

Le métabolisme urbain

Un tour d'horizon des concepts et des outils



Istanbul Urban Metabolism, par Deniz Ayaz : <https://society6.com/denizayaz>

Résumé

Eau, carburants, électricité, nourriture, matériaux de construction, biens de consommation divers et variés... Pour répondre aux besoins de leurs habitants, les villes absorbent quotidiennement une quantité impressionnante de matières premières et d'énergie. En retour, elles produisent des pollutions et des déchets de toutes sortes, à la fois liquides, gazeux ou solides. Ce flux continu de matière et d'énergie qui traverse les métropoles modernes a amené certains auteurs à comparer les villes à des écosystèmes, voire même à des organismes vivants. L'engouement actuel pour des concepts comme l'empreinte écologique, l'économie circulaire ou encore l'écologie industrielle n'a fait que renforcer cette métaphore, menant à l'idée d'optimiser ces flux afin de rendre les villes plus soutenables, plus résilientes et moins vulnérables à l'égard des aléas écologiques. Cette synthèse bibliographique fait un point sur l'émergence de la notion de métabolisme urbain et les différents outils qui lui sont associés, notamment les outils de description et de quantification des flux ; elle questionne également la pertinence de ces outils dans la perspective d'un pilotage des politiques publiques en matière de transition écologique à l'échelle d'une agglomération.

Sommaire

Introduction	2
1. Une brève histoire du métabolisme urbain : de l'écologie urbaine à l'écologie industrielle et territoriale	4
2. Les approches descriptives du métabolisme urbain : un essai de typologie	9
3. Les analyses de flux génériques.....	12
4. Les analyses de flux spécifiques.....	21
5. Les analyses entrées-sorties étendues à l'environnement.....	29
Conclusion, perspectives.....	42
Bibliographie	43

Rédaction : Aurélien Boutaud (consultant indépendant) et Boris Chabanel (Nova7)
Relectures et compléments : Natacha Gondran (ENS Mines de St-Etienne) et Philippe Jury (CIRIDD)

Préambule

Ce travail poursuit une réflexion de la Métropole de Lyon relative à la vulnérabilité de l'agglomération à l'égard d'un certain nombre d'aléas écologiques (Cf Annexe pour un rappel détaillé). Il s'inscrit dans un contexte scientifique marqué par une série de publications préoccupantes concernant à la fois la raréfaction des ressources naturelles (fossiles et renouvelables) et le déséquilibre des capacités de régulation des écosystèmes (climat, biodiversité, cycles biogéochimiques...). Ces aléas peuvent-ils générer des vulnérabilités à l'égard des grandes fonctions du métabolisme urbain (se nourrir, boire, se loger, se déplacer, produire de la richesse et du bien-être pour ses habitants) ? Comment l'agglomération peut-elle accroître ses capacités de résilience face à ces aléas ?

Pour répondre à ces deux questions, le Grand Lyon a décidé d'initier une réflexion autour de la notion de métabolisme urbain. Ce rapport constitue la première phase de ce travail. Essentiellement bibliographique, l'étude vise à faire un état des lieux des différents concepts et outils descriptifs du métabolisme urbain. Il sera suivi d'un exercice de collecte de témoignages (retours d'expériences, interviews d'acteurs). Ces deux travaux permettront dans une troisième étape d'établir des propositions opérationnelles pour le Grand Lyon.

Introduction

Les problématiques écologiques ont progressivement évolué au cours des dernières décennies, au gré d'une prise de conscience de la globalisation et de l'accélération des impacts des activités humaines sur la biosphère. Apparue dans le courant des années 2000, la notion d'anthropocène traduit ce phénomène de globalisation et d'accélération en constatant que l'activité humaine est devenue le premier facteur de modification des écosystèmes, mais aussi d'épuisement des ressources.

Cette dégradation massive du capital naturel trouve en grande partie sa source dans le développement d'une forme d'économie extractiviste à laquelle on oppose aujourd'hui les concepts d'économie circulaire ou encore d'écologie industrielle – concepts dont l'idée commune consiste en grande partie à imiter la nature dans sa capacité à recycler la matière et l'énergie. Appliquée à l'échelle d'un territoire, l'économie circulaire trouve alors des formes de traduction à travers des notions émergentes comme celle de métabolisme territorial ou urbain.

Particulièrement en vogue, l'écologie industrielle et l'économie circulaire proposent d'imiter la nature dans sa capacité à recycler la matière. Appliquée aux systèmes urbains, cette métaphore renvoie à l'idée d'écologie urbaine, ou plus encore celle de métabolisme urbain...

L'objectif de ce travail consiste à explorer de manière pragmatique la question du métabolisme urbain, afin de comprendre en quoi cette notion et les outils qui lui sont rattachés peuvent être mobilisés pour mener à bien une politique publique de transition écologique. D'où viennent ces notions de métabolisme urbain, d'écologie urbaine ou encore d'écologie industrielle et territoriale ? A quels types d'outils renvoient-elles ? Comment ont-elles été utilisées jusqu'à présent sur les territoires ? Quelles sont leurs forces et leurs faiblesses ? Peut-on mobiliser ces outils à l'échelle d'une agglomération comme le Grand

Lyon ? Peut-on s'appuyer sur elles afin de mener à bien une politique cohérente et concrète de transition écologique et de résilience territoriale ? En quoi ces outils nous aident-ils à agir et à renouveler le management de la transition écologique ?

Cette étude est la première partie (essentiellement bibliographique) d'un travail plus exhaustif qui tente d'apporter des réponses à ces différentes questions. Le premier chapitre rappelle dans quel contexte historique la notion de métabolisme urbain est apparue il y a de cela plusieurs décennies. Nous essaierons de comprendre à la fois pourquoi le terme a plus ou moins disparu dans le courant des années 1980, et au gré de quelles évolutions il fait aujourd'hui son retour.

...mais en quoi le métabolisme urbain et les outils qui lui sont rattachés nous aident-ils à analyser la dimensions insoutenable de nos territoires ? Et comment permettent-ils de piloter une politique de transition écologique ?

Dans le second chapitre, nous proposerons d'établir une typologie des outils aujourd'hui disponibles pour décrire et analyser les flux qui traversent les métabolismes territoriaux. Sur cette base, le troisième chapitre sera plus spécifiquement dédié aux outils multicritères, en particulier les analyses de flux de matière (AFM) qui connaissent aujourd'hui un certain engouement. Le quatrième chapitre s'intéressera quant à lui aux analyses de flux de substances

spécifiques (AFS) – comme par exemple les flux de gaz à effet de serre ou les flux d'azote – qui permettent de compléter utilement les analyses de flux plus génériques de type AFM. Dans ces deux chapitres, nous aborderons également rapidement et de manière transversale un troisième type d'outils : les empreintes (écologique, carbone ou autre).

Enfin, le cinquième chapitre de cette étude est dédié à une forme d'analyse de flux particulièrement intéressante et prometteuse, basée sur l'utilisation de tableaux entrée-sortie croisant des données économiques et environnementales. Encore peu développées à l'échelle des métabolismes urbains, ces outils pourraient bien révolutionner nos capacités d'analyse des flux de matière et d'énergie.

1. Une brève histoire du métabolisme urbain : de l'écologie urbaine à l'écologie industrielle et territoriale

Ecologie urbaine, écologie des systèmes urbains, écologie territoriale, métabolisme urbain... il est bien difficile de choisir a priori le terme le plus approprié. Car ces différentes notions ne sont pas entièrement stabilisées. Mais comme le note Sabine Barles, cela ne doit pas nous empêcher de constater que, s'il est encore mal défini, ce vaste champ d'étude de l'écologie urbaine existe bel et bien. Il regroupe un ensemble de travaux « qui tout à la fois s'inscrivent dans une problématique

L'écologie urbaine est une notion encore mal définie, qui renvoie à des champs disciplinaires variés.

environnementale, concernent les villes et relèvent des théories, concepts et méthodes de l'écologie scientifique et plus précisément de la théorie des écosystèmes. Ces travaux sont souvent associés (mais pas toujours) à la notion de métabolisme urbain ou industriel. En d'autres termes ils portent sur les échanges de matières et d'énergie entre les sociétés et la biosphère et leur circulation au sein des sociétés. » (Barles, 2010) Afin d'y voir plus clair dans cet ensemble

hétéroclite de concepts et d'outils, le plus simple est peut-être d'identifier de quelle manière ils ont traversé l'histoire de la pensée moderne jusqu'à aujourd'hui.

1930-1970 : les prémices. De l'écologie urbaine à l'écologie des systèmes urbains

L'écologie urbaine de l'école de sociologie de Chicago – Assez paradoxalement, il semble bien que ce soit du côté des sciences sociales qu'il faille aller chercher la paternité de l'écologie urbaine. Si on en croit Marina Fischer-Kowalski (1998) la

Les sociologues de l'école de Chicago ont d'abord utilisé le terme d'écologie urbaine pour désigner les relations qu'entretiennent les individus au sein de cet organisme social que sont les villes modernes.

comparaison de la société humaine avec un métabolisme remonte déjà au 19^{ème} siècle. Dans le courant des années 1920, c'est toutefois un groupe de journalistes et de sociologues étasuniens qui va approfondir la métaphore et l'appliquer aux systèmes urbains, en comparant la ville moderne à un écosystème : c'est à dire « *un véritable organisme social où règnent adaptation et compétition, dans un désordre apparent, et où il se forme un équilibre spécifique aux sociétés urbaines.* » (Mirenowicz, 1984) Publié en 1925, *The City* s'inspire alors de la toute récente science écologique pour décrire les relations qui s'opèrent entre les individus – de la même manière que l'écologie s'intéresse notamment aux relations entre les espèces animales et végétales d'un écosystème. Mais l'analogie s'arrête là.

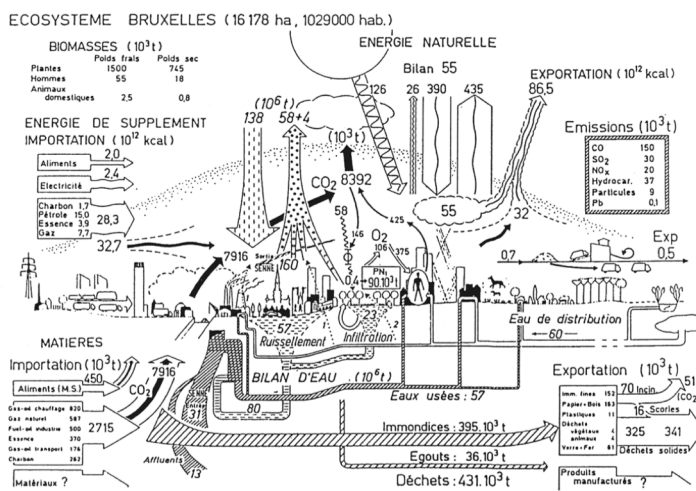
Car étrangement, l'objet de *The City* ne consiste pas à décrire les relations que les hommes entretiennent avec leur environnement naturel. Les auteurs de l'école de Chicago préfèrent se concentrer sur le fonctionnement sociétal de la cité et sur les équilibres qui se mettent en place au sein de cet organisme social entre les différents types de population qui le composent. Ce qui intéresse ces auteurs, ce sont donc avant tout « *les rapports entre les hommes plus que leur rapport au sol sur lequel ils vivent.* » (Grafmeyer & Joseph, 1990). Peu soucieux des flux de matière et d'énergie, les membres de l'école de Chicago n'utilisent d'ailleurs pas la notion de métabolisme...

L'écologie des systèmes urbains et l'apparition de la notion de métabolisme urbain – Il faudra attendre plusieurs décennies pour que cette question du lien entre les villes et leur milieu naturel soit davantage explorée. Dans le courant des années 1960, plusieurs chercheurs vont alors commencer à s'intéresser aux flux de matière et d'énergie qui traversent les systèmes urbains. Si on en croit la plupart des écrits, le véritable pionnier de l'écologie des systèmes urbains serait Abel Wolman, qui employa et explicita dans le détail le terme de métabolisme urbain dès le milieu des années 1960 (Wolman, 1965). Mais c'est sans doute Eugène Odum qui popularisera le plus cette analogie dans son célèbre ouvrage sur les fondamentaux de l'écologie

L'écologie des systèmes urbains va quant à elle développer une approche physique et physiologique de la ville, en étudiant les flux de matière et d'énergie qui la traversent.

(Odum, 1971). Comparant les fonctionnements respectifs d'un grand lac et d'une métropole américaine, Odum souligne alors la dépendance de l'écosystème urbain vis-à-vis des territoires extérieurs dans son approvisionnement en matières et en énergie. L'auteur n'insiste pas seulement sur les intrants mais également sur les extrants, en particulier les déchets et les pollutions – qui au sein des systèmes urbains ne bénéficient pas d'éléments décomposeurs. Malgré des fonctionnements similaires par bien des points, il manque donc à la ville certaines caractéristiques pour s'apparenter réellement à un écosystème. Un constat qui amène

Eugène Odum à considérer les villes comme hétérotrophes, par opposition aux écosystèmes naturels qui sont globalement autotrophes – c'est à dire capables de produire et recycler de manière autonome leurs nutriments et autres matières organiques.



L'écosystème Urbs de Bruxelles, selon Duvigneaud et Denayer, rapporté par Leturcq (2001)

La pensée d'Eugène Odum trouvera en France un écho du côté d'auteurs comme Paul Duvigneaud (1974) qui proposera lui aussi d'adapter le vocabulaire et le fonctionnement des écosystèmes à la réalité physique des villes. Duvigneaud propose alors de modéliser le fonctionnement de ce qu'il nomme les « écosystèmes urbs » dans un travail mené à Bruxelles, où il dresse un bilan des flux de matière et d'énergie qui traversent le système urbain bruxellois. A partir de cette époque, ces travaux de modélisation et de quantification des flux vont alors caractériser le

mouvement de l'écologie des systèmes urbains, sous la double influence des travaux du Club de Rome (Meadows et coll., 1972) et du programme de recherche interdisciplinaire *Man And Biosphere* initié en 1971 par l'UNESCO.

🔍 Zoom sur... Le programme *Man and Biosphere* de l'UNESCO : un succès scientifique... mais un échec politique

Le projet 11 du programme de recherche interdisciplinaire *Man And Biosphere* (MAB) initié en 1971 par l'UNESCO a permis à cette époque de mutualiser à l'échelle mondiale les recherches sur la question de l'approche écologique de la ville. Dans la foulée des travaux de modélisation menés à l'époque par les chercheurs du MIT pour le compte du Club de Rome (Meadows et coll., 1972), l'UNESCO va alors concentrer son attention sur la modélisation et la quantification des flux alimentant le fonctionnement des villes. Le premier rapport du programme MAB met essentiellement l'accent sur les flux d'énergie nécessaires au fonctionnement du système urbain, soulignant l'extrême dépendance de la ville à l'égard des ressources énergétiques extérieures. L'analyse sera ensuite élargie aux flux de matière et d'eau et, à partir de 1975, le congrès du MAB ouvre encore le programme de recherche en s'intéressant cette fois à la question de l'homme et de son bien-être. Une manière de rappeler que « les systèmes urbains sont à la fois culturels et biologiques » et que « le premier critère d'évaluation de l'efficacité urbaine doit être le bien-être humain » (extraits cités par Leturcq, 2001).

Malgré cet élargissement, les recherches menées durant ces quelques années ont essentiellement abouti à la création de modèles descriptifs. Plus de 150 variables sont ainsi représentées dans les modèles d'écologie des systèmes urbains issus du programme MAB, représentant à la fois des données relatives la sphère physique et la sphère humaine des systèmes urbains. L'interaction entre ces variables urbaines, à l'intérieur de chacune de ces sphères mais également entre elles, est alors finement décrite et modélisée dans un modèle qui sera finalement testé sous la direction de Stephen Boyden (1979) sur la ville de Hongkong. Mais malgré des conclusions intéressantes, la complexité du modèle et son aspect expérimental n'ont pas permis une appropriation suffisante de l'outil par les acteurs de terrain, et peu de décisions opérationnelles seront prises à la suite de cet imposant travail.

Malheureusement, ce premier élan de recherche va rapidement s'essouffler dans les années 1980. Cyria Emelianoff et Jacques Theys (2001) expliquent cet échec par le

Mais les travaux de quantification menés par l'écologie urbaine des années 1970 auront au final peu d'impacts politiques.

fait que l'écologie urbaine se serait alors « fourvoyée dans un quantitativisme étroit dont elle n'est pas parvenue à se dégager » ; et les deux auteurs ajoutent que « la tentative de représenter la ville comme un écosystème n'a conduit qu'à réduire la complexité des activités urbaines à une vision systémique assez pauvre, limitée à des flux de matière et d'énergie. » Moins sévère, Sabine Barles (2010) pense de son côté que ce sont peut-être les limites conceptuelles et techniques de l'écologie urbaine, alors balbutiante, qui expliqueraient

pour partie cet échec. On peut toutefois se demander si ce dernier n'est pas plus simplement lié au fait que l'écologie urbaine, en montrant notamment « la dépendance de la ville vis-à-vis de l'extérieur (...), n'a pas amené les preneurs de décision à se détourner d'un modèle qui leur rappelait peut-être trop brutalement certaines réalités quant à leur impuissance ? » (Boutaud, 2005) Mais au final, quelles qu'en soient les raisons, force est de constater que la dynamique initiée dans les années 1960 et 1970 s'est rapidement épuisée.

Le renouveau des années 1990-2000 : de l'empreinte écologique aux démarches inspirées par l'écologie industrielle

L'empreinte écologique des villes – Au début des années 1990, dans la foulée du Sommet de la Terre, l'intérêt pour les questions écologiques va brutalement resurgir

Dans les années 1990 et 2000, l'empreinte écologique va réactualiser la question des analyses de flux et être utilisée par de nombreuses villes qui vont alors se demander quelle surface de planète elles consomment.

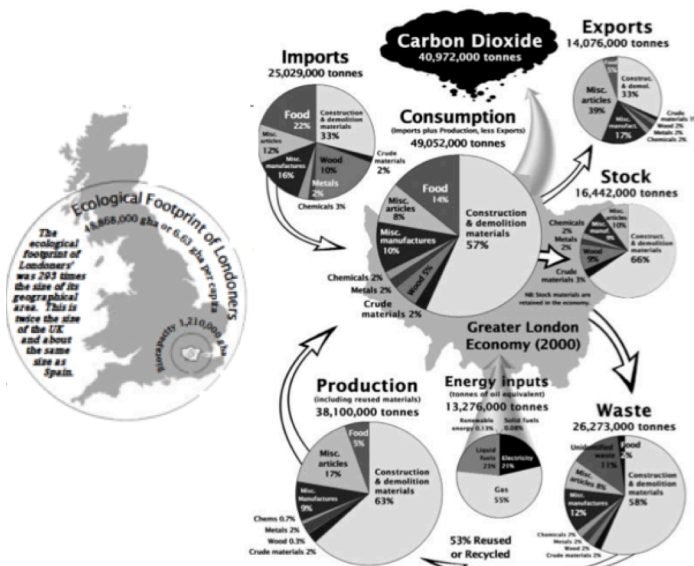
dans l'opinion publique. C'est à cette époque que la notion d'empreinte écologique va faire son apparition, suite à la rédaction d'une thèse de doctorat réalisée par Mathis Wackernagel à l'Université de Vancouver, sous la direction de William Rees. A l'origine, ces deux chercheurs en planification urbaine cherchaient à démontrer la dépendance des villes à l'égard des territoires ruraux et naturels – entrant en cela en écho avec les travaux précurseurs de l'écologie urbaine des années 1970. Prenant l'image d'un terrarium, ils posent alors la question suivante : « quelle dimension devrait avoir la coupole de verre pour que la ville qu'elle recouvre puisse vivre exclusivement de l'écosystème qu'elle contient ? » Et cette question va alors les amener à filer la métaphore organique, en proposant de

« penser une économie comme ayant un métabolisme industriel (...) semblable à une vache dans un pré. (...) La question devient donc : quelle surface de pâturage faut-il

pour soutenir cette économie ? » (Wackernagel & Rees, 1999)

Les deux auteurs se mettent alors à comptabiliser les différentes

surfaces biologiquement productives de terre et de mer qu'il convient de mobiliser à la surface de la Terre pour répondre aux besoins d'un individu, d'une ville ou encore d'un pays. Au tournant des années 2000, l'outil va alors connaître un succès très important, et de nombreuses villes à travers le monde se mettront à calculer l'empreinte écologique de leurs territoires.



L'empreinte écologique du Greater London (BFF, 2002)

l'immense dépendance des villes à l'égard des territoires non urbains – elles ont en revanche eu peu d'impact en termes d'aide à la décision et sont souvent restées cantonnées au rôle d'outil de sensibilisation auprès du grand public (Raoul-Duval, 2008).

De l'écologie industrielle à l'écologie territoriale – Le tournant des années 1990 a également été marqué par l'apparition du concept d'écologie industrielle, qui va lui aussi connaître un certain succès dans le courant des années 2000. Si les influences théoriques et les références disciplinaires sont parfois différentes, l'écologie industrielle rejoint au moins les courants de pensée précédents sur cette idée centrale selon

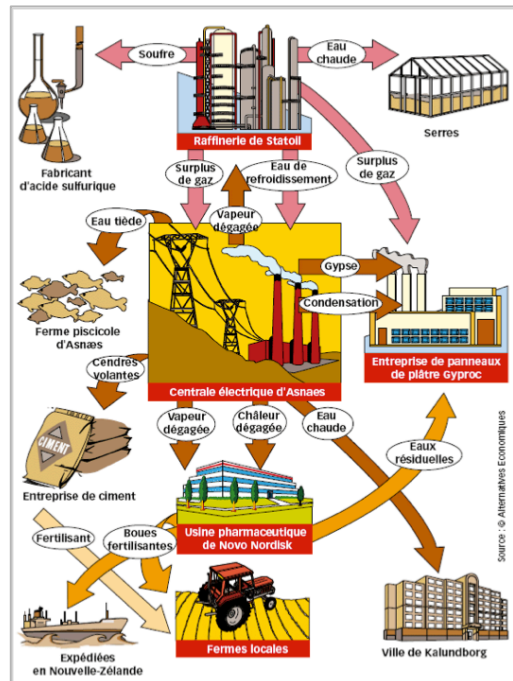
Dans le même temps, le mouvement de l'écologie industrielle va prendre de l'ampleur et développer de nombreux outils...

laquelle l'économie fonctionne peu ou prou comme un métabolisme et que, pour être pérenne, elle devrait imiter sur certains points les écosystèmes naturels. Dans leur article fondateur, Robert Froesch et Nicholas Gallopoulos dénoncent par exemple le mode de fonctionnement linéaire de l'économie industrielle, qui tend à considérer la nature comme un puits infini de ressources et un réceptacle tout aussi illimité de déchets et de pollutions ; ils proposent alors de transformer ce modèle en un « *écosystème industriel*. » Avant de préciser que, « *dans un tel système, la consommation d'énergie et de matériaux est optimisée, la production de déchets est minimisée et les déchets d'un processus servent de matière première à un autre processus.* » (Froesch & Gallopoulos, 1989) Cette dernière idée va engendrer un peu plus tard le concept de symbiose industrielle, que l'on peut aisément considérer comme une première forme d'application territoriale de la notion d'écologie industrielle.

♀ Zoom sur... La symbiose industrielle de Kalundborg : une application territoriale du principe d'écologie industrielle

Lorsqu'il s'agit d'illustrer les notions d'écologie industrielle ou de symbiose industrielle, l'exemple cité est presque toujours le même : la zone industrielle de Kalundborg, au Danemark. Et de fait, il s'agit peut-être encore aujourd'hui du cas le plus abouti de symbiose réalisée entre plusieurs entreprises situées sur un même territoire, puisqu'on compte près d'une trentaine de contrats de vente entre les acteurs économiques du secteur : ainsi, la centrale électrique vend de la vapeur à la raffinerie de pétrole, mais également à une société de biotechnologies, à une société productrice de panneaux de plâtre et également à la municipalité (chauffage urbain). De son côté, la raffinerie revend ses eaux usées à la centrale électrique (refroidissement) et à une ferme piscicole ; quant au gypse issu de la désulfuration de ses gaz de combustion, la raffinerie les vend à la société de panneaux de plâtre, etc.

In fine, ces contrats témoignent d'une symbiose effective dans laquelle les résidus de production d'une entreprise deviennent une ressource pour une autre. Les économies ainsi générées sont estimées à 20 000 tonnes de pétrole par an, 200 000 tonnes de gypse, 15 000 tonnes de charbon, 2,9 millions de m³ cubes d'eau (Chevallier, 2009).



...qui vont pour partie être appliqués à l'échelle des territoires, donnant naissance à la notion d'écologie territoriale.

