



**HAL**  
open science

# Métabolisme urbain des villes intermédiaires: l'analyse des flux de matières, l'hinterland et la fonction logistique de Rennes et du Mans (France)

Jean-Baptiste Bahers, Sabine Barles, Mathieu Durand

## ► To cite this version:

Jean-Baptiste Bahers, Sabine Barles, Mathieu Durand. Métabolisme urbain des villes intermédiaires: l'analyse des flux de matières, l'hinterland et la fonction logistique de Rennes et du Mans (France). 2020. halshs-02865903

**HAL Id: halshs-02865903**

**<https://shs.hal.science/halshs-02865903>**

Preprint submitted on 12 Jun 2020

**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.

# **Métabolisme urbain des villes intermédiaires: l'analyse des flux de matières, l'hinterland et la fonction logistique de Rennes et du Mans (France)**

**Jean-Baptiste Bahers**, Chargé de recherche CNRS, UMR ESO CNRS, Université de Nantes

**Sabine Barles**, Professeur à l'Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, Géographie-Cités UMR CNRS

**Mathieu Durand**, Maître de Conférences à l'Université du Maine, UMR ESO CNRS

Preprint dans Journal of industrial ecology de :

**Bahers, Jean-Baptiste, Sabine Barles, et Mathieu Durand.** « **Urban Metabolism of Intermediate Cities: The Material Flow Analysis, Hinterlands and the Logistics-Hub Function of Rennes and Le Mans (France)** ». *Journal of Industrial Ecology* **23**, n° 3 (2019): 686-98. <https://doi.org/10.1111/jiec.12778>.

## **Résumé**

Bien que le métabolisme urbain fasse l'objet d'un regain d'intérêt depuis quelques années, les études connexes restent fragmentées à travers le monde. La plupart d'entre elles concernent les grandes villes (mégalo-poles et / ou capitales nationales) et plus rarement les villes intermédiaires, moyennes ou petites. Cependant, les tendances de l'urbanisation montrent qu'avec le processus de métropolisation, se caractérise aussi la prolifération des villes intermédiaires.

Nous avons étudié le métabolisme de deux villes intermédiaires françaises pour l'année 2012: Rennes Métropole, 400 000 habitants, et Le Mans Métropole, 200 000 habitants. À cette fin, nous avons utilisé l'analyse des flux de matières (AMF) sur la base de la méthodologie développée par Eurostat, adaptée au niveau infranational. Cela a été rendu possible par l'utilisation, pour la première fois, de sources statistiques très précises concernant le fret. Nous avons développé une approche multi-échelles afin de mesurer le métabolisme urbain de ces deux villes et de les comparer à d'autres cas et territoires plus vastes. Cela permet une meilleure compréhension du métabolisme territorial spécifique des villes intermédiaires, de leur hinterland et de leur fonction de hub logistique. Nous concluons sur la « dimension urbaine » du métabolisme social et, grâce à l'approche multi-échelles, au débat sur les pôles logistiques, la dématérialisation et l'autonomie territoriale.

Mots-clés: métabolisme urbain, analyse des flux de matières, villes, urbanisation, arrière-pays, villes intermédiaires, spatialisation, logistique

# 1. INTRODUCTION

La ville est assez tôt apparue aux promoteurs du développement durable comme l'espace permettant de mettre en œuvre cette approche. Cyria Emelianoff (2007) relate que les premières réflexions sur la ville durable cherchaient à « stimuler la capacité à satisfaire localement les besoins fondamentaux » et à ne pas exporter les coûts de développement. L'idée était alors d'organiser des communautés tendant vers l'autosuffisance en termes d'approvisionnement en matières premières, notamment alimentaires et énergétiques. Plus récemment, les travaux du réseau des territorialistes ont repris cette idée que le territoire peut constituer une ressource contre les crises environnementale, culturelle et économique à l'œuvre. L'idée est alors de produire de la richesse « durable » au niveau local autour d'une « auto-soutenabilité environnementale, sociale et culturelle » (Magnaghi, 2014). La bio-région urbaine (concept dérivé des approches de Patrick Geddes, 1915) permet idéalement une intégration des flux dans une économie circulaire de proximité.

Cependant, la connaissance du métabolisme urbain, entendu comme l'ensemble des flux d'énergie et de matière permettant le fonctionnement des villes, demeure aujourd'hui lacunaire. Si les travaux en la matière ont connu un regain d'intérêt depuis quelques années (Weisz, Steinberger, 2010, Zhang et al. 2015), ils restent dispersés de par le monde, souvent concentrés sur les métropoles conçues comme la forme paroxystique et dominante de l'urbanisation planétaire – l'énormité des flux de matières et d'énergie qu'elles mettent en jeu ne laisse en effet pas d'être préoccupante (voir par exemple : Kennedy, 2015). Ils se limitent dans de nombreux cas à l'identification des flux directs dont l'origine géographique reste souvent méconnue, et, lorsque les flux indirects sont quantifiés, ils sont rarement localisés – Zhang et al. (2015) citent néanmoins quelques cas de quantification des flux indirects, et un numéro spécial de *Regional environmental change* (Billen et al., 2012) a été consacré à l'empreinte environnementale des villes et à sa localisation dans le temps.

Pourtant, les villes intermédiaires, les villes moyennes, voire les petites villes, contribuent de façon non négligeable au métabolisme des sociétés humaines, et sont constitutives des processus d'urbanisation (ou parfois de désurbanisation) contemporains. L'analyse des flux d'énergie et de matières qu'elles mettent en jeu et dont elles dépendent s'impose autant que celle des grandes métropoles, non seulement en raison de l'effet de chacune d'entre elles sur leur milieu et les milieux qui les approvisionnent ou les débarrassent de leurs émissions, mais aussi en raison de leurs effets cumulés. En France, l'agglomération parisienne, qui a suscité les principaux travaux relatifs au métabolisme urbain, représente certes 10,6 millions d'habitants, mais les autres villes accueillent 41,6 millions d'habitants, soit 80 % de la population urbaine et 63 % de la population totale (en 2013, INSEE). Leur population est de deux ordres de grandeur inférieure à celle de l'agglomération parisienne, mais elles pèsent indéniablement dans le métabolisme. À l'échelle mondiale, malgré la diversité des processus d'urbanisation, les villes intermédiaires, moyennes et petites jouent un rôle tout aussi important, ayant souvent un lien plus direct avec un hinterland spatialement restreint et donnant ainsi plus de poids au lien entre la ville et son espace environnant. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi, dans cet article, de nous focaliser sur deux de ces villes, Rennes (un peu plus de 400 000 habitants, région Bretagne, France) et Le Mans (un peu moins de 200 000 habitants, région des Pays de la Loire, France), toutes deux situées dans l'ouest de la France. Indépendamment de l'intérêt intrinsèque de la connaissance du métabolisme de ces agglomérations, ces deux nouveaux cas contribueront à la recherche encore embryonnaire d'une typologie du métabolisme territorial (Saldivar-Sali, 2010 ; Barles, 2014 ; Rosado et al., 2016).

Par ailleurs, les débats sur l'économie circulaire, la proximité, la biorégion, que nous venons d'évoquer, nécessitent une meilleure connaissance des relations métaboliques que les villes entretiennent actuellement avec d'autres territoires, et de la portée de leur hinterland réel (Krausmann, 2013 ; Bognon et Barles, forthcoming) – par opposition à l'hinterland idéal (ou de projet) de la proximité. C'est pourquoi nous nous attacherons à déterminer l'étendue des aires d'approvisionnement urbain. De plus, si des travaux antérieurs ont montré que les aires d'évacuation des rejets étaient généralement moins vastes et moins éloignées que les aires d'approvisionnement, il n'en demeure pas moins que les villes exportent une partie de leur insoutenabilité sous la forme de déchets qui parcourent parfois de très longues distances : c'est à la mesure de cette exportation spécifique que nous nous attacherons aussi.

La section suivante (2) présente la méthode utilisée, fondée sur la méthode Eurostat, ainsi que les sources mobilisées, certaines pour la première fois à l'échelle communale (fret). Elle se termine par les principales caractéristiques des deux villes étudiées. Les résultats de l'analyse du métabolisme sont alors exposés (3) : bilan de matières brutes, aires d'approvisionnement, aires d'émission pour les déchets solides de façon comparative entre Le Mans et Rennes. La discussion des résultats (4) permet de mettre en évidence les caractéristiques métaboliques des villes moyennes, notamment par comparaison avec les études menées sur d'autres types de territoires (mégalo-poles ou zones rurales).

