

## **L'analyse systémique du métabolisme territorial, un outil pour favoriser le recours aux ressources secondaires dans le domaine du BTP**

*Laurent ROUVREAU, BRGM, Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies, 3 av. Claude Guillemin, BP 36009 45060 Orléans cedex 2 - [l.rouvreau@brgm.fr](mailto:l.rouvreau@brgm.fr)*

*Pascale MICHEL, BRGM, Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies, 3 av. Claude Guillemin, BP 36009 45060 Orléans cedex 2- [p.michel@brgm.fr](mailto:p.michel@brgm.fr)*

*Daniel MONFORT CLIMENT, BRGM, Direction Risques et Prévention, 3 av. Claude Guillemin, BP 36009 45060 Orléans cedex 2- [d.monfortcliment@brgm.fr](mailto:d.monfortcliment@brgm.fr)*

*Emmanuel JAYR, CSTB, Département Energie, Santé, Environnement - Division Environnement, 24 rue Joseph Fourier - 38400 St MARTIN D'HERES [emmanuel.jayr@cstb.fr](mailto:emmanuel.jayr@cstb.fr)*

*Jonathan MORICE, Mairie d'Orléans, Délégué au développement durable - 1 Place de l'Étape, Orléans Cedex 1- [jmorice@ville-orleans.fr](mailto:jmorice@ville-orleans.fr)*

*Préambule : Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement la ville d'Orléans pour son soutien à ce projet, et l'intérêt manifesté par les élus et les personnels de la ville. Sans leur disponibilité et leur implication, ces travaux n'auraient pas pu être réalisés.*

Les modèles économiques considèrent que c'est la demande aval (la satisfaction du besoin exprimé par l'utilisateur final), qui régit la production, en faisant abstraction de la disponibilité physique des ressources nécessaires à la satisfaction de ce besoin (les notions de disponibilité ou de pénurie sont prises en compte dans ces modèles par le biais d'une variation du coût de ces ressources). L'économie française repose à 70 % sur des ressources épuisables selon CGDD<sup>1</sup> (2009). La question des métaux stratégiques, auxquels nous n'avons accès qu'au travers de marchés internationaux et dont la circulation est de plus soumise à des considérations politiques, ont mis en évidence la nécessité de repenser certains concepts, bien au-delà d'un discours qui se focalisait jusqu'alors sur la dépendance énergétique. Ces éléments ont favorisé l'émergence de nouvelles approches, telles que les concepts d'économie circulaires, mais le débat sociétal qui entoure aujourd'hui ces questions montre que la réflexion ne peut être dissociée d'une remise en cause des pratiques et des modes de consommation de matières, qui ne concerne pas uniquement les professionnels, mais la société dans son ensemble. Limiter ces réflexions au domaine énergétique et à « quelques » substances mises en avant par le discours médiatique est sans doute bien trop restrictif. Ainsi, jusqu'à une époque très récente, tout accroissement du besoin en matériaux dans le secteur du BTP était satisfait par une augmentation de la production (les matériaux de construction représentent environ 40% du tonnage annuel des matériaux transportés sur le territoire métropolitain). Une plus grande prise de conscience des contraintes sur le stock de matières non renouvelables (les gisements de gypse nécessaires à la fabrication du plâtre, situés pour une part au droit de zones urbanisées, deviennent plus difficilement accessibles, la région Île de France n'est plus auto suffisante pour son approvisionnement en granulats), des conflits d'usage autour de leur utilisation (le nombre de carrières en activité est passé de 3 500 à 2 700 entre 1982 et 2008), mais aussi la pression réglementaire croissante, remettent aujourd'hui en cause ce postulat. Ainsi, ce que l'on constate à l'échelle mondiale pour certaines matières se vérifie également à une échelle de proximité (quelques kilomètres ou dizaines de kilomètres pour les granulats, quelques centaines de kilomètres pour le plâtre). Ces modèles économiques, qui permettent de conduire des études prospectives en considérant un accroissement ou une baisse de la demande, peinent à modéliser des scénarios dans lesquels la ressource se raréfie et les conséquences de cette raréfaction sur l'économie, indépendamment de l'évolution de la demande aval (les fluctuations de court ou moyen terme, liées aux cycles économiques de croissance ou de récession, ont d'abord pour conséquences de retarder la

---

<sup>1</sup> CGDD : Commissariat Général au Développement Durable.

pénurie en matériaux et de différer le développement de filières de recyclage et d'affecter leur rentabilité, mais la question du long terme reste entière).