Assez rapidement, le focus d'abord porté par l'écologie industrielle sur la production (dans l'optique de verdir celle-ci) va s'élargir à la consommation. Dans le même temps, les outils et les analyses développés à l'échelle des entreprises vont également s'étendre à l'échelle des territoires, qui sont précisément caractérisés par une mixité de flux de production et de consommation. Apparaît alors le néologisme d'écologie territoriale (ou écologie industrielle et territoriale, selon les auteurs) que l'on peut considérer comme l'application à l'échelle des territoires des outils et des méthodes de l'écologie industrielle – ou encore, comme l'écrit Sabine Barles (2010), « *une écologie industrielle inscrite spatialement,*

qui prend en compte les acteurs des flux de matières, s'interroge sur les modalités de leur gestion et ne néglige pas les conséquences économiques et sociales de ces flux.»

Au final, bien que d'origines différentes, les mouvements utilisant la notion de métabolisme urbain se rejoignent sur de nombreux points. Notamment sur le constat de l'extrême entropie des villes modernes et leur grande dépendance à l'égard des ressources extérieures.

Mais cette évolution ne manque pas d'interroger, car ainsi décrite l'écologie industrielle et territoriale ressemble à s'y méprendre à l'écologie urbaine des années 1970. Certes, les deux mouvements ont des origines disciplinaires différentes. Certes, l'écologie urbaine est considérée comme désuète tandis que l'écologie territoriale bénéficie de l'effet de mode qui entoure aujourd'hui encore l'écologie industrielle et plus encore l'économie circulaire (Buclet, 2011). Mais les convergences sont si fortes que, bien légitimement, « certains militent pour le maintien de l'appellation initiale [d'écologie urbaine] compte tenu de son antériorité et de la structuration existante du champ afin de ne pas ajouter à la confusion. » (Barles, 2010) Et cela est d'autant plus vrai que, là encore, ce sont d'abord et avant tout les analyses de flux qui occupent le plus de place dans la littérature sur l'écologie territoriale. En témoignent par exemple les quelques études francophones sur lesquelles nous aurons l'occasion

de revenir plus en avant et qui, toutes, font une large place à la quantification des flux de matière et d'énergie. En témoigne également le très officiel Commissariat Général au Développement Durable, qui définit l'EIT comme un processus de « quantification des flux de ressources (matière, eau, énergie) et d'optimisation de leur utilisation dans le cadre d'actions coopératives et innovantes. » (CGDD, Delduc (dir.), 2014)

🔍 **Zoom sur... L'économie circulaire et l'écologie industrielle : des thématiques qui s'imposent peu à peu dans l'agenda politique.**

Des rejets... aux ressources : les deux « bouts du tuyau » – Depuis le milieu des années 1990, l'agenda politique international s'est focalisé essentiellement sur le problème des pollutions et autres atteintes à l'environnement et à la biodiversité. La focale a alors particulièrement été centrée sur la question du changement climatique et ses corollaires émissions de gaz à effet de serre, avec au niveau international la création du Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) et la signature de la convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique, qui a notamment abouti au protocole de Kyoto sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre – lui-même suivi de nombreux engagements européens, nationaux et locaux (Paquet Climat-Energie de l'UE, Plan Climat de la France, Plans Climat-Energie Territoriaux, etc.). On constate toutefois depuis quelques années un retour des préoccupations relatives aux ressources naturelles. Le Panel international sur les ressources du PNUE note par exemple que l'extraction de ces dernières a augmenté de 80% entre 1980 et 2010, et que celle-ci sera probablement multipliée encore par deux d'ici à 2025 si les rythmes de consommation se maintiennent. L'Union Européenne a de son côté établi une liste de 14 matières premières critiques qui font l'objet d'une surveillance spécifique, du fait de la dépendance de nos sociétés à leur égard (éléments cités par CGDD, 2014).

L'économie circulaire et l'écologie industrielle sont deux concepts apparus simultanément au tournant des années 1990 pour répondre à ce double défi que posent les flux de matière et d'énergie entrants et sortants de l'économie humaine. Le terme d'économie circulaire apparaît ainsi pour la première fois en 1989 dans l'ouvrage *Economics of Natural Resources and the Environment* (Pearce & Turner, 1989), tandis que la notion d'écologie industrielle va être formalisée la même année (Frosch & Gallopoulos, 1989) et devenir un champ d'étude spécifique à partir de 1991 à la suite d'un colloque de la *National Academy of Science* des Etats-Unis. Popularisées en langue française par Suren Erkman (1998), ces deux notions ont pour caractéristique commune d'être à l'origine très axées sur la production – qu'il s'agit de rendre plus vertueuse par le biais de processus managériaux et technologiques. A l'échelle des institutions internationales, la Conférence de Rio+20 a consacré en 2012 la notion d'économie verte, accentuant encore l'intérêt pour l'économie circulaire et l'écologie industrielle – même si ces termes ne sont pas explicitement mentionnés dans la déclaration finale. Au sein de l'Union Européenne, l'économie circulaire est également devenue une priorité politique : l'utilisation efficace des ressources est par exemple l'une des sept initiatives phares de la stratégie Europe 2020 pour une croissance durable adoptée par les chefs d'Etat de l'UE en 2010 ; et une stratégie de déploiement de l'économie circulaire a été initiée en 2014 – le Paquet économie circulaire de la Commission européenne. En France, la conférence environnementale de 2013 a mis l'accent sur l'économie circulaire. Dans la foulée, la Stratégie Nationale de Transition Ecologique vers un Développement Durable (SNTEDD) a fixé comme objectif prioritaire à la France de « s'engager dans une économie circulaire et sobre en carbone » (défi n°2 de la SNTEDD) en promouvant notamment le développement de l'écologie industrielle.

L'économie circulaire est officiellement définie dans la SNTEDD (20 occurrences du terme) comme un « système économique de production, d'échange et de consommation conçu et organisé pour minimiser les prélèvements nets de ressources (énergies fossiles, matières premières, eau, foncier, milieux) et les émissions polluantes sources d'impacts environnementaux et sanitaires négatifs, tant locaux que globaux. »

L'écologie industrielle et territoriale (11 occurrences du terme dans la SNTEDD) est définie ainsi : « l'écologie industrielle et territoriale s'inspire du fonctionnement des écosystèmes naturels pour recréer à l'échelle du système industriel une organisation caractérisée par un usage optimal des ressources et un fort taux de recyclage de la matière et de l'énergie. Concrètement, il s'agit d'inciter les acteurs économiques à développer des synergies, de sorte à réutiliser localement les résidus de production et mutualiser certains services et équipements. » (CGDD, 2015)

Que retenir de cette courte mise en perspective historique ? Tout simplement que, de l'écologie des systèmes urbains des années 1970 à l'actuelle écologie industrielle et territoriale, différents courants de pensée ont décrit les établissements humains (villes, régions, pays) en les comparant à des écosystèmes ou des métabolismes. Et dans tous les cas, cette analogie les a alors amenés :

- d'une part à produire un certain nombre de conclusions quant à la dimension insoutenable des villes modernes, leur extrême dépendance à l'égard des territoires extérieurs, leur grande vulnérabilité en matière d'approvisionnements de ressources, leur dimension fortement entropique... ;
- d'autre part, à proposer certaines préconisations qui visent généralement à s'inspirer davantage de la nature, notamment en favorisant le recyclage, en optimisant l'usage des ressources et en limitant les rejets de déchets et autres pollutions.

Reste à voir plus en détail de quelle manière sont aujourd'hui déclinées ces différentes approches.

2. Les approches descriptives du métabolisme urbain : un essai de typologie

Comme nous l'avons évoqué dans la première partie, l'actuel regain d'intérêt pour la notion de métabolisme urbain coïncide avec la montée en puissance de l'écologie industrielle et des outils de type « empreinte ». Ces deux démarches ont comme caractéristique commune de s'intéresser aux flux de matière et/ou d'énergie qui

Certains outils d'analyse du métabolisme urbain s'intéressent à un seul flux tandis que d'autres en agrègent plusieurs. Et certains outils observent les flux générés par tous les acteurs du territoire, tandis que d'autres se focalisent sur les consommations finales des habitants (leur mode de vie).

traversent l'économie humaine et traduisent la dimension matérielle de celle-ci. Mais comment s'y retrouver parmi les très nombreux outils aujourd'hui proposés ?

Pour rendre compte de la diversité des approches contemporaines du métabolisme urbain, plusieurs catégories d'outils ont déjà été distinguées (Barles, 2007 ; Zhang, 2003). Nous proposons quant à nous d'établir une typologie des outils descriptifs du métabolisme urbain qui recoupe pour partie seulement ces précédentes analyses, en nous basant sur deux critères bien distincts :

Les flux analysés : certains outils sont monocritère, c'est à dire qu'ils sont tournés vers un objet spécifique : un flux d'énergie ou de matière bien précis (par exemple l'azote), ou encore un impact spécifique (par exemple les gaz à effet de serre). D'autres, au contraire, sont multicritères, c'est à dire qu'ils cherchent à analyser et agréger tous les flux de matières et/ou d'énergie qui traversent un métabolisme

territorial donné.

Les consommations ciblées : certains outils sont tournés vers les habitants d'un territoire et leur consommation finale ; ils cherchent à mettre en avant les flux de matière et/ou d'énergie générés pour permettre le mode de vie des habitants du territoire en question. Ces méthodes estiment les flux générés par les consommations des ménages habitant le territoire étudié, quel que soit l'endroit où se situent leurs

achats, et excluant les achats effectués sur le territoire par d'autres acteurs que les ménages habitant le territoire (entreprises ou ménages habitant d'autres territoires). C'est typiquement le cas des outils de type « empreinte ». D'autres outils s'intéressent à l'ensemble des acteurs du territoire analysé, consommateurs comme producteurs (c'est à dire l'ensemble du système socio-économique) : tous les flux générés sur ce territoire sont alors pris en compte (consommation totale, incluant les consommations intermédiaires) ; c'est la démarche privilégiée par les analyses de flux inspirés de l'écologie industrielle. Cette différence entre consommation finale et consommation totale est explicitée dans l'encart ci-après.

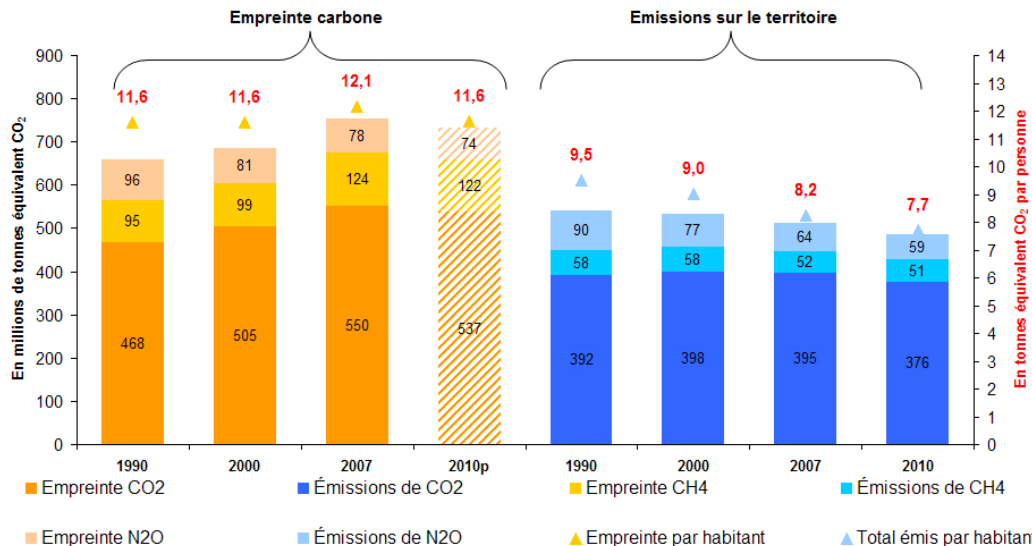
📍 Zoom sur... Consommation directe, finale et totale : l'exemple des gaz à effet de serre

Il est possible d'analyser les émissions de gaz à effet de serre d'un pays de trois façons, correspondant à trois périmètres de calcul bien différents.

La première façon – qui est aussi la plus classique – consiste à prendre en compte l'ensemble des **émissions directes** de gaz à effet de serre qui sont émises sur le territoire durant une période donnée, en intégrant de manière indistincte tous les acteurs socioéconomiques : les ménages, les entreprises, les administrations, les transports de personnes et de marchandises, les personnes de passages sur le territoire (touristes notamment), etc. A titre d'exemple, en France, en 2010, **les émissions de gaz à effet de serre** ainsi comptabilisées représentaient environ **7,7 tonnes d'équivalent CO₂ par habitant**.

La seconde méthode consiste à ne retenir dans le calcul que les émissions liées à la **consommation finale** des ménages... mais en incluant en revanche toutes les émissions liées à cette consommation, c'est à dire **même les émissions indirectes**, c'est à dire celles générées tout au long de la production, que cette dernière ait eu lieu sur le territoire étudié ou en dehors (importations). Par exemple, si un tee-shirt acheté en France a émis du CO₂ en Chine lors de sa production, ce CO₂ indirect est alors réimputé à la France. Inversement, un produit fabriqué en France et exporté verra ses émissions de production retranchées du bilan de la France. Cette méthode est utilisée par la plupart des outils de type « empreinte » (écologique, carbone, etc.). En 2010, **l'empreinte carbone** de la France s'élevait à **11,6 tonnes d'équivalent CO₂**.

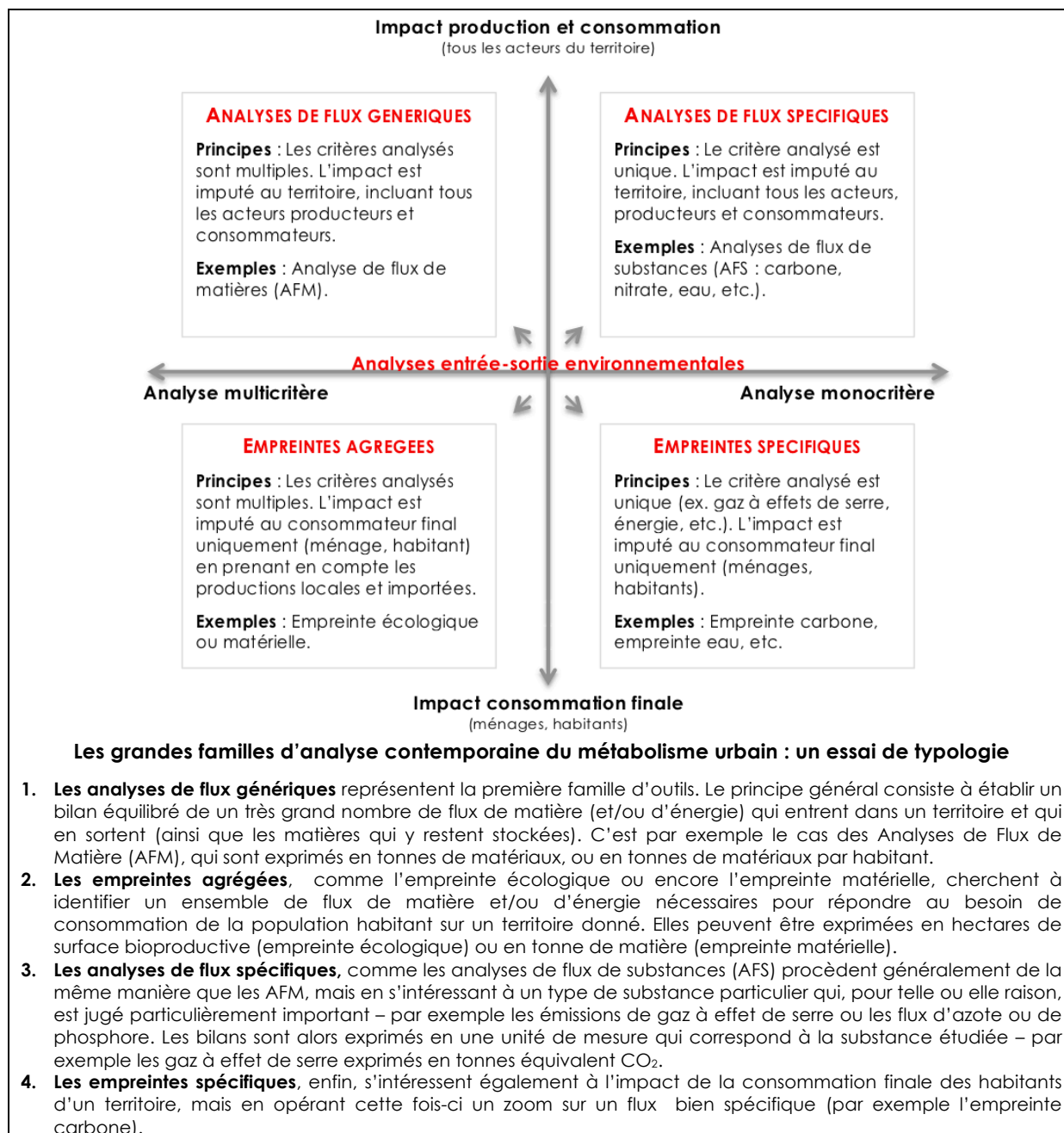
Entre 1990 et 2000, les émissions de gaz à effet de serre de la France ont baissé, conformément aux engagements du protocole de Kyoto. Malheureusement, durant la même période l'empreinte carbone du pays s'est accrue, traduisant un transfert de pollution en dehors des frontières françaises.



Empreinte carbone et émissions directes de gaz à effet de serre de la France, 1990-2010 (source : SOeS, 2015)

Enfin, la troisième méthode, qui est généralement celle utilisée par les outils de comptabilité inspirés de l'écologie industrielle et territoriale (analyse de flux de matière, de substance, d'énergie, etc.), comptabilise l'ensemble des flux entrants dans le territoire étudié, ainsi que l'ensemble des flux sortants, **directs et indirects** (CGDD, 2014). On peut qualifier cette approche de **consommation totale** du territoire.

En croisant ces deux critères (flux analysés / acteurs ciblés) on obtient alors une typologie qui fait ressortir quatre grandes familles de démarches, représentées dans le graphique ci-après.



L'objectif des pages qui suivent est d'explorer plus en détail ces différents outils, en essayant de montrer leurs avantages et leurs limites respectives lorsqu'il s'agit de décrire des métabolismes territoriaux.

Le chapitre 3 est ainsi dédié aux analyses multicritères du métabolisme urbain (1 et 2 de la typologie) : il fait plus particulièrement un point sur l'état de l'art dans le domaine des analyses de flux de matière (avec une description plus superficielle des empreintes agrégées de type empreinte écologique).

Le chapitre 4 fait quant à lui un état des lieux des analyses de flux de substances spécifiques (3 et 4 de la typologie) (avec une description plus sommaire des empreintes spécifiques de type empreinte carbone).

Enfin, **le chapitre 5** fait le point sur une méthodologie émergente qui peut potentiellement être utilisée dans les quatre cas de figure de notre typologie : celle des analyses entrée-sortie étendues à l'environnement.

3. Les analyses de flux génériques

La comptabilité matérielle et la comptabilité énergétique des métabolismes territoriaux ont fait l'objet de très nombreuses études au cours des dernières décennies. Si ces deux types d'outils obéissent à certaines règles communes – notamment le fait d'agréger une multitude de flux physiques – ils se différencient toutefois par leur objet d'étude et, par conséquent, par l'unité de mesure utilisée : les tonnes de matières d'un côté et les wattheures (ou joules, ou toute autre unité énergétique) de l'autre. Nous étudierons essentiellement dans les pages qui viennent les Analyses de Flux de Matière (AFM). L'un des avantages de ces dernières est que,

Les analyses de flux de matière (AFM) ont l'avantage de proposer une méthodologie aujourd'hui largement standardisée.

loin de se cantonner aux expérimentations académiques, les méthodologies d'AFM se sont progressivement uniformisées et standardisées au cours des dernières années, au point même que l'AFM est devenue un outil obligatoire pour les états membres au sein de l'Union Européenne – en application de la directive sur les déchets 2008/98/CE. Dans le courant des années 2000, Eurostat a ainsi développé un guide méthodologique (Eurostat, 2009) aujourd'hui utilisé en France afin de réaliser le rapportage européen sur les flux de matières. Et c'est bien entendu sur les fondements de cette méthodologie que les calculs les plus récents ont été réalisés à l'échelle infranationale.

Les principes généraux de l'AFM

Dans un document méthodologique produit à l'égard des collectivités et des praticiens, le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) écrit que « la caractérisation du métabolisme territorial repose sur la quantification des flux de matières et d'énergie qu'il engendre. » Le CGDD précise que « ces démarches [de quantification, nda] permettent de peser, au sens strict du terme, c'est-à-dire en tonnes de matières, le fonctionnement d'un territoire donné. » (CGDD, 2014) Le principe général de l'AFM consiste donc à comptabiliser « l'ensemble des flux de matières nécessaires aux activités humaines sur un territoire » (Alterre Bourgogne, 2013)

Quel territoire ? Déterminer le périmètre du métabolisme – La première étape consiste donc à définir un périmètre d'étude précis, qui correspond aux frontières du

Les AFM comptabilisent la masse de l'ensemble des flux de matière (à l'exception de l'eau) qui sont nécessaires aux activités humaines au sein d'un territoire donné.

métabolisme territorial. Pour des raisons pratiques, notamment liées à la disponibilité des données, le périmètre en question correspond la plupart du temps aux frontières administratives : état, région ou encore département. On notera d'emblée que la notion de métabolisme urbain suppose toutefois de s'intéresser à des entités qui, en France pour le moins (et à l'exception de Paris), correspondent à des territoires infra-départementaux – ce qui, nous le verrons, pose de difficultés en termes de disponibilité des données statistiques.

Les matières prises en compte (et celles ignorées) – Au sein du territoire étudié, l'AFM comptabilise l'ensemble des flux de matières nécessaires aux activités humaines, « qu'il s'agisse de matières brutes, de produits finis ou semi-finis, regroupées selon les catégories suivantes :

- biomasse issue de l'agriculture et de la pêche (produits agricoles et alimentaires),
- bois et produits dérivés,
- minerais métalliques et produits principalement métalliques,
- minéraux utilisés principalement dans la construction,
- minéraux industriels (argiles et kaolin, sel, engrais minéraux...),
- combustibles fossiles et produits dérivés,
- autres produits (principalement produits manufacturés). » (Alterre Bourgogne, 2013)

Il est important de noter que l'eau n'est pas prise en compte dans les bilans de flux de matière, notamment parce que les volumes en jeu sont « *tellement considérables qu'ils masqueraient tous les autres flux.* » (CGDD, 2014)

L'unité de mesure utilisée : les tonnes de matière – Mise à part l'eau, les autres matières entrant dans le métabolisme sont comptabilisées sous la forme d'une unité de mesure commune : la tonne – ou la tonne par habitant pour faciliter les comparaisons entre territoires. Cela signifie que seule la masse des matériaux est comptabilisée, indépendamment de leur nature. Ainsi, une tonne d'éléments toxiques ou rares est indifféremment agrégée à une tonne de sable, bien que les deux matériaux ne renvoient pas aux mêmes enjeux en termes de vulnérabilité, par exemple. De la même manière, les combustibles fossiles ou issus de la biomasse qui entrent dans le métabolisme sont pris en compte mais, conformément au principe de l'analyse de flux de matières (et contrairement aux analyses de flux énergétiques), ces combustibles sont simplement comptabilisés sous la forme de flux physiques, et c'est donc leur masse qui est considérée (exprimée en tonnes) indépendamment de leur contenu énergétique.

Les AFM établissent un bilan, exprimé en tonnes, des matières qui entrent dans le métabolisme territorial. Une partie de ces matières est stockée ou recyclée au sein du métabolisme, et une autre partie en sort sous différentes formes (produits exportés vers d'autres territoires et/ou résidus rejetés dans la nature).

Les différents « pôles » du métabolisme : entrées, stocks, recyclage et sorties – Les matières ainsi déterminées circulent au travers du métabolisme territorial en respectant un principe bien connu de la physique : la conservation de la masse. Connu également sous le nom de loi de Lavoisier, ce principe s'exprime communément par la formule consacrée selon laquelle « *rien de ne se perd, tout se transforme* ». Cela signifie que les bilans de flux de matière sont forcément équilibrés et se répartissent au sein du métabolisme territorial entre quatre pôles :

- les entrées (ou flux entrants) : il s'agit de l'ensemble des flux de matière, exprimés en tonnes ou en tonnes par habitant, qui ont été mobilisés pour le fonctionnement du métabolisme territorial durant la période étudiée (en général une année). Ces flux de matière sont pour partie issus du territoire et pour partie importés, et se présentent tout aussi bien sous la forme de matières premières que de produits finis ou semi-finis ; ils peuvent ensuite suivre trois cheminements différents ;
- les stocks : une partie des flux de matière qui entre dans le métabolisme territorial est stockée au sein de celui-ci (par exemple, du ciment et du sable sont stockés sous la forme de béton dans les bâtiments ou infrastructures construits) ;
- le recyclage : une partie des flux de matière non utilisés ou en fin de vie est récupérée afin d'être recyclée, permettant ainsi de limiter les flux entrants et sortants ;
- les sorties (ou flux sortants) : enfin, les flux de matière non stockés et non recyclés ressortent du métabolisme territorial sous différentes formes : il s'agit à la fois de matières premières ou de produits manufacturés exportés vers d'autres territoires, mais aussi de résidus (gazeux, liquides ou solides) qui retournent à la nature.