## **2. MATERIEL ET METHODE**

La méthodologie utilisée dans cette recherche vise à quantifier le métabolisme territorial à l'échelle urbaine. Pour cela, nous utilisons une MFA (*Material Flow Analysis*) basée sur l'adaptation de la méthode du service européen de la statistique (Eurostat, 2001 & 2009) aux échelles infranationales (Barles, 2009 ; 2010, 2014). Cette dernière reste la plus utilisée et la plus robuste. Elle permet d'identifier les principaux flux entrants et sortants d'un système et ainsi de mesurer la matérialité urbaine et une partie de ses conséquences en termes de pressions urbaines sur l'environnement. Ce choix a également l'avantage de prolonger des études déjà réalisées en France (Barles, 2009 ; 2014) et de les comparer à d'autres territoires investigués par la communauté scientifique.

### **2.1. Les principes de mise en œuvre du métabolisme territorial à travers la MFA**

La réalisation d'une MFA nécessite, dans un premier temps, de quantifier les entrées : l'extraction locale de biomasse, de minéraux et minerais, puis de combustibles fossiles, ainsi que les importations de matières premières, produits semi-finis et finis. Ensuite, il convient de quantifier les sorties : les exportations commerciales (matières premières, produits semi-finis et finis), l'exportation de déchets, les rejets locaux vers la nature (émissions atmosphériques, émissions dans l'eau, mise en décharge), et enfin les flux dissipatifs qui associent usages dissipatifs (épandage d'engrais, de lisier, de boues d'épuration, usages de solvants, de sels de déneigement, etc.) et les pertes dissipatives essentiellement dues à l'usure (des pneumatiques, des chaussées, etc.).

Le principe de conservation de la masse qui fonde les bilans de matières nécessite la quantification des flux d'équilibrage : il s'agit, d'une part, des masses d'air consommé, d'eau et de dioxyde de carbone produits par la respiration humaine et animale, et, d'autre part, des masses d'air consommé et d'eau produite par la combustion du charbon et des hydrocarbures (le dioxyde de

carbone produit à cette occasion étant comptabilisé dans les émissions atmosphériques)<sup>1</sup>. Une fois ces flux équilibrés, le différentiel entre les sorties et les entrées constitue les masses additionnées au stock (c'est à dire ce qui reste dans la ville sous forme de bâtiments, de biens de consommation, etc.).

Le tableau 1 présente tous les indicateurs qui serviront de base à la comparaison entre les deux villes étudiées, ainsi qu'avec d'autres territoires par la suite. La plupart de ces indicateurs sont communs à la méthodologie d'Eurostat, à l'exception de trois indicateurs ajoutés ici, DMC<sub>p</sub>, DMC<sub>corr</sub> et LEPO (Barles, 2009). En effet, alors que DMC rend compte de la consommation intérieure apparente de façon classique (extraction locale plus importation moins exportations), DMC<sub>p</sub> rend compte de la consommation physique, telle qu'elle peut être déduite de l'application du principe de conservation de la masse, donc en comptabilisant les flux d'équilibrage. DMC<sub>corr</sub> consiste à soustraire la partie de déchets importés de la DMC et à y ajouter la part des déchets exportés ; ainsi, la consommation matérielle urbaine n'est pas affectée par les déchets importés ou exportés. L'indicateur LEPO ajoute aux rejets vers la nature (DPO) la catégorie des flux exportés vers la nature. Ainsi, lorsqu'un déchet est traité hors de la ville, les flux résultant de son traitement (rejets atmosphériques et vers le sol) sont comptabilisés dans LEPO. LEPO permet de mesurer les flux vers la nature totaux engendrés par le fonctionnement urbain, et peut servir de base à une meilleure spatialisation des rejets vers la nature.

**Tableau 1. Explanation of indicators and abbreviations.**

| <b>MFA indicators</b> | <b>Explanations</b>  |
|-----------------------|--|
| BI                    | Balancing Inputs   |
| BO                    | Balancing Outputs  |
| DMC                   | Domestic Material Consumption = DMI - exports  |
| DMC <sub>corr</sub>   | Corrected Domestic Material Consumption = DMI – imported wastes – exports except wastes                                |
| DMC <sub>p</sub>      | Consommation physique nette intérieure d'un territoire donné.<br>DMC <sub>p</sub> = DPO + NAS = DMI – Export + BI - BO |
| DMI                   | Direct Material Input<br>DMI + BI = NAS + DMO + BO   |
| DMO                   | Direct Material Output = DPO + exports   |
| DPO                   | Domestic Processed Output  |
| LEPO                  | Local and Exported Processed Output = DPO + exported flows to nature   |
| NAS                   | Net Addition to Stock  |
| TDO                   | Total Domestic Output  |
| TMI                   | Total Material Input<br>TMI + BI = NAS + TMO + BO  |
| TMO                   | Total Material Output  |
| TMR                   | Total Material Requirement   |

---

<sup>1</sup> S'y ajoute la masse d'azote gazeux consommé par le procédé Haber-Bosch lorsque le territoire comprend une usine de production d'engrais azoté ou d'explosifs à base d'azote, ce qui n'est pas le cas de nos territoires d'étude.

Notre analyse accordant une place importante à la spatialisation du métabolisme urbain, certaines de ses composantes sont étudiées de manière approfondie. Il s'agit notamment :

- Des flux d'importation, qui sont catégorisés selon les grands types de marchandises (Appareils manufacturés, Produits agricoles et alimentaires, Matériaux de construction, Minerais et produits métallurgiques, Engrais et produits chimiques, Combustibles et produits pétroliers, Matières premières secondaires, Divers).
- Pour les flux d'importations et d'exportation, des aires d'approvisionnement et d'émission, pour lesquelles on distingue les échelles départementale, régionale, nationale ou internationale.
- Des flux de déchets, qui sont analysés de façon à identifier les échelles spatiales de recyclage, valorisation, et élimination (lorsque les déchets ne sont pas traités localement).

## **2.2. Des sources de données hétérogènes**

Les données utilisées sont une combinaison de sources statistiques et de données locales. L'année 2012 est choisie car elle est la plus récente pour certaines bases de données. Les statistiques mobilisées sont celles du BRGM<sup>2</sup> (pour les matériaux de construction), d'AGRESTE<sup>3</sup> (pour les produits agricoles), et de SITRAM<sup>4</sup> (pour les flux d'importation et d'exportation de marchandises)<sup>5</sup>.

Les travaux conduits aux échelles infranationales en France ont été jusqu'ici limités aux régions et départements administratifs, limitant les MFA urbaines au cas de l'agglomération parisienne (Paris étant un département)<sup>6</sup>. Dans ce travail, la mobilisation de sources statistiques à l'échelle communale (pour le fret notamment) permet d'appliquer la méthode à une échelle infradépartementale, et donc de traiter le cas d'autres villes que Paris. En effet, la base SITRAM, commercialisée par le ministère de l'Écologie à l'échelle départementale, a pu, pour la première fois dans le cadre de ce type de recherche, être utilisée à l'échelle communale. Ceci a permis de réaliser la MFA des deux agglomérations retenues dans le cadre de ce travail.

Bien que les questions de rejets environnementaux soient à l'agenda politique, les données rendant compte de leur évolution sont très disparates. La production de données locales fait progressivement l'objet de cadres réglementaires. Ainsi, un diagnostic des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre est obligatoire dans le cadre des Plans Climat-Energie Territoriaux. De même, la planification territoriale de la gestion de tous les types de déchets (sauf agricoles) est encadrée par la réglementation. Cependant, les méthodologies employées pour réaliser ces diagnostics de flux pour ces dispositifs sont parfois dissemblables et peu étayées. Cela dépend fortement de la volonté et de la capacité des collectivités à rendre compte de ces informations, à détailler la méthode mise en œuvre (notamment en ce qui concerne les flux indirects), et donc à

---

<sup>2</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières

<sup>3</sup> Base de données statistique et évaluation pour la prospective agricole du ministère de l'agriculture.

<sup>4</sup> Base de données Système d'information sur les transports de marchandises du Ministère de l'environnement.

<sup>5</sup> L'annexe donne le détail des sources de données.

<sup>6</sup> En France, le territoire est divisé en 18 régions, regroupant plusieurs départements (pour un total de 101 à l'échelle nationale), eux-mêmes constitués de plusieurs communes (35 416 au total).

produire des métadonnées. Nous avons pu néanmoins corriger les données et estimer ces flux en vérifiant leur cohérence par rapport aux résultats qu'apportent d'autres statistiques régionales. Par exemple, la consommation de combustible fossile de la base EIDER (Ministère de l'Écologie) est une base de comparaison avec les données obtenues auprès des institutions locales, de même que les données issues des observatoires régionaux des déchets.

L'hétérogénéité des données mobilisées, ainsi que la fiabilité et l'exhaustivité relatives de certaines d'entre elles, invite à la plus grande prudence quant à leur utilisation. Les calculs d'incertitude ne sont malheureusement pas possibles pour l'ensemble des données, au vu du manque de métadonnées dans certaines bases statistiques. Une analyse qualitative de leur fiabilité a cependant été effectuée dans le cadre du projet de recherche MUEED<sup>7</sup> (Durand et *al.*, 2016), auquel le lecteur pourra se reporter.

