HAL
open science

La terre et le béton : le projet d'urbanisme considéré sous l'angle du métabolisme territorial

Mathieu Fernandez, Corinne Blanquart, Éric Verdeil

To cite this version:

Mathieu Fernandez, Corinne Blanquart, Éric Verdeil. La terre et le béton : le projet d'urbanisme considéré sous l'angle du métabolisme territorial. VertigO : La revue électronique en sciences de l'environnement, 2018, 18 (3), 10.4000/vertigo.23302 . halshs-02267165

HAL Id: halshs-02267165

https://shs.hal.science/halshs-02267165v1

Submitted on 19 Aug 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement

Volume 18 Numéro 3 | décembre 2018
Entre controverses environnementales et projets d'aménagement: le paysage à l'épreuve des sens
Section courante

La terre et le béton : le projet d'urbanisme considéré sous l'angle du métabolisme territorial

Mathieu Fernandez, Corinne Blanquart and Éric Verdeil

Abstracts

Français English
Cet article propose une démarche alternative de quantification en stock de la matière mobilisée par un projet d'urbanisme, dans une finalité d'amélioration du métabolisme urbain. Les études de métabolisme territorial mettent en effet l'accent sur les processus d'urbanisation qui représentent la majeure partie des flux de matières solides opérés dans les territoires en termes d'extractions directes et de production de déchets. Ici, l'objectif est de présenter une méthode quantifiant les flux liés à la réalisation d'un projet d'urbanisme – sous la forme juridique d'une zone d'aménagement concertée, outil privilégié d'urbanisme en France –, à l'échelle de son périmètre et pour sa période de mise en œuvre. Les méthodes de quantification existantes se basent sur des informations disponibles seulement à des échelles administratives – régions, départements voire communes –, dépassant largement celle des projets d'urbanisme. Le terrain d'étude de l'article est un projet de renouvellement urbain de la métropole du Grand Paris, à Vitry-sur-Seine. En prenant en compte le sol et les artefacts bâtis dans le processus de quantification, l'originalité de la méthode consiste à obtenir des résultats sur les masses de terre et de béton mobilisés par le projet. Les résultats mettent en évidence la prédominance de ces deux matières pour des politiques visant, par exemple, à augmenter la circularité des matières en milieu urbain.

This paper proposes an alternative approach about a stock quantification of matter mobilized by an urban planning project, aiming at improving urban metabolism. Actually, territorial metabolism studies reveal that urbanization processes generate the main mart of material flows produced by territories, in direct extraction or garbage production. The objective of the paper is to present a method permitting to quantify matter flows resulting from the realization of an urban planning project whose privileged form in France is the ZAC – *ie* concerted planning zone –, considering the time scale of its implementation and its perimeter. Quantification methods are based on data available only at administrative scales – region, department or communes –, exceeding largely urban projects scale. The field analyzed for this paper is an urban renewal project in the Grand Paris metropolis, in Vitry-sur-Seine. Considering ground and built artifacts in the quantification process, the originality of the method consists in producing results concerning masses of earth and concrete mobilized by the project. Then, the results show the centrality of these matters for circular economy politics based, for example, on an increasing circularity of matter in urban environment.

Index terms

Mots-clés : métabolisme territorial, métropole du Grand Paris, Vitry-sur-Seine, projet d'urbanisme, ZAC, stock, sol, bâti, terre, béton
Keywords : territorial metabolism, Grand Paris metropolis, Vitry-sur-Seine, urban planning project, concerted planning zone, stock, soil, buildings, earth, concret

Full text

La matière du projet d'urbanisme

1 Dans le contexte de la crise écologique contemporaine, l'idée s'impose, à travers des avertissements médiatiques comme « le jour du dépassement de la Terre » – par exemple le 1er août en 2018 tel que relevé dans *Le Monde*, *Libération*, *France Inter*, *etc.* faisant suite au *Global Footprint Network* et à des publications scientifiques (Wackernagel, 1994 ; Wackernagel et Rees, 1996) –, que l'humanité vit à crédit en consommant chaque jour toujours plus que ne le permettent les ressources de la planète. Bien que ce type de méthode ne soit pas indemne de critiques méthodologiques (Blomqvist, 2013) une forme de consensus s'est toutefois formée autour de l'idée qu'optimiser les prélèvements et limiter les rejets soient des enjeux essentiels pour l'action publique.

2 Les villes constituent dans cette problématique des espaces particulièrement sensibles. Lieux de concentration des consommations et donc, directement ou indirectement, des prélèvements de ressources, elles sont aussi les points majeurs de rejets de matières polluées et de déchets, exportés à plus ou moins grande distance des zones bâties. Ceci justifie largement de placer les villes au cœur de la transition écologique en faisant en sorte de réduire les prélèvements et les rejets de la ville vis-à-vis des milieux. Cette prise de conscience explique que les méthodes dites de l'écologie industrielle et celles du métabolisme territorial soient redécouvertes et développées (Duvigneaud et Denaeyer-De Smet, 1977 ; Claval, 1981 ; Fischer Kovalski et *al.*, 2004 ; Kennedy et *al.*, 2007 ; Barles, 2009 ; Kim et Barles, 2012, Buclet et *al.*, 2015 ; *etc.*). Elles visent à mieux connaître la nature des flux entrants et sortants d'un système productif industriel ou d'un territoire, par exemple urbain.

3 Les études de métabolisme territorial ont mis en évidence que les matériaux liés à la construction constituent le flux majeur pour la matière solide – c'est-à-dire hors eau et matières gazeuses – du métabolisme urbain, tant en entrée qu'en sortie. En effet, comme le secteur économique de la construction est l'un des secteurs industriels les moins délocalisés dans ses extractions, ce flux est le principal vecteur local d'extractions et de décharges. Pour la région Île-de-France en 2003, seule année ayant fait l'objet d'une étude exhaustive du métabolisme local, la construction et la déconstruction – c'est-à-dire le secteur économique du BTP – représentent 72 % des extractions et 85 % des mises en décharge de matières solides réalisées par le système socioéconomique vis-à-vis des composantes naturelles du territoire (Barles, 2007 ; 2009). Ce résultat sectoriel est une constante dans les études concernant le métabolisme des villes occidentales : Vienne (Obernosterer et *al.*, 1998), Genève (Faist Emmenegger et Frischknecht, 2003), Bruxelles (Athanassiadis et *al.*, 2016). Un tel chiffrage pourrait, par hypothèse, être susceptible d'importantes variations en fonction des contextes, selon que l'on ait affaire à des villes en forte croissance, en croissance relativement réduite, voire en situation de décroissance. Toutefois, même dans les deux derniers cas de figure, une vision intra-urbaine permet de comprendre la permanence des chantiers de construction – notamment *via* le renouvellement urbain – et de déconstruction. Ainsi, les critères de la croissance de population ou même de la croissance spatiale ne sont pas suffisants pour comprendre la circulation des matériaux dans l'espace urbain : les dynamiques intra-urbaines sont des enjeux de flux majeurs.

4 Les projets d'urbanisme sont donc un moteur essentiel de flux de matières. La reconnaissance des flux associés à ces projets s'impose doublement. On peut en effet faire l'hypothèse que plus les projets d'urbanisme sont nombreux, au sens d'opérations concertées, plus le flux généré sera important et nécessitera d'être géré pour en limiter les externalités négatives. Par ailleurs, étant plus ou moins fortement contrôlés par les pouvoirs publics, ces projets peuvent constituer des points d'action urbanistique visant à optimiser la consommation de ressources et à mieux gérer les rejets, par exemple en réutilisant sur place une partie des matériaux excavés ou déconstruits – en cas de renouvellement urbain. Sur ce dernier point, il convient de signaler que nous ne nous focalisons pas sur les externalités de l'économie informelle ni sur les pratiques non déclarées produisant par exemple les décharges sauvages en périphérie urbaine ou la transformation non détectée de déchets en remblaiement au sein de zones agricoles ou de chantiers.

5 L'enjeu apparaît particulièrement d'actualité dans une ville comme la métropole parisienne où les pouvoirs publics ont lancé toute une série d'opérations de grande ampleur. Une partie d'entre elles se réclame des préceptes de limitation de l'extension spatiale en densifiant le développement urbain, notamment en refaisant la ville sur la ville dans d'anciens secteurs industriels. Par exemple, la volonté de mettre fin à l'étalement urbain exprimée dans le Schéma directeur de la région Île-de-France (SDRIF) de 1994 est renouvelée dans sa mise à jour de 2013 Île-de-France 2030 : « l'étalement urbain, le gaspillage du foncier et des espaces naturels doivent être maîtrisés par le renouvellement de la ville sur la ville » (Région Île-de-France, 2013). Le renouvellement comme doctrine, corollaire de celle de la densification, est actuellement justifié par une volonté de diminution du gaspillage de ressources foncières, de préservation des milieux naturels et de la biodiversité ou encore de réduction des émissions carbonées liées à l'allongement des réseaux. Ceci conduit à se demander dans quelle mesure l'urbanisme de la densification et du renouvellement urbain contribue-t-il effectivement à réduire les prélèvements sur les ressources – ici de matériaux de construction – ou à limiter les rejets – en particulier les matériaux de démolition ou les terres excavées.