Ces quatre étapes du cycle de vie potentiel des flux de matière permettent de résumer le principe général des AFM d'un métabolisme territorial. Mais ce processus est en réalité plus complexe qu'il n'y paraît, comme en témoigne l'encart ci-après qui détaille davantage l'AFM telle qu'elle est aujourd'hui conventionnellement établie – faisant notamment apparaître les flux indirects.

🔍 Zoom sur... Le schéma détaillé d'une analyse conventionnelle de flux de matières (CGDD, 2014)

L'AFM se présente sous la forme d'un bilan de matière dont une partie est constituée de flux apparents dont le bilan est équilibré entre les entrées, les stocks, le recyclage et les sorties.

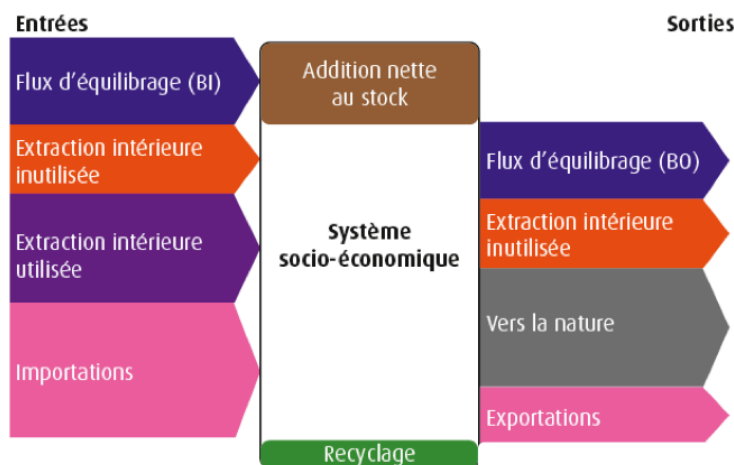


Schéma conventionnel d'une analyse de flux de matière, pour la partie « apparente » (Alterre Bourgogne, 2013, modifié)

1. Les entrées (ou flux entrants) comprennent :

« **L'extraction intérieure utilisée** : il s'agit des matières extraites sur le territoire et utilisées par le système socio-économique (entreprises et ménages). Cela recouvre la biomasse agricole, sylvicole, aquatique et issue de la chasse, les minerais métalliques, les minéraux non métalliques et les combustibles fossiles.

L'extraction intérieure inutilisée : ce sont des matières extraites, produites ou déplacées qui n'entrent pas dans l'économie (terres de découverte d'activités minières, résidus de culture laissés sur les champs et érosion des sols agricoles par exemple).

Les importations : elles comprennent toutes les matières brutes et les produits finis ou semi-finis introduits sur le territoire à partir de pays étrangers ou d'autres parties du territoire français en dehors de celle qui est étudiée. »

Enfin, il faut ajouter **les éléments d'équilibrage en entrée** [cf. note « flux d'équilibrage ci-dessous »] : l'oxygène nécessaire aux combustions d'énergies ainsi qu'à la respiration des humains et du bétail, et l'azote nécessaire à la fabrication d'engrais. » (CGDD, 2014)

2. Les stocks (ou addition nette au stock) : « il s'agit de la quantité de nouveaux matériaux de construction stockés dans les bâtiments et autres infrastructures, ainsi que les matériaux intégrés dans les équipements des entreprises (engins, machines, outils...) et les biens durables des ménages (voitures, chaudières, équipements ménagers). »

3. Le recyclage comprend la partie des matières usagées ou non utilisée recyclée et réutilisée.

4. Les sorties (ou flux sortants) comprennent :

« **Les exportations** : elles comprennent toutes les matières et les produits finis ou semi-finis qui sortent du territoire à destination de pays étrangers ou d'autres parties du territoire français en dehors de celle qui est étudiée. »

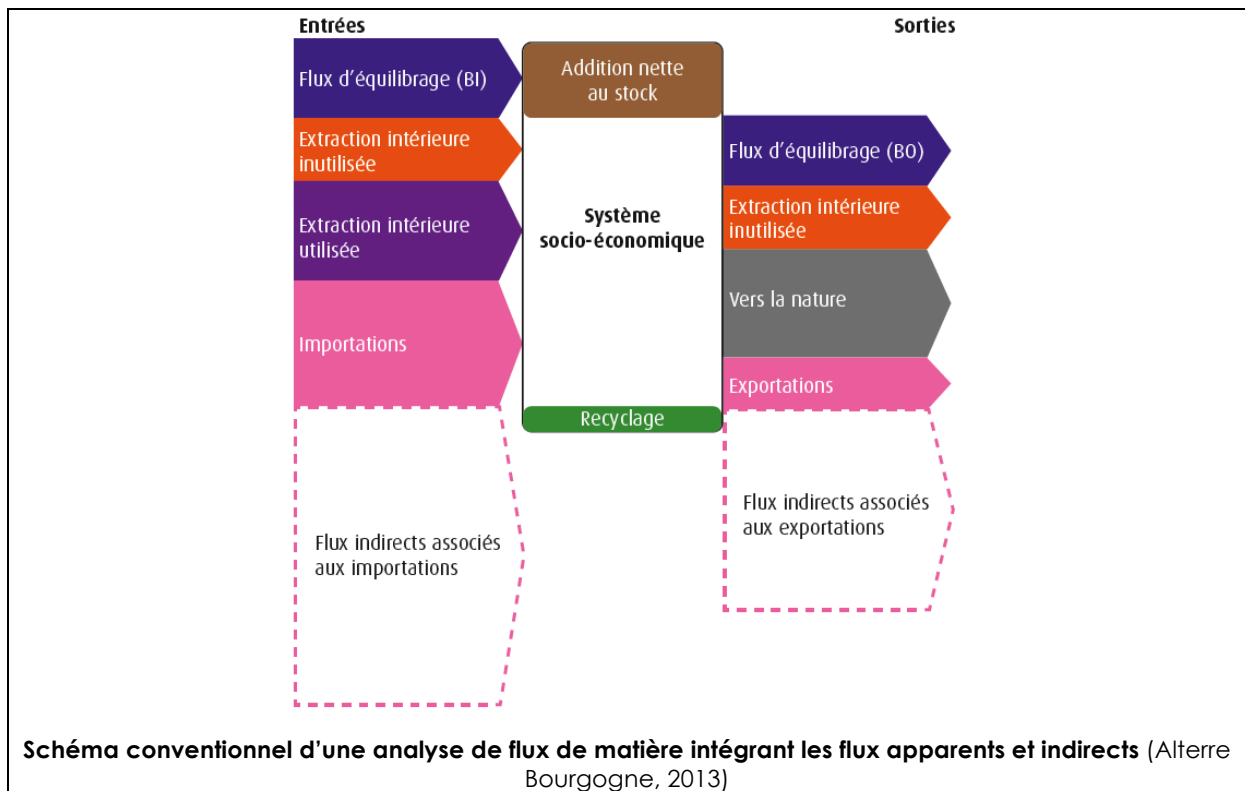
L'extraction intérieure inutilisée (cf. ci-dessus)

« **Les émissions vers la nature** : il s'agit des substances émises dans l'air, l'eau et les sols, ainsi que les déchets enfouis, résultant de la consommation de matières. »

Là encore, il faut ajouter « **les éléments d'équilibrage en sortie** [cf. note « flux d'équilibrage ci-dessous »] : la vapeur d'eau issue des combustions d'énergies, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone issus de la respiration des humains et du bétail. » (CGDD, 2014)

A propos des **flux d'équilibrage**, il est important de comprendre leur rôle : « afin de prendre en compte le principe de conservation de la matière, il est nécessaire d'équilibrer les entrées et les sorties. Pour cela, l'ensemble des éléments qui entre en jeu dans les principaux processus que sont la combustion de combustibles, la respiration des humains et des animaux, la production d'engrais azotés à partir de l'ammoniac de l'air sont comptabilisés. Si l'on détaille par exemple la réaction de combustion, on a (...) pour les hydrocarbures : Hydrocarbure + oxygène = dioxyde de carbone + vapeur d'eau. (...) » (CGDD, 2014)

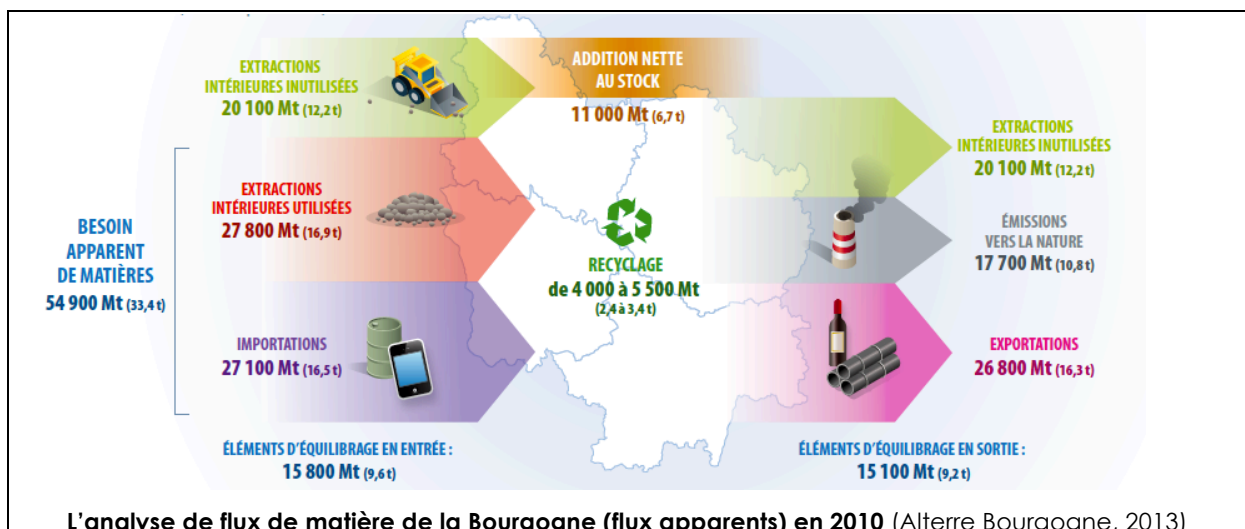
Le bilan ainsi réalisé n'est toutefois pas exhaustif. En effet, les importations et les exportations de produits finis et semi-finis nécessitent en amont de leur production la mobilisation d'une multitude de matériaux qui ne sont pas apparents : ils sont pour ainsi dire « incorporés » dans les produits et services en question. Cette partie « fantôme » des flux de matières, ce sont les « **flux indirects liés aux importations et exportations** : il s'agit à la fois de matières inutilisées et des flux de matières utilisées (notamment des combustibles) pour produire et transporter des matières ou des biens que le territoire étudié importe ou exporte, mais qui ne sont pas incorporés aux biens importés ou exportés du territoire concerné. » (CGDD, 2014) Comme nous le verrons dans les études de cas, ces flux indirects, qui sont pour ainsi dire invisibles, peuvent représenter une part considérable des AFM des métabolismes territoriaux.



Un exemple d'AFM : la région Bourgogne

En 2013, Alterre Bourgogne a piloté pour le compte de la Région une AFM en utilisant les éléments méthodologiques proposés Eurostat et utilisés pour la France par le CGDD (SOes).

A l'échelle locale, et parmi les territoires francophones, c'est sans doute le canton de Genève qui a fait figure de pionnier dans l'AFM au début des années 2000 (Emmenegger et coll., 2003). En France, les premiers travaux menés à l'échelle infranationale ont d'abord été de type universitaires, dirigés notamment par Sabine Barles en Île-de-France ou encore en région Midi-Pyrénées (Barles, 2007 ; 2014). Ces travaux universitaires ont été suivis par la publication, par le CGDD, d'un guide méthodologique (CGDD, 2014) ainsi que par des études portées par les collectivités territoriales. La Bourgogne a été relativement pionnière en la matière. Pilotée par l'agence régionale Alterre Bourgogne en partenariat avec le Conseil Régional, la DREAL et l'ADEME, l'étude réalisée en 2012-13 par l'agence de conseil Mydiane (Benoît Duret) aboutit à des conclusions que nous résumons ci-après.



En entrée : plus de 33 tonnes de matière par habitant... – Si l'on met de côté les flux d'équilibrage (9,6 t/hab/an), les flux indirects liés aux exportations ainsi que les extractions intérieures inutilisées (12,2 t/hab/an) les besoins apparents de matière de la région Bourgogne s'élèvent en 2010 à 33,4 t/hab/an. Cette masse est à peu près équitablement répartie entre les *extractions intérieures utilisées* (48% de matériaux de construction, 44% de produits agricoles, 7% de bois et 1% de produits minéraux) et les *importations* (34% de produits manufacturés divers, 20% de produits agricoles et alimentaires, 14% de combustibles fossiles et produits dérivés).

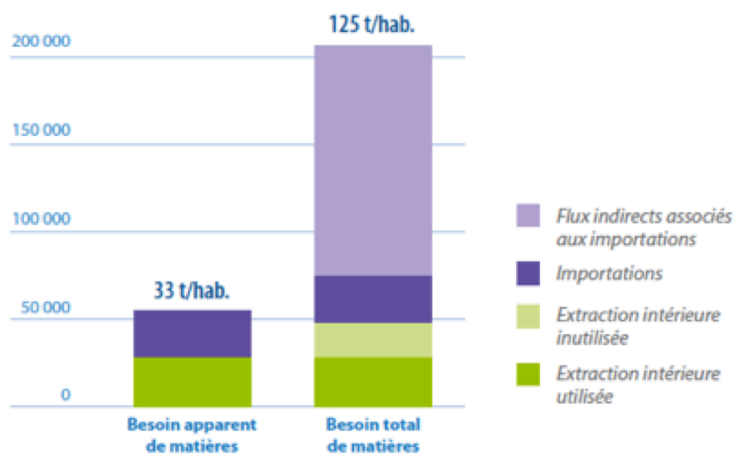
Le métabolisme bourguignon mobilise plus de 33 tonnes de matière apparente par habitant/an... et 125 tonnes en incluant les flux indirects et les flux non utilisés.

...dont 6,7 tonnes/hab/an stockées sur le territoire – Parmi ces 33,4t/hab de matériaux, environ 6,7 t/hab/an ont été stockées dans le métabolisme territorial sous la forme d'infrastructures, de bâtiments ou encore de biens durables divers et variés.

...seulement 2,4 à 3,4 tonnes/hab/an recyclées – Le recyclage de matériaux s'élève en 2010 à environ 3 t/hab/an. Le volume recyclé est en majeure partie constitué de matériaux de construction (déchets de chantiers) valorisés sous différentes formes : réemploi sur sites, recyclage en centrales d'enrobage ou encore réaménagement de carrières. Une partie plus modeste est constituée par le recyclage des autres déchets, notamment ménagers.

...et en sortie, 27 tonnes/hab/an d'exportations et de rejets dans la nature – Enfin, ce qui n'est ni stocké ni recyclé ressort du métabolisme sous deux formes : *les exportations* vers d'autres territoires, qui représentent 16,3 t/hab/an (dont 33% de produits manufacturés divers, 30% de produits agricoles, 19% de minéraux pour la construction) ; et les *rejets vers la nature*, qui représentent 10,8 t/hab/an de déchets et pollutions divers, aussi bien solides que gazeux ou liquides. Parmi ces rejets, les émissions de CO₂ comptent pour plus de 60% de la masse totale.

Le besoin total en matières de la Bourgogne en 2010 (en milliers de tonnes)



Alterre Bourgogne, 2013

à 125 tonnes par habitant et par an. Soit presque quatre fois plus que les seuls besoins apparents de matières (33,4 t/hab/an).

Last but no least : des flux indirects colossaux !

– Enfin, l'étude pilotée par Alterre Bourgogne montre que les flux associés aux importations (ou flux indirects) sont considérables. Ces derniers représentent la partie « fantôme » des matériaux incorporés dans les biens importés (cf. ci-dessus). Leur part est estimée à environ 80 tonnes par habitant/an. Si on ajoute l'extraction intérieure inutilisée, le besoin total de matière (c'est à dire la quantité de matériaux réellement mobilisée pour permettre le fonctionnement du métabolisme territorial) équivaut

De l'analyse à l'action : intérêts et limites de l'AFM

Que faire d'une AFM ? Si on en croit la plupart des écrits sur le sujet, l'inventaire réalisé lors d'une AFM n'est en réalité que la première étape vers une action concertée des acteurs du territoire visant à améliorer le bilan écologique et matériel du métabolisme territorial. Le CGDD écrit par exemple que « la comptabilité matérielle n'est plus uniquement dédiée à l'observation et au suivi (...) mais constitue aussi un préalable indispensable à la mise en œuvre de démarches d'écologie territoriale – ou

d'économie circulaire pour reprendre la terminologie de la conférence environnementale. » (CGDD, 2014) En Bourgogne, Didier Soulage, chef du service développement durable de la DREAL, considère également que « cette analyse constitue une première étape indispensable pour favoriser la concrétisation des démarches d'économie circulaire. » (CGDD, 2014) Mais dans les faits, il est peut-être encore trop tôt pour confirmer cette bonne intention. Les bilans réalisés en Bourgogne et – plus encore – en Alsace sont en effet récents ; si certaines conclusions sont intéressantes, il est encore difficile d'évaluer leurs effets sur les politiques publiques. Il semble toutefois que deux conclusions au moins puissent être tirées des quelques expériences en cours :

1. Un bilan global des flux pour piloter une stratégie d'écologie territoriale – Par rapport aux analyses plus sectorielles, l'avantage incontestable des AFM est leur dimension englobante. Car mise à part l'eau, presque toutes les matières sont

Les AFM offrent une vision globale des flux qui laisse présager des possibilités intéressantes de pilotage d'une stratégie d'écologie territoriale...

comptabilisées, ce qui suppose à l'échelle régionale la mobilisation de plus d'une centaine de données statistiques. Ce bilan permet d'établir quelques conclusions intéressantes, en particulier lorsque les territoires sont comparés entre eux. Sabine Barles a par exemple montré que les profils d'AFM pouvaient être très variables d'un métabolisme territorial à l'autre, avec un gradient rural-urbain particulièrement marqué (Barles, 2014). Les AFM permettent ainsi d'identifier les matières pour lesquelles un territoire est autonome ou, au contraire, dépendant vis-à-vis d'autres territoires. La plupart des

AFM réalisées jusqu'à présent montrent également que, même si les notions d'économie circulaire ou encore d'écologie industrielle sont sur toutes les lèvres, la part des matériaux effectivement recyclés est aujourd'hui très faible.

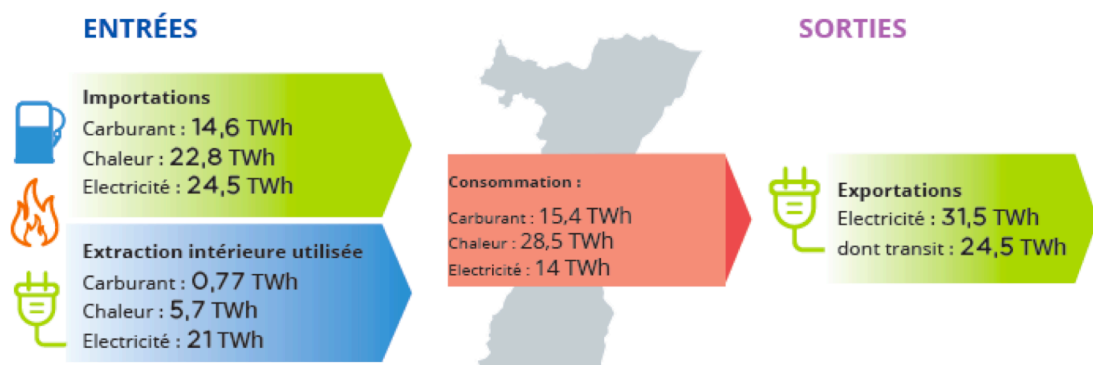
2. Un bilan qui mérite d'être décliné afin d'être plus opérationnel – L'une des principales limites des AFM est précisément leur dimension exhaustive, qui oblige à agréger toutes les données physiques en unités de masse (tonnes). Cette agrégation empêche d'identifier précisément les enjeux et les vulnérabilités pour le territoire. Par

...mais ce bilan global mérite ensuite d'être décliné (par filière ou par enjeu) afin d'être réellement pertinent et opérationnel.

exemple, une tonne d'éléments toxiques compte pour autant qu'une tonne de sable ou une tonne de pétrole, alors que les enjeux environnementaux et sanitaires sous-jacents à l'utilisation de ces différents matériaux n'ont évidemment rien de comparables. Conscient de cette limite, le CGDD précise toutefois que lorsqu'une AFM est opérée, « les flux peuvent être désagrégés » afin de correspondre « à des matières ou plutôt des groupes de matières spécifiques : ceci est important pour l'analyse et l'identification des

pistes d'action. » (CGDD, 2014) Ainsi des développements méthodologiques seraient nécessaires afin de représenter le niveau de toxicité, de rareté des flux recensés ainsi que le niveau de contribution de ces flux à l'atteinte d'éventuelles limites écologiques.

En Alsace, par exemple, l'AFM réalisée en 2015 a été complétée par une analyse spécifique des flux d'eau et d'énergie. Le bilan énergétique montre par exemple une



Région Alsace, 2015

forte dépendance de l'Alsace à l'égard des autres territoires, avec 80% de la chaleur produite et 95% des carburants utilisés qui sont issus de ressources fossiles importées.

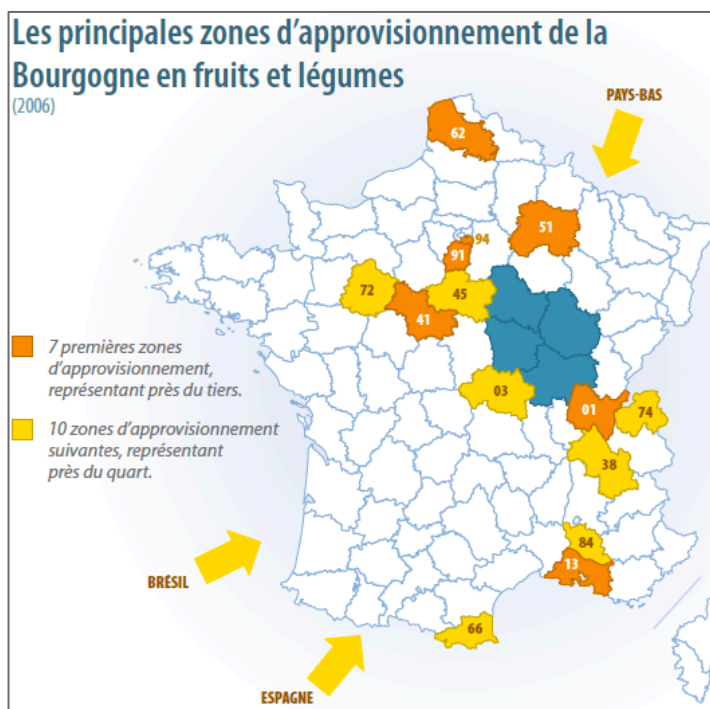
En Bourgogne, l'étude est accompagnée d'une analyse plus fine de certains secteurs clés, comme par exemple la construction et l'alimentation.

♀ Zoom sur... L'enjeu de l'alimentation au prisme de l'AFM réalisée en Bourgogne (Alterre Bourgogne, 2013)

L'AFM réalisée en Bourgogne montre que les produits agricoles et alimentaires représentent le second flux de matière de la région. La part la plus importante de ces flux sert à l'alimentation humaine et animale. Sur les 17,5 millions de tonnes en question, 12 millions ont été récoltées en région et un peu plus de 5 millions ont été importées. Au final, 9,5 millions de tonnes ont été consommées sur le territoire et le reste exporté ; ce qui signifie que la Bourgogne a produit davantage de biens issus de l'agriculture qu'elle n'en a consommé. Mais comme le rappelle Alterre Bourgogne cela « ne signifie pas pour autant que la région soit autosuffisante pour l'ensemble des produits alimentaires. La Bourgogne a récolté 69 kg/hab de fruits et légumes en 2010, alors qu'elle en a consommé de l'ordre de 178 kg/hab. Ce chiffre inclut la consommation finale des habitants, mais aussi les pertes intervenant aux divers stades de la transformation, du transport, de la distribution, du stockage et de la préparation. »

Par ailleurs, Alterre Bourgogne rappelle à juste titre qu' « on connaît encore peu la situation actuelle des territoires en matière d'approvisionnement alimentaire. Les outils permettant de visualiser les aires d'approvisionnement sont encore en développement dans le cadre de programmes de recherche. Un premier zoom a pu être réalisé sur l'approvisionnement de la Bourgogne en fruits et légumes (voir carte ci-dessous). Basé sur des données 2006, il fait apparaître que 88 % de l'approvisionnement en fruits et légumes provient de France : 9 % de Bourgogne, 15 % des départements limitrophes, 29 % des départements adjacents. Les sept premiers départements d'approvisionnement en représentent à eux seuls près du tiers (Val-de-Marne, Essonne, Marne, Loir-et-Cher, Bouches du-Rhône, Ain, Pas-de-Calais). Les 10 origines suivantes dans lesquelles on trouve des pays étrangers (Espagne, Brésil, Pays-Bas), en représentent le quart. »

Ainsi, même si elle fournit un certain nombre d'éléments intéressants dans le secteur de l'alimentation, l'AFM ne suffit pas à fournir des informations suffisamment précises pour développer une stratégie sectorielle. Des études complémentaires ont permis d'affiner le diagnostic sur des productions spécifiques. Mais le travail ne fait que commencer...