### **2.3. Rennes et Le Mans : étudier le métabolisme de villes intermédiaires**

Le Mans et Rennes sont deux villes intermédiaires de l'ouest français, respectivement peuplées, en 2012, de 184 446 et 414 149 habitants (INSEE, 2012). Ces chiffres concernent les entités politiques et administratives, connues sous les noms de Communauté Urbaine de Le Mans Métropole et Communauté d'Agglomération de Rennes Métropole (regroupant chacune plusieurs communes). Le Mans Métropole se concentre sur un espace resserré autour de la ville-centre d'une superficie de 157,41 km<sup>2</sup> (INSEE, 2013). Le territoire est donc très urbanisé et n'intègre que peu d'espaces agricoles : la SAU (Surface Agricole Utile) ne représente que 26% de la superficie de la ville<sup>8</sup>. Au contraire, Rennes Métropole est beaucoup plus étendue. Deux fois plus peuplée que Le Mans, la communauté d'agglomération est également 4,5 fois plus étendue avec une superficie de 711,3 km<sup>2</sup> englobant de vastes territoires agricoles (SAU) qui couvrent 45% de sa surface (INSEE, 2013). La ville est ainsi en capacité d'avoir une production de matières premières (agricoles ou minérales) plus importante que celle du Mans.

Les deux villes présentent un léger différentiel de dynamisme, ce qui peut annoncer des résultats différents en termes de métabolisme. Rennes a en effet connu une croissance démographique de 1,2% entre 2008 et 2013, quand pour Le Mans celle-ci se limitait à 0,2%. Cette différence s'exprime également dans un secteur clef pour comprendre le métabolisme d'une ville, celui de la construction : le nombre de logements a progressé de 9,5% entre 2008 et 2013 à Rennes Métropole, contre seulement 3,4% à Le Mans Métropole. De même, la part des entreprises classées dans la sphère productive<sup>9</sup> par l'INSEE est de 42,1% à Rennes, contre 34,8% au Mans. Ces informations sont corroborées par le nombre d'emplois et d'entreprises existant dans les secteurs agricoles et de la construction, toujours plus importants à Rennes (en valeur absolue comme relative) qu'au Mans.

---

<sup>7</sup> Projet « Métabolisme Urbain, Empreinte Environnementale et gestion des Déchets », réalisé par l'Université du Maine (UMR ESO CNRS), l'École des Métiers de l'Environnement (UMR ESO CNRS) et l'Université de Paris-Est Marne-La-Vallée (Lab'Urba - Génie Urbain), sous financement ADEME entre 2012 et 2016.

<sup>8</sup> Ce terme de "ville" sera dorénavant toujours utilisé pour désigner la Communauté Urbaine de Le Mans Métropole et la Communauté d'Agglomération de Rennes Métropole.

<sup>9</sup> Selon l'INSEE, le secteur productif correspond aux « activités qui produisent des biens majoritairement consommés hors de la zone ».

Toutes deux situées dans l'ouest de la France, Rennes et Le Mans sont à l'écart des grands flux de transit international traversant le pays. Elles sont cependant les exutoires terrestres naturels de la région Bretagne pour Rennes et de tout l'ouest (régions Bretagne et Pays de la Loire) pour Le Mans. Elles constituent par exemple des portes de sorties routières et ferroviaires vers la région parisienne. Les deux villes sont toutefois bien connectées aux flux internationaux de marchandises via la proximité de plusieurs grands ports français (Saint Nazaire, Caen et même Le Havre).

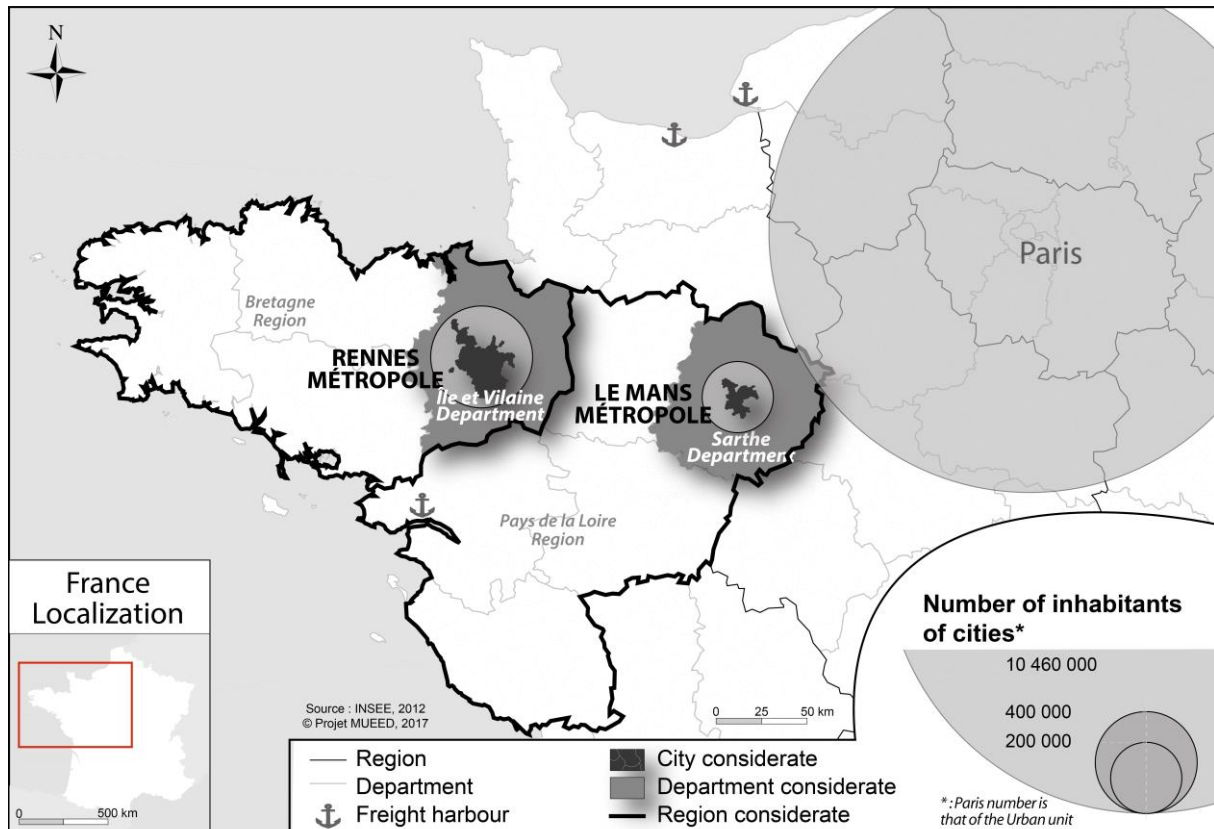


Figure 1. Localisation des villes de Rennes et du Mans (France)

### 3. RESULTATS : LE METABOLISME DE RENNES METROPOLE ET DE LE MANS METROPOLE

#### 3.1. Les entrées, sorties et stocks de matières

La Figure 2 synthétise les résultats obtenus pour les deux villes qui, si elles mettent en jeu des flux totaux très différents, affichent des ordres de grandeur très voisins lorsqu'ils sont ramenés à la population : la DMI atteint par exemple 30,7 t/hab à Rennes, contre 29,4 t/hab au Mans. La figure 4 montre aussi des profils très semblables entre Rennes et Le Mans, ce qui tend à montrer qu'il existe une homogénéité métabolique entre les deux villes, chaque indicateur (rapporté à l'habitant) présentant moins de 10% d'écart (moins de 1,5 t/hab.) d'une ville à l'autre.



