

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/346604865>

Bilan de flux de matières de la région Ile-de-France en 2015

Technical Report · May 2018

CITATIONS

3

READS

1,070

2 authors:



Vincent Augiseau

CitéSource

25 PUBLICATIONS 265 CITATIONS

SEE PROFILE



Sabine Barles

Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne

191 PUBLICATIONS 3,426 CITATIONS

SEE PROFILE



*Bilan de flux de matières
de la région Ile-de-France en 2015*

Vincent Augiseau
Sabine Barles
Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Laboratoire Géographie-Cités, UMR 8504, équipe C.R.I.A.

Mai 2018

Etude réalisée dans le cadre du Contrat d'engagement 1700679 entre la Région Ile-de-France et le CNRS - Délégation régionale pour la circonscription Ile-de-France Ouest et Nord - Laboratoire Géographie-Cités (UMR 8504)

Avec la contribution d'Eunhye Kim pour les flux de combustibles et émissions associées

Sommaire

1. Méthode et principaux indicateurs.....	3
1.1. Méthode.....	3
1.2. Indicateurs.....	7
2. Bilan de flux de matières	8
3. Analyse synthétique des flux.....	11
3.1. Stocks : une faible croissance unitaire mais un fort renouvellement	11
3.2. Une extraction utilisée de ressources primaires faible et en chute	15
3.3. Déchets : un potentiel de substitution aux ressources naturelles insuffisant mais des enjeux réels	18
3.4. Une consommation d'énergie en très grande majorité non renouvelable et importée	22
3.5. Une consommation de produits alimentaires importante et une gestion des déchets engendrant une altération des cycles biogéochimiques	24
Conclusion.....	26
Bibliographie.....	29
ANNEXES.....	31
Annexe 1. Bilan de flux de matières hors flux indirects, Ile-de-France, 2015, Mt (t/hab)	31
Annexe 2. Indicateurs de consommation de matières par catégories de produits consommés, Ile-de-France, 2015, kt et t/hab.....	32
Annexe 3. Demande totale énergétique en GJ PCS/hab/an de l'agglomération parisienne entre 1801 et 2006 (hors consommation de la sidérurgie) selon Kim (2013)	33
Annexe 4. Empreinte azote du Francilien moyen en 2006 (généralisation de la notion d'équivalent habitant) (flux en kgN/habitant/an).....	34
Annexe 5. Empreinte azote du Francilien moyen dans un scénario hypothétique de généralisation à tout le bassin de la Seine d'un système agricole basé sur le cahier des charges de l'agriculture biologique et sur un régime alimentaire demitarien	35
Annexe 6. Empreinte azote d'un habitant de l'agglomération parisienne en 2013	36
Annexe 7. Empreinte azote d'un habitant de l'agglomération parisienne en 2053	37

1. Méthode et principaux indicateurs

1.1. Méthode

La comptabilité des flux est réalisée à partir de la méthode présentée dans le guide *Comptabilité des flux de matières dans les régions et les départements* publié en 2014 par le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (CGDD - SOeS) et rédigé par Pascale Repellin, Benoît Duret et Sabine Barles. Ce guide, qui s'appuie sur des études menées par les auteurs sur les cas de l'Ile-de-France, de la Bourgogne et de Midi-Pyrénées, est issu de la méthode développée par l'Office Statistique de l'Union Européenne (Eurostat) à partir de 2001. Quelques adaptations ponctuelles y ont été apportées en s'appuyant sur deux études récentes menées sur l'Ile-de-France par Laurent Georgeault (2015) et Vincent Augiseau (2017).

La comptabilité consiste en une mesure de différentes catégories de flux de matières générés par la population, les activités, les productions et les artefacts de la région Ile-de-France. Cet ensemble est dénommé système socio-économique. La figure 1 ci-dessous présente les différents éléments pris en compte.

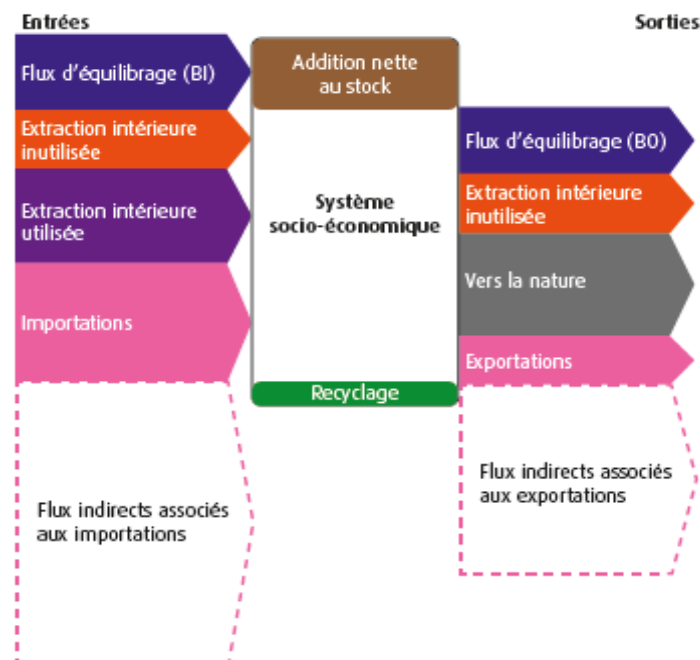


Figure 1. Schéma de principe de la comptabilité des flux de matières

Source : Alterre Bourgogne in CGDD - SOeS (2014)

L'extraction intérieure utilisée comprend, dans le cas de cette étude, la biomasse agricole ou sylvicole récoltée (donc végétale) ou issue de la chasse, les minéraux non métalliques et le pétrole extraits du sous-sol. La région n'extrait pas de minéraux métalliques et la biomasse issue de la pêche est marginale. Les sources de données sont présentées dans le tableau 1.

L'extraction intérieure inutilisée regroupe les « matériaux extraits ou déplacés [...] qui ne sont pas adaptés ou destinés à être utilisés » (Eurostat, 2001, p. 20, traduction personnelle). Sont inclus dans ce bilan la biomasse agricole et forestière inutilisée (résidus de culture laissés sur les champs notamment), les matériaux excavés issus du bâtiment et des travaux publics (déblais), de même que l'extraction en carrières inutilisée (morts-terrains). Les estimations s'appuient sur des coefficients issus d'études du ministère de l'Écologie réalisées à l'échelle nationale pour la biomasse et l'extraction en carrières) et de l'étude sur les déchets du bâtiment et des travaux publics du Conseil Régional d'Ile-de-France pour les déblais (voir les sources de données dans le tableau 1). En considérant que ces matières ne sont ni transformées ni utilisées, les flux sont identiques en entrée et

en sortie. Néanmoins, les matériaux excavés (souvent dénommés terres) qui ne sont pas réemployés sont considérés comme des déchets par la réglementation. Aussi les différents modes de gestion de ces matières sont distingués afin de pouvoir identifier les déchets selon la réglementation.

Les importations et exportations comprennent les matières brutes, les produits semi-finis et les produits finis en provenance ou à destination du reste de la France ou d'autres pays. Ces flux sont renseignés dans la base de données SitraM constituée par le ministère de l'Ecologie. Les données sur le fret ferré intérieur ne sont plus enregistrées dans cette base depuis 2007 suite à l'ouverture à la concurrence de cette activité. Aussi, les flux acheminés par fret ferré sont estimés à partir des dernières données disponibles (moyenne des années 2005 et 2006), en considérant que les parts de ce mode dans les importations et exportations totales ont peu évolué. Les déchets importés par la région sont également comptabilisés.

Les flux indirects liés aux importations comprennent les matières utilisées (dont les combustibles) pour produire et transporter les matières brutes et les produits importés par l'Ile-de-France. Ces matières ont été consommées à l'extérieur de la région et ne sont donc pas comprises dans les flux directs (importations). Par exemple, une voiture importée en Ile-de-France représente un flux entrant d'environ une tonne, mais sa production et son transport jusqu'au lieu de déchargement ont nécessité cinq à sept tonnes de minerais métalliques et non métalliques et deux à trois tonnes de combustibles fossiles (CGDD-SOeS, 2014). Les **exportations** génèrent de même des flux indirects. Ces flux sont ici estimés à partir de coefficients issus du ministère de l'Ecologie (CGDD-SOeS, 2014). Les déplacements de matières inutilisées associés aux produits importés ou exportés (dans les mines notamment) ne sont pas inclus dans les flux indirects, du fait du manque de données permettant de les estimer. L'estimation des flux indirects fait l'objet de travaux en cours de l'Eurostat qui pourraient permettre prochainement de mieux comptabiliser ces éléments.

Les émissions vers la nature, émissions locales ou exportées, comprennent ici les substances émises dans l'air, dans l'eau (rejets des stations d'épuration des collectivités et des industries ou autres activités non raccordées au réseau public), dans les sols (déchets enfouis), ainsi que les flux dissipatifs liés notamment à l'usure des chaussées routières, à l'utilisation d'engrais, au compostage ou à l'épandage de matières organiques et de boues de stations d'épuration. Les déchets exportés par la région pour être enfouis sont également comptabilisés. Ils sont distingués des déchets exportés pour être recyclés qui sont comptés dans le recyclage externe. Concernant les rejets dans l'eau, par simplification et ainsi que dans Barles (2007), seules les matières organiques rejetées sont incluses.

Concernant les émissions dans l'air, sont prises en compte :

- les émissions de dioxyde de carbone générées par la consommation de combustibles fossiles¹,
- les émissions de dioxyde de carbone résultant de l'incinération des déchets²,
- les émissions dans l'air résultant de la méthanisation de déchets,
- les émissions de dioxyde de carbone de procédés des sites de production de matériaux de construction³,
- les autres émissions dans l'air⁴.

Les émissions dans l'air ainsi estimées sont très proches des estimations d'Airparif pour l'année 2012 : respectivement 41 513 kt en 2015 contre 41 214 kt en 2012. Les sources de données sont présentées dans le tableau 1.

¹ Estimées à partir de la teneur en carbone et en hydrogène des combustibles. Cette approche, adoptée par Georgeault (2015), permet d'estimer de façon cohérente et sans double compte à la fois les émissions de dioxyde de carbone d'une part et les émissions de vapeur d'eau et les consommations de dioxygène associées d'autre part (flux d'équilibre).

² Estimées à partir du contenu en carbone des déchets incinérés (voir note précédente).

³ Les productions de ciment, de plâtre et de matériaux céramiques (briques, tuiles et autres produits en terre cuite) génèrent des émissions de dioxyde de carbone contenu dans les minéraux non métalliques transformés et surtout dans le calcaire (carbonate de calcium CaCO₃). Ces émissions résultent des procédés de fabrication.

⁴ Selon les estimations réalisées par Airparif pour l'année 2012 et qui comprennent les gaz suivants : SO₂, NO_x, NH₃, CH₄, N₂O, composés organiques volatils non méthaniques, poussières en suspension.

Les matières recyclées font l'objet d'une comptabilité séparée dans la mesure où il est considéré qu'elles ne constituent ni des entrées ni des sorties du système étudié. Recyclage local et recyclage hors de l'Ile-de-France sont distingués. L'utilisation de déchets pour l'aménagement d'installations de stockage est considérée ici comme une valorisation matière distincte du recyclage.

Les éléments d'équilibrage comprennent les flux de dioxygène (entrée), de dioxyde de carbone et vapeur d'eau (sortie) associés à la respiration humaine et animale, de dioxygène (entrée) et vapeur d'eau (sortie) liés à la consommation de combustibles fossiles, ainsi que l'eau incorporée dans les bétons produits en Ile-de-France (les autres flux d'eau ne sont pas compris dans le bilan). Ces flux, qui permettent d'équilibrer le bilan et de calculer l'addition nette au stock, sont estimés à partir de coefficients (voir sources dans le tableau 1).

L'addition nette au stock est calculée par soustraction de l'ensemble des flux sortants à l'ensemble des flux entrants, flux d'équilibrage compris et hors flux indirects. On considère en effet, selon le principe de conservation de la masse, que tout ce qui est entré durant une année dans le territoire en est ressorti ou s'est ajouté au stock que constituent les ouvrages bâtis, équipements et produits comme les véhicules dont la durée d'utilisation est supérieure à un an.

Les matières ont été réparties selon les catégories et sous-catégories présentées dans le tableau 2.

Tableau 1. Principales sources de données

Elément de l'analyse de flux de matières	Données
Entrées	
Importations	<p>Toutes matières hors combustibles fossiles : base SitraM 2015, ajout du fret ferré en France selon moyenne données SitraM 2005 et 2006</p> <p>Produits pétroliers : consommation apparente selon base selon Eider pour l'année 2015</p> <p>Carburéacteur : coefficients issus du <i>Guide des facteurs d'émissions</i> de l'ADEME (2007) cités dans Georgeault (2015) et appliqués aux émissions de CO₂ des aéroports Charles De Gaulle et Orly en 2015 selon la DGAC</p> <p>Charbon : base SitraM 2015</p> <p>Gaz naturel : <i>Le bilan du gaz naturel en France en 2015</i> de CGDD-SOeS, conversion en masse selon coefficients issus de la <i>Calculatrice de conversion des unités énergétiques</i> de l'ATEE (2015)</p> <p>Déchets : sources citées dans la partie Génération et traitement des déchets solides</p>
Extraction intérieure utilisée	<p>Biomasse agricole :</p> <p>Céréales, protéagineux, oléagineux : <i>Bilan de la campagne agricole millésimée 2015 en Île-de-France</i> de l'Agreste IdF</p> <p>Fourrages annuels, prairies non permanentes et surfaces en herbe, cultures industrielles, pommes de terre, cultures légumières, cultures fruitières : surfaces cultivées en 2014 selon <i>Mémento de la statistique agricole</i> de l'Agreste IdF, rendements en 2010 selon la même source et selon <i>Statistique Agricole Annuelle. Résultat définitif 2015, semi-définitif 2016</i> de l'Agreste</p> <p>Pailles de céréales et cultures non alimentaires : données issues de Georgeault (2015) sur l'année 2010</p> <p>Chasse : données issues de Georgeault (2015) sur l'année 2010</p> <p>Biomasse sylvicole : <i>Enquête de branche - Exploitations forestières</i> de l'Agreste sur 2015, conversion en masse selon coefficients issus de Barles (2007)</p> <p>Minéraux non métalliques : base de données S3IC (SIGIC) de la DRIEE sur l'année 2014</p> <p>Pétrole : base EIDER sur l'année 2009</p>
Extraction intérieure inutilisée	<p>Matériaux excavés issus du bâtiment et des travaux publics : estimations d'Augiseau (2017) issues de l'enquête du Conseil régional pour le PREDEC (2015) sur l'année 2010</p> <p>Extraction de biomasse agricole et sylvicole inutilisée, extraction des carrières inutilisée : coefficients issus de CGDD-SOeS (2013) appliqués à l'extraction utilisée</p>
Flux d'équilibrage en entrée	<p>Dioxygène pour la respiration humaine : population de référence (moyenne au 1^{er} janvier 2015 et 1^{er} janvier 2016 : 12 073 940 hab) selon INSEE et coefficients issus de Georgeault (2015)</p> <p>Dioxygène pour la respiration animale : cheptel en 2014 selon <i>Mémento de la statistique agricole</i> de l'Agreste IdF et coefficients issus de Georgeault (2015)</p> <p>Dioxygène pour la consommation de combustibles fossiles : coefficients issus du <i>Guide des facteurs d'émissions</i> de l'ADEME (2007) cités dans Georgeault (2015) et appliqués aux consommations de gaz naturel, carburéacteur, super, gazole, fuel, GPL, butane, propane, houille</p> <p>Dioxygène pour l'incinération des déchets : coefficients issus du <i>Guide des facteurs d'émissions</i> de l'ADEME (2007) cités dans Georgeault (2015) et appliqués aux masses incinérées selon les sources citées dans la partie Génération et traitement des déchets solides</p>