On retiendra de ces quelques pages que les AFM ont comme grand avantage d'obéir à des règles bien établies, suivant une méthodologie rigoureuse et normalisée. Elles permettent de regrouper une multitude de données physiques au sein d'un même appareil statistique. Mais cette agrégation présente une limite, puisqu'elle rend difficile la hiérarchisation des vulnérabilités – d'autant que les fonctions du métabolisme (se nourrir, se loger, etc.) ne sont pas détaillées. Par conséquent, aucun seuil de soutenabilité ou de vulnérabilité n'est directement identifiable. Pour répondre à cette difficulté, il faut alors procéder à des analyses de flux plus spécifiques, que nous allons essayer de présenter plus en détail dans le chapitre suivant.

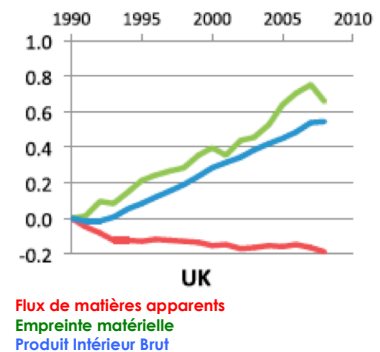
Avantages	Limites
Méthodologie normée et standardisée	Pas de hiérarchie des vulnérabilités
Retours d'expérience sur les calculs (plusieurs études en France)	Manque de retours concernant la partie opérationnelle (pilotage de l'action)
Approche globale (agrégation d'une multitude de flux physiques au sein d'un même outil)	Absence du flux « eau »
Possibilité de désagrégation des flux	Pas d'analyse par fonction (enjeu) du métabolisme
	Pas d'identification de seuil d'insoutenabilité

Quelques avantages et limites des AFM : synthèse

Quelques mots sur... Les « empreintes agrégées » de type empreinte écologique à l'échelle des métabolismes territoriaux

Avant de passer au chapitre suivant, il nous faut dire un mot sur les outils de type « empreinte agrégées », dont la particularité consiste à additionner un ensemble de flux de matière et/ou d'énergie en s'intéressant à la consommation (ou demande) finale des territoires (cf. chapitre 2). Il existe essentiellement deux types d'empreintes agrégées : l'empreinte matérielle et l'empreinte écologique.

L'**empreinte matérielle** est un outil en plein développement, qui fait régulièrement l'objet de publications académiques (Wiedmann et coll., 2013). Son principe est proche de l'AFM traditionnelle, si ce n'est que l'empreinte met l'accent sur la demande totale finale du territoire en prenant en compte tous les flux directs et indirects liés aux importations et aux exportations. Les résultats obtenus sont très intéressants : ils montrent que, si certains des pays parmi les plus tertiarisés tels la Grande-Bretagne (ci-contre) sont parvenus à réduire assez nettement leur consommation apparente de matières tout en accroissant leur PIB, ce découplage n'est en fait que superficiel : en prenant en compte les flux incorporés dans les échanges internationaux, leur empreinte matérielle a continué de croître. On notera toutefois que, pour obtenir les résultats les plus solides, on fait aujourd'hui appel à des tableaux entrée-sortie étendus à l'environnement prenant en compte les échanges entre régions du monde, et peu d'expériences de tels calculs sont encore menées à l'échelle de territoires infranationaux (chapitre 5).



L'**empreinte écologique** est sans doute l'outil le plus connu parmi les outils de mesure des flux de métabolismes socioéconomiques. Comme l'empreinte matérielle, l'empreinte écologique s'intéresse à l'impact de la demande finale d'un territoire. Son grand avantage consiste toutefois à agréger une multitude de données non pas en tonnes mais en hectares globaux : c'est à dire une surface biologiquement productive de terre ou de mer ayant une productivité équivalant à la moyenne mondiale. Ainsi, l'empreinte écologique d'un territoire correspond à la surface de terre et de mer qu'il convient de mobiliser à la surface du globe pour répondre aux besoins de consommation de ses habitants, à la fois :

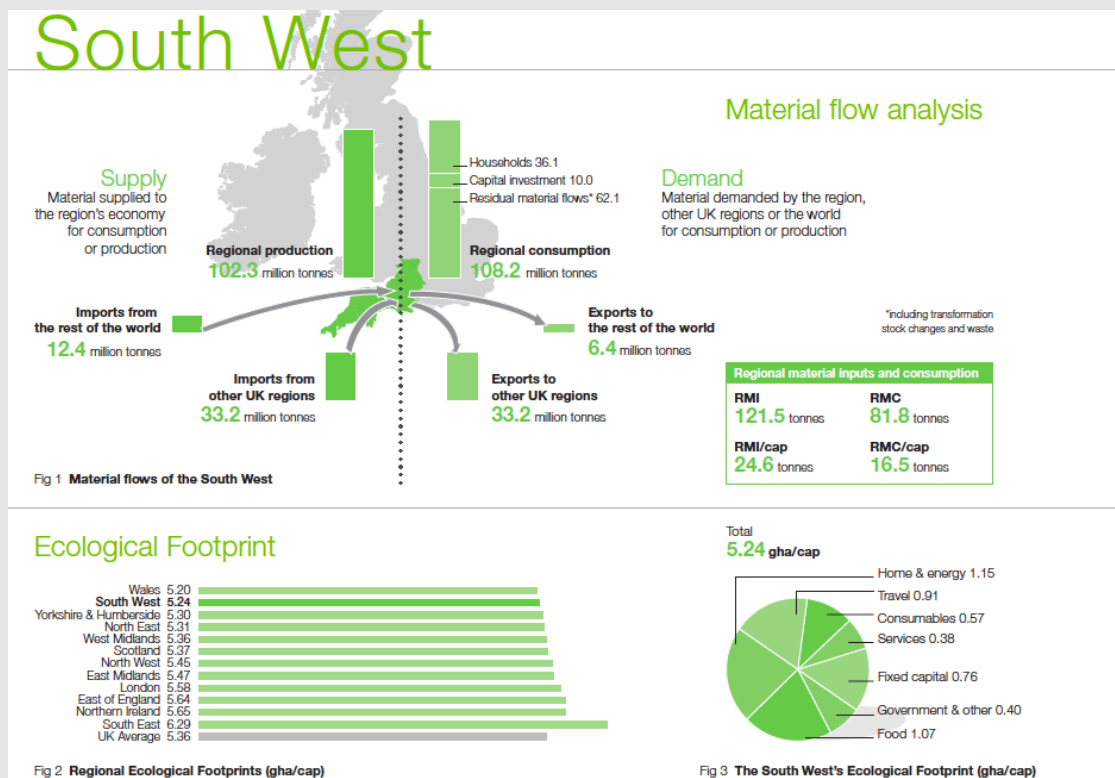
- pour produire les ressources biologiques renouvelables dont ils ont besoin (pour se nourrir, s'habiller, se loger, etc.) ;
- pour absorber certains des déchets qu'ils génèrent, en particulier pour séquestrer le CO₂ consécutif à la combustion des énergies fossiles (émissions directes ou indirectes) (Wackernagel & Rees, 1996 ; Boutaud & Gondran, 2009).

Quelques avantages de l'empreinte écologique : Ce parti pris présente de gros avantages. Il permet notamment de hiérarchiser les flux de matière et d'énergie en fonction de leur intensité puisque, contrairement aux empreintes matières et autres AFM, chaque tonne de matière n'a pas ici le même « poids » : tout dépend notamment de sa productivité biologique, c'est à dire la capacité d'un hectare à produire telle ou telle matière première. L'autre très grand avantage de l'empreinte écologique est qu'elle renvoie à un seuil de soutenabilité, qui équivaut à l'ensemble des surfaces biologiquement productives disponibles (sur Terre ou sur un territoire donné) : ce qu'on appelle la biocapacité. Au niveau mondial, on constate par exemple en 2010 un déficit écologique global : l'empreinte écologique de l'humanité (2,6 ha/hab) est en effet supérieure à la biocapacité mondiale (1,7 ha/hab) (WWF, 2014). Ce qui signifie que l'humanité utilise davantage de services issus de la nature que celle-ci est capable d'en régénérer : d'une part parce que certaines ressources renouvelables sont utilisées au-delà de leur capacité de renouvellement, mais aussi (surtout) parce que les émissions de CO₂ outrepassent la capacité de la biosphère à les séquestrer.

Quelques limites de l'empreinte écologique : L'empreinte écologique présente évidemment des limites et elle a fait l'objet de vives critiques (par exemple Pigué et coll., 2007 ; Blomqvist et coll., 2013). D'abord, cet outil ne comptabilise pas tous les flux de matière, puisque son objet se limite à ce que les économistes appellent le capital naturel critique, qui renvoie à la partie vivante de l'écosystème terrestre (la biosphère). Les matériaux qui ne sont pas issus directement ou indirectement de la biosphère tels que les minerais (y compris fossiles) issus de la lithosphère ne sont par exemple pas pris en compte. La biocapacité est par ailleurs calculée sur la base de la productivité constatée des sols, même si les types d'exploitation en question ne sont pas soutenables sur le long terme. Enfin, par construction, la majorité du déficit écologique constaté au niveau mondial est imputable aux émissions de CO₂, ce qui peut amener à privilégier cet enjeu sans passer par des équivalences de surface (empreinte carbone).

Quelques exemples d'utilisation à l'échelle infranationale – L'empreinte écologique a été intégrée dans l'outil statistique de certaines nations, mais ce n'est pas le cas en France malgré les demandes récurrentes des ONG – notamment lors du Grenelle de l'environnement (Tregouet, 2010). A l'échelle infranationale, de très nombreuses collectivités territoriales ont procédé à un calcul d'empreinte écologique et de biocapacité, avec des méthodologies de calcul plus ou moins homogènes et transparentes – dont le principe général consiste à réaffecter les résultats de l'empreinte écologique nationale à partir de données de consommation dont on dispose à l'échelle locale.

En France, des calculs ont ainsi été réalisés à partir du milieu des années 2000 sur des territoires aussi variés que des agglomérations (le Grand Lyon, Marseille) et des régions (Nord-Pas-de-Calais, Île-de-France) (Raoul-Duval, 2008). La Région Île-de-France a récemment renouvelé le calcul d'empreinte écologique de son territoire, aboutissant à la conclusion que l'empreinte écologique des franciliens s'était allégée au cours des dix dernières années – bien que les méthodologies diffèrent sensiblement entre ces deux périodes (Nascimento, 2015).



Ecological Footprint

Wales	5.20
South West	5.24
Yorkshire & Humberside	5.30
North East	5.31
West Midlands	5.36
Scotland	5.37
North West	5.45
East Midlands	5.47
London	5.58
East of England	5.64
Northern Ireland	5.65
South East	5.29
UK Average	5.36

Fig 2 Regional Ecological Footprints (gha/cap)

The South West's Ecological Footprint (gha/cap)

Total: 5.24 gha/cap

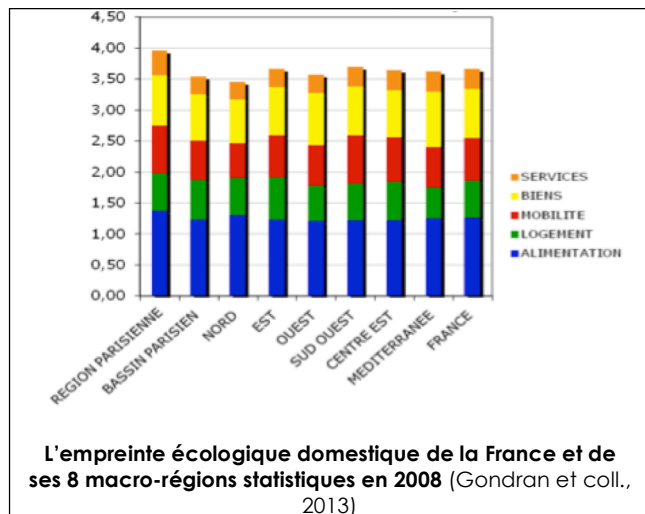
Home & energy	1.15
Travel	0.91
Consumables	0.57
Services	0.38
Fixed capital	0.76
Government & other	0.40
Food	1.07

Fig 3 The South West's Ecological Footprint (gha/cap)

AMF et empreinte écologique des régions britanniques : l'exemple du South West (SEI, 2006)

En Grande-Bretagne, de nombreux travaux ont également été réalisés à partir de la fin des années 1990, avant que les méthodologies de calcul soient homogénéisées sous l'égide notamment du *Stockholm Environmental Institute* à partir de 2006 (WWF-UK, 2006 ; SEI, 2010). Des AMF et des calculs d'empreinte écologique ont alors été opérés à l'échelle des régions et des collectivités britanniques (*counties*).

Plus récemment, l'Association des Régions de France a réalisé des calculs similaires à ceux de la Grande-Bretagne, en utilisant une méthodologie transparente et des bases de données nationales homogènes concernant la consommation finale des ménages. La disponibilité de ces données étant toutefois limitée, les résultats ont pour l'instant seulement été établis à l'échelle de macro-régions statistiques. Le calcul à des échelles plus fines suppose ensuite d'opérer des ajustements à partir d'autres variables, comme cela été le cas en Grande-Bretagne (Gondran et coll., 2013).



4. Les analyses de flux spécifiques

Comme nous l'avons évoqué, la faiblesse des analyses de flux globales de type AFM tient au fait qu'elles ne permettent pas de hiérarchiser les enjeux. D'abord parce que les AFM agrègent indifféremment toutes les masses de matière ; mais aussi parce que les AFM telles qu'elles sont aujourd'hui conçues sont difficiles à décliner par fonctions du métabolisme urbain (se nourrir, se loger, se déplacer, etc., cf. encart ci-après).

🔍 Zoom sur... Les AFM : une boîte noire ? Ou pourquoi une analyse par fonctions du métabolisme est-elle difficile à établir...

Les méthodologies des AFM ont beaucoup évolué au cours des dernières décennies. Historiquement, on distingue deux approches différentes (CGDD, 2014).

La première méthode consiste à identifier un certain nombre de fonctions qui caractérisent un métabolisme territorial. Par exemple, une méthode proposée par Brunner et Reichberger (2004) identifiait les quatre fonctions suivantes : nourrir, laver, résider & travailler, transporter & communiquer. Pour chacune de ces fonctions, on identifie alors les flux mobilisés avant de les agréger afin d'obtenir un flux global intégrant l'ensemble des fonctions du métabolisme territorial considéré. Cette méthode, dite ascendante (ou *bottom up*), présente le grand avantage de permettre une analyse par fonctions métaboliques. En revanche, elle présente l'inconvénient de proposer un découpage par fonctions qui ne fait pas forcément l'unanimité : ainsi, le CGDD note que, « selon les sociétés, la religion, qui n'entre pas dans leur typologie, peut être à l'origine d'importants flux de matières. A contrario, l'activité 'laver' n'a pas toujours eu le poids qu'elle a aujourd'hui. » (CGDD, 2014)

La seconde méthode, qui est aujourd'hui privilégiée par les institutions statistiques internationales, utilise des sources statistiques agrégées qui sont disponibles à l'échelle d'un territoire administratif donné (Etat, région, département...) en ne préjugant pas des fonctions du métabolisme en question. Avec cette méthode dite descendante (ou *top down*) le métabolisme territorial est alors considéré de manière universelle ; mais il apparaît comme une sorte de boîte noire traversée de flux dont on a par conséquent plus de mal à identifier les fonctions spécifiques, puisqu'il faut alors parvenir à désagréger les flux pour retracer leurs fonctions – par exemple, une tonne de pétrole peut être utilisée pour se loger (chauffage), produire de la nourriture (machines agricoles) ou se déplacer (véhicules).

Il y a alors deux moyens au moins de compléter les études en question : soit en opérant un zoom sur une substance/aléa spécifique représentant en tant que tel un enjeu (par exemple les émissions de gaz à effet de serre) ; soit en se concentrant sur une fonction du métabolisme afin d'identifier quels flux sont nécessaires à cette fonction (et quelles vulnérabilités potentielles y sont rattachées : par exemple l'alimentation). Une voie intermédiaire consiste à cibler une substance particulièrement liée à une fonction du métabolisme : c'est par exemple le cas de l'azote, que nous proposons de prendre ici comme illustration.

Contrairement aux AFM, les AFS permettent de focaliser l'attention sur un enjeu (aléa ou fonction) considéré comme particulièrement important.

Les principes généraux de l'AFS : l'exemple de l'azote

Même si les méthodologies sont moins clairement établies, les analyses de flux de substances spécifiques obéissent à des principes qui sont assez comparables à ceux des analyses de flux globaux – de type AFM ou AFE.

Le choix du périmètre – La première étape consiste là encore à définir un périmètre d'étude précis, qui correspond aux frontières du métabolisme territorial choisi (sur ce point, on se référera à ce qui a été dit plus haut sur les AFM).

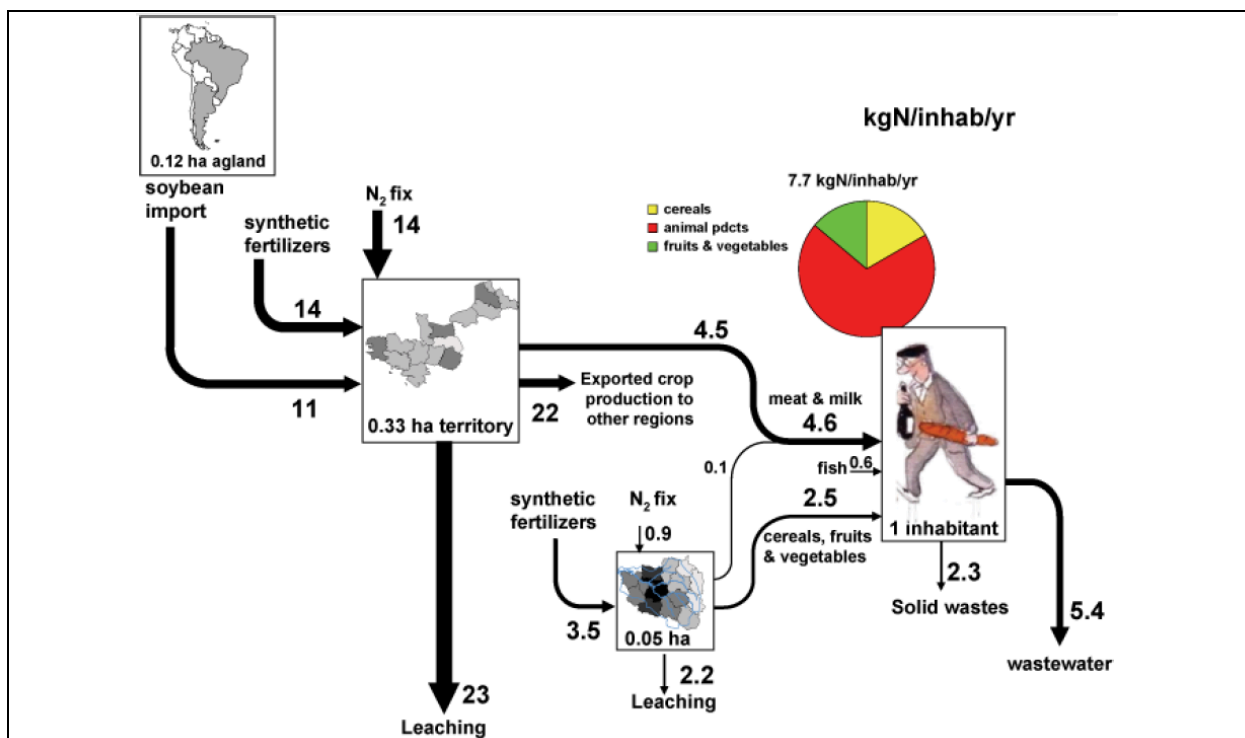
Les matières prises en compte (et celles ignorées) – La grande différence entre AFM et AFS tient ensuite au choix des flux qui seront pris en compte. Comme pour l'AFM, il peut s'agir de matière apparente ou de flux indirects. Par exemple, dans le cas de l'azote, il s'agit essentiellement de flux indirects : le principe consiste à retracer toutes les matières premières qui entrent dans le territoire et qui ont mobilisé de l'azote pour leur production. Potentiellement, cela peut inclure l'intégralité des matières issues de la biomasse et utilisées pour toutes les fonctions du métabolisme urbain : l'alimentation bien entendu, mais aussi le bois de chauffage, la fibre textile et même, pourquoi pas, le transport en cas de traction animale ou d'usage d'agroc carburants. Il est toutefois possible de limiter l'analyse à une fonction métabolique, comme par exemple l'alimentation.

L'unité de mesure utilisée : les tonnes de substance – Les biens qui entrent dans le territoire sont comptabilisés en tonnes de produits bruts ou transformés, dont on estime

Les AFS obéissent globalement aux mêmes règles que les AFM, mais elles sont exprimées en une unité de mesure correspondant à l'aléa ou la substance considérée.

ensuite le contenu en azote en utilisant des facteurs d'équivalence correspondant au pourcentage d'azote incorporé dans chaque type de produit. Ces facteurs d'équivalence sont compilés à partir de plusieurs études. Ils nous apprennent par exemple que les céréales intègrent environ 1,8% d'azote dans leur masse, la viande 3,4%, le lait 0,5%, etc. (Billen et coll., 2009) On obtient alors des flux d'azote exprimés en tonnes, ou en kg/hab, ou encore en kg/hab/an. Comme nous le verrons, connaissant la productivité des surfaces agricoles, il est également possible d'estimer sur cette base les surfaces de terres mobilisées pour répondre à tel ou tel besoin (par exemple l'alimentation). Les données peuvent alors être exprimées en hectares.

Les différents « pôles » du métabolisme : entrées, stocks, recyclage et sorties – Les flux de substances ainsi identifiés circulent au travers du métabolisme territorial. Certains flux de substances suivent exactement le même cheminement que les matières globales identifiées dans les AFM : ils entrent dans le territoire et sont pour partie stockés ou recyclés, tandis qu'une autre partie ressort du système (déchets, exports). C'est par exemple le cas de substances solides comme le plomb, le zinc, le cuivre, etc. dont des quantités parfois très importantes peuvent être stockées dans les villes sous différentes formes manufacturées (canalisations, toitures, etc.). D'autres substances, comme l'azote, ne sont quasiment pas stockés dans le métabolisme urbain : ils ne font que le traverser.



Représentation schématique des flux d'azote incorporés dans l'alimentation d'un parisien, en kg d'azote/hab/an (source : Billen et coll., 2012)

On note que le bilan entrée sortie est équilibré, notamment au moment de la consommation finale : l'azote apparent est incorporé dans différents types d'aliments consommés (7,7 kg/hab/an), et ressort du métabolisme en masse à peu près équivalente sous formes de déchets solides ou liquides. Cet azote incorporé dans la consommation finale suppose toutefois la mobilisation de flux d'azote beaucoup plus importants en amont du processus de production (plus de 30 tonnes de flux en incluant les flux non apparents).

Un exemple d'AFS : les flux d'azote et l'emprise alimentaire de Paris

Une série d'études sur l'emprise alimentaire (dite *food-imprint* en anglais, ou encore *food-print*) a été initiée à partir du milieu des années 2000 dans le cadre du programme Paris 2030 – à la suite de différents projets de recherche financés par le programme PIRVE consacrés à l'approvisionnement de Paris (en aliment, énergie et autres matériaux). Sur la question de l'alimentation, le choix a consisté à mesurer dans un premier temps les flux d'azote incorporés dans l'alimentation (Billen et coll., 2009).

L'emprise alimentaire de Paris a été mesurée sur la base du contenu en azote de l'alimentation. Ce dernier correspond à un flux apparent d'environ 8 kg d'azote /hab/an, dont les 3/4 sont liés à la production d'origine animale. Les flux non apparents, générés en amont de la consommation, sont toutefois beaucoup plus importants.

