

Fondements des analyses de flux de matières et d'énergie et typologies d'applications pour la gouvernance des territoires et des organisations

Benoit Ribon, Dominique Badariotti and René Kahn

Volume 18, Number 2, September 2018

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1059916ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Ribon, B., Badariotti, D. & Kahn, R. (2018). Fondements des analyses de flux de matières et d'énergie et typologies d'applications pour la gouvernance des territoires et des organisations. *VertigO*, 18(2).

Article abstract

Material and energy flow analysis (MEFA) is a helpful tool for understanding systems and is essential in several applications. It is based on accounting approach of flows and on mass and energy conservation principles. MEFA was particularly important for industrial development, but it is now also very useful to tackle ecological issues. Indeed, it allows for describing material dynamics and interactions with the environment at different scales : from micro level for an industrial process or an organisation (company, administration ...) to macro level for a territory (city, region, country ...). MEFA can also be performed at a transversal scale when realising a life-cycle inventory for a given product. Even with specific methods for each of those scales, the analysis have common basis and can have similar uses. We identified in literature different typologies of applications : environmental impacts assessment, process optimization, study of material dispersion and deposit, identification of local resources, legislative contribution, communication on environmental impacts and progresses, urbanism consideration, building of a territory shared vision including circular economy and resiliency consideration. MEFA have thus a large panel of applications to tackle sustainable development according different societal and technical perspectives. Hence, it should be included among the governance tools of organisations and territories. However this will be possible only if we success to overcome several difficulties : managing a big amount of data ; making feedbacks accessible to uninitiated people through different understanding frameworks ; developing legislation in favour of material accounting ; and gathering various competences in order to correctly perform and interpret MEFA.

Tous droits réservés © Université du Québec à Montréal et Éditions en environnement VertigO, 2018



This document is protected by copyright law. Use of the services of Érudit (including reproduction) is subject to its terms and conditions, which can be viewed online.

<https://apropos.erudit.org/en/users/policy-on-use/>

Fondements des analyses de flux de matières et d'énergie et typologies d'applications pour la gouvernance des territoires et des organisations

Benoit Ribon, Dominique Badariotti et René Kahn

Introduction

- 1 L'analyse de flux de matières et d'énergie (AFME) est un outil d'aide à la compréhension des systèmes basé sur une comptabilité des flux en entrées et sorties et sur l'application des principes de conservation de la masse et de l'énergie. Fruit d'un héritage historique comptable et scientifique, les AFME se sont révélées indispensables au développement industriel. Elles figurent également aujourd'hui parmi les meilleurs outils disponibles pour évaluer les impacts environnementaux des organisations (entreprises notamment, mais aussi administrations, associations...) et des territoires (villes, régions, pays...).
- 2 Dans cet article, nous prenons les AFME dans un sens général pour désigner les études qui visent à qualifier et quantifier les flux mobilisés par un système. Cela peut tout aussi bien désigner des études empiriques que celles reposant sur des méthodes plus formalisées et scientifiques. En effet, si les approches diffèrent dans leur mise en œuvre, toutes reposent sur une comptabilisation d'entrées et de sorties de matière. Elles peuvent également se recouper dans leurs applications (études d'impacts environnementaux, optimisation de processus, suivi réglementaire, mise en place d'une économie circulaire...). En considérant l'AFME d'un point de vue général, cela nous permet de prendre un peu de recul et de l'envisager du point de vue des applications pragmatiques qui peuvent en découler pour la gouvernance des territoires et des organisations. Un parcours de la littérature nous a en effet permis d'identifier différentes typologies d'applications théoriques possibles pour les AFME. Cela montre qu'il s'agit d'un outil finalement très transversal pouvant apporter des informations à différents corps de métier : comptables,

juristes, managers, urbanistes, architectes, diplomates, communicants, commerçants, scientifiques, ingénieurs, citoyens, etc.

- 3 Afin d'accompagner le lecteur qui n'est pas familier des AFME, nous débuterons notre propos en présentant les fondements généraux de la démarche, du point de vue historique et scientifique, puis du point de vue méthodologique. Nous verrons notamment, à l'aide de quelques exemples, les spécificités des AFME selon trois types de systèmes : un produit, une organisation ou un territoire.
- 4 Ces trois approches peuvent toutefois présenter des usages similaires. Nous avons ainsi recensé différentes typologies d'applications pour les AFME, indépendamment du type de système étudié. L'objectif est de montrer qu'il ne s'agit pas seulement d'un outil environnemental ou technique, mais qu'il permet d'aborder également des sujets économiques, sociaux et sociétaux. En cela, il a un fort potentiel à devenir un outil d'aide à la gouvernance du développement durable des territoires et des organisations.
- 5 Néanmoins, il y a encore plusieurs limites sociétales et techniques qui font que les applications présentées ne sont pas forcément opérationnelles. Nous verrons ces limites dans la dernière partie et proposerons quelques pistes à envisager pour les dépasser.

Le développement des analyses de flux de matière et d'énergie

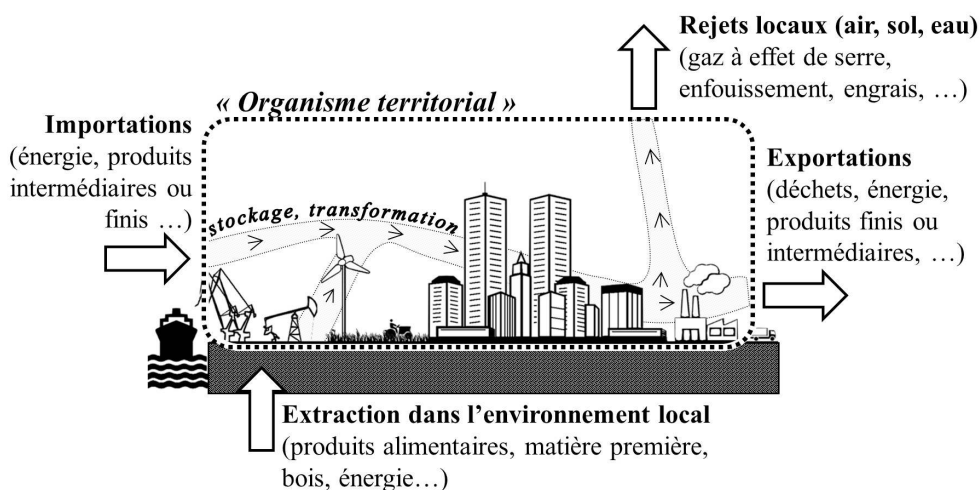
- 6 Les AFME comprennent une partie comptable des flux en entrées et sorties du système étudié. En ce sens, elles ressemblent à la comptabilité financière par partie double qui décrit les opérations et la situation financière d'une organisation à travers différents comptes. Les AFME visent toutefois à quantifier physiquement les flux par leur masse et non économiquement par leur valeur.
- 7 Ces méthodes comptables sont le fruit d'un développement par les civilisations humaines que l'on peut remonter au moins jusqu'au XIX^e siècle av. J.-C, notamment en Mésopotamie. L'extraction, la transformation et l'échange (sous la forme de biens) de matière ont permis de fonder les civilisations qui les ont mises en œuvre. Dès l'antiquité, comptabiliser la matière a ainsi permis d'anticiper des flux de valeurs, d'attester de créances, de gérer des stocks, et même plus largement, de gouverner la société (Minaud 2014).
- 8 En dehors des aspects comptables, les AFME reposent également sur des découvertes scientifiques qui lui ont permis de se formaliser. Notamment au XVII^e et XVIII^e siècle, on commence à réaliser que toute la matière n'est pas visible (et donc qu'elle peut échapper à la comptabilité), mais que pour autant, elle ne disparaît pas. Ainsi Santorio (1561-1636), médecin italien, a réussi à peser la masse des produits ingérés par certains de ses patients et celle des sorties (urine et excréments). Il nota que plus de la moitié de la masse ingérée ne ressortait pas (Brunner and Rechberger, 2003). C'est Lavoisier (1789), dont les travaux ont permis d'établir la célèbre loi de conservation de la masse « rien ne se perd, rien ne se crée »¹, qui donnera l'explication un siècle plus tard. La matière ne disparaît pas, elle ressort sous forme gazeuse et invisible de dioxyde de carbone (CO₂) et de vapeur d'eau lors de la respiration. Au XIX^e siècle, on commence à mieux comprendre la nature de la matière, de l'énergie et du lien entre les deux, notamment avec le potentiel énergétique des matières fossiles comme le pétrole, le gaz et le charbon. Cela a ainsi du sens d'évaluer en parallèle les flux d'énergie et les flux de matières, même s'il est possible de ne

s'intéresser qu'à l'un des deux. Dans la suite de l'article, les aspects concernant la matière peuvent souvent être étendus à l'énergie même si cela n'est pas explicitement mentionné. Entre 1830 et 1850, les travaux de plusieurs scientifiques aboutissent à la formulation d'une loi de conservation pour l'énergie, en plus d'autres lois physiques et notamment thermodynamiques (Kuhn, 1959). Ces découvertes vont accompagner la révolution industrielle, en particulier le développement de l'industrie chimique et manufacturière. En comptabilisant et en maîtrisant mieux les flux, les industries vont pouvoir mettre au point des procédés tant logistiques que techniques, qui seraient ingérables ou non rentables en l'absence de support comptable (Nikitin, 1992).

- 9 Au XXe siècle, la comptabilité va prendre une autre échelle. Alors qu'elle était utilisée de manière libre par les entreprises qui y trouvaient un intérêt, plusieurs États vont lui donner un cadre obligatoire et réglementaire. Ils mettent également en place une comptabilité publique afin d'assurer leur gouvernance et de mettre en place des stratégies de planification, particulièrement utiles dans la reconstruction à l'issue de la Seconde Guerre mondiale (Desrosières, 2008). Cette volonté va aboutir au premier Système de comptabilité nationale (SCN) en 1953 qui a pour objectif de décrire une économie par ses flux monétaires (Eurostat, 2013b).
- 10 L'émergence des problématiques environnementales à partir des années 1960 va progressivement remettre en cause la pertinence de la seule comptabilité économique pour assurer un développement durable des sociétés. Le rapport Meadows (Meadows et al., 1972) est notamment l'un des premiers à avertir des limites écologiques à une croissance économique qui intègre mal la question des externalités. Il peut s'agir des rejets qui ne sont pas comptabilisés, car dépourvus de valeur économique, mais qui sont pourtant en cause dans la dégradation de l'environnement : les émissions de gaz à effet de serre (GES) (IPCC, 2014), les déchets mal gérés qui finissent par relâcher leurs composés nocifs dans l'environnement... Les questions relatives à l'épuisement des ressources et à l'efficacité dans leur utilisation sont aussi difficilement abordables sous l'angle purement économique.
- 11 Pour aborder ces questions, la Commission mondiale de l'environnement et du développement dans les années 1980, et le programme Action 21 adopté en 1992 par la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement ont préconisé la mise en place d'une comptabilité qui tienne compte des éléments écologiques. Cela a abouti à une première version en 1993 d'un Système de comptabilité économique et environnementale (SCEE), qui sera actualisée en 2003 et 2012 par un consortium d'institutions internationales (Nations Unies et al., 2012). Le SCEE offre ainsi un cadre comptable pour agréger et comparer des informations à travers trois types de comptes : les flux physiques (énergie, matière, eau), les actifs (les ressources naturelles disponibles) et l'activité environnementale (activité économique destinée à la protection de l'environnement). La comptabilité des flux physiques, en particulier pour la matière, repose sur les travaux menés sous l'égide du World Resource Institute à la fin des années 1990 (Pasquier, 2010) puis adaptés par la suite pour les pays européens par Eurostat (2001 ; 2013a) à travers la méthodologie « Economy-Wide Material Flows Accounts ».
- 12 En parallèle de l'évolution de la comptabilité nationale, les AFME connaissent un intérêt grandissant dans le monde académique, en particulier depuis que Wolman (1965) s'est intéressé aux flux d'eau, de nourriture et de combustible fossile d'une ville américaine imaginaire d'un million d'habitants. Il introduisit le terme de « métabolisme urbain », emprunté à la biologie pour désigner l'ensemble des ressources mobilisées par un

organisme vivant pour son fonctionnement, et la façon dont elles sont transformées avant d'être rejetées. Selon la métaphore, l'organisme est une ville, sa nourriture en entrée est constituée par les importations et ce qu'elle extrait sur son territoire, et les sorties ne sont pas que les rejets, mais comprend également l'exportation de produits finis (voir Figure 1).

Figure 1. « L'organisme territorial » et l'étude de son métabolisme/ A "territorial organism" and the study of its metabolism.



