuration totale des infrastructures de transport du pétrole (Peyret, Courau, 1935).

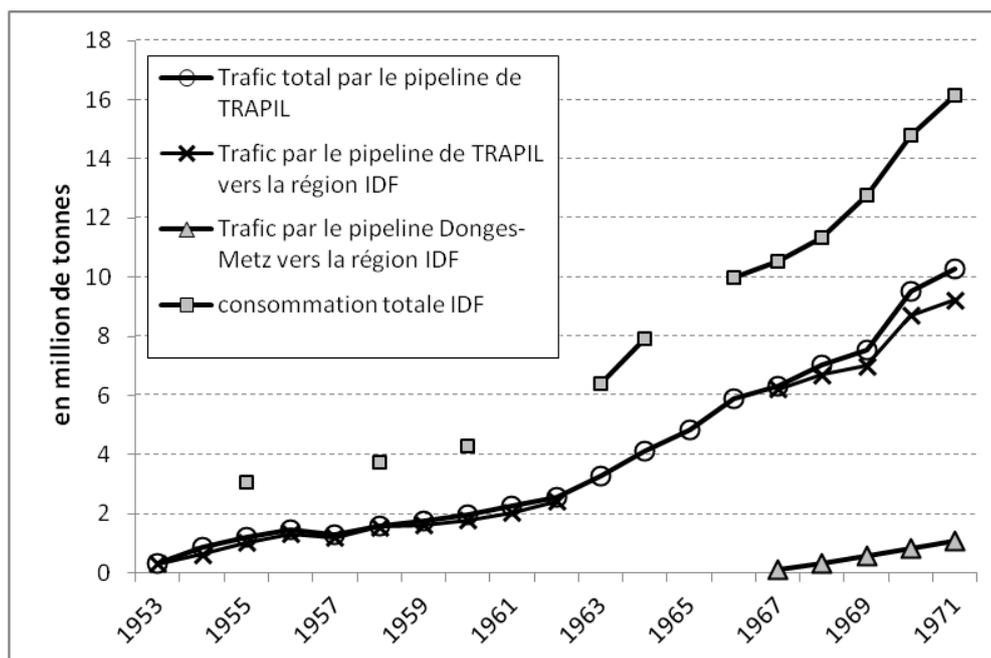


Figure 6.6. Transport de produits pétroliers par des pipelines entrant dans la région Île-de-France et consommation parisienne en million de tonnes, 1953-1971. Source : INSEE, 1966, TRAPIL, 1963, TRAPIL, 1972 (en supposant la distribution du pétrole vers la région parisienne entre 85 et 95% du total).

Les années 1950 sont marquées en France par la découverte de gisements pétroliers et de gaz naturel à l'intérieur et à l'extérieur du territoire métropolitain (Ezran, 2010). Dans la région Île-de-France, l'exploration du pétrole brut est fructueuse notamment depuis le début des années 1960. La production régionale de pétrole brut qui était de 1,3 kilotonne en 1953, croît d'un facteur dix en 1958 avec 13,5 kt, puis 478,9 kt en 1960, représentant environ 11% de sa consommation, part maximale de ce produit régional dans la consommation de toutes les périodes. Dans les années suivantes, la part de produit régional baisse, du fait de la croissance de la consommation régionale. En 1964, elle ne représente que 7% de sa consommation en termes de masse. Cette part diminue davantage dans les années suivantes.

Quant au gaz naturel, le contexte régional d'approvisionnement connaît une évolution importante durant les années 1960. D'abord, à l'extérieur de la région, l'extraction de ce combustible dans le département des Pyrénées-Atlantiques (Lacq) permet un autre regard sur le combustible gazeux. Pour Gaz de France, héritant de technologies anciennes d'industrie gazière manufacturée, c'est une opportunité d'évoluer vers une nouvelle technologie (Beltran, 1992). Dans la région parisienne, malgré la modernisation effectuée dans certaines usines à gaz

(Gennevilliers notamment), l'image d'une industrie vieillissante et de son combustible polluant est inévitable ainsi que le déclin de sa consommation depuis 1946. Le gaz de Lacq est découvert au début des années 1950 et est importé dès la fin des années 1950. Au début des années 1960, ce gaz croît de plus en plus dans le réseau de la région parisienne. C'est aussi durant ces années que l'on envisage d'étendre le réseau vers les Pays-Bas. Le gaz algérien pénètre aussi dans le réseau français de gaz. Suite au changement de produits et de réseaux de gaz, l'infrastructure gazière de la région connaît une mutation majeure avec la fermeture des usines à gaz existant majoritairement dans le département de la Seine et l'installation de complexes de mélange et de compression dans les départements périphériques¹.

On tente par la suite de déterminer les provenances des produits énergétiques et la part de chaque mode de transport. L'approvisionnement est bien décrit par l'Atlas de la région parisienne dressé pour 1965 par divers organismes de la région parisienne. Le relevé des données issues des graphiques a été effectué pour les provenances de charbon de terre parmi lesquelles les départements du Pas-de-Calais et du Nord représentent la plus grande part. Les provenances du charbon importé de l'Union européenne ne sont pas connues en détail. On suppose qu'elles se répartissent de la même façon que les importations nationales. Selon celles-ci, en 1965, la France importe le charbon de terre majoritairement d'Allemagne et dans une moindre mesure des États-Unis et de l'URSS². Il semble que ces régions restent les fournisseurs principaux durant les années 1960. L'organisation de l'approvisionnement en charbon de terre ne change que durant les années 1970, notamment avec des provenances nouvelles : l'Afrique du Sud et l'Australie.

Pour les provenances des produits pétroliers consommés dans la région, on a utilisé des données portant sur l'arrivage de pétrole brut et de produits pétroliers au Havre qui datent de 1955. Le décalage temporel est assez important par rapport aux années de référence choisies 1960-1965. Toutefois, pendant la crise de Suez entre 1956 et 1958, la situation de l'approvisionnement a probablement peu changé. De plus, la part d'extraction pétrolière de chaque pays du Moyen-Orient connaît peu de changement, avec entre 1 et 2 % d'écart en termes de part de chaque pays producteur entre 1959 et 1964. Selon ces données, l'arrivage au port du Havre de ces produits représente 93 % de la consommation totale de la région parisienne. L'origine du reste, soit 7 %, étant inconnue, on obtient la part de provenance à partir des provenances connues pour 86 % du

¹ TF1, 1975, *Evry-Gregy : carrefour du gaz*, Télévision Française 1, le 1 mars 1975, 12min51s, Institut National Audiovisuel, [En ligne] [réf du 9 juin 2012] : ina.fr.

² Charbonnage de la France, Statistique annuelle, en 1980, 56p (p 46), cité par : Angelier (1981).

pétrole. La marge d'erreur est probablement peu importante si l'on considère la concentration de production dans une même zone géographique à cette période. Les provenances du pétrole ont probablement changé après 1965, puisque l'approvisionnement national se tourne vers l'Afrique du Nord, notamment avec la croissance de l'extraction pétrolière libyenne, alors que durant les années 1950, la dépendance de la France vis-à-vis des produits pétroliers du Moyen-Orient était de plus de 80 %¹.

Quant à l'approvisionnement en gaz naturel d'Algérie, en 1965, l'importation est à l'essai avec la technique de liquéfaction du gaz naturel (gaz naturel liquéfié, GNL) et de transport par navires, navires qui arrivent au Havre et dont le gaz est par conséquent consommé dans la région parisienne. On a néanmoins ignoré cette quantité faible et considéré que le gaz transporté par gazoduc est à 100 % issu de Lacq.

Tableau 6.8. Origines de premier ordre des combustibles consommés dans la région parisienne pour 1960-1965 : Part de chaque provenance dans la consommation énergétique totale primaire de chaque groupe d'énergie de Paris (Part dans le charbon de terre, part dans le pétrole, part dans le gaz naturel en %), Part de chaque provenance dans la DET en %

| Charbon de terre | | | Pétrole | | | Gaz naturel | | |
|------------------|------------------------------------|---|-----------|-----------------------------|---|-------------|------------------------------|---|
| Origine | Part dans le charbon de terre en % | Part de chaque provenance dans la DET (%) | Origine | Part dans le pétrole en (%) | Part de chaque provenance dans la DET (%) | Origine | Part dans le gaz naturel (%) | Part de chaque provenance dans la DET (%) |
| Nord | 60 | 15 | Le Havre | 93 | 62 | Lacq | 100 | 6 |
| St-Etienne | 15 | 4 | Dunkerque | 2 | 1 | Le Havre | 0 | 0 |
| Lorraine | 15 | 4 | Bordeaux | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| UE | 10 | 2 | Nantes | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 100 | 25 | Marseille | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Source : dans le texte

¹ En 1970, la dépendance nationale de l'approvisionnement en pétrole est respectivement de 40 % du Moyen-Orient et de 50% de l'Afrique du Nord (Bourgey, 1971).

Tableau. 6.9. Provenances des produits pétroliers consommés dans la région parisienne pour
1960-1965

| | Tonnes | % |
|-------------------------------|-----------|------|
| Golf Persique | 4 305 646 | 45,0 |
| Syrie-Liban | 3 731 560 | 39,0 |
| États-Unis | 133 953 | 1,4 |
| Amérique centrale et Antilles | 114 817 | 1,2 |
| Venezuela | 373 156 | 3,9 |
| Roumaine | 95 681 | 1,0 |
| URSS | 57 409 | 0,6 |
| Europe de l'Ouest | 133 953 | 1,4 |
| Autre cabotage national | 621 927 | 6,5 |
| Entrée totale au Havre | 9 568 103 | 100 |

Source : dans le texte

(La production de 521,3 kt de la région parisienne est entièrement affectée au département de la Seine-et-Marne, compte tenu du fait que l'extraction est quasi entièrement réalisée dans ce département avant 2006.)

L'électricité consommée à Paris est issue d'un nouveau combustible à partir des années 1960. L'électricité nucléaire est développée depuis 1950 et sa production croît de façon sensible durant les années 1960. L'importation de cette énergie est donc faite uniquement par l'électricité et le combustible fissile utilisé pour la production électrique dans des centrales qui sont en dehors de la région parisienne. On assimile les provenances de l'uranium consommé dans la région Île-de-France aux lieux d'extraction nationale connue par département. Pour connaître les provenances de ce combustible, on utilise la base MIMOSA, base de données d'anciennes carrières d'uranium en France, disponible sur le site de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, sachant que durant les années 1960, l'extraction d'uranium est faite au sud de la France : selon l'IRSN, la dernière exploitation en France a été effectuée dans la Haute-Vienne en 2001. Les fiches de renseignement de l'IRSN sont organisées par carrière ; elles renseignent la quantité d'extraction totale de chaque carrière et détaillent ainsi la date du début et celle de la fin de sa mise en service. On a relevé seulement les données concernant l'année 1965, qui portent sur les carrières fonctionnant au cours de 1965, et divisé la quantité totale d'extraction par le nombre d'années de fonctionnement pour obtenir la quantité d'extraction annuelle. On ignore donc la variation annuelle d'extraction de chaque carrière qui n'est pas connue dans cette base. Ensuite, on réorganise ces données d'extraction par département. Pour certaines mines qui sont concernées par deux départements (cas minoritaire), on affecte la

quantité d'extraction annuelle de façon égale aux deux départements. Les données brutes sont présentées dans l'annexe 4. Le résultat de l'analyse de provenance de l'uranium se trouve dans la section 6.5.

Tableau 6.9.2. Tableau de synthèse de la part de contribution de chaque provenance et de la distance pondérée de l'approvisionnement en pétrole, en charbon de terre et en gaz naturel (haut) et en électricité hydraulique de Paris en km pour 1965 (bas)

| Code de département ou région du monde | Nom de département ou de région du monde | Distance en km | Pétrole | | CMS | | Gaz naturel | |
|--|--|----------------|---------|-------------------------|------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| | | | % | Distance pondérée en km | % | Distance pondérée en km | % | Distance pondérée en km |
| 40 | Landes | 590 | 6% | 34 | | 0 | 100% | 590 |
| 42 | Loire | 370 | - | 0 | 15% | 56 | - | - |
| 57 | Moselle | 320 | - | 0 | 15% | 48 | - | - |
| 59 | Nord | 200 | - | 0 | 6% | 12 | - | - |
| 62 | Pas-de-Calais | 180 | - | 0 | 54% | 97 | - | - |
| 77 | Seine-et-Marne | 50 | 5% | 3 | - | - | - | - |
| 2A | Corse-du-Sud | 930 | - | 0 | - | - | - | - |
| 2B | Haute-Corse | 890 | - | 0 | - | - | - | - |
| 1009 | Russie | 5988 | - | 32 | - | - | - | - |
| 1300 | Allemagne | 836 | - | 0 | 10% | 84 | - | - |
| 2002 | USA - Porto Rico | 7159 | 1% | 89 | - | - | - | - |
| 2320 | Venezuela | 7348 | 3% | 253 | - | - | - | - |
| 2520 | Syrie | 3582 | 34% | 1234 | - | - | - | - |
| 2610 | Irak | 4147 | 6% | 262 | - | - | - | - |
| 2620 | Iran | 4866 | 9% | 421 | - | - | - | - |
| 2630 | Koweït | 4671 | 13% | 606 | - | - | - | - |
| 2650 | Arabie Saoudite | 4812 | 9% | 424 | - | - | - | - |
| 2671 | Bahrein | 5127 | | 13 | - | - | - | - |
| 2672 | Qatar | 5215 | 1% | 54 | - | - | - | - |
| 2676 | Émirats arabes unis | 5527 | | 51 | - | - | - | - |
| 1620 | Algérie | 2027 | - | - | - | - | 0% | 0 |
| Total | | | 88% | 3493 | 100% | 296 | 100% | 590 |

| Nom de région | Distance en km | Part de production d'électricité hydraulique en % | Distance pondérée en km |
|---------------|----------------|---|-------------------------|
| Midi-Pyrénées | 565 | 15 % | 85 |
| Rhône-Alpes | 458 | 68 % | 311 |
| Auvergne | 357 | 17 % | 61 |
| Total | - | 100 % | 457 |

Source : cette thèse.

6.4.2. Bassin d'approvisionnement de Paris de la fin des années 1960 jusqu'en 2006

Notons quelques changements remarquables pour l'approvisionnement de Paris entre la fin des années 1960 et 2006. La consommation parisienne du pétrole diminue. Le pétrole est de plus en plus transporté par pipeline. De ce fait, le taux de couverture des données de SITRAM pour ce produit est relativement moins important. On a comparé les données de consommation finale et intermédiaire (pour la production électrique) pétrolière issue de la base PEGASE au bilan d'entrée et de sortie issu de données de SITRAM en additionnant l'extraction régionale de 459 kt en 2006. En comparant les données de PEGASE aux données de SITRAM, on constate que 24 % des produits sont recensés par SITRAM, tandis que le reste n'apparaît pas dans la base. On a donc affecté sans peine ces 76 % à l'importation régionale par pipeline. Toutefois, l'importation se fait par deux pipelines, le Havre-Paris et Donges-Metz, dont les points d'entrée sont respectivement la Haute-Normandie et le Pays de la Loire. La part de trafic des deux pipelines est connue pour 2006, respectivement 90 % et 10 % (voir le tableau suivant). Les provenances sont obtenues au deuxième ordre en adoptant les coefficients pondérateurs suivants : 0,68 ($0,76 \times 0,9$) pour le Havre (région Haute-Normandie) et 0,08 ($0,76 \times 0,1$) pour le port Donges-Metz (Pays de la Loire).

Tableau 6.10. Transport de produits pétroliers par le pipeline Le Havre-Paris et Donges-Metz, pipelines approvisionnant Paris en kt/an en 2006

| | Produits finis | Produits bruts | Total produit | Part de chaque pipeline sur le trafic total des deux lignes |
|-------------------|----------------|----------------|---------------|---|
| Le Havre-Paris | 20 113 | 7 170 | 27 283 | 90 % |
| Donges-Melun-Metz | 3 086 | - | 3 086 | 10 % |

Source : MEEDDAT, 2009.

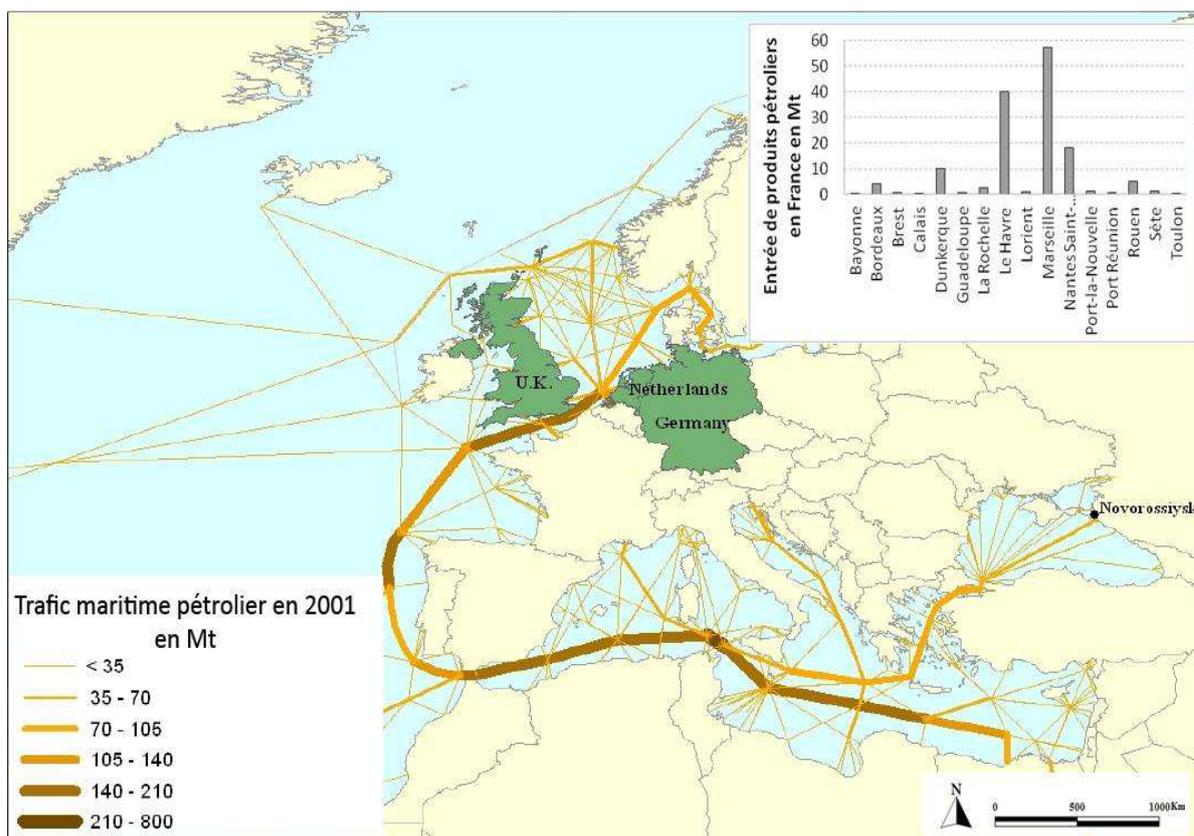


Figure 6.7. Parcours et trafic de transport maritime pétrolier en 2001 et entrée de produits pétroliers (pétrole brut plus raffiné) en France selon le port d'entrée en 2006. Source : Huijer, 2005, Soes, données téléchargées, sous format Excel le 16 déc. 2011.

Pour le gaz naturel, en 2006, 70 % de celui qui est importé en France emprunte le gazoduc, tandis que 30 % entre sous forme de GNL (gaz naturel liquéfié, notamment pour les produits provenant d’Afrique) (DGEMP, 2007a). Ce dernier est injecté ensuite dans les gazoducs aux ports d’entrée de Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône (13) - Provence-Alpes-Côte d’Azur) et Montoir de Bretagne (Loire-Atlantique (44) - Pays de la Loire). Dans Paris, par conséquent, 100 % du gaz entre par le réseau de gazoducs et il est difficile d’en connaître les provenances exactes. Faute de données à l’échelle régionale, on assimile les provenances de ces produits consommés à Paris à celles de produits consommés en France et on utilise des données nationales. La part de chaque provenance pour le gaz naturel est estimée selon les données nationales issues de la DGEMP, qui datent de 2006. Selon ces données, les provenances du gaz naturel en 2006 sont respectivement de 38 % pour la Norvège, 21 % pour la Russie, 21 % pour l’Algérie, 12 % pour le Niger, et 7 % pour l’Égypte.

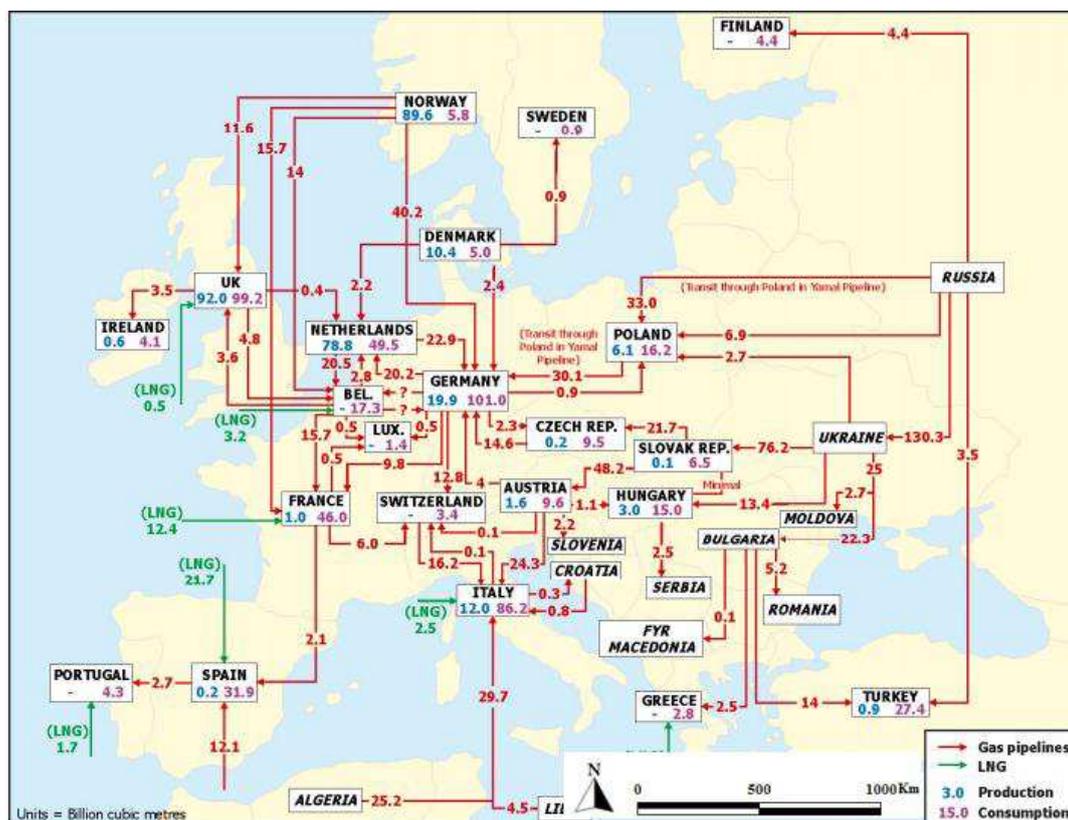


Figure 6.8. Flux européens de gaz naturel en milliard de m³ au cours des années 2000.

Source : DGEMP, 2007a.

(La source originale est l’Agence internationale de l’énergie (AIE) ; la date exacte des données n’étant pas précisée, on suppose qu’elles datent des années 2000.)

Pour l'électricité hydraulique, on recourt à des données de production régionales (DGEMP, 2007b). On en déduit la répartition des provenances pour Paris, sachant que la production régionale de cette énergie est très faible.

Pour la matière fissile consommée indirectement par l'électricité, on assimile les provenances à des pays dans lesquels AREVA exerce ses activités extractives¹. La part de contribution de chaque pays est estimée selon les données d'AREVA qui datent de 2004 (AREVA, 2004). En fait, l'uranium extrait par AREVA est également exporté à l'étranger. Néanmoins, faute d'autres informations, on affecte cette extraction à la consommation française et assimile la répartition des provenances de ce produit consommé indirectement dans Paris à la part d'extraction de chaque pays. Le décalage temporel de deux ans des données crée éventuellement un écart entre le résultat de 2004 et celui de 2006. Toutefois, les pays de provenance de matière fissile ne changent pas entre 2004 et 2006, puisque les provenances actuelles de matières fissiles sont un résultat de l'expansion des activités extractives entre 1980 et 2000, périodes durant lesquelles AREVA devient une filière mondiale de l'enrichissement et de l'extraction de l'uranium (Giraud, Boy de La Tour, 1987, OCDE, AIEA, 2006). De fait, la matière fissile extraite en Afrique (Niger notamment) et au Canada représentait déjà une part importante à la fin des années 1990. Pour les années 2000, le changement effectué dans les provenances semble mineur par rapport à la fin des années 1990. Le Kazakhstan vient s'ajouter à la liste des pays dans lesquels AREVA exerce ses activités extractives et sa part est encore mineure en 2004 (AREVA, 2004). Notons par ailleurs qu'AREVA n'extrait plus d'uranium en France.

Quant au charbon de terre, la part croissante de produits importés est probablement parallèle à la croissance de la consommation de charbon, notamment intermédiaire dans le secteur électrique et de production de chaleur (voir le chapitre 4). La contribution de l'Afrique du Sud et de l'Australie (notamment), croissante depuis les années 1970, fait augmenter considérablement la distance moyenne d'approvisionnement pour ce produit, tandis que la consommation diminue depuis les années 1990, après une hausse importante durant les années 1970 et 1990.