Une consommation apparente de 7,7 kg d'azote/hab/an... – Comme évoqué plus haut, le principe consiste à identifier la consommation alimentaire du territoire, puis à estimer le contenu en azote des aliments en question en se basant sur des facteurs de conversion établis dans la littérature. Une particularité de l'étude parisienne est qu'elle a été réalisée à différents moments de l'histoire, entre la fin du 18^{ème} siècle et la période contemporaine – avec donc des populations, des modes de culture et des zones d'approvisionnement très différents. Pour la période contemporaine, on obtient selon les études un résultat de 7,7 à 8,6 kg d'azote/hab/an contenu dans l'alimentation, contre moins de 5 kg/hab/an à la fin du 18^{ème} siècle (Billen et coll., 2009, 2012). Cet écart entre période s'explique pour partie par le changement de régime alimentaire marqué par l'accroissement de la part d'alimentation issue des animaux (viande,

lait, œufs, produits laitiers) dont le contenu en azote est proportionnellement plus important.

...et une consommation cachée nettement plus importante – Une autre conclusion intéressante de l'étude concerne la partie non apparente des flux d'azote, c'est à dire celle qui est générée en amont de la consommation, tout au long du processus de production. Si on considère les deux principales zones de production qui approvisionnent la capitale, le total de rejets dans l'environnement est d'environ 25 kg d'azote/hab/an, soit 5 fois plus que les rejets directs des habitants dans les eaux usées. Cela signifie tout simplement que ces rejets d'azote ont lieu en dehors du territoire, sur les zones de production... et particulièrement là où sont produits les aliments issus de l'élevage d'animaux, qui mobilisent davantage d'azote.

Une emprise alimentaire de 0,5 hectare de sol essentiellement répartie entre le bassin parisien, le Nord-Ouest... et l'Amérique du Sud – Les études menées à Paris ont également cherché à identifier de quels bassins de production était issue

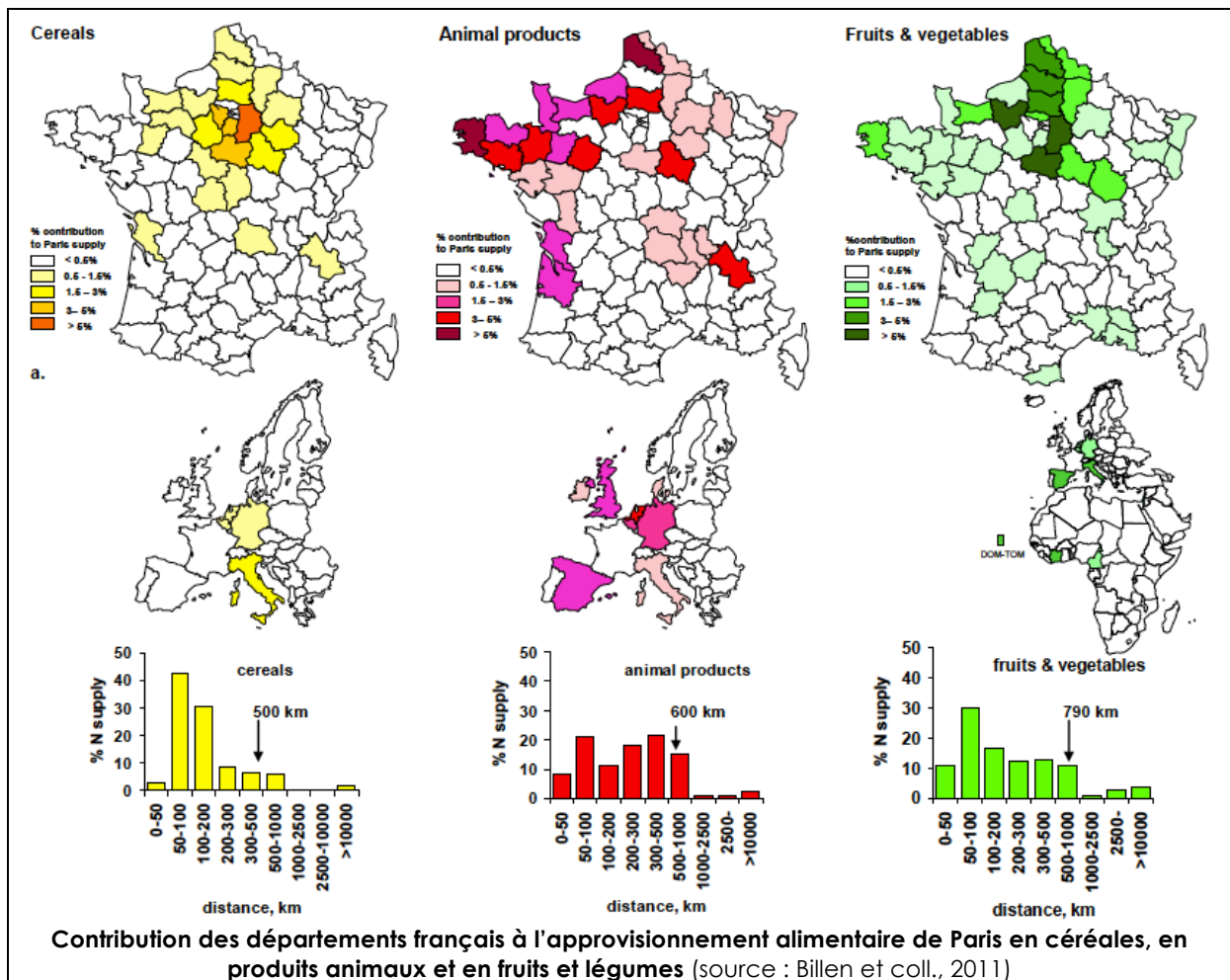
Les échanges commerciaux ont permis d'identifier les zones d'approvisionnement et les surfaces de sol mobilisées pour répondre aux besoins de l'agglomération.

l'alimentation parisienne. Pour ce faire, les statistiques de transport des biens alimentaires ont été utilisées. La conclusion assez surprenante est que, aujourd'hui encore, l'écrasante majorité de la consommation alimentaire de Paris est produite dans des régions relativement proches, en particulier le bassin de la Seine (notamment la Beauce) qui produit l'essentiel des protéines végétales de l'agglomération, mais aussi la région située au nord-ouest de Paris (constitué de la Normandie, de la Bretagne et du Nord-Pas-de-Calais) qui produit l'essentiel des protéines animales. Cette dernière région est toutefois tributaire des importations de céréales fourragères pour la nourriture du bétail, dont la majorité est aujourd'hui importée d'Amérique du

Sud. Ces trois régions (bassin parisien, nord-ouest et Amérique latine) couvrent 70% des besoins de la consommation alimentaire de l'agglomération parisienne. Les 30% restants sont approvisionnés par les autres départements français et le reste du monde.

Enfin, prenant en compte la productivité agricole constatée dans les différentes régions d'approvisionnement, les chercheurs en concluent qu'il faut mobiliser environ 0,5 hectares de surfaces de culture pour répondre aux besoins alimentaires d'un

parisien, incluant 0,33 ha de surfaces destinées à l'élevage du type de celles utilisées dans le nord-ouest, 0,12 ha de surfaces de production céréalière du type de celle provenant d'Amérique du Sud et 0,05 ha de surfaces de production végétale dans le bassin parisien.



Le constat d'une dépendance à l'égard d'un mode d'agriculture insoutenable – Enfin, la série d'études menée en région parisienne aboutit à un constat paradoxal. D'un côté, la région parisienne est encore assez largement tournée vers ses zones d'approvisionnement agricoles historiques, relativement proches de l'agglomération : Gilles Billen et ses collègues notent à ce propos qu'on est « très loin des 'Food-Miles' de plusieurs milliers de km qui caractérisent l'approvisionnement des villes anglaises ». (Programme Paris 2030 (coll.), 2010) Pour autant, le mode de production a considérablement changé au cours des dernières décennies au sein de ces bassins d'approvisionnement, avec une production agricole qui s'est à la fois spécialisée et internationalisée :

- Spécialisée, puisque les bassins de production ont perdu leur dimension polyculturelle avec l'arrivée massive des engrais chimiques azotés. L'usage de ces derniers a en effet permis de dissocier les productions animales et végétales, amenant chaque région à se spécialiser dans l'une ou l'autre de ces productions.
- Internationalisée, puisque le bassin parisien exporte la majorité de sa production végétale, tandis que la région nord-ouest importe l'essentiel des fourrages nécessaires à l'alimentation animale.

L'agglomération parisienne est encore très tournée vers ses zones de chalandises historiques. Mais ces zones se sont elles-mêmes spécialisées et sont davantage tournées vers une production mondialisée.

Le bilan écologique de cette évolution est préoccupant, en particulier parce que l'utilisation massive d'engrais azotés synthétiques est à l'origine d'une perturbation majeure du cycle biogéochimique de l'azote, entraînant de graves pollutions des écosystèmes et des ressources en eau. Ce déséquilibre du cycle biogéochimique de l'azote est identifié par les scientifiques comme l'une des trois perturbations écologiques les plus préoccupantes à l'échelle planétaire – avec l'érosion de la biodiversité et le changement climatique. (Rockström et coll., 2009)

Du constat à l'action : quelques avantages et limites des AFS

Des méthodologies souvent moins stabilisées – Contrairement aux AFM, les AFS sont encore souvent élaborées sur la base de méthodologies qui ne font pas l'objet d'un consensus absolu. Il existe bien entendu des exceptions, comme par exemple les bilans carbone territoriaux ou autres bilans de gaz à effet de serre, dont la multiplication au cours de la décennie passée s'est accompagnée de l'élaboration de guides méthodologiques. Mais pour la plupart des autres flux, comme par exemple l'azote, les méthodes sont en cours de construction et de validation scientifique.

...mais des outils prometteurs sur le plan opérationnel – Les AFS présentent par contre le grand avantage d'être plus facilement opérationnels que les AFM. En France, les bilans d'émissions de gaz à effet de serre sont par exemple directement associés aux

Les AFS sont souvent plus opérationnelles : plus facilement réimputables à un enjeu spécifique, elles se prêtent mieux à des scénarios ou des stratégies locales.

plans climat-énergie territoriaux (PCET), dont ils constituent une phase préliminaire indispensable (ADEME, 2015 ; MEDD, 2011). Plus innovante, l'analyse de flux d'azote alimentaire de Paris que nous avons choisi comme illustration s'avère également riche en informations... et en possibilités d'actions. Gilles Billen et ses collègues ont ainsi élaboré des scénarios envisageant la possibilité d'un approvisionnement alimentaire de l'agglomération parisienne basé sur une modification des méthodes de production (biologique) et de distribution (locale), allant même jusqu'à imaginer un changement du régime alimentaire (davantage végétal). Et si elles ne sont pas encore aujourd'hui suivies

d'effets politiques, ces simulations ont le mérite de montrer que la transition vers un modèle de production moins intensif et plus écologique est tout à fait envisageable.

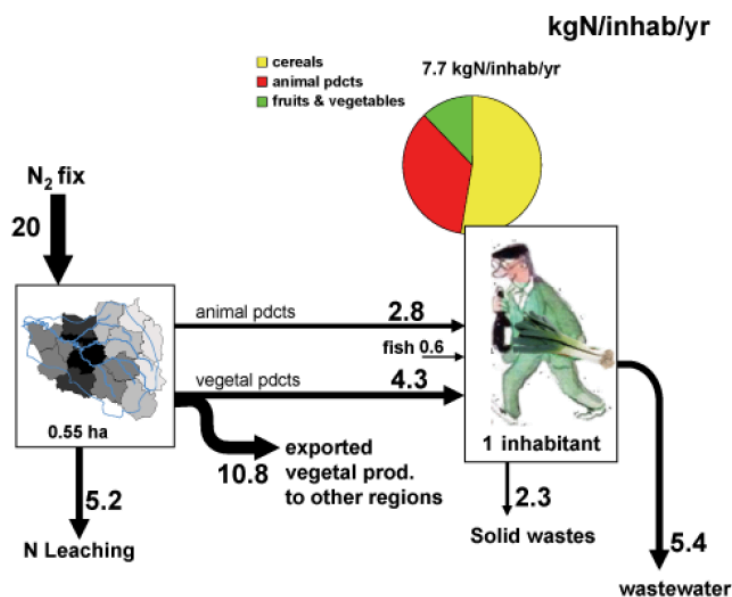
🔍 Zoom sur... Quelques scénarios d'approvisionnement alimentaire pour Paris en 2030

Les études menées sur l'agglomération parisienne montrent clairement que celle-ci se caractérise par un bassin d'approvisionnement encore majoritairement de proximité, contrairement à de nombreuses agglomérations de la même taille, souvent davantage tournée vers la mer et les importations. De la même manière, l'approvisionnement en eau potable est localisé sur le bassin de la Seine, ce qui signifie que Paris n'a pas étendu son aire d'approvisionnement au-delà de son bassin hydrographique, comme l'ont fait certaines villes européennes telles Barcelone, Athènes ou encore New-York. Pour autant, Gilles Billen et ses collègues rappellent qu'il a été clairement montré que « la poursuite des tendances récentes en matière de pratiques agricoles compromettrait gravement la pérennité des ressources actuelles d'eau potable et la qualité écologique des eaux de surfaces. » (Programme Paris 2030 (coll.), 2010) La volonté affichée par certains de continuer dans la voie d'une spécialisation et d'une intensification de la production sur le bassin parisien est donc aujourd'hui remise en cause. Plusieurs scénarios alternatifs ont donc été proposés afin de démontrer que la conversion à des formes d'agriculture sans intrants synthétiques sur le bassin de la Seine permettrait de revenir à un niveau acceptable de qualité des eaux de surface et souterraines, tout en assurant la couverture des besoins alimentaires de la population de l'agglomération. Les chercheurs sont partis de la situation actuelle et ont imaginé deux leviers d'action potentiels, correspondants à deux scénarios (Billen et coll., 2012).

Scénario bio et local - Le premier scénario imagine une relocalisation de la consommation sur le bassin de la Seine et une conversion massive des exploitations à l'agriculture biologique. L'objectif qui consiste à supprimer les engrais chimiques azotés suppose également une diversification de la production avec la réintroduction d'une part plus importante de production animale sur le territoire et l'accroissement des cultures de céréales fixatrices d'azote. Ce premier scénario permettrait de nourrir la population sans avoir recours aux intrants chimiques... mais il entraînerait tout de même le relargage dans l'hydrosystème de quantités de nitrates encore trop importantes pour assurer à termes le respect des normes de potabilité de l'eau.

Scénario démetarien (bio, local et davantage végétal) - Pour atteindre ce second objectif, il faut alors envisager un changement de régime alimentaire de la population parisienne. En passant du régime actuel basé à 65% sur la production de protéines d'origine animale à un régime davantage végétal (avec 35 à 40% des protéines animales),

il serait alors possible non seulement de produire localement et sans engrais chimiques l'alimentation de l'agglomération parisienne, mais également de réduire considérablement les rejets de nitrates dans les milieux naturels, permettant ainsi de maintenir l'approvisionnement en eau potable de l'agglomération.



Représentation schématique des flux d'azote incorporés dans l'alimentation d'un parisien selon le scénario démétarien, en kg d'azote/hab/an (source : Billen et coll., 2012)

En résumé, comparativement aux AFM, les AFS présentent donc le grand avantage d'aborder un enjeu bien précis et d'identifier le poids respectif des différentes fonctions du métabolisme urbain. Par exemple, sur l'enjeu du changement climatique, les analyses d'émissions de gaz à effet de serre permettent d'identifier les secteurs fortement émetteurs (transport, alimentation, logement, etc.). Les analyses de flux d'azote ou d'énergie permettent le même genre d'exercice. L'élaboration de scénarios ou de politiques de transition est alors grandement facilitée, ce qui permet d'envisager une utilisation de ces bilans dans une perspective de pilotage de l'action publique (plan climat, stratégie d'approvisionnement énergétique ou alimentaire, etc.). En revanche, les méthodologies utilisées sont encore parfois expérimentales, et le risque est important de focaliser l'attention sur un seul aléa au détriment des autres. C'est typiquement ce que l'on peut aujourd'hui reprocher aux bilans de gaz à effet de serre et aux stratégies de lutte contre le changement climatique, qui ont bien souvent focalisé l'attention et les moyens des acteurs publics sur cette thématique... au risque de reléguer les autres enjeux écologiques au second plan.

Avantages	Limites
Enjeux ou vulnérabilités plus facilement identifiables	Méthodologies plus ou moins standardisées / stabilisées
Plus facilement déclinable en politiques / scénarios	Manque de retours d'expériences (sauf CO ₂ et énergie)
Identification plus aisée des acteurs clés / actions prioritaires	Risque de focalisation sur une thématique au détriment des autres
Hiérarchisation des impacts	Comptabilité partielle et thématique

Quelques avantages et limites des AFS : synthèse

♀ Zoom sur... Les analyses de flux spécifiques : une grande diversité d'outils et d'enjeux

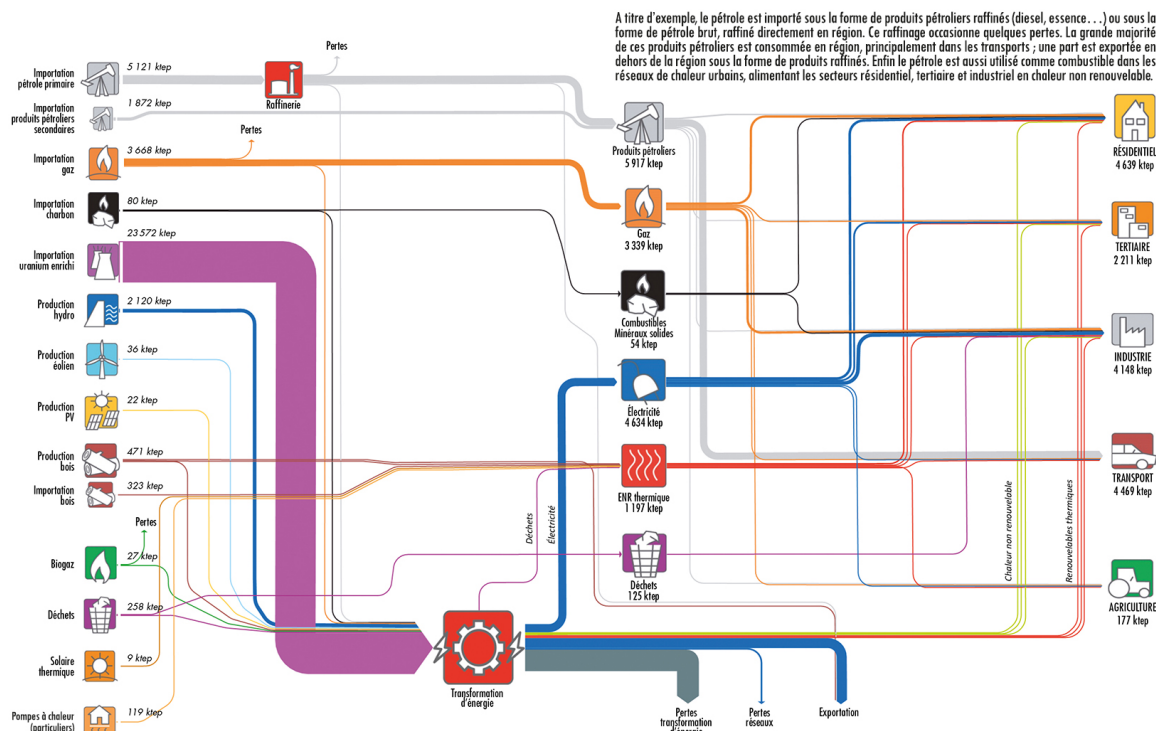
Les analyses de flux de substances spécifiques peuvent être très variées. Certaines sont aujourd'hui très largement utilisées, comme par exemple celles relatives aux gaz à effet de serre. D'autres sont plus innovantes, à l'image de celles concernant l'azote dont nous venons de décrire les principes. Mais il existe un grand nombre de substances pouvant faire l'objet de telles études. On peut essayer ici de les regrouper en trois familles :

Les analyses de flux biogéochimiques – Eau, azote, phosphore, carbone... ces substances ont pour particularité commune de circuler entre les différentes composantes de l'écosystème terrestre que sont la biosphère, la lithosphère, l'hydrosphère ou encore l'atmosphère. Ces cycles biogéochimiques déterminent en grande partie les équilibres écologiques planétaires ; mais ils peuvent toutefois être perturbés par l'activité humaine. Par exemple, la combustion d'énergie fossile entraîne un transfert de carbone de la lithosphère vers l'atmosphère, modifiant la

composition chimique de ce dernier au point de menacer l'équilibre climatique. De nombreux outils ont été développés afin de mesurer ces flux de carbone atmosphérique à l'échelle des métabolismes territoriaux. En France par exemple, le Grand Lyon a joué un rôle pionnier dans la mesure des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle d'une agglomération (Grand Lyon, 2009) ; de très nombreuses collectivités utilisent aujourd'hui ces outils, qui ont été largement normalisés entre temps, aussi bien en France (ADEME, 2015) qu'à l'étranger. Les analyses de flux d'azote commencent également à voir le jour en France, mais aussi dans des villes comme Toronto (Forkes, 2007). Le même type d'outil se développe pour analyser les flux de phosphore, par exemple au Japon (Cui et coll., 2015) ou en Grande-Bretagne (Cooper et coll., 2013), mais aussi à l'échelle de métabolismes urbains comme à Hefei City, en Chine (Li et coll., 2010). Les exemples pourraient être multipliés.

Les analyses de flux de matériaux spécifiques – Parce qu'ils ont des impacts potentiellement importants, certains éléments chimiques font également l'objet d'études de flux. C'est par exemple le cas des métaux (plomb, zinc, cuivre, etc.) ou encore de divers éléments toxiques. Des analyses de flux de cuivre ont ainsi pu être réalisées en Chine, à l'échelle du pays ou de certains territoires (Guo & Song, 2008). De manière plus générale, on notera que la décomposition des AFM permet de réaliser des zooms spécifiques sur de nombreux matériaux : matériaux de construction, alimentation, etc. (Barles, 2014).

Les analyses de flux d'énergie – Enfin, même si on hésite à les classer parmi les analyses de flux spécifiques, on notera que de très nombreuses études de flux énergétiques ont pu être menées à l'échelle de territoires infranationaux. En France, plusieurs observatoires régionaux ou départementaux de l'énergie opèrent de tels bilans – souvent de manière conjointe aux bilans d'émissions de gaz à effet de serre. Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'analyse de flux de matières récemment réalisée en Alsace est utilement accompagnée d'une analyse des flux énergétiques (Région Alsace, 2015). D'autres régions, comme Rhône-Alpes, présentent également aujourd'hui des bilans sous la forme de diagrammes de Sankey, très proches des analyses de flux de matières ou de substances. Un tel diagramme « permet de quantifier les flux d'énergie (la largeur des flèches indique la quantité de flux d'énergie) et de comprendre visuellement où et quand se passent les transferts d'énergie les plus importants. (...) Il présente les flux d'énergie en partant des ressources (énergies primaires locales ou importées), pour arriver aux usages de l'énergie finale en passant par la transformation éventuelle des ressources. Les pertes lors de ce processus (transport, transformation, distribution) sont également indiquées sur le schéma. » (OREGES, 2015)



Flux d'énergie en Rhône-Alpes en 2012 : approvisionnement, transformation et consommation (OREGES, 2015)

On notera enfin que les démarches parmi les plus stimulantes sont développées depuis quelques années par des chercheurs qui tentent d'établir un bilan énergétique global des métabolismes territoriaux en intégrant notamment dans les bilans l'énergie incorporée dans la biomasse via la photosynthèse (Haberl, 2001 ; 2006).

Quelques mots sur... les « empreintes spécifiques » à l'échelle des métabolismes territoriaux

Il faut évidemment clore ce chapitre en disant quelques mots à propos des outils de type « empreinte » qui, au-delà de l'empreinte écologique et de l'empreinte matérielle, sont également de plus en plus souvent déclinés pour quantifier des flux spécifiques.

Empreinte eau, empreinte énergétique, empreinte terre... - De nombreuses substances ont fait l'objet de calculs de type empreinte au cours des quinze dernières années. Même si la notion d'empreinte prête encore parfois à quelques divergences d'interprétation, le principe généralement retenu consiste à comptabiliser les flux incorporés dans la consommation d'un territoire, en prenant en compte les flux apparents (directs) et cachés (indirects, c'est à dire inclus dans la production importée) (Gali et coll, 2011). On parle parfois de l'impact de la « consommation nette » qui peut être résumée ainsi :

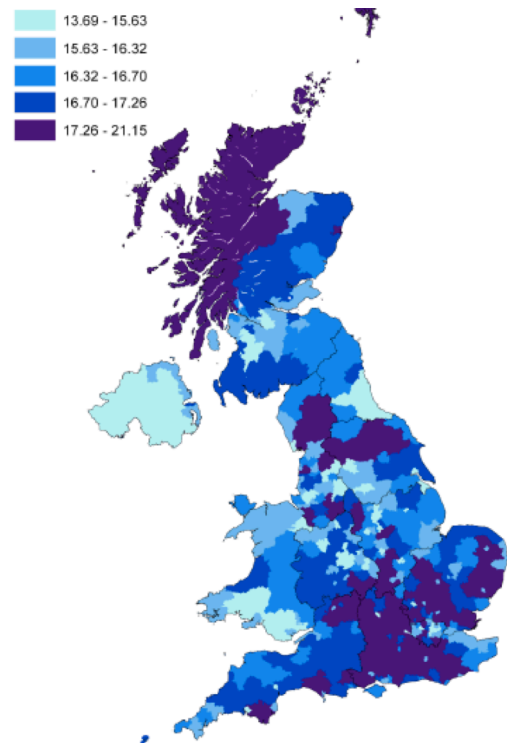
Contenu en substances de la production locale + Contenu incorporé dans les imports – Contenu incorporé dans les exports

Sur cette base, l'Université NTNU et le centre de recherche CICERO ont par exemple rassemblé les données concernant l'empreinte eau, l'empreinte énergétique, l'empreinte terre et l'empreinte carbone de la plupart des nations du monde (<http://carbonfootprintofnations.com>).