- 13 Cette approche par le métabolisme fut aussi féconde que discutée. Féconde, car des études sur de nombreuses autres villes à travers le monde ont suivi et ont permis d'améliorer les méthodes d'évaluation (Zhang, 2013). Beloin-Saint-Pierre et al. (2016) recensent ainsi plus de 150 études de métabolisme urbain : de Bruxelles (Duvigneaud and Denaeyer-De Smet, 1975) à Lisbonne (Rosado et al., 2014), en passant par Buenos Aires, Sao Paulo (Hoornweg et al., 2012) ou Paris et l'Île-de-France (Barles, 2009)... Discutée, car le choix du terme « métabolisme », bien que pouvant être inspirant (Yan Zhang, 2013), induit une approche organiciste qu'il faut savoir dépasser (Barles, 2010). Certains chercheurs préfèrent ainsi l'image du fonctionnement d'un écosystème (des organismes en interactions) plutôt que d'un « organisme territorial » dont le contour reste flou (Broto et al., 2012). D'autres évitent même les termes d'origine biologique les trouvant trop réducteurs pour décrire la réalité complexe d'un territoire (Veyret et Ciattoni, 2011). Cependant, la formalisation du concept de métabolisme territorial va l'amener à s'affranchir de son ancrage biologique. Il désigne ainsi communément l'ensemble des processus techniques et socio-économiques par lesquels un territoire mobilise, consomme et transforme la matière et l'énergie (Kennedy et al., 2007 ; Barles, 2009). Le métabolisme est ainsi souvent utilisé comme un terme général pour désigner la dynamique matérielle du territoire, et son usage n'implique pas forcément une approche organiciste.
- 14 Le métabolisme d'un territoire dépend de sa taille, de sa densité de population, de son degré de développement, de la présence de plateformes logistiques (ports, gares de fret...) ou de sa performance écologique (taux de recyclage, d'usage de ressources locales et/ou renouvelables...). Toutefois une grande constante que l'on retrouve dans la majorité des études est la linéarité de ce métabolisme (Barles, 2010) : la matière mobilisée est d'abord extraite de l'environnement, puis transformée en un produit, avant de devenir un déchet à éliminer. Cette matière finit ainsi souvent rejetée dans l'environnement souvent en étant incinérée ou via une mise en décharge. Une meilleure efficacité dans l'usage de la

matière demanderait à rendre le processus circulaire en s'assurant, entre autres que les déchets soient retransformés en matières premières. Cette linéarité est encore plus courte dans les territoires les plus urbanisés où peu de moyens de production sont présents. Les produits sont généralement importés sous forme de produits finis et, une fois consommés, ils se retrouvent sous la forme de déchets et sont évacués en dehors du territoire urbain (Ferrão and Fernández, 2013). Les villes sont ainsi fortement dépendantes des territoires extérieurs qui sont moins peuplés, mais qui disposent des moyens de production pour les approvisionner et traiter de leurs déchets.

- 15 Les méthodes pour analyser les flux de matière se sont ainsi développées à la fois à l'échelle nationale, selon la méthodologie proposée par Eurostat (2001), et à la fois à l'échelle des villes selon l'approche par le métabolisme urbain. Entre les deux, les méthodes dédiées aux échelles intermédiaires, celles des territoires² apparaissent un peu plus tard. Ce sont les travaux de Barles en Île-de-France (2009) complétés par des ceux réalisés en Bourgogne (Alterre Bourgogne, 2013) et en Midi-Pyrénées (Barles, 2014) qui vont permettre d'adapter la méthode européenne aux départements et régions français. Finalement, les auteurs des études sus-citées (Repellin et Duret pour la région Bourgogne et Barles) ont formalisé leurs travaux à travers un guide méthodologique réalisé en collaboration avec le Commissariat général au développement durable (CGDD, 2014). Ce guide vise à accompagner les territoires souhaitant se lancer dans une démarche similaire.
- 16 Ce cadrage historique montre que les AFME héritent de méthodes comptables dont les prémices apparaissent il y a plus de 3500 ans, mais dont la formalisation par la puissance publique a commencé il y a moins d'un siècle. Elles héritent également des découvertes scientifiques qui ont permis de mieux comprendre la nature de la matière et de l'énergie et d'établir des lois de conservation. L'émergence des problématiques environnementales a rendu cet outil essentiel pour renforcer notre compréhension des interactions entre nos sociétés et l'environnement et pour aborder certaines questions essentielles de durabilité. Dans les parties suivantes, nous allons voir les fondements méthodologiques des AFME et comment elles peuvent être mobilisées pour aborder ces questions de durabilité.

La réalisation d'une AFME

- 17 Bien qu'étant le fruit d'une longue tradition comptable, l'émergence de méthodes formelles visant à quantifier et analyser les flux de matières à l'échelle des organisations et des territoires remonte à moins d'un demi-siècle. Ces méthodes ont pris plusieurs aspects visant à différents objectifs (Loiseau et al., 2012 ; Yan Zhang, 2013) par exemple l'empreinte environnementale qui se focalise sur l'étude des impacts sur la biosphère, l'analyse entrées/sorties utilisée dans l'étude et la modélisation des économies ou encore l'analyse du cycle de vie des produits dont nous reparlerons un peu plus loin. L'analyse de flux de matière est ici une méthode parmi les autres, basée sur une analyse comptable des flux.
- 18 Toutefois, si ces méthodes diffèrent dans leur mise en œuvre, elles reposent toutes sur une étude de flux et la réalisation d'un bilan entrées/sorties. Elles peuvent également se recouper dans leurs applications (études d'impacts environnementaux, optimisation de processus, suivi réglementaire, mise en place d'une économie circulaire...). Nous avons ainsi fait le choix dans cet article de ne pas considérer les AFME du point de vue de leur méthodologie, mais plutôt de les considérer comme une approche générale visant à

qualifier et quantifier les flux mobilisés par un système. Cette vision nous permet de prendre un peu de recul et de l'examiner du point de vue des applications qui peuvent en découler. Il nous paraît cependant nécessaire, à la fois pour appuyer notre argumentaire, mais aussi pour accompagner le lecteur encore peu familier de l'approche, de présenter les fondements théoriques et pratiques des études de flux avec le support de quelques exemples.

- 19 Ainsi, pour réaliser une analyse de flux, il convient de poser avant tout le cadre de l'étude et de définir le système étudié. Les AFME peuvent être réalisées à un niveau micro pour un processus industriel ou une entreprise ou à un niveau macro pour un territoire comme une ville ou une région (ou au-delà). Il est également possible de réaliser des AFME à niveau transversal lorsque le système étudié est un produit et que l'on s'intéresse aux flux de matière et d'énergie mobilisés tout au long de son cycle de vie. Nous parlerons des spécificités de cet Inventaire du Cycle de Vie (ICV) dans un paragraphe suivant. Ces trois approches (micro, macro, produit) sont différentes possibilités données aux acteurs pour appréhender les enjeux matériels qui les concernent, soit d'un point de vue collectif (macro), soit individuel (micro) ou soit au sein d'une chaîne d'acteurs (produit). Bien que ces approches soient liées entre elles³ et que leurs développements méthodologiques s'influencent mutuellement (Laner et Rechberger, 2016), elles ont des spécificités que nous présenterons un peu plus loin.
- 20 Après avoir défini le système, il faut également définir le cadre temporel. La période d'étude peut être plus ou moins large selon les objectifs. Les processus chimiques et le réseau électrique ont besoin d'une supervision en temps réel, tandis que les études territoriales font généralement le bilan des flux sur une année.
- 21 Les AFME peuvent viser l'étude de tous les flux physiques. Néanmoins, pour limiter leur complexité, certaines ne s'intéressent qu'à une partie des flux : les déchets (voir exemple de la MAS paragraphe suivant), voire spécifiquement les déchets d'équipements électriques et électroniques – DEEE (Bahers, 2012) ou ceux issus de la construction (Rouvreau et al., 2013). D'autres s'intéressent aux émissions de GES (Ademe, 2010), à l'eau⁴ (Hoekstra et Chapagain, 2007), aux ressources alimentaires ou à des substances spécifiques⁵ comme l'azote (Le Noé et al., 2016).
- 22 La réalisation d'une AFME comprend généralement deux composantes. La première est systématique, il s'agit du bilan (de) matière et (d') énergie qui vise à qualifier et quantifier les flux entrants et sortants du système. La seconde est plus complexe et ne figure pas dans toutes les études⁶. Elle vise à expliquer comment les entrées deviennent des sorties à travers les différents processus de circulation, de transformation et de stockage au sein du système. Dans les versions les plus formalisées, ces deux composantes permettent de construire les tables (ou matrices) entrées/sorties physiques du système étudié (Giljum et Hubacek, 2009).
- 23 L'application des principes physiques de conservation de la masse et de l'énergie vont aider à assurer la cohérence et l'exhaustivité du bilan, en permettant de traquer toute disparition anormale de matière. La connaissance du bilan de matière et d'énergie de certains processus génériques va aussi permettre de mieux quantifier les flux. Ainsi, à l'aide du Tableau 1, il est possible de déduire qu'une maison individuelle moyenne chauffée au gaz⁷ mobilise un peu plus d'une tonne de méthane et génère l'émission de près de 3 tonnes de dioxyde de carbone dans l'air⁸. Cette estimation des sorties (invisibles et non comptabilisée comme le CO₂) à l'aide des entrées (comme le méthane dont les quantités sont connues, car facturées) peut être généralisée à beaucoup de rejets et de

déchets qui sont rarement quantifiés directement. Cela implique néanmoins une inévitable approximation avec la réalité souvent plus complexe des processus : il pourrait y avoir par exemple une fuite de gaz ou une combustion incomplète faussant ainsi le bilan sans que l'on puisse s'en rendre compte en observant le compteur de gaz en entrée⁹.

Tableau 1. Bilan de combustion complète d'un kilogramme de méthane (gaz naturel) (Haynes, 2016)/ Full combustion balance of one kilogram of methane (natural gas) (Haynes, 2016).

	Entrées		Sorties	
	Réactifs	Quantités	Produits	Quantités
Matière	Méthane (CH ₄)	1 kg	Dioxyde de carbone (CO ₂)	2,75 kg
	Dioxygène (O ₂)	4 kg	Eau (H ₂ O)	2,25 kg
Énergie			Chaleur *	15,4 kWh

* : Dans les conditions normales de température et de pression (0 °C et 1,013 bar)

- 24 Les éléments précédents montrent les aspects communs aux AFME pour les différentes échelles considérées : micro, macro, produit. Toutefois, il y a aussi des spécificités que nous allons voir pour chacune de ces échelles.

Au niveau micro : AFME des organisations et de leurs processus

- 25 Le niveau micro est celui des entreprises et organisations, voire en deçà lorsque l'on considère leurs processus internes. Afin d'appuyer nos propos à cette échelle, nous prenons appui sur le bilan déchets mené à la maison d'arrêt de Strasbourg (MAS). En prévision de la mise en place d'une tarification incitative sur les déchets, la MAS a fait réaliser un bilan de déchets par un groupe d'étudiants (De Boissésion et al., 2013). Occupée par environ 750 détenus pour une capacité de 444 places (!), l'étude a révélé que MAS générerait environ 430 tonnes de déchets par an. Pour arriver à ce chiffre, les étudiants se sont appuyés sur plusieurs méthodes :

- Beaucoup d'entrées ont pu être facilement quantifiées à l'aide des factures, même si la masse des produits ne figure pas systématiquement et que cela nécessite donc une conversion approximative. Ainsi les quantités jetées de bouteilles en plastique (5,6 t), briques alimentaires (4,1 t) ou de barquettes alimentaires usagées (17 t) ont été estimées à partir des achats en entrée.
- Une partie des sorties est également bien connue : il s'agit des déchets traités par des prestataires spécifiques, et non par les services de ramassage municipaux. Ces prestataires indiquent sur leurs factures le poids des déchets pris en charge. En l'occurrence : 29 t de bois, 32 t de cartons, 37 t de déchets industriels banals.
- D'autres matières sont plus volatiles, notamment la nourriture dont une partie « disparaît » dans l'air ou dans les eaux usées. Seule une fraction ressort en tant que déchet solide dans les poubelles des cellules ou celles des cuisines. Pour évaluer cette part, la pesée des déchets sur 15 jours en cuisine, et la caractérisation du contenu d'une benne des déchets de cellules ont permis de donner des ordres de grandeur des quantités annuelles : 60 tonnes en sortie de cuisine, 100 tonnes en sortie des cellules.

- 26 Ainsi, l'étude a notamment permis de mettre en avant la quantité de déchets alimentaires produits : environ 200 kg par détenu. C'est bien plus que la moyenne des Français estimée à 79 kg (Ademe, 2014) et du seuil réglementaire à partir duquel un producteur de biodéchets doit les faire traiter dans une filière adéquate¹⁰. Les contraintes liées à la distribution de la nourriture en milieu carcéral expliquent en partie cet excès, mais n'exonéraient pas la MAS de cette obligation légale. La réalisation de l'analyse de flux de matière a ainsi pu permettre d'identifier l'infraction. Depuis, les pratiques de la MAS ont évolué. L'établissement composte sur place une grande partie des déchets alimentaires et surveille mieux les quantités de repas produites. Des expérimentations visent également à trouver des alternatives pour supprimer les barquettes plastiques utilisées pour la distribution des repas.
- 27 La réalisation d'une AFME au niveau micro se base donc sur la recherche et l'interprétation de factures qui comptabilisent directement certains flux. La connaissance des processus, la caractérisation d'échantillons et des pesées ponctuelles vont permettre d'évaluer les quantités qui ne sont pas comptabilisées, avec néanmoins une marge d'erreur difficile à établir. Dans l'exemple, les questions d'eau et d'énergie n'ont pas non plus été abordées : l'objectif était de se concentrer sur les déchets solides. L'analyse réalisée n'est donc pas exhaustive et ne visait pas un bilan complet vérifiant la conservation de la masse à l'échelle du système. La question des déchets est toutefois très transversale et questionne la majorité des flux en sorties comme en entrées.