¹ La création d'AREVA au début des années 2000 fait suite à la restructuration du secteur nucléaire en France, regroupant les activités de Cogema (Compagnie générale des matières nucléaires) et de Framatome (société franco-américaine de constructions atomiques) (OECD, NEA, 2002, p. 50-51).

Tableau 6.10.2. Tableau de synthèse de la part de contribution de chaque provenance et de la distance pondérée de l'approvisionnement en charbon de terre, en pétrole, en combustible fissile et en électricité hydraulique de Paris en km pour 2006

| Région d'origine | Nom | Distance en km | Pétrole | | Charbon de terre | | Électricité hydraulique | | | | |
|------------------|-----------------------|----------------|-----------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| | | | Si >0,005 | Distance pondérée | Si >0,005 | Distance pondérée | Nom de région | Distance en km | Part de production en % | Prod. Elec. Hyd. en GWh | Distance pondérée |
| 200 | Belgique - Luxembourg | 500 | - | 0 | 1% | 5 | Île-de-France | 23 | 0% | 54 | 0 |
| 300 | Pays-Bas | 692 | 2% | 11 | - | - | Champagne-Ardenne | 170 | 3% | 1 072 | 5 |
| 500 | Italie | 1 333 | - | 1 | 1% | 10 | Picardie | 90 | 0% | 14 | 0 |
| 610 | Royaume-Uni | 569 | 7% | 39 | 1% | 4 | Haute-Normandie | 117 | 0% | 52 | 0 |
| 700 | Danemark | 1 140 | - | 10 | - | - | Centre | 147 | 0% | 118 | 0 |
| 910 | Norvège | 1 634 | 23% | 376 | 1% | 16 | Basse-Normandie | 206 | 0% | 50 | 0 |
| 1002 | Estonie | 2 125 | - | - | 1% | 18 | Bourgogne | 223 | 0% | 113 | 0 |
| 1009 | Russie | 5 988 | 14% | 854 | 8% | 460 | Nord-Pas-de-Calais | 191 | 0% | 1 | 0 |
| 1013 | Kazakhstan | 4 945 | 2% | 93 | - | 0 | Lorraine | 286 | 1% | 293 | 3 |
| 1100 | Pologne | 1 597 | - | - | 32% | 516 | Alsace | 386 | 21% | 8 760 | 81 |
| 1300 | Allemagne | 836 | - | - | 1% | 6 | Franche-Comté | 344 | 2% | 864 | 7 |
| 1410 | Espagne | 980 | - | - | 1% | 5 | Pays de la Loire | 284 | 0% | 19 | 0 |
| 1510 | Grèce | 2 197 | - | 1 | - | - | Bretagne | 394 | 1% | 604 | 4 |
| 1620 | Algérie | 2 336 | 2% | 48 | - | - | Poitou-Charentes | 352 | 0% | 120 | 0 |

| | | | | | | | | | | | |
|-------|---------------------|--------|-----|-------|-----|-------|---|-------|------|--------|-------|
| 1643 | Libye | 3 105 | - | 27 | 23% | 2 051 | Aquitaine | 549 | 1% | 540 | 5 |
| 1840 | Afrique du Sud | 8 945 | - | - | 9% | 609 | Midi-Pyrénées | 565 | 23% | 9 356 | 130 |
| 2210 | Mexique | 8 680 | - | 8 | - | - | Limousin | 357 | 4% | 1 718 | 14 |
| 2310 | Colombie | 8 107 | - | - | 10% | 803 | Rhône-Alpes | 458 | 25% | 10 480 | 115 |
| 2333 | Aruba | 7 255 | - | 5 | - | - | Auvergne | 357 | 3% | 1 351 | 11 |
| 2610 | Irak | 4 147 | 3% | 125 | - | - | Languedoc-Roussillon | 584 | 5% | 2 175 | 29 |
| 2620 | Iran | 4 866 | 6% | 281 | - | - | Provence-Alpes-Côte d'Azur | 599 | 8% | 3 270 | 48 |
| 2630 | Koweït | 4 671 | 4% | 186 | - | - | Corse | 905 | 1% | 278 | 9 |
| 2650 | Arabie Saoudite | 4 812 | 18% | 858 | - | - | Total | - | 98% | 41 302 | 461 |
| 2676 | Emirats Arabes Unis | 5 527 | 4% | 209 | - | - | Combustible fissile (production en tonne) | | | | |
| 2711 | Inde et Sikkim | 7 498 | - | 71 | - | - | Canada | 5 806 | 62% | 3 791 | 3 594 |
| 3110 | Australie | 15 330 | - | - | 10% | 1 545 | Niger | 3 426 | 37% | 2 274 | 1 272 |
| 3112 | Nauru | 14 390 | - | 0 | - | - | Kazakhstan | 5 070 | 1% | 53 | 44 |
| Total | | | 84% | 3 971 | 97% | 6 111 | Total | 4 767 | 100% | 6 125 | 4 909 |

Source : cette thèse.

6.5. Résultat d'ensemble

Part de contribution de chaque provenance dans la source énergétique consommée à Paris en % et distance moyenne et maximale d'approvisionnement de chaque période en km

Au début du XIXe siècle, le rayon d'approvisionnement est de 190 km en termes de distance moyenne et de 270 km en termes de distance maximale. Cette distance correspond en fait à la limite des réseaux d'approvisionnement par la voie fluviale qui était quasiment l'unique moyen de transport. Les bassins hydrauliques concernés sont le bassin de la Seine-Normandie et le bassin de la Loire, notamment les affluents du sud-est du bassin. Les départements du sud du bassin de la Seine et de l'est de la Loire (tels que la Loire et la Saône-et-Loire) approvisionnent principalement Paris en combustibles fossiles, sachant que la consommation en est encore très faible. A la fin du siècle, la distance moyenne ne change pas significativement et atteint 270 km. Toutefois, les régions du nord deviennent les provenances majeures. Ce sont notamment les départements du Nord et du Pas-de-Calais qui approvisionnent principalement Paris, ainsi que le bassin minier belge. L'Angleterre et l'Allemagne apparaissent plus marginalement parmi les pays approvisionnant Paris. La distance maximale croît remarquablement d'un facteur 2 (790 km) durant environ un siècle et reflète la pénétration du charbon de terre étranger dans Paris, notamment celui de l'Angleterre qui représente la distance maximale du charbon de terre. Puisque ce charbon étranger restait encore marginal durant les années 1870 et que son importation croît durant la première moitié du XXe siècle, les distances moyenne et maximale pour le charbon de terre augmentent probablement pour le début du XXe siècle. De plus, l'apparition de produits pétroliers dans Paris augmente très probablement la distance moyenne et considérablement la distance maximale qu'on n'a néanmoins pas pu quantifier.

Si l'on compare maintenant les distances moyenne et maximale pour toutes les sources énergétiques consommées à Paris entre les années 1870 et 1965, deux valeurs augmentent de façon considérable. En 1965, la distance moyenne progresse d'un facteur 10 et la distance maximale de 9,3, ce qui donne un résultat respectivement de 2 700 km et 7 350 km (tableau suivant). La croissance de la consommation de produits pétroliers provenant du Moyen Orient est un facteur important de l'allongement de la distance moyenne. Quelques produits pétroliers proviennent également de pays de l'Amérique du Sud et sont un facteur de croissance de la distance maximale d'approvisionnement en sources énergétiques en 1965. Entre 1965 et 2006,

l'allongement en termes de distances moyenne et maximale d'approvisionnement est respectivement d'un facteur 1,4 et 2,1. Ce sont les produits pétroliers, le gaz naturel et le combustible fissile qui jouent un rôle important. Pour les produits pétroliers, la distance moyenne varie peu ; le rétrécissement grâce à la croissance de l'importation de la Mer du Nord (Norvège) est en effet contrebalancé par l'éloignement dû à la croissance des produits en provenance de la Russie et du Moyen-Orient. En revanche, pour le gaz naturel et pour le combustible fissile, la croissance en termes de distance est considérable, sachant que l'extraction nationale s'éteint progressivement entre les années 1970 et 2000. Pour les combustibles en 2006, les produits sont presque entièrement importés. Le charbon de terre connaît la même situation que d'autres combustibles, la part croissante de produits étrangers augmente la distance moyenne, mais dans une moindre mesure du fait de sa part peu importante dans la demande totale énergétique de Paris. Toutefois, la distance maximale pour 2006 est celle du charbon de terre qui provient de l'Australie et atteint environ 15 000 km.

Tableau 6.11. Distance moyenne de chaque source énergétique, distance moyenne d'approvisionnement pondérée de chaque période et distance maximale de provenance contribuant à plus de 0,5% à l'approvisionnement en source énergétique de Paris

| | | 1800 | 1875 | 1965 | 2006 |
|--|----------------------------------|------|------|-------|-------|
| Part de chaque source énergétique sur la DET | Bois | 0,97 | 0,42 | 0,00 | 0,00 |
| | Charbon de terre | 0,03 | 0,58 | 0,25 | 0,05 |
| | Produits pétroliers | | | 0,67 | 0,19 |
| | Gaz naturel | | | 0,06 | 0,24 |
| | Combustible fissile | | | 0,00 | 0,44 |
| | Energie hydraulique | | | 0,01 | 0,02 |
| | Autres | | | 0,02 | 0,06 |
| | Total | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Distance (km) | Bois | 190 | 190 | - | - |
| | Charbon de terre | 340 | 330 | 300 | 6 110 |
| | Produits pétroliers | | | 3 850 | 3 970 |
| | Gaz naturel | | | 590 | 2 540 |
| | Combustible fissile | | | 400 | 4910 |
| | Energie hydraulique | | | 460 | 460 |
| | Autres | | | 50 | 50 |
| | Distance moyenne pondérée (Davg) | 190 | 270 | 2 700 | 3 850 |
| | Distance maximale (Dmax) | 370 | 790 | 7350 | 15330 |

Source : cette thèse.

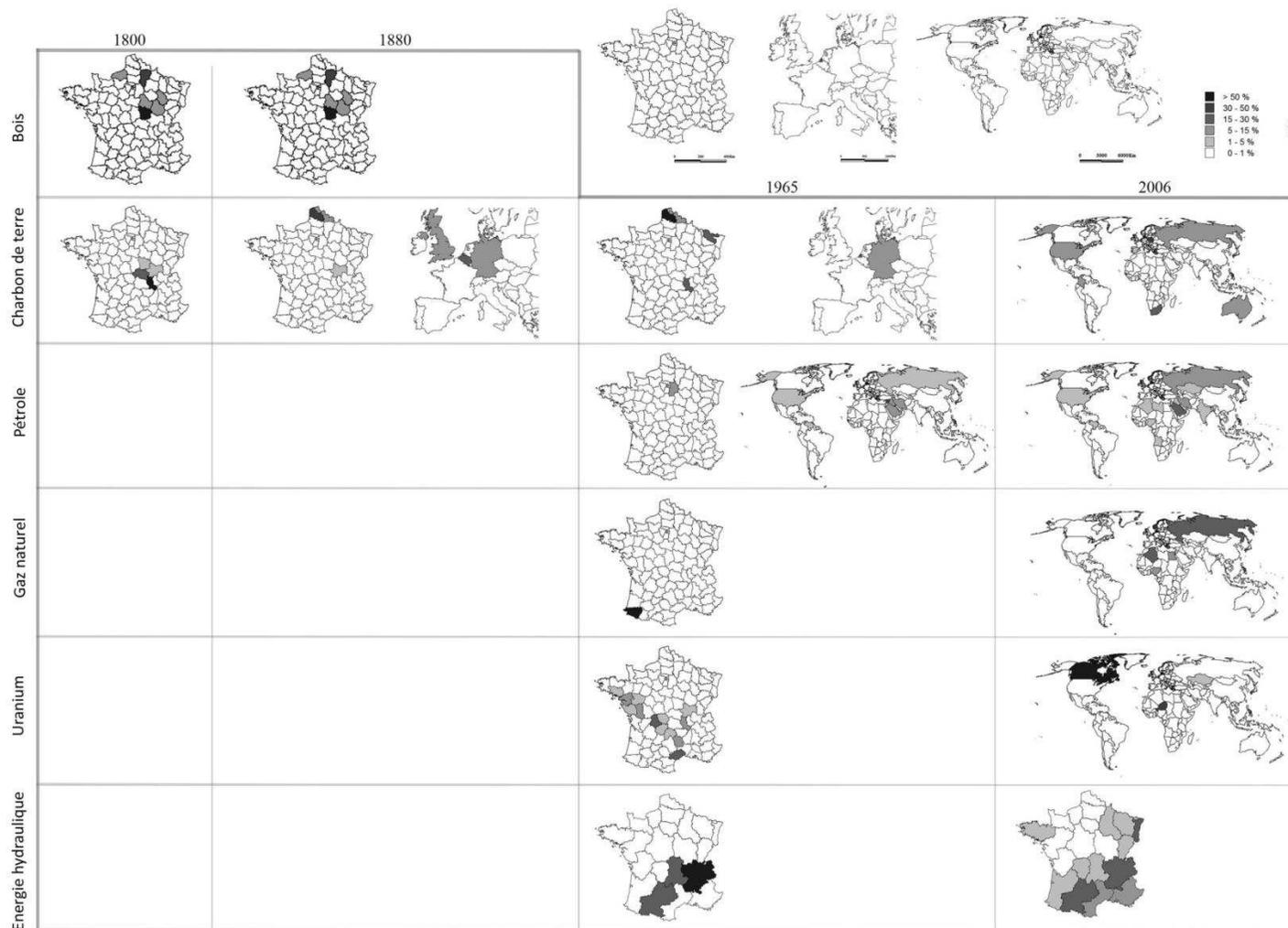


Figure 6.9. Origines des sources énergétiques consommées à Paris selon les sources et selon les dates choisies de l'analyse pour le début du XIXe siècle, pour les années 1870, 1965 et 2006 (provenance significative de plus de 0,5 % de l'approvisionnement total en chaque groupe de produits). Source : cette thèse.

L'évolution de la distance moyenne reflète la croissance de la dépendance de la ville envers l'extérieur pour son approvisionnement en source énergétique. Cette distance montre d'une part le degré de dépendance d'un milieu de plus en plus lointain de la ville, et d'autre part la dépendance de systèmes de transports et par conséquent d'infrastructures liées à ces moyens de transport. La distance maximale quant à elle est un indicateur montrant la capacité d'organisation d'un réseau d'approvisionnement le plus loin possible. Dans l'histoire de l'approvisionnement de Paris, cette provenance la plus lointaine à un moment donné devient une provenance banale dans les années suivantes. De ce fait, comme le montre le tableau suivant, la capacité d'approvisionnement (montrée par l'indicateur de distance maximale) croît considérablement préalablement à la croissance de la distance moyenne. Pour une date donnée, la distance maximale reflète probablement l'existence d'une technique de transport qui n'est pas encore généralisée en raison de contraintes techniques et/ou économiques. C'est le cas notamment du chemin de fer durant la deuxième moitié du XIXe siècle. Dans le cas de la distance maximale en 2006, celle du charbon de terre importé d'Australie, l'effet d'économie d'échelle (extraction massive) et la disponibilité de la ressource (matière première moins chère) sont probablement des facteurs déterminants qui permettent ainsi de supporter le coût du transport à longue distance.

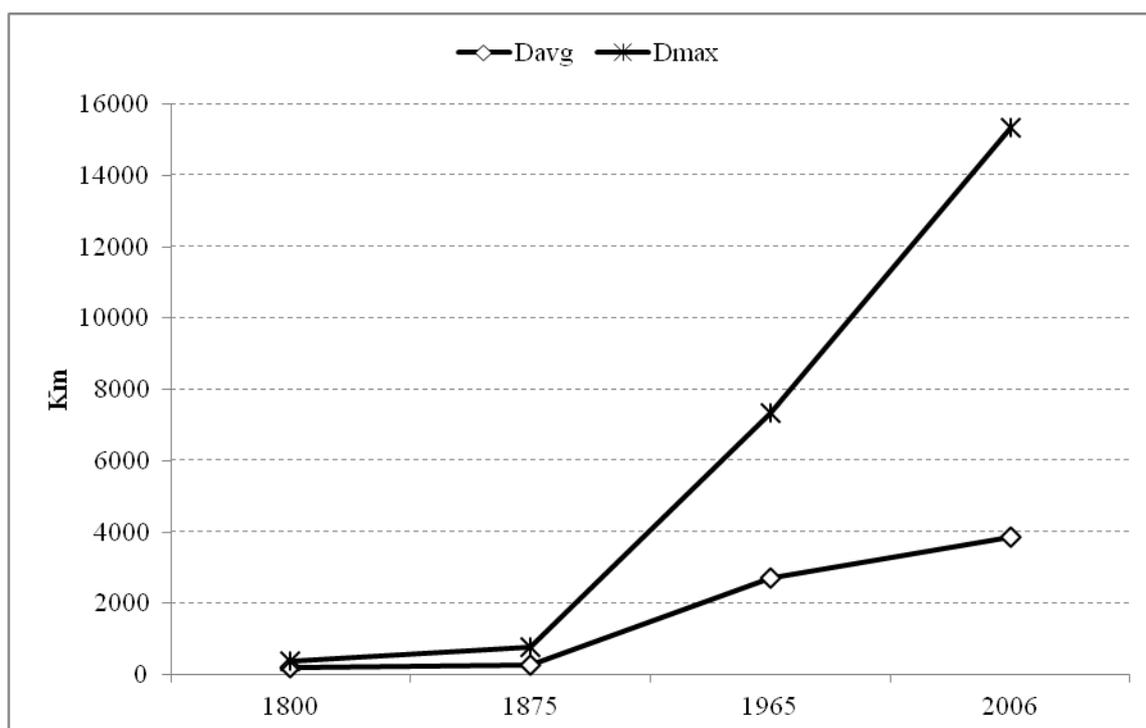


Figure 6.10. Distance moyenne et maximale selon les dates d'observation. Source : cette thèse.

Pour 2006, compte tenu de notre hypothèse et de la difficulté d'estimer les provenances de certaines sources énergétiques à l'échelle urbaine, telles que l'énergie hydraulique, la matière fissile et le gaz naturel, 52 % de la demande énergétique totale de Paris est estimée par les données nationales d'importation des sources énergétiques. On constate néanmoins une tendance de similitude en termes de provenances d'énergie à l'échelle nationale et régionale pour les produits pétroliers et pour le charbon de terre qui est probablement le résultat d'un processus long, en cours depuis le milieu du XXe siècle. Cette tendance semble être renforcée depuis 1970 : l'extraction locale d'énergie primaire en France n'a cessé de diminuer. C'est la raison notamment pour laquelle la France, ainsi que la région Île-de-France, connaissent une forte dépendance des combustibles fossiles importés : le charbon de terre, le gaz naturel et le pétrole. On remarque ainsi la distance considérablement accrue de provenance du gaz naturel depuis les années 1960, due d'abord à l'épuisement du produit national et à la croissance de la consommation finale de gaz, et par conséquent à la croissance de produits importés, et à l'importation de pays de plus en plus lointains, Algérie, Pays-Bas, puis Russie. Les provenances du pétrole montrent seulement une légère modification. Néanmoins, la part de pétrole diminue dans la demande énergétique totale (DET) de Paris. L'influence de ce produit dans la distance moyenne pondérée diminue par conséquent.

Quant au charbon de terre, les provenances majeures sont l'Afrique du Sud et l'Australie. Cet éloignement s'est effectué durant les années 1970-1980 dans un contexte particulier. En effet, cette période est marquée par un renouveau de la demande de charbon dû aux crises pétrolières alors que les filières européennes de production ont été condamnées. Le déclin en a été tel qu'elles n'ont pas été en mesure de faire face à cette nouvelle demande. Des pays comme l'Australie et l'Afrique du Sud ont de leur côté développé des filières beaucoup plus performantes (Angelier, 1981). L'automatisation des activités minières à ciel ouvert dans ces pays permet un rendement important qui demande ainsi moins de main-d'œuvre et est par conséquent plus économique. La situation de l'approvisionnement en charbon de terre de la région parisienne en 2006 est donc le résultat des crises pétrolières des années 1970.

En outre, la politique de promotion des énergies locales durant les années 1970 et au début des années 1980 entraîne une croissance de production de deux types d'énergie dans la région parisienne, la géothermie et l'énergie issue de l'incinération des déchets. On parlera du deuxième type d'énergie qui concerne uniquement et essentiellement Paris. Paris a déjà un réseau de chaleur très dense dans les années 1960, ce qui signifie l'existence d'une

infrastructure et par conséquent l'adoption d'une stratégie différente en termes de croissance de production et de consommation de cette énergie. Si les réseaux étaient déjà importants durant les années 1960, leur longueur totale croît de 172 km à 423 km dans Paris depuis la fin des années 1960. Par conséquent, la densité des réseaux augmente de 2,2 km/km² à 5,3 km/km² entre 1969 et aujourd'hui, avec une surface chauffée de 7150 hectares, soit 92 % du territoire parisien (bois de Vincennes et de Boulogne non compris). Le nombre d'abonnés a doublé entre 1969 et 1982, passant de 2 000 à 4 000, sachant que la population parisienne a diminué à cette période et que la plupart des abonnés sont des immeubles collectifs. La part de chaleur issue de l'incinération des déchets, qui était de l'ordre de 30 % durant les années 1960, s'élève à 50 % au début des années 1980. Durant les années 2000, la part des déchets se maintient à environ 50 % dans la chaleur distribuée par les réseaux de la CPCU. Puisqu'on considère cette énergie comme locale et primaire, la croissance de cette énergie dans Paris contrebalance légèrement l'augmentation de la distance moyenne due à l'éloignement des autres combustibles, tels que le gaz et le charbon de terre.

Modes de transport

Jusqu'aux années 1870, le transport par la voie fluviale est un moyen essentiel pour le transport des produits énergétiques pour Paris. Le système de flottage mis en œuvre au XVI^e siècle entraîne un besoin d'aménagement hydraulique pour assurer l'acheminement régulier du bois vers Paris et diminuer les pertes éventuelles. Au début du XIX^e siècle, l'existence de telles infrastructures permet d'importer un nouveau combustible, le charbon de terre qui provient des bassins houillers du sud de la France. Durant les années 1870, la coexistence de deux modes de transport, voie fluviale et chemin de fer, pour l'importation de produits énergétiques et le partage quasi égal entre ces modes sont expliqués par l'importance des infrastructures hydrauliques réalisées dans le bassin de la Seine ; dans les autres régions en France, la croissance de la consommation de charbon de terre se fait parallèlement au développement du chemin de fer durant la deuxième moitié du XIX^e siècle (Minard, 1858-1861).

La voie fluviale connaît un déclin dans le transport de charbon de terre dans les décennies suivantes, et ne concerne plus que 20% du charbon de terre en 1965. Toutefois, ces infrastructures sont utilisées pour le transport de pétrole durant la première moitié du XX^e siècle en combinaison avec le transport maritime. La part croissante du transport maritime en 1965 dans les modes de transport des produits énergétiques consommés à Paris – 67 % - montre la

part elle aussi croissante des produits étrangers, notamment le pétrole en 1965. En 2006, cette part croît légèrement en raison de la part croissante des importations pour quatre produits, le gaz naturel, l'uranium, le charbon de terre et le pétrole. En 2006, le transport par le pipeline concerne le gaz naturel importé de Mer du Nord et de Russie. Enfin, la part du transport routier croît entre 1965 et 2006, en raison de la croissance des produits pétroliers et du charbon de terre arrivant dans la région parisienne par la route, avec un mode initial de transport non identifié.

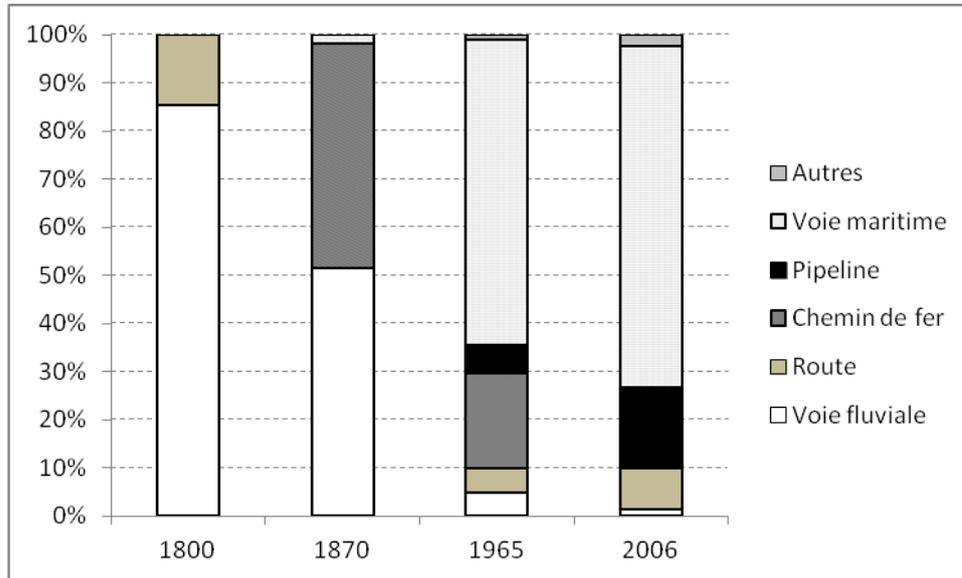


Figure 6.11. Mode de transport principal de produits énergétiques dans les années 1800, 1870, en 1965 et 2006, % du total des produits consommés dans Paris et dans la région Île-de-France. Source : dans le texte (« Autres » concerne l'électricité hydraulique transportée par les réseaux électriques.).