6 Répondre à cette question butte toutefois sur un verrou méthodologique, surtout dans un contexte où, paradoxalement, rares sont les acteurs urbains, tant en maîtrise d'ouvrage que d'œuvres, qui se préoccupent ou qui aient les moyens de caractériser les entrées et sorties de matériaux à l'échelle de leur projet. En effet, si les projets urbains font l'objet d'images – ou plans — projetant les formes urbaines futures, leur mise en œuvre s'effectue sur un temps multi annuel pouvant atteindre actuellement 20 à 25 ans (Cour des comptes, 2015a). Elle se fait par l'intermédiaire de très nombreux intervenants, de l'aménageur principal du projet aux promoteurs-constructeurs : la durée et la diversité des acteurs se traduisent donc par un fractionnement des chantiers, des comptabilités, *etc.* S'il est possible d'établir des bilans financiers, il n'existe pas de méthode standard pour caractériser un bilan de flux de matières à l'échelle d'une opération.

7 Travailler à l'échelon infra-urbain implique de définir des méthodes renouvelées basées sur la combinaison de données cartographiques et d'observations *in situ*. Cet article vise à proposer, à partir de

l'étude d'un projet de renouvellement urbain d'une ancienne zone industrielle, une analyse estimant les flux matériels à partir de la comparaison des stocks de matières à différentes dates. Notre approche s'est aussi donnée pour objectif de recourir le plus possible à des données et outils libres pour la description des éléments topographiques et bâtis – gestion de l'information topographique – combinées des ratios d'intensité matérielle – données concernant le sol ou renseignant les bâtiments.

8 Un état de l'art nous permet d'abord de choisir une méthode à adapter à de nouvelles échelles. Dans la seconde partie, nous en décrivons en détail la mise en place dans le contexte du cas d'étude choisi qui repose sur une collecte de données existantes, mais aussi sur d'autres à produire afin d'aboutir à une estimation des stocks de matières. La troisième section analyse et interprète les résultats obtenus. Ils mettent en évidence deux flux principaux dont nous recherchons les mécanismes les produisant de manière structurelle. La section conclusive discute de la conséquence de tels résultats sur les stocks, qui peuvent aussi être lus comme les flux entrants et sortants induits par une opération d'urbanisme type. Dans l'optique d'une lecture matérielle de l'économie circulaire, nous pouvons alors mieux saisir les potentialités de réemploi *in situ,* mais aussi prévoir de nécessaires exportations hors du périmètre étudié y compris dans l'optique de rendre possible un bouclage des flux et *in fine* une amélioration des effets du projet d'urbanisme sur le métabolisme urbain.

Choix et adaptation d'une méthode de quantification des stocks

9 Tout un ensemble de recherches récentes a pour finalité la quantification des ressources mobilisées par le fonctionnement de systèmes socio-économiques. Mais elles sont peu utiles à l'échelle des projets d'urbanisme en tant que tels.

10 Les préceptes les plus en vue actuellement sont ceux de l'économie circulaire. Définie par opposition à une économie linéaire, l'économie circulaire développe une notion économique en travaillant sur le cycle de vie des produits, en mettant en avant l'étude des chaines de valeurs pour y détecter des bouclages possibles. Le concept se diffuse institutionnellement dans les années 2010 en France sous l'influence des rapports de la fondation Ellen Mac Arthur et de la Commission européenne (Cabinet Auxilia et ADEME, 2014). En termes d'applications méthodologiques dans des projets français récents, une branche de la recherche se développe en filiation avec les méthodes de l'écologie industrielle (Mat et *al.*, 2012). Un autre type de formalisation de l'économie circulaire en milieu urbain provient des sciences économiques, permettant de démontrer par transposition monétaire la pertinence économique de certaines techniques appliquées à des fluides tels que les matières organiques (Kampelmann, 2016). D'autres méthodes comme l'empreinte écologique ou l'analyse du cycle de vie donnent des résultats quantitatifs, mais territorialement peu ou pas définis, concevant des indicateurs tels que la surface fictive pouvant être affectée à la consommation moyenne de l'habitant d'un territoire ou à la création d'un produit.

11 L'échelle des projets d'urbanisme reste difficilement abordable par ces travaux. Elle nécessite de poser le problème d'une façon spécifique, en prenant en particulier en compte l'espace et sa topographie.

12 La méthode du métabolisme territorial présente des caractéristiques appropriées à l'analyse des projets d'urbanisme, moyennant quelques adaptations, car elle permet de caractériser le territoire en mesurant des quantités de matière ou d'énergie par pas de temps, recherchant la totalité des flux entrants et sortants sur une période donnée. Une méthodologie diffusée par le Commissariat général au développement durable formalise l'étude des flux de matière – le métabolisme prenant en compte l'énergie dans une autre branche d'étude (CGDD, 2014). Pour la matière, la notion physique centrale est la mesure des masses en tonnes. La notion d'espace est contenue dans celle de territoire étudié.

13 Une recension sur 32 cas de travaux existants sur le métabolisme urbain permet d'identifier des méthodes très diverses pour opérer leurs quantifications (Augiseau et Barles, 2016). Les méthodes descendantes estiment les flux à partir des statistiques relatives à l'activité économique. Les méthodes ascendantes pour leur part s'appuient sur des données de construction et de démolition ventilées par types de bâti. Sur l'axe du temps, la capacité à décrire le projet et non un état économique donné induit la notion de rétrospective par des recherches historiques ou bien de prospective par la proposition de scénarios alternatifs. La réflexion sur les échelles spatiales et temporelles est donc indispensable pour appréhender le métabolisme à l'échelle urbaine, ce qui implique de revenir à des problématiques typiquement géographiques assises sur une base matérielle.

14 Dans la même recension, il apparaît toutefois qu'aucun cas ne concerne l'espace intra-urbain. Cette absence s'explique par deux types de raisons : d'une part les politiques publiques se sont pour l'instant surtout préoccupées de cette quantification à des échelles larges, nationales, régionales ou métropolitaines, avec l'idée que les mesures d'optimisation des métabolismes territoriaux se devaient d'être les plus englobantes possible. D'autre part, la quantification repose sur des sources statistiques qui sont rarement disponibles à des échelons administratifs fins, comme la commune ou le quartier (Eurostat, 2001). Toutefois, des recherches récentes visent à pallier les difficultés de ces méthodes à se séparer des entités statiques de types administratifs ou annuels afin d'atteindre des échelles dynamiques – temps, espace, logique ascendante – ou territorialement problématisées selon des secteurs économiques spécifiés (Athanassiadis et *al.*, 2016 ; Augiseau, 2017).

15 Nous faisons le pari que les pratiques opérationnelles courantes de l'urbanisme fournissent une source d'inspiration méthodologique pour notre étude. Ces pratiques sont d'une grande stabilité et le cas d'étude standard de cet article peut être ainsi décrit : un projet politique engendre des commandes par un maître d'ouvrage disposant de la compétence urbanisme ou par son délégataire. Ce maître d'ouvrage recherche une plus ou moins grande maîtrise foncière et crée pour cela un périmètre d'aménagement – en France, il s'agit

d'une zone d'aménagement concertée (ZAC). Il commande à une maîtrise d'œuvre spécialisée la conception de l'aménagement de la ZAC, réalise cet aménagement, puis vend à des promoteurs des lots prêts pour la construction. Au stade où la maîtrise d'œuvre chargée de la conception de la ZAC rend son cahier d'aménagement, le projet est susceptible d'être décomposé comme un stock de matières à atteindre à une certaine échéance temporelle.

16 La durée du processus d'urbanisme opérationnel est variable, notamment en fonction de la complexité de l'opération. Dans le cas d'étude que nous allons décrire, la conception précède d'une quinzaine d'années la fin espérée des livraisons. Les délais peuvent être plus courts selon la simplicité de l'opération. Si un délai de plusieurs années semble minimal dans tous les cas, la durée maximale peut atteindre plusieurs dizaines d'années dans le cas d'opérations très longues, complexes, avec des rebondissements.

17 On peut en effet se représenter le processus urbanistique comme un remplacement du stock existant de matières par un nouveau stock. La méthode la plus propice semble donc être la quantification des stocks de matière avant et après le projet, grâce à la mobilisation de documents de travail renseignant un territoire entre deux états séparés de quelques années à quelques dizaines d'années. C'est donc la méthode ascendante d'analyse des stocks dans une dimension prospective sur une échelle infra urbaine de quelques hectares qui est privilégiée dans cet article.