Au niveau d'un produit : Inventaire du Cycle de Vie

- 28 L'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) vise à recenser les flux de matière et d'énergie mobilisés dans le cycle de vie d'un produit¹¹ : à partir de l'extraction des matières premières, en passant par l'utilisation, jusqu'au traitement en fin de vie (décharge, incinération, recyclage...). L'ICV est une étape indispensable à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Celle-ci est définie par la norme internationale ISO 14040 (ISO, 2006) et concerne notamment l'interprétation, l'exploitation et la communication des résultats de l'ICV. Elle aide ainsi à la conception de produits respectueux de l'environnement, ou dit autrement, à l'« éco-conception » des produits (Janin, 2000).
- 29 L'ICV permet de s'intéresser aux flux indirects générés pendant le cycle de vie des produits. Il s'agit de la matière mobilisée pendant les différentes phases (extraction des ressources, fabrication, usage, élimination des déchets), mais qui ne constitue pas le produit fini. Cela peut concerner le gaz utilisé pour chauffer un entrepôt, le gazoil lié au transport, les chutes de matières des processus de fabrication, l'eau du nettoyage... En ce qui concerne l'« énergie indirecte » mobilisée pendant la production, cette notion est plutôt connue sous le nom d'énergie grise.
- 30 Afin de juger convenablement des impacts d'un produit et d'effectuer un choix vertueux parmi les offres du marché, il est ainsi nécessaire de connaître les flux engendrés pendant la totalité du cycle de vie. Une erreur fréquente est de ne se concentrer que sur les performances du produit fini. C'est ainsi que l'on s'aperçoit que la construction des bâtiments basse consommation nécessite autant d'énergie que leur fonctionnement pendant 30 à 50 ans (ARENE IdF et ICEB, 2012) ou que la majorité des impacts imputables à de nombreux d'équipements électroniques survient pendant la phase de fabrication en raison de la grande quantité de matière et d'énergie mobilisées dans l'extraction des matières premières (EcoInfo, 2014).

- 31 En théorie, la réalisation d'un ICV par une entreprise commence par un inventaire des ressources mobilisées en interne pour la fabrication du produit étudié. Ensuite il s'agit d'évaluer les ressources indirectes mobilisées par les fournisseurs en amont et en aval de la chaîne logistique pour la production des ressources inventoriées.
- 32 En pratique, les entreprises connaissent très rarement les flux indirects mobilisés par leurs fournisseurs, et encore moins par les fournisseurs des fournisseurs... Elles ne peuvent pas non plus estimer précisément les ressources mobilisées pour la gestion de la fin de vie du produit, car celui-ci peut finir de différentes manières : incinéré, enfoui, recyclé... Ainsi, les ICV reposent en grande partie sur des évaluations génériques des flux indirects à l'aide de bases de données et logiciels dédiés à l'ACV. La difficulté à évaluer des flux qu'on ne maîtrise pas doit inciter à interpréter les résultats avec précaution. Tout en ayant le mérite de questionner nos moyens de production pour les rendre plus efficaces, les ACV peuvent présenter des résultats contradictoires en fonction des hypothèses réalisées et des bases de données mobilisées. Des analyses de sensibilité peuvent être ainsi mises en place pour évaluer les marges d'erreur et identifier les hypothèses et les paramètres les plus importants (Kozderka, 2016).

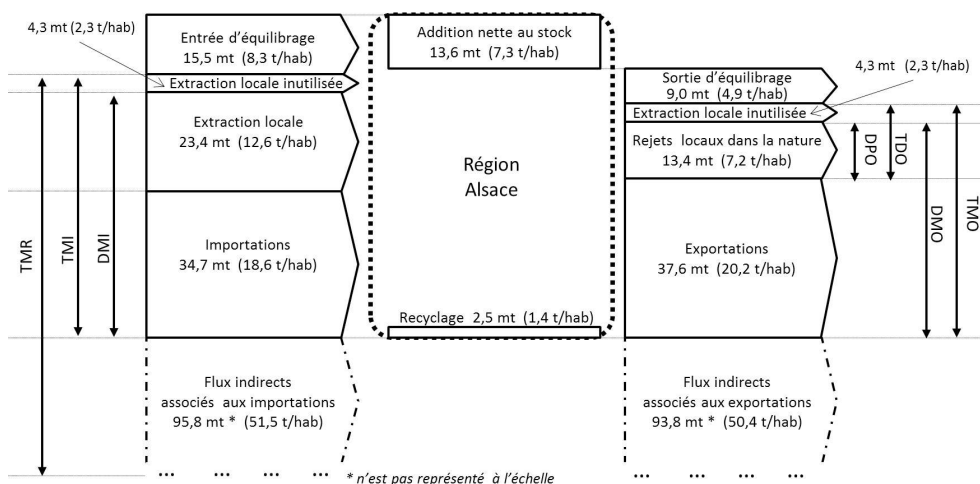
Au niveau macro : Le métabolisme des territoires

- 33 Le niveau macro est celui des territoires : les villes, les pays, voire les continents... À cette échelle, les AFME se confondent souvent avec les études de métabolisme territorial, même si en pratique, ces dernières désignent plutôt la réalisation du bilan de matière que l'analyse des flux internes. Il n'y a pas de taille de territoire systématiquement pertinente pour mener une AFME, cela dépend des objectifs visés (Barles, 2017). La démarche peut appuyer aussi bien des politiques urbaines que régionales, nationales ou même au-delà. Il est néanmoins pertinent de réaliser les AFME pour des territoires dont les contours sont communément reconnus et en usage, afin de faciliter leurs réalisations et l'appropriation des résultats. Ainsi les territoires retenus dans les études sont généralement des territoires administratifs (région, département, ville, zone d'activité...). Dans certains cas, le contexte culturel ou géologique permet de justifier d'une autre délimitation du territoire, par exemple pour des zones transfrontalières ou des bassins versants. Cela induit néanmoins une plus grande complexité dans la collecte des données.
- 34 Après avoir défini le territoire, il s'agit de collecter les données nécessaires à l'étude de son métabolisme. En théorie, l'AFME territoriale peut être réalisée en rassemblant et connectant les AFME des organisations qui le composent (entreprises, administrations, industries...). C'est l'approche dite « bottom-up ». Cette approche est toutefois limitée : les organisations ne réalisent souvent pas de bilan de matière formel, ou ne souhaitent pas le partager. Il n'existe pas non plus de norme pour rendre l'agrégation des bilans de matière aisée au niveau macro. Ainsi, Brunner et Rechberger (2003) proposent d'évaluer uniquement les flux des plus importantes entreprises et organisations pour dresser les grandes lignes du métabolisme du territoire. Cette approche a été utilisée par exemple pour évaluer le métabolisme du canton de Genève (Faist Emmenegger et al., 2003).
- 35 En alternative à l'approche bottom-up, le CGDD (2014) suggère plutôt une approche « top-down », qui visent à rassembler les données disponibles à l'échelle macro et fournies par différents acteurs de la statistique ou du territoire. C'est l'approche retenue par les régions françaises qui ont réalisé une comptabilité de leurs flux de matière. En pratique, cette approche se limite à la réalisation du bilan des entrées et sorties de matière et

d'énergie d'un territoire. Elle ne vise pas à décrire la circulation interne des flux, à l'exception des quantités de matière recyclée ou accumulée sous forme de biens matériels durables (ou *addition nette au stock*, voire Figure 2). C'est une des limites de la méthode qui considère le territoire comme une boîte (presque) noire. Combiner les approches bottom-up et top-down semble être l'idéal pour combiner la connaissance des principaux flux internes apportée par la première et la vision globale obtenue par la seconde, mais encore peu d'études ont exploré cette voie plus complexe (Beloin-Saint-Pierre et al., 2016).

- 36 Dans tous les cas, l'évaluation du métabolisme relève en grande partie d'un exercice minutieux et d'enquête à la recherche des « meilleures données disponibles » (Hoorweg et al., 2012). Le guide méthodologique du CGDD (2014) donne une liste de matières à considérer et indique les organismes qui peuvent renseigner les données. Certaines données sont gratuites et accessibles sur internet comme la production agricole départementale¹², la production de déchets ménagers¹³, les importations et exportations entre régions et vers/depuis l'étranger¹⁴, ou d'autres données sur l'environnement, l'énergie, le transport, le logement et la construction¹⁵. Pour certaines matières, les données sont disponibles auprès d'organismes spécialisés. Les émissions dans l'air seront ainsi renseignées par les Agences agréées pour la surveillance de la qualité de l'air¹⁶, les extractions minières sont connues de l'Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction ou de la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), etc. Les données publiques sont généralement accessibles à une échelle régionale ou départementale. Descendre à des niveaux inférieurs (villes, zones d'activités, etc.) est plus difficile. Nous y reviendrons dans la partie sur les limites de l'AFME.
- 37 Les données collectées sont ensuite classées en différentes catégories, dont les principales sont visibles en Figure 1 : les importations, l'extraction de matière de l'environnement, les exportations et les rejets dans l'environnement. Afin d'avoir une vue complète et garantissant les principes de conservation de la masse, la méthode intègre en plus le calcul de flux d'équilibrage¹⁷, des extractions intérieures inutilisées¹⁸ et des flux indirects (la matière utilisée par d'autres territoires dans la fabrication des produits importés). Ainsi, l'étude menée en Alsace (Région Alsace et Ademe, 2015) a abouti au bilan de matière présenté en Figure 2. De manière générale, les principales matières mobilisées dans les régions françaises en termes de masse sont les matériaux de construction, les combustibles fossiles (gaz et pétrole) et les produits alimentaires (Barles, 2017).

Figure 2. Bilan de matière de la Région Alsace en 2010 à travers différents indicateurs, d'après Région Alsace et Ademe (2015)/ Material balance of Region Alsace in 2010 through different indicators, according Région Alsace et Ademe (2015).



mt : millions de tonnes, t/hab : tonnes par habitant. TMR : besoin total de matière, TMI : entrée totale de matière, DMI : entrée directe de matière, DPO : rejets locaux vers la nature, TDO : rejets locaux totaux vers la nature, DMO : sortie directe de matière, TMO : sortie totale de matière)/mt : millions of tons, t/hab : tons per capita. TMR: total material requirement, TMI: total material input, DMI: direct material input, DPO: domestic processed output, TDO : total domestic output, DMO : direct material output, TMO : total material output.

- 38 Nous avons ainsi vu les principes régissant la réalisation des AFME, de manière générale et de manière un peu plus spécifique selon trois types de systèmes étudiés : les territoires au niveau macro, les entreprises/organisations au niveau micro, et les produits/service dans leur cycle de vie. Malgré leurs spécificités, ces trois approches peuvent être mobilisées dans des intentions similaires.

Panorama des applications

- 39 Historiquement, les analyses de flux physiques ont permis (et permettent encore) la mise au point de procédés techniques, manufacturiers et surtout chimiques, ainsi que leur amélioration. Par la suite, l'outil s'est révélé également pertinent pour aborder différents enjeux du développement durable. L'étude de la littérature nous a permis d'identifier un certain nombre d'applications possibles pour les AFME. Afin de pouvoir en dresser plus facilement le panorama, nous avons regroupé celles qui nous semblaient relever d'une même approche conceptuelle, avec probablement une certaine part de subjectivité dans la classification. Ces approches peuvent pour la plupart se décliner selon les trois types de systèmes mentionnés précédemment. Nous les décrirons toutefois de manière essentiellement transversale et théorique, l'objectif est avant tout de montrer le potentiel et la polyvalence des AFME. Les difficultés à passer de la théorie à la pratique seront discutées dans la partie suivante.

Amélioration des procédés et de la circulation des flux

- 40 L'industrie repose sur la maîtrise des quantités de matières mobilisées dans les processus manufacturiers ou chimiques (Nikitin, 1992). Cette maîtrise peut être renforcée à l'aide

d'une AFME. Celle-ci peut en effet permettre d'identifier les processus de fabrication ou de fonctionnement qui pourraient être améliorés. Certains processus peuvent par exemple mener à des gaspillages significatifs (comme le gaspillage alimentaire de la MAS), mobiliser inutilement de la matière (surtout lorsqu'il y a des fuites), ne pas valoriser une matière qui pourrait l'être en étant mieux triée, etc. L'amélioration peut aussi concerner le transport et la circulation des flux : il s'agit d'éviter les situations paradoxales comme lorsque des territoires font venir de loin des ressources disponibles plus près, voire produites et exportées par le territoire lui-même (Buclet, 2015). Ainsi les AFME peuvent aider à améliorer les procédés et la circulation des flux et ainsi réduire les besoins matériels et énergétiques, et donc les coûts associés qu'ils soient sanitaires, économiques ou environnementaux (Brunner and Rechberger, 2003).

Évaluation des impacts environnementaux

- 41 Certaines problématiques environnementales découlent des conséquences directes de flux trop importants entre l'environnement et nos systèmes socio-économiques, dans un sens comme dans l'autre. Le dérèglement climatique lié aux rejets de gaz à effet de serre en est un exemple (IPCC, 2014). D'autres processus posent également de sérieuses questions en termes de durabilité : l'extraction de ressources naturelles qui les épuise, y compris celles qui sont renouvelables comme les ressources halieutiques (Idda, 2014) ; la pollution régulière de l'eau, l'air et les sols par les rejets industriels et le transport ; l'appauvrissement des sols agricoles par la perturbation des cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et du phosphore (Peyraud et al., 2015), etc. Au total, la commission européenne a ainsi recensé 14 types d'impacts environnementaux¹⁹. Ces impacts varient selon les caractéristiques physico-chimiques des matières prélevées ou émises dans l'environnement.
- 42 Une AFME peut ainsi permettre de quantifier les rejets des matières contribuant directement à ces problématiques environnementales et d'identifier les processus qui en sont à l'origine. L'objectif est de pouvoir mettre en place les actions adaptées pour réduire les impacts. Cela peut se faire par la réduction des quantités mobilisées ou produites, par la substitution par des matériaux plus durables et moins toxiques, par une amélioration des processus techniques et logistiques ou encore par un meilleur traitement des déchets et rejets.