Secteurs de transformation

La consommation d'énergie secondaire augmente de façon progressive depuis le XIXe siècle, d'abord avec la croissance de la consommation de gaz manufacturé dans Paris, puis avec celle de la consommation d'électricité depuis la fin du XIXe siècle. Cette énergie demande des unités de transformation de matières premières et est distribuée par des réseaux souterrains ou aériens. L'amélioration de la performance des réseaux techniques et du rendement de production expliquent aussi cette part croissante de l'énergie secondaire, comme l'éloignement des usines de transformations qui quittent progressivement la ville et ses abords immédiats. Dans cette section, on essaie de comparer la Demande Énergétique Totale (DET), la Consommation

Energétique Totale Finale (CETF) et la Consommation Energétique Directe (CED). La différence entre la CETF et la DET représente la perte énergétique totale pour un type d'énergie secondaire, alors que la différence entre la CED et la CEFT représente uniquement la perte énergétique qui intervient dans le périmètre de la ville. On analyse et on compare ces indicateurs selon les dates choisies précédemment (section 6.1). On essaie ensuite d'observer la part d'apport énergétique à Paris d'un type d'énergie secondaire selon les territoires définis dans le chapitre 3 : Paris, la Petite Couronne (PC) et la Grande Couronne (GC). La consommation qu'on analyse est la consommation parisienne, tandis que la transformation est celle qui est effectuée dans les différents territoires qui contribuent à la consommation parisienne (de la ville de Paris) d'un type d'énergie secondaire (tableau suivant).

Tableau 6.12. Contribution de chaque territoire pour chaque type d'énergie secondaire dans la consommation parisienne de cette énergie dans les années 1870, durant les années 1960 et 1965 et en 2006, % (exceptionnellement le gaz inclut le gaz naturel, qui est du gaz importé)

| | | Paris | Petite Couronne | Grande couronne | Énergie secondaire totale produite dans la région Île-de-France pour la consommation parisienne | Importation |
|-------------|--------|-------|-----------------|-----------------|---|-------------|
| Années 1870 | Gaz | 90 | 10 | - | 100 | - |
| | Elec. | - | - | - | - | - |
| | Vapeur | - | - | - | - | - |
| | Total | 90 | 10 | - | 100 | - |
| 1965 | Gaz | - | 70 | - | 70 | 30 |
| | Elec. | - | 16 | 62 | 78 | 22 |
| | Vapeur | 72 | 28 | - | 100 | - |
| | Total | 19 | 35 | 28 | 82 | 18 |
| 2006 | Gaz | - | - | - | - | - |
| | Elec. | - | 2 | 8 | 10 | 90 |
| | Vapeur | 14 | 86 | - | 100 | - |
| | Total | 4 | 26 | 6 | 36 | 64 |

Source : cette thèse.

Durant les années 1870, l'énergie secondaire, réduite au gaz manufacturé, est majoritairement produite dans la ville. La proximité entre le secteur de transformation et les consommateurs est

expliquée par des facteurs technico-économiques. La perte dans les réseaux de gaz atteignait en effet environ 30 % lorsque l'industrie gazière s'est développée, ce qui nécessitait que les usines à gaz s'installent à proximité de la consommation. En parallèle avec la croissance du secteur entraînée par la croissance des abonnés et par l'extension des réseaux, les améliorations techniques permettent à ce secteur de s'éloigner peu à peu de la ville. La figure suivante traduit deux effets principaux : d'abord la fermeture progressive des usines à l'intérieur de la ville de Paris, puis, la réouverture et la croissance de la production d'énergie secondaire dans des usines situées à l'extérieur de la ville. Le renforcement du suivi et du contrôle sur les installations classées dans les dernières décennies du XIXe siècle défavorise par ailleurs le maintien d'un tel secteur industriel polluant à l'intérieur de Paris (Daumas, 1976, Bonnaud, 2007) (voir le chapitre 4).

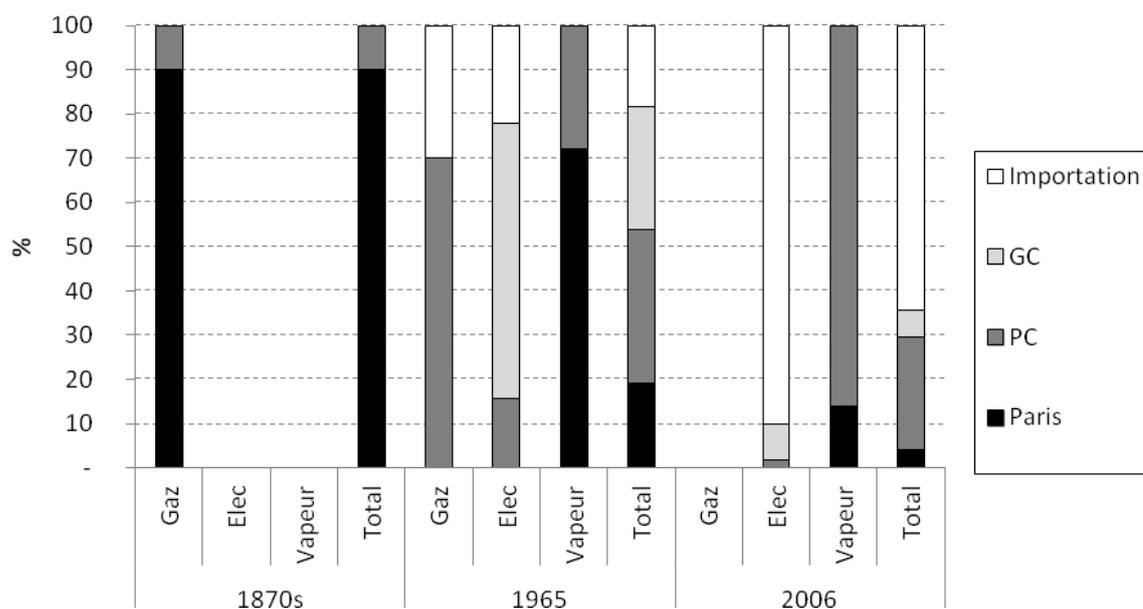


Figure 6.12. Contribution de chaque territoire pour chaque type d'énergie secondaire dans la consommation parisienne de cette énergie dans les années 1870, durant les années 1960 et 1965 et en 2006. Source : cette thèse.

Dans les années 1960 et 1965, la banlieue de la Seine produisait majoritairement le gaz manufacturé de la région parisienne. La plupart des usines à gaz sont installées entre la fin du XIXe siècle et le début du XXe siècle, ce qui correspond au moment où la banlieue du département de la Seine connaît une industrialisation lourde. Quant au secteur électrique, son

développement est plus conséquent après 1946 et donc les installations sont faites en dehors du département de la Seine, puisque cette période correspond à l'urbanisation de la banlieue. De ce fait, au cours de la période comprise entre 1946 et 1965, la Grande Couronne devient le lieu de développement du secteur énergétique, notamment électrique. La production de la vapeur contrebalance cependant cette tendance car elle est faite majoritairement dans la ville, notamment dans les arrondissements périphériques, comme le montrent les usines de Bercy, de Grenelle et du Kremlin-Bicêtre (voir le chapitre 4). De plus, la désindustrialisation de la ville favorise l'acquisition de terrains pour l'installation de chaufferies. En 1965, 70 % du gaz consommé par la ville de Paris est produit en petite couronne et le reste des 30 % est importé. Ce gaz néanmoins n'est plus du gaz manufacturé, mais du gaz naturel qui arrive de Lacq. Dans le cas du secteur électrique, 16 % de l'électricité est produite dans la petite couronne, alors que 62% est produite dans la Grande Couronne, les 22 % restants étant importés. Dans le cas du secteur de la vapeur, cette période étant marquée par l'essor du secteur et par la construction de chaufferies au fioul dans la ville, 72 % de la vapeur est produite à l'intérieur de la ville alors que la production de la petite couronne reste modeste avec 28 %.

Pour 2006, le secteur du gaz manufacturé est éteint dans la région ainsi qu'en France. Dans le cas du secteur électrique, la consommation régionale augmente, et la production diminue au profit de l'importation électrique. Par conséquent, la part de la production régionale devient marginale avec 10 % d'électricité produite dans la région, en particulier dans la Grande Couronne. Quant au secteur de la vapeur, la production à l'intérieur de la ville de Paris, qui se faisait majoritairement par des chaufferies au fioul, diminue de façon considérable après la crise pétrolière. Cette fermeture de chaufferies au fioul, associée à l'ouverture de chaufferies au charbon dans la petite couronne (Saint-Ouen notamment qui accueille la plus grande chaufferie de production de vapeur de la CPCU), entraîne une production élevée de vapeur dans le territoire de la petite couronne comme le montre le tableau ci-dessus.

Dans la logique d'une installation, se posent plusieurs questions d'ordre économique et environnemental. D'abord, l'industrie énergétique a toujours des difficultés à s'installer en milieu urbain, notamment à proximité de l'habitat. Cette industrie nécessite de s'approvisionner en matières premières qui demandent une surface importante pour la décharge, le stockage, ainsi que des servitudes imposées par l'autorité publique. Ces secteurs nécessitent d'évacuer des rejets sous diverses formes, solide, liquide ou gazeux, et créent certains conflits d'usage avec d'autres secteurs tels que le secteur résidentiel et tertiaire. La comparaison entre les

consommations énergétique finale et directe de Paris contribue à caractériser le métabolisme de Paris qui consomme l'énergie majoritairement sous forme de produits secondaire. De ce fait, les consommations énergétique finale et directe sont assez proches sur toutes les années d'observation (figure suivante 6.13). Ce n'est pas étonnant au vu du tissu urbain de Paris qui est principalement constitué par les secteurs résidentiel et tertiaire et est très dense par rapport à la banlieue. Le cas exceptionnel est le résultat de l'année 1880, puisque l'écart entre les consommations énergétiques finale et directe est plus important que pour les autres années d'observation. Paris, après l'extension spatiale de 1860, a en effet inclus presque toutes les usines à gaz de l'agglomération, qui s'éloigneront à la période suivante pour s'installer en banlieue de la Seine. La deuxième exception est l'année 1965. L'écart entre les consommations énergétiques finale et directe de Paris devient important grâce à l'essor de la consommation de vapeur qui fait croître la consommation de combustibles et multiplier les chaufferies de la CPCU à l'intérieur de Paris durant les années 1960. Vue sa densité énergétique très élevée (voir la section 5.6), accueillir les industries énergétiques gourmande en matière première était probablement impossible à l'intérieur de Paris. Pourtant, la réappropriation de l'espace de Paris par l'industrie gazière observée en 1880 et par celle de la vapeur en 1965 montre que l'installation industrielle et l'essor de la consommation de la ville vont de pair durant certaines périodes.

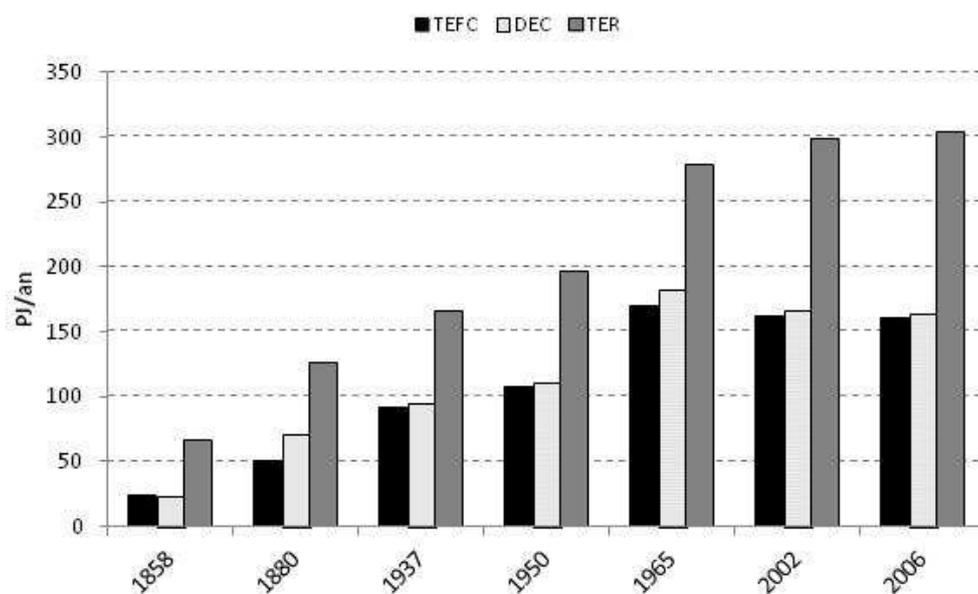


Figure 6.13. Comparaison entre CEFT, CED, DET de la ville de Paris entre 1858 et 2006 en PJ/an.

Source : cette thèse.

6.6. Conclusion

Durant le XIX^e siècle, la croissance de la consommation énergétique et le développement du secteur énergétique secondaire à Paris a d'importantes conséquences spatiales. L'usage de l'énergie issue de la biomasse forestière implique des surfaces considérables dans le bassin de la Seine. Lorsque la consommation parisienne diminue de 1 200 kg à 500 kg durant le XIX^e siècle, cette diminution signifie directement celle de la coupe annuelle du bois destiné à Paris. En revanche, pour les sources énergétiques issues de combustibles fossiles, tels que le charbon de terre et le pétrole, la surface directe occupée pour l'extraction a peu de signification en termes d'impact environnemental apparent. Toutefois, durant le XIX^e siècle, l'aménagement d'infrastructures de transport pour l'approvisionnement en combustibles fossiles pour Paris est important dans le bassin de la Seine. Ces infrastructures permettent à la ville d'accéder à des ressources lointaines et marquent durablement le paysage. Le changement du contexte d'approvisionnement en énergie de Paris entraîne aussi l'évolution dans la responsabilité de la ville en termes d'approvisionnement. Alors que l'approvisionnement en énergie était de son ressort jusqu'au début du XIX^e siècle, cette responsabilité disparaît peu à peu durant la première moitié du XIX^e siècle, tandis que l'approvisionnement du marché parisien devient fluide. Deux phénomènes sont alors constatés. D'une part, la consommation par habitant tend à croître (voir le chapitre 5), d'autre part les produits étrangers arrivent dans le marché intérieur de la ville.

Depuis les années 1920, la croissance de consommation de produits pétroliers à Paris entraîne une augmentation conséquente de la distance moyenne d'approvisionnement. Après les années 1970 et les crises pétrolières, on constate deux tendances divergentes. D'une part, la distance moyenne des produits énergétiques fossiles et fissiles s'élève de façon remarquable, en raison d'une part de l'épuisement des ressources nationales, et d'autre part de la difficulté de maintenir des activités extractives du fait des coûts économiques relativement élevés ; ceci concerne notamment le charbon de terre et la matière fissile. Dans le contexte d'approvisionnement très dépendant de combustibles fossiles et fissiles de la ville de Paris, ce changement de contexte d'approvisionnement à l'échelle nationale entraîne un éloignement des sources énergétique. Ainsi, la dépendance des produits étrangers rend l'organisation de l'approvisionnement de Paris peu différente de celle de la France. En revanche, la politique favorisant le réseau de chaleur dans la région parisienne après les chocs pétroliers contrebalance légèrement la distance très éloignée des combustibles fossiles et fissiles, puisque cette énergie augmente de façon

significative dans la consommation énergétique finale et la demande énergétique totale de la ville depuis les années 1980.

Quant au secteur de l'énergie secondaire, la ville possède de moins en moins d'usines depuis la fin du XIXe siècle. Cette tendance ne concerne évidemment pas que le secteur énergétique mais l'ensemble des industries polluantes et encombrantes. En revanche, la consommation de la ville de Paris en gaz et en électricité étant importante et la production d'énergie secondaire étant encore régionale, la banlieue du département de la Seine accueille la plupart des industries lourdes dont le secteur énergétique fait partie entre la fin du XIXe siècle et le début des années 1970. La tendance en 2006, en comparaison à 1965, montre la diminution de la taille du secteur énergétique dans la région Île-de-France, notamment due à la disparition du secteur gazier durant les années 1960 et ensuite à la fermeture des usines électriques durant les années 1970. Dans le cas du secteur de production de vapeur, la production dans la petite couronne devient importante. Cette tendance est en réalité déterminée par l'évolution du secteur durant les années 1980 et 1990, lorsque la CPCU se tourne vers le charbon (à l'exception des centrales de la société TIRU), dans de nouvelles chaufferies installées en dehors de la ville de Paris. En conséquence de cette tendance après 1980, dans le cas de l'électricité, le produit importé de l'extérieur de la région représente une part essentielle de l'électricité consommée par la ville de Paris. Dans le cas de la vapeur, la vapeur produite dans la petite couronne représente une part essentielle dans la vapeur consommée à Paris.

Conclusion générale

Dans le cadre de cette thèse, nous avons observé le processus de la transition énergétique dans le cas de Paris. Pour comprendre la ville et la société urbaine en termes matériels et écologiques, nous avons d'abord conceptualisé la ville comme tributaire des milieux extérieurs pour son ravitaillement en ressources. De fait, l'externalisation du métabolisme est considérée comme un caractère fondamental de la consommation urbaine. La ville engendre par conséquent un impact environnemental à l'extérieur de son territoire, quels que soient le niveau de sa consommation et la taille de son bassin d'approvisionnement en ressource.

Comme observé à travers le cas de Paris, les ressources naturelles étant externes à la ville, l'approvisionnement en énergie, essentiel pour sa subsistance, demande une mobilisation technique considérable pour extraire, transporter, stocker et transformer les sources énergétiques. La ville dépend par conséquent tant des milieux extérieurs approvisionnant directement en ressource que des infrastructures et des superstructures intra-urbaines et extra-urbaines, dont les impacts spatiaux et environnementaux s'étendent à l'extérieur de la ville comme à l'intérieur de celle-ci, de façon directe et indirecte.

À Paris, l'extension spatiale du bassin d'approvisionnement marque chaque transition énergétique. L'amélioration de l'efficacité du système d'approvisionnement et l'éloignement de la ressource ne sont pas réalisés simultanément, mais avec une temporalité différente ; la transition énergétique entre le bois et le charbon de terre s'amorce au début du XIX^e siècle, tandis que l'extension du bassin est réalisée après 1870 ; de même, le gaz naturel et l'uranium étaient des ressources nationales extraites à quelques centaines de kilomètres de Paris dans les années 1960, alors qu'ils proviennent de quelques milliers de kilomètres de la ville à la période suivante. Enfin, Paris recourt à des ressources provenant de milieux de plus en plus lointains après chaque transition énergétique. Dans ce processus d'éloignement, la croissance de la consommation énergétique de la ville joue un rôle crucial. Cette croissance ne concernant pas uniquement Paris, l'éloignement des ressources pendant les XIX^e et XX^e siècles concerne toutes les villes françaises. En particulier, le recours massif aux énergies fossiles (le pétrole notamment) et fissiles de façon quasi exclusive durant le dernier demi-siècle est une cause majeure de la croissance de la distance d'approvisionnement énergétique.

Quelques éléments sont particulièrement marquants dans le mécanisme de croissance de la consommation d'énergie fossile et fissile de l'agglomération parisienne. Pendant la période 1801-1920, la croissance de la population urbaine était une cause majeure de la croissance de la consommation énergétique. Pendant la période suivante, en particulier après la Seconde Guerre mondiale, la croissance de la consommation énergétique est entraînée simultanément par la croissance de la population urbaine, par l'élévation du niveau de vie, grâce à la diffusion des systèmes techniques par réseau, et par la naissance de nouveaux usages énergétiques, associés à des nouveaux modes d'habiter et de travailler, tels que la consommation des carburants pour le transport et l'électricité spécifique.

Ces phénomènes – de la croissance de la consommation et de l'éloignement des ressources – depuis le milieu du XXe siècle sont réalisés par la conjonction de divers facteurs dont deux méritent d'être distingués : 1) la planification économique et territoriale qui se fonde sur l'effet positif d'externalité économique des grandes infrastructures et des superstructures de transport et d'approvisionnement en énergie en faveur des secteurs de l'industrie et de la construction, 2) les enjeux territoriaux qui sont plus complexes et divers selon différentes échelles territoriales, qui concernent la gestion de l'espace, l'identification des rôles et des responsabilités des acteurs des différents échelons territoriaux.

A l'intérieur de la ville, il s'agit de la gestion d'espace dans un contexte de densité humaine et matérielle accrue, problème essentiel de la ville, qui devient de plus en plus problématique (ou aiguë) parallèlement à la croissance de la population et de la consommation urbaine. La tendance à la dématérialisation énergétique grâce à l'utilisation d'un combustible ou d'une énergie à haute densité énergétique montre que l'économie d'espace est un facteur important du choix énergétique. En particulier, la densité matérielle d'une activité industrielle et la densité humaine d'une zone d'habitat créent un confit d'usage du sol et influencent mutuellement la localisation de chaque espace fonctionnel.

A l'échelle nationale, le passage à la gestion par les grands réseaux d'approvisionnement en énergie est important dans le processus de la transition vers la société industrielle moderne comme le montrent le cas historique de Paris et le cas actuel des pays en voie de développement. Il ne s'agit pas que d'obtenir l'efficacité en termes matériels et énergétiques. La régulation de l'approvisionnement est un enjeu majeur de la société contemporaine ; le

raccordement au réseau signifie être *branché* au confort moderne et renvoie à la notion de la qualité de vie (Coutard, 1999) et fait partie des objectifs des politiques publiques (APUR, 1980). En termes techniques, la régulation du temps et du débit de matières et d'énergie est l'un des enjeux majeurs des réseaux d'approvisionnement, ainsi que l'amélioration de la résilience des systèmes en cas d'incidents liés à la fluctuation du prix de l'énergie par le moyen de la diversification des sources énergétiques (notamment comme le montre le secteur électrique) et celle des provenances d'approvisionnement (comme le montre l'approvisionnement en pétrole après les chocs pétroliers des années 1970).

Un autre facteur important concerne l'identification de la responsabilité des acteurs en termes de gestion des ressources. La multiplication des systèmes techniques énergétiques entraîne la complexification de la gestion et la spécialisation des secteurs, pour l'extraction, le transport, la transformation, la distribution, formant ensemble un grand système d'approvisionnement dont de nombreuses villes dépendent. L'échelle du système énergétique est souvent bien supérieure à celle d'une agglomération urbaine (à l'exception du réseau de chaleur). Dans le cas de Paris au début du XIXe siècle, la réorganisation de l'approvisionnement suite au changement de combustible en faveur du charbon de terre libère la ville de sa responsabilité lourde en matière de gestion directe des milieux extérieurs subissant la conséquence de son approvisionnement, ainsi que des conflits politiques et sociaux qui y sont liés. D'un autre côté, le développement de l'énergie secondaire entraîne une autre responsabilité qui devient de plus en plus importante pour la gestion des systèmes techniques énergétiques à l'intérieur de l'agglomération. Jusqu'à il y a quelques décennies, l'articulation est maintenue entre le système d'approvisionnement en source énergétique en amont à l'échelle nationale et le système de transformation régionale.

Dans les années 1960 et 1970, la question de la rareté de la ressource énergétique interpelle la communauté scientifique et à la société civile. En France, dans le contexte de la hausse du prix pétrolier au cours des années 70 et 80, de nombreuses initiatives ont été lancées pour l'économie d'énergie et pour la promotion d'énergies renouvelables (voir Chaline, 1985, Chaline, Dubois-Maury, 1983, CR IDF, 1984), d'une part par l'initiative de l'État encourageant les collectivités à établir leur propre politique énergétique locale, et d'autre part au sein des collectivités elles-mêmes face au réel problème de l'augmentation du budget municipal dû au coût du pétrole très élevé¹.

¹ Quelques collectivités ont eu un succès considérable, notamment Lorient et l'Ile de France pour la géothermie.

Ces initiatives n'ont pas été poursuivies dans les décennies suivantes probablement pour deux raisons principales. Dans un premier temps, c'est la disparition de la rareté de la ressource par l'extension du système technique qui supprime la nécessité de l'économie d'énergie. Dans les années 1970 et 1980, à côté de ces initiatives en matière d'économie d'énergie, la politique énergétique nationale vise à l'indépendance énergétique et à la promotion d'une source énergétique alternative au pétrole, ce qui a résulté dans l'investissement massif dans les filières nucléaires (Cour des Comptes, 2012). Quant aux filières d'extraction du charbon et du pétrole, pour lesquelles la France dépend de l'extérieur en termes d'approvisionnement, elles connaissent un renouvellement important en termes techniques ; la filière du charbon se tourne vers une extraction industrialisée à haut rendement et vers une spécialisation géographique (notamment en Afrique du Sud, en Australie) ; l'extraction du pétrole en eaux profondes est promue dans le cadre de la politique énergétique européenne.

La deuxième raison est l'échec du *transfert des compétences* en matière de gestion énergétique vers les collectivités territoriales, confirmée dans le cadre de la loi du 2 mars 1982 (dite loi sur la décentralisation) (voir Poupeau, 2009, Chaline, 1985). Cet échec est en effet marqué par plusieurs problèmes fondamentaux : 1) le système de production et de distribution très centralisé en France, comme dans le cas de l'électricité, 2) la position de l'État qui promeut d'une part des politiques énergétiques locales et reconnaît d'autre part l'autonomie de la stratégie de la gestion des grandes entreprises énergétiques nationales, 3) le manque de ressources techniques et d'expertises au sein des collectivités pour mener une gestion territorialisée de l'énergie, 4) le partage de la compétence en matière de gestion d'un type d'énergie entre plusieurs collectivités qui demande une cohérence et une articulation entre les différentes échelles territoriales et des entreprises.

Dans les deux dernières décennies, la croissance de la consommation d'énergie fossile et celle de la consommation énergétique urbaine sont remises en question, ainsi que la politique énergétique territorialisée visant l'économie d'énergie, la lutte contre le réchauffement climatique et la promotion des énergies renouvelables. En revanche, l'évolution de l'approvisionnement depuis le début du XIXe siècle engendre une difficulté majeure. Elle supprime l'avantage de proximité des ressources locales dans la mesure où la source énergétique fossile et fissile lointaine en termes de distance physique est devenue une ressource plus *proche* pour la ville en termes de prix et d'accessibilité grâce à sa capacité technique. La

ressource locale d'énergie renouvelable fait l'objet de l'attention publique et des habitants dans une vision prospective, notamment en vue d'une plus grande indépendance énergétique et des enjeux écologiques contemporains. Néanmoins, la mise en place des systèmes énergétiques renouvelables dans le système technique énergétique et territorial actuel est encore difficile et crée des controverses.