Elément de l'analyse de flux de matières	Données
	Eau incorporée dans les bétons : coefficient selon Eurostat (2012) appliqué aux productions de bétons selon UNICEM (2016)
Sorties	
Exportations	
Emissions vers la nature exportées	Sources citées dans la partie Génération et traitement des déchets solides
Exportations hors déchets	Toutes matières hors combustibles fossiles : base SitraM 2015, ajout du fret ferré en France selon moyenne données SitraM 2005 et 2006 Combustibles fossiles hors charbon : pas d'exportation prise en compte Charbon : base SitraM 2015
Emissions vers la nature locales	
Génération et traitement des déchets solides	DMA : <i>La gestion des déchets ménagers et assimilés en IdF. Données 2015</i> de l'ORDIF Déchets du BTP : <i>Etat des lieux PRPGD – Installations franciliennes de collecte, valorisation et traitement des déchets du BTP</i> du Conseil régional IdF (2018) pour l'année 2015 DAE : <i>Etat des lieux des déchets d'activités économiques (hors service public)</i> du Conseil régional IdF (2018) pour l'année 2015 REP : <i>Les filières à responsabilité élargie du producteur en IdF - Données 2013-2014</i> de l'ORDIF Métaux : <i>Recyclage des déchets métalliques franciliens. Données 2015</i> de l'ORDIF Déchets solides générés par les sites de production de matériaux : base IREP pour l'année 2015
Emissions dans l'air	Incinération des déchets : coefficients issus du <i>Guide des facteurs d'émissions</i> de l'ADEME (2007) cités dans Georgeault (2015) et appliqués aux masses incinérées Dioxyde de carbone issu de la consommation de combustibles fossiles : coefficients issus du <i>Guide des facteurs d'émissions</i> de l'ADEME (2007) cités dans Georgeault (2015) et appliqués aux consommations de gaz naturel, carburacteur, super, gazole, fuel, GPL, butane, propane, houille Emissions de dioxyde de carbone de procédés des sites de production de matériaux de construction : coefficients issus d'Augiseau (2017) appliqués aux émissions déclarées dans la base IREP pour 2015 Autres émissions dans l'air : <i>Inventaire régional des émissions en Ile-de-France. Année de référence 2012</i> d'Airparif (2016)
Rejets dans l'eau	Matières organiques rejetées par les stations d'épuration : données issues de <i>RETREAU SPECTIVE 2015</i> du SIAAP adaptés pour l'IdF selon Barles (2007) Matières organiques rejetées par les industries non raccordées au réseau public : masse issue de Barles (2007)
Flux dissipatifs	Flux dissipatifs liés à l'utilisation d'engrais : <i>Enquête sur les livraisons d'engrais en France Métropolitaine</i> (campagne 2015/2016) de l'UNIFA Flux dissipatifs liés au compostage des déchets (hors boues de stations d'épuration) : données sur le compostage d'après sources citées dans la partie Génération et traitement des déchets solides Flux dissipatifs liés à l'épandage et au compostage de boues de stations d'épuration : quantités de boues produites dans les stations d'épuration en IdF selon base EIDER pour l'année 2014 et coefficients selon des données issues de <i>RETREAU SPECTIVE 2015</i> de la SIAAP Flux dissipatifs liés à l'usure des chaussées routières : masse issue d'Augiseau (2017) pour l'année 2013
Extraction intérieure inutilisée	Idem en entrée
Flux d'équilibrage en sortie	Vapeur d'eau et dioxyde de carbone issus de la respiration humaine et pour la respiration animale : idem dioxygène pour la respiration humaine et pour la respiration animale Vapeur d'eau issue de la consommation de combustibles fossiles : idem dioxygène pour la consommation de combustibles fossiles
Recyclage	
Recyclage local et valorisation matière locale	Sources citées dans la partie Génération et traitement des déchets solides
Recyclage externe et valorisation matière externe	

Source : voir dans le texte

Tableau 2. Catégories et sous-catégories de matières

Catégorie	Sous-catégorie
Biomasse agricole et produits alimentaires	/
Biomasse forestière	Bois d'œuvre (bâtiment et travaux publics)
	Bois énergie
	Bois pour l'industrie (dont papier-carton)
Combustibles fossiles et produits dérivés	Plastiques pour le bâtiment et les travaux publics
	Bitumes et enrobés bitumineux (bâtiment et travaux publics)
	Combustibles fossiles
	Produits dérivés
Minéraux non métalliques et produits à dominante non métallique - secteurs du bâtiment et des travaux publics	Granulats
	Verre pour le bâtiment et les travaux publics
	Autres minéraux non métalliques et produits à dominante non métallique pour le bâtiment et les travaux publics
Minéraux non métalliques et produits à dominante non métallique - autres activités	Verre hors bâtiment et travaux publics
	Autres minéraux non métalliques et produits à dominante non métallique
Minéraux métalliques et produits principalement métalliques	Produits métalliques pour le bâtiment et les travaux publics
	Minerais métalliques et produits principalement métalliques hors bâtiment et travaux publics
Autres produits	Mélange de produits n'entrant pas dans une catégorie spécifique
	Colis, échafaudages et autres produits liés aux importations ou exportations de matières
	Produits chimiques et engrais minéraux

Source : adapté de CGDD - SOeS (2014)

1.2. Indicateurs

L'analyse des flux s'appuie sur des indicateurs calculés à partir des différentes catégories de flux comptabilisées.

La consommation apparente de matières représente les matières consommées par le système socio-économique au sens classique du terme et correspond à la consommation nette intérieure du territoire. Elle est égale à la somme de l'extraction intérieure utilisée et des importations directes dont sont déduites les exportations directes.

La consommation apparente corrigée de matières s'apparente à l'indicateur précédent mais exclut du calcul les déchets importés et exportés, ces derniers étant considérés comme étant en dehors du système socio-économique étudié.

La consommation physique de matières complète l'indicateur précédent et représente l'ensemble des matières physiquement consommées au sein du système socio-économique étudié. En plus des éléments pris en compte dans la consommation apparente sont ajoutés les flux d'équilibrage en entrée et soustraits les flux d'équilibrage en sortie.

La consommation physique en équivalent matières premières permet d'étendre la notion de consommation en incluant l'ensemble des flux indirects, matières liées à la consommation ou engendrées par les activités économiques du territoire. A la consommation intérieure physique sont ajoutés les flux indirects liés aux importations et soustraits les flux indirects liés aux exportations.

La consommation totale de matières inclut en plus de l'indicateur précédent l'extraction intérieure inutilisée. Cet indicateur, qui traduit le mieux la mobilisation de matières générée par l'Ile-de-France, peut plus difficilement faire l'objet d'une comparaison entre territoires, du fait des diverses méthodes d'estimation de l'extraction intérieure inutilisée.

2. Bilan de flux de matières

La figure 2 présente le bilan de flux de matières de l'Ile-de-France en 2015 (le bilan hors flux indirects est présenté en Annexe 1). La figure 3 regroupe les différents indicateurs de consommation du territoire en 2015 selon les catégories de matières. Dans les cas de la consommation physique en équivalent matières premières et de la consommation totale de matières, les masses figurées en hachures se rapportent aux catégories de matières de même couleur (biomasse agricole par exemple) mais peuvent comprendre des matières d'autres natures que ces catégories (combustibles associés au transport de biomasse agricole par exemple).

Le bilan de flux de matières fait apparaître cinq caractéristiques principales du métabolisme francilien :

1. au-delà de la croissance du stock matériel (relativement faible rapportée à la population mais importante au total), l'importance du renouvellement de ce stock dans les flux entrants et sortants ;
2. le poids faible de l'extraction intérieure utilisée de matières au regard des consommations de matières et l'importance concomitante des flux indirects dans la consommation physique en équivalent matières premières ;
3. le faible potentiel de substitution que représentent les déchets solides au regard de la consommation physique en équivalent matières premières, mais des enjeux importants liés aux matières contenues dans certains déchets ;
4. la part importante que représentent les combustibles fossiles et fissiles, sources d'énergie non renouvelables, dans les consommations ;
5. l'importance de la biomasse agricole et des produits alimentaires issus de cette biomasse dans les consommations, flux liés à une activité agricole et une gestion de déchets engendrant une altération des cycles biogéochimiques.

Ces cinq caractéristiques feront l'objet d'une analyse qui se focalisera sur les pressions et impacts sur l'environnement qu'engendrent ces flux, les dimensions économiques et les jeux d'acteurs qu'impliquent la mise en œuvre d'une politique régionale d'économie circulaire faisant l'objet d'une analyse complémentaire de l'IAU IdF.

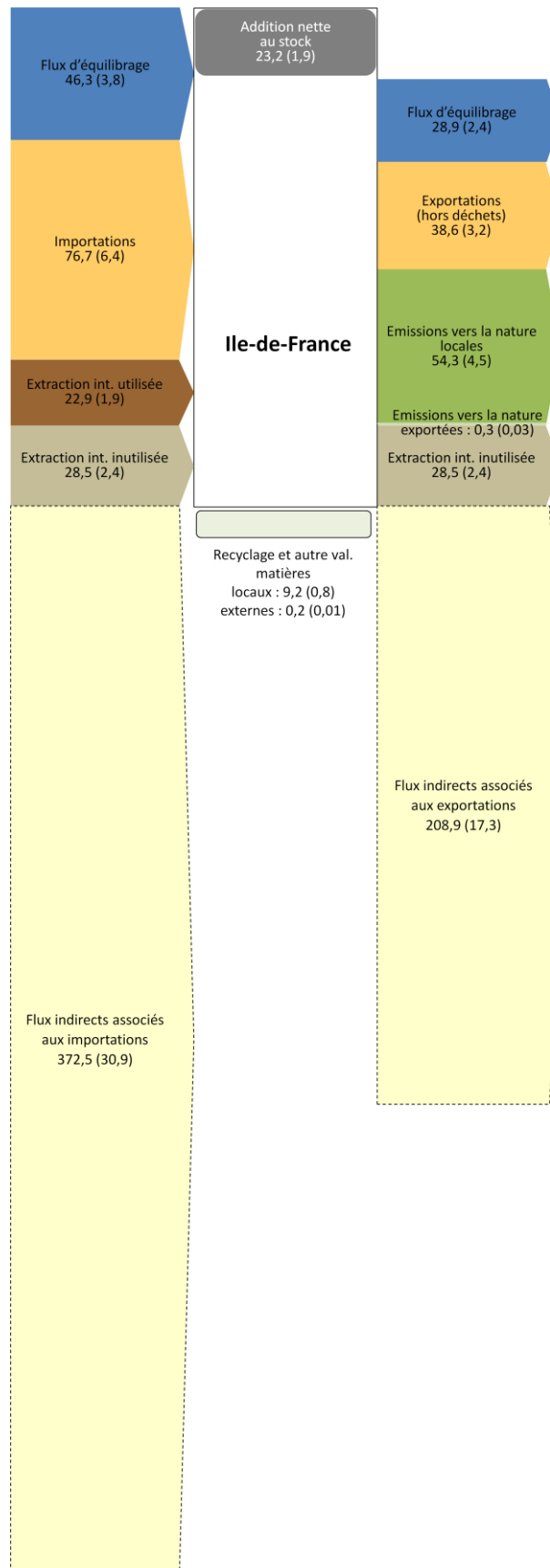


Figure 2. Bilan de flux de matières, Ile-de-France, 2015, Mt (t/hab)

Source : cette étude

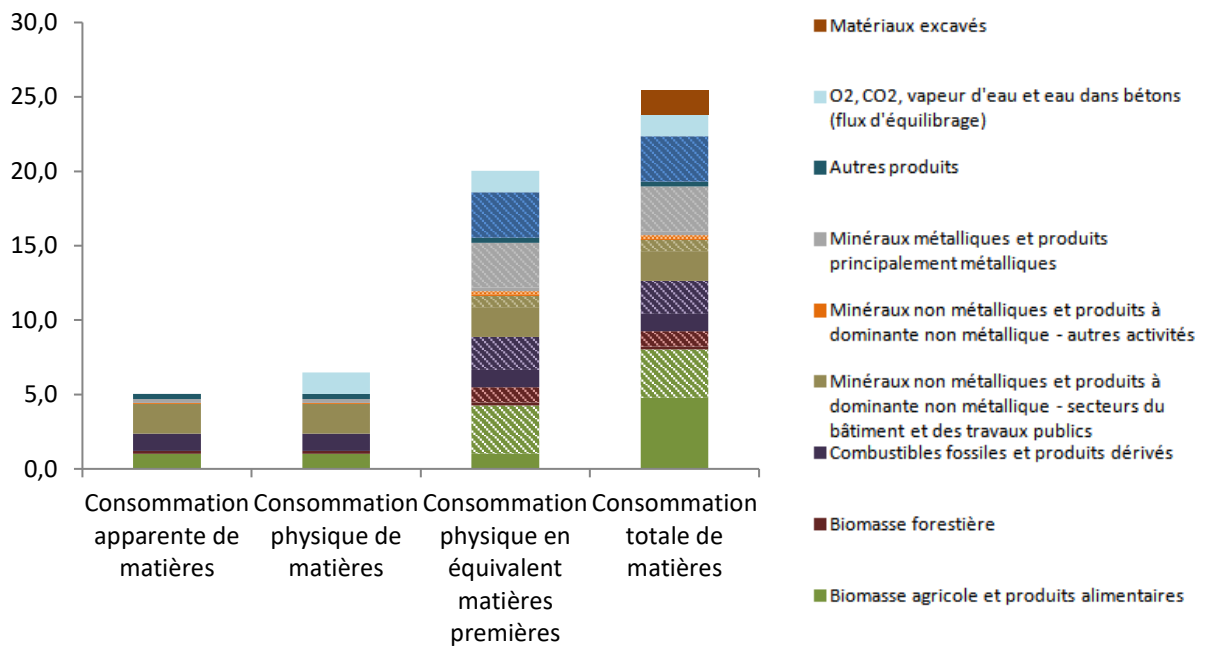


Figure 3. Indicateurs de consommation de matières et catégories de produits consommés, Ile-de-France, 2015, t/hab

NB. Les hachures correspondent aux flux indirects.

Source : cette étude

Les valeurs dont sont issues ce graphique sont présentées en Annexe 2.