Étude des phénomènes dispersifs et identification des gisements

- 43 Un aspect particulier du cycle de la matière concerne les phénomènes qui dispersent la matière dans l'environnement la rendant difficilement récupérable. Ces phénomènes sont de cinq natures différentes :
- Les rejets liquides et gazeux : sous cette forme, la matière est intrinsèquement dispersive, et s'éparpille facilement une fois émise dans l'environnement.
 - Les pertes dissipatives : Elles concernent essentiellement les objets mobiles qui s'usent par friction (pneus, freins...) et les infrastructures telles que les chaussées qui s'érodent sous les effets de la circulation, de la météo et du temps²⁰ (Landner and Lindeström, 1998 ; CGDD, 2014). Il est possible d'inclure également les accidents matériels qui peuvent avoir un effet dissipatif, mais difficilement quantifiable.

- L'usage de produits dissipatifs, c'est-à-dire qui ont été spécifiquement conçus pour être dispersés. Il peut s'agir d'engrais, de graines végétales ou de sel de déneigement (CGDD, 2014).
 - La dispersion de la matière dans les objets techniques à haute complexité. Par exemple, les circuits imprimés contiennent de nombreux métaux précieux, mais en très faible concentration.
 - Les rejets de déchets solides dans la nature (hors biomasse). Bien qu'initialement consistants, ces déchets se dégradent lentement sous l'effet de la météo et du temps et relâchent des fragments ou des particules pouvant être nocifs.
- 44 Ces phénomènes dispersifs ont des dynamiques fondamentalement différentes qui doivent être étudiées séparément. Toutefois, certains points communs à ces dynamiques peuvent être soulignés. Tout d'abord, la matière finit dans l'environnement (sauf pour la partie des objets techniques qui est collectée avec les déchets) et peut donc potentiellement être source de pollution. Les pertes dissipatives sont notamment associées à des problématiques de qualité de l'air²¹.
- 45 Ensuite, cette matière peut ruisseler, entraînée par le vent et les eaux des pluies ou des rivières. Une partie arrive ainsi dans les stations d'épurations ce qui peut être considéré comme un risque de pollution, car cette matière peut contenir des éléments métalliques toxiques (Baize et al. 2006), ou comme une ressource de plusieurs millions d'euros, car certains de ces éléments sont précieux (Westerhoff et al. 2015). Une autre partie de la matière peut ruisseler jusqu'aux océans où elle s'y accumule, le résultat le plus visible étant celui des « continents de plastiques » (Garric 2012).
- 46 Enfin, une dernière caractéristique commune des phénomènes dispersifs est d'empêcher la réutilisation de la matière. Les déchets à haute complexité (DEEE principalement) ou les métaux des boues des stations d'épuration posent un même problème : les matériaux économiquement intéressants sont en faible concentration et les techniques d'extraction actuelles doivent être perfectionnées avant que l'on puisse considérer ces gisements de matière comme exploitables.
- 47 L'AFME est ainsi un outil qui permet d'aborder la question de la dispersion de la matière en évaluant les quantités mises en jeu et les conséquences environnementales. Elle peut également participer à identifier et quantifier les gisements résultants des phénomènes de ruissellements ou d'une bonne gestion des déchets, et ainsi évaluer l'intérêt économique à les exploiter.

Suivi de la réglementation applicable

- 48 Afin que les matières dangereuses soient gérées avec précaution et que le développement économique se fasse dans le respect de l'environnement, la législation s'est enrichie au fil du temps d'un certain nombre de règles, par exemple :
- Le régime des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)²² s'applique à des entreprises dont l'activité ou les substances qu'elle manipule présentent un risque pour l'environnement. Selon les volumes, les contraintes diffèrent entre une déclaration et une demande d'autorisation.
 - La réglementation sur les déchets²³ vise certains produits en particulier : les emballages doivent être optimisés et valorisables, les biodéchets doivent être traités de manière adéquate au-delà de 10 tonnes par an, etc. De manière générale, la loi désigne « tout producteur ou détenteur de déchets [comme] responsables de la gestion de ces déchets jusqu'à leur

élimination ou valorisation finale, même lorsque le déchet est transféré à des fins de traitement à un tiers »²⁴.

- L'instauration d'un marché carbone (De Perthuis and Trotignon, 2017) et l'obligation de réaliser un bilan d'émission de GES pour les plus grandes entreprises et collectivités²⁵.
- Mise en place d'une fiscalité environnementale (redevance incitative, taxe, bonus/malus, appel à projets, crédit d'impôt...)

- 49 La réglementation tend ainsi à renforcer la maîtrise des flux physiques par les acteurs qui les manipulent. Elle s'appuie sur des impératifs comptables, ouvre des opportunités de marché, responsabilise les producteurs de déchets, etc. La réalisation d'un bilan de matière n'est toutefois pas légalement contrainte. C'est pourtant un outil adapté pour décrire une réalité physique à confronter avec le cadre juridique et faire le lien entre différentes obligations : comptabilisation des émissions de GES, des (bio)déchets, estimation des stocks présents dans les ICPE...
- 50 Combiner une analyse de flux et une analyse juridique reste toutefois complexe. Il n'est ainsi pas surprenant de voir que certains acteurs ignorent les règles qu'ils devraient respecter : c'était par exemple le cas de la MAS avec ses déchets alimentaires ou de certains restaurateurs ne faisant pas traiter leurs huiles usagées (Georgeault, 2015).

Communication sur les progrès et les impacts environnementaux

- 51 Les AFME permettent de suivre l'évolution des flux et d'évaluer les bénéfices environnementaux d'un projet. Ces informations peuvent ensuite être détournées de leur objectif initial de suivi et d'aide à la décision en devenant un outil d'aide à la communication environnementale, mettant en avant les progrès réalisés en termes de réduction d'émission de GES, de déchets, de consommation d'eau...
- 52 Dans un cadre plus formel, les résultats d'une AFME peuvent aussi prendre la forme d'un affichage environnemental²⁶. L'objectif est de porter à la connaissance du consommateur les impacts liés à la production de différents biens et services (Francois-Lecompte et al., 2013). Ces impacts peuvent notamment être évalués à partir d'un inventaire du cycle de vie. D'ailleurs, de la même manière que pour les ICV, des règles communes de comptabilité doivent être établies pour pouvoir effectivement comparer différents produits d'une même catégorie. Parfois l'affichage prend la forme plus simple d'un label. Il ne s'agit alors plus de quantifier des impacts, mais cela peut donner tout de même une information sur la présence, l'absence ou les caractéristiques de certains flux mobilisés dans le cycle de vie du produit²⁷.

Compréhension scientifique et vision partagée

- 53 Les AFME aident à la compréhension des dynamiques d'une organisation ou d'un territoire. D'un point de vue scientifique, cette connaissance est intéressante en soi, même si elle n'est pas suivie d'applications pratiques. Elle peut porter sur les aspects géographiques, économiques, sociaux, historiques des flux mobilisés par l'organisation ou le territoire. Le champ émergent de l'écologie territoriale vise ainsi, à travers des analyses interdisciplinaires, à décrire les trajectoires socio-économico-écologique des territoires. (Buclet, 2015).

- 54 Mais au-delà des scientifiques, les AFME doivent permettre à l'ensemble des acteurs territoriaux concernés de se rendre compte des moyens matériels et énergétiques mobilisés par leur territoire, leur entreprise et les produits qu'ils consomment... À l'échelle régionale, l'entrée directe de matière (DMI - c'est-à-dire les importations et l'extraction locale) est de plusieurs dizaines de tonnes par habitant et par an : 31 tonnes pour un alsacien (Région Alsace et Ademe, 2015 ; voir également Figure 2), 21 tonnes pour un parisien (Barles, 2014). Cette mise en perspective peut ainsi participer à la construction d'une « vision partagée ». En tentant de rendre compte de manière objective (malgré les biais) des forces et faiblesses matérielles et énergétiques d'un territoire auprès de ses acteurs, c'est bien un langage commun qui est mis en place, ou une « entrée en intelligibilité » selon Cerceau et al. (2014). Celle-ci est un préalable essentiel à toute démarche collective comme celles d'économie circulaire ou d'écologie industrielle dont nous reparlons par la suite. Savoir ce que le territoire produit, importe, consomme, jette, recycle devient alors une connaissance partagée, augmentant ainsi la capacité des acteurs à s'inscrire dans une dynamique de coopération (Debuisson, 2014). Cette connaissance partagée peut également servir de base à l'élaboration et le suivi des politiques publiques en matière de développement durable (Barles, 2010).
- 55 Afin de rendre appréhendable cette connaissance, les résultats d'une AFME peuvent prendre différentes formes, que ce soit des indicateurs (Barles, 2014 ; Chrysoulakis et al., 2015), des cartes (Silvestre et al., 2012 ; Le Noé et al., 2016 ; Pincetl et al., 2016), des bilans entrées/sorties, des diagrammes de flux, dits aussi diagrammes de Sankey (Barles, 2014 ; CGDD, 2014) et bien d'autres formes de représentations graphiques (histogrammes, circulaires...) ou littérales (texte, tableau). Néanmoins, dans la partie sur les limites des AFME, nous parlerons de la difficulté à rendre cette vision effectivement partagée. L'AFME doit en effet faire l'objet d'un effort pédagogique important pour que ses tenants et aboutissants soient compris par le plus grand nombre.

Les flux de matières dans les projets de construction et d'aménagement

- 56 Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) est concerné à deux niveaux par la question des flux physiques. D'une part, il s'agit du secteur qui mobilise le plus de matière (hors eau) en termes de masse. Le rythme de développement d'une ville peut d'ailleurs se lire à travers la quantité de matériaux de construction mobilisés (Ferrão and Fernández, 2013). Encore peu de ces matériaux sont recyclés lors des opérations de démolition (Rouvreau et al., 2013). En France, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte²⁸ fixe un objectif de 70 % de valorisation matière à horizon 2020 pour les déchets non dangereux du BTP. La valorisation de la matière peut aussi concerner des stocks abandonnés : par exemple de vieilles conduites d'eau laissées sous terre, d'anciennes voies ferrées ou les matériaux de construction des friches industrielles... Ces réserves de matières représentent un gisement important qui pourrait être exploité dans le futur. C'est sur cette idée que reposent les recherches sur les « mines urbaines » (Hendriks et al., 2000 ; Barles 2017).
- 57 D'autre part, une fois en place, l'architecture structure le cadre dans lequel les flux vont circuler. Elle doit ainsi tenir compte des réseaux vitaux (eau et énergie), mais aussi des autres flux. Les travaux menés à la MAS (De Boissésou et al., 2013) montrent que les flux de déchets et leur spatialisation n'ont pas été suffisamment anticipés. Ainsi, la

configuration des lieux fait que les poubelles sont entreposées et remplies à l'arrière du bâtiment, mais elles sont ramassées par les services municipaux à l'avant. Pour les amener d'un côté à l'autre du bâtiment, des agents font tous les jours parcourir 300 mètres (dans un sens) à 5/6 poubelles d'un volume de mille litres sur un chemin de terre battue peu adapté. Une configuration permettant l'entreposage des poubelles du même côté que leur collecte aurait permis d'économiser ces efforts quotidiens.

- 58 À l'échelle d'une ville, une mauvaise gestion des infrastructures et des réseaux permettant la circulation des flux peut avoir des conséquences sanitaires et écologiques importantes (UNEP 2013). Cela est particulièrement vrai pour les villes à forte croissance des pays émergents (Cohen, 2004). Dans ces villes, le développement des réseaux logistiques, d'énergie et d'eau (potable et assainissement) n'arrive pas à suivre le développement urbain. Il en résulte des constructions anarchiques et des habitats densément peuplés, voire des bidonvilles (Kennedy et al., 2014). Ce développement incontrôlé génère un surcroît de pollutions, qui peuvent avoir un impact sur la disponibilité en eau potable déjà parfois très réduite (Shao et al., 2006). Dans les villes des pays développés, ces problématiques sont moins critiques. Toutefois, nous sommes encore loin d'une organisation du transport des personnes et des marchandises que l'on peut qualifier de durable. Par exemple, l'étalement urbain permis par l'essor des véhicules motorisés engendre une dépendance accrue au pétrole (Ferrão and Fernández, 2013). Cela pose des questions de résilience en vue de l'épuisement des ressources que nous verrons plus loin. Mais cela questionne aussi l'aménagement et la logistique des villes, et plus largement des territoires (Kennedy et al., 2011). Il s'agit d'évaluer les besoins, de déterminer où et comment s'approvisionner, de faciliter la circulation des flux, le ramassage et le recyclage des déchets ou encore de réduire le transport qui dégrade la qualité de l'air. Des travaux du programme des Nations-Unies pour l'environnement ont mis en évidence l'importance des infrastructures et des réseaux pour la circulation de la matière (UNEP 2013). Ils ont un impact direct sur l'efficacité dans l'utilisation des ressources et sur la santé et le bien-être des habitants. Ces travaux ont ainsi identifié différentes approches pour adapter les infrastructures des villes dans une optique de développement durable. Toutefois, intégrer les questions relatives à la matière dans les outils d'aménagement du territoire reste encore très complexe (Chrysoulakis et al., 2015).
- 59 Réaliser une AFME en amont des projets de construction et d'urbanisation présente ainsi plusieurs intérêts. Il s'agit d'évaluer la nature et la quantité des flux qui seront mobilisées pendant les phases de chantier puis d'usage de l'espace. Durant la phase de construction, ces informations peuvent aider à coordonner un chantier plus vertueux et économique en optimisant l'usage de la matière, par exemple en exploitant la synergie entre les opérations de déconstruction et de construction, ou en s'assurant d'un meilleur tri pour favoriser le recyclage. En prévision de la phase d'usage, l'AFME peut permettre aux architectes et urbanistes de mieux anticiper la circulation des flux (par exemple celle des déchets) afin de la rendre plus ergonomique.