.....

Plusieurs questions et réflexions émergent pour le prolongement de ce travail. D'abord, la question des incertitudes des résultats en lien avec la méthode adoptée reste à explorer. Du fait d'agréger plusieurs produits énergétiques en un certain nombre de groupes de produits et de ne pas connaître parfaitement l'état des combustibles, le résultat en termes de consommation énergétique peut inclure certaines surestimations et sous-estimations. Le pouvoir calorifique du bois de feu en particulier dépend fortement de son contenu en eau. Les mauvaises conditions de stockage peuvent augmenter le contenu en eau et par conséquent baisser le pouvoir calorifique supérieur et inférieur. Il est possible qu'il y ait eu une amélioration des conditions de stockage durant les deux derniers siècles. De plus, l'amélioration peut se réaliser dans le mélange de sous produits qui peuvent éventuellement augmenter le pouvoir calorifique des combustibles ; c'est le cas en particulier du charbon de terre. Le charbon de terre, comme évoqué dans le chapitre 4, inclut divers sous produits dont le pouvoir calorifique supérieur diffère et se situe entre 17 GJ/t et 30 GJ/t. Il serait souhaitable de déterminer l'évolution de la qualité des produits de charbon de terre en fonction de la provenance des produits consommés connus par notre étude (dans le chapitre 6) en comparant les données de production minière de chaque grand bassin. Par ailleurs, la demande énergétique totale et la demande totale de matière incluent par principe la perte à l'extraction qu'on n'a pas pu évaluer du fait de la période d'analyse longue et de la difficulté de connaître la perte à l'activité minière de la France. Par ailleurs, la consommation du coke éventuellement effectuée par la sidérurgie qui est non estimée pour Paris entraîne une sous-estimation de la demande énergétique de Paris. La consommation des matières premières des secteurs de transformation qui est estimée par l'interpolation des valeurs connues toutes les 3 ou 4 ans peut entraîner une sous-estimation et sur estimation pour la période lacunaire, en particulier pour la période de fluctuation du prix des combustibles dans les années 1970 et 1980. Une meilleure estimation annuelle serait possible en prenant en compte les prix des combustibles pour estimer les variations annuelles de la consommation.

Le facteur spatial et territorial est primordial dans les questions de l'écologie et de l'économie écologique. Dans la perspective d'une transition énergétique et de l'utilisation de ressources renouvelables, comprendre et décrypter la complexité des enjeux territoriaux dans la mise en œuvre de systèmes énergétiques est sans doute un objet prioritaire de recherche. Ces enjeux sont à étudier dans la durée. Les objets de recherche sont à puiser dans des cas actuels comme dans des expériences passées. Le système énergétique renouvelable traditionnel, possédant une configuration diffuse, mais situé à proximité du consommateur urbain, pouvait se développer dans des conditions spécifiques du territoire et dans le contexte économique politique particulier de l'Ancien Régime puis de la première moitié du XIXe siècle. Dans l'agglomération parisienne, la montée en puissance des systèmes énergétiques techniques de transformation du combustible fossile aurait entraîné le déclin du secteur de la production des énergies renouvelables traditionnelles, arrivé très probablement durant la deuxième moitié du XIXe siècle, suite à l'industrialisation de l'agglomération et au développement du chemin de fer¹, qui méritent une étude plus approfondie – on pense par exemple à mobiliser l'inventaire historique de la géographie des moulins au XIXe siècle.

La deuxième réflexion concerne la bioénergie qui attire une attention de plus en plus importante aujourd'hui. Cependant, l'utilisation de cette énergie demande des précautions pour trois raisons principales liées au système actuel de production, à sa propriété biologique et à la question de l'équité ; 1) la production de cette énergie demande une énergie externe, souvent issue de l'énergie fossile consommée dans toutes les chaînes d'approvisionnement ; 2) elle connaît une demande importante en diverses ressources en eau, en azote et en surface agricole dont les impacts écologiques sont ainsi divers² ; 3) l'utilisation en amont de la biomasse est encore controversée pour la production des grains céréales et oléagineux à usage de carburant automobile et de carburéacteur, compte tenu du fait qu'elle entraîne la déforestation (dans le cas de certains pays étrangers) et qu'elle accentue la concurrence avec la production à usage alimentaire. Seule l'utilisation en aval des déchets de la biomasse se justifie plus facilement, puisque c'est une récupération de matière et d'énergie une fois *perdue*. L'efficacité d'utilisation de la biomasse dans la société préindustrielle est probablement assurée de multiples façons entre l'usage alimentaire, l'usage de fourrage (pour la production de la force motrice ou pour la

¹ La comparaison est très intéressante entre les enquêtes de moulins à farine en 1801, 1809 et 1851 (AN F293, F296, F633), dont la dernière peut être complétée par l'enquête industrielle. Voir également Centre Historique des Archives Nationales, 1998.

² L'évaluation de ces impacts en aval par les jeux d'empreintes environnementales au sens surfacique, d'azote, d'eau réalisée par Petros Chatzimpiros est intéressante de ce point de vue.

production de protéines), l'utilisation de matière et des matériaux à usages divers, en assurant l'usage économe de la surface agricole et la gestion des intrants. Son rendement n'est donc pas comparable au rendement énergétique des énergies fossiles. Par ailleurs, le rendement énergétique (le ratio sortie / entrée (EROI)) de la production agricole tendant à diminuer de par l'augmentation des intrants et de la consommation énergétique fossile, l'énergie grise investie dans l'agroécosystème est une question importante dans l'écologie. Cette question est traitée dans une démarche de l'Analyse du cycle de vie (ACV) (d'un produit) ou de l'analyse énergétique de l'agroécosystème (Risoud, 2000) (sur une unité de production agricole en hectare). Cependant, l'impact de l'éloignement entre la ville et la ressource en biomasse sur l'efficacité énergétique du système d'approvisionnement reste à explorer. Cette question qui n'a pas été traitée dans la thèse peut l'être dans un prolongement de travail.

Sources et bibliographie

- ADEME, 2001, *Mesure des caractéristiques des combustibles bois*, ADEME, Critt Bois-Fibois-CTBA, juil. 34 p.
- ADEME. 2005. *La géothermie en Île-de-France : la chaleur de la terre*. ADME Île-de-France. 27 p.
- AGRESTE. 2007a. Bilans d'approvisionnement. [en ligne] [08/06/2010] Disponible sur la toile : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/publications/chiffres-et-donnees/article/bilans-d-approvisionnement-5443>.
- AGRESTE. 2007b. *Mémento 2007 : Les chiffres clés de l'agriculture et du monde rural*, AGRESTE Île-de-France. 20 p.
- AGRESTE. 2007c. *Matières premières utilisées pour la fabrication d'aliments composés*. [en ligne] [réf. du 29 juin 2011] Disponible sur la toile : www.Agreste.fr
- AGRESTE. 2008a. *Les cultures énergétiques en Île-de-France en 2007*. Agreste Île-de-France 91, avril. 2 p.
- AGRESTE. 2008b. *Mémento de statistique agricole*. Edition 2009. AGRESTE Île-de-France, Déc. 11 p.
- AGRESTE. 2009a. *Chiffres et données. Série Agriculture 207*. Juin. Annexe. p. 47-61. [en ligne] [réf. du 24 mars 2010]. Disponible sur la toile : www.agreste.fr
- AGRESTE. 2009b. *Méthodologie Production des IAA en 2008 Enquêtes de branches*. 2 p. [en ligne] [réf. du 18 avril 2012] Disponible sur la toile : <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/industries-agroalimentaires-529/statistiques-prodcom-et-enquete-de/>
- AGRESTE. *Données en ligne* [en ligne] [réf. du 08 juin 2010] Disponible sur la toile : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/page-d-accueil/article/donnees-en-ligne>
- AJTAY, L., KETNER, P., DUVIGNEAUD, P. [s. d.] SCOPE 13 - *The Global Carbon Cycle. 5 Terrestrial Primary Production and Phytomass*. [en ligne] [réf. du 13 déc. 2011] Disponible sur la toile : <http://www.scopenvironment.org/downloadpubs/scope13/chapter05.html>.
- ALEKLETT, K., JOHANSSON, K., LILJEQUIST, K., OHLANDER, L. 2010. "Agriculture as Provider of Both Food and Fuel". *Ambio* 39, p. 91-99
- AN. F20 Art. 293. *Enquête sur les moulins à farine de 1801*.
- AN. F20 Art. 296. *Enquête sur les moulins à farine de 1809*.
- AN. F20 Art. 633. *Enquête sur les moulins à céréale de 1851*.
- ANGELIER, J.-P. 1981. "Le charbon, industrie nouvelle", *Revue d'économie industrielle* 16 (16), P. 1-15
- Annuaire Statistique de la Ville de Paris (ASVP). 1880.
- APUR. 1980. "Schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme de la ville de Paris", *Paris Projet*, 19-20. p. 199.

- APUR. 2006. *Les réseaux de chaleur à Paris et en petite couronne*. Paris, APUR, nov., 18 p.
- ARCHIVE EN LIGNE DE L'UNION EUROPEENNE. [en ligne] [réf. du 3 déc. 2011]. Disponible sur la toile : <http://www.ena.lu/>
- ARCHIVES DE LA PREFECTURE DE POLICE, DA 43.
- AREVA. 2004. *Rapport annuel 2004*. 372 p.
- AREVA. 2004. *Rapport annuel 2004*. 372 p.
- Annuaire Statistique de la Ville de Paris (ASVP). 1880.
- AYRES, R. U, AYRES, L. W. (eds.) 2002. *handbook of industrial ecology*. Massachusetts, Edward Elgar Publishing, 680 p.: p. 73-75.
- AYRES, R. U., AYRES, L. W. 1996. *Industrial Ecology: Towards Closing the Materials Cycle*. London, Edward Elgar Publishers.
- AYRES, R. U. , SIMONIS, U. K. (eds.) 1994. *Industrial Metabolism: restructuring for Sustainable Development*. Tokyo, New York, Paris, United Nations Press. 390 P. [en ligne] [réf. du 6 mars 2010]. Disponible sur la toile : <http://archive.unu.edu/unupress/unupbooks/80841e/80841E00.htm>
- AYRES, R. U., SIMONIS, U. K. (eds.). 1994. *Industrial Metabolism*. Tokyo, United Nations University Press. 390 p.
- BACCINI, P. 1996. "Understanding Regional Metabolism for a Sustainable Development of Urban Systems", *Environ. Sci. & Pollut. Res.*, 3 (2), p. 108-111.
- BACCINI, P. 1997. "A city's metabolism: towards the sustainable development of urban systems", *Journal of Urban Technology*, 4 2, p. 27-39.
- BACCINI, P., BRUNNER, P. H. 1991. *Metabolism of the anthroposphere*. Springer-Verlag. 157 p.
- BACKOUCHE, I. 2000. *La trace du fleuve. La Seine et Paris (1750-1850)*. Paris, Éditions de l'EHESS. 431 p.
- BADRE, L. 1978. *Les remous du commerce du bois dans la région parisienne au milieu du XIXe siècle*. p. 163-170. in : Actes du deuxième colloque de la Fédération des Sociétés historiques et archéologiques de Paris et Île-de-France, *La forêt en Île-de-France et les utilisations du bois*. tome 28, Paris, p. 163-170. ;
- BARJOT, D., VUILLERMOT, C., WILLIOT, J.-P. 1991. *L'énergie aux XIXe et XXe siècles*. Paris, Presses de l'École normale supérieure. 415 p.
- BARLES, S. 2004. "Regards d'écologues et de géochimistes sur la ville et la société industrielle, 1953-2003", in : BARLES, J. P. TRAISNEL, *Ville et durabilité : Questions pour la recherche, questions à la recherche*, rapport de recherche pour le compte du ministère de la Recherche (ACI Ville), Champs-sur-Marne, LTMU (UMR CNRS AUS 7136), juin.
- BARLES, S. 2005. *L'invention des déchets urbains : France, 1790-1970*. Seyssel, Champ Vallon (coll. « Milieux »). 300 p.

- BARLES, S. 2006, "Parcs et trafics routiers en France, 1870-1970 : Caractérisation et principaux enjeux environnementaux", vol. 1, p. 311-318, in : JOUMARD, R. (ed.). *Environnement et transports - Transport et pollution de l'air / Environment and transport – Transport and Air Pollution*. Actes de la 2e conférence, Reims, 12-14 juin 2006. Arcueil : INRETS (« Actes INRETS », n° 107)
- BARLES, S. 2007. "Feeding the city: Food consumption and flow of nitrogen, Paris, 1801–1914", *Science of the Total Environment* 375, p. 48–58.
- BARLES, S. 2009a. « Urban Metabolism of Paris and its Region », *Journal of Industrial Ecology* 13(6), p. 898-913.
- BARLES, S. 2009b. "Wood crisis and urban supply: Paris, 18th-19th centuries", Paper prepared for the international colloquium *Cities and energy transitions: past, present, future*, organised by LATTIS (CNRS). Autun, 1-4 juin.
- 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), June, p. 439-455.
- BARLES, S. *et al.* *Ville et fonctionnement du bassin de la Seine : matériaux de construction, sol, énergie, alimentation. Contribution à une écologie territoriale*, in : Programme PIREN-Seine : Ville et fonctionnement du bassin de la Seine. PIREN-Seine. Phase V – Rapport de synthèse 2007-2010.
- BARLES, S. *Nourrir la ville : Consommation alimentaire et circulation de l'azote, Paris, 1801-1914.* [en ligne] [réf. du 11 mars 2012]. Disponible sur la toile : http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/webfm_send/246
- BARLES, S. TRAISNEL J. P. (eds.) 2004. *Ville et durabilité : Questions pour la recherche, questions à la recherche*, rapport de recherche pour le compte du ministère de la Recherche (ACI Ville), Champs-sur-Marne, LTMU (UMR CNRS AUS 7136), juin.
- BARRUE, M., RODRIGUEZ, J.F. 1997. "Temps et contretemps des pratiques de l'environnement et des représentations paysagères de la haute-montagne Pyrénéenne", in : Acte de colloque Journées PIREVS – *Les temps de l'environnement*. Toulouse 5/6/7 nov. 1997.
- BATISSE, M. 1969. "can we keep our planet habitable ?", *UNESCO Courrier* 22, Jan., p. 4-5
- BEAUCIRE, F., 1985. Enquête sur la notion et les pratiques de l'écologie urbaine en France. Research report. Paris: CNRS.
- BEAUCIRE, F., SAINT-GERAND, T. 2001. "Les déplacements quotidiens, facteurs de différenciation sociospatiale? La réponse du périurbain en Île-de-France", *Géocarrefour*, 76 (4), p. 339-347.
- BEAUJEU-GARNIER, J., BASTIE, J. 1967. *Atlas de Paris et de la région parisienne*. Paris, Edition Berger-Levrault. 963 p.
- BELEZE, G. 1882. *Dictionnaire universel de la vie pratique à la ville et à la campagne*. 6e édition. Paris, Librairie de L. Hachette et de Cie, 1869 + 59 p.
- BELTRAN, A. 1992. "Gaz de France et le secteur gazier depuis 1940", *Flux* 8 (8), p. 29-38.

- BELTRAN, A. 1995. *L'énergie électrique dans la région parisienne entre 1878 et 1946 : Production, distribution et consommation d'électricité dans le département de la Seine*. Thèse doctorat. Sous la direction de F. Caron. Université Paris IV-Sorbonne
- BELTRAN, A. 2002. *La ville-lumière et la fée électricité: service public et entreprises privées : l'énergie électrique dans région parisienne*. Paris, Rivedroite. 786 p.
- BENOISTON DE CHATEAUNEUF, L.-F. 1821. *Recherches sur les consommations en tout genre de la ville de Paris en 1817 comparées avec ce qu'elles étaient en 1789*. Paris, Martinet. 168 p.
- BENOIT, P., BERTHIER K., BOËT P., REZE C. 2003. Les aménagements hydrauliques liés au flottage du bois, leur impact sur le milieu fluvial XVIe-XVIIIe siècles », in: *Piren Seine, rapport d'activité 2002*. [en ligne] [réf. du 20 May 2009]. Disponible sur la toile : <http://www.sisyphes.upmc.fr/piren/book/713>.
- BERGER, A. S. 1978. *The city: urban communities and their problems*. Dubuque, Brown. 511 p.
- BERNARD, P. 1953, *Économie et sociologie de la Seine-et-Marne, 1850-1950*. Cahiers de la Fondation Nationale des Sciences Politiques - n° 43. 300 p.
- BESNARD, H. 1942. *L'industrie du gaz à Paris depuis ses origines*. Paris, Ed. Domat-Montchrétien. 216 p.
- BIENAYME, G. 1887. *Histoire des droits d'entrée & d'octroi à Paris*. Paris, Paul Dupont. 148 p.
- BILLEN, G., BARLES, S., GARNIER, J. et al. 2009. "The food-print of Paris: long-term reconstruction of the nitrogen flows imported into the city from its rural hinterland", *Regional Environmental Change* 9, p.13–24.
- BLOCK, D. 2003. "Making the country work for the city : Von Thünen's ideas in Geography, Agricultural economics and the sociology of Agriculture", *American Journal of Economics and Sociology* 60 (1), p. 79-98.
- BOISSIERE, J. 1990. "La consommation parisienne de bois et les sidérurgies périphériques : essai de mise en parallèle (milieu XVe-milieu XIXe siècle.) ", in : WORONOFF, D. (dir.). 1990. *Forges et Forêts*. Paris, Ed. de l'École des Hautes Études en Sciences sociales. 263 p.
- BOLINDER, M.A., ANGER, D.A., DUBUC, J.P. 1996. "Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soils for cereal crops", *Agriculture, Ecosystems and Environment* 63, p. 61-66.
- BONNAUD, L. 2007. "Histoire des inspecteurs des installations classées (1810-2006)", *Les annales des mines. Responsabilité & environnement* 46, Avril. N.p.
- BONNET, A. 1872. *Manuel de l'employé de l'octroi. 2ème édition*. Paris. Paris, Bonnet, A. (libraire). N.p.
- BONNET, A. 1874. *Annales des octrois, complément du 'Manuel de l'employé de l'octroi*. Tome premier. Paris, Librairie Bonnet, A. N. p.
- BOURGEY, A. 1971. "Le pétrole et ses incidences géographiques dans le Moyen-Orient arabe", *Revue de géographie de Lyon* 46 (3), p. 233-284.

- BOUSQUET, M. 1918. "Le chauffage des bâtiments par centrale urbaine", *La Nature*, p. 22.
- BOYD, C. E. 1982. *Water quality management for pond fish culture*. Elsevier Scientific Pub. Co. 318 p.
- BOYDEN, S., CELECIA, J. 1981. « L'écologie des mégalo-poles », *Le Courrier de l'Unesco : L'homme et la biosphère*. Avril. p 24-27.
- BOYDEN, S., NEWCOMBE, K., MILLAR, S. et al. 1981. *The ecology of a city and its people: The case of Hong Kong*. Canberra, Australian National University Press. 437 p.
- BRGM. 2003. *L'énergie du sous-sol : la géothermie en Île-de-France*, *Bulletin 4*, 6 p.
- BRGM. *Sigminesfrance*. [réf. du 15 avril 2012]. Format PDF : <http://sigminesfrance.brgm.fr/telechargement/substances/cha.pdf>.
- BRIANE, D., DOAT, J. 1985. *Guide technique de la carbonisation : la fabrication du charbon de bois*. Aix-en-Provence, Edisud. 180p.
- BRINGEZU, S. SCHÜTZ, H. STEGER, S. et al. 2004. "International comparison of resource use and its relation to economic growth. The development of total material requirement, direct materials inputs and hidden flows and the structure of TMR", *Ecological Economics* 51 (1/2), p. 97-124.
- BRINGS JACOBSEN, N. 2006. "Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark: A quantitative assessment of economic and environmental aspects", *Journal of Industrial Ecology*, 10 (1-2), p. 239-255.
- Brunner p., Rechberger H. 2006. Anthropogenic Metabolism and Environmental Legacies, Volume 3, Causes and consequences of global environmental change, p. 54-72, In : Ian Douglas (ed.). *Ian Douglas, Encyclopedia of Global Environmental Change*. Chichester, John Wiley & Sons.
- BURGESS, R. L., [s.d.]. *The Ecological Society of America. Historical Data and Some Preliminary Analyses*. Environmental Science Division. Oak Ridge National Laboratory. [réf. du 8 sept. 2011]. Format PDF : <http://www.esa.org/history/docs/BurgessHistory.pdf>
- CAILLAVET F. ET NICHELE, V. 2002. "L'activité féminine détermine la consommation de repas hors domicile", *INRA Sciences Sociales* 1/02, oct. N. p.
- CARDINI, F. J. 1845. "Fourrage : qualités nutritives de certains fourrages et rapports entre eux", pp. 540-546. in : *Dictionnaire d'hippiatrique et d'équitation*, Bouchard-Huzard, Paris. p. 751.
- CARNOT, S. 1824. *Réflexion sur la puissance motrice du feu*. 102 p.
- CARON, F. (dir.). 1990. *Paris et ses réseaux: naissance d'un mode de vie urbain, XIXe-XXe siècles*. Paris, Bibliothèque historique de la ville de Paris, Université de Paris IV : Paris-Sorbonne - Centre de recherche en l'histoire de l'innovation. 425 p.
- CARON, F. 1997. *Histoire des chemins de fer en France*, Tome premier. 1740-1883. Paris, Fayard. 700 p.

CASTRI, F. 1976. "International, Interdisciplinary Research in Ecology: Some Problems of Organization and Execution. The Case of the Man and the Biosphere (MAB) Programme". *Human Ecology* 4 (3), Jul. ,p. 235-246.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY (CIA). *World Factbook*. Washington, CIA. [en ligne] [réf. du 14 Oct. 2010]. Disponible sur la toile : <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>.

CHALINE, C., DUBOIS-MAURY, J. 1983. *Energie et urbanisme*. Paris, PUF, Que-sais-Je ?. 128 p.

CHALINE C., "Les Plans Énergétiques régionaux ou la recherche d'une échelle pertinente de planification énergétique", Architecture, urbanisme et énergie : bilan et perspectives : séminaire de confrontation et de réflexion, PUCA, H2E83 et MINEL, Paris, 12-13 décembre 1985. (Actes de colloques).

CHAPMAN, P.F., Science Faculty. 1975. "4. The energy costs of materials", *Energy Policy*, 1975, 3 (1), p. 47-57.

CHATZIMPIROS, P. 2011. *Les empreintes environnementales de l'approvisionnement alimentaire : Paris, ses viandes et lait, XIXè-XXIè siècles*. Thèse de doctorat, Université Paris Est. 351 p. Dir. BARLES S.

CHEVALIER, M. [183.] "Observations sur les mines de Mons, et sur les autres mines de charbon, qui approvisionnent Paris", *Annales de l'industrie française et étrangère* (Article extrait des). Paris, Impr. de H. Fournier. 94 p.

CHEVALIER, M. 1832. "Observations sur les mines de Mons et sur les autres mines de charbon qui approvisionnent Paris", *Annales des mines*, Troisième Série, Tome II. Paris, Carilian-Goeury. p. 203-232.

CLAUSTRE, P.-F. 2000-2001. "L'Octroi de Paris (1798-1943) : Bilan historiographique et perspectives de recherche", *Recherches contemporaines* 6. p 299-316.

CLAVAL, P. 1974. *Eléments de la géographie humaine*. Paris, Editions M. Th. Génin, Librairie Techniques. 412 p.

CLAVÉ J. 1861. "Etudes d'Économie forestière : L'Industrie et le Commerce des Bois en France", *Revue des Deux Mondes* Tome 33. p. 446-480.

CLEGG, S. 1860. *Traité pratique de la fabrication du gaz d'éclairage*. (Traduit de L'anglais et annoté par Ed Servier). Paris, Lacroix et Baudry. 299 p.-XXVIII pl.

CLEVELAND, C. J. 1999. "8. Biophysical economics: from physiocracy to ecological economics and industrial ecology", in : MAYUMI, K., GOWDY, J. M. (eds.), 1999, "Bioeconomics and sustainability: essays in honor of Nicholas Georgescu-Roegen", *Ecological Economics*, Massachusetts, Edward Elgar Publishing, Inc., 417 p.

COCHIN, D. 1883. *La compagnie du gaz et la ville de Paris, traité, négociation, rapport*. Paris, O. Doin, n. p.

COLLIER, U., LOFSTEDT, R. E. 1997. "Think globally, act locally? Local Climate change, energy policies in Sweden, the UK", *Global Environmental Change* 7 (1), p. 25-40.

COLONNA, P. 2012. "Le carbone renouvelable dans les systèmes alimentaires, énergétiques et chimiques", in *Le carbone renouvelable dans les systèmes alimentaires, énergétiques et chimiques*, Paris, Collège de France / Fayard (« Leçons inaugurales », n° 223), 2012, [En ligne] [réf. du 05 fév. 2013]. Disponible sur la toile : <http://lecons-cdf.revues.org/549>.

COMBRIS P., SOLER L.G. 2011. "Consommation alimentaires : tendances de long terme et questions sur leur durabilité", *Innovations Agronomiques* 13, p. 149-160

COMMISSARIAT GENERAL AU DEVELOPPEMENT DURABLE. "Les émissions de CO2 dues à la combustion d'énergie dans le monde en 2008", *Chiffres et statistiques* 175, Décembre 2010. [en ligne] [réf. du 20 nov., 2012]. Disponible sur la toile : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-emissions-de-CO2-dues-a-la,20161.html>

COMMISSION MONDIALE SUR L'ENVIRONNEMENT ET LE DEVELOPPEMENT DES NATIONS UNIES (WCED en anglais), Notre avenir à tous (Rapport dite Brundtland). [en ligne] [réf. du 08 sept. 2011]. Disponible sur la toile : <http://wwwv1.agora21.org/dd/rapport-brundtland.html>.