Ces considérations, les conclusions du Grenelle de l'environnement et les objectifs fixés en termes de recyclage par l'UE aux états membres (« D'ici 2020 le réemploi, le recyclage et les autres formules de valorisation matière... passent à un minimum de 70% en poids »), sont à l'origine du projet ASURET<sup>2</sup> dont quelques résultats partiels sont présentés ici. ASURET vise à définir les conditions d'amélioration du bilan des activités du BTP, en réduisant le recours aux ressources naturelles et en optimisant la valorisation de matériaux recyclés. Ceci suppose de reconsidérer globalement l'activité BTP dans une approche systémique, et d'explorer les voies qui permettraient de favoriser le développement de modèles de production et de consommation plus vertueux au travers de ce changement de paradigme.

## **1. ANALYSE DES FLUX DE MATIERE A L'ECHELLE D'UNE VILLE, AU TRAVERS DE LA NOTION DE METABOLISME URBAIN**

Les zones urbaines ont accumulé et accumulent dans leur bâti et leurs infrastructures, de formidables quantités de matières. Ces stocks, constitués à partir de l'extraction et de la transformation de matières premières du sous-sol, sont immobilisés pour une durée variable (de quelques années ou dizaines d'années pour certains ouvrages, « l'éternité » pour les monuments historiques). Ces matériaux sont appelés à être « libérés » et remis en mouvement lors de travaux d'aménagement, de réhabilitation, de déconstruction/démolition dans des conditions souvent très mal connues. Il n'existe pas de composition quantitative et qualitative de ce stock, et l'échéance à laquelle ces matériaux seront remis en mouvement n'est (en général) pas connue ou l'est tout au moins tardivement, ce qui ne permet ni d'identifier les potentialités de recyclage ou de valorisation d'une partie de ces matériaux, ni même de réfléchir à l'organisation et la mise en place de filières structurées et viables économiquement, sans lesquelles une amélioration significative des pratiques n'est pas possible.

Quelques études (15 à 20 selon Kennedy et al. (2007)) se sont intéressées à une approche globale des flux (entrées et sorties) à l'échelle d'une ville, au travers de la notion de métabolisme urbain, imaginée en 1965 par Wolmann. Ce concept du métabolisme urbain défini par Kennedy comme « *la somme totale des processus techniques et socioéconomiques qui interagissent au sein d'une cité et traduisent son évolution, sa croissance, l'énergie produite et l'élimination des déchets* », permet de décrire le « fonctionnement » d'une ville au travers de 4 flux majeurs, qui sont l'eau, la nourriture (biomasse), les matériaux de construction et l'énergie. La description de ces flux, leur organisation, leur évolution, caractérisent l'entropie des systèmes complexes que sont les zones urbanisées, mais permettent aussi d'établir une base de référence à partir de laquelle une réflexion autour du concept de « cités durables » peut être organisée (comment améliorer l'efficacité du système, comment privilégier les boucles courtes ? comment mesurer les effets d'une modification des pratiques ?). Dans un système donné, ceci passe (Hendriks et al. 2000) par une quantification des flux de matières et des stocks associés, une bonne appréciation des enjeux et contraintes associés à ces flux, et un contrôle de ces flux et de ces stocks en fonction d'objectifs définis (des objectifs de développement durable par exemple).

---

<sup>2</sup> Analyse Systémique de l'Utilisation des Ressources non renouvelables (projet soutenu par l'ANR dans le cadre de l'appel à projet ECOTECH 2009). ASURET associée au BRGM (coordonnateur), le CSTB (Centre scientifique et Technologique du Bâtiment), INSAVALOR (INSA Lyon), la SEM 13 Développement, l'Université Technologique de Troyes (CREIDD).

La diversité des contextes, la variété des approches méthodologiques, les échelles d'observation retenues, les objectifs visés dans cette quinzaine d'études, ne permettent pas de tirer de conclusions définitives ou généralisables de ces exercices complexes, à l'exception sans doute d'une tendance à l'accroissement des stocks de matières accumulées dans les territoires étudiés, ce qui n'est pas surprenant, compte tenu de l'urbanisation croissante de la population constatée ces dernières décennies à l'échelle de la planète.