18 Une appréhension physique du stock matériel implique une observation et des mesures en volumes davantage qu'en surfaces. Le projet d'urbanisme doit donc s'observer dans son épaisseur – ou sa verticalité –, que ce soit en profondeur dans le sol ou en hauteur (Giusti et *al.*, 2015). Les méthodes développées se placeront donc dans ce registre tridimensionnel. Une des ambitions est de territorialiser *in fine* les flux en prenant en compte pour le stock d'une part la volumétrie et l'épaisseur (3D) à l'aide de la topographie, d'autre part leur nature matérielle – typologie, composition géotechnique, pollution, etc. Les données nécessaires à la caractérisation des stocks de matières peuvent être réparties selon les grandes dimensions indiquées dans le tableau 1. La section suivante se concentre sur la recherche des données renseignant le type de terrain choisi tout en précisant lorsque nécessaire certains éléments méthodologiques qui leur sont propres. L'exploitation de ces données est tout au long de ce travail mené *via* les outils disponibles dans le logiciel de systèmes d'information géographique libre *QGis*.

Tableau 1. Identification des variables de l'analyse.

	Sol	Artefacts bâtis
Stock initial	Nature : couche géologique ou couche d'origine anthropique.	Bâti existant : volume, typologie, nature des matériaux associés.
	État : couche géologique, provenance et datation de la couche du sol d'origine anthropique, sources de pollutions locales, *etc.*	Réseaux existants.
Stock projeté	Nature : terres, roches, *etc.*	Bâti envisagé : volume, typologie, nature des matériaux associés – béton – ou alternatives – terre, bois, paille, *etc.*
	État : couche topographique issue du projet.	Réseaux envisagés.

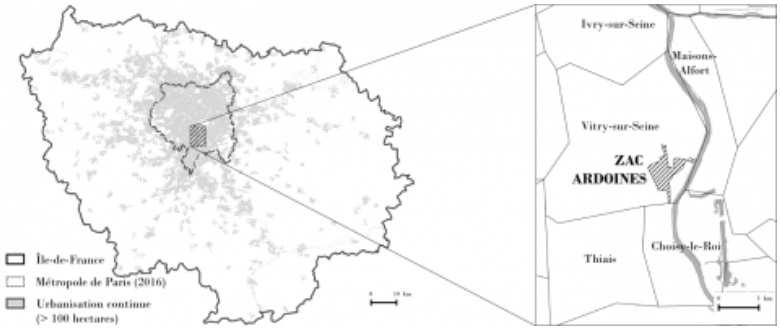
Cas d'étude, récolement et production des données

Contexte urbain et cas d'étude

19 Depuis le 1er janvier 2016, le Grand Paris repose sur une nouvelle organisation administrative, une métropole constituée de douze établissements publics territoriaux (EPT), ainsi que sur la mise en œuvre de grands projets d'urbanisme et de réseaux de transports. Une partie de ceux-ci a été préalablement lancée par l'État au cours des années 2000 et 2010. Le cas d'étude observé est une zone d'aménagement concertée (ZAC) planifiée par un établissement public d'aménagement dans le cadre d'une opération d'intérêt national (OIN) lancée en 2007 : l'OIN Seine amont, dont l'EPA-ORSA est le maître d'ouvrage créé *ad-hoc* par l'État pour les opérations d'urbanisme sur le territoire de l'OIN (EPA-ORSA, 2007). Une OIN consiste à affecter à l'État les compétences d'urbanisme sur un espace défini, notamment la délivrance des permis de construire et la création des ZAC. L'OIN Seine amont correspond bien à l'idée de densification et de renouvellement urbain du fait de son emprise géographique couvrant des zones déjà urbanisées.

20 Le cas d'étude est le projet de la ZAC des Ardoines qui vise à construire à Vitry-sur-Seine, en bordure du fleuve, près de 700 000 m2 de surface bâtie neuve majoritairement affectés au bureau et au logement (figure 1). L'EPA-ORSA prévoit la livraison ces prochaines années de 12 500 logements en cumulant les ZAC qu'il planifie (EPA-ORSA, 2015) tandis que la ZAC des Ardoines engendre 3 300 logements. À titre comparatif, l'objectif de l'Établissement public territorial n° 12 – territoire métropolitain institué le 1er janvier 2016 dans lequel est localisée l'OIN – est de 5 600 logements par an et celui de la métropole est de 70 000 logements par an (Région Île-de-France et CRHH, 2016).

Figure 1. Situation de la ZAC Ardoines dans les entités administratives l'englobant : Région, Métropole, communes.



Crédit : auteurs.

21 Le stock dans la zone des Ardoines à l'horizon 2026 a été programmé au fil de plusieurs commandes du maître d'ouvrage à des équipes d'urbanisme. En 2011, l'agence d'urbanisme SEURA fournit un Plan guide qui résulte de la commande en 2008 d'un plan « de principe » pour le secteur Seine Ardoines par l'EPA-ORSA. Au printemps 2014, la consolidation « de différentes études dont le plan guide élaboré entre 2008 et 2011 » permet au maître d'ouvrage d'acter un Plan directeur de développement urbain et paysager (EPA-ORSA, 2015). Deux ZAC apparaissent à ce stade, Gare Ardoines et Gare Vitry, créées au nord et au sud de la zone d'aménagement générale tandis que différents scénarios de restructuration ultérieure d'une partie centrale de la zone comprenant la centrale thermique à charbon d'EDF sont étudiés. Par la suite, une maîtrise d'œuvre est choisie par la maîtrise d'ouvrage pour la conception et la coordination de la ZAC. Cette équipe livre un cahier où le programme est topographiquement fixé (TGTFP et *al.*, 2016). Dans ce contexte, la méthodologie générale peut être précisée d'une part comme le récolement de données disponibles et d'autre part comme la production de celles identifiées comme manquantes. La dimension ascendante de la méthode d'analyse métabolique choisie implique un travail topographique et la mise en place de solutions de production de données en fonction de l'état des données fournies de manière standard au fil du projet.

22 Nous allons quantifier les stocks avant et après projet sur la base initiale de la topographie produite pour la ZAC telle que reçue par le maître d'ouvrage en 2016. Le document source fournit des données sur le sol projeté et sur les artefacts bâtis programmés – fonction, forme, hauteur des bâtiments et réseaux. Cependant, plusieurs analyses complémentaires ont dû être réalisées spécifiquement du fait de leur absence au sein des documents standards. Elles concernent d'abord l'estimation du stock de matière contenu dans le sol existant et projeté, puis celui contenu dans les artefacts bâtis, existants et projetés – bâti et réseaux. Nous décrivons d'abord une première méthode visant à caractériser le sol urbain anthropique dans un temps long grâce de manière topo-historique, suivie d'une estimation du sol projeté selon une démarche analogue. Une seconde méthode vise à quantifier les artefacts bâtis existants et projetés en matière grâce à des données libérées par une récente recherche publique.

Le sol existant : données existantes et à produire

23 La couche du sol d'origine anthropique est un parent pauvre des données sur l'état existant du milieu urbain. L'approche la plus répandue du métabolisme territorial basée sur l'approche descendante tend à le négliger, car elle se concentre sur les imports et les exports mesurés *via* leur extraction des données économiques. Le sol n'est pas non plus déductible des données concernant les artefacts anthropiques bâtis – réseaux, bâtiments. Dans le bilan de matières sur lequel peut s'appuyer une étude de métabolisme, le sol apparaît surtout dans les processus d'extractions de matières premières et de mise en décharge, c'est-à-dire au sein des importations ou exportations depuis ou vers la nature, ou plus précisément vers « les composantes naturelles du territoire » (Barles, 2007, 2009).

24 Néanmoins, le sol est un élément prépondérant de tout chantier du fait des terrassements réalisés et de la gestion des terres polluées (Labat et Meulemans, 2016). La mise en décharge, c'est-à-dire la sortie du système socioéconomique, n'est pas une donnée intangible : un processus d'extension urbaine sur une ancienne décharge ou bien de renouvellement urbain sur une zone exhaussée conduit à remobiliser ces matières (Fernandez, 2018). Le déchet ancien intervient alors à nouveau dans le processus de production. Cette remobilisation se traduit par diverses manifestations le plus souvent décrites comme des risques environnementaux ou des surcoûts économiques. Cette position théoriquement ambivalente du sol, de même que celle des artefacts anthropiques enterrés – caves, carrières, fondations –, est due à une position de frontière entre les systèmes structurants du métabolisme : le système socio-économique et les « composantes naturelles du territoire » qui l'entourent, mais dont le cas du sol montre bien qu'elles ne sont souvent qu'un « moins anthropisé ». Une certaine méconnaissance historique ou morphologique du sol explique enfin la difficulté de sa prise en compte formelle dans les flux et les stocks des études métaboliques aussi bien que dans la conception des projets d'urbanisme. Deux dynamiques principales et distinctes semblent toutefois caractériser un état standard du sol urbain.