COMPTE DE CHABROL. 1829. *Recherches statistiques sur la Ville de Paris et le département de la Seine ; Recueil de tableau dressés et réunis d'après les ordres de monsieur le Comte de Chabrol, conseiller d'Etat, Préfet du Département*. Paris, L'impr. Royale. xlviii-87 p.

CONSEIL REGIONAL DE L'ILE-DE-FRANCE. 1984. *Le Schéma régional de l'énergie rapport d'étape*, Annexe au rapport N° 07-84. Jan. N. p.

CORLIOLIS, G.1844. *Traité de la mécanique des corps solides et du calcul des effets des machines*, Paris

COTTRELL, F. 1955. *Energy and Society: The Relationship Between Energy, Social Change, and Economic Development*. New York, McGraw-Hill, Book Company. [en ligne] [réf. du 8 sept. 2012]. Disponible sur la toile : http://www.eoearth.org/article/Energy_and_Society:_The_Relationship_Between_Energy,_Social_Change,_and_Economic_Development_%28e-book%29

COTTRELL, F., CLEVELAND, C. "Energy and Society: Chapter 2: Organic Energy and the Low-Energy Society", in: Cutler J. Cleveland (eds.). *Encyclopedia of Earth* 4, 2009 [en ligne] [réf. du 20 fév. 2013]. Disponible sur la toile : http://www.eoearth.org/article/Energy_and_Society:_Chapter_2:_Organic_Energy_and_the_Low-Energy_Society.

COUR DES COMPTES. 2012. *Les coûts de la filière électronucléaire*. Rapport public thématique. Janvier. 430 p.

COUTARD, O. 1999. "L'accès des ménages à faible revenu aux services d'eau et d'énergie en France et en Grande-Bretagne", *Flux*, 36-37, p. 7-15.

CPCU. [en ligne] [réf. du 24 mars 2012]. Disponible sur la toile : www.cpcu.fr.

CPCU. 1937. *Plan du réseau de la CPCU en 1937*, 56 p.,

CPCU. 1955. *Le Chauffage urbain à Paris, 1929-1954*. CPCU, Paris, Helpé.

CPCU. 1994. *Degré CPCU*, 10, juin.

CPCU. 2000. *Guide Technique 2000*. 8 Livres. N. p.

- CPCU. 2002. *Degré CPCU*, 28, avril.
- CPCU. 2005. *Degré CPCU*, 38, avril.
- CPCU. 2005. *Rapport annuel de la CPCU*.
- CPCU. 2006. *Rapport annuel de la CPCU*.
- CPCU. 2007. *Rapport annuel de la CPCU*.
- CPDP. *Généralités du CPDP*. [réf. du 24 mars 2012]. Format PDF : http://www.cpdp.org/sites/www.cpdp.org/files/generalites_cpdp/cpdp_1962.pdf.
- CREDOC. 2000. *Enquête individuelle et nationale sur les consommations alimentaires*. Agence française de sécurité sanitaire des aliments, Ministère de l'agriculture et de la pêche . Londres, Paris, New York, Tec & Doc. XVIII-158 p.
- DAINTITH, J. , RENNIE, R. (eds.). 2005. *The facts on file dictionary of physics*. 4th edition, Checkmark Books. 289 p.
- DAUMAS, M. GUERON, F. HERLEA, A. et al. (dirs.).1996. *Histoire générale des techniques*. Tome 4. Les techniques de la civilisation industrielle : Énergie et matériaux, 1ère éd. Quadriage [1ère éd. P.U.F. 1978]. Paris, Quadriage/P.U. F. 754 p.
- DAUMAS, M. PAYEN, J. (dirs.). 1976. *Evolution géographique industrielle de Paris et sa proche banlieue au XIXe siècle*, Vol. II, Vers la maturité de l'industrie parisienne 1872-1914. (2 tomes) Paris, Centre de Documentation d'Histoire des Techniques, Conservatoire des Arts et Métiers. 617 p.
- DAUMAS, M., FONTANON, C., JIGAUDON, G. et al. 1977. *Analyse historique de l'évolution des transports en commun dans la région parisienne de 1855 à 1939*. Centre d'histoire des techniques et de l'environnement. VIII-475 p.
- D'AVENEL, G. 1919. *L'évolution des moyens de transport (voyageurs. lettres. marchandises)*. Paris, Flammarion. 266 p.
- DE SAINT-JULIEN, A., GUSTAVE BIENAYME, G. 1887. *Histoire des droits d'entrée & d'octroi à Paris*. Paris, Paul Dupont. 148 p.
- DEBEIR, J.-C., DELEAGE, J.-P., HEMERY, D. 1986, *Les servitudes de la puissance: une histoire de l'énergie*, Paris, Flammarion, Nouvelle bibliothèque scientifique, 428 p.
- DELEAGE, J.-P. 1991. *Histoire de l'écologie : une science de l'homme et de la nature*. Paris, La Découverte. 330 p.
- DGEMP. 2007a. *Energies & Matières premières : Statistiques 2006 de l'industrie gazière en France*. Observatoire de l'Energie-DGEMP. Décembre. 23 p.
- DGEMP. 2007b. *Production-Distribution de l'énergie électrique en France et dans les régions en 2004 et 2005*. Sept. 101 p.
- DGEMP. 2008. *Bilan énergétique de la France en 2007*. 31 p.
- DI BLASI, C., TANZI, V., LANZETTA, M. 1997. "A study on the production of agricultural residues in Italy", *Biomass and bioenergy* 12 (5), p. 321-331.
- DIACT. 2005. "Changement climatique, énergie et développement durable des territoires", *Territoires 2030*. N.2, Déc. p. 35-38.

- DOUGLAS, I., HODGSON, R., LAWSON, N. 2002. "Industry, environment and health through 200 years in Manchester ", *Ecological Economics* 41 (2), p. 235-255.
- DRIRE. 2001. *Le Pétrole en Île-de-France : De la ressource aux consommateurs*. Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche et de l'Environnement. Déc. 32 p.
- DUMONT, M.-J. 1991. *Le logement social à Paris 1850-1930 : les habitations à bon marché*. Liège, Editions Mardaga. 192 p.
- DUPEUX, G. 1981. *Atlas historique de l'urbanisation de la France (1811-1975)*. Laurent, J (ed. scientifique) Paris, Ed. du CNRS. 190 p., 20 cartes, graph., tabl.
- DUPIN, C. 1827. *Forces productives et commerciales de la France*. tome seconde. Paris, Bachelier. p 336
- DUTENS, J. 1829. *Histoire de la navigation intérieure de la France : avec une exposition des canaux à entreprendre pour en compléter le système*, Volume 2. Paris, Sautelet/ Bruxelles, Librairie Parisienne Française et Etrangère. 470 p.
- DUVIGNEAUD, P. 1980. *La synthèse écologique. Populations, communautés, écosystèmes, biosphère, noosphère*, 2e éd. [1st ed. 1974] Paris, Doin. 300 p.
- EHRlich, P. R., HOLDREN, J. P. 1971. "Impact of Population Growth : Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive", *Science* 171, p. 1211-1217.
- EMELIANOFF, C. 2000-2001. "L'écologie urbaine entre science et urbanisme", *Quaderni* 43, Hiver p. 85-99.
- ENS. Séminaire "Histoire climat", Association d'histoire moderne et contemporain. Le 11 octobre 2010. ENS.
- ERKMAN, S. 1998. *Vers une écologie industrielle : comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper-industrielle*. Paris, La librairie FPH. Edition Charles Léopold Mayer. 147 p.
- ESNAULT, J. M. (présenté par, au nom du Groupe Energie). 1978. *Rapport sur les problèmes de l'énergie en région d'Île-de-France*. Comité économique et social de la région d'Île-de-France. le 26 janvier
- EUROSTAT. 2001. *Economy wide material flow accounts and balances with derived resource use indicators: A methodological guide*. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities. 92 p.
- EUROSTAT. 2008. *Statistical books Yearly statistics 2006*. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities. 483 p.
- EZRAN, M. 2010. *Histoire du pétrole*. Paris, L'Harmattan. p. 299.
- FAO. 2001. *Food Balance Sheets, A handbook*. Rome, FAO. [en ligne] [réf. du 17 juin 2011]. Disponible sur la toile : <http://www.fao.org/DOCREP/003/X9892E/X9892e01.htm>

- FAO. 2003. "Food Energy : Methods of Analysis and Conversion Factors, Report of a technical workshop", *FAO food and nutrition paper 77*, Rome, FAO, N.p, [en ligne] [réf. du 3 déc. 2008], Disponible sur la toile : <http://www.fao.org/docrep/006/Y5022E/Y5022E00.HTM>
- FAO. 2006. *Food energy – methods of analysis and conversion factors 77*. [réf. du 28 mars 2011]. Format PDF : <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/006/y5022e/y5022e00.pdf>.
- FAO. 2009. *The state of food and agriculture: Livestock in the balance*. Rome, FAO. 180 p.
- FAO. *Food Balance Sheets* 1961, 1962, 1972, 1982, 1992, 2002, 2005. [en ligne] [réf. du 4 déc. 2009]. Disponible sur la toile : www.fao.org.
- FERNIQUE, A. 1878-1880. *Compagnie parisienne d'éclairage et de chauffage par le gaz : vue des usines et des ateliers*. Ecole nationale des ponts et chaussées.
- FEUGERE, I. E. 1904. *L'octroi de Paris. Histoire et législation*. Paris, Berger- Levrault. in-8°, vn-678 p.
- FIGUIER, L. [1873-1877]. *Les merveilles de l'industrie : industries agricoles et alimentaires*. Paris, Furne, Jojuvet et Cie. 739 P.
- FISCHER-KOWALSKI M., AMANN C. 2001. "Social Metabolism and Human Population" (Editorial Note), *Population and Environment* 23 (1), Sep., p. 3-5.
- FISCHER-KOWALSKI, M. 1998. "Society's Metabolism: The intellectual History of Materials Flow Analysis, Part 1, 1860-1970", *Journal on Industrial Ecology* 2 (1), p. 61-70.
- FISCHER-KOWALSKI, M., HABERL, H. (eds.). 2007. *Socioecological transitions and global change: trajectories of social metabolism and land use*. (coll. « Advances in Ecological Economics ») Cheltenham/Northampton, Edward Elgar Publishing. 263 p.
- FISCHER-KOWALSKI, M., HÜTTLER, W. 1999. "Society's Metabolism. The Intellectual History of Material Flow Analysis, Part II: 1970-1998", *Journal of Industrial Ecology* 2(4), p. 107-136.
- FROSCH, R. A., GALLOPOULOS, N. 1989. "Strategies for manufacturing", *Scientific American* 261(3), p. 144-152. (titre d'article traduit en français "Des stratégies industrielles viables")
- GALLO, E. 2006. *Modernité technique et valeur d'usage : le chauffage des bâtiments d'habitation en France*. Thèse doctorat. Université Paris I Panthéon Sorbonne. Dir. MONNIER G.
- GARNIER, E. 2006. "Appel à informations. Programme d'histoire du climat « Ophélie »", *Annales de Normandie*, 56-1, p. 93-94
- GARNIER, E. 2010. *Les dérangements du temps : 500 ans de chaud et de froid en Europe*. Plon. p. 244
- GEDEC, Service cantonal de gestion des déchets. 2005. *Ecologie industrielle à Genève. Premiers résultats et perspectives*. 47 p.

GIAMPIETRO, M, MAYUMI, M. 2000. "Multiple-Scale Integrated Assessment of Societal Metabolism: Introducing the Approach", 22 (2), *Societal Metabolism*, Nov., p. 109-153.

GIAMPIETRO, M. 1997. Linking technology, natural resources, and the socioeconomic structure of human society: A theoretical model", *Advanced in Human Ecology*, 6, p. 75-130.,

GIAMPIETRO, M., CERRETELLI, G., PIMENTEL, D. 1992. "Energy analysis of agricultural ecosystem management: human return and sustainability, Agriculture", *Ecosystems & Environment* 38, p. 219–244.

GILJUM, S., LUTZ, C. AND JUNGNTZ, A., 2007. A Multi-Regional Environmental Input–Output Model to Quantify Embodied Material Flows. 16th International Input–Output Conference of the International Input–Output Association (IIOA), Istanbul, Turkey. [en ligne] [réf. du 30 sept 2010]. Disponible sur la toile : <http://www.iioa.org/Conference/16th-downable%20paper.html>.

GIRAUD, A.,BOY DE LA TOUR, X. 1987. *Géopolitique du pétrole et du gaz*. Paris, Editions Technip. 427 p.

GRANGEZ, E. 1855. *Précis historique et statistique des voies navigables de la France et d'une partie de la Belgique : contenant tous les renseignements relatifs à la perception des droits de navigation et de péage...* Paris, N. Chaix et Cie. VIII-796 p.

GRIMM N. B., FAETH S. H., GOLUBIEWSKI, N. E. *et al.* 2008. "Global change and the Ecology of Cities", *Science* 319 (5864), Fév, p. 756-760.

GROB, G. R. 2003. "Importance of ISO and IEC international energy standards and a new total approach to energy statistics and forecasting", *Applied Energy* 76, p. 39–54.

GRUBLER, A. 2004. "Transitions in Energy Use", *Encyclopedia of Energy* 6, p. 163-177.

GRUNER, M., LAN, M., 1861. « Etat présent de la métallurgie du fer en Angleterre », *Annales des Mines* 5, Paris, Dunod, P. 139-237.

GUILBAUD, G., SCHOTT, D. (eds.). 2005. *Resources of the City : Contributions to an Environmental History of Modern Europe*. Aldershot, Ashgate (coll. « Historical Urban Studies Series »). 299 p.

GUILLERME, A. 1991. "Réseau : Genèse d'une catégorie dans la pensée de l'ingénieur sous la Restauration ", *Flux* 7 (6), p. 5-17

GUILLERME, A. 1992. "Chaleur et confort, L'introduction du confort à Paris sous la Restauration ", *History of Technology* 14, p. 16-53.

GUILLERME, A. 1995. *Bâtir la ville : Révolutions industrielles dans les matériaux de construction. France-Grand-Bretagne (1760-1840)*. Seyssel, Champ Vallon. P315.

GUILLERME, A. 2007. *La naissance de l'industrie à Paris: entre sueurs et vapeurs, 1780-1830*. Paris, Editions Champ Vallon. 432 p.

- HABERL, H. 2001a. "The energetic metabolism of societies, part I: accounting concepts", *Journal of Industrial Ecology* 5(1), p. 11–33.
- HABERL, H. 2001b. "The energetic metabolism of societies, part II: Empirical Examples", *Journal of Industrial Ecology* 5(2), p. 71–88.
- HABERL, H. ERB, K. H. KRAUSMANN, F. et al. 2003. "Land-use change and socio-economic metabolism in Austria—Part II: land-use scenarios for 2020", *Land Use Policy* 20 (1), p. 21–39.
- HABERL, H. WINIWARTER V., ANDERSSON K. et al. 2006. From LTER to LTSER: Conceptualizing the Socioeconomic Dimension of Long-term Socioecological Research. *Ecology and Society* 11(2), N.p.
- HAY, R. K. M. 1995. "Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology", *Annals of applied biology* 126 (1), p. 197-216.
- HOLLAND, H. D., TUREKIAN, K. K. (eds.) 2010. *Geochemistry of Earth Surface Systems: From the Treatise on Geochemistry*. London, Academic. 640 p.
- HORNBORG, A., MCNEILL, J, MARTINEZ-ALIER, J. (eds). 2007. *Rethinking environmental history: World-system history and global environmental change*, Altamira Press, Lanham, 420 p : p.
- HUBACEK, K., GILJUM, S. 2002. « Applying physical input-output analysis to estimate land appropriation (ecological footprints) of international trade activities », *Ecological Economics* 44, p. 137-151.
- HUIJER, K. 2005. *Trends in oil spills from tanker ships 1995-2004*. International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF). Londres, ITOPT. 14 p. [en ligne] [réf. du 08 juin 2010] Format PDF : <http://www.itopf.com/uploads/amop05.pdf>
- HURLEY, W. L. *Milk Composition & Synthesis Resource Library*, University of Illinois. [en ligne] [réf. du 13 jan 2012]. Disponible sur la toile : <http://classes.ansci.illinois.edu/ansc438/milkcompsynth/milkcompsynthresources.html>
- HUSSON, A. 1856. *Les consommations de Paris*. Paris, Guillaumin et Cie. 492 p.
- HUTCHINSON, G. E. 1948. "On Living in the Biosphere", *The Scientific Monthly* LXVII, p 393-398.
- IAU. 2005. *L'incinération des déchets en Île-de-France : Considérations environnementales et sanitaires*. Paris, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Île-de-France. déc. 264 p. [réf. du 16 avril 2012]. Format PDF : http://www.iau-idf.fr/fileadmin/Etudes/etude_408/pdf.pdf
- IAURIF. 2005. "La consommation énergétique des transports franciliens", *Note rapide sur les transports 400*, Nov. 6 p.
- IEA. 2004. *Energy statistics manual*. sept., 196 p.
- IEA. 2008a. *Energy Balances of OECD countries*. 2008 Edition. Paris. N. p.
- IEA. 2008b. *Key world energy statistics 2008*. Paris, OECD, IEA, 78 p.
- ILLAIRE, M. 1998. *Energie et subsistances. Enquêtes sur les moulins à blé, an II-1809. Inventaire des articles F20 290 à 296, F10 226 à 310*. Paris, Centre historique des Archives nationales. p. 641.

INSEE. [s. d.] Unité urbaine. [en ligne] [réf. du 3 sept. 2012]. Disponible sur la toile : <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/unite-urbaine.htm>

INSEE. 1926. *Annuaire statistique de la région Île-de-France*. vol. 42

INSEE. 1952-1965. *Bulletin régional de statistique. Oise, Seine, Seine-et-Marne, Seine-et-Oise*. Paris, Direction régionale de Paris. (1er trimest. 1952 - 4e trimest. 1965).

INSEE. 1959. *Le district de Paris, structure, population, habitat*. Paris, INSEE Direction régionale de Paris. 51 p.

INSEE. 1965. *Annuaire statistique abrégé de la région parisienne*. Paris, INSEE, Direction régionale de Paris. XI-304 p.

INSEE. 1966. *Annuaire statistique de la France 1966. Résumé rétrospectif*. Vol. 72. Nouvelle série n° 14. Paris, Imprimerie nationale : Presses universitaires de France. N. p.

INSEE. 1966-1970. *Bulletin de statistique. Région parisienne : Seine, Seine-et-Marne, Seine-et-Oise*. Paris, Direction régionale de Paris. (1er trimest. 1966-4e trimest. 1970)

INSEE. 1978. *Tableaux économiques de l'Île-de-France*. Edition 1978. INSEE Direction régionale de Paris.

INSEE. 1982. *Tableaux économiques de l'Île-de-France*. Edition 1982. INSEE Direction régionale de Paris. 102 p.

INSEE. 1983. *Tableaux économiques de l'Île-de-France*. Edition 1983. INSEE Direction régionale de Paris. 104 p.

INSEE. 1984. *Tableaux économiques de l'Île-de-France*. Edition 1984. INSEE Direction régionale de Paris. 144 p.

INSEE. 1986. *Tableaux économiques de l'Île-de-France*. Edition 1986. INSEE Direction régionale d'Île-de-France. 159 p.

INSEE. 1988. *Tableaux économiques de l'Île-de-France*. Edition 1988. INSEE Direction régionale d'Île-de-France. 161 p.

INSEE. 1990a. *Annuaire rétrospectif de la France 1948-1988*. Paris, INSEE, 658 p.

INSEE. 1990b. *Tableaux de l'économie de l'Île-de-France*. Edition 1990. INSEE Direction régionale d'Île-de-France. 163 p.

INSEE. 1994. *Tableaux de l'économie de l'Île-de-France*. Edition 1994. INSEE Direction régionale d'Île-de-France. 174 p.

INSEE. 1995. *Tableaux de l'économie de l'Île-de-France*. Edition 1995. INSEE Direction régionale d'Île-de-France. 172 p.

INSEE. 1997. *Tableaux de l'économie régionale Île-de-France*. Edition 1997-1998. INSEE Direction régionale d'Île-de-France. 175 p.

INSEE. 2002. *Tableaux économiques régionaux*. Edition 2000-2001. INSEE Direction régionale d'Île-de-France. 196 p.

INSEE. 2004. *Tableaux économiques régionaux*. Edition 2004. INSEE Direction régionale d'Île-de-France. 193 p.

- INSEE. 2008. *Tableaux économiques d'Île-de-France*. Edition 2008. INSEE Direction régionale d'Île-de-France. 236 p.
- ISENMANN, R. 2003. "Industrial Ecology: Shedding more light on its perspective of understanding nature as model", *Sust. Dev.* 11, 143–158.
- JACQMIN, F. 1868. *Chemins de fer, Leçon faites en 1867 à l'Ecole Impériale des Ponts et Chaussées par F. Jacqmin*. Paris, Garnier Frères. 427 p.
- JACQMIN, F. 1878. *Commission centrale des chemins de fer- sous-commission des tarifs. Réponses au questionnaire. Première partie*. Paris, Imprimerie Nationale. 245 p.
- JELINSKI, L. W. *et al.* 1992. "Industrial ecology : Concepts and approaches", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 89, Colloquium paper, p. 793-797.
- JEVON, S. 1866. *The coal question*. London, Macmillan and Co. 2nd Éd. [1re éd. en 1865]
- JÖLLI, D., GILJUM, S. 2005. *Unused biomass extraction in agriculture, forestry and fishery*. SERI Studies No. 3. Sustainable Europe Research Institute. Vienna.
- JOLLIVET, M., 2001. "Un exemple d'interdisciplinarité au CNRS : le PIREN (1979-1989) ", *La revue pour l'histoire du CNRS* 4, p. 22-30.
- Journal Officiel du Sénat du 10/12/1992, p. 2738. *Mode de calcul de la population dite " agglomérée " des communes*. [en ligne] [réf. du 28 mars 2012]. Disponible sur la toile : <http://www.senat.fr/questions/base/1992/qSEQ920722144.html>.
- KASIOUMI, E. 2010. *Sustainable Urbanism : an examination of environmentally responsible neighborhood developments in Europe and lessons for sustainable urban planning*. Thèse NR., Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Urban Studies and Planning. 138 p. Dir. BRENT R.
- KENNEA, T. 1975. "The UNESCO Man and the Biosphere Programme (MAB) ", *Area* 7 (4), p. 225-227.
- KENNEDY, C., CUDDIHY, J., ENGEL-YAN, J. 2007. "The changing metabolism of cities", *Journal of Industrial Ecology* 11(2), p. 43-59.
- KENT, M. 2000. "Classics in physical geography revisite : Lindeman, R, L. 1942. The trophic-dynamic aspect of ecology", *Ecology* 23, p. 399–418. 1941", *Progress in Physical Geography* 24, 2, p. 253–260.
- KIM, E., BARLES, S. 2010. "The Long Term Energetic metabolism of Paris (France) : first quantitative results, 18th-20th century", Paper prepared for the 11th biennial Conference of International Society for Ecological Economics, *Advancing sustainability in a time of crisis*. Oldenburg/Bremen, 22-25 August.
- KIM, E., BARLES, S. 2011, "The energy consumption of Paris and its supply areas from the 18th century to the present", *Regional Environmental Change* 12 (2), p. 295-310.
- KNITTEL F. 2007. *Mathieu de Dombasle : Agronomie et innovation (1750-1850)*. Université Nancy II. Thèse en histoire moderne. (Sous la direction de Mme MAZAURIC S.)

- KRAUSMANN, F., 2006. "A City and its Hinterland: The Social Metabolism of Vienna 1800-2000", Paper prepared for the 4th International Round-Table on *Urban Environmental History of the 19th and 20th Century*. Paris, 16-18 Novembre. N. p.
- KRAUSMANN, F., HABERL, H. 2002. "The process of industrialization from the perspective of energetic metabolism. Socioeconomic energy flows in Austria 1830-1995", *Ecological Economics* 41(2), p 177-201.
- KRAUSMANN, F., HABERL, H., Erb, K.-H., WACKERNAGEL, M. 2004. "Resource flows and land use in Austria 1950–2000: using the MEFA framework to monitor society–nature interaction for sustainability", *Land Use Policy* 21, p 215–230.
- KRAUSMANN, F., HABERL, H., SCHULZ, N. B. et al. 2003. "Land-use change and socio-economic metabolism in Austria - Part I : driving forces of land-use change : 1950-1995", *Land use Policy* 20, p. 1-20.
- LA BIBLIOTHEQUE DE L'INSEE : 50 000 FICHES PAR AN. 1969. *Economie et statistique* 5 (5), p. 57-60.
- LABETTERAVE. Le portail de la betterave sucrière, www.labetterave.fr
- LARROQUE, D. 1997. *Histoire du service de la production thermique d'électricité de France*. Tome premier 1946-1973. Association pour l'histoire de l'Electricité en France. Paris, Compédit-Beauregard. 462 p.
- LAYKE C., MATTHEWS E., AMANN C. et al. 2000. *The weight of Nations : the material outflows from industrial economies*. Washington D. C., World Resources Institute. 135 p.
- LE BERQUIER, J. 1866. *Commune de Paris et du département de la Seine ou Traité pratique des lois et règlements qui régissent, à Paris et dans le département de la Seine, l'administration municipale et l'administration générale... précédé d'une étude historique sur les institutions municipales de la ville de Paris*. 3e éd., Paris, P. Dupont, XII-688 p.
- LE BON DE FERRUSSAC. (dir.). 1824. *Bulletin des sciences agricoles et économiques*. Tome 1. Paris, Bureau du Bulletin. P. 1-5. (Il s'agit de l'extrait de Recherches statistiques sur la ville de Paris et le département de la Seine 1821 et 1823).
- LE GOFF, P. 1979. "La valeur de l'énergie a-t-elle une base économique, écologique ou technique ? Critère d'optimisation en énergétique industrielle", *Revue d'Economie Industrielle* 8, 2e trimestre, p. 68-98.
- LEACH, G. 1975. "Net energy analysis - Is it any use ? ", *Energy Policy*, 3 (4), p. 332-344.
- LEBŒUF, *Le Précis d'histoire de Seine-et-Marne*. Amatteis, Impr. Lienhart. 358 p.
- LECOIN, J. P. (dir.). 1977. "L'occupation du sol en région d'Île-de-France", *Cahiers de l'IAURIF* 48-49.
- LEVEQUE, C. 2001. *Écologie: De l'écosystème à la biosphère*. Paris, Dunod. 502 p.