Rendre l'économie circulaire, et l'industrie écologique

- 60 Une des stratégies des politiques publiques pour assurer un développement durable vise à découpler la production de richesse de l'usage des ressources (UNEP 2013 ; Kahn, 2015) ou, dit autrement, d'aller vers une *dématérialisation*. Il s'agit d'assurer un même niveau de

performance économique en utilisant moins de matière et d'énergie. Pour cela, un des objectifs recherchés est de « boucler les flux » manipulés par les différents acteurs du territoire. Cette approche est inspirée du fonctionnement des écosystèmes naturels dans lesquels les rejets de certains organismes servent de ressources à d'autres. La matière circule ainsi dans des cycles biogéochimiques.

- 61 C'est sur ces bases que l'écologie industrielle est apparue dans les années 1970, avant d'évoluer par la suite vers les champs plus larges de l'écologie territoriale (Barles, 2010) et de l'économie circulaire (voir paragraphe suivant). Dans les trois terminologies, les fondements sont les mêmes : réduire l'usage des ressources et réutiliser ou recycler au maximum la matière auparavant considérée comme un déchet à éliminer. Cette idée se traduit concrètement par trois types de synergies entre les acteurs économiques d'un territoire (Adoue, 2004 ; Georgeault, 2015) : (1) La mutualisation dans la fourniture d'un service, l'approvisionnement d'une ressource ou le traitement d'un déchet ; (2) La valorisation, les déchets des uns devenant les matières premières des autres ; (3) La substitution d'une ressource par une autre plus locale et/ou renouvelable. La réalisation de bilans de matière par les acteurs permet ainsi d'identifier les synergies potentielles. Celles-ci sont plus simples à mettre en œuvre lorsque ces acteurs sont proches géographiquement et ont l'habitude de travailler ensemble (Debuisson, 2014 ; Georgeault, 2015). Mais même dans les zones industrielles propices, les démarches d'écologie territoriale ne sont encore qu'à un stade émergent. Ainsi, la part de matière effectivement recyclée en France reste actuellement faible et concerne moins de 10 % de la matière en entrée (DMI)²⁹, dont essentiellement des déchets du BTP. De plus, une grande partie de la matière utilisée par nos sociétés est impliquée dans les processus dispersifs mentionnés précédemment (concernant les émissions gazeuses, l'usure des routes, les produits complexes...) et elle ne peut donc pas toujours être réutilisée. Ainsi, en plus des synergies industrielles, il est nécessaire de trouver également des solutions pour réduire les impacts et la perte de matière résultant des processus dispersifs. Cela concerne en particulier le secteur du transport et les appareils de haute technologie (Bihouix, 2014).
- 62 Le concept d'économie circulaire est apparu plus tard, dans les années 2000, avant d'être intégré dans la législation française en 2015 avec la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte. Il vise à rassembler au sein d'un terme unique plusieurs dynamiques économiques et écologiques en plus de la seule question des synergies industrielles. L'économie circulaire comprend ainsi également l'éco-conception (qui consiste à concevoir des produits durables et recyclables) ou la consommation responsable (qui est possible à travers l'affichage environnemental). Il y a également l'économie de la fonctionnalité dans laquelle la fourniture d'un service se substitue à l'achat d'un objet (Maillefert and Robert, 2014). Le consommateur paye non plus l'objet qu'il utilise, mais sa location et le service rendu. L'entretien étant compris, le fabricant (devenu de fait prestataire de service) a alors tout intérêt à rendre ses produits durables et à en réduire l'obsolescence. L'intérêt environnemental d'une offre de service par rapport à la vente d'un produit peut être évalué notamment grâce aux analyses de cycle de vie.

Des questions de résilience et d'anticipation de l'épuisement des ressources

- 63 Le fonctionnement de nos sociétés mobilise des ressources naturelles qui s'épuisent : les énergies fossiles, l'eau, les métaux, les terres agricoles, les poissons.... si nous ne parvenons pas à développer une économie plus sobre, celle-ci risque de connaître d'importants dysfonctionnements lorsque ces stocks seront épuisés, à l'horizon d'une à quelques décennies selon les ressources (Servigne and Stevens, 2015). Dans ce contexte, la commission européenne a d'ailleurs identifié vingt-sept « matières premières critiques » en fonction de leur importance économique et du risque de pénurie (Commission européenne, 2017). À cela s'ajoutent les risques de conflits, de crises économiques ou de catastrophes naturelles qui peuvent également survenir et rompre l'approvisionnement d'une ressource essentielle à un territoire (Ferrão and Fernández, 2013), par exemple le gaz russe pour l'Europe (Locatelli 2012).
- 64 Les risques matériels ne se limitent pas à la question de l'approvisionnement, mais concernent l'ensemble de la chaîne de production et d'élimination, notamment les infrastructures les plus stratégiques étant donné leur fonction et leur dimensionnement³⁰ (usine d'incinération, station d'épuration, centrales énergétiques électriques ou thermiques). D'une part les ressources que ces installations mobilisent pour fonctionner sont conséquentes, d'autre part, en cas de non-fonctionnement³¹, les conséquences sanitaires, écologiques ou économiques peuvent être coûteuses, voire critiques.
- 65 Ces risques logistiques peuvent se présenter à court, moyen et long termes, et peuvent avoir des conséquences temporaires ou définitives. Ils questionnent les territoires et les organisations dans leur capacité de résilience : sont-ils capables de continuer à fonctionner avec une pénurie de ressources ? Les AFME peuvent apporter un éclairage en quantifiant les besoins et en décrivant la circulation des flux. Elles peuvent ainsi servir de base à la construction de scénarios envisageant certaines ruptures logistiques. Mais face à la multitude de scénarios possibles, il est complexe de définir les stratégies d'adaptation qui tiennent compte du contexte économique, social et géopolitique et qui permettent de surmonter d'éventuels futurs aléas. C'est toutefois l'ambition des recherches sur la résilience territoriale (Dauphiné and Provitolo, 2007 ; Toubin et al., 2012).

Les limites des AFME

- 66 Malgré son large panel d'applications, réaliser une analyse de flux ne permet pas d'aborder tous les aspects de nos sociétés. Des questions économiques (échanges de services, valeur ajoutée...), sociales (emploi, éducation...) ou culturelles semblent difficilement abordables par le seul angle de la matière ou de l'énergie. D'autre part, quantifier les flux physiques est avant tout une approche descriptive et non explicative. Ainsi, les AFME ne permettront pas d'expliquer le comportement des acteurs du territoire (pourquoi un produit est jeté ? Pourquoi un acteur n'utilise pas des ressources locales ? ...), mais seulement d'en décrire la résultante en termes de flux.
- 67 Outre ces limitations fonctionnelles intrinsèques, la réalisation concrète d'une AFME pose encore des difficultés. Ce sont des difficultés d'ordre technique (pour manipuler de nombreuses données), méthodologique (pour analyser les résultats à travers différents

cadres théoriques), pédagogique (pour restituer les informations à un public large), réglementaire (pour disposer d'un cadrage de la comptabilité matière) et organisationnel (pour rassembler les compétences nécessaires à l'analyse).

Des données éparses, difficiles à regrouper

- 68 Un des facteurs essentiels facilitant la réalisation des AFME est la disponibilité des données. Cela est particulièrement vrai à l'échelle des territoires et les situations sont extrêmement différentes selon les pays, les cultures et les moyens des services de statistiques. En France, ces services fournissent de nombreuses informations publiques sur les flux de matières, mais les rassembler prend parfois du temps. Elles ne sont pas non plus toujours disponibles en dessous de l'échelle départementale (Barles, 2014) même si des méthodes visent à évaluer les flux à des échelles plus fines (Courtonne 2016). Dans certains cas, l'information est payante³², restreinte ou soumise au secret statistique³³. Toutefois l'accessibilité des données va certainement s'améliorer avec la récente loi pour une République numérique³⁴ qui vise une meilleure ouverture et accessibilité des données publiques. La question de la qualité des données sources est également importante. La transcription de la réalité vers l'information statistique, notamment à l'aide d'enquêtes, ne peut être que partielle et approximative (Desrosières, 2008). Une grande partie des flux de matières reste ainsi non mesurée ou à la discrétion de ceux qui les manipulent.
- 69 Tous ces obstacles pour collecter et standardiser les données rendent les études territoriales longues et complexes³⁵ (Bahers, 2012). Une plus grande automatisation des traitements et un meilleur partage des informations permettraient de rendre la réalisation des bilans de matière plus faciles. Pour cela, plusieurs points sont à considérer :
- La généralisation des normes comptables pour la comptabilité matière. Les travaux menés par les institutions internationales (Nations Unies 2016 ; Eurostat 2013) sur la comptabilité environnementale ont ensuite été adaptés dans des études à différentes échelles (villes, départements, régions, pays). Toutefois, à l'échelle des entreprises, cette comptabilité n'est pas encore suffisamment formalisée au point de pouvoir être généralisée. Il s'agit de définir les méthodes et nomenclatures adaptées à la gestion de la matière, conçues pour faciliter les comparaisons et les agrégations et en lien avec la comptabilité économique (Ribon, 2017).
 - Le développement des infrastructures de données, matérielles et logicielles (Kennedy and Hoornweg, 2012). L'objectif est de permettre aux acteurs de partager leurs données pour les études territoriales (CGDD, 2014), ou pour parfaire les inventaires de cycle de vie des produits en réduisant les inconnues. Vu les impératifs de confidentialité, le développement et l'exploitation de ces infrastructures devraient certainement relever d'une maîtrise d'ouvrage publique.
 - La sensibilisation et la formation des acteurs pour les inciter à mieux collecter les données sur la matière qu'ils manipulent, et à les partager dans une optique de coopération territoriale. Ce partage résulte néanmoins d'un difficile équilibre entre le respect des données privées et leur nécessaire partage pour évaluer les impacts et déployer les synergies entre acteurs.
- 70 Les données ont une place importante dans les analyses de flux territoriales. Leur agrégation et leur croisement offrent un large éventail d'applications théoriques comme nous l'avons dans notre panorama. Les outils numériques sont ainsi de nouvelles possibilités pour mieux comprendre nos sociétés et faciliter la transition écologique

(Audard et al., 2014). Ils posent toutefois également des questions en termes de sécurité, de confidentialité, d'incompatibilité des formats et des méthodes de comptabilisation, ou encore de propriété intellectuelle. Les pouvoirs publics doivent s'emparer de cette question en proposant des solutions techniques pérennes s'ils veulent mettre à profit les nouvelles possibilités de ces outils dans la gouvernance territoriale et sortir du monopole des grands acteurs privés du numérique (AFNOR, 2015).

La quantification des flux à travers différents cadres théoriques

- 71 Les acteurs économiques expriment systématiquement les flux et les stocks en unité monétaire. C'est en effet un dénominateur commun pour évaluer des opérations de nature très diverse (Eurostat, 2013b). De manière similaire, pour la comptabilité matière, les flux et les stocks sont généralement exprimés en unité de masse. Le choix de l'unité servant de dénominateur commun n'est pas neutre et va privilégier certains processus au détriment d'autres. Par exemple, l'unité monétaire intègre mal les externalités (Buclet, 2015). Quant à la masse, elle n'est pas directement corrélée aux impacts environnementaux : quelques kilogrammes d'une matière très toxique (par exemple les métaux lourds) peuvent avoir des effets bien plus ravageurs sur l'environnement que quelques tonnes de graviers de construction.
- 72 Finalement, aucune unité ne peut aborder simultanément toutes les thématiques. Mais la recherche scientifique a mis au point un large panel d'unités pour les aborder séparément. Par exemple pour la question du réchauffement climatique, il s'agit de quantifier les flux en kilogramme équivalent CO₂³⁶. Dans ses travaux sur la performance environnementale³⁷, la Commission européenne recense onze autres unités pour évaluer les impacts environnementaux comme l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'acidification et l'eutrophisation des milieux, l'épuisement des ressources, la transformation des sols, etc. Certaines sont reprises dans le Tableau 2, accompagnées d'autres unités disponibles dans la littérature scientifique. Notons que la matière et les biens peuvent également être quantifiés par les flux indirects qu'ils mobilisent pendant leur cycle de vie. Ainsi, un objet n'a généralement pas d'impact climatique en lui-même, mais il peut être quantifié par les émissions dont il est responsable pour sa fabrication, son fonctionnement et/ou son élimination.

Tableau 2. Quelques exemples d'unités disponibles pour l'étude de différentes thématiques/ Few examples of available unities for the study of different thematic.

Thématique/Discipline	Type d'unité	Exemples d'unité(s) disponible(s)
Économie	Monétaire	Euro (€), Dollar (\$)...
Physique	Masse Volume	Gramme (g), Tonne (t)... Mètre cube (m ³), Litre (L)...
Énergie	Énergie primaire ou finale	Kilowatt-heure (kWh EP ou EF)
Eau	Empreinte aquatique (Hoekstra and Chapagain, 2007)	Mètre cube d'eau (m ³)

Biophysique	Energie (Odum, 2002)	Solar Energy Joule (sej)
Impact environnemental global	Empreinte environnementale (Kitzes et al., 2008)	Mètre carré (m ²) EE
Changement climatique*	Potentiel de réchauffement planétaire (Ademe, 2010)	Kilogramme équivalent CO ₂ (kg eq. CO ₂)
Substances affectant les voies respiratoires*	Modèle RiskPoll (Humbert, 2009)	Kilogramme équivalent PM _{2,5}
Acidification*/Eutrophisation – terrestre*	Modèle d'accumulation d'excédents (Seppälä et al, 2006)	Mole eq H ⁺

* Inclus dans les recommandations de la Commission européenne pour mesurer et indiquer la performance environnementale des produits et des organisations sur l'ensemble du cycle de vie/

*Included in the European Commission recommendation to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations.