## **2. EXERCICE A L'ECHELLE DE LA VILLE D'ORLEANS DANS LE CADRE DU PROJET DE RECHERCHE ASURET**

### **Contexte et objectifs**

Parallèlement à des travaux conduits à l'échelle nationale et à celle de l'ouvrage (au travers du suivi d'opérations de travaux spécifiques), qui ne sont pas présentées ici, une approche de type métabolisme urbain a été mise en œuvre dans le cadre d'ASURET au niveau de la ville d'Orléans. Analyser les interactions entre un territoire et son environnement sur le plan des flux de matières est un exercice difficile à réaliser, tant au niveau de l'organisation géographique et spatiale de ces flux, que de la structuration qualitative et quantitative des échanges, de la perception (connaissance) que peuvent en avoir l'ensemble des acteurs impliqués dans ces processus d'aménagement.

La ville d'Orléans représente une ville moyenne de 113 000 habitants, pour 60 100 logements (INSEE, 2006). Elle appartient à une communauté d'agglomération de 22 communes (273 000 habitants et 128 000 logements selon l'INSEE, 2006). Sa spécificité tient à un découpage entre un cœur de ville organisé majoritairement au nord de la Loire (avec un centre historique ancien, des faubourgs et des quartiers reconstruits dans l'après-guerre suite aux bombardements) et une « ville nouvelle » qui date des années 60 (Orléans la Source). La typologie de son bâti se décompose donc en deux grands ensembles très différents. Les zones industrielles et commerciales sont principalement situées hors de la zone d'étude, sur le territoire des communes voisines de l'agglomération.

L'approche a été volontairement restreinte à une partie de l'un des 4 flux majeurs (les matériaux de construction), en ne retenant que les matériaux issus de matières premières épuisables (CGDD, 2009) : les matériaux minéraux ou à base de minéraux (granulats, ciments, bétons et produits bétons, plâtres, produits en terre cuite, terres, remblais, ...), les métaux (aciers de ferrailage, aciers de structure, bardage et couverture, câbles, menuiseries alu, canalisations...), les matières plastiques (fourreaux, canalisations, menuiseries, isolants ...), les produits bitumineux (voirie, isolation, étanchéité...). Ces matériaux représentent la grande majorité des quantités de matériaux pondéreux utilisés dans le secteur du BTP. Le bois pour les ossatures, charpentes, bardages, menuiseries, isolation... a également été inclus dans l'étude compte tenu de son utilisation importante en construction et de son potentiel de réutilisation comme matières premières secondaires.

Cet exercice de caractérisation du métabolisme urbain de la ville d'Orléans a plusieurs finalités dans le cadre du projet ASURET : Quantifier les matériaux accumulés au sein du territoire, caractériser la composition de ce stock et son évolution pour évaluer les potentialités de recyclage, affecter une durée de vie à ce stock (quand et comment la matière est-elle libérée sous forme de déchets qui constituent autant de matière première secondaire potentiellement réutilisable et pourrait ainsi réintégrer un processus de production ou un cycle d'utilisation ?).

## Méthodologie

Pour essayer de répondre à ces questions, une méthodologie originale a été développée à partir d'outils conçus par le BRGM dédiés à l'estimation des impacts potentiels de séismes pour estimer la quantité de matière immobilisée sur le territoire lié au patrimoine bâti.

Il s'agit d'abord d'évaluer les superficies bâties, le « volume » occupé par ce bâti (hauteur), sa typologie, son usage, les techniques constructives utilisées (structure, matériaux employés, toiture, etc.) et son âge.

- Dans une première étape, un découpage du territoire en quartiers homogènes, réalisé sur photographies aériennes a été croisé avec les bases de données INSEE qui donnent des indications sur la répartition du bâti en pourcentage par type et âge d'habitat (avant 1949, de 1949 à 1974, ...).
- Des visites de terrain ont ensuite permis d'affiner les informations antérieures et d'estimer, en fonction de l'âge du bâti, les techniques de construction par quartier et typologie de bâtiment.
- Dans un troisième temps, un travail de SIG mené par quartier a permis de dénombrer les bâtiments sur photo aérienne et d'estimer les surfaces et volumes caractéristiques de chacun des bâtiments à partir de la base de données Topo® IGN.

Une phase d'ajustement en fonction de l'usage (logements, surface commerciale...) permet d'achever cette évaluation du volume. L'exercice étant focalisé durant la période 2004-2006, une dernière tâche a consisté à extraire de l'analyse toutes les constructions postérieures à 2006.