- LEVEQUE, C., MUXART, T., ABBADIE, L. et al. 2003. L'anthroposystème entité structurelle et fonctionnelle des interactions sociétés-milieux, in LEVEQUE, C., VAN DER LEEUW, S. (Eds), *Quelles natures voulons-nous ? Pour une approche socio-écologique du champ de l'environnement*. Paris, Elsevier, p110-129.
- LIKENS, G. E. 1995. "The ecosystem approach : its use and abuse", p. in : KINNE O. (ed.). *Excellence in Ecology*. Oldendorf, ECI. 371 p.
- LINDEMAN, H. R. 1994. *Energy and industrial ecology*. National Academy of Engineering. 22 p.
- LINDEMAN, R. L. 1942. "The Trophic-Dynamic Aspect of Ecology". *Ecology* 23 (4), Oct. p. 399-417.
- LOTKA, A. J. 1925. *Elements of Physical Biology* (réimprimé par Dover en 1956). *Elements of Mathematical Biology*. Baltimore, Williams & Wilkins company. 460 p.
- M'BOW, A.-M., "L'homme et la biosphère : Les dix ans de du programme écologique de l'Unesco", *Le Courrier de l'Unesco : L'homme et la biosphère*, Avril 1981.p. 4-5.
- MACNEILL, J. R. 2001. *Something new under the sun: An environmental history of the twentieth century world*. New-York, W.W. Norton & Company. 421 p.
- MAHOOD, H.R. , ANGUS E. L. (ed.) 1969. *Urban politics , problems*. New York, Scribner. 587 p.
- MALEGARIE, C. 1947. *L'Electricité à Paris*. Paris/Liége, Ch. Béranger (impr. de R. Hermieu). IV-707 p.
- MARTINEZ-ALLIER J. (avec K. SCHLIIPMANN) 1987. *Ecological Economics. Energy, Environment and Society*. New York, Basil Blackwell. 286 p.
- MASSE, R. 1914. *Le gaz*. Paris et Liège, Ch. Béranger Ed. 1579 p.
- MATHIEU, N. "Temps de l'histoire de l'environnement, temps des problèmes d'environnement : pour une théorisation des représentations et des constructions du temps dans les recherches interdisciplinaires en fonction de leur définition du concept d'environnement", p. 117-121. In : Acte de colloque Journées PIREVS – *Les temps de l'environnement*. Toulouse 5/6/7 nov. 1997.
- MAYUMI, K., GOWDY, J. M. (eds.). 1999. *Bioeconomics and sustainability: essays in honor of Nicholas Georgescu-Roegen*. Ecological Economics. Massachusetts, Edward Elgar Publishing, Inc., 417 p.
- MAZIA, M. 2007. "L'énergétique urbaine et la morphologie des villes : l'analyse du bâti parisien", *Les annales de la recherche urbaine* 103, sept. p. 79-85.
- MCSHANE, C., TARR, J. A. 2007. *The horse in the city : living machines in the nineteenth century*. Baltimore, The Johns Hopkins university press. XI-242 p.
- MERLIN, P., CHOAY, C. (eds.). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*, 3e éd. [1ère éd. 1988], Paris : PUF, 2010. 843 p.
- MERRILL, A. L. WATT, B. K. 1973. *Energy value of food : basis and derivation*. Human Nutrition Research Branch, Agricultural Research service, United States Department of Agriculture. Agriculture Handbook N. 74. (Version revise du Feb. 1973).

MIMAUSA (Mémoire et Impact des Mines d'urAniUm : Synthèse et Archives). Database of uranium mining activity in mainland France from Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire (IRSN), on the web, [30 Sept. 2010], <http://mimaubdd.irsn.fr/Mimausa/>.

MINARD, C. J. 1858-1861. *Carte Figurative et approximative des tonnages de marchandises qui ont circulé en 1858 – en 1859 – en 1860 sur les voies d'eau et de fer de l'Empire Française*. Champs-sur-Marne, ENPC 4.3563.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE. 1886. *Statistique agricole annuelle 1885*. p. 155.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE. 1908. *Statistique agricole annuelle 1906*. p. 311.

MINISTERE DE L'INDUSTRIE. [s. d.] *Nomenclature d'activités économiques pour l'étude des livraisons et consommations d'énergie(NCE)*. [en ligne] [réf. du 16 fév. 2012]. Disponible sur la toile : http://www.industrie.gouv.fr/sessi/enquetes/eacei/eacei_nce_naf.htm.

MINISTERE DES TRAVAUX PUBLICS. 1847. *Statistique de l'industrie minérale et des appareils à vapeur*. volume 14. Direction des mines, Bureau de documentation minière. Paris, Imprimerie Royale. 219 p.

MINISTERE DES TRAVAUX PUBLICS, DES TRANSPORTS ET DU TOURISME. *Mémento de statistiques des transports* [en ligne] [réf. du 29 sept. 2012] ; http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/temis/document.xsp?id=Temis-0001048&qid=sdx_q1&n=6&q=

MOSS, T. 2009. "Models of socio-technical change and the politics of urban infrastructure : Managing energy in Berlin between dictatorship and democracy", Paper prepared for the international colloquium *Cities and energy transitions: past, present, future*, organised by LATTs (CNRS). Autun, 1-4 juin.

MUSSET, R. 1962. "Le pipe-line du Havre à Paris : son trafic, son doublement", *Annales de Géographie* 71(385), p. 325.

MUSSET, R., 1959. "Le pétrole dans la Basse-Seine", *Annales de Géographie* 68 (369), p. 409-423.

MUSTAR, P. 1984. "Généalogie du réseau de gaz cadre juridique et stratégie commerciale à Paris au XIXe", *Réseaux*2(4), p. 81 – 109.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (NAS). *International Biological Program*. [en ligne] [réf. du 15 déc. 2012]. Disponible sur la toile : http://www7.nationalacademies.org/archives/International_Biological_Program.html#P299_15278.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, Proceedings, February 1 1992. *An NAS colloquium on industrial ecology in May, 1991 including papers by industry, government and academic contributors*. 2101 Constitution Avenue NW Washington DC 20418 Sales: 202-334-2525

NATIONAL COTTON COUNCIL.1990. "Physiology Today", *Newsletter of the Cotton Physiology Education Program*, Feb. 4 p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). 2000. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*. Seventh revised edition: Update 2000. 248 p. en ligne [3 mars 2012]. Disponible sur la toile: http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=9791.

- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). 1987. *Predicting feed intake of food-producing animals*. Washington D.C. National Academy Press. 85 p.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). 1998. *Nutrient Requirements of Swine*, 10th Revised Edition. Washington, DC, National Academy Press, 212 p. [en ligne] [réf. du 28 mars 2012]. Disponible sur la toile : http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=6016
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). 2001. *Nutrient requirements of dairy cows*. Seventh revised Edition, [en ligne] [réf. du 17 oct. 2011] Disponible sur la toile : http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=9825.
- NIELSEN, S. 2010. *Food Analysis*. 4th edition. Springer. 550 p.
- NGO, N. S., PATAKI, D. E. 2008. "The energy and mass balance of Los Angeles County" *Urban Ecosystems* 11, February. p. 121–139.
- NOTHOMB, J.-B. *La navigation de la Belgique vers Paris: Études faites pour effectuer en Belgique la jonction des bassins de la Meuse et de l'Escaut, par un canal de Mons à la Sambre. Rapport présenté aux Chambres Législatives, le 24 février 1840*, par le M. le Ministère des travaux publics. Belgique. Bruxelles, Remy Imprimeur du roi. 330 p.
- O'ROURKE, D., CONNELLY, L., KOSHLAND, C. P. 1996. "Industrial Ecology : a critical review", *Int. J. Environment and Pollution*. Vol. 6. Nos. 2/3. p. 89-112.
- OBSERVATIONS SUR L'APPROVISIONNEMENT DE PARIS EN COMBUSTIBLE. 1816. Paris, Imp. de Dondey-Dupré. N. p.
- OBSERVATOIRE DE L'ÉNERGIE. 1984a. « Les nouveaux bilans énergétiques », *Économie et statistique*, 164(1), p. 53 – 59.
- OBSERVATOIRE DE L'ÉNERGIE. 1984b. L'énergie dans les régions. Ministère du redéploiement industriel et du Commerce extérieur, Direction générale de l'énergie et des matières premières. 168 p.
- OBSERVATOIRE DE L'ÉNERGIE. 1984c. *L'Énergie dans les secteurs économiques*. La Documentation Française. P 92-95.
- OBSERVATOIRE DE L'ÉNERGIE. 1985. Méthode de comptabilité de l'énergie. Ministère du redéploiement industriel et du Commerce extérieur, Direction générale de l'énergie et des matières premières. 45 p.
- OBSERVATOIRE DE L'ÉNERGIE-DGEMP. [s. d.] Note méthodologique. [en ligne] [réf. du 3 mars 2009]. Disponible sur la toile : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/energie/statisti/tbb/note-methodologique.htm>.
- OCDE, IAEA. 2006. *Uranium 2005: Ressources, Production et Demande*. OCDE, IAEA. 402 p.
- ODUM, E. P. 1976. *Écologie : Un lien entre les sciences naturelles et les sciences humaines*, traduction de la 2e éd. de Ecology, [1ère éd. 1963], Paris, Doin. p. 39.
- ODUM, H. T ., PINKERTON, R. C. 1955. « Time's Speed Regulator : The Optimum Efficiency for Maximum Power Output in Physical and Biological Systems", *American Scientist* 43, p. 331-343. 1955.

- ODUM, H. T. et al. 1953. *Productivity of Florida Springs*. Second semi-annual report to the Biology Division, Office of Naval Research, Dept. of the Navy. 25 p.
- OECD, NEA. 2002. *Nuclear Energy Data 2002*. pp. 50-51.
- OTTO, H.-J. 1998. *Ecologie forestière*. Paris, Institut pour le développement forestier. 401 p.
- ØVERGAARD, S. 2008. *Issue paper : Definition of primary and secondary energy*. Statistics Norway, Sept. Prepared as input to Chapter 3: Standard International Energy Classification (SIEC) in the International Recommendation on Energy Statistics (IRES).
- OYAT, A. et al. 1991. *Adaptation de 4 types variétaux de maïs aux fortes densités de peuplement*. p. 335-343.
- PAVE, A., 2001. "Deux programmes de recherche sur l'environnement dans les années 1990-1998 : le programme Environnement, puis le programme Environnement, vie et sociétés", *La revue pour l'histoire du CNRS*, 4, p. 32-46.
- PAYEN, A. 1832. *Traité de la fabrication et du raffinage des sucres*. (Extrait du Dictionnaire technologique, Tome XX.). Paris, Thomine libraire. 155 p
- PAYEN, A. 1861. *Traité complet de la distillation des principales substances qui peuvent fournir de l'alcool*. Paris, Bouchard-Huzard. 391 p.
- PECLET, E. 1844. *Traité de la chaleur, considérée dans ses applications*. 3e ed. Liège, D. Avanzo et Ce Editeur. 420 p.
- PEET, J. R. 1969. "The Spatial Expansion of Commercial Agriculture in the Nineteenth Century: A Von Thunen Interpretation ", *Economic Geography* 45 (4), Oct., p. 283-301.
- PEGASE (Pétrole, Électricité, Gaz et Autres Statistiques de l'Énergie). Base de données sur la consommation et la production d'énergie du Ministère de l'Écologie du Développement Durable, des Transport et du Logement (MEDDTL). Service de l'observation et des statistiques (SOEs). [en ligne] [réf. du 20 jan. 2010]. Disponible sur la toile : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/telechargement/pegase.html>.
- PEYRET, H., COURAU, R. 1935. *Le pétrole et son économie*. Paris, La Librairie Technique et Economique. 220 p.
- PICARD, D. 1991. "Physiologie et production du maïs", Communications au Colloque *La vie du maïs*. 13-15 nov. 1990. Paris, INRA, Editions Quae. 501 p.
- PICKETT, S. T. A., BURCH JR. W. R., DALTON S. E. et al. 1997. "A Conceptual framework for the study of human ecosystems in urban areas", *Urban ecosystems* 1, p. 185-199.
- PIMENTEL D., PIMENTEL M. 2008. *Food, Energy, And Society* (3e ed.). Boca Raton/London/New-York, CRC Press. 380 p.
- PINOL P.-L. 1996. *Atlas historique des villes de France*. Centre de Cultura Contemporania de Barcelona (ed. scientifique). Paris, Hachette. 318 p.
- PINON, P. 2001. *Un canal... Des Canaux*, Exposition présentée à Paris du 7 mars au 8 juin 1986 dans le cadre de la Conciergerie. Caisse Nationale des Momuments Historiques et des Sites/Ministère de la Culture. Paris, Picard. 415 p.

- PINON, P. 2002. *Atlas du Paris haussmannien : la ville en héritage du Second Empire à nos jours*. Paris, Parigramme. 209 p.
- POCHON, A., JOURNET., M., "Révolution fourragère". *Académie d'Agriculture de France*. Séance du 9 février 2005.
- PODOLINSKY, S. 1880. "Le socialisme et l'unité des forces physiques", *Revue Socialiste* 8. Avril 1880.
- POUPEAU F.-M. 2009. *Les collectivités locales productrices et distributrices d'énergie. Enjeux, usages et limites*. Atelier de réflexion LATTIS-PUCA. Rapport de Synthèse. nov. 79 p.
- PRB. 2007. *World Population data sheet*. Washington, Population reference bureau. 16 p.
- PREFECTURE DU DEPARTEMENT DE LA SEINE. 1894. *Rapport annuel de l'année 1893 sur les services municipaux de l'approvisionnement de Paris*. Direction des affaires municipales. Paris, Imprimerie municipale. 304 p.
- PRZYBYLA, F. 2007. *Le blé, le sucre et le charbon: les parlementaires du Nord et leur action, 1881-1889*. Villeneuve d'Ascq, Presses Univ. Septentrion. 594 p.
- RAOULT, M. 2007. *Histoire du chauffage urbain*. Paris, Harmattan. 357 p.
- RARE. 2004. *Bilan énergétique régional*, Groupe de travail Observation de l'énergie et de l'effet de serre en régions ADEME/MIES/RARE/Observatoire de l'énergie, cahier techniques n°1, 16 p.
- REES, W. 1992. "Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out", *Environment and Urbanization* 4(2), Oct, p. 121-130.
- RENOUARD, D. 1960. *Les transports de marchandises par fer, route et eau depuis 1850* (Coll. Recherches sur l'Economie française, n°2.). Paris, Armand Colin & Fondation Nationale des Sciences Politiques. 122 p.
- REZE, C.-H. 2002. *Les aménagements du réseau hydrographiques du Morvan pour le flottage du bois, du XVIe au XVIIIe siècle*. Mémoire de maîtrise d'archéologie sous la direction de Mr P. BENOIT, Université Paris 1-Panteon-Sorbonne, UFR 03, Année universitaire 2001-2002. 61p.
- REZE, C.-H. 2002. *Les aménagements du réseau hydrographiques du Morvan pour le flottage du bois, du XVIe au XVIIIe siècle*, Mémoire de maîtrise d'archéologie, sous la direction de Mr P. BENOIT, Université Paris 1-Panteon-Sorbonne, UFR 03, Année universitaire 2001-2002. 61p.
- RICHTER, M., WEILAND, W. 2011, *Applied Urban Ecology*, John Wiley and Sons, p. 59-60.
- RICKLEFS, R. E., MILLER, G. L. 2005. *Écologie*. 4e ed. [1ère éd. 1973], (trad fr, et adaptation par Baguette M., Baguette V. d'Amico F. Mahy G). Bruxelles, De Boeck Université. 858 p.

RISOUS, B. 2000. "Energy efficiency of various French farming systems : questions to sustainability", Paper presented at International Conference "Sustainable energy : new challenges for agriculture and implications for land use", organised by Wageningen University, the Netherlands, May 18-20, 2000.

ROBERTS, F. 1975. "The convention conventions, The IFIAS Stockholm Workshops, convened to establish the basic ground rules for energy analysis Proceedings are available from IFIAS, Nobel House, Sturegetan 14, Box 5344 5-102 46, Stockholm", Sweden *Energy Policy*, Dec, p. 345-347.

SAY, H. 1846. *Études sur l'administration de la ville de Paris et du département de la Seine*. Paris, Guillaumin, VIII-484 p.

SCHANDL, H., SCHULZ, N. B. 2002. « Changes in United Kingdom's natural relations in terms of society's metabolism and land use from 1850 to the present day », *Ecological Economics* 41(2), May, p 203-221.

SCHMID NESET T. S., BADER H. P., SCHEIDEGGER R., LOHM U. 2008. "The flow of phosphorus in food production and consumption — Linköping, Sweden, 1870–2000", *Science of The Total Environment* 396 (2–3), 25 June 2008, p. 111–120.

SCHNAKENBOURG, C. 2010. *Histoire de l'industrie sucrière en Picardie: (1810-2006)*. Paris, L'Harmattan. 400 p.

SEBILLIOTTE, M. A. 1928. *Le problème de la récupération des calories dans les usines à Gaz*. Paris, Semaine Gazière. Laval, Barnéoud, Association technique de l'industrie du gaz en France. 114 p.

SERI, (Sustainable Europe Research Institute), base de données des flux de matières : www.materialflows.net/

Service d'Administration Nationale des Données et des Référentiels sur l'Eau (Sandre), [en ligne] [réf. du 7 déc. 2011]. Disponible sur la toile : http://services.sandre.eaufrance.fr/Courdo/Fiche/client/fiche_courdo.php?CdSandre=---0010

SESSI, Ministère de l'Economie, de l'Industrie et de l'Emploi, Statistique énergétique de l'industrie Nomenclature NCE (Nomenclature d'activités économiques pour l'étude des livraisons et consommations d'énergie) :

SGF (Statistique générale de la France). 1878-1899. *Annuaire statistique de la France*. 19 Volumes.

SGF (Statistique générale de la France). 1901-1945. *Annuaire statistique*. Vol. 20e vol. (1900)-55e vol. (1939) ; 56e vol. (1940/1945).

SGF. 1873. *Statistique de la France : industrie, résultats généraux de l'enquête effectuée dans les années 1861-1865*, Nancy (commentée par CHANUT, J.-M., HEFFER J. MAIRESSE J. et al. 2000. L'industrie française au milieu du XIXe siècle. Les enquêtes de la Statistique générale de la France, Paris, Ed. EHESS. 215 p.)

Statistique générale de la France (SGF). [en ligne] [réf. du 5 avril 2012]. Disponible sur la toile : http://www.insee.fr/fr/insee-statistique-publique/bibliotheque/tableaux_sgf/tableaux.asp?domaine=terr

- SIEFERLE, R. P. 2001. *The Subterranean Forest : Energy Systems and the Industrial Revolution*. Cambridge, The White Horse Press. 242 p.
- SITRAM (Système d'Information sur les TRANsports de Marchandises), Database from French Transport Ministry. 2006.
- SMIL, V. 1999. "Crop Résidues : Agricultures's largest Harvest", *BioScience* 49 (4), April, p 299-308.
- SMIL, V. 2002. "Energy resources and uses: A global primer for the twenty-first century", *Current History*, March, p. 126-131.
- SMIL, V. 2008. *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*. Cambridge, The MIT Press. xi + 480 p.
- SMITH, F. E. 1968. "The international biological program and the science of ecology", *Proc Natl Acad Sci U S A*. 60(1), May, p. 5–11.
- SNCU. 2008. *Enquête Nationale de Branche sur les réseaux de chaleur et de froid : Restitution des statistiques portant sur l'année 2005*. 17 p.
- SOCIETE DES TRANSPORTS PETROLIERS PAR PIPE-LINE (TRAPIL). 1963. *Pipeline Le Havre-Paris*. Paris, Impr. Keller. 60 p.
- SOCIETE DES TRANSPORTS PETROLIERS PAR PIPE-LINE (TRAPIL). 1972. *Réseau de pipelines Le Havre-Paris*. Paris, Impr. Keller. 20 p.
- SODDY F. 1924. *Cartesian economics: the bearing of physical science upon state stewardship*. Hendersons, 32 p.
- SOUGY, N., VERLEY, P. 2008. *La première industrialisation : 1750-1880*. Documentation Française n° 8061. Jan.-fév. 63 p.
- STAFFORD N. 2010. "The changing notion of food : The pioneers of nutrition research determined the energy content of food and also helped to overturn misconceptions about various diseases that plagued humankind", *Nature* 468. 23/30 Déc., p. S16-17.
- STEFFEN W. et al. 2011. "The Anthropocene: From Global Change to Planetary Stewardship" *Ambio* 40. p. 739–761.
- STEINHART J.S. et STEINHART C. E. 1974. "Energy use in the US food system", *Science* 184 (4134), avril, p. 312.
- Syndicat National des fabricants de sucre en France. 1919. "Annuaire sucrier", *Le journal des fabricants de sucre*.
- SYNDICAT NATIONAL DES FABRICANTS DE SUCRE EN FRANCE. 1919. *Annuaire sucrier*. Série à partir de 1878 (à la bibliothèque nationale de la France).
- TAILLET, R., VILLAIN, L. 2009. *Dictionnaire de physique*. 2e éd. Bruxelles, De Boeck. XII-741 p.
- TANSLEY, A. G. 1935. "The use and abuse of vegetational concepts and terms", *Ecology* 16, p. 284-307.
- TARBE DE VAUXCLAIRS, J. B. 1835. *Dictionnaire des travaux publics, civils, militaires et maritimes, considérés dans leurs rapports avec la législation, l'administration et la jurisprudence ; à l'usage des ingénieurs de tous les services publics, ...* . Paris, Carilian-Goeury. p. 568.

TARR, J. A., DUPUY, G. (eds.). 1988. *Technology and the Rise of the Networked City in Europe and America*. Philadelphie, Temple University Press. 339 p.

TF1. 1975. Evry-Gregy : carrefour du gaz, Télévision Française 1, le 1 mars 1975, 12min51s, Institut National Audiovisuel. En ligne : ina.fr

The National Archives. [n.d.]. British Ecological Society. Catalogue of British Ecological Society GB 1858 BES, p. 38. [réf. du 5 juillet 2011], Format PDF : <http://www.nationalarchives.gov.uk/nra/onlinelists/GB1858%20BES.pdf>

TOUZERY, M. 1995. *Atlas de la Généralité de Paris au XVIIIe siècle : un paysage retrouvé*. Comité pour l'histoire économique et financière de la France. Paris, Impr. Nationale. 176 p.

TRASNEL, J.P., MAIZIA, M., RODITI, D. 2004. "Habitat et développement durable : les perspectives offertes par le solaire thermique", *Les Cahiers du CLIP*, 16 sept., pp. 3-46.

TRANSEAU E. N. 1926. "The accumulation of energy by plants", *The ohio journal of Science* 26 (1), p. 1-10

TREANTON, K. 2008. *Units of Measurement and conversion factors*. International Energy Agency. IEA Energy Statistics Division. Mexico déc. 21p. (support Powerpoint).

U. S. Energy Information Administration, International Energy Annual. 2006. [en ligne] [réf. du 3 déc. 2010]. Disponible sur la toile : <http://www.eia.gov>.

UN Department of Economics and Social Affairs/Population Division. 2006. *World urbanization prospects: The 2005 revision*. United Nations, New-York. 210 p. [en ligne] [réf. du 20 fév. 2013]. Format PDF : http://www.un.org/esa/population/publications/WUP2005/2005WUPHighlights_Final_Report.pdf.

UNESCO, UNEP. 1976. Programme on Man and the Biosphere (MAP). Task force on integrated ecological studies on human settlements, within the framework of Project 11. MAP report series No. 31. Paris 2-6 june 1975. [réf. du 17 oct. 2011]. Format PDF : <http://unesdoc.unesco.org/images/0002/000204/020463eb.pdf>

UNITED NATIONS (UN). 1982. Concepts and Methods in Energy Statistics, with Special Reference to Energy Accounts and Balances-A Technical Report. Department of International economic and social affaires, Technical Reports, Series F. N° 29. New-York, United Nations. 138 p. [réf. du 5 April. 2009]. Format PDF : http://og.ssb.no/ogwebpage/oldmanuals/SeriesF_29E.pdf.

UNITED NATIONS (UN). 1987. Energy Statistics Definitions Units of Measure and Conversion Factors. Department of International economic and social affaires, Technical Reports, Series F. N° 44. New-York, United Nations. 74 p. [réf. du 5 April. 2009]. Format PDF : http://og.ssb.no/ogwebpage/oldmanuals/SeriesF_44E.pdf.

UNKOVICH M. BALDOCK J. FORVES M. 2010. "Chapter 5 - Variability in Harvest Index of Grain Crops and Potential Significance for Carbon Accounting: Examples from Australian Agriculture", *Advances in Agronomy* 105, p. 173-219.