- 73 La matière peut donc être quantifiée par ses propres caractéristiques économiques ou physico-chimiques ou celles de ses flux indirects. Cela va permettre aux AFME de s'inscrire dans différents cadres théoriques qui mobilisent leurs propres méthodologie, critères et indicateurs (Figuières et al., 2007). Il en résulte fréquemment des résultats contradictoires sur l'importance de certaines matières selon les critères retenus. Une substance peut avoir un fort impact sur le réchauffement climatique, mais aucune toxicité (le CO₂) et vice-versa (le mercure). Ainsi, des recherches s'intéressent aux outils permettant la prise de décision sur la base de plusieurs critères économiques, écologiques ou sociaux (Chrysoulakis et al., 2015 ; Courtonne 2016). Il faut toutefois être capable d'analyser et quantifier les flux selon différents cadres théoriques et cela relève souvent d'approximations qui obligent à manipuler avec précaution les résultats obtenus, tant dans leur fiabilité que dans leur signification (Figuières et al., 2007).

Rendre intelligible l'AFME auprès des acteurs du territoire

- 74 Les acteurs du territoire sont de plusieurs natures : décideurs politiques (élus, administration), économiques (entreprises) ou techniques (ingénieurs, architectes...), acteurs professionnels (salariés, syndicats, fédérations) ou de la société civile (associations, citoyens), chercheurs et autres praticiens, etc. Leurs compétences, intentions et poids sur les décisions diffèrent, tout autant que les informations qu'ils pourront exploiter d'une AFME. Aussi, les praticiens ayant réalisé ces études doivent présenter leurs conclusions de différentes manières, tant sur la forme que sur le fond, en fonction des acteurs à qui ils sont destinés. L'objectif est de « produire de la connaissance dont peuvent se saisir les acteurs concernés, tant individuellement que collectivement » (Buclet, 2015, p.40).
- 75 Pour faciliter l'interprétation des résultats par un plus large public, le guide méthodologique du CGDD (2014) comprend une partie dédiée aux modes d'analyse, permettant d'aller au-delà de la simple quantification des masses mises en jeu. Les travaux de Chrysoulakis et al. (2015) ont également abouti à l'élaboration d'un système informatique d'aide à la décision, permettant à des élus, urbanistes ou architectes de comprendre et d'évaluer les conséquences sur le métabolisme urbain de différents projets

d'aménagement à travers différentes approches : construction de grille d'indicateurs personnalisés, représentations cartographiques... Toutefois, encore peu d'études sont effectivement rendues accessibles à un public diversifié (Beloin-Saint-Pierre et al., 2016) et les travaux dans ce sens méritent d'être poursuivis.

L'évolution du cadre législatif

- 76 Nous avons vu que la législation imposait des contraintes pour la gestion de certaines matières. Le lien entre le cadre législatif et la matière est d'ailleurs en constante évolution. Progressivement, la législation a intégré de nouvelles règles à travers par exemple la mise en place du régime des ICPE (1976), de filières de collectes nationales et réglementées des déchets (depuis 1992 selon les filières), d'un bilan GES obligatoire (2011), etc. La comptabilité matière est devenue également incontournable pour les États européens.
- 77 Ainsi, la réglementation devient de plus en plus contraignante et incitative, et demande aux entreprises et territoires d'évaluer leurs impacts environnementaux et de mieux maîtriser leurs flux selon des règles de plus en plus formelles. Récemment encore, la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte a donné un signal fort en faveur de l'économie circulaire. Les territoires qui disposent de plus d'autonomie avec la loi NOTRe³⁸ doivent ainsi s'approprier cette question des ressources et en optimiser les usages.
- 78 Avec l'évolution des textes de loi, les bilans de matière deviennent de plus en plus nécessaires pour appréhender certaines réalités matérielles, respecter la réglementation et s'adapter à son évolution. Ils ne sont pas encore obligatoires, mais plusieurs travaux préconisent de les rendre systématiques pour les entreprises et les territoires (Kennedy and Hoornweg, 2012 ; Georgeault, 2015). Cela nécessite toutefois de nouvelles évolutions du cadre législatif pour accompagner cette généralisation de la comptabilité matière.

Des compétences spécifiques à mobiliser et la coordination des acteurs

- 79 Pour pouvoir réaliser et exploiter une analyse de flux de matière, il faut mobiliser un certain nombre de compétences : une expertise méthodologique, la connaissance des thématiques environnementales, une aisance dans la manipulation des données, des capacités pédagogiques et graphiques pour restituer l'information et la connaissance des acteurs territoriaux. Ces compétences sont rarement disponibles ensemble au sein des administrations publiques (ou même des entreprises). Les compétences ne pouvant être mobilisées en interne, les administrations sollicitent souvent d'autres organismes à travers des marchés publics pour la réalisation de leur bilan de matière, comme en Bourgogne (Alterre Bourgogne, 2013), en Alsace ou en Lorraine (Région Alsace et Ademe, 2015).
- 80 La question (politique) est de savoir si les collectivités et services de l'État doivent intégrer en interne les compétences liées à la comptabilité matière. Certaines municipalités ont déjà franchi le pas sur la question de l'énergie, en intégrant des économies de flux dans les services techniques, dans le but de réduire les consommations. Élargir cette question à la matière en général reste cependant complexe et les acteurs concernés sont nombreux. Est-ce aux régions, aux départements, aux zones d'activités, aux communes, aux DREAL, à l'ADEME, aux CCI ou à d'autres de prendre à charge la

structuration d'un pôle d'expertise sur la question matérielle ? Actuellement, la réponse n'est pas encore formelle et les acteurs impliqués dans les démarches d'économie circulaire diffèrent selon les territoires³⁹.

Conclusions et Perspectives

81 En réalisant un panorama des applications possibles des analyses de flux de matière et d'énergie, nous avons vu qu'il s'agissait d'un outil particulièrement polyvalent qui peut être utilisé pour aborder différentes questions de durabilité. En aidant à appréhender certaines réalités matérielles, les AFME peuvent contribuer à définir les stratégies pour s'adapter aux évolutions présentes et à venir (juridiques, économiques, logistiques, exigences des consommateurs, disponibilité des ressources...). Elles constituent ainsi un véritable outil pour la gouvernance des organisations et des territoires. Toutefois des contraintes organisationnelles, techniques et réglementaires restent à lever avant que les AFME ne soient généralisées. Plusieurs chantiers nous semblent nécessaires pour cela :

- Poursuivre le travail de normalisation des méthodes et des règles comptables à la fois pour l'échelle macro, à partir du travail d'Eurostat pour les États, mais déclinés à des niveaux inférieurs (régions, villes, zones d'activité...) jusqu'au niveau des entreprises et des produits.
- Favoriser le partage des données pour suivre la matière tout au long de son cycle de vie. Développer les infrastructures permettant de collecter, croiser et analyser plus rapidement les données sur les flux et leurs impacts, tout en considérant pleinement les exigences de confidentialité.
- Poursuivre les recherches sur la restitution des résultats des études, sur le fond et sur la forme. L'objectif est de rendre accessibles les informations permettant aux acteurs du territoire d'appréhender les enjeux matériels et énergétiques qui les concernent pour les inclure dans leur stratégie opérationnelle.
- Développer des pôles d'expertise « matière » rassemblant les compétences requises pour accompagner les acteurs du territoire dans leurs études de flux et dans le déploiement des synergies territoriales.

82 La multiplication récente des démarches d'économie circulaire et les exigences environnementales de plus en plus contraignantes permettent de penser que les AFME vont continuer à se développer. Toutefois, elles restent avant tout descriptives et sont utiles pour élaborer ou suivre une stratégie visant à un meilleur usage des ressources. Mais la mise en œuvre effective d'une telle stratégie nécessite en plus la volonté et la collaboration des acteurs du territoire, ce qui pose des difficultés d'une tout autre nature et fait l'objet de recherches spécifiques.

Remerciements

83 Cet article s'inscrit dans le cadre d'une thèse portant sur le processus d'évaluation du métabolisme territorial et préparé grâce au financement de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.

BIBLIOGRAPHIE

Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies (Île-de-France) et Institut pour la conception environnementale du bâti (Ivry-sur-Seine, Val-de-Marne) (ARENE IdF et ICEB), 2012, L'énergie grise des matériaux et des ouvrages, [En ligne] URL : http://www.asso-iceb.org/wp-content/uploads/2012/11/guide_bio_tech_l_energie_grise_des_materiaux_et_des_ouvrages.pdf, Consulté le 19 avril 2018.

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), 2010, Bilan Carbone® Entreprises - Collectivités - Territoires : Guide Méthodologique - Version 6.1 - Objectifs et principes de comptabilisation.

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), 2014, Opération foyers témoins pour estimer les impacts du gaspillage alimentaire des ménages. Étude réalisée pour le compte de l'Ademe par Verdacité et Biens Communs.

Adoue, C., 2004, Méthodologie d'identification de synergies éco-industrielles réalisables entre entreprises sur le territoire français, Thèse de doctorat en études environnementales, Université de Technologie de Troyes.

Association française de normalisation (AFNOR), 2015, Livre Blanc. Données massives - Big Data : Impact et attentes pour la normalisation.

Airparif, 2016, Étude prospective dans le cadre de la création d'une zone à circulation restreinte à Paris, [En ligne] URL : <https://api-site.paris.fr/images/87626>. Consulté le 19 avril 2018.

Alterre Bourgogne, 2013, La Bourgogne comptabilise ses flux de matière. Repères no. 64.

Audard, F., S. Carpentier et S. Oliveau, 2014, Les " big data " sont-elles l'avenir de la géographie [théorique et quantitative] ?, 20e Biennale de géographie d'Avignon - Géopoint 2014 - " Controverses et géographies ", pp. 1-4, [En ligne] URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01132689/document>, Consulté le 31 juillet 2017.

Bahers, J.-B., 2012, Dynamiques des filières de récupération-recyclage et écologie territoriale : l'exemple de la filière de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) en Midi-Pyrénées, Thèse de doctorat en géographie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2012 [En ligne] URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00711199/document>, Consulté le 31 juillet 2017.

Barles, S., 2009, Urban Metabolism of Paris and Its Region, *Journal of Industrial Ecology*, 13, pp. 898-913, DOI: 10.1111/j.1530-9290.2009.00169.x

Barles, S., 2010, Society, energy and materials: the contribution of urban metabolism studies to sustainable urban development issues, *Journal of Environmental Planning and Management*, 53, pp. 439-455, Routledge, DOI : 10.1080/09640561003703772

Barles, S., 2014, L'écologie territoriale et les enjeux de la dématérialisation des sociétés : l'apport de l'analyse des flux de matières, *Développement durable et territoires*, vol. 5, n° 1. [En ligne] URL : <http://developpementdurable.revues.org/10090>. Consulté le 31 juillet 2017.

Barles, S., 2017, Écologie territoriale et métabolisme urbain : quelques enjeux de la transition socioécologique, *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, Décembr, pp. 819-836. DOI : 10.3917/reru.175.0819

- Beloin-Saint-Pierre, D., B. Rugani, S. Lasvaux, A. Mailhac, E. Popovici, G. Sibiude, E. Benetto. et N. Schiopu, 2016, A Review of Urban Metabolism Studies to Identify Key Methodological Choices for Future Harmonization and Implementation, *Journal of Cleaner Production*, DOI : 10.1016/j.jclepro.2016.09.014
- Bihoux, P., 2014, *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable*, Éd. du Seuil, Paris, 334 p.
- Broto, V.C., A. Allen et E. Rapoport, 2012, Interdisciplinary Perspectives on Urban Metabolism, *Journal of Industrial Ecology*, 16, pp. 851–861, DOI : 10.1111/j.1530-9290.2012.00556.x
- Brunetière, J., S. Alexandre, M. d'Aubreby et G. Debieuse, 2013, Le facteur 4 en France : la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, 215 p, [En ligne] URL : http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/008378-01_rapport-final_cle0aca84.pdf. Consulté le 19 avril 2018.
- Brunner, P. H., H. Rechberger, 2003, *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, CRC Press, 336 p.
- Buclet, N., 2015, *Essai d'écologie territoriale : l'exemple d'Aussois en Savoie*, CNRS éditions, Paris, 216 p.
- Cerceau, J., G. Junqua, C. Gonzalez, V. Lafores et M. Lopez-Ferber, 2014, Quel territoire pour quelle écologie industrielle ? Contribution à la définition du territoire en écologie industrielle, *Développement durable et territoires*, vol. 5, n° 1, [En ligne] URL : <http://developpementdurable.revues.org/10179>, Consulté le 31 juillet 2017
- Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), 2014, *Comptabilité des flux de matières dans les régions et les départements - Guide méthodologique*, Commissariat Général au Développement Durable, Collection Références du Service de l'observation et des statistiques (SOes), 114 p.
- Chrysoulakis, N., E. A. Castro et E. J. de Moors, 2015, *Understanding Urban Metabolism: A Tool for Urban Planning*, Routledge, London, 240 p.
- Cohen, B., 2004, Urban Growth in Developing Countries: A Review of Current Trends and a Caution Regarding Existing Forecasts, *World Development*, 32, 1, pp. 23–51, DOI : 10.1016/j.worlddev.2003.04.008
- Commission européenne, 2017, *Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au comité des régions relative à la liste 2017 des matières premières critiques pour l'UE*, [En ligne] URL : <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/FR/COM-2017-490-F1-FR-MAIN-PART-1.PDF>, Consulté le 19 avril 2018,
- Courtonne, J., 2016, *Évaluation environnementale de territoires à travers l'analyse de filières : la comptabilité biophysique pour l'aide à la décision délibérative*, Thèse de doctorat en Sciences de gestion, Université Grenoble Alpes, [En ligne] URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01421664>, Consulté le 19 avril 2018,
- Dauphiné, A. et D. Provitolo, 2007, La résilience : un concept pour la gestion des risques, *Annales de géographie*, vol. 654, no. 2, 2007, pp. 115-125, [En ligne] URL : <http://www.cairn.info/revue-annales-de-geographie-2007-2-page-115.htm>, Consulté le 31 juillet 2017
- De Boissésou, J., B. Géhin, F. Jenvrin et B. Ribon, 2013, *Vers une gestion durable des déchets à la Maison d'arrêt de Strasbourg - Rapport du chantier d'application ECO-Conseil*,

De Perthuis, C. et R. Trotignon, 2017, Marché européen des quotas de CO2 : Les enjeux du passage à la phase 3, [En ligne] URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01504990>, Consulté le 31 juillet 2017,

Debuisson, M., 2014, Les modes d'interaction pour une dynamique territoriale soutenable : Un apport à l'écologie territoriale, Thèse de doctorat en Sciences de l'Homme et Société, Université de Technologie de Troyes, [En ligne] URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-01162416>. Consulté le 31 juillet 2017.