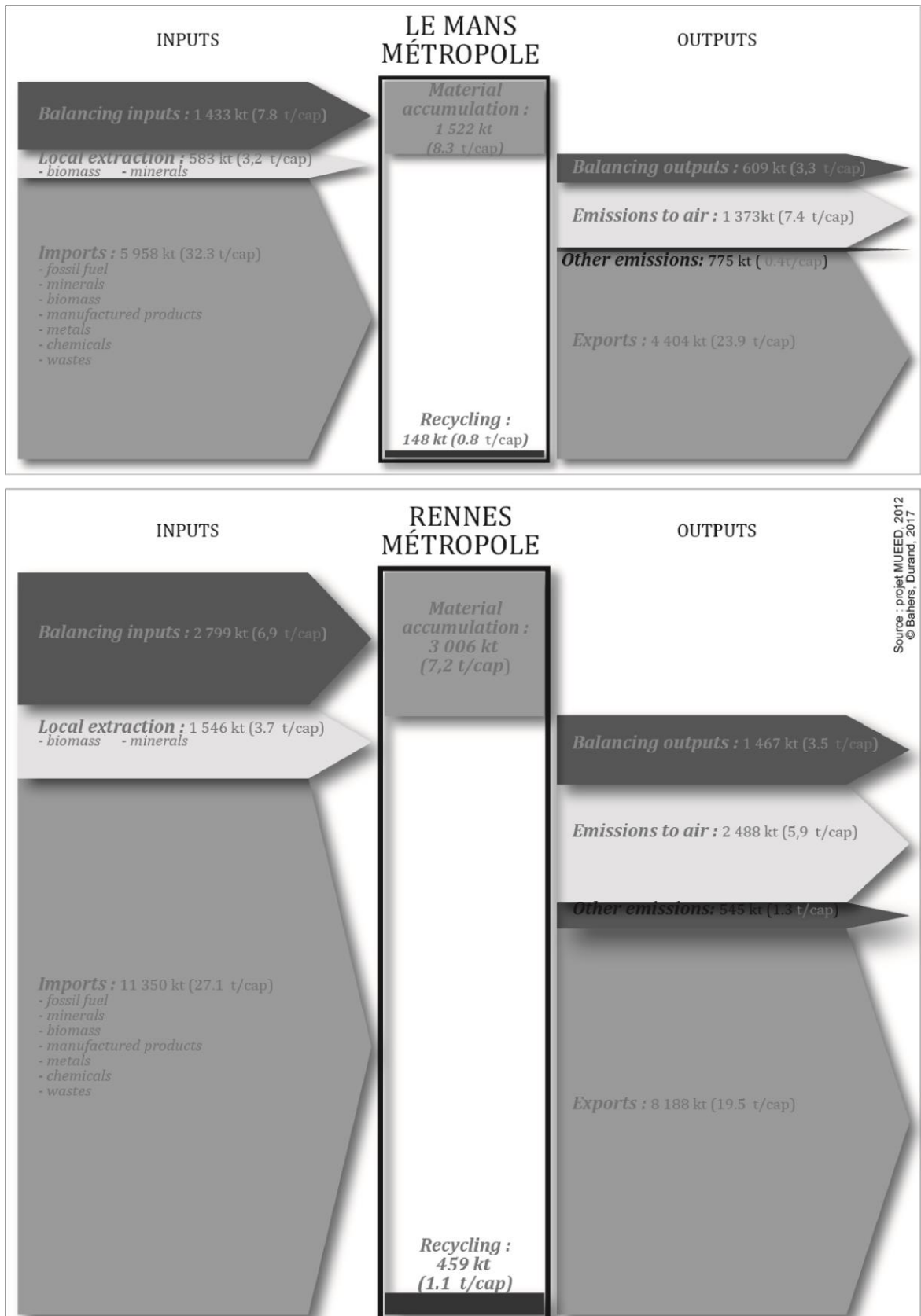


Figure 2. Bilan de matières brutes de a) Rennes métropole et b) de Le Mans Métropole, kt (t/hab)(2012)

Dans les deux cas, le poids des importations est considérable (88% de la DMI à Rennes et 91% au Mans), de même que celui des exportations (respectivement 73 et 71% de la DMO) : ceci illustre le rôle de pôle logistique joué par ces villes. L'extraction locale (matériaux de construction et biomasse) est minime au regard de ces importations (12% de la DMI à Rennes et 9% au Mans), mais représente respectivement 32 % et 22 % de la DMC. Ces chiffres traduisent le taux d'autosuffisance matérielle théorique brute des deux villes, théorique car rien ne nous dit que l'extraction locale est consommée localement, brute car les matières ne sont pas distinguées. Le potentiel d'autosuffisance n'est donc pas négligeable, et montre en outre la différence d'usage des sols entre les deux villes. Il faudrait bien sûr produire une analyse plus fine pour vérifier l'adéquation entre l'extraction locale et les besoins locaux, mais cet indicateur donne un premier aperçu des possibilités locales, au sein des périmètres institutionnels (qui, par ailleurs, ne sont pas supposés refléter une cohérence métabolique et n'ont pas été définis en fonction d'exigences d'autosuffisance).

Les rejets vers la nature atteignent 7,2 t/hab à Rennes et 7,9 t/hab au Mans, dont respectivement 82% et 95% d'émissions atmosphériques (pour l'essentiel des dioxydes de carbone issus de la combustion des moteurs), cette différence s'expliquant à nouveau par la présence d'une activité agricole soutenue à Rennes, qui engendre des usages dissipatifs ou des mises en décharge plus importantes qu'au Mans. Par comparaison, le recyclage est très faible (seulement 1,1 t/hab à Rennes et 0,7 t/hab au Mans) et participe donc peu à la dématérialisation urbaine malgré les nombreux efforts qui sont fournis par les habitants pour mieux trier leurs déchets. Ces gestes sont d'ailleurs largement soutenus par des politiques publiques qui se focalisent sur cet enjeu, ce qui donne à penser qu'il existe une « *articulation of governmentality, then, instrumentalizes a particular public in relation to waste* » (Hird, 2015, p4) et qui a parfois pour effet rebond de soutenir la consommation lorsque sont mises en œuvre des campagnes de sensibilisation citoyenne au tri des déchets (Hird, 2017, Workshop Opening the bins). En effet, la production de déchets ménagers est soutenue (0,46 t/hab à Rennes et 0,52 t/hab au Mans), mais reste inférieure aux déchets du BTP (1,3 t/hab à Rennes et 0,68 t/hab au Mans), aux déchets banals et dangereux des activités économiques (0,53 t/hab à Rennes et 0,71 t/hab au Mans) et aux déchets agricoles à Rennes (0,80 t/hab - seulement 0,18 t/hab au Mans) et ne représente au total que 15 % des déchets produits à Rennes et 25 % au Mans. Enfin, une quantité non négligeable de déchets est importée (0,20 t/hab à Rennes et 1 t/hab au Mans) soit comme matières premières secondaires utiles aux industries manuelles, soit comme des rebuts à traiter par les entreprises de gestion des déchets situées dans le périmètre urbain.

L'addition unitaire au stock est du même ordre de grandeur au Mans (8,3 t/hab) et à Rennes (7,2 t/hab) où elle est environ double en valeur absolue. Le Mans, sans être catégorisée comme une ville en décroissance, connaît pourtant une stagnation relative (cf § 2.3). On peut donc faire l'hypothèse que la faible dynamique démographique ne suffit pas à ralentir l'augmentation du stock et n'engendre donc pas mécaniquement un processus de dématérialisation urbaine. Par ailleurs, il existe une difficulté à analyser la NAS du fait du temps de résidence des matériaux et des déchets du BTP (Browne et al. 2009), ce qui nécessite une analyse plus fine et dynamique (Schiller et al. 2017).

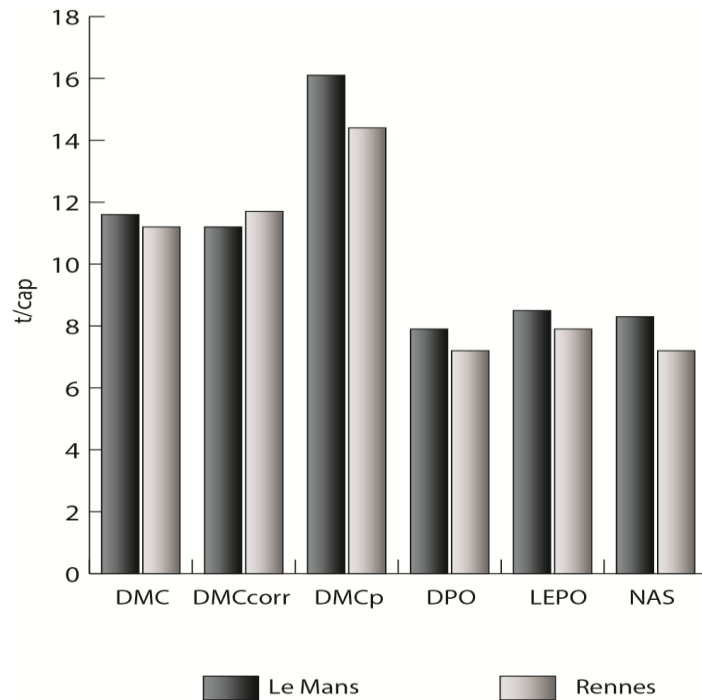
**Tableau 2 : Importation et exportation (Rennes Metropole et Le Mans Metropole, in 2012)**

|                              | Rennes Metropole |       |        | Le Mans Metropole |       |        |
|------------------------------|------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|
|                              | kt               | t/cap | %      | kt                | t/cap | %      |
| <b>Imports</b>               |                  |       |        |                   |       |        |
| <i>Manufactured products</i> | 2,192            | 5.29  | 19.32% | 1,079             | 5.85  | 18.11% |
| <i>Biomass</i>               | 2,161            | 5.22  | 19.04% | 1,849             | 10.02 | 31.03% |