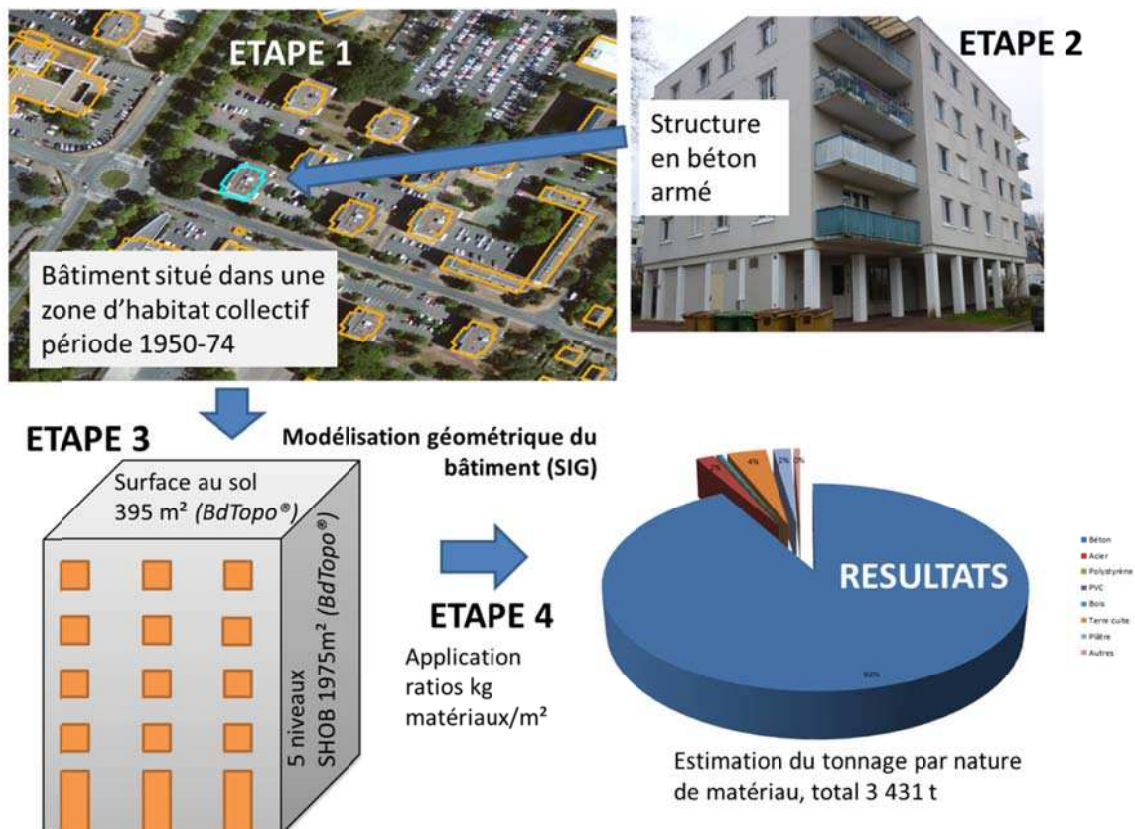


Figure 1 : Méthodologie suivie pour l'évaluation du stock de matière dans le bâti (ville d'Orléans)

Ce premier résultat, permet de classer l'ensemble du bâti dans des catégories auxquelles des ratios de matières consommées par unité de surface ou mètre linéaire peuvent être affectés pour calculer les quantités de matières immobilisées. L'âge des bâtiments, l'évolution des techniques constructives, des réseaux et voiries, sont bien évidemment des éléments clés de cette évaluation. Les ratios utilisés sont issus d'un travail mené avec le CSTB et le SNED<sup>3</sup>.

Cet exercice a également été conduit sur des infrastructures visibles (voiries, ponts) et invisibles (réseaux enterrés), la ville d'Orléans disposant d'informations très précises sur les linéaires de ces différents réseaux.