Desrosières, A., 2008, L'Argument statistique I : Pour une sociologie historique de la quantification. Presses des Mines, Paris, 328 p.

Duvigneaud, P. et S. Denaeyer-De Smet, 1975, L'écosystème Bruxelles. L'Ecosystème urbain. Application à l'agglomération bruxelloise, Colloque international, organisé par l'Agglomération de Bruxelles, 1974, édité par P. Havelange, Duvigneaud, P. et Denaeyer-De Smet, S. Brussels, pp. 45-47.

EcoInfo, 2014, L'énergie des métaux, [En ligne] URL : <https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/09/03/2-lenergie-des-metaux/>, Consulté le 19 avril 2018.

Eurostat, 2001, Economy-Wide Material Flow Accounts and Derived Indicators: A Methodological Guide, 2000 ed., Eurostat Theme 2, Economy and finance, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Eurostat, 2013a, Economy-Wide Material Flow Accounts (EW-MFA) - Compilation Guide, 87 p. [En ligne] URL : <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/1798247/6191533/2013-EW-MFA-Guide-10Sep2013.pdf/>. Consulté le 31 juillet 2017.

Eurostat, 2013 b, Système européen des comptes : SEC 2010. Publications Office, Luxembourg.

Faist Emmenegger, M., R. Frischknecht, L. Cornaglia et S. Rubli, 2003, Métabolisme des activités économiques du canton de Genève - Phase 1, [En ligne] URL : <https://www.genie.ch/library/h/metabolisme-des-activites-economiques-du-canton-de-geneve---phase-1.html>. Consulté le 19 avril 2018.

Ferrão, P. et J. Fernández, 2013, Sustainable Urban Metabolism. MIT Press, Cambridge, Mass, 244 p.

Figuères, C., H. Guyomard et G. Rotillon, 2007, Une brève analyse économique orthodoxe du concept de développement durable. *Économie rurale*, 300, pp 79-84, [En ligne] URL : <https://economierurale.revues.org/2228>. Consulté le 31 juillet 2017.

Francois-Lecompte, A., M. Gentric et N. Audigier, 2013, L'affichage environnemental, une nouvelle façon pour l'entreprise de rendre des comptes. *Revue française de gestion*, 8, no. 237, pp. 181-199, [En ligne] URL : <http://www.cairn.info/revue-francaise-de-gestion-2013-8-page-181.htm>. Consulté le 31 juillet 2017.

Garric, A., 2012, Le 7e continent de plastique : ces tourbillons de déchets dans les océans, *Le Monde*. [En ligne] URL : http://www.lemonde.fr/planete/article/2012/05/09/le-7e-continent-de-plastique-ces-tourbillons-de-dechets-dans-les-occeans_1696072_3244.html, Consulté le 19 avril 2018.

Georgeault, L., 2015, Le Potentiel d'écologie Industrielle En France : Approche Territoriale et Éléments de Réalisation. Thèse de doctorat en Géographie, Aménagement, Université Paris 1 – Panthéon-Sorbonne

- Gérard, J., 2017, Incinérateur amiante : un diagnostic en avait trouvé dès 2009, Rue89 Strasbourg, [En ligne] URL : <https://www.rue89strasbourg.com/incinerateur-amiante-leurometropole-etait-elle-au-courant-116718>. Consulté le 19 avril 2018.
- Giljum, S. et K. Hubacek, 2009, Conceptual Foundations and Applications of Physical Input-Output Tables, *Eco-Efficiency in Industry and Science*, pp. 61-75, Springer Netherlands. DOI: 10.1007/978-1-4020-5737-3_4
- Goldstein, B., M. Birkved, M.-B. Quitzau et M. Hauschild, 2013, Quantification of Urban Metabolism through Coupling with the Life Cycle Assessment Framework: Concept Development and Case Study, *Environmental Research Letters* 8, 3. DOI: 10.1088/1748-9326/8/3/035024
- Haynes, W.M., 2016, *CRC Handbook of Chemistry and Physics: A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data*. CRC Press, 2652 p.
- Hendriks, C., R. Obernosterer, D. Müller, S. Kytzia, P. Baccini, P.H. Brunner, 2000, Material Flow Analysis: A Tool to Support Environmental Policy Decision Making, Case-Studies on the City of Vienna and the Swiss Lowlands. *Local Environment*, 5, 3, pp. 311-328, DOI: 10.1080/13549830050134257
- Hoekstra, A.Y. et A.K. Chapagain, 2007, Water Footprints of Nations: Water Use by People as a Function of Their Consumption Pattern. *Water Resources Management* 21, 1, pp. 35-48. DOI: 10.1007/s11269-006-9039-x
- Hoornweg, D.A., G. Campillo, A.N. Saldivar-Sali, L. Sugar et D. Linders, 2012, Mainstreaming Urban Metabolism: Advances and Challenges in City Participation, Sixth Urban Research and Knowledge Symposium [En ligne] URL: http://www.dennislinders.com/portfolio/Hoornweg_et_al_URKS6_Urban_Metabolism.pdf, Consulté le 31 juillet 2017.
- Humbert, S., 2009, Geographically Differentiated Life-cycle Impact Assessment of Human Health. UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations, [En ligne] URL : <https://escholarship.org/uc/item/1xv927gv>, Consulté le 19 avril 2018.
- Idda, C., 2014, Caractéristiques biologiques spatialisées et influence des stratégies individuelles dans la gestion des ressources halieutiques : Une approche par les jeux différentiels, Thèse de doctorat en Sciences économiques, Université de Corse.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014, *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), Geneva, Switzerland, 151 p., [En ligne] URL: http://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPCC_SynthesisReport.pdf, Consulté le 31 juillet 2017.
- ISO, 2006, ISO 14040 :2006 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre, Organisation internationale de normalisation, 23p.
- Janin, M., 2000, Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus, Thèse de doctorat en Sciences de l'ingénieur. Arts et Métiers ParisTech, [En ligne] URL : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00005632>, Consulté le 19 avril 2018.
- Kahn, R., 2015, Le développement durable et les territoires : Conceptions, Impacts et Perspectives, 1re Partie. *La Lettre du financier territorial*, no. 302, pp. 45-51.
- Kennedy, C., J. Cuddih et J. Engel-Yan, 2007, The Changing Metabolism of Cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11, 2, pp. 43-59, DOI: 10.1162/jie.2007.1107
- Kennedy, C. et D. Hoornweg, 2012, Mainstreaming Urban Metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, 16, 6, pp. 780-782, DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00548.x

- Kennedy, C., S. Pincetl et P. Bunje, 2011, The Study of Urban Metabolism and Its Applications to Urban Planning and Design, *Environmental Pollution*, 159, 8-9, pp. 1965-1973, DOI: 10.1016/j.envpol.2010.10.022
- Kennedy, C., I.D. Stewart, N. Ibrahim, A. Facchini et R. Mele, 2014, Developing a Multi-Layered Indicator Set for Urban Metabolism Studies in Megacities, *Ecological Indicators*, 47, pp. 7-15, DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.07.039
- Kitzes, J., M. Wackernagel, J. Loh, A. Peller, S. Goldfinger, D. Cheng et K. Tea, 2008. Shrink and Share: Humanity's Present and Future Ecological Footprint, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 363, pp. 467-475, DOI: 10.1098/rstb.2007.2164
- Kozderka, M., 2016, Parametric LCA approaches for efficient design, Thèse de doctorat en Sciences de l'ingénieur. Université de Strasbourg et Technical University of chemistry and technology (Prague), [En ligne] URL : <http://www.theses.fr/2016STRAD050>. Consulté le 19 avril 2018.
- Kuhn, T.S., 1959, Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery. *Critical problems in the history of science*, The university of Wisconsin Press, 550 p., pp. 321-356.
- Lagain, A., 2016, La station d'épuration déborde, la Nesque encore polluée à Saint-Didier, France Bleu Vaucluse, [En ligne] URL : <https://www.francebleu.fr/infos/climat-environnement/la-station-d-epuration-deborde-la-nesque-encore-polluee-st-didier-1474602330>, consulté le 19 avril 2018.
- Laganier, R., B. Villalba et B. Zuindeau, 2002, Le développement durable face au territoire : éléments pour une recherche pluridisciplinaire, *Développement durable et territoires*, Dossier 1, [En ligne] URL : <http://developpementdurable.revues.org/774>. Consulté le 31 juillet 2017.
- Landner, L. et L. Lindeström, 1998, Zinc in Society and in the Environment: An Account of the Facts on Fluxes, Amounts and Effects of Zinc in Sweden. Swedish Environmental Research Group, Kil, Sweden, 160 p.
- Laner, D. et H. Rechberger, 2016, Material Flow Analysis, Special Types of Life Cycle Assessment, *LCA Compendium - The Complete World Life Cycle Assessment*. Springer, Netherlands, 399 p., pp. 293-332.
- Le Noé, J., G. Billen, L. Lassaletta, M. Silvestre et J. Garnier, 2016, La place du transport de denrées agricoles dans le cycle biogéochimique de l'azote en France : Un aspect de la spécialisation des territoires. *Cahiers Agricultures*, 25, 1, DOI : 10.1051/cagri/2016002
- Loiseau, E., G. Junqua, P. Roux et V. Bellon-Maurel, 2012, Environmental assessment of a territory : An overview of existing tools and methods, *Journal of Environmental Management*, 112, pp. 213 - 225. DOI : 10.1016/j.jenvman.2012.07.024
- Maillefert, M. et I. Robert, 2014. Écologie industrielle, économie de la fonctionnalité, entreprises et territoires : vers de nouveaux modèles productifs et organisationnels ? *Développement durable et territoires*, 5, 1, [En ligne] URL : <https://developpementdurable.revues.org/10177>, Consulté le 31 juillet 2017.
- Meadows, D., D. Meadows, J. Randers et W. Behrens III, 1972, The limits to growth: a report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. Universe Books, [En ligne] URL : <https://www.clubofrome.org/report/the-limits-to-growth/>. Consulté le 19 avril 2018.
- Minaud, G., 2014, Comptables et comptabilités dans l'Antiquité : conclusion, *Comptabilités*, 6. [En ligne] URL : <http://journals.openedition.org/comptabilites/1539>. Consulté le 19 avril 2018.