|   |               |              |        |              |              |        |
|---|---------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------|
| <i>Building minerals</i>                | 4,366         | 10.54        | 38.47% | 1,504        | 8.15         | 25.24% |
| <i>Metals</i>                           | 180           | 0.44         | 1.59%  | 113          | 0.61         | 1.89%  |
| <i>Fossils fuels</i>                    | 1,067         | 2.58         | 9.40%  | 1,013        | 5.49         | 17.00% |
| <i>Fertilizer and chemical products</i> | 129           | 0.31         | 1.14%  | 57           | 0.31         | 0.96%  |
| <i>Other products</i>                   | 1,188         | 2.87         | 10.47% | 154          | 0.83         | 2.58%  |
| <i>Imported waste</i>                   | 65            | 0.16         | 0.57%  | 190          | 1.03         | 3.19%  |
| <b>Total Import</b>                     | <b>11,350</b> | <b>27.40</b> |        | <b>5,958</b> | <b>32.30</b> |        |
| <b>Exports</b>                          |               |              |        |              |              |        |
| <i>Manufactured products</i>            | 1,588         | 3.83         | 19.39% | 663          | 3.60         | 15.06% |
| <i>Biomass</i>                          | 1,520         | 3.67         | 18.57% | 1,335        | 7.24         | 30.32% |
| <i>Building minerals</i>                | 2,799         | 6.76         | 34.19% | 1,235        | 6.70         | 28.06% |
| <i>Metals</i>                           | 139           | 0.33         | 1.69%  | 81           | 0.44         | 1.83%  |
| <i>Fossils fuels</i>                    | 459           | 1.11         | 5.61%  | 688          | 0.33         | 15.62% |
| <i>Fertilizer and chemical products</i> | 91            | 0.22         | 1.11%  | 60           | 1.17         | 1.36%  |
| <i>Other products</i>                   | 1,318         | 3.18         | 16.10% | 215          | 3.73         | 4.88%  |
| <i>Exported waste</i>                   | 274           | 0.66         | 3.35%  | 126          | 0.68         | 2.86%  |
| <b>Total Export</b>                     | <b>8,188</b>  | <b>19.77</b> |        | <b>4,404</b> | <b>23.88</b> |        |

### 3.2. Comparaison des caractéristiques de la consommation

Les indicateurs de la consommation (DMC, DMCcorr, et DMCp) sont très proches. Les DMC du Mans et de Rennes sont respectivement de 11,6 t/hab. et 11,2 t/hab. En outre, les flux de déchets importés atteignent 190 kt au Mans et 65 kt à Rennes, alors que les flux vers la nature engendrés à l'extérieur des périmètres urbains par le traitement des déchets exportés sont de 126 kt au Mans et 274 kt à Rennes. Ceci est loin d'être négligeable et vient affecter les DMCcorr (11,2 t/hab au Mans et 11,7 t/hab. à Rennes). La DMCp, qui traduit la consommation physique nette intérieure des territoires en associant les flux d'équilibrage au bilan, s'avère bien plus élevée que la DMC classique qu'elle dépasse de 39 % au Mans et 28 % à Rennes.



**Figure 3. Indicateurs du MFA pour Rennes et Le Mans en t/hab. (2012)**

Ces indicateurs sont importants car ce sont eux qui renferment les perspectives de dématérialisation à l'échelle de la ville. Les opportunités de *dématérialisation urbaine* peuvent être approfondies par une décomposition de la DMC par grandes catégories de matières, présentée sur la figure 4 qui traduit à nouveau une assez grande homogénéité entre les deux villes. La consommation matérielle principale est constituée, sans grande surprise, par les minéraux non métalliques, *i. e.* les matériaux de construction, suivie par la biomasse. Ainsi, les besoins élémentaires consistant à se nourrir et à s'abriter restent fondamentaux. Il est aussi important de souligner que la répartition des emplois et des entreprises entre les secteurs industriels, de la construction et agricole sont assez proches entre les deux villes (Tableau 2), ce qui justifie ces similarités. Enfin, les appareils manufacturés et les combustibles fossiles oscillent entre 1,5 et 2,3 t/hab, alors que les minerais métalliques sont marginaux. En termes de dématérialisation, on retrouve ici l'enjeu déjà cité des processus d'urbanisation, auquel s'ajoute celui de la biomasse. En effet, l'essentiel de la biomasse consommée par les villes est représenté par des produits alimentaires. Selon l'enquête INCA (Lafay, 2009), la prise alimentaire des 18-79 ans représente, à l'échelle nationale 1 t/hab/an (tous aliments et boissons manufacturées confondus), à comparer à la consommation nette de Rennes et Le Mans, qui s'élève à plus de 3 t/hab/an, soit un différentiel de 2 tonnes, en grande partie constitué par des pertes et gaspillages.

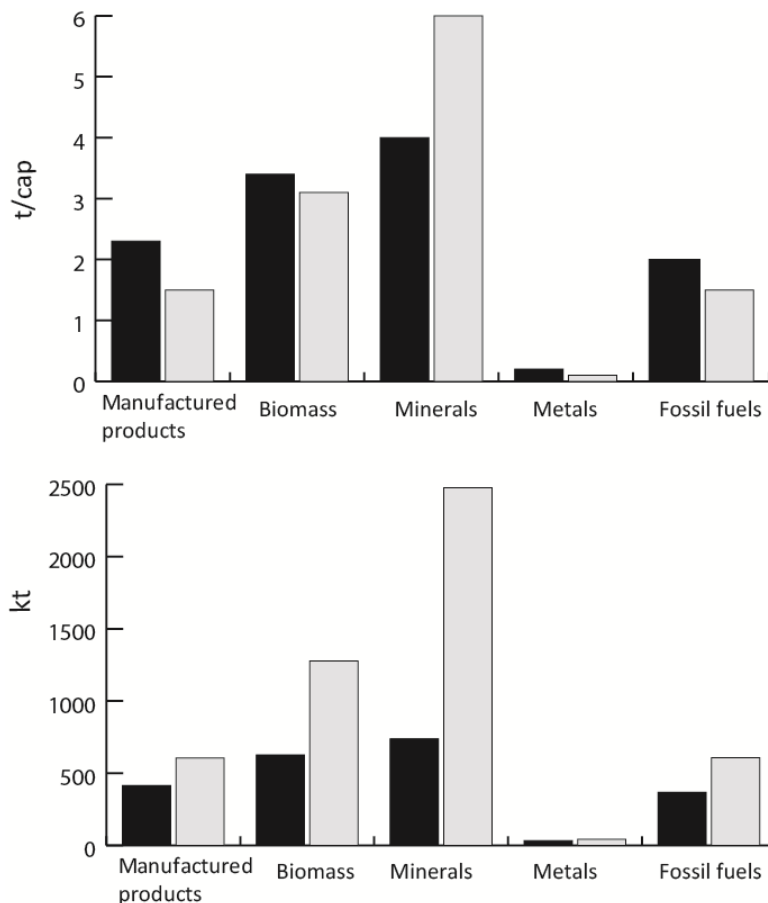


Figure 4. DMC par catégories de matières de Rennes et Le Mans, 2012, en t/hab et kt

### 3.3. Spatialisation du métabolisme : un hinterland à géométrie variable

La spatialisation du métabolisme permet d'identifier la provenance des différents flux entrants et la destination des flux sortants et offre de nombreuses pistes de réflexion quant aux relations matérielles qu'entretient la ville avec son hinterland d'approvisionnement, de distribution et de rejets. Cette approche multiscale du métabolisme permet d'aborder les questions relatives aux aspects socio-spatiaux et politiques de la gestion des ressources des aires urbaines, comme le font d'autres chercheurs: "Making our analysis multi-scalar (rather than setting rigid system boundaries around the urban system) reveals an assemblage of local, metropolitan and global dynamics that shape cities' waste metabolisms" (Guibrunet, et al. 2016).

La figure 5 présente la part relative des importations, des exportations, de la mise en décharge et du recyclage à différentes échelles spatiales (présentées sur la figure 2) : urbaine, départementale, régionale, nationale/internationale. Elle montre la géométrie très variable des hinterlands selon les flux considérés. En effet, les importations et exportations sont réparties de façon inégale entre les différentes échelles, ce qui traduit la dépendance des villes étudiées à l'égard de l'extérieur. Pour autant, une majorité des importations (environ deux tiers) est réalisée aux frontières régionales et certaines catégories de marchandises ont clairement un espace d'approvisionnement plus local, comme les minéraux, la biomasse et les matières secondaires. Pour être plus précis, il existe deux grandes catégories de produits (cf. Figure 6):

- les biens "locaux". Ces biens sont importés principalement au niveau départemental et régional, comme la biomasse (68% au Mans, 59% à Rennes), les matériaux de construction (90% au Mans et 80% à Rennes) et les matières secondaires (90% au Le Mans et Rennes).