Parmi ces empreintes spécifiques, **l'empreinte carbone** est sans doute celle qui a fait l'objet du plus grand nombre de publications. C'est également celle qui bénéficie de la plus grande reconnaissance de la part des instituts statistiques – en France, par exemple, l'empreinte carbone fait partie des indicateurs officiels de suivi de la Stratégie Nationale de Développement Durable (SOeS, 2015 ; Pasquier, 2010). L'empreinte carbone intègre généralement les différents gaz à effet de serre sous une unité de mesure commune, l'équivalent CO₂, en prenant en compte le pouvoir de réchauffement global de chaque gaz. Enfin, c'est actuellement l'une des rares empreintes spécifiques ayant fait l'objet de calculs à l'échelle infranationale.

Un exemple intéressant de tels calculs est fourni là encore en Grande-Bretagne par les travaux du *Stockholm Environment Institute* (SEI) à travers un programme intitulé REAP (Dawkins et coll., 2010 ; SEI, non daté). Le SEI et ses partenaires sont en effet parvenus à calculer l'empreinte carbone à l'échelle des régions et des autorités locales britanniques, en se fondant essentiellement à cette échelle sur des données monétaires de consommation finale des ménages (pour les émissions indirectes) et quelques données physiques (pour les émissions directes, notamment celles liées aux déplacements et au chauffage).

On notera toutefois que, si les travaux du SEI paraissent très avancés, la méthodologie utilisée par le projet REAP est fondée sur l'utilisation de tableaux entrée-sortie adossés à des données environnementales. Or, si cette méthode s'avère très prometteuse, elle est encore assez peu répandue. C'est en tout cas ce que nous allons constater dans le chapitre suivant qui s'intéresse spécifiquement aux développements actuels de cette méthodologie.



Empreinte carbone des régions et autorités locales britanniques en 2004 – en tonnes de CO₂eq/hab, (SEI, non daté)

5. Les analyses entrées-sorties étendues à l'environnement

Connaissant un développement accéléré au plan académique ces dernières années, l'analyse entrée-sortie étendue à l'environnement (« *environmentally extended input-output analysis* » / EEIOA en anglais) constitue une approche transversale à celles qui viennent d'être présentées. En effet, elle vise d'une part à

L'EEIOA a trouvé récemment une reconnaissance internationale en venant ainsi démentir l'idée selon laquelle certains pays occidentaux seraient parvenus à découpler pression sur l'environnement et croissance économique.

intégrer dans un même cadre analytique une grande diversité de flux physiques, aussi bien en termes de consommation (matières premières, énergie) que de rejets (gaz à effet de serre, polluants, déchets, etc.), et d'autre part à retracer finement l'origine et le cheminement de ces flux au sein du système économique, au niveau des secteurs d'activités, des produits finis et de la consommation finale.

L'analyse entrée-sortie environnementale a trouvé récemment une reconnaissance internationale en mettant en lumière l'ampleur des « flux cachés¹ » de ressources (matières premières renouvelables et non renouvelables) sous-jacents au commerce international, venant ainsi démentir l'idée selon laquelle certains pays occidentaux

seraient parvenus à découpler pression sur l'environnement et croissance économique. A cet égard, l'Union Européenne apparaît en pointe en matière d'intégration de l'EEIOA dans le développement des indicateurs environnementaux clés des Etats membres. D'autre part, plusieurs travaux académiques se sont attachés ces toutes dernières années à explorer les possibilités d'application de l'EEIOA à l'analyse du métabolisme urbain, notamment dans un certain nombre de villes européennes.

Les principes généraux de l'analyse entrée-sortie environnementale

Croiser tableau entrée-sortie et comptabilité environnementale. Au cours des quinze dernières années, l'analyse entrée-sortie, constituant au départ une composante majeure de la comptabilité nationale (voir encadré ci-dessous), est devenue un outil

L'EEIOA vise à décomposer l'origine des impacts environnementaux d'un système économique en distinguant secteurs d'activités, produits et consommation finale

de plus en plus utilisé pour les évaluations environnementales (Lutter & Giljum, 2014). L'extension de l'analyse entrée-sortie à l'environnement offre en effet des perspectives nouvelles pour comprendre les impacts environnementaux (consommation de matières premières², rejets de déchets et polluants) générés par un système économique. Du côté des activités de production, l'EEIOA permet de décomposer les impacts environnementaux de chaque secteur d'activités en amont (décomposition des impacts liés aux consommations intermédiaires du secteur) et en aval de la chaîne de valeur (décomposition des impacts selon les différents secteurs ou consommateurs finaux qui achètent la production du secteur). Du

côté de la consommation finale³, elle permet d'estimer l'ensemble des pressions environnementales accumulées tout au long de la chaîne de production des produits consommés (biens et services), de prendre en compte les pressions environnementales s'exerçant au moment de la consommation finale⁴, et de répartir

¹ Il s'agit à la fois de matières inutilisées (résidus agricoles inutilisés, terres excavées pour la construction, etc.) et des flux de matières utilisées pour produire et transporter des matières ou des biens que le territoire étudié importe ou exporte, mais qui ne sont pas incorporés à ces biens importés ou exportés.

² Energie, biomasse, minéraux industriels et de construction, minerais métalliques

³ A l'instar de l'approche « empreinte écologique », l'analyse entrée-sortie environnementale permet d'imputer la responsabilité ultime des impacts environnementaux au consommateur final qui achète un bien ou un service.

⁴ La consommation finale de produits n'entraîne pas directement d'extraction de ressources naturelles supplémentaire. Les pressions directes qui lui sont associées concernent donc uniquement des rejets (par exemple, les émissions provenant de la combustion de combustibles fossiles par les véhicules automobiles).

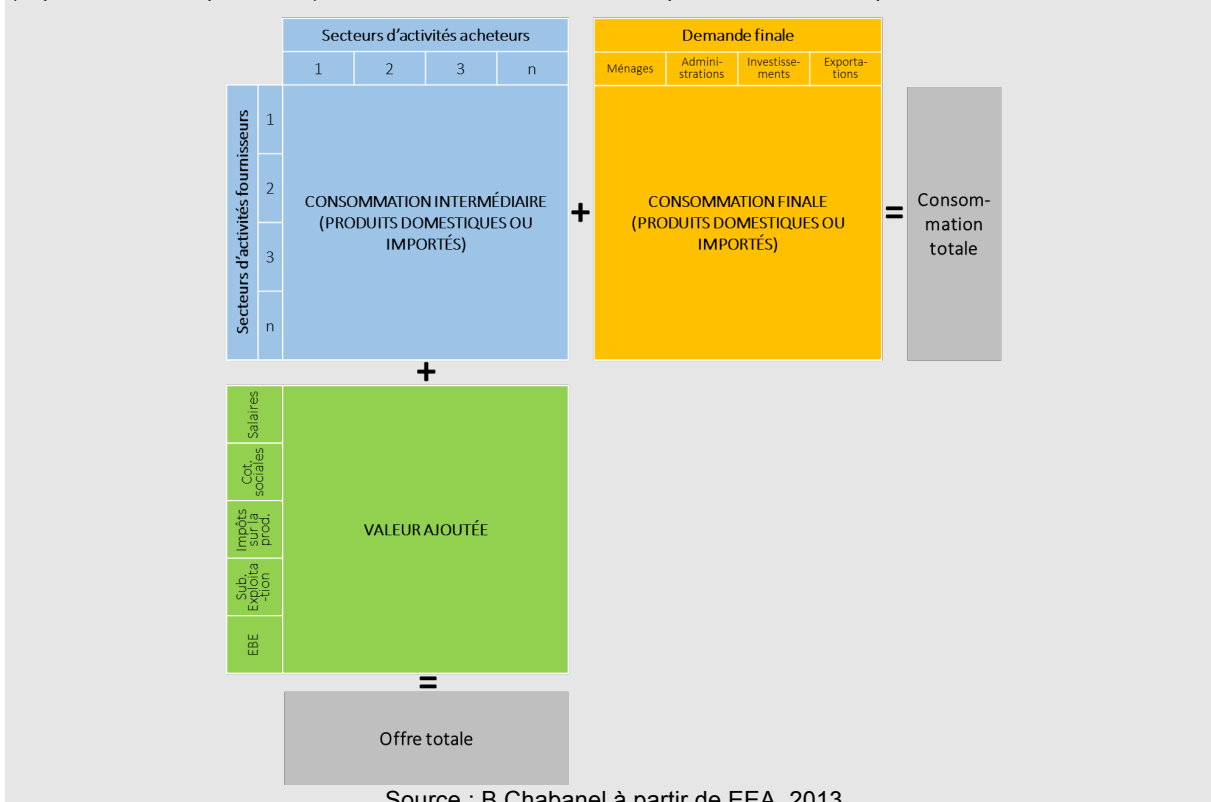
ces impacts selon les différentes catégories de la consommation finale (ménages, secteur public, capital fixe, exportations).

Par ailleurs, s'agissant de comparer l'évolution des pressions environnementales entre deux dates, l'EElOA permet de décomposer les évolutions observées en différents facteurs (EEA, 2014) : évolution de la productivité des ressources (« *intensity effect* »), évolution du panier de consommation (« *consumption mix effect* »), évolution du volume de consommation (« *consumption volume effect* »).

Enfin, l'analyse entrée-sortie environnementale permet de prendre en compte les impacts indirects associés aux importations du territoire considéré. Deux approches sont ici possibles (EEA, 2013). La première consiste à faire l'hypothèse que les produits importés reposent sur des activités qui génèrent les mêmes pressions environnementales (consommation de ressources et rejets) par unité produite que les activités du territoire d'étude. La seconde réside dans la combinaison des tableaux entrées-sorties nationaux avec les TES d'autres pays afin de développer des modèles entrées-sorties régionaux (« *Multi-regional Input Output* » ou MRIO en anglais). Ces tableaux MRIO permettent alors de retracer les interdépendances entre secteurs domestiques et étrangers, et de prendre en compte les différences de technologies de production, d'utilisation des ressources et d'intensités de pollution entre pays ou régions du monde. Cette seconde approche nécessite de mobiliser des bases de données internationales croisant les TES d'un nombre plus ou moins importants de pays : GTAP, WIOD, EXIOBASE, EORA, EUROSTAT, etc.

Quelques mots sur... l'analyse entrée-sortie dans la comptabilité nationale

Introduit dans les années 1930 par Wassily Leontief (prix Nobel d'économie en 1973), les tableaux d'entrées-sorties (TES) de la comptabilité nationale constituent une représentation synthétique de l'économie d'un pays. Ils rassemblent dans un même cadre comptable l'ensemble des flux économiques intervenant dans la formation (production) et l'emploi (consommation) du PIB au cours d'une année. Ils donnent ainsi à voir les liens d'interdépendance entre les secteurs d'activités pour leurs approvisionnements (les consommations intermédiaires de chaque secteurs impliquent des achats auprès d'autres secteurs) comme pour leurs débouchés (la production de chaque secteur peut être consommé en totalité ou pour partie par d'autres secteurs), les liens entre la production et la consommation finale, et les liens entre l'économie nationale et le reste du monde (importations et exportations). Présenté de manière schématique, le TES est composé de trois matrices.



- La **matrice des échanges intermédiaires** : constituant la partie centrale du TES, elle prend la forme d'un tableau à double entrée qui divise l'économie en secteurs, disposés de haut en bas sur la première colonne de gauche et de gauche à droite sur la première ligne. Chaque ligne donne les ventes du secteur mentionné à gauche à tous les secteurs mentionnés en haut du tableau. Chaque colonne donne les inputs achetés par le secteur mentionné en haut à chacun des secteurs mentionnés à gauche. La somme de chaque ligne est l'ensemble des produits intermédiaires fournis par le secteur; la somme de chaque colonne est l'ensemble des achats de produits intermédiaires du secteur. A noter, il arrive que les échanges intermédiaires concernant des produits importés soient présentés dans une matrice spécifique.

- La **matrice de la valeur ajoutée** : située sous la matrice des échanges intermédiaires, elle indique la valeur ajoutée générée par chacun des secteurs d'activité (en colonne) en distinguant ses différentes composantes (salaires, fiscalité, excédent brut d'exploitation, etc.). En ajoutant les importations à l'ensemble de cette production on obtient l'offre totale disponible au sein de l'économie concernée.

- La **matrice de la demande finale** : située à droite de la matrice des échanges intermédiaires, elle indique par secteurs d'activité (en ligne) les dépenses de consommation finale (produits finis) des ménages, des administrations publiques et des institutions sans but lucratifs au service des ménages, la formation brute de capital, la variation des stocks et les exportations (en colonne). A noter, la consommation finale de produits importés peut faire l'objet elle-aussi d'une matrice spécifique.

Considérée dans sa totalité, chaque colonne décompose le processus de production du secteur placé en tête de colonne. De façon similaire, chaque ligne décompose l'ensemble de la consommation de la production du secteur placé en tête de ligne entre consommations intermédiaires et finales.

Au plan méthodologique, l'analyse entrées-sorties environnementale repose sur le croisement entre, d'une part, les tableaux entrées-sorties de la comptabilité nationale retraçant les échanges monétaires entre secteurs d'activités et entre ces secteurs et la demande finale (voir encadré ci-dessus) et, d'autre part, les données de la comptabilité environnementale relatives aux pressions sur l'environnement (inputs : consommation d'énergie, de matières premières, d'eau, etc. ; outputs : rejets de polluants, de déchets, etc.) exercées par chaque secteur économique et au moment de la consommation finale (Schaffartzik et alii, 2014 ; Kitzes, 2013 ; EEA, 2013, 2014). Plusieurs étapes d'analyse peuvent être distinguées :

L'EEIOA repose sur l'intégration des tableaux entrée-sortie de la comptabilité nationale et les bases de données de la comptabilité environnementales

1. Il peut être nécessaire de transformer certaines statistiques sur les pressions environnementales dans un format compatible avec les principes et classifications de la comptabilité nationale. L'objectif est d'obtenir des tableaux comptabilisant les pressions environnementales exercées par les activités économiques et la demande finale (cf. tableaux ci-dessous).

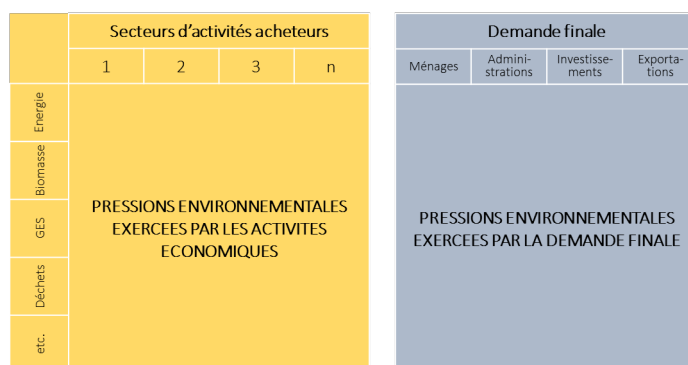
2. Pour chaque secteur d'activités, les données d'impact environnemental direct sont rapportées aux données monétaires : il s'agit par exemple de rapporter le volume total d'émissions de CO₂ du secteur à la valeur de sa production, de façon à obtenir son intensité carbone (tonnes de CO₂ / euro).

3. Les échanges monétaires retracés par les tableaux entrées-sorties sont convertis en impacts environnementaux en multipliant les valeurs monétaires par les intensités de pression environnementales calculées précédemment (on obtient alors des « tableaux entrée-sortie physiques »).

4. Les impacts des secteurs d'activités sont ensuite alloués aux produits finaux (biens et services). Grâce aux tableaux entrée-sortie physiques, les pressions environnementales directes attribuables à un secteur sont réattribuées aux acteurs qui achètent sa production (autres secteurs d'activités ou consommation finale). De la même manière, les impacts environnementaux indirects accumulés en amont par chaque secteur du fait de ses consommations intermédiaires sont réalloués en aval aux secteurs d'activités ou à la demande finale auprès desquels il vend sa production. À la fin de ce processus itératif de réallocation des impacts, on obtient la somme des pressions environnementales accumulées le long de la chaîne de production de chaque catégorie de produit (impact environnemental total et pour chaque euro de produits finis).

- Les tableaux entrée-sortie permettent d'analyser comment se répartissent les biens et les services produits au sein de la consommation finale (ménages, administration publiques, investissement) en termes monétaire. Ce qui permet d'en déduire l'impact environnemental de chacune de ces catégories de consommation finale.

En résumé, l'analyse entrée-sortie environnementale peut être décrite comme un processus de réaffectation de la responsabilité d'une quantité connue d'impacts environnementaux par secteurs, produits et consommateurs finaux (Kitzes, 2013).



Exemples d'analyse entrée-sortie étendue à l'environnement

L'EEIOA a fait une percée au sein de la comptabilité environnementale européenne à l'occasion de la mise en œuvre de la « Feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources »

L'Union Européenne en pointe en matière d'analyse entrée-sortie environnementale. Les travaux conduits dans le cadre de l'Union Européenne en matière de comptabilité environnementale démarrent en 1993 suite à la publication du Rapport Brundtland et à la conférence de Rio. Ils n'ont cessé de s'étoffer depuis sous l'impulsion d'Eurostat et de l'Agence Européenne pour l'Environnement (créée en 1993). Les priorités sont établies par la stratégie européenne pour la comptabilité de l'environnement (connue sous le nom de ESEA pour « *European Strategy for Environmental Accounting* »), adoptée pour la première fois en 2003 et révisée depuis en 2008 puis en 2014. Ces dernières années,

l'analyse entrée-sortie étendue à l'environnement a fait une percée au sein de la comptabilité environnementale européenne à l'occasion de la mise en œuvre de la « Feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources », cette dernière constituant l'une des « initiatives phare » de la stratégie « Europe 2020 »⁵. Adoptée en 2011, la « *roadmap* » se donne pour objectif à l'horizon 2050 de faire de l'Europe une économie respectueuse des contraintes de ressources et des limites planétaires, en donnant une place de premier plan aux politiques en faveur de la production et de la consommation soutenables (CE, 2011).

La mesure des progrès réalisés apparaissant comme une condition de réussite incontournable, la feuille de route se dote d'emblée d'un indicateur clé provisoire : la « productivité des ressources », à savoir le PIB divisé par la « Consommation Intérieure de Matières » (ou *domestic material consumption* en anglais). Consciente des limites de ce ratio, et notamment du fait qu'il ne tient pas compte d'un éventuel transfert du fardeau entre les différents pays via les échanges commerciaux (comme le montrent des études récentes : voir encadré ci-dessous), la Commission prévoit dans la feuille de route le développement d'indicateurs complémentaires. En particulier, une demande politique s'est exprimée récemment (notamment au cours du conseil des ministres de l'environnement de juillet 2014) de faire de la « consommation totale de matières premières » (« *Raw Material Consumption* ») – c'est-à-dire incluant flux

⁵ La stratégie « Europe 2020 » est la stratégie de coordination des politiques économiques au sein de l'Union Européenne adoptée en 2010 pour une période de dix ans. Elle succède à la stratégie de Lisbonne pour la croissance et l'emploi qui avait été adoptée en 2000.

cachés en amont relatifs aux importations et exportations de matières premières et de produits – l'indicateur leader de la stratégie européenne en faveur de l'utilisation efficace des ressources.

🔍 Zoom sur... Un regard renouvelé sur les échanges internationaux : le prisme de l'empreinte matérielle

La pertinence de l'analyse entrée-sortie environnementale a acquis une certaine notoriété à l'occasion notamment de la publication d'un article d'une équipe internationale de chercheurs intitulée « *The material footprint of nations* » (Wiedmann et alii, 2013). Cette analyse offre en effet une perspective nouvelle sur le rôle déterminant du commerce international dans la répartition de la consommation mondiale de ressources naturelles (biomasse, minéraux de construction, énergies fossiles, minerais métalliques) entre les pays. Elle vient ainsi contredire les résultats des deux principaux indicateurs utilisés habituellement par les gouvernements et les institutions internationales pour suivre la consommation de ressources et les performances dans l'utilisation de ces ressources :

- la consommation domestique de matières (« *domestic material consumption* » / DMC en anglais) qui mesure la quantité de matériaux utilisés directement par une économie : matières premières extraites du territoire national, auxquelles sont ajoutées les importations physiques et retirées toutes les exportations physiques.
- la productivité des ressources (ou intensité ressource) qui est calculée en divisant le PIB par la consommation de matière domestiques.

Selon cette approche de la productivité des ressources, certains pays développés ont vu leur consommation de ressources naturelles s'accroître à un rythme plus lent que la croissance économique (découplage relatif) ou ont même réussi à utiliser moins de ressources au fil du temps (découplage absolu). Au cours du siècle passé, l'intensité des ressources moyenne mondiale (DMC / PIB) a presque continuellement diminué, passant de 3,6 kg / dollar en 1900 à 1,3 kg / dollar en 2005. Les pays du G8 quant à eux ont réduit de moitié l'intensité en ressources de leur PIB entre 1980 et 2008, et le Canada, l'Allemagne, l'Italie et le Japon ont réussi à découpler la consommation domestique de matières de la croissance économique en termes absolus.

Or, l'approche en termes d'empreinte matérielle (« *material footprint* ») proposée par Thomas Wiedmann et ses collègues montre que ces résultats s'avèrent erronés dans la mesure où ils ne prennent pas en compte les « flux cachés » liés aux importations et exportations de produits de chaque pays : c'est-à-dire les matières mobilisées (biomasse, métaux, minéraux, combustibles fossiles, etc.) lors de l'extraction, la fabrication, le conditionnement et le transport des produits importés/exportés par chaque pays, mais qui n'entrent pas dans le territoire qui importe ou ne sortent pas du territoire qui exporte. Afin de combler cette lacune, les chercheurs ont calculé les « équivalents matières premières » (« *Raw Material Equivalents* » / RME en anglais) des flux d'échanges économiques entre 186 pays au cours de la période 1990-2010, en croisant les comptes nationaux de la demande finale et les comptes de flux de matières au sein d'un modèle d'analyse entrée-sortie environnemental multirégional. Les données mobilisées sont issues de la base de données mondiales EORA. L'empreinte matérielle de chaque pays comprend ainsi les équivalents matières premières des importations et l'extraction intérieure, dont sont soustraits les équivalents matières des exportations.

Ce travail a permis d'aboutir à plusieurs résultats significatifs :

- les 2/5 des matières premières extraites dans le monde sont utilisées directement ou indirectement pour produire des biens et services exportés.
- la consommation de ressources naturelles non domestiques de chaque pays est, en moyenne, environ trois fois plus grande que la quantité physique apparente des biens échangés telle que mesurée par la comptabilité des flux de matières.
- l'empreinte matérielle (EM) tend à suivre le rythme de croissance du PIB. Ainsi, aucune amélioration de la productivité des ressources (mesurée par le rapport PIB/EM) et donc aucun découplage ne sont observés dans les pays développés analysés (Etats-Unis, Japon, Grande Bretagne, UE27, Australie).

Au total, en recourant à l'analyse entrée-sortie étendue à l'environnement, Thomas Wiedmann et ses collègues montrent que les progrès apparents des pays occidentaux sur le plan de la consommation de ressources naturelles traduisent avant tout un mouvement croissant d'externalisation des extractions de ressources vers les pays moins développés à travers la délocalisation de la production. Cet éclairage renouvelé sur les échanges internationaux ne manque pas de soulever la question de la responsabilité des consommateurs occidentaux dans l'extraction mondiale de ressources naturelles.

Dans ce contexte, l'Agence Européenne pour l'Environnement (EEA) s'intéresse dès la fin des années 2000 à l'analyse entrée-sortie environnementale. Dans un rapport de 2013 décrivant de façon approfondie les rouages et les applications possibles de l'EEIOA, l'EEA présente celle-ci comme un outil permettant à la fois de mieux cerner les impacts globaux (mondiaux) liés à la production et de la consommation de biens et de services en Europe, et d'identifier plus précisément les composantes de la production et de la consommation entraînant les pressions sur l'environnement les plus fortes. Ainsi, la principale valeur ajoutée de l'EEIOA serait de fournir aux décideurs

publics et privés l'information permettant de focaliser l'action sur les objets où elle est la plus nécessaire et où elle peut avoir le plus d'effet (EEA, 2013).