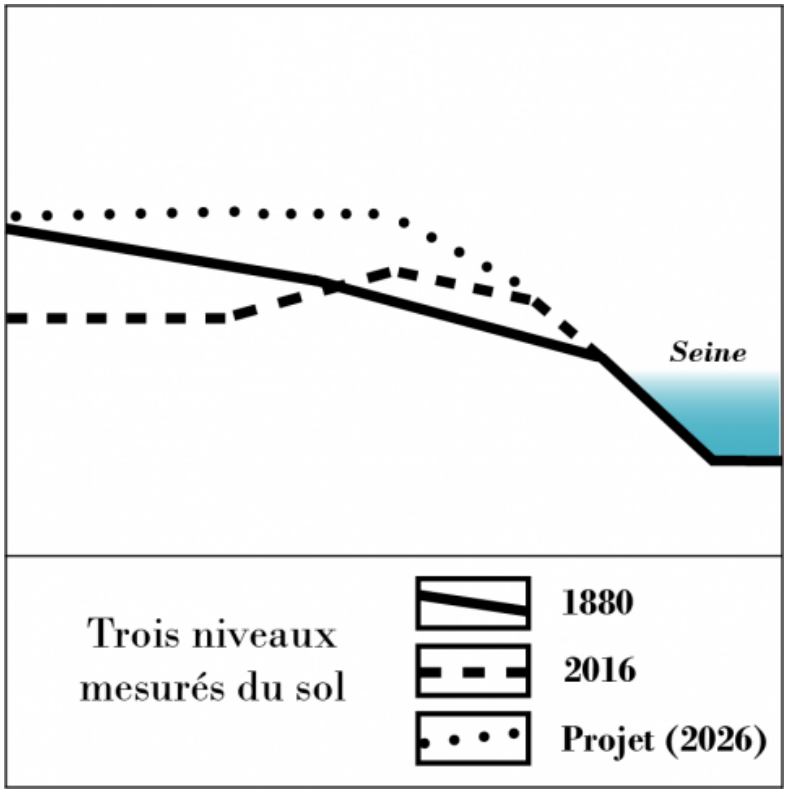
25 En premier lieu, il a pu être soumis à une pollution industrielle d'intensité variable. Les études de pollution de sols sont classiquement élaborées selon une approche historique – histoire industrielle – suivie d'une approche analytique – relevés physico-chimiques de terrain. L'approche historique prend en compte les éléments ponctuels statiques que sont les établissements industriels classés comme dangereux pour l'environnement à des époques diverses. C'est tout particulièrement le cas à Vitry-sur-Seine depuis la fin du XIXe siècle, la commune s'étant largement développée lors de la seconde révolution industrielle (Proquitte, 1930). La base de données BASIAS tenue à jour par le Bureau de la recherche géologique et minière – BRGM – et partiellement libérée est la source d'information nationale classiquement mobilisée (BRGM,

2005). Les données de cette base sont issues pour les périodes anciennes de la compilation des derniers dépouillements de séries historiques des archives départementales qui enrichissent les fiches accumulées par les recherches des années 1960 et 1970 en archéologie industrielle (Daumas et Payen, 1976). Cette base, recensant 3 697 sites dans le Val-de-Marne dont 302 à Vitry-sur-Seine, donne une idée de la densité d'industries polluantes ayant pris place sur la zone d'aménagement des Ardoines entre 1850 et 2005 et donc un niveau prévisible de pollution des sols autour des points recensés. Toutefois, un manuel tel que Sites et sols pollués confirme que l'archéologie des industries ne suffit pas à saisir une morphologie des sols anthropisés : « il serait présomptueux de considérer que seules les installations industrielles ont pu conduire à des impacts significatifs et que l'absence constatée d'activité industrielle suffit à garantir l'absence d'impact. Pourtant, rares sont les référentiels législatifs qui traitent de passifs environnementaux non imputables à une activité professionnelle » (Le Corfec, 2011).

26 En second lieu, le sol en milieu urbain connait de fait des transformations dans un temps long en fonction de l'histoire du lieu étudié (Barles et *al.*, 1999). Le phénomène est à voir comme un corollaire de mouvements de terres issus de l'artificialisation et des phases de l'urbanisation, induisant également les déplacements potentiels de pollutions. C'est par exemple le cas pour les mises en décharge de déchets inertes observées dans les approches de métabolisme territorial ou encore au sein des épandages des boues – déchets organiques – rendus visibles par les approches historiques (Barles, 2005 ; Zeller, 2017). De telles dynamiques volumétriques constituant la couche du sol urbain restent méconnues et redécouvertes lors des diagnostics de pollution de sols sous le nom de remblais. Les amplitudes en épaisseur sont importantes, variant de quelques dizaines de centimètres à plusieurs dizaines de mètres. À l'échelle de la métropole parisienne, le point culminant médiéval est par exemple atteint butte de Bonne-Nouvelle dans le deuxième arrondissement parisien avec 16 mètres de remblais tandis que celui du XXe siècle est atteint dans le parc Georges Valbon à La Courneuve avec 37 mètres stockés à l'issue des opérations d'urbanisme des années 1960 et 1970 (Legrand, 2015 ; Fernandez, 2018). La prise en compte du phénomène implique une lecture topographique tridimensionnelle de la notion d'artificialisation – ou d'anthropisation – du sol urbain. L'absence de représentation épaisse dans les cartographies urbaines limite une telle prise en considération, qu'elle concerne l'existant ou le projet du fait que l'essentiel de l'information disponible provient du support cadastral bidimensionnel construit autour de la spatialisation parcellaire de la propriété. L'application d'outils géomatiques à des sources historiques permet de reconstituer les variations du niveau du sol pour la période contemporaine à l'échelle de la métropole parisienne (Delesse, 1880). L'extraction des données à Vitry-sur-Seine permet d'estimer le volume de sol accumulé ou excavé durant le processus contemporain d'urbanisation sur l'emprise de la ZAC étudiée. La valeur peut en effet être négative si la zone a fait l'objet d'extractions par exemple de matériaux nécessaires à la production de matériaux de construction – sable, granulats.

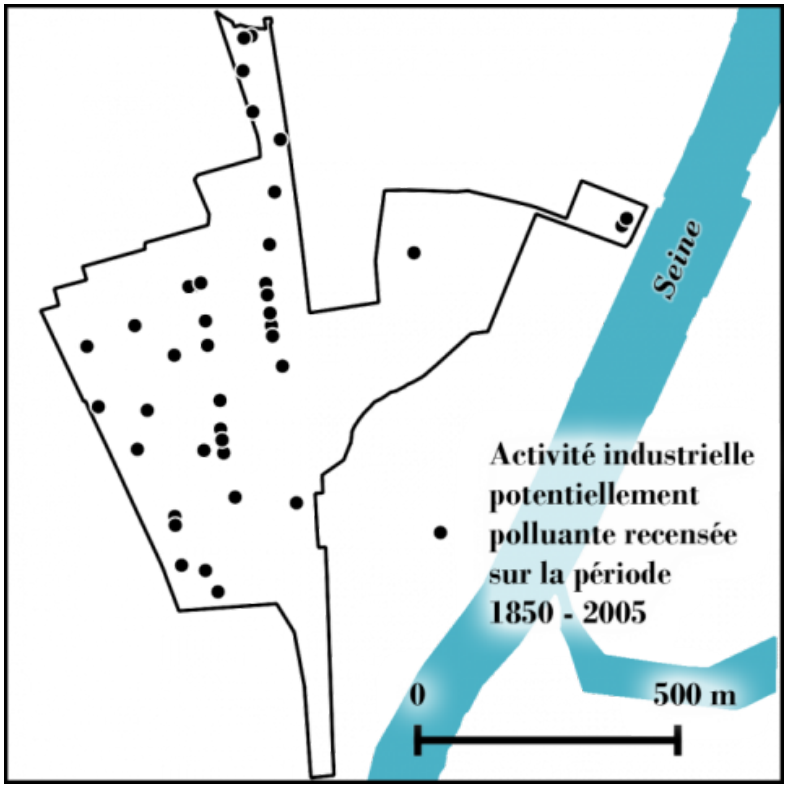
27 Au final, nous pourrons caractériser la morphologie du sol urbain de la zone des Ardoines à partir de la combinaison des deux types d'informations que sont la localisation des activités polluantes ayant historiquement pris place sur la zone et les mouvements volumétriques au cours de la période contemporaine. Les figures 2 et 3 résument le procédé. La disponibilité de ces données dans le domaine public permet de produire des résultats en l'absence de diagnostic concernant la pollution des sols. En somme, ce développement montre la possibilité d'une autonomisation de la démarche scientifique par rapport aux données produites dans le cadre strict du projet d'urbanisme. La section suivante montre qu'elle semble par ailleurs nécessaire du fait que les diagnostics de pollution des sols sont produits à un stade avancé du projet.