- les biens fortement mondialisés comme les produits manufacturés (seulement 30% des importations de la région pour Le Mans et Rennes), les énergies fossiles (pas d'importations locales) et les métaux (7% pour Le Mans et 14% pour Rennes)

De plus, il convient de noter que les exportations suivent les mêmes trajectoires logistiques. En effet, les biens locaux sont principalement exportés à l'intérieur des frontières régionales (entre 60% et 80% au Mans et à Rennes), ce qui n'est pas le cas pour les biens plus mondialisés (entre 30% et 40% pour les produits manufacturés et les métaux). Seuls les combustibles fossiles n'obéissent pas à cette règle, car ils sont principalement exportés à l'intérieur des frontières régionales (60%).

Ceci traduit la solidarité relative qui unit les villes à leurs territoires environnants, solidarité métabolique qui pourrait servir de base à une politique matérielle élaborée à l'interface des villes et des régions, notamment concernant les matériaux de construction et la biomasse comme évoqué précédemment. Ces réflexions inter-territoriales sont primordiales pour mener des stratégies de dématérialisation et de bouclage de flux, probablement autant si ce n'est plus que celles qui promeuvent l'autonomie urbaine qui peut être considérée comme en contradiction avec la notion même de ville (Barles, 2015 & forthcoming). Cependant, elles sont pour l'instant freinées par les logiques d'économie d'échelles de l'ensemble des acteurs qui privilégient une proximité industrielle et infrastructurelle à une proximité sociale et spatiale (Bahers, Durand, 2017). Les acteurs publics, quant à eux, n'ont pour le moment pas d'outils juridiques et réglementaires en France pour rapprocher les hinterlands d'approvisionnement des villes.

Concernant les rejets, l'indicateur LEPO est primordial pour montrer, notamment dans les villes, qu'une partie des flux vers la nature est exportée en dehors de la zone urbaine. Si l'on ne prend en compte que les rejets vers les sols et l'eau, les flux exportés (0,7 t/hab.) sont plus significatifs au Mans que le cumul des mises en décharges et des flux dissipatifs (0,4 t/hab.). Presque deux fois plus de rejets solides et liquides sont exportés hors de la ville que traités par des infrastructures urbaines. Ce constat est moins contrasté à Rennes même si les exportations de rejets sont très élevées. La ville est donc loin d'être autonome en capacité de traitement et conduit à son externalisation. Ainsi, au Mans et à Rennes, les mises en décharge sont effectuées soit à l'intérieur du périmètre urbain soit au sein de territoires proches, mais également vers des territoires plus lointains dans le cadre de filières de traitement nécessitant une technologie plus poussée. En outre, la majorité du recyclage de déchets urbains est réalisée à l'échelle nationale voire mondiale près de 80 % pour Le Mans, plus de 50 % pour Rennes, dont respectivement 40 % et 57 % hors de France). Les matières récupérées rencontrent ainsi la logique des trajectoires spatiales du cours des matières premières secondaires qui impliquent une exportation massive vers des pays très consommateurs. Si le bouclage des flux est un principe de l'économie circulaire, son application à des échelles mondialisées perd de son sens si l'on réfléchit en termes de métabolisme urbain. Ces résultats confirment ce qui a été observé ailleurs : les aires d'approvisionnement sont plus vastes que les aires d'émission. Cependant, ils montrent aussi l'importance d'une autre géographie, celle du recyclage, qui semble échapper à tout principe de proximité, ce que les politiques publiques paraissent omettre.

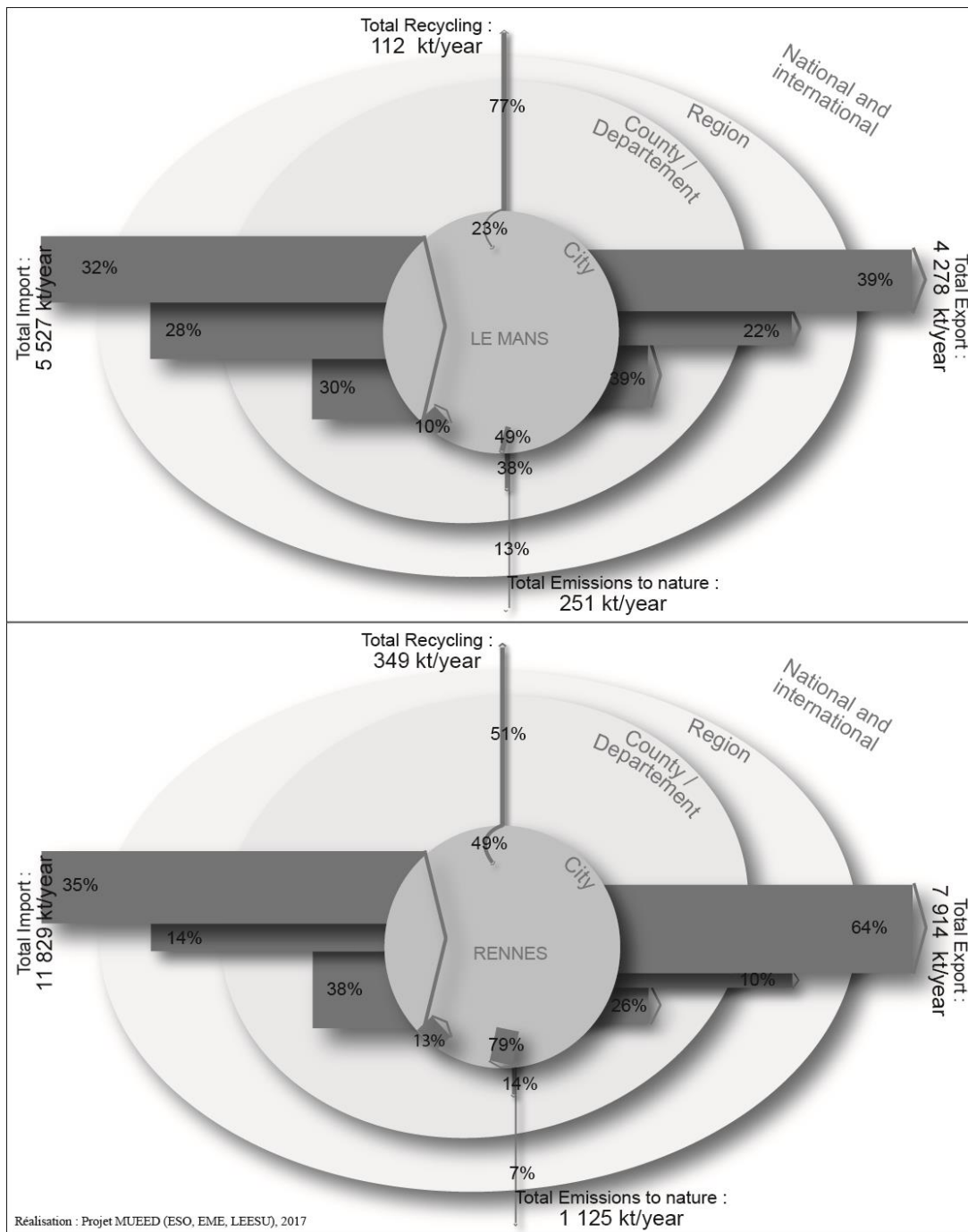


Figure 5. Part des relations matérielles entre villes et différentes échelles territoriales