Selon l'Agence Européenne pour l'Environnement, l'EIOA permet d'identifier plus précisément les composantes de la production et de la consommation entraînant les pressions sur l'environnement les plus fortes.

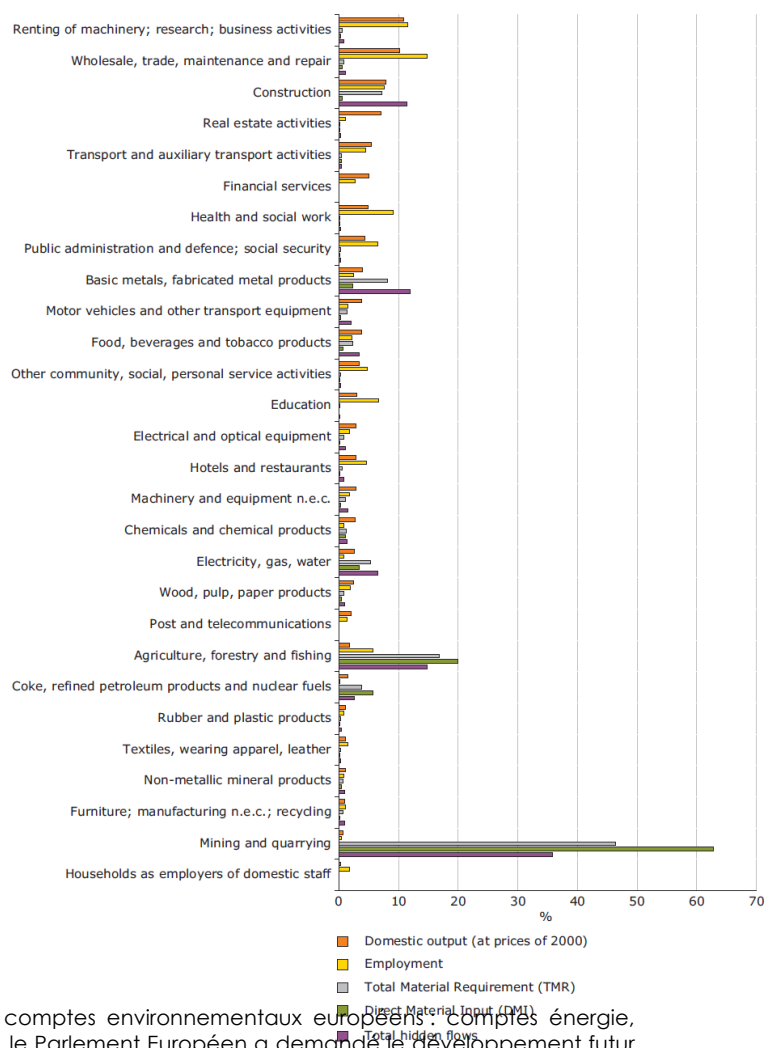
L'EEA a publié en 2014 un rapport intitulé « *Progress on resource efficiency and decoupling in the EU 27* » dans lequel elle présente les résultats d'une analyse entrée-sortie environnementale à l'échelle européenne. Sur le plan des données, cette étude mobilise des tableaux entrées-sorties d'Eurostat agrégeant les 27 pays de l'UE (considérée comme une seule région) et distinguant 59 secteurs d'activités (au sens de la Nomenclature statistique des Activités économiques dans la Communauté Européenne, NACE Rev 1.1). Concernant les données de pressions environnementales, à ce jour les comptes environnementaux physiques établis par Eurostat, sur la base des données compilées par les offices statistiques des Etats-membres, sont limitées⁶ aux émissions atmosphériques⁷ et aux flux de matières⁸. Les résultats de cette étude sont présentés en cinq points délivrant plusieurs messages clés :

- les pressions environnementales directes des secteurs d'activités : l'étude montre que l'agriculture, les industries de réseaux (électricité, gaz, eau) et les transports dominent les émissions atmosphériques générées par la production de l'UE (56% des émissions de GES, 74% des émissions acides, 53% des émissions d'ozones), alors qu'ils ne contribuent qu'à une part très inférieure du PIB (10%) et de l'emploi (11%).

Les secteurs primaires des industries extractives, de l'agriculture, de la sylviculture et de la pêche représentent de loin la plus grande partie de la consommation européenne de matières premières (voir graphique ci-contre).

Sur la période, 2000-2007, 11 des 28 secteurs activités de l'UE ont connu un découplage absolu entre l'évolution de leurs émissions de GES et la croissance de leur

Figure 3.2 Contribution of economic sectors to domestic economic output, employment and Direct Material Input and resource requirement (*) in the EU-27, 2007



⁶ Eurostat développe actuellement d'autres comptes environnementaux européens : comptes énergie, comptes eau, comptes déchets. De son côté, le Parlement Européen a demandé le développement futur des comptes de la forêt et des écosystèmes (EEA, 2013).

⁷ Huit émissions atmosphériques (CO₂, CH₄, N₂O, SO₂, NO_x, NH₃, COVNM, CO) agrégés en 3 groupes (émissions de GES, émissions acidifiantes, émissions d'ozone) pour chaque des 59 secteurs économiques (NACE rév 1.1)

⁸ La Comptabilité des Flux de Matières européenne comprend les indicateurs suivants pour chacun des 59 secteurs : Entrée directe de matière (ensemble des matières entrant directement dans le territoire afin de répondre à la demande : matières extraites du territoire et importées) ; Mobilisation totale de matières (ensemble des matières extraites mobilisée par le territoire, c'est-à-dire l'entrée directe de matière de matières à laquelle on ajoute les flux dits « cachés » : flux de matières inutilisées et flux indirects associés aux importations.

production. En revanche, les émissions de GES du secteur des transports ont augmenté plus rapidement que la production. D'autre part, aucun secteur n'a atteint le découplage absolu concernant la consommation de ressources matérielles.

- les « moteurs aval » des pressions environnementales directes de chaque secteur d'activités : Deux tiers des émissions directes de GES et trois quarts de la consommation de matières des secteurs d'activités de l'UE sont entraînés par la demande (consommation intermédiaire) provenant d'autres secteurs d'activités. L'exportation est un moteur important des émissions de GES et des besoins matériels des secteurs du transport maritime, de l'industrie chimique et de l'industrie des métaux de base ; toutefois, elle n'entraîne que 18-20% des émissions de GES et de la consommation de matières générées par la production de l'UE dans son ensemble.

- Les « pressions amont » causées par les consommations intermédiaires des secteurs d'activités : les résultats présentés se limitent aux émissions acides.

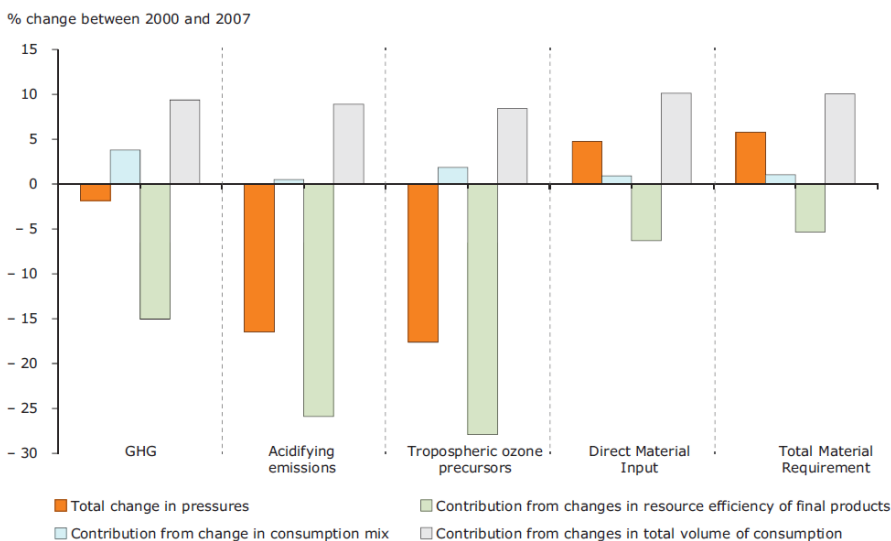
- Les pressions environnementales causées par la consommation finale européenne : Six groupes de produits sont responsables de la majeure partie (entre la moitié et les deux tiers) des émissions atmosphériques et de la consommation de matières globales causées par la consommation finale de l'UE : travaux de construction ; produits alimentaires ; produits de l'agriculture, sylviculture et pêche (principalement des produits alimentaires) ; électricité, gaz, vapeur et eau chaude (pour la plupart de l'électricité) ; transport et commerce de gros ; services de maintenance et de réparation. En revanche, ces six groupes de produits représentent moins du tiers de l'ensemble des dépenses de consommation finale.

D'autre part, l'étude montre que dépenser un euro en faveur des services entraîne des pressions environnementales beaucoup plus faibles que de consacrer un euro aux biens matériels.

Entre 2000 et 2007, les émissions atmosphériques liées à la consommation finale européenne ont reculé (significativement pour les émissions acidifiantes et les émissions d'ozone, légèrement pour les émissions de GES), tandis les consommations de matières augmentent (voir graphique ci-dessous). Lorsque l'on décompose ces évolutions en différents facteurs contributifs, on constate que l'amélioration de la productivité des ressources dans les chaînes de production ont été un puissant moteur de réduction des pressions environnementales. En revanche, on constate que ces améliorations ont été partiellement (émissions atmosphériques) ou complètement (utilisation des matières) compensées par l'augmentation de la consommation totale.

De plus, les changements dans le panier de biens et services consommés ne contribuent pas à réduire les pressions puisqu'ils se font avant tout en faveur de produits moins économes en ressources.

Figure 6.6 Changes in pressures per capita caused by consumption (domestic final use) in the EU-27 between 2000 and 2007, and decomposition into contributing factors



Trois exemples d'application de l'analyse entrée-sortie étendue à l'environnement à l'échelle d'une ville :

Aveiro (Portugal). Conduite par des chercheurs des universités d'Aveiro (Portugal) et de Barcelone (Espagne) et ayant fait l'objet d'une publication dans une revue scientifique internationale (Dias et alii, 2014), cette étude évalue les impacts environnementaux associés à la consommation des ménages vivant dans la municipalité d'Aveiro⁹ (Portugal). Plus précisément, l'étude vise à estimer la consommation d'énergie fossile et l'émission de gaz à effet de serre induites directement par les activités domestiques des ménages (par exemple, transport, chauffage, éclairage) et indirectement par leur consommation de biens de services.

L'étude propose une procédure permettant de décliner localement des données disponibles annuellement à l'échelle nationale

Au plan méthodologique, cette étude développe une procédure permettant de décliner localement des données disponibles annuellement à l'échelle nationale : le tableau entrée-sortie de la comptabilité nationale portugaise (distinguant 22 secteurs d'activités), les dépenses des ménages (distinguant 47 postes de dépense), les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'énergies fossiles. Celle-ci se décompose de la façon suivante :

1. Estimation des dépenses des ménages d'Aveiro pour chaque poste de consommation en multipliant les dépenses moyennes des ménages à l'échelle du pays par le nombre de ménages du territoire (en intégrant également une variable concernant l'âge de la personne de référence du ménage).
2. Estimation de la production nécessaire à la satisfaction de ces dépenses de consommation pour chaque secteur d'activités grâce au tableau entrée-sortie national. Une matrice d'équivalence entre postes de consommation et secteurs d'activités est mobilisée.
3. Calcul des intensités d'émissions de GES et de consommation d'énergie fossile (exprimées par unité monétaire de production) de chaque secteur d'activité à l'échelle nationale, en divisant les émissions et la consommation annuelles de chaque secteur d'activités par leur production annuelle (en valeur monétaire).
4. *In fine*, les impacts environnementaux (émissions de GES et consommation de combustibles fossiles par habitant) induits par la consommation des ménages d'Aveiro ont été obtenus en multipliant la production de chaque secteur (calculée lors de l'étape 2) par les intensités environnementales calculées à l'étape précédente.

En termes de résultats, l'étude a permis d'obtenir l'intensité d'émission de GES (en kg. équivalent CO₂) et la consommation d'énergie fossile (en kg. équivalent pétrole) par habitant et par jour pour l'année 2005, avec une ventilation par secteurs d'activités répondant aux dépenses de consommation des ménages d'Aveiro. Comme le montre le tableau ci-dessous, l'analyse entrée-sortie permet en particulier d'adopter une double lecture : en ligne, répartition de la consommation d'énergies fossiles par secteurs d'activités répondant directement à la demande finale (secteurs demandeurs) ; en colonne, répartition par secteurs d'activités fournisseurs (où se réalisent effectivement les consommations d'énergie). On constate alors que la consommation d'énergies fossiles nécessaire pour satisfaire la consommation des ménages s'élève au total à 7,3 kep/hab/jour, et près de 70% de cette consommation provient de quatre secteurs économiques demandeurs (lecture en ligne) : transport terrestre et par réseaux (25% de la consommation totale), construction (18%), industrie agroalimentaire (14%), production et distribution d'électricité (12%). Lorsque l'on remonte la chaîne de valeur et que l'on s'intéresse aux secteurs d'activités fournisseurs (lecture en colonne), on observe que deux secteurs représentent la moitié

⁹ Aveiro est une ville de 80 000 habitants située sur la côte au sud de Porto

des consommations d'énergie fossile : transport terrestre et par réseaux, production et distribution d'électricité. Du côté des émissions de GES, elles s'élèvent au total à 26 kg équivalent CO₂/hab/jour et font ressortir sensiblement les mêmes secteurs d'activités.

Selon les chercheurs, ces éclairages sectoriels permettent ainsi d'identifier de façon

L'étude permet d'identifier de façon plus précise les composantes de la consommation des ménages les plus dépendantes de la consommation d'énergie et contribuant le plus aux émissions de GES.

plus précise les composantes de la consommation des ménages les plus dépendantes de la consommation d'énergie et contribuant le plus aux émissions de GES. Outre la mise en œuvre d'actions ciblées visant à infléchir certaines pratiques de consommation (par exemple en matière de mobilité, de chauffage des logements, de consommation alimentaire (réduction du gaspillage, modération de la consommation de viandes, de poisson, de produits laitiers, promotion des produits locaux, etc.)), cette approche permet aussi de cibler certains secteurs d'activités (par exemple, en matière de production d'électricité à partir des énergies renouvelables, de choix de matériaux et de conception dans le secteur de la construction).

Les chercheurs suggèrent de prendre en compte davantage de variables (taille du ménage, type de logement, densité urbaine, etc.) susceptibles d'influer sur la structure des dépenses de consommation des ménages du territoire local. D'autre part, les auteurs soulignent les limites inhérentes au fait d'utiliser seulement le tableau entrée-sortie national : l'analyse ne permet pas d'isoler les émissions et les consommations liées aux importations et part du principe que celles-ci sont identiques à celles que l'on peut observer pour les activités économiques portugaises.

Table 4
Fossil fuel consumption of Aveiro household consumption (koe/cap/day).

Economic sectors demanding	Economic sectors emitting										Total
	Land transport; transport via pipelines	Production, collection and distribution of electricity	Other non-metallic mineral products	Pulp, paper, paper products, printing and publishing	Construction	Food products, beverages and tobacco	Chemicals excluding pharmaceuticals	Mining and quarrying (energy)	Coke, refined petroleum products and nuclear fuel	Other sector ^a	
Land transport; transport via pipelines	1.652	0.052	0.006	0.011	0.003	0.001	0.012	0.048	0.054	0.027	1.864
Construction	0.101	0.227	0.348	0.032	0.268	0.002	0.064	0.053	0.054	0.166	1.314
Food products, beverages and tobacco	0.134	0.183	0.044	0.089	0.006	0.239	0.055	0.031	0.029	0.196	1.003
Production, collection and distribution of electricity	0.009	0.791	0.002	0.003	0.001	0.000	0.003	0.033	0.011	0.006	0.858
Hotels and restaurants	0.036	0.115	0.020	0.024	0.002	0.027	0.016	0.014	0.012	0.159	0.426
Motor vehicles, trailers and semi-trailers	0.036	0.062	0.023	0.011	0.001	0.001	0.022	0.008	0.007	0.077	0.248
Textiles, textile products, leather and footwear	0.023	0.051	0.003	0.011	0.001	0.001	0.025	0.007	0.006	0.116	0.244
Other community, social and personal services	0.026	0.081	0.005	0.019	0.002	0.001	0.010	0.009	0.007	0.069	0.230
Other manufacturing; recycling (including furniture)	0.031	0.050	0.010	0.013	0.001	0.001	0.022	0.008	0.008	0.065	0.208
Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.181	0.181
Pharmaceuticals	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.160	0.160
Pulp, paper, paper products, printing and publishing	0.008	0.012	0.001	0.098	0.000	0.000	0.005	0.002	0.001	0.005	0.133
Air transport	0.002	0.006	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.004	0.005	0.066	0.086
Health and social work	0.004	0.011	0.001	0.003	0.000	0.001	0.013	0.004	0.005	0.025	0.069
Post and telecommunications	0.008	0.014	0.002	0.008	0.001	0.000	0.003	0.002	0.002	0.024	0.063
Collection, purification and distribution of water	0.003	0.026	0.003	0.002	0.001	0.000	0.003	0.002	0.002	0.017	0.059
Other electrical machinery and apparatus	0.010	0.012	0.002	0.003	0.000	0.000	0.007	0.002	0.002	0.018	0.054
Radio, television and communication equipment	0.006	0.008	0.001	0.003	0.000	0.000	0.004	0.001	0.001	0.020	0.044
Other machinery and equipment	0.005	0.009	0.002	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.012	0.033
Finance and insurance	0.003	0.007	0.001	0.004	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.009	0.027
Wood and products of wood and cork	0.004	0.004	0.001	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.011	0.023
Education	0.001	0.006	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.006	0.017
Total	2.099	1.726	0.474	0.339	0.289	0.273	0.270	0.230	0.207	1.435	7.343

Source : (Dias et alii, 2014)

Barcelone (Espagne). Cette seconde étude académique (Shafie et alii, 2013), à laquelle a contribué l'un des chercheurs impliqués dans l'étude d'Aveiro, vise à estimer les émissions de GES par personne et par an induites par la consommation des habitants de Barcelone, en ventilant les résultats par secteurs d'activités. Au plan méthodologique, elle mobilise une méthodologie similaire à celle utilisée dans l'étude précédente. Il convient toutefois de préciser que les données mobilisées – tableau

entrée-sortie (distinguant 14 secteurs d'activités), dépenses de consommation des ménages, émissions de GES – sont disponibles à l'échelle de la région Catalogne. Les résultats font état d'un niveau d'émission par habitant proche de celui constaté à Aveiro. En raison de découpages sectoriels différents, la comparaison des émissions par secteur d'activités entre Barcelone et Aveiro est en revanche malaisée. Tout au plus peut-on constater à nouveau la contribution importante du secteur transport-communication.

Glasgow (Ecosse). Réalisée par des chercheurs de l'université de Glasgow, (Hermannsson K., McIntyre S.G., 2014), cette troisième étude académique part du constat qu'une part significative des émissions de GES générées par les villes sont incorporés dans leurs importations. Elle vise dès lors à clarifier les interdépendances territoriales existant entre Glasgow (City), son hinterland (*wider city-region*) et le reste de l'Ecosse en matière d'émissions de GES induites par les activités économiques et la consommation des ménages, et d'examiner en quoi ces interdépendances réinterrogent la définition des objectifs nationaux, régionaux et locaux de réduction d'émissions de GES.

Pour ce faire, les chercheurs décomposent le tableau entrée-sortie de l'Ecosse en un modèle entrée-sortie à trois « régions » (Glasgow, hinterland, reste du pays) avec un découpage sectoriel distinguant 126 secteurs. Celui-ci permet ainsi de retracer les échanges entre secteurs au sein et entre les trois régions (échanges estimés à partir des données d'emplois), ainsi que l'origine et la distribution spatiale des dépenses de consommation finale (ménages, administration, investissement, exportations) de chaque sous-région en fonction de la capacité à fournir des secteurs d'activités des différentes régions. Les données sont ensuite agrégées en 37 secteurs afin de correspondre au découpage sectoriel des données d'émissions de GES (disponibles à l'échelle nationale). Les émissions de chaque secteur sont ainsi calculées de manière analogue à l'étude d'Aveiro (calcul d'intensités d'émission par secteur et multiplication par la valeur de la production du secteur) ; à noter cependant, les émissions du secteur de la production d'électricité relevées à l'échelle nationale sont réparties entre les différentes unités de production présentes dans chacune des trois régions. Enfin, les résultats sont agrégés en 12 secteurs afin d'en faciliter la présentation. De son côté, la demande finale comprend 11 catégories (ménages

Table 4
Directly generated CO₂ emissions by sector, by household, and sub-region totals (tonnes).

Emitting sector	GLA			RST			ROS			National total		
	CO ₂ tonnes	% of GLA emissions generation	% of sector	CO ₂ tonnes	% of RST emissions generation	% of sector	CO ₂ tonnes	% of ROS emissions generation	% of sector	CO ₂ tonnes	% of Scotland emissions generation	% of sector
Agriculture, forestry & fishing	47,035	1	5	249,022	3	25	685,732	2	70	981,789	2	100
Finishing	30,991	1	1	202,164	2	8	2,288,181	6	91	2,521,336	5	100
Manufacturing	658,400	14	9	2,070,813	21	27	4,931,068	12	64	7,660,282	14	100
Energy	830,537	17	4	587,119	6	3	18,521,774	46	93	19,939,430	36	100
Other utilities	91,820	2	14	38,022	0	6	528,038	1	80	657,880	1	100
Construction	142,116	3	13	320,827	3	29	662,556	2	59	1,125,499	2	100
Distribution & catering	210,132	4	15	341,479	3	25	841,723	2	60	1,393,334	3	100
Transport & communication	1,047,914	22	18	1,741,004	18	30	3,080,100	8	52	5,869,019	11	100
Finance & business	133,490	3	24	91,848	1	17	322,321	1	59	547,660	1	100
Public administration	170,180	4	19	220,258	2	25	486,353	1	55	876,791	2	100
Education, health & social work	108,142	2	18	146,626	1	24	361,601	1	59	616,369	1	100
Other services	81,136	2	17	117,452	1	24	287,829	1	59	486,418	1	100
Total emissions from production sectors	3,551,894	74		6,126,636	62		32,997,277	82		42,675,807	78	
Direct household emissions	1,278,047	26		3,710,925	38		7,310,045	18		12,299,018	22	
Total emissions	4,829,941	100		9,837,561	100		40,307,322	100		54,974,824	100	
Share of total Scottish emissions		9			18			73			100	

Table 5
CO₂ emissions (tonnes) from production as supported by Final Demand, by sub-region of generation.

	Where the emissions are generated						Total
	Glasgow	% of total emissions generated	RST	% of total emissions generated	ROS	% of total emissions generated	
Households GLA	412,500	11.6%	70,923	1.2%	816,104	2.5%	1,299,527
Households RST	369,790	10.4%	1,035,839	16.9%	2,380,740	7.2%	3,786,369
Households ROS	496,595	14.0%	517,242	8.4%	6,527,099	19.8%	7,540,937
NPISHs ^a	37,899	1.1%	55,423	0.9%	172,889	0.5%	266,211
Non-resident household expenditure ^b	62,017	1.7%	91,363	1.5%	261,820	0.8%	415,201
Central government	350,394	9.9%	464,532	7.6%	1,313,902	4.0%	2,128,827
Local government	185,672	5.2%	259,147	4.2%	734,595	2.2%	1,179,414
Capital ^c	259,747	7.3%	597,867	9.8%	1,474,756	4.5%	2,332,370
Rest of UK exports	991,119	27.9%	1,958,540	32.0%	14,654,369	44.4%	17,604,028
Rest of world exports	386,160	10.9%	1,075,760	17.6%	4,661,003	14.1%	6,122,923
Total emissions in each sub-region	3,551,894	100%	6,126,636	100%	32,997,277	100%	42,675,807

Non-profit institutions serving households.
This can be thought of as tourist spending or more generally expenditure by non-residents.

résidents, ménages non-résidents, gouvernement central, gouvernement local, formation de capital fixe, exportations vers le reste de Grand-Bretagne, exportations vers le reste du monde)

Les résultats concernant les secteurs d'activités (tableau 4) montrent que, dans les trois sous-régions les trois secteurs d'activité les plus émetteurs sont la fabrication manufacturière, l'énergie, les transports et communication. Un autre éclairage intéressant offert par l'étude réside dans les différences d'émissions par emploi entre les trois régions qui suggèrent que la production est plus « propre » (« cleaner ») à Glasgow (11,3 tonnes de CO₂ par emploi) et dans son hinterland (13,7 tonnes) que dans le reste de l'Ecosse (30,3 tonnes). Toutefois, comme le souligne les auteurs, ce constat reflète avant tout les différences de composition du tissu économique entre les trois sous-régions : les secteurs des services étant surreprésentés à Glasgow et dans son hinterland, tandis que le secteur de l'énergie (qui représente près de la moitié des émissions des activités économiques à l'échelle de l'Ecosse) est surreprésentée dans la région « reste de l'Ecosse ».