Figure 2. Schéma de principe illustrant trois états historiques mesurés du niveau du sol.



Crédit : auteurs

Figure 3. Adresses répertoriées d'activités industrielles polluantes aux XIXe et XXe siècles sur la ZAC des Ardoines à Vitry-sur-Seine.



Crédits : auteurs et extraction des données libres de la base de données BASIAS du Bureau de la recherche géologique et minière (BRGM)

Le sol projeté : données existantes et à produire

28 Au sein du processus du projet d'urbanisme, le sol apparaît en général sous deux aspects. Le premier résulte de la prise en compte des caractéristiques du sol hérité. Comme exposé dans la section précédente, l'accent est alors mis sur les risques encourus – pollution des sols en lien avec l'usage futur des usagers, mouvements de tassements différentiels engendrant de possibles effondrements, *etc.* Cette prise en compte souffre toutefois du flou des informations disponibles. Par exemple dans le cas de la ZAC des Ardoines, l'étude de pollution des sols parvient après la rédaction du cahier de programmation de la ZAC. Auparavant, seule l'importance de surcoûts potentiels est évoquée comme pouvant fragiliser l'équilibre économique de l'aménageur au vu du passé industriel des espaces qu'il vise à réaménager (Cour des comptes, 2015b). Ce

n'est que lors de la phase opérationnelle, lorsque sont estimés précisément les coûts et les procédés à mettre en place pour préparer des parcelles en vue de leur reconstruction, que le sol est réellement pris en compte en tant que contrainte à confronter aux nécessités fonctionnelles et réglementaires (Labat et Meulemans, 2016). La méthode classique d'analyse comprend une partie historique basée sur les données de pollution des sols d'origine industrielle précédemment décrites tandis qu'une section analytique les complète de manière substantielle en fournissant des résultats sur le taux de pollution estimé sur les parcelles en fonction de la profondeur atteinte par les sondages et des analyses physico-chimiques réalisées. Les taux de pollutions des terres induisent ensuite des obligations vis-à-vis des terres excavées réemployables ou non en fonction des aménagements prévus confrontés aux règlements sanitaires.

29 Le second aspect réside dans la topographie future du site. Dans notre exemple, elle vise à respecter un ensemble de contraintes liées au caractère de zone inondable. Cette démarche est à relier à l'objectif de résilience du quartier aménagé, axe fort pris en compte dès le plan guide proposé par l'agence SEURA en 2011 (Adisson et Brun, 2011). Réglementairement, l'OIN est soumise à une version allégée du Plan de prévention des risques d'inondation (PPRI) lui-même issu d'un arrêté du préfet du Val-de-Marne qui s'ajoute aux règles d'urbanisme des lieux concernés (Direction départementale de l'équipement du Val-de-Marne, 2007). La version allégée implique néanmoins des éléments structurants au sein de la zone inondable comme une emprise au sol des constructions limitée à 50 % de l'emprise au sol totale de l'opération, ou bien un niveau habitable inférieur des bâtiments devant être situé au-dessus de la cote des plus hautes eaux connues, assimilées dans le cas de la Seine à la hauteur atteinte par la crue de 1910. Par conséquent, le maître d'ouvrage a développé sa propre réponse respectant de tels critères pour l'adaptation du projet au risque de crue :

30 « Une grande partie du territoire des Ardoines étant soumise aux risques d'inondation, les projets sont conçus dans l'objectif d'une résilience renforcée […] à cet effet, le réseau primaire de voiries structurantes sera positionné au-dessus du niveau des plus hautes eaux : cours nord-sud, liaison est-ouest et rue Salvador Allende » (EPA-ORSA, 2015, p. 15).

31 Le travail de quantification du stock futur devra donc évaluer les quantités de sols qui doivent être déplacées en lien avec la topographie du projet et les contraintes évoquées, en remblaiement et en déblaiement. La qualité du sol résultant de l'histoire devra pour sa part indiquer dans quelle mesure le sol qui sera déplacé devra ou non être évacué, permettant ainsi de lier la variation de stock aux déplacements de matières dans l'espace urbain environnant.

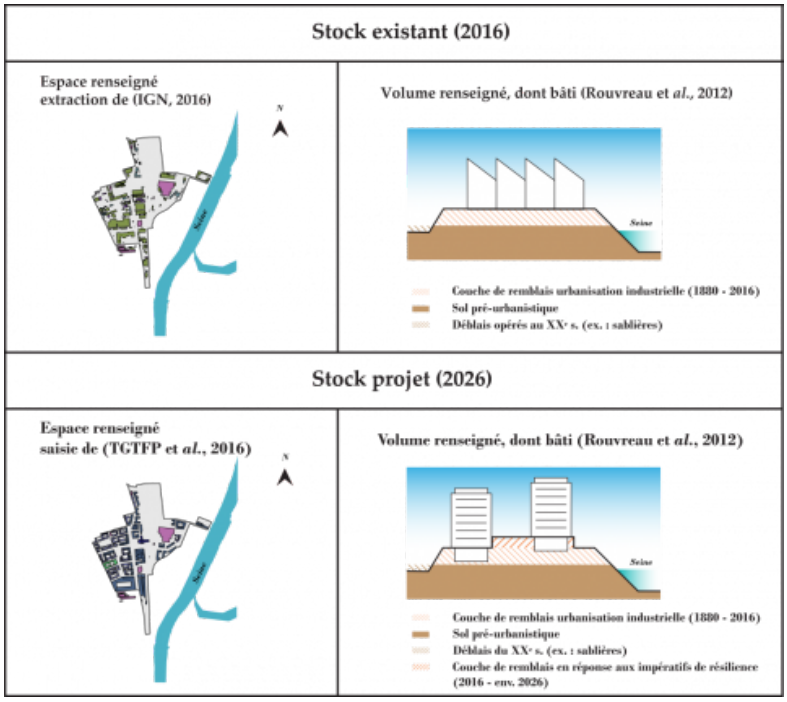
32 Les quantités de sols nécessaires seront par ailleurs analysées en tenant compte des extractions prévues par la Société du Grand Paris (SGP), autre maître d'ouvrage majeur agissant sur la zone *via* la construction d'une gare et un puits d'extraction de terres produites par un tunnelier dans le cadre des travaux du Grand Paris Express. En 2012, la SGP a rendu publics plusieurs documents de planification des travaux de creusement de la ligne 15 renseignant les volumes concernés ainsi que les phasages prévus pour le chantier (SGP, 2012).

Le bâti existant et projeté : données existantes et à produire

33 Dans le cadre des projets de rénovation urbaine, l'estimation de la quantité de matière contenue dans le bâti préexistant n'est pas prise en compte dans le processus de conception du projet d'urbanisme. Or, les enjeux liés au devenir de la matière composant le bâti existant sont essentiels dans une optique d'analyse des effets sur le métabolisme. Au sein d'une gestion de projet standard, ceux-ci s'inscrivent dans le cadre de l'économie du déchet généré par les opérations de déconstruction confiées aux filières économiques de la déconstruction-démolition (Mongeart, 2017). La matière peut alors être par exemple recyclée en sol pour stabilisation ou sous-couche routière (YPREMA, 2016), plus rarement en nouveaux matériaux de construction conformément aux statuts juridiques du réemploi ou de la réutilisation ou bien éliminée et exportée vers de vastes zones de déchargement situées en périphérie des zones urbaines – installations de stockages de déchets inertes (ISDI) (Région Île-de-France, 2015 ; Augiseau, 2017). Cependant, aucune étude spécifique n'est réalisée avant le lancement de la phase du projet visant à la préparation de parcelles neuves et prêtes à bâtir pour les promoteurs. Cet état de fait implique de notre part la mise en place en amont d'une méthode de quantification spécifique dont le principe est schématisé dans la figure 4 avant d'être précisé ci-après.

34

Figure 4. Graphisme illustrant la conversion des données planimétriques en données volumétriques.



Crédit : auteurs.

35 Un récent rapport de recherche publique fournit des éléments utiles pour cette quantification (Michel et *al.*, 2012). Il décrit une méthodologie de suivi des flux des matériaux de construction et de déconstruction pour une ville moyenne, Orléans, en vue de comparer ces flux au stock total de matières contenu dans le système socio-économique existant. Une modélisation estime les stocks associés à des typologies de bâtiments et à leur période de construction. Cette modélisation permet aux auteurs d'estimer en masse les flux liés aux chantiers de déconstruction urbains. La validation du modèle est recherchée à travers une enquête sur les chantiers de construction de la ville opérés entre 2004 et 2006. Si la filière de la démolition et du déchet apparaît comme difficile à tracer en flux réels, le projet parvient en revanche à mesurer en flux réels les matériaux de construction, quoique non ventilés par typologie de bâtiments. Les résultats confirment alors qualitativement les résultats prédits par la modélisation : 96 % des 358 000 tonnes consommées entre 2004 et 2006 sont constitués de béton et de remblais.