- Nations unies, Commission européenne, Eurostat et Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2012, Cadre central du système de comptabilité économique et environnementale 2012. UNO, 377 p.
- Nikitin, M., 1992, La naissance de la comptabilité industrielle en France. Thèse de doctorat en Gestion et management, Université Paris Dauphine - Paris IX, [En ligne] URL : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00649637/file/ThA_se_Nikitin.pdf. Consulté le 19 avril 2018.
- Odum, H.T., 2002, *Emergy Accounting. Unveiling Wealth*. Springer Netherlands, pp. 135–146.
- Pasquier, J., 2010, La comptabilité environnementale au niveau national, [En ligne] URL : <http://encyclopedie-dd.org/encyclopedie/neige-neige-economie-neige-neige/la-comptabilite-environnementale.html>. Consulté le 19 avril 2018.
- Peyraud, J.-L., G. Richard et C. Gascuel-Oudou, 2015, Boucler les grands cycles biogéochimiques. *Innovations Agronomiques*, 43, pp. 177–186, [En ligne] URL : <https://www6.inra.fr/ciag/content/download/5606/42546/file/Vol43-15-Peyraud.pdf>, Consulté le 31 juillet 2017.
- Pincetl, S., R. Graham, S. Murphy et D. Sivaraman, 2016, Analysis of High-Resolution Utility Data for Understanding Energy Use in Urban Systems: The Case of Los Angeles, California. *Journal of Industrial Ecology*, 20, 1, pp. 166–178. DOI : 10.1111/jiec.12299
- Région Alsace, Ademe, 2015, Consommations, besoins et richesses du territoire alsacien, [En ligne] URL : https://alsace.ademe.fr/sites/default/files/files/Domains-intervention/Economie-circulaire/synthese_etude_de_flux_juillet2015.pdf, Consulté le 31 juillet 2017.
- Ribon, B., 2017, Territorial Metabolism through the Life Cycle of Products, LCM 2017 Conference Cycle (Luxembourg), [En ligne] URL : <https://metabolisme-territorial.fr/wiki/index.php/LCM2017>, Consulté le 19 avril 2018.
- Rosado, L., S. Niza et P. Ferrão, 2014, A Material Flow Accounting Case Study of the Lisbon Metropolitan Area Using the Urban Metabolism Analyst Model, *Journal of Industrial Ecology*, 18, 1, pp. 84–101. DOI : 10.1111/jiec.12083
- Rouvreau, L., P. Michel, D. Monfort, E. Jayr et J. Morice, 2013, L'analyse systémique du métabolisme territorial, un outil pour favoriser le recours aux ressources secondaires dans le domaine du BTP. [En ligne] URL : <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00788373>. Consulté le 31 juillet 2017.
- Seppälä, J., M. Posch, M. Johansson et J. Hettelingh, 2006, Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator (14 pp), *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11, pp. 403–416. DOI : 10.1065/lca2005.06.215
- Servigne, P. et R. Stevens, 2015, Comment tout peut s'effondrer : petit manuel de collapsologie à l'usage des générations présentes. Editions du Seuil, Collection Anthropocène, 304 p.
- Shao, M., X. Tang, Y. Zhang et W. Li, 2006, City Clusters in China : Air and Surface Water Pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4, 7, pp. 353–361, DOI: 10.1890/1540-9295(2006)004[0353:CCICAA]2.0.CO;2
- Silvestre, M., G. Billen et J. Garnier, 2012, Évaluation de la provenance des marchandises consommées par un territoire : AmstraM, une application de webmapping basée sur les statistiques de transport et de production. *Écologie industrielle et territoriale : COLEIT*. pp. 361–370.

Toubin, M., S. Lhomme, Y. Diab, D. Serre, R. Laganier, 2012, La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ? Développement durable et territoires, 3, 1, [En ligne] URL : <http://developpementdurable.revues.org/9208>. Consulté le 31 juillet 2017

United Nations Environment Programme (UNEP), 2013, City-level decoupling: urban resource flows and the governance of infrastructure transitions: summary for policy makers. United Nations Environment Programme. A Report of the Working Group on Cities of the International Resource Panel, Swilling M., Robinson B., Marvin S. and Hodson M..

Veyret, Y. et A. Ciattoni, 2011, Géo-environnement, Armand Colin, Paris, 253 p.

Wolman, A., 1965, The Metabolism of Cities. Scientific American, 213, pp. 179–190.

Yan Zhang, 2013, Urban metabolism: A review of research methodologies, Environmental Pollution, 178, pp. 463 - 473. DOI : 10.1016/j.envpol.2013.03.052

NOTES

1. Les réactions nucléaires qui transforment de la masse en énergie mettent en défaut la maxime. Mais les variations de masses sont extrêmement faibles (~ 40 g/TWh) et localisées, et peuvent être largement négligées dans les propos qui nous intéressent.
2. Un territoire peut tout aussi bien désigner un pays qu'une ville. Il désigne dans ce cas une échelle intermédiaire (notamment une région ou un département).
3. L'échelle macro est le regroupement des échelles micro et l'approche par le produit est une succession d'étapes micro.
4. La masse des flux d'eau mobilisés dépasse généralement d'un ordre de grandeur celle des autres matières. L'eau est ainsi fréquemment étudiée à part pour éviter de masquer - de « noyer » - les autres flux (Fischer-Kowalski et al. 2011).
5. On parlera d'analyse de flux de substance.
6. La présence de cette seconde phase fait le distinguo entre un « bilan de matière » et une « analyse de flux de matière ».
7. Selon une consommation annuelle de 18 000 kWh (approximation pour une maison de 100 m²).
8. À comparer avec le seuil limite d'émission recommandé par le GIEC à l'horizon 2050 évalué à 2,2 tonnes équivalent CO₂ par personne (Brunetière et al., 2013)
9. Le relevé régulier du compteur peut toutefois mettre en évidence la surconsommation engendrée par une éventuelle fuite.
10. Code de l'environnement : Article L541-21-1, R543-225; arrêté du 12 juillet 2011 fixant les seuils définis à l'article R. 543-225. Le seuil pour les biodéchets était de 120 t/an en 2012, et est de 10 t/an depuis 2016.
11. Cela peut également s'appliquer à un service ou à une solution technique à la condition de définir l'« unité fonctionnelle » de service rendu pour pouvoir comparer différentes possibilités.
12. Site Agrest, [En ligne] URL: <http://agreste.agriculture.gouv.fr/> réalisé par le Service de la statistique et de la prospective au sein du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt
13. SINOE® déchets, [En ligne] URL : <http://www.sinoe.org> réalisé par l'Agence de l'Environnement de la Maitrise de l'Énergie.
14. Base de données SitraM, [En ligne] URL : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/> réalisée par le service de l'observation et des statistiques du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer.

15. Base de données Eider, [En ligne] URL : <http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/Eider/> réalisée par le service de l'observation et des statistiques du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer
16. Réunion au sein du réseau ATMO France, [En ligne] URL : <http://www.atmo-france.org/fr/>
17. Les processus de combustion ou de respiration mobilisent l'oxygène de l'air et rejettent de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone. Si ce dernier est pris en compte pour les combustions, dans le reste des cas, ces flux doivent être ajoutés au bilan pour respecter le principe de conservation de la masse.
18. L'extraction intérieure de matière s'accompagne de pertes ou de déplacements de matières qui ne sont pas valorisées économiquement (restes miniers, résidus de récolte, érosion des terres agricoles...). Certains de ces matériaux peuvent avoir des effets sur l'environnement et sont donc comptabilisés. La matière étant inutilisée, la masse en entrée est identique à celle en sortie.
19. Recommandation de la Commission du 9 avril 2013 relative à l'utilisation de méthodes communes pour mesurer et indiquer la performance environnementale des produits et des organisations sur l'ensemble du cycle de vie, [En ligne] URL : <http://data.europa.eu/eli/reco/2013/179/oj>
20. L'usure des pneus représente en Alsace environ 1900 tonnes de matière dispersée dans l'environnement par an. L'usure des chaussées est quant à elle estimée à plus de 300 000 tonnes (Région Alsace et Ademe 2015).
21. « L'usure des routes, des pneus et plaquettes de frein est responsable de 20 % des émissions parisiennes de particules » (Airparif, 2016, p15).
22. Livre V – Titre Ier du Code de l'environnement
23. Livre V – Titre IV du Code de l'environnement
24. Code de l'environnement : Article L541-2
25. Code de l'environnement - Article L229-25; Décret n° 2011-829 du 11/07/2011 relatif au bilan des émissions de gaz à effet de serre et au plan climat-énergie territorial
26. L'ADEME propose à cet effet une base de données pour l'affichage environnemental des produits de grande consommation, [En ligne] URL: <http://www.base-impacts.ademe.fr/>
27. Il peut s'agir par exemple de l'absence d'utilisation des produits chimiques dans les produits étiquetés « Agriculture Biologique », de l'origine des produits fabriqués à travers les marques régionales...
28. Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte
29. D'après les études menées dans plusieurs territoires français (Barles 2009 ; Alterre Bourgogne 2013 ; Barles, 2014 ; Région Alsace et Ademe, 2015)
30. Certaines chaufferies à bois peuvent être surdimensionnées dans le sens où elles mobilisent un volume trop important de bois. L'aire d'approvisionnement peut ainsi devenir trop grande (avec un besoin plus important de transport) ou présenter une menace pour les forêts locales (Sawerysyn et al. 2012).
31. Voir par exemple, l'arrêt forcé d'une usine d'incinération (Gérard 2017) ou le dysfonctionnement d'une station d'épuration (Lagain 2016).
32. Par exemple, les données de la base SitraM sont payantes pour un niveau détaillé à l'échelle départementale.
33. Ces règles définissent pour les entreprises un minimum d'agrégation de trois unités pour la diffusion d'une donnée statistique, et aucune de ces unités ne doit contribuer à plus de 85 % du total (Insee 2010).
34. Loi n° 2016-1321 du 7 octobre 2016 pour une République numérique
35. Environ 85 à 105 jours × hommes pour une région (CGDD 2014 ; Région Alsace et Ademe 2015)
36. Quelques exemples de conversion : 1 kg de matière solide ou liquide = 0 kg eq. CO₂; 1 kg de dioxygène (O₂) = 0 kg eq. CO₂; 1 kg de CO₂ = 1 kg eq. CO₂; 1 kg de méthane (CH₄) = 25 kg eq. CO₂.

37. Recommandation de la Commission du 9 avril 2013 relative à l'utilisation de méthodes communes pour mesurer et indiquer la performance environnementale des produits et des organisations sur l'ensemble du cycle de vie (2013/179/UE), [En ligne] URL: <http://data.europa.eu/eli/reco/2013/179/oj>

38. Loi n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République

39. Au niveau régional, la démarche d'économie circulaire était pilotée à l'origine par l'ADEME et le Conseil Régional en Alsace, et par la DREAL et le Conseil Régional en Lorraine (Région Alsace et Ademe, 2015).

RÉSUMÉS

L'analyse de flux de matières et d'énergie (AFME) est un outil d'aide à la compréhension des systèmes essentiel pour de nombreuses applications. Elle se base sur une approche comptable des flux et sur les principes de conservation de la masse et de l'énergie. L'AFME a joué un grand rôle dans le développement industriel, mais a surtout connu un regain d'intérêt avec l'émergence des problématiques environnementales. Elle permet en effet de décrire les dynamiques matérielles et les interactions avec l'environnement à différentes échelles : du niveau micro pour un processus industriel ou une organisation (entreprise, administration...), au niveau macro pour un territoire (ville, région, pays...). Il est aussi possible de décliner l'AFME à une échelle transversale en réalisant un inventaire du cycle de vie d'un produit donné. Malgré des spécificités méthodologiques pour chacune de ces échelles, les AFME ont des fondements communs et peuvent avoir des usages similaires. Nous avons ainsi recensé dans la littérature plusieurs typologies d'applications : évaluation des impacts environnementaux, optimisation des processus, étude de la dispersion de la matière et identification des gisements, identification des ressources locales, apport d'éléments juridiques, communication sur les progrès et impacts environnementaux, prise en compte dans les projets d'aménagement urbain et construction d'une vision partagée d'un territoire, de sa dynamique d'économie circulaire et de ses capacités de résiliences. Ainsi, les AFME présentent un large panel d'applications permettant d'aborder le développement durable sous différents angles sociétaux et techniques. À ce titre, elles méritent leur place parmi les outils de gouvernance des organisations et des territoires. Toutefois, avant de généraliser les AFME, il reste un certain nombre de difficultés à surmonter. Il s'agit de pouvoir manipuler des données nombreuses, de restituer les résultats à un public non initié à travers différents cadres théoriques, de faire évoluer la législation en faveur de la comptabilité matière et de mobiliser des compétences diverses et spécifiques pour réaliser et interpréter correctement les AFME.

Material and energy flow analysis (MEFA) is a helpful tool for understanding systems and is essential in several applications. It is based on accounting approach of flows and on mass and energy conservation principles. MEFA was particularly important for industrial development, but it is now also very useful to tackle ecological issues. Indeed, it allows for describing material dynamics and interactions with the environment at different scales : from micro level for an industrial process or an organisation (company, administration ...) to macro level for a territory (city, region, country ...). MEFA can also be performed at a transversal scale when realising a life-cycle inventory for a given product. Even with specific methods for each of those scales, the analysis have common basis and can have similar uses. We identified in literature different

typologies of applications : environmental impacts assessment, process optimization, study of material dispersion and deposit, identification of local resources, legislative contribution, communication on environmental impacts and progresses, urbanism consideration, building of a territory shared vision including circular economy and resiliency consideration. MEFA have thus a large panel of applications to tackle sustainable development according different societal and technical perspectives. Hence, it should be included among the governance tools of organisations and territories. However this will be possible only if we success to overcome several difficulties : managing a big amount of data ; making feedbacks accessible to uninitiated people through different understanding frameworks ; developing legislation in favour of material accounting ; and gathering various competences in order to correctly perform and interpret MEFA.

INDEX

Mots-clés : bilan, évaluation, environnement, comptabilité, écologie, métabolisme, territorial, industriel, économie, circulaire

Keywords : balance, assessment, environment, accounting, ecology, metabolism, territory, industrial, circular, economy

AUTEURS

BENOIT RIBON

Doctorant en Géographie, Laboratoire Image, Ville, Environnement - UMR 7362 – CNRS, Université de Strasbourg, 3 rue de l'Argonne - 67000 Strasbourg, France et Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Énergie 20, avenue du Grésillé - BP 90406 - 49004 Angers Cedex 01, France, courriel : benoit.ribon@live-cnrs.unistra.fr

DOMINIQUE BADARIOTTI

Professeur HDR en Géographie, Laboratoire Image, Ville, Environnement - UMR 7362 – CNRS, Université de Strasbourg, 3 rue de l'Argonne - 67000 Strasbourg, France, courriel : dominique.badariotti@live-cnrs.unistra.fr

RENÉ KAHN

Maître de Conférences HDR en Sciences économiques, Bureau d'Économie théorique et appliquée - UMR 7522- CNRS, Université de Strasbourg, 61, avenue de la Forêt Noire, 67000 Strasbourg, France, courriel : rkahn@unistra.fr