- VAN DEN BERGH, J., VERBRUGGEN, H. 1999. « Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the 'ecological footprint' », *Ecological Economics* 29, p. 61–72.
- VERLEY, P. 1992. "Annuaire statistique de l'économie française aux XIXe et XXe siècles", *Histoire & Mesure* 7 (3-4), p. 351-355.
- VERNADSKY W. 2002. *La biosphère*. Paris, Seuil. [1ère éd. française, Paris, Félix Alcan, 1929]. 281 p.
- VIASEVA. Association des réseaux de chaleur en France. www.viaseva.org.
- VILLE DE PARIS. 2007. *Plan parisien de lutte contre le dérèglement climatique. Plan climat de Paris*. Annexe de la délibération. DEVE 2007-116. Adopté par le Conseil de Paris le 1er octobre 2007. 59 p.
- VITOUSEK, P. M., EHRLICH, P. R., EHRLICH, A. H. et al. 1986. "Human Appropriation of the Products of Photosynthesis", *BioScience* 36 (6), p. 368-373.
- VIVIEN, F.-D. 1997 "L'économie et l'écologie entre science et idéologie", *Nature Sciences Sociétés* 5(4), Oct.-Dec., p.12-22.
- VIVIEN, F.-D. 2007. "La pensée économique française dans l'invention de l'environnement et du développement durable", *Responsabilité & Environnement* 46, avril, 5 p.
- VIVIEN, F.-D., MUXART, T. 2011. "Vie de la recherche - Le comité scientifique "Sociétés, environnement et développement durable" du programme Environnement, vie et sociétés du CNRS (1999-2002) : une esquisse de bilan", *Natures Sciences Sociétés* 19, p. 40-49.
- VOIES NAVIGABLES DE FRANCE (VNF). 2007. *Voie Navigable d'Europe- Edition 2007* (cartes). Béthune, Direction de la Communication. 1 p.
- WARREN-RHODES, K., KOENIG, A. 2001. "Escalating Trends in the Urban Metabolism of Hong Kong : 1971-1997", *Ambio* 30 (7), p. 429-438.
- WEISZ H., KRAUSMANN, F., CHRISTOF, A. et al. 2006. "The physical economy of the European Union: Cross-country comparison and determinants of material consumption", *Ecological Economics*, 58, p. 676-698.
- WEISZ H., STEINBERGER J. K. 2010. "Reducing energy and material flows in cities", *Current opinion in Environmental Sustainability* 2, p. 185-192.
- WEISZ, H., KRAUSMANN, F., AMANN, C., EISENMENGER, N., ERB, K.-H., HUBACEK, K., FISCHER-KOWALSKI, M. 2006. "The physical economy of the European Union: Cross-country comparison and determinants of material consumption", *Ecological Economics* 58, p. 676– 698.
- WIEDMANN, T. 2008. "A first empirical comparison of energy footprints embodied in trade — MRIO versus PLUM", *Ecological Economic*, 68 (7), p. 1975-1990.
- WILLIOT J.-P. 2003. "La respiration des gazomètres ou la consommation de gaz manufacturé à Paris de 1860 à 1960", *Flux* 51 (1), p. 83-88.
- WILLIOT, J.-P. 1999. *Naissance d'un service public, Le gaz à Paris*. Institut d'Histoire de l'Industrie. Paris, Editions Rive Droite. 778 p.

WOLMAN, A. 1962. *Water resources: A report to the Committee on Natural Resources*. Washington, D.C. ,National Research Council (U.S.). Committee on Natural Resources.

WOLMAN, A. 1965. "The Metabolism of Cities", *Scientific American* 213, Sept. p 178-190.

WOLMAN, A. 1966. "The metabolism of cities", in *Cities : a Scientific American Book*. New-York, Alfred A Knopf. 211 p.

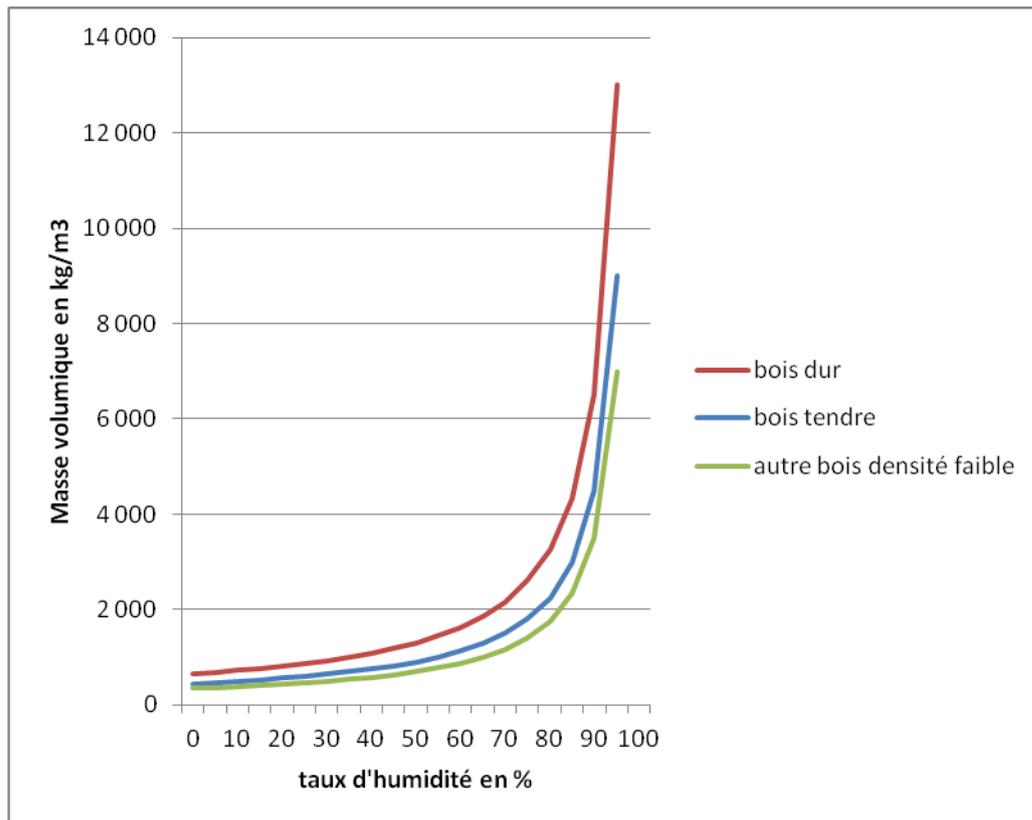
WORONOFF, D. (dir.). 1990. *Forges et Forêts*. Paris, Ed. de l'EHSS. 263 p.

WORONOFF, D. 1998. *Histoire de l'industrie en France: du XVIe siècle à nos jours*. Paris, Seuil. 674 p.

Annexes

Annexe 1. Masse volumique de bois selon les essences et selon le taux d'humidité

Annexe 3.2. Comportement de la masse volumique et du pouvoir calorifique du bois selon l'humidité.



| Famille d'essence | Humidité | Contenu énergétique (1) | | | | Masse volumique (1) (kg/ m3) |
|----------------------------|----------|-------------------------|-------|--------|--------|---------------------------------|
| | | kWh / t | tep/t | GJ/t | GJ/st | |
| bois tendres (résineux) | 0% | 5 000 | 0,43 | 18,060 | 8,127 | 450 |
| | 20% | 3 900 | 0,33 | 13,860 | 7,762 | 560 |
| | 30% | 3 320 | 0,28 | 11,952 | 7,683 | 643 |
| | 50% | 2 200 | 0,19 | 7,980 | 7,182 | 900 |
| Bois moyens | 0% | 5 000 | 0,43 | 18,060 | 9,933 | 550 |
| | 20% | 3 900 | 0,33 | 13,860 | 9,563 | 690 |
| | 30% | 3 320 | 0,28 | 11,952 | 9,391 | 786 |
| | 50% | 2 200 | 0,19 | 7,980 | 8,778 | 1100 |
| Bois durs (feuillus) | 0% | 5 000 | 0,43 | 18,060 | 11,739 | 650 |
| | 20% | 3 900 | 0,33 | 13,860 | 11,227 | 810 |
| | 30% | 3 320 | 0,28 | 11,952 | 11,098 | 929 |
| | 50% | 2 200 | 0,19 | 7,980 | 10,374 | 1300 |

(1)Calculé avec les formules présenté sur le site comme ci-dessous:

PCI en kWh/t(E%) = (PCI (0%) x (100 - E) / 100) - 6 x E (E=taux d'humidité en pourcentage)

Masse volumique (en kg / m3) : Mv (E%) = Mv (0%) x (1 + E / (100 - E))

- bois tendres, de masse volumique plus faible (essentiellement des résineux) : sapin, épicéa, peuplier, douglas;
- bois moyens : châtaignier, aulne, pin maritime, pin sylvestre;
- bois durs, de masse volumique plus élevée (essentiellement des feuillus) : hêtre, charme, chêne, frêne.

Source : Observatoire de l'Energie-DGEMP, en ligne, [2009] <http://www.developpement-durable.gouv.fr/energie/statisti/tbb/note-methodologique.htm> ; ADEME, 2001.

Annexe 2. Ouverture et fermeture des usines à gaz de la CPECG entre 1818 et 1880

| Usine | Terrain occupé par les usines en 1880 | Localisation des usines | 1828 | | 1841 | | 1856 | | 1858 | 1861 | 1863 | 1880 |
|---------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------------------------------------|------|
| | | | En nombre de cornues | | | | | | | | En quantité de la houille consommée | |
| Usine à gaz | en hectare | Selon le périmètre spatial | nb | % | nb | % | nb | % | % | % | % | % |
| Trudaine | // | ville de Paris avant 1860 | 70 | 38 | 99 | 17,7 | 151 | 8,1 | | | | |
| Grand Prieuré | // | ville de Paris avant 1860 | 7 | 3,8 | 86 | 15,4 | 283 | 15,3 | | | | |
| Poissonnière | // | ville de Paris avant 1860 | 53 | 28,8 | 79 | 14,1 | 259 | 14 | | | | |
| Ternes | 5,4 | Zone annexée en 1860 | 54 | 29,3 | 120 | 21,4 | 390 | 21 | | | | |
| Vaugirard | 6,9 | Zone annexée en 1860 | - | - | 57 | 10,2 | 270 | 14,6 | | | | |
| Belleville | 1,4 | Zone annexée en 1860 | - | - | 35 | 6,3 | 224 | 12,1 | | 50,3 | 55,9 | 65 |
| Ivry | | Zone annexée en 1860 | - | - | 54 | 9,6 | 192 | 10,4 | | | | |
| Passy | 5,2 | Zone annexée en 1860 | - | - | 30 | 5,4 | 85 | 4,6 | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|--|------|----------------------|----------------------------------|--|---------------------------|--|--|-----|-----|------|----|----|
| St-Mandé | 9 | Zone annexée en 1860 | | | | | | | | | | |
| Villette | 16 | Zone annexée en 1860 | | | | | | | | 49,7 | 29 | 25 |
| Boulogne | 2,6 | Banlieue | | | | | | | | | | 10 |
| Batignolles | - | Banlieue | | | | | | | | | | |
| St-Denis I | 0,7 | Banlieue | | | | | | | | | | |
| Maison-Alfort | 6,8 | Banlieue | | | | | | | | | | |
| Total | 62,8 | - | 184 | | 560 | | 1854 | 100 | | | | |
| Part de production faite dans la zone annexée en % | - | - | 29,3 (approximativement 30 %) | | 52,9 (valeur non retenue) | | 62,6 (selon le contrat avec la municipalité) | | 100 | 90 | | |

Source : d'après Williot, 1999 (en gris foncé : usines fermée, pas encore ouvertes, en gris claire : usines dont le terrain est acquis)

Annexe 3. Consommation de la houille et production des sous produits de l'industrie gazière en France entre 1920 et 1945

| | Houille en kt : a | Coke dispo. pour la vente en kt : a | Goudron dérivé en kt : a | Gaz vendu en million de m ³ : a | Rendement de gaz en m ³ /t | Coke en % | Goudron en % : b | Houille en PJ | Coke en PJ | Goudron en PJ | Gaz en PJ | Rendement global : c |
|------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|-----------|------------------|---------------|------------|---------------|-----------|----------------------|
| 1920 | 4581 | 1881 | 231 | 1178 | 257,1 | 0,41 | 0,05 | 128,27 | 52,67 | 1,92 | 20,73 | 0,59 |
| 1921 | 4757 | 2285 | 225 | 1452 | 305,2 | 0,48 | 0,05 | 133,20 | 63,98 | 1,80 | 25,56 | 0,69 |
| 1922 | 4815 | 2338 | 231 | 1515 | 314,6 | 0,49 | 0,05 | 134,82 | 65,46 | 1,82 | 26,66 | 0,70 |
| 1923 | 4978 | 2472 | 236 | 1589 | 319,2 | 0,50 | 0,05 | 139,38 | 69,22 | 1,80 | 27,97 | 0,71 |
| 1924 | 5076 | 2451 | 243 | 1710 | 336,9 | 0,48 | 0,05 | 142,13 | 68,63 | 1,82 | 30,10 | 0,71 |
| 1925 | 5030 | 2471 | 237 | 1796 | 357,1 | 0,49 | 0,05 | 140,84 | 69,19 | 1,79 | 31,61 | 0,73 |
| 1926 | 5041 | 2456 | 232 | 1849 | 366,8 | 0,49 | 0,05 | 141,15 | 68,77 | 1,75 | 32,54 | 0,73 |
| 1927 | 4922 | 2345 | 232 | 1849 | 375,7 | 0,48 | 0,05 | 137,82 | 65,66 | 1,79 | 32,54 | 0,73 |
| 1928 | 4767 | 2279 | 235 | 1897 | 397,9 | 0,48 | 0,05 | 133,48 | 63,81 | 1,87 | 33,39 | 0,74 |
| 1929 | 4803 | 2364 | 237 | 1996 | 415,6 | 0,49 | 0,05 | 134,48 | 66,19 | 1,88 | 35,13 | 0,77 |
| 1930 | 4761 | 2265 | 237 | 1996 | 419,2 | 0,48 | 0,05 | 133,31 | 63,42 | 1,89 | 35,13 | 0,75 |
| 1931 | 4648 | 2234 | 234 | 2023 | 435,2 | 0,48 | 0,05 | 130,14 | 62,55 | 1,91 | 35,60 | 0,77 |
| 1932 | 4385 | 2107 | 225 | 1996 | 455,2 | 0,48 | 0,05 | 122,78 | 59,00 | 1,95 | 35,13 | 0,78 |
| 1933 | 4298 | 2048 | 224 | 2007 | 467,0 | 0,48 | 0,05 | 120,34 | 57,34 | 1,98 | 35,32 | 0,79 |
| 1934 | 4095 | 1950 | 216 | 1980 | 483,5 | 0,48 | 0,05 | 114,66 | 54,60 | 2,00 | 34,85 | 0,80 |
| 1935 | 3972 | 1901 | 212 | 1928 | 485,4 | 0,48 | 0,05 | 111,22 | 53,23 | 2,03 | 33,93 | 0,80 |

| | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|-----|------|-------|------|------|--------|-------|------|-------|------|
| 1936 | 3878 | 1859 | 206 | 1913 | 493,3 | 0,48 | 0,05 | 108,58 | 52,05 | 2,02 | 33,67 | 0,81 |
| 1937 | 3800 | 1804 | 197 | 1914 | 503,7 | 0,47 | 0,05 | 106,40 | 50,51 | 1,97 | 33,69 | 0,81 |
| 1938 | 4334 | 2188 | 218 | 1894 | 437,0 | 0,50 | 0,05 | 121,35 | 61,26 | 1,91 | 33,33 | 0,80 |
| 1939 | 3781 | 1820 | 191 | 1685 | 445,6 | 0,48 | 0,05 | 105,87 | 50,96 | 1,92 | 29,66 | 0,78 |
| 1940 | 3397 | 1547 | 159 | 1430 | 421,0 | 0,46 | 0,05 | 95,12 | 43,32 | 1,78 | 25,17 | 0,74 |
| 1941 | 3405 | 1416 | 154 | 1733 | 509,0 | 0,42 | 0,05 | 95,34 | 39,65 | 1,72 | 30,50 | 0,75 |
| 1942 | 3469 | 1321 | 164 | 1817 | 523,8 | 0,38 | 0,05 | 97,13 | 36,99 | 1,80 | 31,98 | 0,73 |
| 1943 | 3490 | 1253 | 158 | 1837 | 526,4 | 0,36 | 0,05 | 97,72 | 35,08 | 1,72 | 32,33 | 0,71 |
| 1944 | 2060 | 451 | 94 | 1266 | 614,6 | 0,22 | 0,05 | 57,68 | 12,63 | 1,73 | 22,28 | 0,64 |
| 1945 | 2831 | 773 | 124 | 1631 | 576,1 | 0,27 | 0,04 | 79,27 | 21,64 | 1,66 | 28,71 | 0,66 |
| 1946 | 4327 | 1607 | 187 | 2255 | 521,1 | 0,37 | 0,04 | 121,16 | 45,00 | 1,64 | 39,69 | 0,71 |

Source : d'après la statistiques publiées par l'ATG dans : Aide-mémoire de l'industrie du gaz, Paris, 1953, p. 392, cité par : Barjot, 1991 (a) (b. La part de goudron est fixée à 5 % de la production totale en termes de matière ; c. Production totale de coke, de gaz et de goudron, par rapport à la houille distillée en termes énergétiques).

Annexe 4. Extraction des mines d'uranium en France : mines en activité au cours de l'année 1965 et nombre total d'années en fonction

| Code de département | Tonne | Date du début | Date de la fin | Nombre d'années en marche | Tonne/an |
|---------------------|-------|---------------|----------------|---------------------------|----------|
| 63 | 0.695 | 1964 | 1965 | 1 | 1 |
| 12 | 1.4 | 1963 | 1979 | 16 | 0 |
| 87 | 280 | 1959 | 1987 | 28 | 10 |
| 87 | 615 | 1958 | 1998 | 40 | 15 |
| 87 | 159 | 1963 | 1985 | 22 | 7 |
| 56 | 400 | 1960 | 1971 | 11 | 36 |
| 56 | 48 | 1963 | 1968 | 5 | 10 |
| 56 | 146 | 1961 | 1978 | 17 | 9 |
| 56 | 11 | 1956 | 1977 | 21 | 1 |
| 56 | 20 | 1962 | 1965 | 3 | 7 |
| 56 | 72 | 1960 | 1982 | 22 | 3 |
| 56 | 114 | 1964 | 1975 | 11 | 10 |
| 56 | 49 | 1963 | 1981 | 18 | 3 |
| 56 | 58 | 1962 | 1971 | 9 | 6 |
| 15 | 1350 | 1958 | 1981 | 23 | 59 |
| 58 | 109 | 1956 | 1975 | 19 | 6 |
| 58 | 2 | 1955 | 1976 | 21 | 0 |
| 19 | 1846 | 1960 | 1993 | 33 | 56 |
| 19 | 23.8 | 1958 | 1978 | 20 | 1 |
| 19 | 115 | 1959 | 1981 | 22 | 5 |
| 23 | 29.3 | 1956 | 1980 | 24 | 1 |
| 23 | 90 | 1956 | 1982 | 26 | 3 |
| 23 | 205 | 1954 | 1989 | 35 | 6 |
| 23 | 17 | 1957 | 1965 | 8 | 2 |
| 23 | 14.4 | 1958 | 1969 | 11 | 1 |
| 23 | 87 | 1957 | 1967 | 10 | 9 |
| 23 | 149 | 1959 | 1984 | 25 | 6 |
| 87 | 4542 | 1951 | 1992 | 41 | 111 |

| | | | | | |
|-------|-------|------|------|----|------|
| 87 | 1069 | 1965 | 1990 | 25 | 43 |
| 87 | 186 | 1949 | 1981 | 32 | 6 |
| 87 | 9450 | 1953 | 1995 | 42 | 225 |
| 87 | 748 | 1955 | 1995 | 40 | 19 |
| 42 | 16 | 1953 | 1978 | 25 | 1 |
| 42 | 6919 | 1955 | 1980 | 25 | 277 |
| 87 | 326 | 1964 | 1979 | 15 | 22 |
| 87 | 2124 | 1955 | 1972 | 17 | 125 |
| 87 | 60 | 1954 | 1973 | 19 | 3 |
| 34 | 72 | 1959 | 1990 | 31 | 2 |
| 34 | 14630 | 1959 | 1997 | 38 | 385 |
| 48 | 2283 | 1956 | 1988 | 32 | 71 |
| 48 | 1280 | 1958 | 1987 | 29 | 44 |
| 48 | 427 | 1962 | 1988 | 26 | 16 |
| 71 | 54.5 | 1950 | 1986 | 36 | 2 |
| 71 | 128.5 | 1955 | 1986 | 31 | 4 |
| 71 | 60.87 | 1947 | 1984 | 37 | 2 |
| 71 | 623 | 1954 | 1989 | 35 | 18 |
| 71 | 12.4 | 1950 | 1981 | 31 | 0 |
| 79 | 665 | 1958 | 1970 | 12 | 55 |
| 44 | 3570 | 1965 | 1991 | 26 | 137 |
| 79 | 295 | 1959 | 1983 | 24 | 12 |
| 85 | 48 | 1957 | 1986 | 29 | 2 |
| 79 | 1989 | 1955 | 1991 | 36 | 55 |
| 85 | 1989 | 1955 | 1991 | 36 | 55 |
| 44 | 2056 | 1955 | 1990 | 35 | 59 |
| 49 | 2056 | 1955 | 1990 | 35 | 59 |
| Total | - | - | - | - | 2083 |

Source : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), MIMAUSA (Mémoire et Impact des Mines d'urAniUm : Synthèse et Archives), [en ligne] [30 Sept. 2010], disponible sur la toile : <http://mimaubdd.irsn.fr/Mimausa/>.