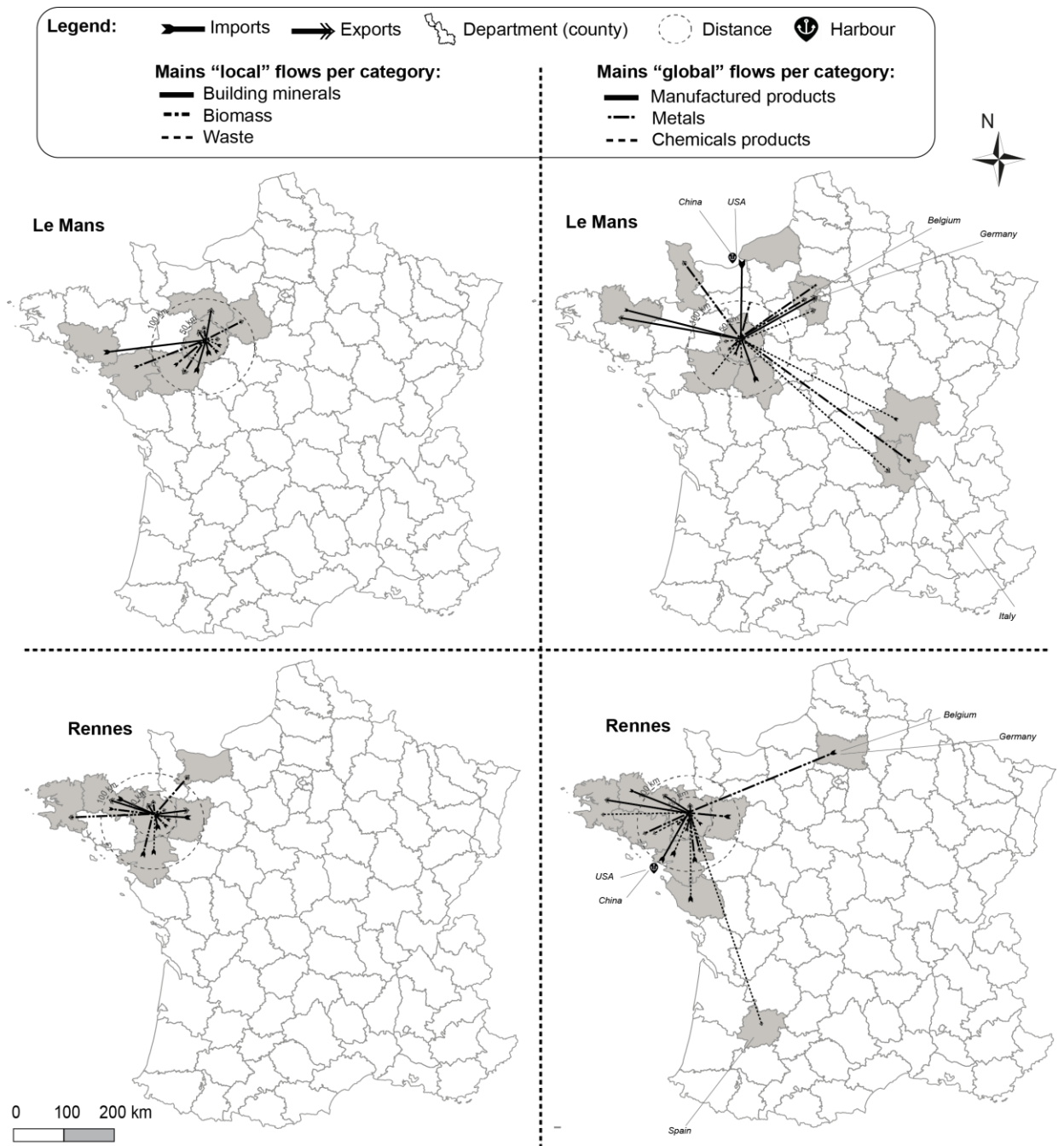


Figure 6 : Spatialisation des flux locaux et globaux

#### 4. DISCUSSION : QUEL PROFIL METABOLIQUE POUR LES VILLES INTERMEDIAIRES ?

Rennes et Le Mans sont deux villes intermédiaires au métabolisme comparable, comme nous venons de le voir. La figure 7 montre les contrastes existant avec d'autres territoires : une mégalopole (la métropole parisienne (Paris et Petite Couronne) – 6 507 780 habitants, 764 km<sup>2</sup> de superficie), un territoire ruralo-industriel (l'Ariège - 152 366 habitants, 4 890 km<sup>2</sup> de superficie) et un territoire mixte ruralo-urbain comme le département de Haute Garonne (1 279 349 habitants, 6 309 km<sup>2</sup> de superficie).



La comparaison montre une très nette différence entre ces territoires : à l'exception de DMI et DMO, tous les indicateurs de nos deux villes sont compris entre ceux de la métropole parisienne d'une part et ceux de l'Ariège et de la Haute-Garonne d'autre part. Le niveau de consommation matérielle (entre 11.2 t/hab. et 11.7 t/hab. pour DMC et DMCcorr) est en outre assez proche de celui d'autres villes européennes (Rosado, Kalmykova, et Patrício 2016; Sastre, Carpintero, et Lomas 2015; Athanassiadis, Bouillard, Crawford, et Khan 2016; Rosado, Niza, et Ferrão 2014), et de la moyenne française (12 t/hab. selon le CGDD<sup>10</sup>).

DMI et DMO sont en revanche supérieurs à tous les autres. Les flux de transit (Importations et exportations) sont supérieurs aux autres territoires dans les villes intermédiaires. Cette fonction urbaine est bien plus importante que dans une mégalopole, saturée par des fonctions tertiaires, décisionnaires et résidentielles, et que dans les territoires semi-ruraux, dont les infrastructures ne permettent pas une circulation importante de la matière. Le territoire rural qu'est l'Ariège laisserait à penser qu'il s'en approche au vu de son entrée de matière (DMI) ; celle-ci est en réalité constituée d'extraction locale de matériaux. Ainsi, les importations et exportations du Mans et de Rennes sont à minima deux fois supérieures aux autres territoires. Ces villes intermédiaires ont ainsi pour fonction de regrouper des matières pour ensuite les disséminer dans d'autres territoires proches. Ce sont donc des métabolismes logistiques qui ont surtout pour vocation l'échange des matériaux. Cette « centrifugeuse » métabolique s'explique en partie par la présence d'activités de hubs et de distribution dans ces aires urbaines. Ce résultat a également été observé par une étude du métabolisme urbain de Cape Town en Afrique du Sud, qui démontre « the role of the city as a regional hub » (Hoekman et von Blottnitz 2016).

Cependant, les territoires d'approvisionnements et de rejets ne sont en définitive pas très éloignés de ces villes intermédiaires, au moins en partie (§ 3.3) et traduisent relations socio-matérielles spécifiques. Cette perspective va à l'encontre de la théorie de l'urbain généralisé (énoncée par Neil Brenner (2014), inspiré de la pensée d'Henri Lefebvre), qui stipule que l'ensemble des ressources serait contrôlé par les acteurs urbains. Ces relations entre ville et hinterland sont probablement plus complexes et pourraient être enrichies par une lecture de l'économie politique du métabolisme (Verdeil 2015) qui étudie la spatialisation des jeux de pouvoir, parfois moteurs de nouvelles circulations matérielles et énergétiques.

Par ailleurs, l'importance des importations et exportations caractéristique des deux villes engendre des flux indirects très importants. Selon le CGDD (2016), et à l'échelle nationale, les flux indirects représentent en moyenne 3.5 tonnes de flux cachés par tonnes de flux importés et 4.1 t pour les exportations. Ainsi, pour Le Mans et de Rennes, cela revient respectivement à 110 t/hab. et 76 t/hab pour les flux indirects associés aux importations et 62 t/hab. et 42 t/hab pour les flux indirects associés aux exportations, ce qui est considérable — à l'échelle d'un pays, ce flux est bien moins important (environ 30% dans (Raupova, Kamahara, et Goto 2014) puisque les importations et exportations pèsent beaucoup moins dans le bilan, au profit de l'extraction, de la consommation et des rejets vers la nature nationaux. Cette externalisation du métabolisme est une caractéristique inhérente aux villes en général, mais semble exacerbée dans le cas des villes intermédiaires du fait de leur fonction de pôle logistique.

---

<sup>10</sup> Matières mobilisées par l'économie française : une baisse stabilisée depuis la crise de 2008, CGDD, mai 2016. Disponible sur <[http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits\\_editoriaux/Publications/Chiffres\\_et\\_statistiques/2016/chiffres-stats761-matieres-mai2016.pdf](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Chiffres_et_statistiques/2016/chiffres-stats761-matieres-mai2016.pdf)>, lu le 15/06/17

Enfin, Le Mans et Rennes se caractérisent par de fortes additions au stock et des rejets importants. Le NAS y est bien supérieur à celui de Paris, ce qui semble corroborer l'importance des mécanismes d'urbanisation et d'étalement urbain, tant dans les logements que dans les infrastructures. L'artificialisation des sols est encore en cours dans ces villes (entre 2006 et 2012, elle a touché 631 ha à Rennes, soit + 4,4 %, et 157 ha au Mans, soit + 1,8 %), alors qu'à Paris la situation est celle d'un renouvellement urbain plutôt que d'un stockage additionnel. Ainsi, l'étalement urbain s'observe particulièrement bien dans ces villes intermédiaires, ce que corrobore l'indicateur NAS/ha qui a des valeurs entre 200 et 300 fois supérieures à l'Ariège, la Haute-Garonne et à Paris.