Tableau 3. Principaux indicateurs du bilan de flux de matières, Ile-de-France, 2015, kt et t/hab

	kt	t/hab
Consommation apparente corrigée de matières	60 789	5,0
Consommation physique de matières	78 210	6,5
Consommation physique en équivalent matières premières	241 781	20,0
Consommation totale de matières	270 254	22,4
Addition nette au stock	23 199	1,9

Source : cette étude

3. Analyse synthétique des flux

3.1. Stocks : une faible croissance unitaire mais un fort renouvellement

Le bilan des flux de matières fait tout d'abord apparaître la faible addition nette au stock en Ile-de-France en 2015 lorsqu'elle est rapportée à la population, 1,9 t/hab de matières s'étant accumulées dans l'année au sein du système socio-économique. Ainsi que le montre la figure 4 ci-dessous, cette addition nette par habitant est faible en comparaison de celles de la région Bourgogne et de l'ensemble de la France en 2010 – notons néanmoins qu'elle s'élève au total à environ 23 millions de tonnes en Île-de-France contre 11 millions de tonnes en Bourgogne. Elle est également faible si on la rapporte à la consommation physique de matières de l'Île-de-France, moins du tiers de cette dernière contribuant à l'addition nette au stock de la région, pour des valeurs légèrement supérieures en Bourgogne et pour l'ensemble de la France.

Cette comparaison fait apparaître la spécificité de la région Ile-de-France, territoire déjà très fortement urbanisé et équipé. On observe ainsi un ralentissement marqué depuis une quinzaine d'années de l'addition nette au stock de matériaux de construction⁵, matières qui constituent huit-dixièmes de l'addition nette au stock totale en 2015. En effet, l'addition nette au stock de matériaux s'élève à 1,6 t/hab en 2015⁶, contre 2,0 t/hab en 2013 et 2,8 t/hab en 2001 (Augiseau, 2017). A celle-ci est associée une plus faible consommation physique de matériaux de construction estimée à 2,3 t/hab en 2015, contre 2,5 t/hab en 2013 et 3,4 t/hab en 2001 (Augiseau, 2017).

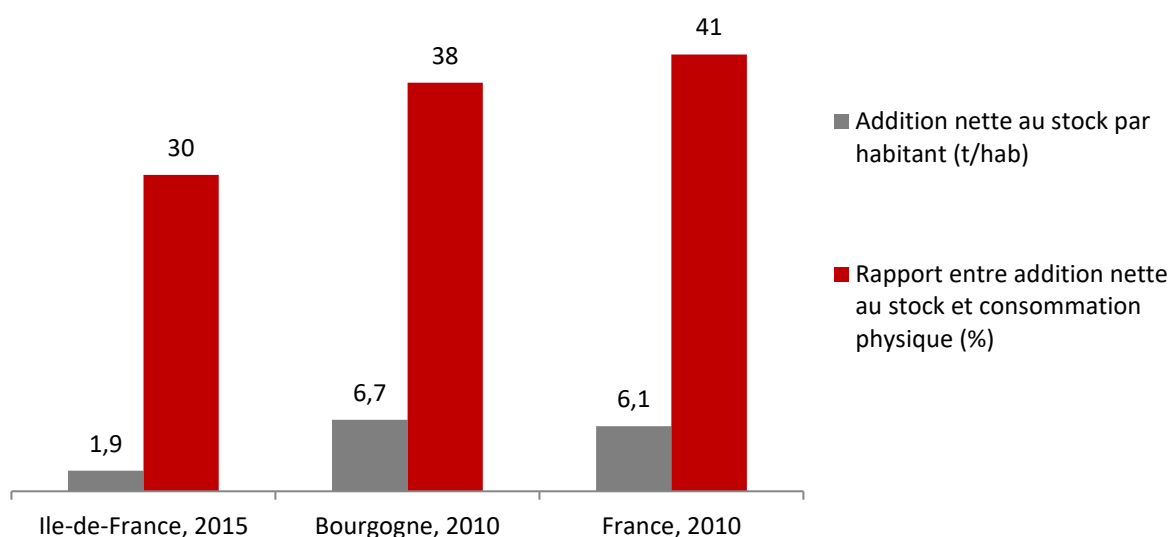


Figure 4. Addition nette au stock par habitant et rapport entre addition nette au stock et consommation physique en équivalent matières premières, Ile-de-France en 2015, Bourgogne et ensemble de la France en 2010, t/hab et %

Source : cette étude, Alterre Bourgogne (2013), CGDD - SOeS (2013)

⁵ Granulats, verre pour le bâtiment et les travaux publics, bitumes et enrobés bitumineux, autres minéraux non métalliques et produits à dominante non métallique pour le bâtiment et les travaux publics, bois d'œuvre, produits métalliques pour le bâtiment et les travaux publics, plastiques pour le bâtiment et les travaux publics.

⁶ Ces valeurs sont calculées à partir d'estimations des déchets du bâtiment et des travaux publics réalisées selon différentes méthodes pour les années 2000, 2010 et 2015 et présentent par conséquent une incertitude. Cependant, cette tendance à la baisse est cohérente si l'on considère le ralentissement de l'extension de l'espace urbanisé depuis 2000 selon le mode d'occupation du sol de l'IAU IdF.

Ainsi que le montre la figure 5 ci-dessous, la consommation physique de matières de l'Ile-de-France en 2015 est légèrement supérieure à celle estimée en 2010 par L. Georgeault (2015), et plus faible que celle estimée en 2003 par S. Barles (2007). Outre des facteurs socio-économiques influant sur la consommation des ménages et l'activité des entreprises, ainsi que la moindre croissance par habitant du stock bâti, la différence observée avec l'année 2003 s'explique notamment par des différences d'ordre méthodologique, en particulier pour la consommation de carburéacteur. En effet, l'ensemble du carburéacteur livré en Ile-de-France est pris en compte pour 2003 alors que seule la consommation lors du cycle d'atterrissage et décollage des appareils volants (cycle dit *LTO* en anglais) est comptabilisée pour les autres années (voir Georgeault, 2015).

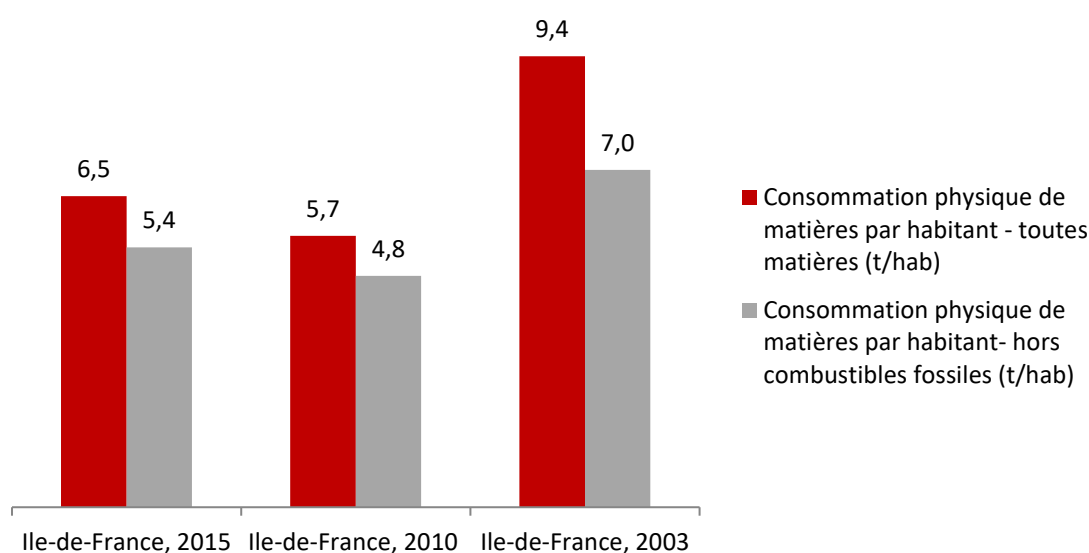


Figure 5. Consommation physique de matières par habitant pour l'ensemble des matières et hors combustibles, Ile-de-France, 2015, 2010 et 2003, t/hab

Source : cette étude, Georgeault (2015), Barles (2007)

Le bâti de l'Ile-de-France est ancien, le quart du stock contenu dans les logements et locaux d'activité tertiaire et de services (soit plus des deux tiers du stock bâti total) a été constitué avant 1914 et seulement le huitième depuis 2001. Ainsi que le montre le tableau 4 page suivante, l'Ile-de-France est riche de vastes espaces bâtis, bâtiments, réseaux de transports, d'énergie et d'eaux, qui représentent une accumulation de matières de 204 t/hab (Augiseau, 2017).

Tableau 4. Surface ou longueur et masse du stock bâti, Ile-de-France, 2013, milliers de m², km, m²/hab, m/hab, kt et t/hab

	Logements ^a	Locaux d'activité ^a	Réseau routier (dont trottoirs et tunnels)	Réseau ferré (dont tunnels)	Pistes d'aéro-dromes	Réseaux d'énergie et d'eaux	Ensemble
Surface (milliers de m ²)	908 903 ^b	367 966 ^c	317 526		11 852		
Longueur (km)			38 210	6 055		176 307	
Surface par habitant (m ² /hab)	76 ^b	31 ^c	27		1		
Longueur par habitant (m/hab)			3	0,5		15	
Stock (kt)	1 402 969	347 688	568 613	30 839	29 298	58 198	2 437 605
Stock par habitant (t/hab)	117	29	48	3	2	5	204

^a Bâtiments dont la surface la plus grande est constituée respectivement de logements ou de locaux d'activité

^b Surface hors œuvre brute comprenant 117 747 milliers de m², soit 10 m²/hab, situées en sous-sol

^c Surface hors œuvre brute comprenant 27 210 milliers de m², soit 2 m²/hab, situées en sous-sol

Source : Augiseau (2017)

Ce stock bâti est constitué principalement de minéraux non métalliques et notamment de béton. Il contient également des minéraux absents du milieu naturel régional : 3 t/hab de métaux ferreux et 0,1 t/hab de métaux non ferreux (aluminium et zinc).

Tableau 5. Stock bâti par habitant, Ile-de-France, 2013, t/hab

	Bâtiments	Réseaux de transport	Réseaux d'énergie et d'eaux	Ensemble des ouvrages
Béton	81	3	4	89
Granulats dans les réseaux de transport	0	47	0	47
Pierre	49	2	0,1	51
Brique	4	0	0	4
Autres minéraux non métalliques	4	0	0,02	4
Bois et aggloméré de bois	4	0,1	0	4
Métaux ferreux	3	0,1	0,3	3
Métaux non ferreux	0,04	0	0,03	0,1
Plastiques	0,2	0	0,03	0,2
Autres matériaux issus du pétrole	1	1	0	1
Ensemble des matériaux	146	53	5	204

Source : Augiseau (2017)

Ce stock bâti, s'il croît relativement peu, fait l'objet d'un important renouvellement. En 2015 en Ile-de-France, 2,3 t/hab de matériaux de construction hors recyclage sont destinées au développement et renouvellement des ouvrages bâtis, tandis que 1,1 t/hab de matières sont retirées du stock, dont 0,7 t/hab qui ne sont pas recyclées et sont émises vers la nature. Environ 0,05 t/hab de matériaux sont consommés mais ne sont pas mis en œuvre et constituent des déchets (excédents de chantiers comme les chutes de découpe)⁷. La figure 6 page suivante présente les flux de matériaux de construction et sorties vers la nature associées.

⁷ Selon les estimations pour 2013 issues d'Augiseau (2017).

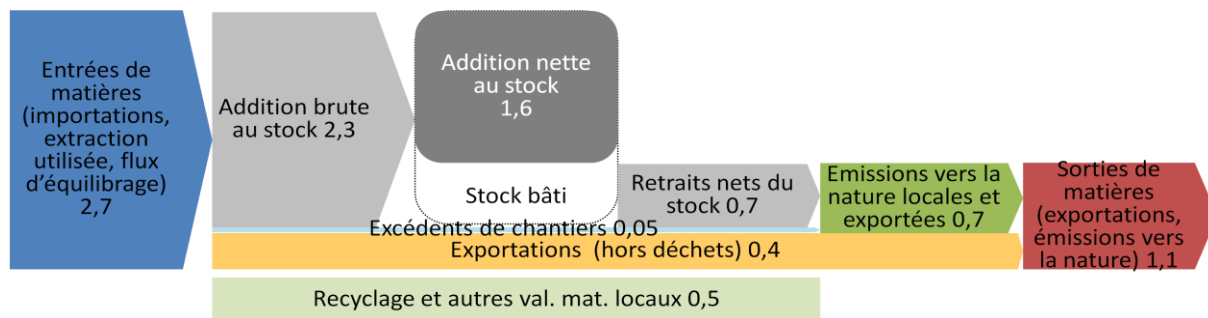


Figure 6. Flux de matériaux de construction et sorties vers la nature associées par habitant, Ile-de-France, 2015, t/hab

Source : cette étude

Les opérations de démolition-reconstruction de bâtiments engendrent près des deux tiers de ces sorties du stock. Ces opérations portent très majoritairement sur des locaux d'activité, et notamment des locaux tertiaires (Augiseau, 2017). Elles s'inscrivent alors dans un marché immobilier très concurrentiel engendrant une obsolescence rapide des locaux, obsolescence qui ne relève pas seulement de la qualité intrinsèque du bâti. Ainsi, 140 000 à 240 000 m² utiles de bureaux construits depuis 1981 pourraient chaque année devenir obsolètes d'ici 2030 en Ile-de-France (Observatoire régional de l'immobilier d'entreprise en Ile-de-France, 2013). Réhabiliter ces surfaces plutôt que les détruire permettrait de fortement limiter les flux de matières. Suivre et encadrer les opérations de démolition-reconstruction permettraient en outre d'articuler politiques urbaines visant un renouvellement urbain et politiques visant une économie circulaire⁸.

Par ailleurs, le renouvellement du réseau routier engendre le quart des sorties du stock en Ile-de-France. Cette part résulte de la configuration de l'espace urbanisé, c'est-à-dire des politiques d'aménagement passées, et varie fortement au sein de la région. A Paris, le stock contenu dans le réseau routier représente 11 t/hab et le renouvellement de ce dernier a généré 0,05 t/hab en 2013, pour des valeurs respectives en Grande Couronne de 84 t/hab et 0,5 t/hab⁹. La conception des espaces aménagés aujourd'hui influe ainsi sur la consommation de matières actuelle et future du territoire.

Outre le stock bâti, les équipements et produits dont la durée d'utilisation est supérieure à un an constitue un stock vraisemblablement inférieur à 11 t/hab¹⁰. Environ 0,1 t/hab a été retirée de ce stock en 2015¹¹. Des actions visant à partager, maintenir, adapter et prolonger la durée de vie des ouvrages bâtis, produits et équipements constituant les stocks permettraient de fortement réduire les consommations de matières et émissions vers la nature de l'Ile-de-France.

⁸ La démolition de bâtiments fait l'objet de statistiques publiques lacunaires aujourd'hui en France, seules les opérations réalisées dans le cadre d'un permis de démolir étant recensées dans la base Sit@del2.