36 Le document de restitution de ce projet fournit des valeurs en masse ramenées à la surface de surface hors d'œuvre nette (SHON) des bâtiments – notion juridique remplacée en 2012 par la surface de plancher des constructions (SPC). À titre d'exemple, un bâtiment industriel composé d'une structure métallique, d'un bardage en acier et d'une toiture terrasse est en moyenne composé de 400 kg/m2 de béton, de 83 kg/m2 d'acier et de 33 kg/m2 d'asphalte. Un bâtiment neuf de logements standard construit dans les années 2000 consomme par comparaison 1 880 kg/m2 de béton et 15 kg d'acier. Des tables d'équivalences en matières sont réalisées pour les catégories mises en place dans ce rapport de recherche.

37 La caractérisation du bâti existant est réalisée grâce aux informations contenues dans la base de données spatiale de l'Institut géographique national (IGN) ainsi que d'une reconnaissance de terrain ayant permis d'y affiner certains attributs comme la typologie et dont le maître d'ouvrage nous a fourni les données. Ces éléments ont permis de relier la grande majorité du bâtiment existant aux tables d'équivalences en matières précitées et d'estimer ainsi les masses de matériaux contenues dans chaque bâtiment. Sur les 254 bâtiments présents dans la zone, une trentaine catégorisée comme « bâtiments légers » de très faibles dimensions n'a pas pu être convertie en masse et aurait nécessité une étude de terrain spécifique. Le bâti projeté au sein de la ZAC est simple à catégoriser, car conçu dans la planification selon une typologie minimaliste comprenant le logement, le bureau et l'équipement. Cette typologie est par conséquent aisément reliée aux tables d'équivalences en matières concernant les constructions neuves.

38 Certaines hypothèses quantitatives complémentaires, mais simples ont été réalisées concernant l'état du bâti existant et celui du bâti programmé pour mieux coller aux spécificités topographiques du projet. Dans la modélisation du bâti existant, les bâtiments industriels ont été considérés à un seul étage conformément à la modélisation des bâtiments industriels standards. Pour les autres typologies, le nombre d'étages est calculé sur la base de la hauteur des bâtiments et de la hauteur moyenne des étages décrite dans un document renseignant de manière assez précise le parc résidentiel existant (PACTE, 2017). Pour les sous-sols, nous avons considéré qu'ils étaient en règle générale d'un niveau sous les bâtiments construits, hypothèse validée par un entretien avec le maître d'ouvrage au vu du caractère inondable de la zone d'aménagement. Cette valeur est prise en compte pour le volume des excavations réalisées, mais aussi en tant qu'étage supplémentaire pour la quantification en masse du bâti.

Collecte des données et reproductibilité

39 Cet exposé fouillé sur les modalités d'obtention et de transformation des données vise à montrer la faisabilité de la méthode en se reposant sur des données existantes et libres ou sur la production de certaines données spécifiques. Le tableau 2 présente la synthèse des données sélectionnées en vue de l'obtention des quantités de matières recherchées. Alors que le processus classique du projet d'urbanisme ne

produit pas de lui-même de données sur les stocks de matière existants et futurs, il apparait que l'obtention du cahier d'aménagement de la part de la maîtrise d'œuvre chargée de la conception de la ZAC permet d'y remédier. Le tableau précise également quelles données sont libres, car la mise en place de la méthode est guidée par le souci de sa reproductibilité. Dans ce dernier objectif, certains points méritent d'être précisés concernant le sol et le bâti.

Tableau 2. Des sources de renseignements aux résultats massiques finaux.

Dimension prise en compte	Objet mesuré	Unité de mesure	Source de renseignement quantitatif	Complément source (libre ; non libre ; existence d'une alternative libre)	Source de renseignement qualitatif	Complément source (libre ; non libre ; existence d'une alternative libre)	Matières	Unité finale
Artefacts bâtis	Réseau existant déconstruit	mètres	BD TOPO (IGN)	Non libre : existence d'une alternative libre	Michel et *al.* (2012)	Libre	Béton, acier, *etc.*	tonne
	Réseau projeté	mètres	TGTFP et *al.* (2016)	Non libre : saisie manuelle	Michel et *al.* (2012)	Libre	Béton, acier, *etc.*	tonne
	Bâti existant déconstruit	mètres carrés et nombre d'étages	BD TOPO (IGN)	Non libre : existence d'une alternative libre	(Michel et *al.* (2012)	Libre	Béton, acier, *etc.*	tonne
	Bâti projeté	mètres carrés et nombre d'étages	TGTFP et *al.* (2016)	Non libre : saisie manuelle	Michel et *al.* (2012)	Libre	Béton, acier, *etc.*	tonne
Sol	Sol existant excavé	mètres cubes	Delesse (1880)	Libre	Avant 2017 : BASIAS (1850-2005)	Partiellement libre	Terres	tonne
					En 2017 : étude de pollution des sols	Non libre		
	Sol projeté	mètres cubes	RGE ALTI (IGN)	Non libre : existence d'une alternative libre	À déterminer : voir texte	-	Terres	tonne
			TGTFP et *al.*, (2016)	Non libre : saisie manuelle				

40 La principale contribution en termes de données neuves ou ré-agencées concerne le sol. Nous avons montré qu'avant l'obtention de l'étude historico-analytique fournie par le maître d'ouvrage en 2017, une approche topo-historique basée sur des sources libres fournit des résultats déjà très consistants.

41 Concernant le bâti, l'existant est renseigné par des données non libres provenant de l'Institut géographique national (IGN). Ce type de données a dû être exceptionnellement privilégié pour ce travail, car les données libres ne fournissaient pas la hauteur des bâtiments sur la zone étudiée. Cependant, les espaces urbains font ces dernières années l'objet de libération de données – par exemple pour Paris par l'Atelier parisien d'urbanisme (APUR) – ou de production collaborative de données de qualité – par exemple des saisies d'*Open Street Map* – qui pourraient aisément permettre d'y remédier. La transposition en matière des artefacts anthropiques a été réalisée grâce aux résultats de travaux scientifiques publics issus de la modélisation au cours des années 2000 de catégories de bâtis standards. Leur disponibilité est permanente, mais peut sans doute bénéficier d'actualisations et d'affinages.

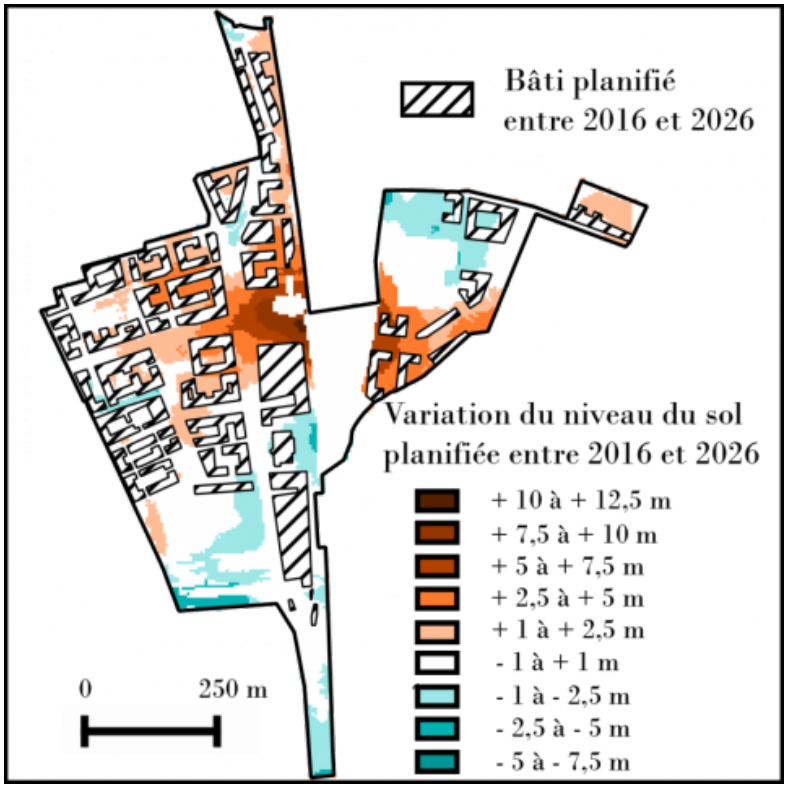
Résultats liés au stock

Le sol : résultats graphiques et quantitatifs

42 La méthode conçue permet de quantifier et de qualifier les états existant et projeté pour le sol. Nous présentons dans un premier temps les masses mues par le projet puis les explications qui influencent leur devenir prévisible qui réside dans l'état existant. La figure 5 représente les variations d'épaisseurs du sol

telles que planifiées par le projet. La quantité estimée de sols supplémentaires prévue sur l'emprise non bâtie de la ZAC est de 264 500 m3. Le volume de sol à extraire sur l'emprise non bâtie est de 104 300 m3. Le volume de sol à extraire en vue du creusement des sous-sols des bâtiments programmés est de 164 200 m3. La conversion en masse pour les terres est effectuée à l'aide du ratio de 2 tonnes (t) (= 103 kg) par m3 couramment employé par la Société du Grand Paris (SGP, 2012).