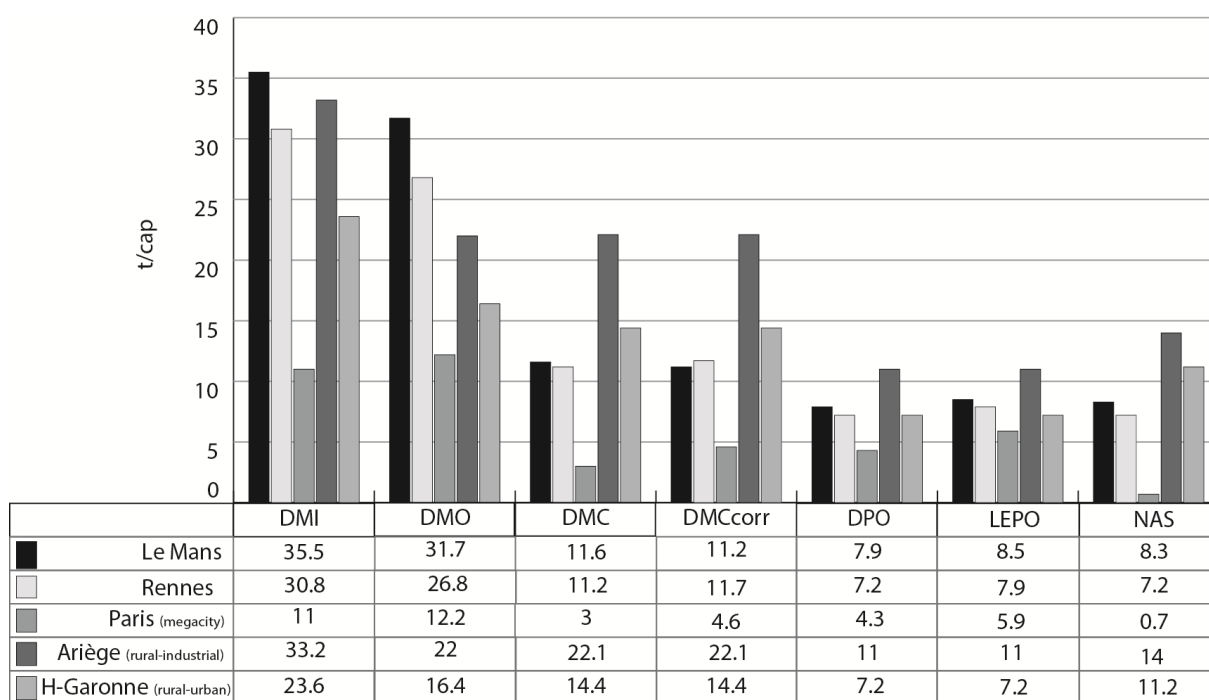


Figure 7. Comparaison des principaux indicateurs du MFA du Mans et de Rennes, avec la métropole de Paris (Paris et petite couronne) (Barles, 2009) et les départements d'Ariège et de Haute-Garonne (Barles, 2014)

## 5. CONCLUSION

Les villes intermédiaires sont donc caractérisées par un métabolisme territorial spécifique et clairement distinct de celui de mégapoles ou de zones plus rurales. Celui-ci se positionne en situation intermédiaire concernant la consommation de matière et l'extraction locale par habitant, entre les territoires ruraux (consommation importante car destinée à l'exportation) et les mégapoles (consommation faible). Les villes intermédiaires ont à l'inverse une fonction logistique très marquée, puisque l'essentiel des flux identifiés ne font que transiter dans ces hubs, depuis les espaces plus ruraux, vers les mégapoles. Ceci engendre un métabolisme fortement externalisé, ayant des relations socio-matérielles très ouvertes sur leurs hinterlands. L'identification de ces zones d'influence (aires d'approvisionnement, de distribution ou d'émission) permet alors d'identifier plusieurs échelles, parmi lesquelles les échelles locale et régionale connaissent l'essentiel des flux de matière. Les villes moyennes ont donc une relation métabolique très forte avec leur environnement rural proche, constituant toujours des zones de transit vers des territoires plus lointains, alors que cet espace environnant est le principal destinataire des rejets, des nuisances et des déchets émis par la ville intermédiaire.

L'analyse du métabolisme des villes moyennes met donc en exergue les caractéristiques de la société de consommation des pays du Nord, à la fois dépendant de flux à large échelle, tout en étant toujours lié à son environnement proche. Si la circularité des flux et l'autonomie territoriale sont des notions qui gagnent en puissance dans le discours public, leur mise en œuvre semble se faire à géométrie variable selon les types de matériaux, d'acteurs et de territoires.

## **Bibliographie**

Athanassiadis, A., P. Bouillard, R.H. Crawford, and A.Z. Khan. 2016. Towards a Dynamic Approach to Urban Metabolism: Tracing the Temporal Evolution of Brussels' Urban Metabolism from 1970 to 2010. *Journal of Industrial Ecology*: n/a-n/a.

Barles, S. 2009. Urban metabolism of Paris and its region. *Journal of Industrial Ecology* 13(6): 898–913.

Barles, S. 2010. Society, energy and materials: the contribution of urban metabolism studies to sustainable urban development issues. *Journal of Environmental Planning and Management* 53(4): 439–455.

Barles, S. 2014. L'écologie territoriale et les enjeux de la dématérialisation des sociétés : l'apport de l'analyse des flux de matières. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*(Vol. 5, n°1). <http://developpementdurable.revues.org/10090>. Accessed January 3, 2017.

Barles, S. 2015. The main characteristics of urban socio-ecological trajectories: Paris (France) from the 18th to the 20th century. *Ecological Economics* 118: 177–185.

Billen, G., J. Garnier, and S. Barles. 2012. History of the urban environmental imprint: introduction to a multidisciplinary approach to the long-term relationships between Western cities and their hinterland. *Regional Environmental Change* 12(2): 249–253.

Bognon, S., Barles, S., Billen, G., Garnier, J. Les flux d'approvisionnement alimentaire de l'agglomération parisienne et leur gouvernance. *Trajectoire socio-écologique du XVIIIe au XXIe siècles. Nature, Sciences, Sociétés*, accepté.

Brenner, N. 2013. Theses on Urbanization. *Public Culture* 25(1 69): 85–114.

Demaria, F. and S. Schindler. 2016. Contesting Urban Metabolism: Struggles Over Waste-to-Energy in Delhi, India. *Antipode* 48(2): 293–313.

Durand, M., J.-B. Bahers, and H. Beraud. 2016. Vers une économie circulaire... de proximité ? Une spatialité à géométrie variable. *Déchets, Sciences et Techniques*(N°71). <http://lodel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/index.php?id=3384>. Accessed January 3, 2017.

Emelianoff, C. 2007. La ville durable : l'hypothèse d'un tournant urbanistique en Europe. *L'Information géographique* 71(3): 48.

Guibrunet, L., M. Sanzana Calvet, and V. Castán Broto. 2016. Flows, system boundaries and the politics of urban metabolism: Waste management in Mexico City and Santiago de Chile. *Geoforum*. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016718516300380>. Accessed June 16, 2017.

Hird, M.J. 2017. Waste, Environmental Politics and Dis/Engaged Publics. *Theory, Culture & Society* 34(2-3): 187-209.

Hoekman, P. and H. von Blottnitz. 2016. Cape Town's Metabolism: Insights from a Material Flow Analysis. *Journal of Industrial Ecology*: n/a-n/a.

Kennedy, C.A., I. Stewart, A. Facchini, I. Cersosimo, R. Mele, B. Chen, M. Uda, et al. 2015. Energy and material flows of megacities. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112(19): 5985-5990.

Krausmann, F. 2013. A City and Its Hinterland: Vienna's Energy Metabolism 1800-2006. In *Long Term Socio-Ecological Research*, 247-268. *Human-Environment Interactions*. Springer, Dordrecht. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-1177-8\\_11](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-1177-8_11). Accessed September 5, 2017.

Magnaghi, A. 2014. *La biorégion urbaine*. Paris: Editions Etérotopia, April 23.

Raupova, O., H. Kamahara, and N. Goto. 2014. Assessment of physical economy through economy-wide material flow analysis in developing Uzbekistan. *Resources, Conservation and Recycling* 89: 76-85.

Rosado, L., Y. Kalmykova, and J. Patrício. 2016. Urban metabolism profiles. An empirical analysis of the material flow characteristics of three metropolitan areas in Sweden. *Journal of Cleaner Production* 126: 206-217.

Rosado, L., S. Niza, and P. Ferrão. 2014. A Material Flow Accounting Case Study of the Lisbon Metropolitan Area using the Urban Metabolism Analyst Model. *Journal of Industrial Ecology* 18(1): 84-101.

Saldivar-Sali, A.N.D. 2010. A global typology of cities : classification tree analysis of urban resource consumption. Thesis, Massachusetts Institute of Technology. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/61558>. Accessed September 5, 2017.

Sastre, S., Ó. Carpintero, and P.L. Lomas. 2015. Regional Material Flow Accounting and Environmental Pressures: The Spanish Case. *Environmental Science & Technology* 49(4): 2262-2269.

Voskamp, I.M., S. Stremke, M. Spiller, D. Perrotti, J.P. van der Hoek, and H.H.M. Rijnaarts. 2017. Enhanced Performance of the Eurostat Method for Comprehensive Assessment of Urban Metabolism: A Material Flow Analysis of Amsterdam. *Journal of Industrial Ecology* 21(4): 887-902.

Weisz, H. and J.K. Steinberger. 2010. Reducing energy and material flows in cities. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2(3): 185-192.

Zhang, Y., Z. Yang, and X. Yu. 2015. Urban Metabolism: A Review of Current Knowledge and Directions for Future Study. *Environmental Science & Technology* 49(19): 11247–11263.