⁹ Le renouvellement des voies routières desservant l'intérieur des communes représente à lui seul 0,01 t/hab à Paris et 0,3 t/hab en Grande Couronne (Augiseau, 2017).

¹⁰ Les résultats d'études menées notamment sur le cas de la Région de Bruxelles montrent que le stock bâti représente plus de 95 % du stock total (Athanassiadis, 2017).

¹¹ Estimation en considérant les flux recensés par l'ORDIF et le Conseil Régional en 2015 d'acier non issu du bâtiment et des travaux publics collecté en Ile-de-France et recyclé, de déchets d'équipements électriques et électroniques, et de déchets d'éléments d'ameublement.

3.2. Une extraction utilisée de ressources primaires faible et en chute

L'extraction intérieure utilisée de matières au sein de l'Ile-de-France ne représente que le dixième de la consommation intérieure physique en équivalent matières premières du territoire. De plus, l'extraction intérieure dite utilisée de l'Ile-de-France inclut des matières qui ne sont pas consommées par le territoire. C'est le cas de la récolte de céréales, protéagineux, oléagineux et des cultures industrielles, qui représente les neuf dixièmes de l'extraction de biomasse agricole en 2015 et qui est en grande partie exportée vers le reste de la France et du monde. Les exportations de biomasse agricole et produits alimentaires en 2015 représentent la moitié de l'extraction intérieure utilisée et des importations. C'est également le cas des extractions de gypse ou de silice ultrapure utilisés respectivement pour la production de plâtre et de verre optique et industriel et en grande partie exportés. Aussi, l'extraction intérieure de l'Ile-de-France consommée par le territoire représente moins du dixième de la consommation intérieure physique en équivalent matières premières du territoire.

La région dépend par conséquent très fortement d'autres territoires, en France et dans d'autres pays. Cette situation résulte des caractéristiques propres à un espace fortement urbanisé : les villes sont par définition dépendantes de l'extérieur pour leur approvisionnement : d'abord alimentaire, puis énergétique et en de nombreux produits, surtout dans un contexte de tertiarisation de l'économie métropolitaine. Lieux de consommation et d'échange, elles attirent et émettent de nombreux flux.

Le caractère extrêmement urbanisé de l'Ile-de-France explique en grande partie les différences dans les consommations unitaires que l'on peut constater avec une région plus rurale comme la Bourgogne ou avec l'ensemble de la France. La figure 7 ci-dessous montre en effet la consommation apparente très faible de matières en Ile-de-France lorsqu'elle est rapportée à la population : ceci s'explique par l'importance des consommations finales de produits élaborés ailleurs, tandis que les activités d'extraction et de transformation sont relativement peu importantes par comparaison avec la Bourgogne et l'ensemble de la France. En revanche, la consommation physique en équivalent matières premières de l'Ile-de-France est proche de celle de la Bourgogne et dépasse légèrement celle de l'ensemble de la France, les produits finis importés par la région engendrant des consommations de matières premières (flux indirects) hors de ses limites administratives.

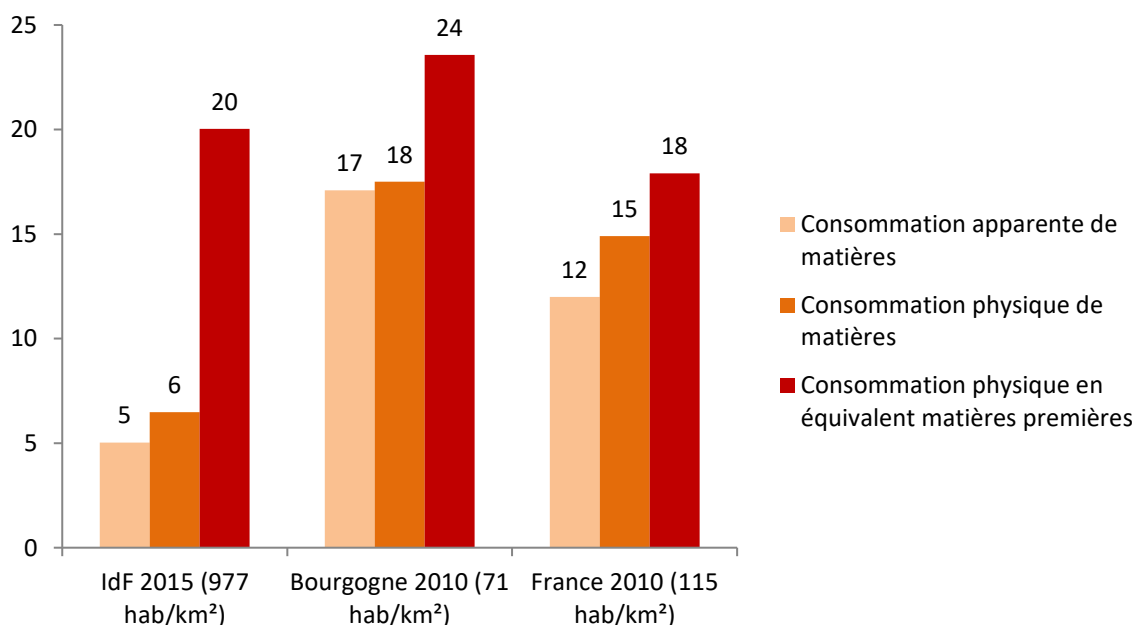


Figure 7. Consommations de matières par habitant, Ile-de-France, Bourgogne et ensemble de la France, 2015 et 2010, t/hab

Source : cette étude, Alterre Bourgogne (2013), CGDD - SOeS (2013)

Le rapport entre consommation apparente de matières et consommation physique en équivalent matières premières résulte de flux indirects associés aux importations, de même qu'aux exportations. Les rapports entre flux indirects et flux apparents, présentés dans le tableau 6 ci-dessous et issus du guide publié par le ministère de l'Ecologie (CGDD - SOeS) en 2014, sont particulièrement élevés pour les minéraux métalliques et produits principalement métalliques, de même que pour les autres minéraux et la biomasse. Notons toutefois que ces rapports, qui comprennent la consommation liée au transport, peuvent être légèrement surestimés lorsqu'appliqués aux échelles infranationales. En effet, pour la France ils concernent uniquement des provenances étrangères, donc potentiellement des déplacements de portées supérieures à ceux qui contribuent à l'approvisionnement de l'Ile-de-France, issu en partie de régions voisines.

Tableau 6. Rapports entre les flux indirects et les flux apparents par catégories de matières

	Importations	Exportations
Biomasse agricole	6,9	6,0
Biomasse forestière	4,9	3,5
Combustibles fossiles et produits dérivés	2,0	1,9
Produits à base dominante de combustibles fossiles	1,5	1,7
Minéraux non métalliques et produits à dominante non métallique - secteurs du bâtiment et des travaux publics	0,9	0,9
Minéraux non métalliques et produits à dominante non métallique - autres activités	4,5	2,3
Minéraux métalliques et produits principalement métalliques	11,7	11,6
Autres produits	5,0	3,9

Source : CGDD - SOeS (2014)

Outre le caractère fortement urbanisé du territoire francilien, la faible part que représente l'extraction intérieure utilisée de matières dans la consommation physique en équivalent matières premières résulte d'évolutions relativement récentes qu'a connues le territoire et qu'illustrent les cas des granulats et du ciment.

L'extraction de granulats et la production de ciment en Ile-de-France

Le sous-sol de l'Ile-de-France est composé d'une riche diversité de minéraux non métalliques. Les pierres calcaires, et en particulier les calcaires lutéciens, ont longtemps fourni des pierres de taille pour les bâtiments de Paris et ses environs. Aujourd'hui, les ressources régionales se répartissent en deux ensembles : granulats et minéraux pour l'industrie. Les premières sont constituées de sables et graviers alluvionnaires exploités dans les vallées de la Seine et de la Marne, de calcaires, de chailles et de sablons. Les ressources en minéraux pour l'industrie comprennent du gypse, les deux-tiers des réserves de gypse connues en France se situant en Ile-de-France. Les ressources comprennent également de la silice ultrapure, des argiles nobles et réfractaires, des argiles communes utilisées pour la production de matériaux céramiques, et des calcaires et marnes à ciment.

Les ressources présentes au sein de la région ne peuvent pas toutes faire l'objet d'une extraction. En 2015, les ressources en granulats et minéraux pour l'industrie occupent une surface équivalente à un peu moins de la moitié de la superficie totale régionale. Cependant, le quart de cette surface est urbanisé ou correspond aux lits mineurs des cours d'eaux (DRIEE *et al.*, 2017). Si l'étalement urbain ralentit depuis les années 2000, l'urbanisation a tout de même engendré annuellement, entre 2008 et 2012, l'artificialisation de 930 ha d'espaces agricoles, boisés et naturels. De plus, certains espaces font l'objet d'une protection au titre du patrimoine historique et architectural, de la ressource en eau ou du milieu naturel. Aussi, seuls les deux-tiers de la surface couverte par les ressources peuvent faire l'objet, dans certaines conditions, d'une exploitation.

L'urbanisation, les protections paysagères et environnementales et le fort prélèvement de ressources passé génèrent pour certains minéraux une situation émergente de raréfaction. C'est en particulier le cas des granulats alluvionnaires, sables et graviers utilisés dans les bétons hydrauliques. La surface couverte par ces ressources en Ile-de-France a chuté d'environ un quart entre 2000 et 2008. L'extraction a été réduite de moitié, passant de 13,5 Mt en 1985 à 6,4 Mt en 2013, et au vu des surfaces de carrières autorisées en 2017, la production annuelle sera probablement inférieure à 5 Mt en 2021 et inférieure à 4 Mt en 2028 (DRIEE *et al.*, 2017).

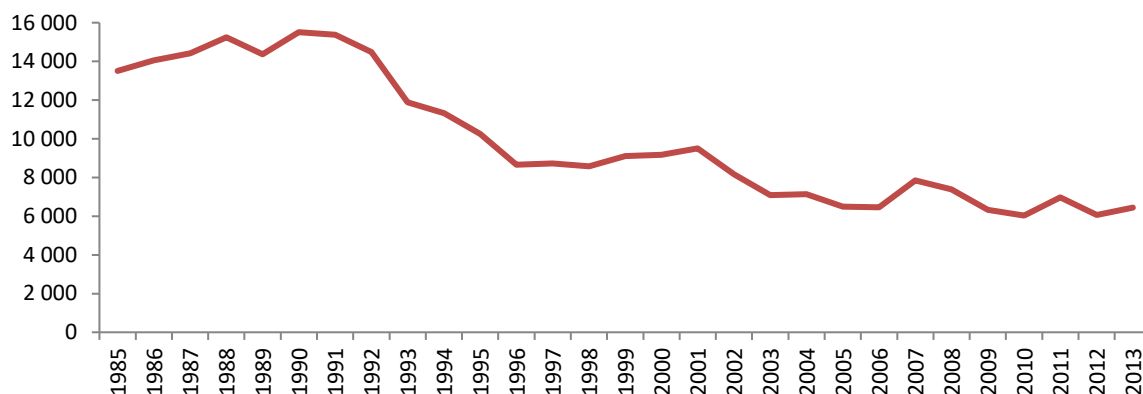


Figure 8. Extraction annuelle de granulats alluvionnaires, Ile-de-France, 1985 - 2013, kt

Source : DRIEE *et al.* (2017)

De plus, le tiers des granulats consommés par la région en 2015 est importé depuis le reste du Bassin Parisien (anciennes régions limitrophes de l'Ile-de-France), dont les ressources en granulats alluvionnaires seront, selon une estimation réalisée par le BRGM à la fin des années 1990 (DRIRE Haute-Normandie, 1999), épuisées dans environ cinquante ans si les contraintes environnementales strictes actuelles restent appliquées, et dans environ un siècle pour des contraintes moindres, c'est-à-dire une moindre protection paysagère et environnementale. En outre, l'atteinte des objectifs de construction de logements définis dans le SDRIF à horizon 2030 engendrera une hausse marquée de la consommation de granulats et accentuera ces pressions sur le milieu naturel (Augiseau, 2017).

Par ailleurs, alors que le béton représente la moitié des matériaux de construction consommés en Ile-de-France, la région ne compte qu'un seul site de production de ciment, composant essentiel de ce matériau avec les granulats. Les difficultés liées à l'ouverture de carrières, ainsi que le prix de l'énergie et les réglementations visant à limiter les émissions de polluants (dioxyde de soufre et chlore) et de dioxyde de carbone, engendrent une délocalisation de la production de ciment. Depuis le début des années 2010, les importations de clinker, produit intermédiaire issu de la cuisson du calcaire et constituant principal du ciment, se développent en France (James, 2010). Ce produit est importé depuis des pays où le prix de l'énergie et les réglementations concernant les émissions de polluants et de gaz à effet de serre sont moins contraignants. Ces exemples montrent que le maintien ou le développement de l'extraction de ressources naturelles et de leur transformation au sein de la région, activités s'inscrivant dans un jeu de contraintes variées et relevant d'échelles d'action multiples, impliquent une articulation des dispositifs de régulation existants.

3.3. Déchets : un potentiel de substitution aux ressources naturelles insuffisant mais des enjeux réels

Ainsi que le présente le tableau 7 page suivante, 2,1 t/hab de déchets solides selon la méthode de comptabilité des flux¹² ont été générées en Ile-de-France en 2015. 1,5 t/hab de matériaux excavés, extraction intérieure inutilisée selon la méthode de comptabilité des flux, ont été générées et ont constitué des déchets au sens réglementaire¹³, ce qui porte le total de ces derniers à 3,6 t/hab. L'activité des entreprises génère la très grande majorité des déchets : environ les neuf dixièmes des déchets au sens réglementaire comptabilisés. Parmi, les activités économiques, les secteurs du bâtiment et des travaux publics dominent : les déchets générés par ces secteurs représentent les trois quarts de l'ensemble des déchets générés au sens réglementaire en Ile-de-France en 2015.

L'ensemble des déchets au sens réglementaire généré au sein de la région représente une masse environ égale au trois-quarts de la consommation apparente de matières. Le potentiel que représentent ces matières en termes de substitution à des ressources naturelles peut par conséquent sembler élevé. Cependant, si l'on rapporte ces déchets à la consommation physique en équivalent matières premières de la région en 2015, le potentiel de substitution apparaît être nettement plus faible, puisque le rapport entre les masses est d'un pour cinq. Par conséquent, à consommation physique en équivalent matières premières égale et en supposant que toutes les émissions vers la nature feraient l'objet d'une valorisation, ce qui est techniquement impossible du fait des pertes propres à tout procédé de transformation de matière ou d'énergie, les déchets ne pourraient satisfaire que le cinquième des besoins régionaux.