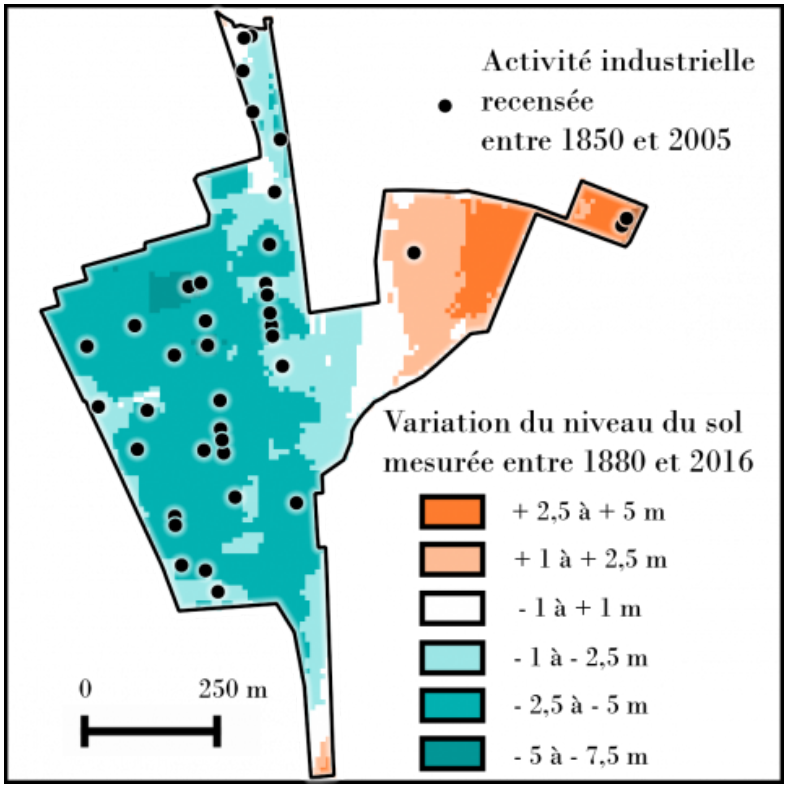
Figure 5. Variation du niveau du sol planifiée au terme du projet.



Crédit : auteurs.

43 La figure 6 concerne le sol existant et démontre que l'emprise concernée par le projet a subi des extractions depuis la fin du XIXe siècle et qui ont eu pour effet d'abaisser le niveau du sol. Ce résultat obtenu sur une base cartographique historique est confirmé par la présence de nombreuses sablières observées dans la zone des Ardoines sur une carte de 1937 produite par le service départemental des Ponts-et-Chaussées consultable aux archives municipales de Vitry-sur-Seine. L'industrie du sable s'est en effet développée en amont de la Seine durant la fin du XIXe siècle et le début du XXe siècle afin d'approvisionner l'extension de Paris en matériaux de construction (Duhau, 2009). La zone de la ZAC Ardoines est donc majoritairement caractérisée par une absence de remblais.

Figure 6. Variation du niveau du sol mesurée entre 1880 et 2016 et activités industrielles recensées entre 1850 et 2005.

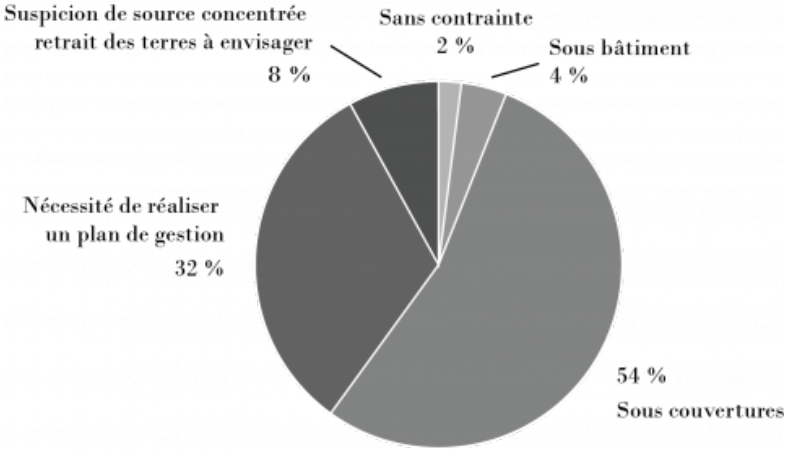


Crédit : auteurs.

44 Une telle observation pourrait aller dans le sens d'un sol peu contaminé, mais le phénomène est ici contrebalancé par la densité d'activités polluantes répertoriées s'étant développées dans la zone depuis la fin du XIXe siècle. L'extraction des points de la base de données BASIAS observable sur la figure 6 donne 39 points répertoriés sur la zone aménagée. Il s'agit d'une importante concentration d'activités polluantes parmi lesquelles 11 ateliers – métallurgie, traitement de surfaces, traitement des métaux, etc. –, 4 dépôts de produits polluants, 4 garages, 7 fabriques et 3 industries chimiques. La spatialisation de l'histoire industrielle laisse donc à penser que les sols sont fortement pollués.

45 Ce résultat qualitatif est confirmé par l'étude analytique obtenue par le maître d'ouvrage en 2017 qui indique au sein de la figure 7 que 98 % des sols sont contaminés à des degrés variés. Parmi eux, 8 % seraient à « retirer » et 32 % nécessiteraient un « plan de gestion » dont le devenir dépend d'arbitrages entre une dépollution in situ, un confinement ou une mise en décharge (Circulaire du 08/02/07 relative aux sites et sols pollués). Les ratios indiqués par les règlements sanitaires permettent par ailleurs de remployer une partie du sol – ici l'estimation est de 58 % – sous certaines contraintes, par exemple sous couverture dont on peut faire l'hypothèse de l'imperméabilité de type dalle, bitume ou sous-sols étanchéifiés des bâtiments. Une conséquence du renouvellement urbain qui implique de privilégier des sols déjà utilisés à des extensions urbaines en terrain agricole apparaît donc de manière explicite à travers la question du sol.

Figure 7. Devenir des terres excavées durant le projet selon l'étude commanditée par le maître d'ouvrage.



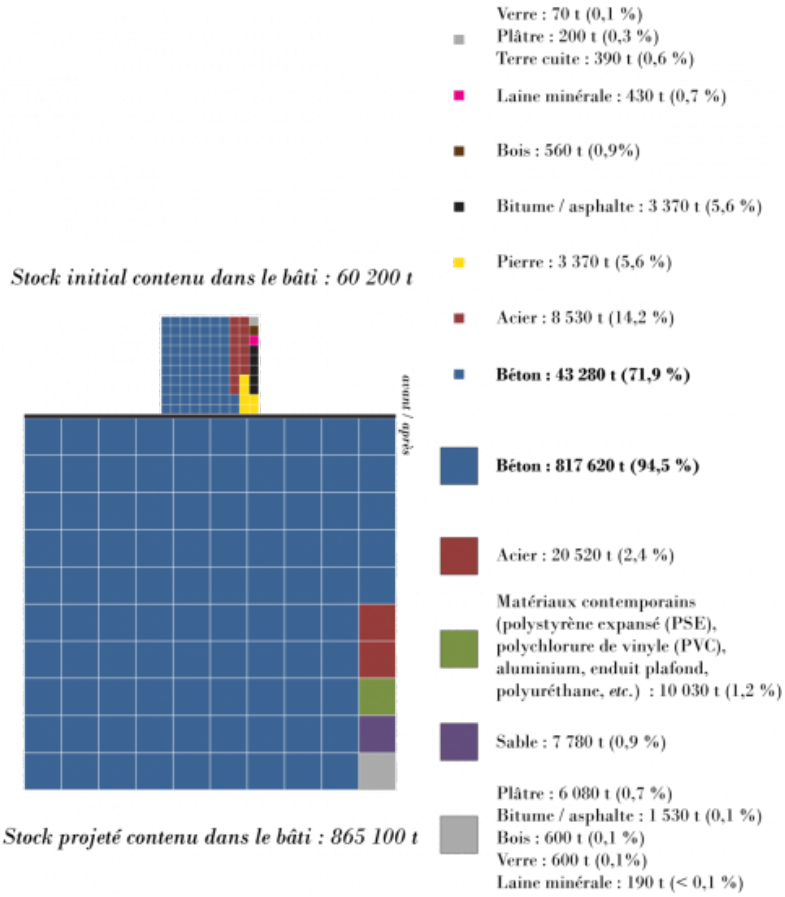
Crédit : auteurs et EPA-ORSA.