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau I.1. La production mondiale de l'écosystème terrestre comparée à la consommation énergétique technique mondiale entre 1950 et 2000 | 10 |
| Tableau 2.1. Types de flux d'entrée dans l'AFM..... | 63 |
| Tableau 2.2. Relevé des indicateurs synthétiques | 70 |
| Tableau 2.3. Variables de la base SITRAM | 83 |
| Tableau 2.4. Sources des données utilisées pour la matrice origine et destination des produits énergétiques consommés dans la région Île-de-France..... | 85 |
| Tableau 2.5. Coefficients pondérateurs utilisés pour évaluer les combustibles enregistrés dans la base SITRAM en termes énergétiques..... | 85 |
| Tableau 2.6. Parts sensibles au climat en % dans la consommation du secteur industrie et résidentiel-tertiaire selon les énergies..... | 92 |
| Tableau 3.1. Sources de données principales pour la consommation de combustibles et d'énergie secondaire entre 1801 et 1950 | 105 |
| Tableau 3.1.2. Masse volumique et pouvoir calorifique selon les essences et selon l'humidité | 114 |
| Tableau 3.2. Facteurs de conversion utilisés pour l'octroi | 115 |
| Tableau 3.3. Densité et densité énergétique des combustibles | 126 |
| Tableau 3.4. Pouvoir calorifique de la tonne de vapeur produite par la CPCU..... | 128 |
| Tableau 3.5. Rapport entre la disponibilité alimentaire et la consommation finale entre 1969 et 1991 en France | 132 |
| Tableau 3.6. % du budget des ménages pour le repas hors domicile et coefficients d'ajustement de repas hors domicile utilisés pour la période entre 1971 et 1991 | 133 |
| Tableau 3.7. Taux de matière sèche pour les produits alimentaires | 136 |
| Tableau 3.8. Pouvoir calorifique de chaque groupe d'aliments en matière sèche | 137 |
| Tableau 4.1. Part de la consommation de charbon de terre à l'intérieur de Paris sur la consommation totale de l'industrie gazière entre 1828 et 1880 (%). | 144 |
| Tableau 4.2. Usines électriques dans la région Île-de-France en 1963..... | 149 |
| Tableau 4.3. État des chaudières de la CPCU et du Sycatom entre 1965 et 1969..... | 151 |
| Tableau 4.4. Production de la CPCU en 2006..... | 152 |
| Tableau 4.5. Sous-produits de la distillation de charbon de terre en % de la masse totale de la matière première | 158 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 4.6. Rendement de la production de gaz et de coke et des sous-produits par la consommation d'une tonne de houille selon différents produits au début du XIXe siècle | 161 |
| Tableau 4.7. Détermination du rendement de production de gaz en % entre 1821 et 1945 | 164 |
| Tableau 4.8. Matières premières utilisées par Gaz de France de la région parisienne entre 1950 et 1976 | 167 |
| Tableau 4.9. Travail produit par une machine à vapeur par la combustion d'un kg de charbon, exprimé en dynamode | 171 |
| Tableau 4.10. Rendement thermique selon trois hypothèses d'amélioration technologique | 171 |
| Tableau 4.11. Rendement moyen en production brute des usines dans la région parisienne en 1945 | 172 |
| Tableau 4.12. Rendement de production thermique dans la région Île-de-France entre 1915 et 2005 | 174 |
| Tableau 4.12.2. Rendement de production et part de combustible dans la vapeur produite de la CPCU. | 180 |
| Tableau 4.13. Indice de récolte selon diverse sources..... | 189 |
| Tableau 4.14. Rendements de produits dits énergétiques en 2007 | 194 |
| Tableau 4.15. Tableau de synthèse des coefficients d'extraction selon le principal type d'industrie alimentaire en Île-de-France (en matière fraîche)..... | 194 |
| Tableau 4. 16. Coefficients primaires pour la consommation de produits animaux en Mcal de fourrage consommé par Mcal de carcasse obtenue et en tonne de fourrage par tonne de carcasse..... | 196 |
| Tableau 5.1. Consommation de combustibles en moyenne décennale par habitant par an de la ville de Paris entre 1801 et 1943 selon l'octroi de Paris..... | 203 |
| Tableau 5.2. Arrivage de bois comparé à la consommation de Paris recensée par l'octroi entre 1808 et 1845 | 208 |
| Tableau 5.3. Consommation de charbon de terre de Paris et de la Seine entre 1825 et 1845 | 209 |
| Tableau 5.4. Importation, consommation finale et intermédiaire de charbon de terre de la banlieue et de la Seine comparées à la consommation parisienne en kt/an, kg/hab/an et en GJ/hab/an entre 1838 et 1911 (Écart entre Seine et Paris : consommation de la Seine par rapport à celle de Paris, écart entre Banlieue et Paris : consommation de la banlieue par rapport à celle de Paris)..... | 213 |
| Tableau 5.6. Consommation d'électricité de Paris et de la banlieue, et du département de la Seine entre 1923 et 1964. | 223 |
| Tableau 5.7. Consommation de charbon de terre de Paris et de la banlieue entre 1838 et 1911 (IDF : Île-de-France, SEO : Seine-et-Oise, SEM : Seine-et-Marne)..... | 230 |
| Tableau 5.8. Consommation finale de combustibles en kg/hab/an de la région Île-de-France entre 1955 et 2005 (Les données sur la consommation finale sont continues entre 1951 et le juin 1968 par les bulletins trimestriels de l'INSEE, 1952-1965, 1966-1970, qu'on présente ici en partie. Elles sont ensuite disponibles tous les 1 à 5 ans depuis 1971) | 243 |
| Tableau 5.11. Consommation de fourrage par tête de chevaux à Paris entre 1850 et 1912 | 247 |
| Tableau 5.9. La consommation alimentaire de produits végétaux de Paris entre 1820 et 1896, en kg/hab/an | 251 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 5.10. La consommation alimentaire de produits animaux de la région Île-de-France entre 1820 et 1991 (base de données non corrigée)..... | 252 |
| Tableau 5.10. 2. La consommation alimentaire parisienne en GJ/hab/an et en kcal/hab/an entre 1820 et 1991 | 254 |
| Tableau 6.1. Distance depuis les lieux d'origine du bois consommé à Paris | 287 |
| Tableau 6.2. Consommation des différentes catégories de bois sur la consommation totale finale de l'énergie de Paris, valeur moyenne entre 1801 et 1810 (%) | 288 |
| Tableau 6.3. Production par bassin des combustibles minéraux solides en France en 1811 | 290 |
| Tableau 6.4. Bateaux de charbon ayant emprunté le canal de Briare et lieux de chargement en 1825 | 292 |
| Tableau 6.5. Part d'approvisionnement en charbon de terre selon l'origine du charbon de terre entre 1810 et 1838 | 294 |
| Tableau 6.5.2. Tableau de synthèse de la part de contribution de chaque provenance et de la distance pondérée de l'approvisionnement en bois et en charbon de terre de Paris en km pour 1800..... | 295 |
| Tableau 6.6. Estimation de % de chaque provenance dans le charbon de terre consommée à Paris pour les années 1870-1875 | 299 |
| Tableau 6.6.2. Tableau de synthèse de la part de contribution de chaque provenance et de la distance pondérée de l'approvisionnement en bois et en charbon de terre de Paris en km pour 1870-1880 (pour le bois, les valeurs de 1800 sont reprises) | 302 |
| Tableau 6.7. Production de houille dans l'espace de la Communauté du Charbon et de l'Acier en million de tonnes entre 1936 et 1958 | 304 |
| Tableau 6.8. Origines de premier ordre des combustibles consommés dans la région parisienne pour 1960-1965 : Part de chaque provenance dans la consommation énergétique totale primaire de chaque groupe d'énergie de Paris (Part dans le charbon de terre, part dans le pétrole, part dans le gaz naturel en %), Part de chaque provenance dans la DET en % | 309 |
| Tableau. 6.9. Provenances des produits pétroliers consommés dans la région parisienne pour 1960-1965 | 310 |
| Tableau 6.9.2. Tableau de synthèse de la part de contribution de chaque provenance et de la distance pondérée de l'approvisionnement en pétrole, en charbon de terre et en gaz naturel (haut) et en électricité hydraulique de Paris en km pour 1965 (bas)..... | 311 |
| Tableau 6.10. Transport de produits pétroliers par le pipeline Le Havre-Paris et Donges-Metz, pipelines approvisionnant Paris en kt/an en 2006 | 313 |
| Tableau 6.10.2. Tableau de synthèse de la part de contribution de chaque provenance et de la distance pondérée de l'approvisionnement en charbon de terre, en pétrole, en combustible fissile et en électricité hydraulique de Paris en km pour 2006..... | 316 |
| Tableau 6.11. Distance moyenne de chaque source énergétique, distance moyenne d'approvisionnement pondérée de chaque période et distance maximale de provenance contribuant à plus de 0,5% à l'approvisionnement en source énergétique de Paris | 319 |

Tableau 6.12. Contribution de chaque territoire pour chaque type d'énergie secondaire dans la consommation parisienne de cette énergie dans les années 1870, durant les années 1960 et 1965 et en 2006, % (exceptionnellement le gaz inclut le gaz naturel, qui est du gaz importé) 325

Liste des figures

| | |
|--|-----|
| Figure 1.1. Flux d'énergie et de matière dans l'approche tropodynamique de H.T. ODUM. | 25 |
| Figure 1.2. Diagramme schématique de la tropodynamie de flux d'énergie écologique..... | 27 |
| Figure 1.3. Le métabolisme de la ville selon Wolman | 30 |
| Figure 1.4. Écosystème bruxellois selon Duvignaud en 1974..... | 33 |
| Figure 1.5. Le Métabolisme de Hong Kong dans les années 1970..... | 36 |
| Figure 1.6. Le Métabolisme de la Ville de Francfort-sur-le Main et son hinterland | 36 |
| Figure 1.7. Écosystème belge : Analyse de flux dans la chaîne de production énergétique en 1979 et dans la chaîne agroalimentaire entre 1974 et 1976 | 38 |
| Figure 1.8. Le métabolisme de l'Anthroposphère et l'exemple d'analyse des flux de plastique | 40 |
| Figure 1.9. Le flux de matière du Canton de Genève, en milliers de tonnes par an en 2000. | 42 |
| Figure 2.1. Table de classification d'énergie..... | 58 |
| Figure 2.2. Schéma de l'Analyse des flux de matières..... | 62 |
| Figure 2.3. Représentation du bilan énergétique de la France en 2007 | 66 |
| Figure 2.4. Schéma du bilan énergétique en comparaison avec l'Analyse des flux de matières | 69 |
| Figure 2.5. Schéma de l'analyse des flux de matières et d'énergie utilisée dans la thèse | 70 |
| Figure 2.6. Chaîne de l'approvisionnement de l'énergie technique | 72 |
| Figure 2.7. Schéma d'analyse de flux d'énergie technique selon les périmètres d'études : ville de Paris, banlieue et départements périphériques | 75 |
| Figure 2.8. Schéma d'analyse de l'énergie biologique..... | 81 |
| Figure 2.9. Logique de calcul d'origine des produits importés dans la région Île-de-France..... | 88 |
| Figure 2.10. Degré de jour unifié calculé pour Paris | 92 |
| Figure 3.1. Périmètres administratifs de la ville de Paris avant 1860, entre 1860 et 1929 et aujourd'hui.. | 96 |
| Figure 3.2. Territoires de Paris, de la petite couronne et de la grande couronne..... | 98 |
| Figure 3.3. Population de la région Île-de-France selon différents périmètres entre 1801 et 2006..... | 101 |
| Figure 3.4. Population de Paris 2006 définie pour la période entre 1821-1861. | 103 |
| Figure 3.5. Désignation de l'agglomération selon le découpage administratif..... | 104 |
| Figure 3.6. Les magasins généraux existant en 1893 | 109 |
| Figure 4.1. Plan schématique du réseau de distribution de gaz et de l'emplacement des six usines dans Paris en 1836, schéma des réseaux de gaz en France en 1964..... | 146 |

| | |
|---|-----|
| Figure 4.1.2. Nombre d'abonnés au gaz et à l'électricité à Paris | 148 |
| Figure 4.1.3. Nombre d'abonnés au chauffage urbain entre 1959 et 2005..... | 150 |
| Figure 4.1.4. Plan du réseau et des usines de la CPCU en 1937 | 153 |
| Figure 4.1.5. Bilan énergétique de la machine à vapeur à piston vers 1900 en calorie par minute..... | 154 |
| Figure 4.2. Atelier de distillation de l'usine à gaz de la Villette de la Compagnie Parisienne d'Eclairage et de Chauffage par le Gaz (CPECG) au milieu du XIXe siècle | 156 |
| Figure 4.3. Bilan de matières de l'industrie du gaz de houille..... | 158 |
| Figure 4.3.2. Pouvoir calorifique du charbon de terre estimé en termes de consommation énergétique finale et d'équivalent primaire en GJ/t de charbon de terre dans le département de la Seine entre 1876 et 1950 | 160 |
| Figure 4.4. Rendements des réseaux de distribution de la CPECG entre 1856 et 1904 en valeur absolue | 165 |
| Figure 4.5. Rendement du gaz manufacturé, 1847-1937 et part de la consommation des sources primaires par l'industrie gazière de l'Île-de-France, 1930-2000. | 166 |
| Figure 4.5.2. Les premiers secteurs de distribution électrique à Paris entre la fin du XIXe siècle et le début du XXe siècle et les réseaux de distribution électrique en France en 1945 | 169 |
| Figure 4.5.3. Matières premières employée pour la production d'électricité en Île-de-France entre 1910 et 2007 en % | 176 |
| Figure 4.5.4. Schéma de raccordement au réseau de chauffage urbain: raccordement au réseau de chauffage urbain en 1918, Coupe verticale de la sous-station de la CPCU en 2000 | 181 |
| Figure 4.6. Structure de la production totale brute d'électricité de la France entre 1936 et 2006..... | 184 |
| Figure 4.7. Consommation et production disponible de l'électricité dans la région parisienne entre 1938 et 2005 | 184 |
| Figure 4.7.2. Mix énergétique de l'électricité consommée en Île-de-France | 185 |
| Figure 4.7.3. Rendements de production électrique entre 1915 et 2006 | 185 |
| Figure 4.8. Chaîne de production et d'utilisation des céréales en France en 2007..... | 187 |
| Figure 5.1. Structure de la consommation de combustibles de la ville de Paris..... | 205 |
| Figure 5.2. Consommation de combustibles de la ville de Paris recensée par l'octroi en kg/hab/an et en kt/an | 205 |
| Figure 5.3. Consommation parisienne de bois selon l'octroi comparée à l'arrivage en kt/an entre 1826 et 1860..... | 208 |
| Figure 5.3. Consommation directe de charbon de terre comparée à la consommation intermédiaire du secteur gazier et électrique dans le département de la Seine entre 1838 et 1911 | 212 |
| Figure 5.4. Consommation finale (Cf) de charbon de terre de la Seine, de Paris et de la banlieue entre 1838 et 1911 | 212 |
| Figure 5.5. Production industrielle de vapeur et d'électricité dans la région Île-de-France | 214 |

| | |
|---|-----|
| Figure 5.6. Consommation finale de charbon de terre pour la production industrielle estimée pour le département de la Seine | 216 |
| Figure 5.7. Consommation finale et directe de charbon de terre du département de la Seine en GJ PCI/hab/an entre 1845 et 1959..... | 218 |
| Figure 5.7.2. Consommation directe comparée à la consommation finale et à la consommation intermédiaire (du secteur gazier et électrique) de charbon de terre de la Seine en millions de tonnes/an entre 1845 et 1959 | 218 |
| Figure 5.8. Consommation finale de gaz de Paris, de la banlieue et de la Seine en GJ/hab/an entre 1876 et 1967 | 220 |
| Figure 5.9. Consommation des combustibles par le secteur gazier en kt/an dans le département de la Seine entre 1838 et 1969 | 221 |
| Figure 5.10. Consommation d'électricité de Paris et de la Banlieue en GJ/hab/an entre 1905 et 1967 ... | 224 |
| Figure 5. 11. Consommation des combustibles en kt/an du secteur électrique en Île-de-France entre 1905 et 1967 | 224 |
| Figure 5.12. Évolution de la population communale entre 1881 et 1886, entre 1921 et 1926, entre 1962 et 1968 et entre 1999 et 2004..... | 228 |
| Figure 5.13. Répartition des résidences principales selon le type de combustibles utilisés pour le chauffage dans les logements équipés d'un chauffage central en France. | 233 |
| Figure 5.14. Consommation de produits pétroliers en kt/an dans la région Île-de-France selon le type de produits entre 1951 et 2007 | 234 |
| Figure 5.15. Consommation finale de gaz en GJ/hab/an selon les territoires définis entre 1958 et 1972 | 235 |
| Figure 5.15.2. Consommation finale d'électricité de basse tension en GJ/hab/an selon les territoires définis entre 1958 et 1972..... | 237 |
| Figure 5.16. Consommation finale d'électricité de toutes tensions en GJ/hab/an selon les territoires définis entre 1958 et 1972 | 237 |
| Figure 5.17. Consommation de combustibles (charbon de terre plus fioul) de la région parisienne en kt/an entre 1951 et 2006 | 238 |
| Figure 5. 18. Consommation de vapeur de l'agglomération parisienne, distribuée par la CPCU entre 1940 et 2006 en GJ/hab/an | 239 |
| Figure 5.18.2. Consommation de matières premières de la CPCU entre 1940 et 2006 en kt/an et en PJ/an | 241 |
| Figure 5.18.3 Mouvements aériens en milliers de mouvements d'appareils commerciaux, test de corrélation entre le nombre de mouvements aériens et la consommation de carburacteur et consommation de carburacteur estimée de la région Île-de-France | 244 |
| Figure 5.19. Nombre des chevaux à Paris et dans le département de la Seine, 1820-1920..... | 248 |
| Figure 5.19.2. Consommation en kt/an de fourrage de la ville de Paris | 249 |

| | |
|---|-----|
| Figure 5.19.3. Consommation finale alimentaire de Paris et de la région Île-de-France entre 1820 et 1991 en kg de produits frais/hab/an, en kg de MS /hab/an et en GJ/hab/an | 255 |
| Figure 5.19.4. Consommation primaire alimentaire en kg de MS/hab/an et en GJ/hab/an | 259 |
| Figure 5.20. Consommation énergétique finale totale et Demande énergétique totale de la ville de Paris en GJ PCS/hab/an entre 1801-2006..... | 261 |
| Figure 5.20.2. Comparaison entre la population, la demande énergétique totale en PJ/an et celle par habitant en GJ/hab/an de la ville de Paris et de Paris 2006 entre 1801 et 2006, avec un indice 1801 égal à 1..... | 262 |
| Figure 5. 21. Consommation énergétique finale totale et demande totale énergétique en GJ PCS/hab/an de l'agglomération entre 1801 et 2006..... | 270 |
| Figure 6.1. Consommation finale totale de produits énergétiques de Paris en kt/an entre 1801 et 2006 . | 279 |
| Figure 6.2 Consommation finale totale de produits énergétiques de Paris en kg/hab/an entre 1801 et 2006: produits fossiles et non fossiles, selon la catégorie de produits | 280 |
| Figure 6.3. Origines de l'approvisionnement en bois de Paris en 1789 | 285 |
| Figure 6.4. Arrivée d'un train de bois à Paris : au port de l'Ecole à Paris au XVIIIe siècle | 289 |
| Figure 6.5. Voie navigable depuis le bassin de la Seine en 1800, 1870, 2007, et réseaux de chemin de fer en France en 1837, 1850, 1870 | 298 |
| Figure 6.6. Transport de produits pétroliers par des pipelines entrant dans la région Île-de-France et consommation parisienne en million de tonnes, 1953-1971 | 307 |
| Figure 6.7. Parcours et trafic de transport maritime pétrolier en 2001 et entrée de produits pétroliers (pétrole brut plus raffiné) en France selon le port d'entrée en 2006 | 313 |
| Figure 6.8. Flux européens de gaz nature en milliard de m ³ au cours des années 2000 | 314 |
| Figure 6.9. Origines des sources énergétiques consommées à Paris selon les sources et selon les dates choisies de l'analyse pour le début du XIXe siècle, pour les années 1870, 1965 et 2006 | 320 |
| Figure 6.10. Distance moyenne et maximale selon les dates d'observation..... | 321 |
| Figure 6.11. Mode de transport principal de produits énergétiques dans les années 1800, 1870, en 1965 et 2006, % du total des produits consommés dans Paris et dans la région Île-de-France. | 324 |
| Figure 6.12. Contribution de chaque territoire pour chaque type d'énergie secondaire dans la consommation parisienne de cette énergie dans les années 1870, durant les années 1960 et 1965 et en 2006 | 326 |
| Figure 6.13. Comparaison entre CEFT, CED, DET de la ville de Paris entre 1858 et 2006 en PJ/an..... | 328 |

Liste des annexes

| | |
|---|-----|
| Annexe 1. Masse volumique de bois selon les essences et selon le taux d'humidité..... | 367 |
| Annexe 2. Ouverture et fermeture des usines à gaz de la CPECG entre 1818 et 1880 | 369 |
| Annexe 3. Consommation de la houille et production des sous produits de l'industrie gazière en France entre 1920 et 1945 | 371 |
| Annexe 4. Extraction des mines d'uranium en France : mines en activité au cours de l'année 1965 et nombre total d'années en fonction | 373 |

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE..... | 9 |
| CHAPITRE 1. ECOLOGIE URBAINE ET ENERGIE..... | 21 |
| 1.1. Introduction..... | 21 |
| 1.2. Concepts de biosphère, d'écosystème et de flux d'énergie et de matière..... | 22 |
| 1.2.1. Du concept de la biosphère à l'analyse de flux d'énergie et de matière..... | 22 |
| 1.2.2. Flux d'énergie et de matière dans le système planétaire..... | 25 |
| 1.3. Émergence du concept de métabolisme urbain (1950 – 1981)..... | 28 |
| 1.4. Du métabolisme industriel au métabolisme de la société industrielle (1983-2007)..... | 37 |
| 1.4.1. Ecologie industrielle..... | 37 |
| 1.4.2. Economie écologique..... | 43 |
| 1.5. Métabolisme de la société : Transition socioécologique..... | 46 |
| 1.5.1. Métabolisme social..... | 46 |
| 1.5.2. Recherche d'un modèle du système interactif société-nature..... | 49 |
| 1.5.3. Ecologie territoriale..... | 52 |
| 1.6. Conclusion..... | 53 |
| CHAPITRE 2. METHODOLOGIE : BILAN DE MATIERE ET D'ENERGIE..... | 57 |
| 2.1. Préalable : système énergétique, énergie, source et ressource..... | 57 |
| 2.2. Analyse des flux de matières et d'énergie..... | 59 |
| 2.2.1. Perspective de long terme du métabolisme énergétique urbain..... | 59 |
| 2.2.2. Analyse des flux de matières et d'énergie : méthode de référence..... | 60 |
| 2.2.3. Bilan de l'énergie technique..... | 64 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 2.3. | Définition de la méthode utilisée dans cette thèse | 67 |
| 2.3.1. | Cadre d'analyse et indicateurs | 67 |
| 2.3.2. | Flux d'énergie technique et biologique | 71 |
| 2.4. | Données de transport de marchandises et méthode de traitement | 82 |
| 2.4.1. | Données de transport de marchandises | 82 |
| 2.4.2. | Traitement de données de transport marchandise, SITRAM, pour l'analyse du bassin d'approvisionnement énergétique de Paris en 2006 | 84 |
| 2.4.3. | Série temporelle pour l'énergie technique et l'ajustement de la variable climatique | 90 |
| 2.5. | Conclusion | 93 |
| | | |
| | CHAPITRE 3. CONSOMMATION ENERGETIQUE PARISIENNE : PERIMETRE, POPULATION ET DONNEES HISTORIQUES ET STATISTIQUES SUR LA CONSOMMATION ENERGETIQUE, XIXE – XXIE SIECLES | 95 |
| 3.1. | Périmètre d'étude, population et méthode | 95 |
| 3.2. | Consommation énergétique parisienne, 1801-1950 | 104 |
| 3.2.1. | Consommation parisienne de combustibles selon l'octroi de Paris, 1801-1943..... | 106 |
| 3.2.2. | Données complémentaires | 109 |
| 3.2.3. | Consommation d'énergie secondaire..... | 117 |
| 3.3. | Consommation énergétique parisienne, 1951-2006 | 121 |
| 3.3.1. | Données entre 1951 et 1970 | 121 |
| 3.3.2. | Données entre 1970 et 2006 | 123 |
| 3.3.3. | Unités et mesures..... | 125 |
| 3.3.4. | Consommation parisienne de chauffage urbain jusqu'en 2006 | 126 |
| 3.4. | Consommation parisienne de biomasse agricole, 1801- 2006..... | 128 |
| 3.4.1. | Consommation de biomasse alimentaire entre 1801 et 1943..... | 128 |
| 3.4.2. | Données après 1969..... | 131 |
| 3.4.3. | Détermination du pouvoir calorifique | 134 |
| 3.5. | Conclusion | 137 |
| | | |
| | CHAPITRE 4. MATIERES PREMIERES ET GEOGRAPHIE DES SECTEURS DE TRANSFORMATION | 141 |

| | | |
|--|---|------------|
| 4.1. | Introduction | 141 |
| 4.2. | Géographie des secteurs de transformation | 142 |
| 4.2.1. | Secteur gazier de la région Île-de-France | 143 |
| 4.2.2. | Secteur de l'électricité dans la région Île-de-France..... | 147 |
| 4.2.3. | Secteur de la production de vapeur..... | 149 |
| 4.3. | Des combustibles à l'énergie : techniques de transformation énergétique dans la région Île-de-France..... | 154 |
| 4.3.1. | Du charbon de terre au gaz | 155 |
| 4.3.2. | Electricité..... | 168 |
| 4.3.3. | Chauffage urbain | 177 |
| 4.4. | Coefficients primaires pour l'énergie importée de l'extérieur de la région Île-de-France | 182 |
| 4.5. | Matière première et transformation de la biomasse | 186 |
| 4.5.1. | Extraction de la biomasse | 186 |
| 4.5.2. | Filières de transformation des produits végétaux : taux d'extraction | 190 |
| 4.5.3. | Matières premières consommées dans les filières de production de viande | 195 |
| 4.6. | Conclusion | 197 |
| CHAPITRE 5. BILAN DE L'ENERGIE ET DES MATIERES..... | | 201 |
| 5.1. | Introduction | 201 |
| 5.2. | Consommation de combustibles de la ville de Paris entre 1801 et 1943 | 202 |
| 5.2.1. | Consommation de combustibles de la ville de Paris recensés par l'octroi | 202 |
| 5.2.2. | Estimation de la consommation parisienne selon le périmètre de «Paris 2006» | 205 |
| 5.3. | Consommation énergétique du département de la Seine entre le début du XIXe siècle et 1967 | 210 |
| 5.3.1. | Consommation de charbon de terre du département de la Seine entre 1838 et 1967 | 210 |
| 5.3.2. | Consommation de gaz et d'électricité du département de la Seine entre 1838 et 1969 | 219 |
| 5.4. | Consommation énergétique de la région Île-de-France du milieu du XXe siècle jusqu'en 2006 | 225 |
| 5.4.1. | Consommation des départements périphériques de la région Île-de-France depuis le milieu du XIXe siècle au milieu du XXe siècle..... | 225 |

| | |
|---|----------------|
| 5.4.2. Croissance de consommation des départements périphériques de la région Île-de-France depuis le milieu du XIXe siècle jusqu'en 2006 | 231 |
| 5.4.3 Consommation énergétique totale finale de l'agglomération parisienne | 241 |
| 5.5. Consommation finale et primaire de biomasse alimentaire | 246 |
| 5.5.1. Consommation de fourrages des chevaux à Paris entre 1801 et 1943 | 246 |
| 5.5.2. Consommation finale de biomasse alimentaire | 249 |
| 5.5.3. Consommation primaire de biomasse alimentaire | 256 |
| 5.6. Vue d'ensemble et discussion | 260 |
| 5.6.1. Consommation énergétique de la ville de Paris | 260 |
| 5.6.2. Changement de ressources..... | 265 |
| 5.6.3. Mise en parallèle du métabolisme énergétique des territoires de l'agglomération parisienne... | 268 |
| 5.7. Conclusion | 275 |
| CHAPITRE 6. AIRES D'APPROVISIONNEMENT ENERGETIQUE DE LA REGION PARISIENNE : XIXE – XXIE SIECLES | 277 |
| 6.1. Méthode et sources de données..... | 277 |
| 6.2. Bassin d'approvisionnement de Paris au début du XIXe siècle | 283 |
| 6.3. Bassin d'approvisionnement de Paris du milieu du XIXe siècle au milieu du XXe siècle | 295 |
| 6.3.1. Bassin d'approvisionnement de Paris pendant la deuxième moitié du XIXe siècle | 295 |
| 6.3.2. Bassin d'approvisionnement de Paris pendant la première moitié du XXe siècle..... | 302 |
| 6.4. Bassin d'approvisionnement de Paris entre 1946 et 2006 | 305 |
| 6.4.1. Bassin d'approvisionnement de Paris entre 1946 et la fin des années 1960 | 305 |
| 6.4.2. Bassin d'approvisionnement de Paris de la fin des années 1960 jusqu'en 2006 | 312 |
| 6.5. Résultat d'ensemble..... | 318 |
| 6.6. Conclusion | 329 |
| CONCLUSION GENERALE | 333 |
| SOURCES ET BIBLIOGRAPHIE..... | 341 |

| | |
|--------------------------------|------------|
| ANNEXES..... | 366 |
| LISTE DES TABLEAUX..... | 377 |
| LISTE DES FIGURES..... | 381 |
| LISTE DES ANNEXES..... | 385 |