Par ailleurs, ainsi que le montre le tableau 7 page suivante, la moitié des matières contenues dans les déchets au sens réglementaire fait l'objet en 2015 d'une valorisation : environ un quart est recyclé et un autre quart utilisé pour réaménager des carrières ou aménager des installations de stockage (matériaux excavés et déchets inertes du bâtiment et des travaux publics). Si l'on tient compte uniquement des déchets solides selon la méthode de comptabilité des flux, leur valorisation est plus faible et représente environ 40 % des masses générées. Les déchets incinérés ou méthanisés font également l'objet d'une valorisation énergétique qui sera abordée dans les points suivants.

¹² Déchets ménagers et assimilés, déchets du bâtiment et des travaux publics et autres déchets d'activité, filières à responsabilité élargie du producteur et boues de stations d'épuration.

¹³ Déchets solides cités dans la note précédente auxquels s'ajoutent les matériaux excavés issus du bâtiment et des travaux publics et gérés comme des déchets (les matériaux excavés réemployés n'ont pas le statut de déchets).

Tableau 7. Masses générées par habitant et traitement des déchets, Ile-de-France, 2015, t/hab et %

		Masse générée par habitant (t/hab)	Traitement des déchets (%)					Total
			Recyclage ^e	Autre valorisation matière ^a	Usage dissipatif ^b	Mise en installation de stockage	Emissions dans l'air ^c	
Déchets solides selon la méthode de comptabilité des flux	Ménagers et assimilés ^d	0,5	22		7	25	46	100
	Déchets du bâtiment et des travaux publics - hors matériaux excavés	1,2	38	4		59		100
	Autres déchets d'activité (DAE)	0,5	42		7	44	7	100
	REP ^e	0,01	54			13	34	100
	Boues de stations d'épuration	0,01			60	40		100
	Ensemble	2,1	35	2	3	48	12	100
Extraction intérieure inutilisée : déchets du bâtiment et des travaux publics - matériaux excavés gérés comme des déchets		1,5	5	49		46		100
Ensemble des déchets solides selon la réglementation		3,6	22	22	2	47	7	100

^a réaménagement de carrière ou aménagement d'installation de stockage

^b épandage ou compostage

^c émissions générées lors de l'incinération des déchets

^d hors DEEE

^e filières à responsabilité élargie du producteur : dont DEEE et hors déchets d'activités comptés ailleurs

Source : déchets solides hors boues d'après enquêtes ORDIF et Conseil Régional, matériaux excavés selon Augiseau (2017) d'après les estimations du Conseil Régional pour l'année 2010

De ce traitement des déchets, ainsi que d'autres activités présentes en Ile-de-France, résultent des flux émis vers la nature. Ainsi que le montre le tableau 8 ci-dessous, l'ensemble des ces flux représente 4,5 t/hab, dont 3,4 t/hab émises dans l'air.

Tableau 8. Emissions vers la nature par habitant, Ile-de-France, 2015, t/hab

	Dans le sol - installations de stockage	Dans l'air	Dans l'eau	Flux dissipatifs	Ensemble des émissions
Déchets solides selon la méthode de comptabilité des flux ^a	1,0	0,2		0,07	1,3
Matières organiques rejetées par les stations d'épuration			0,002		0,002
Matières organiques rejetées par les industries non raccordées au réseau public			0,0004		0,0004
Dioxyde de carbone généré par la consommation de combustibles fossiles		2,7			2,7
Dioxyde de carbone procédé des sites industriels produisant des matériaux de construction		0,02			0,02
Autres émissions dans l'air		0,02			0,02
Flux dissipatifs liés à l'utilisation d'engrais				0,02	0,02
Flux dissipatifs liés à l'usure des chaussées routières				0,00002	0,00002
Ensemble des émissions vers la nature	1,0	3,4	0,002	0,1	4,5

^a hors matériaux excavés gérés comme des déchets

Source : voir paragraphe 1.1. Méthode

Par ailleurs, les valeurs concernant le recyclage recouvrent des formes de valorisation très variées qui correspondent dans certains cas à la même qualité que le produit ou équipement d'origine (*up-cycling*) ou dans d'autres cas à une qualité moindre (*down-cycling*). C'est le cas notamment des granulats recyclés, qui représentent plus de la moitié des matières recyclées par l'Ile-de-France. Ces minéraux non métalliques sont aujourd'hui très rarement utilisés pour la production de béton (DRIEE *et al.*, 2017), alors qu'une incorporation de 10 à 30 % de granulats recyclés dans le béton est autorisée depuis 2012¹⁴. Or, la moitié de la consommation de granulats (extraits, importés et recyclés) de l'Ile-de-France en 2015 est destinée à la production de béton et cette part est appelée à augmenter du fait de la moindre extension du réseau routier résultant d'un moindre étalement urbain. Une évolution de l'utilisation des granulats recyclés permettrait de limiter les pressions sur les ressources en granulats alluvionnaires (voir point 3.2).

En outre, le développement du tri des déchets en vue de leur recyclage n'engendre pas nécessairement une relocalisation de l'économie, à l'échelle régionale mais également à l'échelle nationale. En effet, les flux de métaux non ferreux destinés à être recyclés sont en grande partie exportés de France. Les déchets d'aluminium issus de chantiers sont généralement exportés, de même que l'ensemble du cuivre destiné à être recyclé, le territoire ne comportant plus d'activité de raffinage de ce métal (Hestin *et al.*, 2015).

Cependant, si le recyclage des matières contenues dans les déchets ne peut que très partiellement permettre une substitution aux ressources primaires, il présente un enjeu particulier pour des ressources non renouvelables absentes du milieu naturel. L'Ile-de-France, de même que le reste de la France en 2015, ne comporte pas d'activité d'extraction de métaux. De plus certains minéraux métalliques non ferreux sont en situation de raréfaction à l'échelle mondiale. C'est le cas notamment du cuivre, du plomb, du nickel, de l'argent, de l'étain et du zinc dont les réserves seront probablement épuisées en 2030 (CGDD - SOeS, 2009). A cette situation de raréfaction physique s'ajoutent des facteurs socio-économiques et géopolitiques qui engendrent pour l'approvisionnement de certains minéraux une situation dite de criticité.

Ainsi, au regard de la dépendance envers les importations pour leur approvisionnement, de leur très faible taux de recyclage actuel et de la faible possibilité de les substituer par une autre matière, l'Union européenne identifie en 2017 vingt-sept matières critiques¹⁵. La concentration de l'extraction de ces matières au sein de quelques pays, l'inélasticité de la production et le risque qu'engendre la spéculation sur les marchés renforcent leur criticité. Pour l'industrie française, le ministère de l'Ecologie a identifié en 2010 une dizaine d'applications nécessitant des métaux dont l'approvisionnement présente des risques. Ces applications sont présentées dans le tableau 9 page suivante. Le phosphore, qui fait aussi partie des substances critiques identifiées par l'Union européenne, et l'azote présentent également des enjeux qui seront abordés dans le paragraphe 3.5.

¹⁴ Selon la norme NF EN 206-1/CN. Ce taux varie selon les classes d'exposition (exposition à l'humidité et au gel notamment) et les types de granulats définis dans cette norme (différenciation selon l'origine principalement). Une évolution de cette norme suite aux recherches menées dans le cadre du projet national Recybéton achevé en 2017 permettra probablement d'étendre les possibilités d'utilisation de granulats issus du recyclage dans le béton.

¹⁵ Antimoine, baryte, béryllium, bismuth, borate, cobalt, charbon à coke, spath fluor, gallium, germanium, hafnium, hélium, indium, magnésium, graphite naturel, caoutchouc naturel, niobium, phosphate naturel, phosphore, scandium, silicium-métal, tantale, tungstène, vanadium, platinoïdes, les terres rares lourdes et terres rares légères.

Tableau 9. Métaux considérés comme rares par le ministère de l'Ecologie en France en 2010

Applications	Principales utilisations	Métaux collectables	Taux de recyclage fonctionnel en fin de vie à l'échelle mondiale ^a
Accumulateurs Li-ion	Appareils portables, véhicules hybrides et électriques, appareils industriels	Co	> 50 %
		Li	< 1 %
Aimants	Equipements électriques et électroniques, véhicules hybrides et électriques, moteurs, alternateurs	Nd	< 1 %
		Pr	< 1 %
		Dy	< 1 %
		Tb	< 1 %
Cartes électroniques	Equipements électriques et électroniques	Ag	> 50 %
		Pd	> 50 %
		Pt	> 50 %
Condensateurs	Petits équipements électriques	Ta	< 1 %
Écrans LCD	TV, ordinateurs, téléphones portables	In	< 1 %
Lampes fluo-compactes	Éclairage domestique ou collectif	Tb	< 1 %
		Eu	< 1 %
		Y	< 1 %
		Gd	< 1 %
		La	< 1 %
LED	Lampes, équipements électriques et électroniques	Ce	< 1 %
		In	< 1 %
Panneaux photovoltaïques	Résidentiel, tertiaire, champs terrestres	/	/
Pots catalytiques	Véhicules	Pt	> 50 %
		Pd	> 50 %
		Rh	> 50 %
Poudres de polissage	Verres, cristal, céramiques	Ce	< 1 %
		La	< 1 %
		Pr	< 1 %

^a Rapport entre le flux de métal réellement recyclé avec ses caractéristiques fonctionnelles d'origine permettant une substitution à des métaux primaires, et le flux de métal contenu dans les produits en fin de vie.

Source : CGDD - SOeS (2013)

3.4. Une consommation d'énergie en très grande majorité non renouvelable et importée

Le métabolisme de l'Ile-de-France repose sur une importante consommation d'énergie, dans et en dehors des limites de la région. Le bilan des flux de matières fait tout d'abord apparaître une consommation massive de 1,2 t/hab de combustibles fossiles à usage énergétique en Ile-de-France en 2015. Le pétrole extrait en Seine-et-Marne, dont on fait l'hypothèse qu'il est consommé en Ile-de-France, représente 7 % en masse de la consommation de produits pétroliers à usage énergétique hors carburéacteur de la région et 3 % de sa consommation de combustibles fossiles. La répartition entre combustibles en masse est présentée dans la figure 9 ci-dessous.

Selon le *Tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France* (ARENE IdF et ADEME, 2014)¹⁶ et ainsi que le montre la figure 10 ci-dessous, la consommation finale en énergie de l'Ile-de-France en 2009 est destinée majoritairement au transport, et en particulier au transport aérien¹⁷. Par ailleurs, les activités économiques représentent une consommation supérieure à celle des ménages. Les consommations de l'agriculture et de l'industrie représentent une part faible dans la consommation finale régionale, ce qui traduit la faiblesse de ces activités en Ile-de-France au regard du tertiaire.

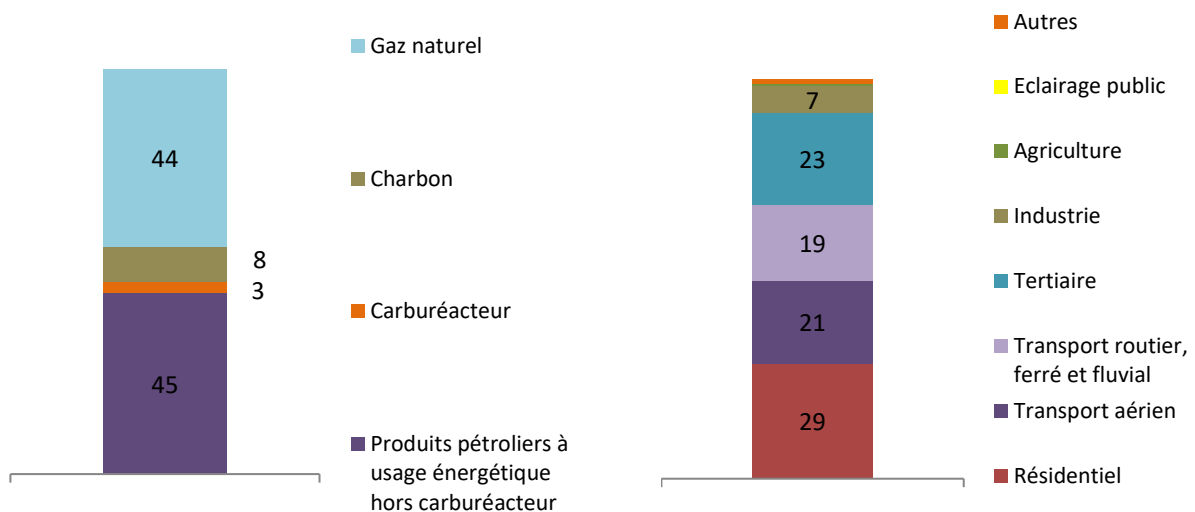


Figure 9. Consommation massive de combustibles fossiles à usage énergétique par combustible, Ile-de-France, 2015, %

Source : cette étude

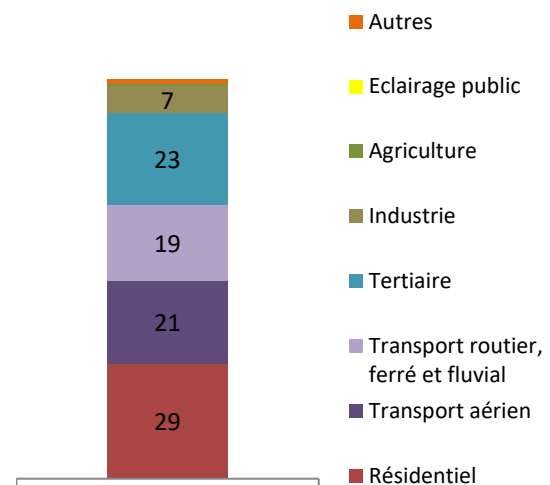


Figure 10. Consommation énergétique finale corrigée du climat par secteur, Ile-de-France, 2009, %

Source : ARENE IdF et ADEME (2014)

¹⁶ Les données les plus récentes disponibles dans le *Tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France* portent sur l'année 2009 pour les consommations et 2012 pour les productions d'énergie renouvelable. La consommation finale est de 303 TWh en 2009 et représente 7 400 kWh par habitant et 14 900 kWh par emploi tertiaire.

¹⁷ Concernant ce dernier, la moindre part qu'il occupe dans la consommation massive de combustibles fossiles est liée à la prise en compte des consommations de carburéacteur lors du cycle atterrissage-décollage uniquement.

La consommation énergétique finale totale ne correspond qu'à la quantité d'énergie livrée aux consommateurs finaux. La demande énergétique totale permet de mesurer la consommation d'énergie primaire en amont pour l'approvisionnement en énergie finale du territoire. Elle comprend la consommation énergétique finale ainsi que les pertes énergétiques intra et extra urbaines qui sont associées à l'approvisionnement en énergie¹⁸. Cet indicateur de pression environnementale est utilisé par E. Kim (2013) pour analyser le bilan énergétique de Paris et de l'Ile-de-France pour l'année 2006 (et depuis le XIXe siècle). En 2006, la demande énergétique totale annuelle de l'Ile-de-France est 1,5 fois supérieure à la consommation énergétique finale totale : elles atteignent respectivement 143 PJ/hab et 101 PJ/hab. L'évolution depuis 1801 est présentée en Annexe 3. Notons qu'à la demande énergétique totale devrait être ajoutée l'énergie qui a été consommée pour produire et transporter les produits et équipements consommés par l'Ile-de-France. Celle-ci n'a pas fait l'objet d'une estimation à l'échelle de la région à ce jour.