Dans le même temps, une analyse des entrées - sorties a été conduite à partir du dépouillement des dossiers techniques relatifs aux marchés de travaux lancés par la ville sur la période 2004 - 2006. Il s'est agi de structurer et d'organiser les données provenant de plusieurs centaines de chantiers et d'opérations courantes de réhabilitation (bâti/voirie) menées par la ville. Comme il n'était pas envisageable de dépouiller de façon systématique l'intégralité de ces dossiers, un nouveau travail méthodologique a permis de resserrer l'analyse sur un nombre plus réduit d'opérations, les résultats étant ensuite extrapolés à l'ensemble des opérations de travaux de réhabilitation

Si les données sur la fraction entrante (quantités, composition par matière ou produit) peuvent être accessibles (via les documents de marchés, les fiches techniques ou les fiches de déclaration environnementale et sanitaire des produits par exemple), celles relatives aux sorties (les déchets) restent aujourd'hui très méconnues. Elles sont souvent traitées sous la forme de forfaits indifférenciés (dont ni la quantité ni la composition ne sont alors connues) dans les marchés et la traçabilité de ces flux n'est pas assurée (exception faite des déchets dangereux et non dangereux, qui ne représentent que 3% des 343 Mt de déchets du BTP produites annuellement contre 97% pour les inertes). Seules les quantités de déchets inertes et non dangereux ont été comptabilisées dans cette étude. Les chantiers identifiés via la base de permis de construire/démolir de la Mairie ont également été étudiés.

## Résultats

La quantité de matière accumulée dans le bâti et les infrastructures de la ville d'Orléans a ainsi été estimée (pour les substances et produits considérés dans le périmètre de l'étude, hors aménagements et mobiliers urbains) à 28,5 millions de tonnes, soit environ 252 t par habitant (159 t/hab. pour le bâti, 32 t/hab. pour les voiries et 61 t/hab. pour les réseaux enterrés et tranchées en remblai associées). Deux exercices du même ordre, conduits l'un en 2007 sur la ville de Vienne (Autriche) et l'autre au niveau national au Japon (et donc à une autre échelle et sur une autre typologie de bâti) (Hashimoto et al. 2009) ont abouti respectivement à des valeurs estimées de 350 t/hab. (Vienne) et 235t/hab. (Japon). Des différences au niveau du spectre de substances retenu, les caractéristiques des trois territoires, et bien évidemment les incertitudes inhérentes à ces exercices expliquent ces écarts.

La fraction issue de la matière minérale, largement prépondérante, représente 97% en poids du total du stock. Au niveau du bâti lui-même, la pierre calcaire (39%), matériaux historique de la ville, et les bétons (53%) sont majoritaires. Mis à part les briques et les tuiles (5%), les autres matériaux ne représentent qu'une fraction à peine mesurable (2% au total pour le cumul plâtre, chaux, enduit, laine minérale, verre).

---

<sup>3</sup> SNED : Syndicat National des Entreprises de Démolition.

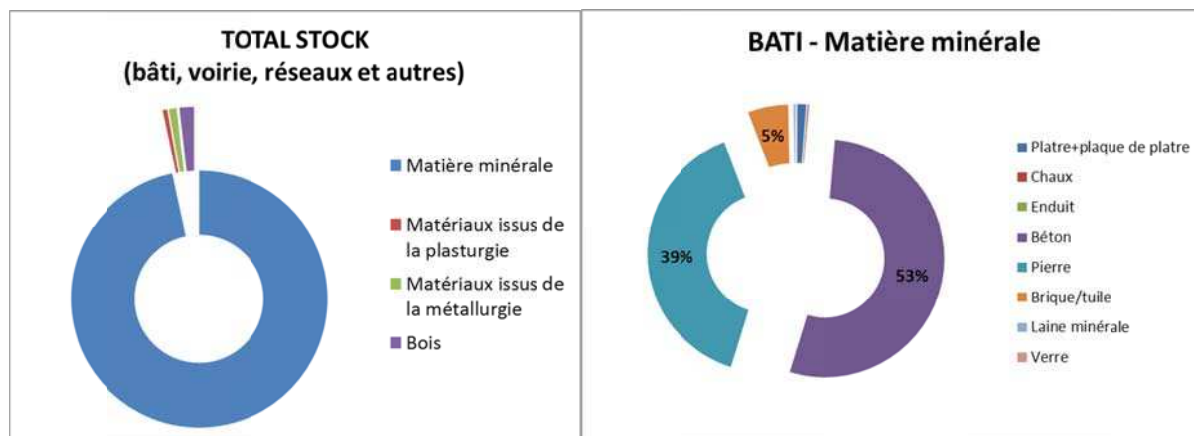


Figure 2 : Composition du stock de matière dans le bâti et les infrastructures (ville d'Orléans)

Les entrées dans le stock en matériaux de construction représentent 275 000 t (près de 2,4 t/hab.), alors que dans le même temps, les sorties sous la forme de déchets représentent 167 000 t. Le stock s'est donc accru de 108 000 tonnes, soit 0,4% du stock (1 t/hab.).