Le solde des émissions entre Glasgow et le reste de l'Ecosse révèle une dépendance importante de la consommation des ménages de la capitale vis-à-vis de la production du reste du pays, et en particulier en matière de consommation d'électricité.

Du côté de la demande finale (tableau 5), les résultats montrent que les exportations (vers le reste de Grande-Bretagne ou vers le reste du monde) génèrent une large part des émissions dans les trois sous-régions. Selon les auteurs, ce constat soulève la question de savoir si la réduction de ces émissions devrait être entreprise en Ecosse ou par les pays de destination de ces exportations. On constate également que la consommation finale des ménages d'une sous-région peut générer des émissions dans une autre sous-région du fait des importations de produits que cette consommation induit : par exemple, la consommation des ménages de Glasgow entraîne l'émission de 412 500 tonnes de CO₂ intra-muros, 70 923 tonnes dans l'hinterland et 816 104 tonnes dans le reste de l'Ecosse. Ce qui conduit les chercheurs à calculer une balance commerciale des émissions de CO₂ pour les échanges bilatéraux entre chacune de

ces régions : par exemple, si la consommation des ménages de Glasgow génère 70 923 tonnes de CO₂ dans l'hinterland, les ménages résidents dans ce dernier génèrent quant à eux 369 790 tonnes au sein de Glasgow, ce qui montre que la consommation des ménages de l'hinterland dépend davantage de la production (et donc des émissions) de Glasgow que les ménages de cette dernière dépendent de la production de l'hinterland pour satisfaire leur consommation. A l'inverse, le solde des émissions entre Glasgow et le reste de l'Ecosse révèle une dépendance importante de la consommation des ménages de la capitale vis-à-vis de la production du reste du pays, et en particulier en matière de consommation d'électricité. Encore une fois, ce constat amène les auteurs à suggérer que les stratégies de réduction des émissions de GES (qu'elles soient nationales, régionales, locales) devraient mieux prendre en compte les émissions incorporées aux échanges économiques entre territoires, et donc à ne pas faire reposer les efforts que sur les territoires qui concentrent les activités fortement émissives et exportatrices.

L'EEIOA est en mesure d'apporter des éclairages de première importance pour évaluer la dépendance du territoire aux ressources naturelles extérieures et sa responsabilité en matière d'émissions de déchets et de polluants dans l'environnement.

Du constat à l'action : quelques avantages et limites des analyses entrées-sorties étendues à l'environnement

Une approche offrant une grande richesse d'analyse. Par la diversité des pressions environnementales qu'elle est susceptible d'intégrer à terme, par les possibilités de décomposition (secteurs, produits, consommation finale) de ces impacts au sein d'un système économique qu'elle offre, par la prise en compte des échanges avec le reste du monde qu'elle permet, l'analyse entrée-sortie étendue à l'environnement met à disposition des décideurs publics et privés une capacité de compréhension des relations entre l'économie et l'environnement inédite. Elle paraît ainsi en mesure de palier certaines limites des approches décrites dans les parties précédentes :

l'approche agrégée et focalisée sur les flux entrants et sortants des AFM ne permet pas d'ouvrir la « boîte noire » du fonctionnement du système économique ; estimation incomplète des flux cachés liés aux importations par les ACV de produits ; faible disponibilité des données à l'échelle locale, etc.

S'agissant d'analyser les pressions sur l'environnement exercées par le système économique d'une métropole, l'EEIOA est en mesure d'apporter des éclairages de première importance pour évaluer la dépendance du territoire aux ressources naturelles extérieures et sa responsabilité en matière d'émissions de déchets et de polluants dans l'environnement naturel. Plus précisément, l'EEIOA peut permettre de répondre à deux séries de questions :

Approche « tissu économique local »	Approche « consommation finale locale »
<ul style="list-style-type: none"> - Quelle est l'ampleur des pressions environnementales exercées par l'ensemble du tissu économique local ? - Quels sont les secteurs d'activités générant les pressions environnementales directes (consommation de ressources/rejets de déchets-polluants) les plus importantes ? - Quels sont les secteurs d'activités les moins (plus) efficaces en matière d'utilisation des ressources (pressions environnementales par euro) ? - Dans quelle mesure les pressions directes des secteurs d'activités sont-elles tirées par la demande intermédiaire ou finale locales, ou l'exportation ? - Quels sont les secteurs d'activités qui provoquent les pressions environnementales indirectes (via leur demande de produits intermédiaires) les plus importantes ? - Dans quelle mesure les consommations intermédiaires des secteurs d'activités entraînent-ils des pressions environnementales à l'extérieur du territoire ? - Dans quelle mesure les secteurs d'activités sont-ils dépendants de ressources importées ? 	<ul style="list-style-type: none"> - Quelle est l'ampleur des pressions environnementales exercées par l'ensemble des produits finaux (biens et services) consommés localement tout au long de leur chaîne de production ? - Quels groupes de produits finaux accumulent les pressions environnementales les plus importantes (au total et par euros de dépenses) ? - Dans quelle mesure la consommation finale locale entraîne-t-elle des pressions environnementales à l'extérieur du territoire ? - Quels groupes de produits finaux consommés localement entraînent les pressions extérieures les plus importantes ? - Dans quelle mesure les groupes de produits finaux consommés localement dépendent-ils de ressources extérieures au territoire ?

Des limites méthodologiques qu'il convient de garder en mémoire. Le premier obstacle à la mise en œuvre d'une analyse entrée-sortie étendue à l'environnement à l'échelle d'une métropole comme Lyon est celui de la disponibilité des données, et plus particulièrement des tableaux entrée-sortie étrangers et des comptes environnementaux. Sur un plan méthodologiques, l'EEIOA repose sur un certain nombre d'hypothèses qui peuvent être sources d'imprécision dans les résultats (EEA, 2014 ; Schaffartzik et alii, 2014 ; Kitzes, 2013 ; Wiedmann, 2010) :

- Homogénéité des produits : les analyses entrée-sortie environnementales reposent sur un niveau d'agrégation des secteurs d'activités et des produits relativement élevé (par exemple, 59 secteurs/produits dans le cas de l'étude de l'Agence Européenne pour l'Environnement présentée plus haut). De fait, cela revient à considérer que chaque activité économique produit un seul produit physiquement homogène en termes d'impact environnemental. Cette hypothèse est d'autant plus prégnante dans le cas d'EEIOA mono-région où les pressions environnementales exercées par les produits importés sont réputées identiques à celles des produits domestiques. Or, on sait qu'un même secteur peut recouvrir des produits générant des pressions environnementales différentes. De même, les technologies de production mises en œuvre peuvent varier d'un pays à l'autre, ce qui entraîne des différences d'impacts environnementaux entre produits selon leur origine géographique. Enfin, au-delà du

produit principal, de nombreuses industries génèrent des sous-produits. De fait, la fiabilité des résultats augmente avec le niveau de détail sectoriel des tableaux entrées-sorties.

- Homogénéité des prix : la mise en œuvre des EEIOA implique également de supposer que chaque industrie vend sa production au même prix quel que soit l'acteur qui l'achète. Or, en réalité, le prix d'un même produit peut varier selon les catégories de clients. De plus, l'hétérogénéité des produits entraîne également une variabilité des prix.

- Répartition des investissements : en comptabilité nationale, les investissements sont intégrés à la demande finale. Dans une analyse entrée-sortie environnementale, ils peuvent aussi être considérés comme un intrant indispensable aux processus de production (par exemple, les machines et les infrastructures de production sont des intrants nécessaires à la production) ; ce raisonnement peut aussi s'appliquer aux dépenses des administrations publiques (considérées elles-aussi comme composantes de consommation finale par la comptabilité nationale). La manière avec laquelle les investissements en capital sont inclus et sont amortis a un impact significatif sur les résultats obtenus pour les équivalents de matières premières des exportations.

- Ressources n'ayant pas de valeur de marché directe : les comptes monétaires ne comprennent pas les flux non marchands qui sont utilisés par la société (par exemple, la biomasse pâturée, les résidus de cultures utilisés, les stériles extraits par les activités minière). Aucune procédure normalisée n'existe pour l'attribution de ces flux non marchands dans le modèle d'entrée-sortie.

Conclusion, perspectives

Dans l'inconscient collectif, la notion de métabolisme urbain renvoie l'image d'une ville fonctionnant tel un organisme vivant : pour remplir ses fonctions quotidiennes, la cité a besoin de puiser dans son environnement naturel des ressources de toutes sortes ; et une fois ses besoins assouvis, elle va alors rejeter dans la nature les résidus de sa consommation. Même s'ils font appel à des méthodes et des périmètres d'analyse assez différents, les outils de description et de comptabilité des flux de matière et d'énergie rendent parfaitement compte de cette matérialité des systèmes urbains.

Les analyses de flux génériques rendent bien compte de la matérialité des métabolismes urbains. Mais pour identifier les vulnérabilités de ce dernier, il faut alors préciser le diagnostic avec des analyses plus spécifiques.

Comme nous l'avons constaté, les analyses de flux génériques comme les AFM présentent le grand avantage d'agréger la quasi totalité des flux traversant un métabolisme territorial donné. De ce fait, ils semblent particulièrement adaptés pour fournir un outil d'observation globale de la situation du métabolisme. En revanche, du fait de leur généralité, ces outils ne fournissent que peu d'informations quant à la vulnérabilité du territoire étudié à l'égard des grands enjeux écologiques ; ils ne peuvent par conséquent que fournir des pistes d'action très générales.

Pour palier à ce défaut, il faut alors probablement décliner les analyses de flux génériques sous la forme d'analyses plus spécifiques. Au moins deux pistes se présentent alors :

- soit l'élaboration d'analyses de flux de substances ou de matières spécifiques, ce qui revient alors à opérer un zoom sur une substance ou une matière en raison de son importance particulière dans le fonctionnement du métabolisme urbain. On raisonne alors par aléas (dangerosité d'une substance, raréfaction d'une ressource, etc.) et on va identifier toutes les fonctions du métabolisme potentiellement impactées par cet aléas ;
- soit l'élaboration d'analyses de fonctions métaboliques, ce qui revient à opérer un zoom sur une fonction du métabolisme (par exemple l'alimentation). On raisonne alors par *enjeu* ou *fonction*, c'est à dire qu'on se focalise sur une fonction pour ensuite identifier les aléas qui peuvent potentiellement créer des vulnérabilités à son égard.

L'analyse entrée-sortie étendue à l'environnement apparaît comme une approche transversale puisqu'elle permet, en théorie, de mettre en évidence aussi bien les pressions globales exercées par un système économique que la décomposition de ces pressions en son sein, par secteurs d'activités, produits consommés et catégories de consommation finale. Elle offre ainsi des perspectives nouvelles pour analyser les implications physiques du fonctionnement économique d'un territoire, en particulier en matière de vulnérabilité à la raréfaction des ressources naturelles. En revanche, comme on l'a vu, la principale limite de l'EEIOA concerne la disponibilité des données économiques et environnementales à un niveau sectoriel et géographique détaillé. A ce titre, on peut envisager une complémentarité avec les analyses de flux de matières et de substances dès lors qu'elles permettent de construire des bases de données solides sur les flux traversant le territoire.

Il faut donc se poser les bonnes questions dès le début...

On devine dès lors plusieurs scénarios possibles (Cf. Annexe). Mais avant de choisir une option, il faut être certain de la question à laquelle on veut répondre. Et être bien conscient de ce que permettent les études de flux des métabolismes territoriaux. Comment sont-elles utilisées ? A quoi ont-elles servi jusqu'à présent ? Comment sont-elles déclinées de manière opérationnelle ? Quelles questions importantes faut-il se poser avant de lancer une telle étude ? Peuvent-elles être réalisées à l'échelle d'une agglomération comme le Grand Lyon ? Est-il indispensable d'initier une telle étude de flux pour identifier les vulnérabilités du territoire et adopter une stratégie de résilience ?

Ce sont quelques-unes des questions auxquelles nous allons essayer de répondre dans la seconde partie de ce travail, sur la base de plusieurs témoignages.

Bibliographie

- ADEME – Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2015. *Bilan GES territoire*, article en ligne. URL : <http://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/contenu/index/page/Bilan+GES+Territoires/siGras/0>
- Alterre Bourgogne, 2013. *La Bourgogne comptabilise ses flux de matières*, Repères n°64, Alterre Bourgogne, Dijon.
- Barles, S. 2007. « Le métabolisme parisien aujourd'hui. Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme », in *Annales de la recherche urbaine*, n°103 (« La ville dans la transition énergétique »), pp. 64-73
- Barles, S. 2010. « Ecologies urbaine, industrielle et territoriale », p. 61-83, in : Coutard O., Lévy J-P. (eds.), *Écologies urbaines*. Economica/Anthropos (collection Villes), Paris.
- Barles S., 2014. « L'écologie territoriale et les enjeux de la dématérialisation des sociétés : l'apport de l'analyse des flux de matières » in *Développement durable et territoires*, vol. 5-1, Février 2014. URL : <http://developpementdurable.revues.org/10090>
- BFF – Best Foot Forward, 2002. *City Limits. A Resource Flow and Ecological Footprint Analysis of Greater London*, IWM (EB), Londres.
- Billen G., Garnier J., Thieu V., Silvestre M., Barles S., Chatzimpiros P., 2012. « Localising the nitrogen imprint of the Paris food supply: the potential of organic farming and changes in human diet » in *Biogeosciences*, n°9, pp. 607–616
- Billen, G., Barles, S., Chatzimpiros, P., Garnier, J. 2011. « Grain, meat and vegetables to feed Paris: where did and do they come from? Localising Paris food supply areas from the eighteenth to the twenty-first century » in *Regional Environmental Change*, n°12, pp. 325-335
- Billen, G., Barles, S., Garnier, J., Rouillard, J., Benoit, P. 2009. « The Food-Print of Paris: Long term Reconstruction of the Nitrogen Flows imported to the City from its Rural Hinterland » in *Regional Environmental Change*, n°9, pp. 3–24
- Blomqvist, L., Brook, B.W., Ellis, E.C., Kareiva, P.M., Nordhaus, T., Shellenberger, M., 2013. Does the Shoe Fit? Real versus Imagined Ecological Footprints. *PLoS Biol.* 11, e1001700. doi:10.1371/journal.pbio.1001700
- Boutaud A., 2005. *Le développement durable : penser le changement ou changer le pansement ?* Thèse de doctorat en science et génie de l'environnement, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne.
- Boutaud A., Gondran N., 2009. *L'empreinte écologique*, Coll. Repères, La Découverte, Paris.
- Boyden S. (dir), 1979. *Une approche écologique intégrée pour l'étude des établissements humains*, UNESCO, PNUE, Nairobi.
- Brunner, P. H., Rechberger, H. 2004. *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton.
- Buclet N., 2011. *Ecologie industrielle et territoriale*, Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve-d'Ascq.
- CGDD – Commissariat Général au Développement Durable / Albertini J-P. (dir.) 2014. *Comptabilité des flux de matière dans les régions et les départements. Guide méthodologique*, Coll. Références, CGDD, Paris.
- CGDD – Commissariat Général au Développement Durable / Delduc P. (dir.) 2014. *Ecologie Industrielle et Territoriale : le guide pour agir dans les territoires*, Coll. Références, CGDD, Paris.
- CGDD – Commissariat Général au Développement Durable, 2015. *Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable 2015-2020*, CGDD, Paris.
- Chevallier M., 2009. « Une économie sans déchets » in *Alternatives Economiques*, n°83, mis en ligne. URL : http://www.alternatives-economiques.fr/une-economie-sans-dechets_fr_art_888_46885.html
- COM - Commission Européenne, 2011. *Feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources – Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions*, Commission Européenne, Bruxelles.
- Cooper J., Carliell-Marquet C., 2013. « A substance flow analysis of phosphorus in the UK food production and consumption system » in *Resources, Conservation and Recycling*, n°74, pp. 82–100
- Cui S., Xu S., Huang W., Bai X., Huang Y., Li G., 2015. « Changing urban phosphorus metabolism: Evidence

- from Longyan City, China » in *Science of the Total Environment*, n°536, pp. 924-932.
- Dawkins E., Roelich K., Owen A., 2010. *A Consumption Approach for Emissions Accounting - the REAP Tool and REAP Data for 2006*, Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- Dias Ana D., Lemos D., Gabarrell X., Arroja L., 2014. « Environmentally extended input-output analysis on a city scale. Application to Aveiro (Portugal) », in *Journal of Cleaner Production*, n° 75.
- Duvigneaud P., 1974. *La synthèse écologique : populations, communautés, écosystèmes, biosphère, noosphère*, Doin, Bruxelles.
- EEA - European Environment Agency, 2013. *Environmental pressures from European consumption and production. A study in integrated environmental and economic analysis*, EEA Technical report, n° 2/2013
- EEA - European Environment Agency, 2014. *Progress on resource efficiency and decoupling in the EU 2027. Messages emerging from environmentally extended input-output analysis with relevance to the Resource Efficiency Roadmap and the 7EAP*, EEA Technical report, n°7/2014
- Erkman S., 1998. *Vers une écologie industrielle : comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper-industrielle*. Éditions Charles Léopold Mayer, Paris
- Eurostat. 2009. *Economy wide material flow accounts: compilation guidelines for reporting to the 2009 Eurostat questionnaire. Version 01, juin 2009*, Eurostat. URL : http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/ceea/archive/Framework/Eurostat%20MFA%20compilation%20guide_2009.pdf
- Faist Emmenegger M., Frischknecht R., Cornaglia L., Rubli S., 2003. *Métabolisme des activités économiques du canton de Genève – Phase 1. Rapport final*, ESU-services, Uster.
- Fischer-Kowalski M., 2008. « The Intellectual History of Material Flow Analysis » in *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 2-1, pp. 61-78
- Forkes J., 2007. « Nitrogen balance for the urban food metabolism of Toronto, Canada » in *Resources Conservation and Recycling*, n°52, pp. 74-94.
- Frosch R.A., Gallopoulos N. E., 1989. « Des stratégies industrielles viables », in *Pour La Science*, n°145, nov. 1989, pp. 106-115
- Galli A., Wiedmann T., Ercin E., Knoblauch D., Ewing B., Giljum S. 2011. « Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a "Footprint Family" of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet » in *Ecological Indicators*, n°13, 13 p.
- Gondran N., Boutaud A., Global Footprint Network, 2013. *L'empreinte écologique des régions françaises en 2008. Application à l'échelle des Zones d'Etudes et d'Aménagement du Territoire*, Association des Régions de France, Paris.
- Grafmeyer Y., Joseph I., 1990. *L'école de Chicago : naissance de l'écologie urbaine*, Aubier, Paris.
- Grand Lyon, 2009. *Diagnostic Climat de l'agglomération lyonnaise : première étape vers une agglomération sobre en carbone*. Grand Lyon, Lyon.
- Guo X., Song Y., 2008. « Substance Flow Analysis of Copper in China » in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 52-6, pp. 874-882
- Haberl H., 2001. « The energetic metabolism of societies » in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 5-1, pp. 11-33.
- Haberl H., 2006. « The global socioeconomic energetic metabolism as a sustainability problem » in *Energy*, n°31, pp. 87-99
- Hermannsson K., McIntyre S.G., 2014. « Local consumption and territorial based accounting for CO2 emissions », in *Ecological Economics*, n°104, pp. 1-11
- Kitzes J., 2013. « An Introduction to Environmentally-Extended Input-Output Analysis » in *Resources* 2013, n°2.
- Leturcq A-S., 2001. *De l'écologie urbaine au développement durable*, AREHN, La lettre du cadre territorial, Voiron.
- Li S., Yuan Z., Bi J., Wu H., 2010. « Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hefei City China » in *Science of the Total Environment*, Vol. 408-23, pp. 5715-5722
- Lutter S., Giljum S., 2014. *Demand-based measures of material flows : a review and comparative assessment of existing calculation methods and data options – OCDE, Paper prepared for the OECD international expert workshop "Demand-based measures of material flows and carbon*. OECD, Paris.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W.III, 1972. *Halte à la croissance ? Les limites de la croissance*, Le club du Livre, Paris.
- MEDD - Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2011. *Décret n° 2011-829 du 11 juillet 2011 relatif au bilan des émissions de gaz à effet de serre et au plan climat-énergie territorial*.

- Mirenowicz P., 1984. *L'écologie des systèmes urbains, et L'écologie urbaine classique*, in *Métropolis* n. 64/65, pp. 15-18 et pp. 13-15
- Nascimento I., 2015. « Une amélioration continue de l'empreinte écologique moyenne des francilies », in *Note Rapide de l'institut d'aménagement et d'urbanisme de l'Île-de-France*, n°700, 4 p.
- Odum E., 1971. *Fundamentals of ecology*, Saunders, Philadelphia.
- OREGES – Observatoire Régional de l'Energie et des Gaz à Effet de Serre, 2015. « Flux d'énergie en Rhône-Alpes : une autre vision de l'énergie », en ligne. URL : <http://oreges.rhonealpes.fr/fr/focus/article/article/juin-2015-flux-denergie-en-rhone-alpes-une-autre-vision-de-lenergie.html>
- Park R.E., Burgess E.W., Mackenzie R.D., 1968. *The city*, Chicago University Press, Chicago.
- Pasquier, J.L., 2010. *CO2 et activités économiques de la France - Tendances 1990-2007 et facteurs d'évolution*. Rapport du Commissariat Général au Développement Durable, SOES, Paris.
- Pearce D.W., Turner K.R., 1989. *Economics of Natural Resources and the Environment*, John Hopkins University Press, Baltimore.
- Piguet F-P., Blanc I., Corbière-Nicollier T., Erkman S., 2007. « L'empreinte écologique: un indicateur ambigu » in *Futuribles*, n°334, pp. 5-24
- Programme Paris 2030 (coll.), 2010. *L'empreinte alimentaire de Paris en 2030*. Rapport d'avancement à mi-parcours, Mairie de Paris, PIREN Seine, Paris.
- Raoul-Duval J., 2008. *Empreinte écologique : retour sur expériences territoriales*, Certu, Lyon.
- Région Alsace – Groupe de travail régional en faveur de l'économie circulaire, 2015. *Consommations, besoins et richesses du territoire alsacien*, Région Alsace, ADEME Alsace & Préfecture de la région Alsace, Strasbourg.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., Wit, C.A.d., Hughes, T., Leeuw, S.v.d., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. & Foley, J.A. 2009, "A safe operating space for humanity", *Nature*, vol. 461, no. 7263, pp. 472-475.
- Schaffartzik A., Sachs M., Wiedenhofer D., Eisenmenger N., 2013. « Environmentally Extended Input-Output Analysis » Institute of Social Ecology, Alpen-Adria Universitaet, Vienna – *Social Ecology Working Paper*, n°154
- Shafie F. A., Omar D., Karupannan S., Gabarrell X., 2013. « Urban metabolism using economic input output analysis for the city of Barcelona » in *The Sustainable City VIII*, Vol. 1, 2013.
- SEI - Stockholm Environment Institute, 2010. *A Consumption Approach for Emissions Accounting - the REAP Tool and REAP Data for 2006*, Ed. Stockholm Environment Institute, York.
- SEI - Stockholm Environment Institute, non daté. *Footprint Results For Local Authorities With background methodology and explanation*, SEI, York.
- SOeS, CGDD – Commissariat Général au Développement Durable, 2015. *L'essentiel sur... L'empreinte carbone*, Article en ligne. URL : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/s/lempreinte-carbone.html>
- Theys J., Emelianoff C., 2001. « Les contradictions de la ville durable » in *Le Débat*, n° 113, pp. 122-135
- Tregouet B. (dir.), 2010. *An expert examination of the Ecological Footprint*. Observation et statistiques. Orléans
- Wackernagel M., Rees W., 1996. *Our Ecological Footprint. Reducing Human Impact on the Earth*, New Society Publishers, Gabriola Island BC.
- Wackernagel M., Rees W., 1999. *Notre empreinte écologique*, Ecosociété, Montréal.
- Wiedmann T.O, Schand H., Lenzen M., Moran D., Suh S., West J. Kanemoto K., 2013. « The material footprint of nations » in *Proceedings of the National of Science (PNAS) of the United States of America*, vol. 112 no. 20, pp. 6271–6276
- Wolman A., 1965. « The metabolism of cities » in *Scientific American*, Vol. 213-3, pp. 179–190.
- WWF – World Wildlife Fund, 2014. *Living Planet Report 2014. Species and spaces, people and places*. WWF, Gland.
- WWF-UK, 2006. *Counting Consumption. CO₂ emissions, material flows and ecological footprint of th UK by region and devolved county*, WWF-UK, Godalming Surrey.
- Zhang Y., 2003. « Urban metabolism: a review of research methodologies » in *Environmental Pollution*, n°178, pp. 463-473