Ainsi que le montre le tableau 10 ci-dessous, les combustibles fossiles, ressources non renouvelables, représentent près des deux-tiers de la demande énergétique totale de la région. La production d'électricité repose également en grande partie sur des ressources fossiles, ressources non renouvelables. Ces ressources sont finies et leurs impacts environnementaux de même que le coût de leur extraction augmentent avec leur épuisement (Criqui et Martin-Amouroux, 2012). De plus, leur consommation engendre l'émission de gaz à effet de serre et de polluants.

Tableau 10. Demande énergétique totale par habitant, Ile-de-France, 2006, PJ/hab

	Bois de chauffage	Charbon	Gaz	Electricité nucléaire et hydraulique	Pétrole	Autres ^a	Total
Demande énergétique totale	4	3	32	45	54	4	143

^a Incinération des déchets alimentant des réseaux de chaleur, électricité photovoltaïque et éolien, biocarburants

Source : Kim (2013)

Les données disponibles sur le cas de la Ville de Paris font en outre apparaître la distance importante d'approvisionnement en ressources énergétiques, la distance moyenne pondérée s'élevant à 3 850 km en 2006 (tableau 11).

Tableau 11. Part de chaque source énergétique dans la demande énergétique totale et distance moyenne d'approvisionnement, Paris, 2006, % et km

	Part de chaque source énergétique dans la demande énergétique totale (%)	Distance moyenne d'approvisionnement (km)
Charbon de terre	5	6 110
Produits pétroliers	19	3 970
Gaz naturel	24	2 540
Combustible fissile	44	4 910
Energie hydraulique	2	460
Autres ^a	6	50
Ensemble des sources énergétiques	100	/
Distance moyenne pondérée	/	3 850

^a Incinération des déchets alimentant des réseaux de chaleur, électricité photovoltaïque et éolien, biocarburants

Source : Kim (2013)

¹⁸ Somme de l'entrée énergétique directe, de l'extraction locale inutilisée liée à la consommation énergétique, des flux indirects associés aux importations et des exportations d'énergie.

L'incinération des déchets, la production d'électricité photovoltaïque et éolienne et les biocarburants produits au sein ou en dehors de l'Ile-de-France ne représentent que 3 % de la demande énergétique totale (Kim, 2013). La méthanisation des déchets organiques n'est pas prise en compte ici. Une estimation portant sur la ville de Paris seule montre que la méthanisation de l'ensemble des biodéchets issus des ordures ménagères résiduelles représenterait, sous forme d'électricité, 0,05 % de la consommation énergétique finale de la capitale (Barles, sous presse), très peu donc.

La production en Ile-de-France d'énergie renouvelable en 2012 est de 5,6 PJ de chaleur, dont 4,2 PJ issus de la géothermie, et 1,0 PJ d'électricité (ARENE IdF et ADEME, 2014). Cette production est faible au regard de la consommation finale de la région. Le doublement de la production d'énergie renouvelable d'ici 2020, associé à une réduction des consommations du fait d'une plus grande efficacité énergétique, permettrait aux énergies renouvelables de couvrir 11 % de la consommation finale en 2020 selon le *Tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France*. A cette production d'énergie renouvelable s'ajoute la production régionale issue des déchets qui représente en 2015 16,6 PJ dont 15,4 PJ issus de l'incinération des déchets, 1,2 PJ du biogaz collecté en installations de stockage de déchets non dangereux et 0,01 PJ de la méthanisation (ORDIF, 2015). La production régionale d'énergie à partir des déchets ne représente que 1 % de la demande énergétique totale régionale, tandis que la production d'énergie renouvelable et issue des déchets représente 1,4 % de la demande énergétique.

3.5. Une consommation de produits alimentaires importante et une gestion des déchets engendrant une altération des cycles biogéochimiques

La consommation physique de biomasse agricole et de produits alimentaires de l'Ile-de-France est de 1,0 t/hab en 2015. Si l'on inclut les flux indirects, la consommation physique en équivalent matières premières atteint 4,3 t/hab. Cette consommation, de même que la gestion des déchets organiques qu'elle entraîne, génère d'importants impacts environnementaux. En effet, le système agricole dont dépend l'alimentation des franciliens perturbe les cycles de l'azote, du phosphore et du potassium et génère une dégradation importante de la qualité des ressources en eau (Barles *et al.*, 2010).

Par exemple, le cycle de l'azote, qui est l'élément le plus souvent limitant de la production agricole végétale est bouleversé par l'utilisation abondante d'engrais azotés de synthèse obtenus par la fixation industrielle de l'azote atmosphérique à laquelle recourt l'agriculture moderne ; il l'est aussi par l'élevage industriel. Il en résulte de nombreux problèmes environnementaux : contamination nitrique des aquifères, déficit en oxygène et eutrophisation des milieux aquatiques dont les répercussions se manifestent dans les milieux marins, pollution atmosphérique acide notamment, émission de gaz à effet de serre (Sutton *et al.*, 2011).

Les travaux menés dans le cadre du programme PIREN-Seine ont montré que la distance moyenne pondérée de l'approvisionnement alimentaire en protéines de l'agglomération parisienne était de 662 km au début des années 2000. Le bassin de la Seine couvre 54 % de la consommation en protéines de l'agglomération et 63 % de sa consommation de protéines d'origine végétale. Le territoire contigu formé par la Bretagne, la Normandie et le Nord-Pas-de-Calais assure la majeure partie des besoins en produits animaux. La consommation annuelle de protéines animales d'un habitant d'Ile-de-France au début des années 2000 requiert 10 kgN de soja latino-américain, l'utilisation de 12 kgN de fertilisants industriels et de 6,3 kgN fixés symbiotiquement. De plus elle génère des pertes environnementales potentiellement polluantes pour l'hydrosystème de l'ordre de 20 kgN. La production de protéines animales génère la plus grande part de l'empreinte alimentaire d'un francilien, que ce soit en termes de surface agricole nécessaire, ou en termes de pollution azotée. La part de protéines animales dans le régime alimentaire est passée de 32 % en 1786, à 50 % à la fin du XIXe siècle, pour une valeur actuelle de 65 % (Barles *et al.*, 2010).

La production de protéines animales actuellement nécessaire à la consommation ne peut provenir d'un système de polyculture élevage équilibré. Le passage à un régime alimentaire demitarien, pour lequel la part des protéines animales dans la consommation totale serait de 40 %, associé au développement au sein du bassin de la Seine de systèmes agricoles à bas intrants, tels que les systèmes d'agriculture biologique qui limitent la fertilisation azotée des terres arables, pourraient permettre de subvenir aux besoins alimentaires de l'agglomération parisienne et de l'ensemble du bassin de la Seine, ainsi que d'exporter une partie de la production céréalière et de produire une eau de bonne qualité (Barles *et al.*, 2010). Ce changement de régime alimentaire et de mode de production agricole permettrait de réduire la pollution azotée, qui passerait de 21,5 kgN/hab/an à 3,5 kgN/hab/an. Les flux sont présentés sous forme de diagramme en Annexe 4 et 5.

Par ailleurs, une étude récente menée sur l'alimentation des habitants du Grand Paris et la gestion des déchets que cette alimentation génère (urines et excréments) fait apparaître les perturbations qu'engendre le métabolisme urbain actuel (Esculier, 2018). En effet, les flux sont linéaires pour l'azote et le potassium et faiblement circulaire pour le phosphore. L'alimentation génère des déchets, le tiers des aliments étant non ingérés. Les déchets résultant de cette alimentation engendrent une pollution au niveau local par les rejets d'eaux usées et au niveau global par les émissions de protoxyde d'azote.

Seulement 4 % des flux d'azote, 41 % des flux de phosphore et 2 % des flux de potassium présents dans les urines et excréments humains sont récupérés en station d'épuration en 2013 en Ile-de-France. Un scénario élaboré dans cette étude montre que ces valeurs pourraient atteindre respectivement 62 %, 89 % et 47 % en 2053 par le développement de systèmes de séparation à la source de l'urine. Les flux sont présentés sous forme de diagramme en Annexe 6 et 7. Le potentiel de récupération d'énergie par méthanisation à partir des déchets organiques est marginal au regard de la consommation d'énergie de la région (cf. ci-dessus), et le bouclage des flux d'azote et de phosphore devrait être une priorité.

Conclusion

L'analyse du métabolisme francilien montre que la consommation physique en équivalent matières premières de la région atteint 20,0 t/hab en 2015. Cette consommation est élevée au regard de l'extraction intérieure utilisée de matières (1,9 t/hab), de même qu'au regard de la génération de déchets solides qui pourraient se substituer à des ressources primaires (2,1 t/hab ; 3,6 t/hab avec les matériaux excavés). Cette consommation engendre en outre de fortes pressions sur les ressources issues du milieu naturel, puisqu'elle est composée en grande partie de ressources non renouvelables : minéraux non métalliques et métalliques, combustibles fossiles et produits dérivés, ressources qui sont très majoritairement extraites et transformées en dehors du territoire régional. En outre, la gestion des déchets résultant de la consommation de matières est source de perturbations environnementales, notamment de l'artificialisation des sols pour l'enfouissement des déchets, de pollutions du sol, de l'eau et de l'air, ainsi que de l'altération des cycles biogéochimiques.

Une politique d'économie circulaire pourrait permettre d'agir sur ces flux de matières afin de réduire les pressions sur le milieu naturel et les perturbations environnementales au sein et en dehors du territoire régional que ces flux génèrent. Cette politique doit permettre de réduire les consommations de matières et substituer les ressources non renouvelables par des ressources renouvelables et à faible impact environnemental. En effet, au vu du déséquilibre entre la génération de déchets et la consommation de matières du territoire, cette politique ne peut uniquement être une politique de valorisation des déchets. De même, l'extraction des ressources naturelles consommées par la région engendrant de fortes pressions sur le milieu naturel, cette politique, si elle peut viser à maintenir ou développer l'extraction de ressources naturelles régionales, doit définir des objectifs cohérents avec les politiques de protections paysagères et environnementales.

La réduction et la modification des consommations de matières est nécessaire pour pouvoir substituer les ressources primaires (ou naturelles) importées par des ressources primaires et secondaires (déchets) régionales. Selon C. Arnsperger et D. Bourg (2016, p. 97) « le recyclage ainsi que la réutilisation et la re-fabrication (les fameux « 3 R » [...]) sont impuissants à limiter et stabiliser les flux de matière entrant dans le système. L'économie ne sera donc authentiquement circulaire que si on la réorganise radicalement selon un « 4e R » : celui de la réduction des flux entrants et des consommations nettes de ressources ». Ceci renvoie à la notion de dématérialisation (Barles, 2017).

Au sein des matières consommées par la région en 2015, quatre ensembles de matières ressortent de par leur importance dans la consommation : la biomasse agricole et les produits alimentaires, les combustibles fossiles, les matériaux de construction¹⁹, ainsi que les équipements et produits « stockés »²⁰. Ces matières représentent 59 % de la consommation physique de matières et 60 % de la consommation physique en équivalent matières premières²¹.

¹⁹ Granulats, verre pour le bâtiment et les travaux publics, bitumes et enrobés bitumineux, autres minéraux non métalliques et produits à dominante non métallique pour le bâtiment et les travaux publics, bois d'œuvre, produits métalliques pour le bâtiment et les travaux publics, plastiques pour le bâtiment et les travaux publics.

²⁰ Equipements et produits dont la durée d'utilisation est supérieure à un an dont la plupart des flux sont compris dans la sous-catégorie *Minerais métalliques et produits principalement hors bâtiment et travaux publics* (voir tableau 2).

²¹ Les matières non prises en compte dans le tableau représentent une consommation physique de matières de 2,3 t/hab et une consommation physique en équivalent matières premières de 7,6 t/hab.

Le tableau 12 ci-dessous et page suivante présente les consommations en 2015 de ces ensembles de matières ainsi que des pressions et impacts environnementaux que ces derniers soulèvent. Sont également présentées des pistes d'actions, inspirées par différents travaux conduits sur la région et le bassin de la Seine (notamment dans le cadre du PIREN-Seine²² ou au sein de l'UMR Géographie-Cités²³) et sur d'autres territoires, de travaux plus théoriques (Arnsperger, Bourg, 2016 ; Haberl *et al.*, 2016) ; des études de la Ellen Mac Arthur Foundation (2016), de l'Institut de l'Economie Circulaire (2017), ainsi que pour les combustibles énergétiques de l'Association négaWatt (2017). Ces pistes d'actions, si elles trouvent leur place dans une politique dédiée à l'économie circulaire, relèvent également d'autres politiques régionales concernant notamment l'aménagement du territoire (SDRIF), le transport, le logement, l'agriculture, l'aménagement forestier, les carrières ou encore l'industrie. Elles relèvent également d'échelles d'action infrarégionales ou suprarégionales et notamment de réglementations et normes techniques nationales ou européennes. Elles rencontrent toutes ou presque une série d'enjeux transversaux, de nature spatiale : l'affectation des sols, la gestion foncière, l'organisation de l'espace, donc l'aménagement du territoire et l'urbanisme.

Tableau 12. Consommations régionales de matières par habitant en 2015 (t/hab), pressions et impacts sur l'environnement et pistes d'action liées à quatre ensembles de matières

Matières	Consommation physique de matières - consommation physique en équivalent matières premières	Pressions et impacts sur l'environnement	Pistes d'action	
			Prévention	Gestion
Biomasse agricole et produits alimentaires	1,0 - 4,3	<p>Perturbation des cycles de l'azote, du phosphore et du potassium</p> <p>Dégradation de la qualité des ressources en eau et eutrophisation des milieux aquatiques</p> <p>Pollution atmosphérique, émissions de gaz à effet de serre</p>	Diminution de la part des protéines animales dans la consommation totale (par exemple régime demitarian) associée au développement au sein du bassin de la Seine de systèmes agricoles à bas intrants et de la complémentarité polyculture-élevage	<p>Développement de systèmes de valorisation des sous-produits urbains et périurbains (biodéchets, urines et excréments humains et animaux) pour la production d'amendements et d'engrais (exemple : séparation à la source des urines, compostage, etc.)</p> <p>Bouclage des flux d'azote et de phosphore prioritaire</p>
Combustibles fossiles	0,5 - 1,5	<p>Consommation de ressources non renouvelables fossiles (près des 2/3 de la demande énergétique totale de la région) et fissiles, ressources finies et dont l'extraction engendre des impacts croissants sur l'environnement</p> <p>Emissions de gaz à effet de serre et de polluants</p>	<p>Sobriété énergétique : priorisation des besoins énergétiques</p> <p>Efficacité énergétique : réduction de la quantité d'énergie consommée pour un certain besoin</p>	<p>Substitution des sources énergétiques non renouvelables (ressources fossiles et fissiles) par des sources renouvelables</p> <p>Réflexion approfondie sur l'affectation des sols et leur multifonctionnalité (usages énergétiques, alimentaires, urbains, etc.)</p>

²² <https://www.piren-seine.fr/>

²³ Voir notamment Barles (2017).