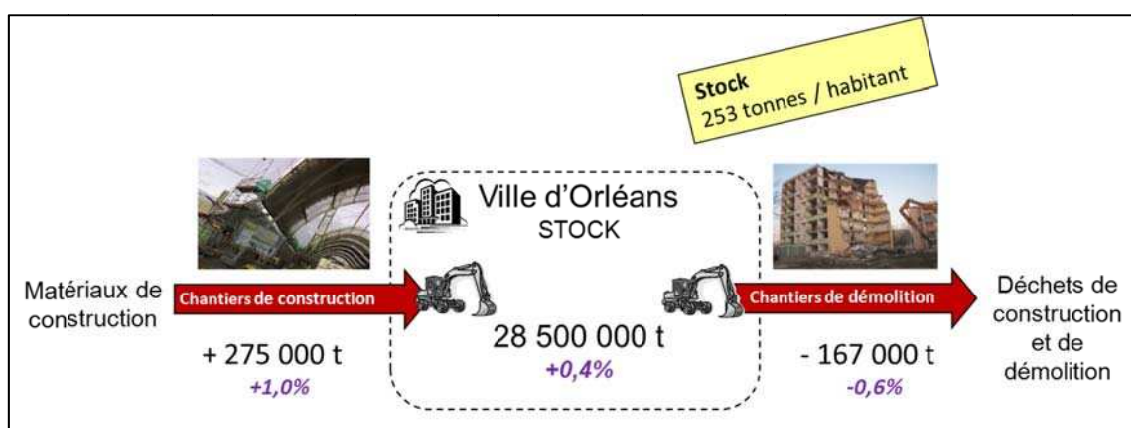


Figure 3 : Stock de matière accumulé dans le bâti et les infrastructures de la ville d'Orléans  
Evolution du stock entre 2004 et 2006

## Conclusions et discussions

Caractériser le métabolisme du territoire doit permettre de discuter des limites du système, de décomposer ou de segmenter les flux complexes de hiérarchiser des actions de progrès, et de prendre en compte tant les réglementations que les technologies.

Si les limites physiques du système pris en compte sont bien délimitées (celles de la ville), le métabolisme urbain interagit avec des contraintes multiples et en perpétuelle évolution, tant au niveau local (caractéristiques physiques de la ville, réglementation locale, attentes de la population, politique et économie locale, ressources naturelles disponibles), qu'au niveau national (réglementation, ressources, politique), dans un contexte globalisé pour certaines ressources et matières premières non disponibles localement.

Faire ressortir les interactions entre le territoire et son environnement proche et lointain, intégrer les contraintes liées à la localisation et à la disponibilité des sources d'approvisionnement, apporter des éléments qualitatifs et quantitatifs pour le développement d'une économie du recyclage, discuter l'échelle la plus pertinente pour observer et optimiser les flux de matière, sont autant d'éléments indispensables au développement d'outils, d'indicateurs et des modèles macroéconomiques qui permettraient de mesurer l'efficacité du métabolisme urbain et de développer des approches prospectives plus économes et durables.

## **Références :**

*Commissariat général au développement durable (2009) Matières mobilisées par l'économie française, Comptes de flux pour une gestion durable des ressources, Études & documents n°6, Juin 2009*

*Hashimoto S., Tanikawa H., Moriguchi Y. (2009) - Framework for estimating potential wastes and secondary resources accumulated within an economy □ A case study of construction minerals in Japan - Waste Management 29, 2859-2866*

*Hendriks, C., Muller D., S. Kytzia, P. Baccini, and Brunner P. (2000) - Material flow analysis: A tool to support environmental policy decision making - 404 Journal of Industrial Ecology FORUM Case-studies on the city of Vienna and the Swiss lowlands. Local Environment 5(3): 311-328*

*Kennedy C., Cuddihy J., Engel-Yan J. (2007) - The changing metabolism of cities □ Journal of Industrial Ecology, Volume 11 Number 2*

*Pincetl S. (2012) - Nature, urban development and sustainability □ What new elements are needed for a more comprehensive understanding? Cities S32 - S37*

*Niza et al., (2009) - Methodological Advances in Urban Material Flow Accounting Based on the Lisbon Case Study - Journal of Industrial Ecology - Volume 13, Number 3*