Matériaux de construction	2,1 - 3,5	<p>Consommation de ressources non renouvelables, ressources finies et dont l'extraction engendre des impacts sur l'environnement et le paysage et génère des conflits entre usages du sol</p> <p>Situation émergente de raréfaction des ressources en granulats alluvionnaires</p> <p>Emissions de gaz à effet de serre et de polluants</p> <p>Forte génération de déchets (y compris de matériaux excavés) dont la moitié est recyclée et en partie pour des besoins de qualité moindre (<i>downcycling</i>)</p>	<p>Partage, maintenance, adaptation et prolongation de la durée de vie des ouvrages bâtis</p> <p>Suivi et encadrement des opérations de démolition - reconstruction afin de privilégier la réhabilitation plutôt que la démolition des bâtiments</p> <p>Conception des espaces aménagés et bâtis afin de réduire les flux de matières et impacts environnementaux associés lors de la construction, du renouvellement et de la démolition des ouvrages</p>	<p>Priorité au réemploi des déchets; puis la réutilisation - redistribution, le reconditionnement - réusinage, le recyclage, et enfin la récupération d'énergie</p>
Produits principalement métalliques (et minéraux métalliques) hors matériaux de construction	0,2 - 2,8	<p>Raréfaction à l'échelle mondiale des ressources en minéraux métalliques non ferreux, situation dite de <i>criticité</i></p> <p>Faible recyclage en Ile-de-France des métaux non ferreux et valorisation pour des besoins de qualité moindre (<i>downcycling</i>)</p>	<p>Partage, maintenance, adaptation et prolongement la durée de vie des produits et équipements en cours d'utilisation</p> <p>Eco-conception des produits afin de réduire l'impact environnemental associé à leur production, utilisation et gestion en fin de vie</p>	<p>Priorité au réemploi des déchets, puis à la réutilisation - redistribution, le reconditionnement - réusinage, le recyclage, et enfin la récupération d'énergie</p> <p>Urban mining (extraction urbaine) : récupération des matières abandonnées (par exemples dans les infrastructures hors d'usage)</p>

Source : cette étude, d'après Ellen Mac Arthur Foundation (2016), Institut de l'Economie Circulaire (2017), Association négaWatt (2017)

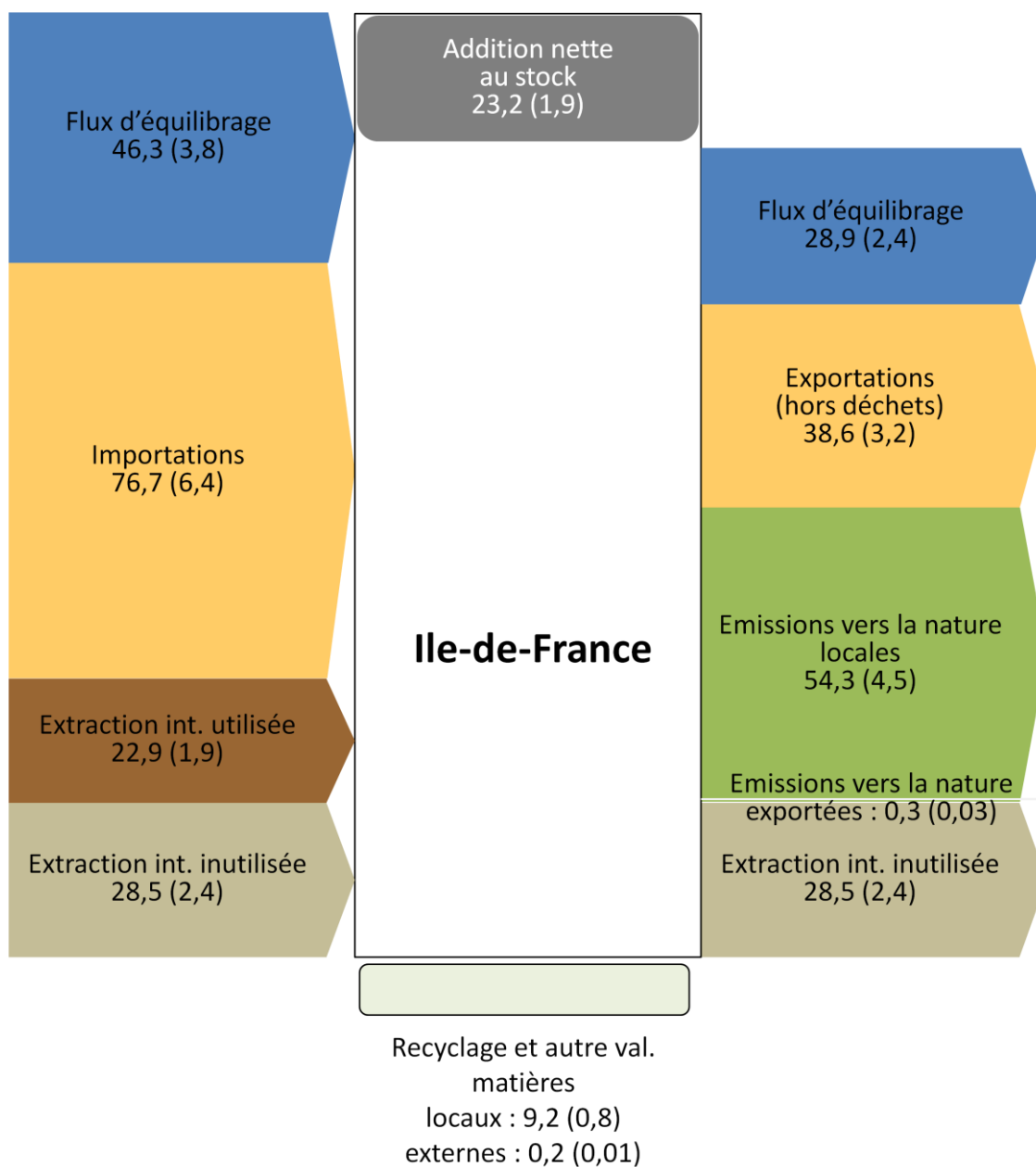
Bibliographie

- ALTERRE BOURGOGNE. 2013. « La Bourgogne comptabilise ses flux de matières », *Repères* n°64. 12 p.
- ARENE ILE-DE-FRANCE, ADEME. 2014. *Tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France. Edition 2014*. 11 p.
- ARNSPERGER, C., BOURG, D. 2016. « Vers une économie authentiquement circulaire. Réflexions sur les fondements d'un indicateur de circularité », *Revue de l'OFCE* 145 : 91-125.
- ASSOCIATION NEGAWATT. 2017. *Scénario négaWatt 2017-2050. Dossier de synthèse*. 47 p.
- ATHANASSIADIS, A. 2017. *Economie circulaire dans le secteur de la construction à Bruxelles : état des lieux, enjeux et modèles à venir*. 98 p.
- AUGISEAU, V. 2017. *La dimension matérielle de l'urbanisation. Flux et stocks de matériaux de construction en Ile-de-France*. Thèse de doctorat. Université Panthéon-Sorbonne-Paris I. 554 p.
- BARLES, S. 2007. *Mesurer la performance écologique des villes et des territoires : le métabolisme de Paris et de l'Île-de-France. Rapport de recherche final pour le compte de la ville de Paris*. 98 p.
- BARLES, S. 2017. « Écologie territoriale et métabolisme urbain : quelques enjeux de la transition socio-écologique », *Revue d'économie régionale et urbaine* (5) : 819-836.
- BARLES, S. Sous presse. « L'autonomie métabolique urbaine, un oxymore, une gageure ? », in : LOPEZ, F., PELLEGRINO, M. COUTARD, O. *Local energy autonomy : spaces, scales, politics*. Londres, ISTE Éditions.
- BARLES, S. BILLEN, G., CHATZIMPIROS, P., KIM, E., GARNIER, J., SILVESTRE, M. 2010. *Ville et fonctionnement du bassin de la Seine : matériaux de construction, sol, énergie, alimentation. Contribution à une écologie territoriale. PIREN-Seine. Phase V – Rapport de synthèse 2007-2010*. 41 p.
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, SERVICE DE L'OBSERVATION ET DES STATISTIQUES. 2009. « Matières mobilisées par l'économie française. Comptes de flux pour une gestion durable des ressources », *Études & documents* n°6. 44 p.
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, SERVICE DE L'OBSERVATION ET DES STATISTIQUES. 2013. « Le cycle des matières dans l'économie française », *Repères*. 56 p.
- COMMISSARIAT GENERAL AU DEVELOPPEMENT DURABLE, SERVICE DE L'OBSERVATION ET DES STATISTIQUES. 2014. « Comptabilité des flux de matières dans les régions et les départements. Guide méthodologique », *Références*. 111 p.
- CRIQUI, P., MARTIN-AMOUREUX, J.-M. 2012. « Les énergies fossiles au XXIème siècle. Transition vers les hydrocarbures non conventionnels, ou vers une économie sobre en carbone ? », *Références économiques* n°21. Conseil économique pour le développement durable. 6 p.
- DRIEE, IAU ILE-DE-FRANCE, UNICEM. 2017. *Granulats en Île-de-France. Panorama régional*. 76 p.
- DRIRE HAUTE-NORMANDIE. 1999. *Schéma interrégional approvisionnement du Bassin parisien en matériaux de construction à l'horizon 2015*. 112 p.
- ELLEN MAC ARTHUR FOUNDATION. 2016. *Vers une économie circulaire : arguments économiques pour une transition accélérée*. 21 p.
- GEORGEAULT, L. 2015. *Le potentiel d'écologie industrielle en France : approche territoriale et éléments de réalisation*. Thèse de doctorat. Université Panthéon-Sorbonne-Paris I. 403 p.

- HABERL, H., FISCHER-KOWALSKI, M., KRAUSMANN, F., WINIWARTER, V. (eds.). 2016. *Social Ecology. Society-Nature Relations across Time and Space*. Springer.
- HESTIN, M., GUILCHER, S., MOAL, O. 2015. *Bilan national du recyclage 2003-2012. Rapport final*. Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par BIO by Deloitte. 84 p.
- INSTITUT DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE. 2017. *L'économie circulaire*. En ligne (page consultée le 25/04/2018) : <https://institut-economie-circulaire.fr/economie-circulaire/>
- JAMES, O. 2010. « Même le ciment se délocalise ! », *L'Usine nouvelle*, 18 mars 2010. En ligne (page consultée le 21/01/2015) : <http://www.usinenouvelle.com/article/meme-le-ciment-se-delocalise.N127984>
- KIM, E. 2013. *Les transitions énergétiques urbaines du XIXe au XXIe siècle: de la biomasse aux combustibles fossiles et fissiles à Paris (France)*. Thèse de doctorat. Université Panthéon-Sorbonne-Paris I. 390 p.
- OBSERVATOIRE REGIONAL DES DECHETS. 2015. *Tableau de bord. Les déchets franciliens dans l'économie circulaire. Edition 2015*. 61 p.
- OBSERVATOIRE REGIONAL DE L'IMMOBILIER D'ENTREPRISE EN ILE-DE-FRANCE. 2013. *La transformation et la mutation des immeubles de bureaux. Colloque du 14 février 2013*. 54 p.
- SUTTON, M.A., HOWARTH, C.M., ERISMAN, J.W., BILLEN, G., BLEEKER, A., GRENNFELT, P., VAN GRINSVEN, H., GRIZZETTI, B. 2011. *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effect and Policy perspectives*. Cambridge University Press. 612 p.

ANNEXES

Annexe 1. Bilan de flux de matières hors flux indirects, Ile-de-France, 2015, Mt (t/hab)



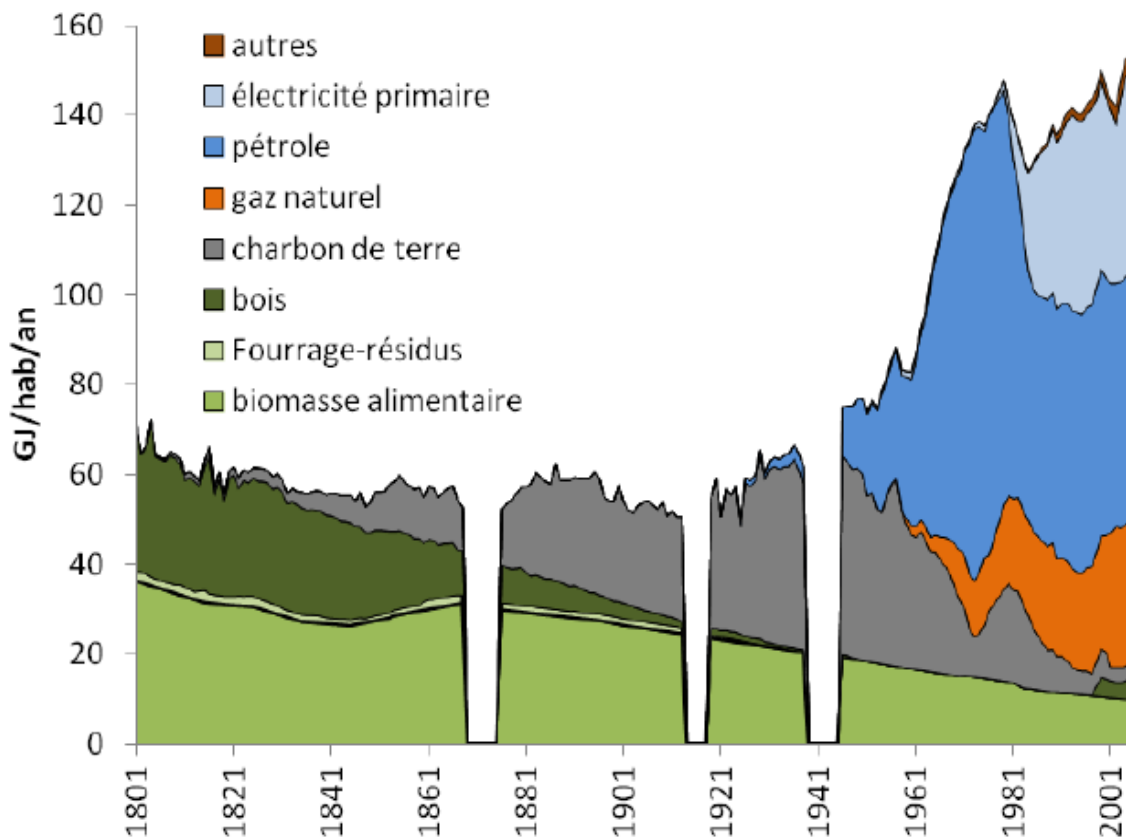
Source : cette étude

Annexe 2. Indicateurs de consommation de matières par catégories de produits consommés, Ile-de-France, 2015, kt et t/hab

	Consommation apparente de matières	Consommation physique de matières	Consommation physique en équivalent matières premières	Consommation totale de matières
Biomasse agricole et produits alimentaires	1,0	1,0	4,3	4,8
Biomasse forestière	0,2	0,2	1,2	1,2
Combustibles fossiles et produits dérivés	1,2	1,2	3,4	3,4
Minéraux non métalliques et produits à dominante non métallique - secteurs du bâtiment et des travaux publics	2,0	2,0	2,8	2,9
Minéraux non métalliques et produits à dominante non métallique - autres activités	0,1	0,1	0,3	0,3
Minéraux métalliques et produits principalement métalliques	0,3	0,3	3,3	3,3
Autres produits	0,3	0,3	3,4	3,4
Autres matières (flux d'équilibrage)	/	1,4	1,4	1,4
Matériaux excavés	/	/	/	1,7
Ensemble	5,0	6,5	20,0	22,4

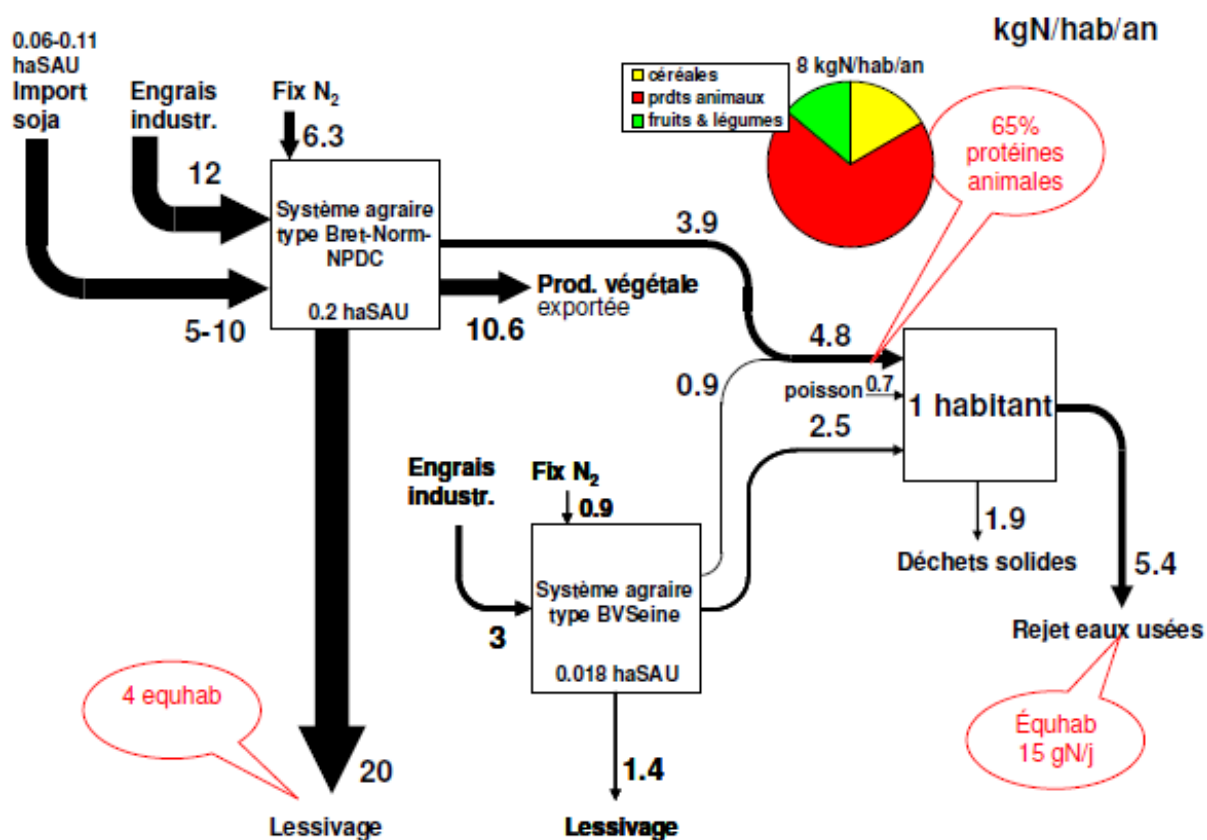
Source : cette étude

Annexe 3. Demande totale énergétique en GJ PCS/hab/an de l'agglomération parisienne entre 1801 et 2006 (hors consommation de la sidérurgie) selon Kim (2013)



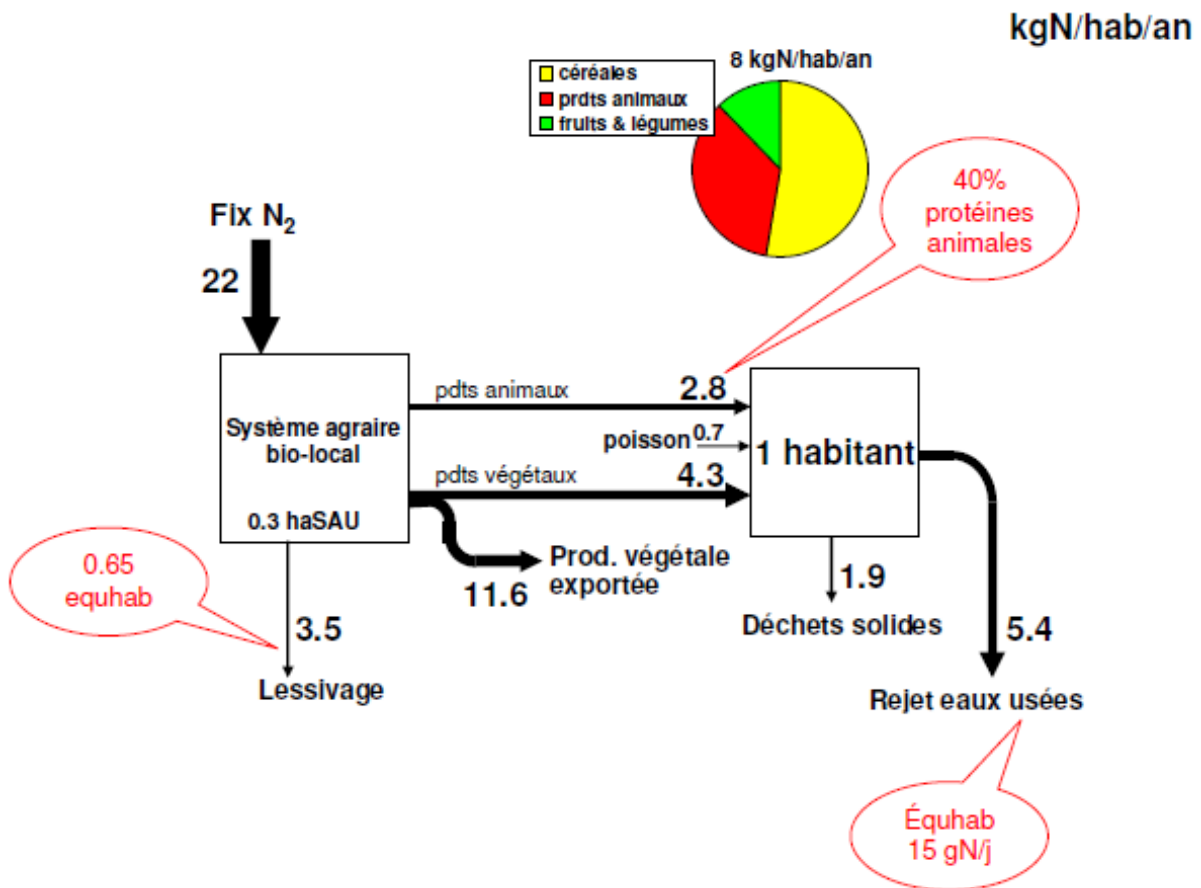
Source : Kim (2013)

Annexe 4. Empreinte azote du Francilien moyen en 2006 (généralisation de la notion d'équivalent habitant) (flux en kgN/habitant/an)



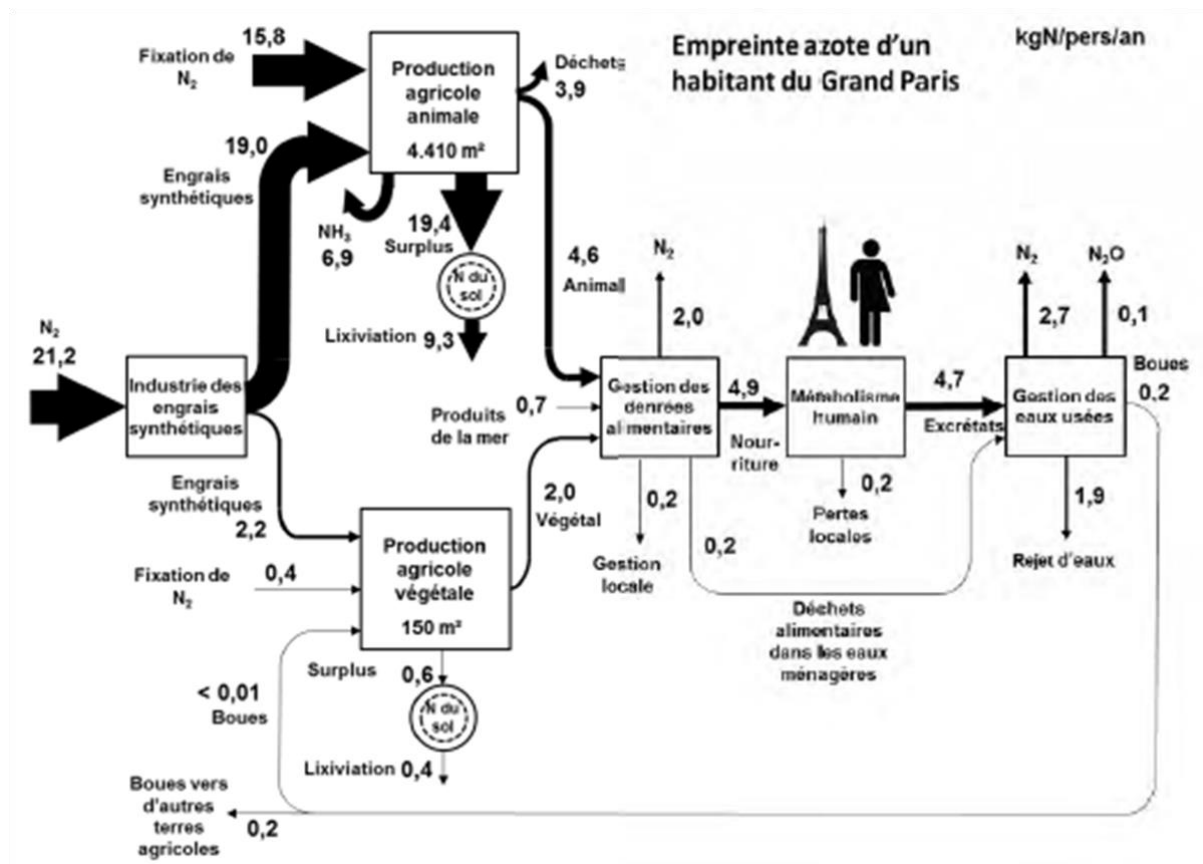
Source : Barles *et al.* (2010)

Annexe 5. Empreinte azote du Francilien moyen dans un scénario hypothétique de généralisation à tout le bassin de la Seine d'un système agricole basé sur le cahier des charges de l'agriculture biologique et sur un régime alimentaire demitarien (flux en kgN/habitant/an)



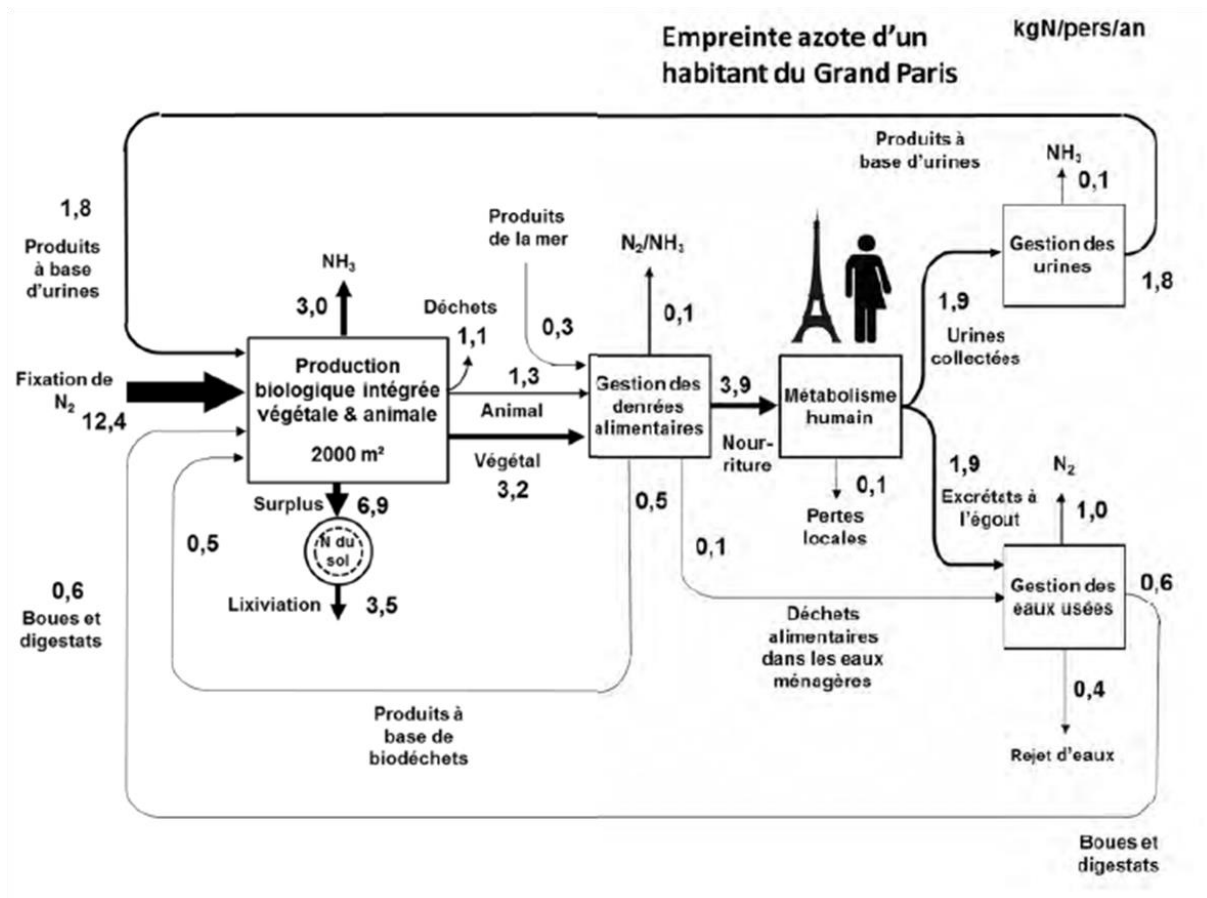
Source : Barles *et al.* (2010)

Annexe 6. Empreinte azote d'un habitant de l'agglomération parisienne en 2013 (flux en kgN/habitant/an)



Source : Esculier (2018)

Annexe 7. Empreinte azote d'un habitant de l'agglomération parisienne en 2053 (flux en kgN/habitant/an)



Source : Esculier (2018)