46 Enfin, la Société du Grand Paris (SGP) projette d'extraire dans la zone des Ardoines une partie des terres issues du travail du tunnelier de la ligne 15 du métro prévu à construction. Le puits d'extraction sera actif au sein de la zone dans une période inclue dans celle de l'aménagement de la ZAC. Les déblais prévus pour ce puits d'extraction sont de 620 000 t (SGP, 2012) et de 170 000 t pour les extractions liées à la gare. Eu égard aux besoins de la zone des Ardoines, ces terres sont potentiellement intéressantes, car majoritairement non contaminées étant donné que les couches géologiques excavées se situent en dessous des couches anthropisées du sol précédemment décrites.

Les artefacts bâtis : résultats graphiques et quantitatifs

47 La figure 8 présente les masses respectives des matières liées à la déconstruction des artefacts existants et celles liées au bâti construit. Les réseaux ne sont pas pris en compte au sein de ces résultats. Le béton est la matière à plus fort enjeu au vu de la comparaison du stock bâti existant et du stock bâti projeté. Il en résulte de manière claire que les quantités de béton à importer dans la zone dépassent largement les quantités déjà présentes et susceptibles de recyclage ou de réemploi.

Figure 8. Le bâti traduit en masses selon les typologies de matériaux.



Crédit : auteurs.

Identification des leviers liés à l'étude des stocks

48 Le tableau 3 fournit la synthèse des principales quantités précédemment identifiées concernant le différentiel de stocks dans la ZAC des Ardoines sur le pas de temps approximatif de la dizaine d'années estimée liée à la durée de l'opération. Ces valeurs de synthèse tiennent compte du sol existant, du bâti existant, du sol projeté et du bâti projeté.

Tableau 3. Résultats concernant les stocks de matières, exprimés en tonnes.

	Raison	Matière	Masse
Extraction de matières	Sol de l'aménagement	Terres anthropisées	537 000 t
	Déconstruction	Béton	43 000 t
	Déconstruction	Acier	8 500 t
	Grands travaux SGP : gare et tunnelier	Terres majoritairement issues des couches géologiques	790 000 t
Introduction de matières	Construction	Béton	820 000 t
	Construction	Acier	20 500 t
	Remblais	Terres	529 000 t

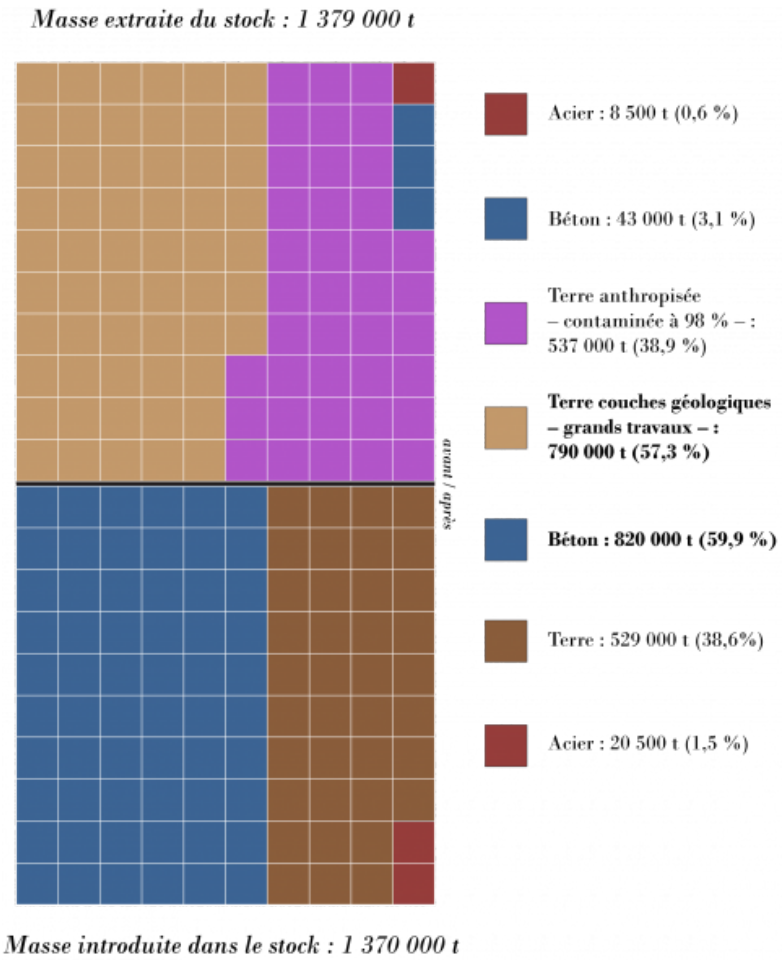
49 L'analyse quantitative observe le projet d'urbanisme en tant que projet de remplacement du stock – extraction de matières – par un nouveau stock – introduction de matières. Dans ce paradigme, les résultats obtenus permettent de discuter des leviers d'action visant à améliorer l'impact du projet du point de vue du métabolisme. La terre géologique non contaminée, la terre anthropique majoritairement contaminée et le béton sont les principaux vecteurs d'évolutions des stocks. Il en résulte que la recherche de leviers d'amélioration peut se concentrer sur ces matières. Sur cette base, deux premières boucles sont

envisageables comme des hypothèses dont la crédibilité a été confirmée lors d'entretiens réalisés au cours de l'étude avec plusieurs acteurs du secteur de l'aménagement[1].

50 La première consiste à recycler le béton en produits de remblaiements. Elle nécessite soit un échange de flux avec un autre territoire que celui du projet par un passage en usine de transformation, soit un concassage sur place. Le béton recyclé en tant que granulat pour du béton neuf n'est actuellement pas un processus utilisé dans l'industrie cimentière.

51 La seconde consiste à réemployer la terre polluée sous la forme de remblais lorsque les normes sanitaires le permettent, en l'occurrence sous les immeubles et sous les revêtements des espaces publics. Une telle boucle a des répercussions possibles sur le *design* de l'espace public en induisant une imperméabilisation des sols liée aux modalités de contention de la pollution vis-à-vis des habitants. Elle peut avoir une incidence sur les possibilités ultérieures d'aménagement en privilégiant des paysages minéraux ou encore sur l'acceptabilité du projet.

Figure 9. Masses de matières extraites et introduites par le projet – d'après les résultats du tableau 3.



Crédit : auteurs.

52 La figure 9 propose une vision graphique du tableau 3 et vise à poursuivre la réflexion sur la possibilité de nouvelles boucles matérielles. Cette figure suggère la vision d'un équilibrage des masses avant et après le projet. Il s'agit pourtant largement d'une illusion dont il convient d'expliquer précisément les causes et d'en déduire certaines conséquences.

53 Le projet repose sur la mobilisation de trois grandes masses, dont l'origine et le devenir sont à chaque fois différents. La première est celle des terres anthropisées. La localisation du projet en zone inondable implique, par obligation de résilience, le rehaussement général des voiries au vu de la solution privilégiée par la maîtrise d'ouvrage. Or, la réglementation vis-à-vis du risque d'inondation implique que le volume d'expansion des crues ne soit pas modifié au sein de l'emprise du projet. Les volumes compensant les apports liés à la surélévation se situent dans la partie souterraine avec en moyenne un niveau de sous-sol prévu sous les bâtiments. C'est alors que l'histoire industrielle du site ressurgit à travers les terres anthropisées contaminées par les activités historiques. Ces terres sont réemployables sous certaines conditions impliquant notamment leur confinement par rapport à la surface. Le confinement des sols est requis dans une zone inondable, ce qui peut sembler contradictoire au vu de l'imperméabilisation induite selon le mode de confinement privilégié. On saisit toutefois la logique d'une pratique courante dans le processus d'aménagement qui implique de maintenir sur site la majorité de telles terres contaminées afin de limiter les flux importants et onéreux qu'impliquerait leur transfert et leur traitement sous le statut de déchet en installations de stockage pour déchets inertes (ISDI).

54 Deux autres grandes masses contribuent au bilan de l'opération. En sortie, les excavations du métro du Grand Paris représentent plus de 57 % des matières ayant vocation à être extraites et/ou évacuées du site. En entrée, le stock projeté inclut près de 60 % de béton qui sera importé. Ces deux grandes quantités, fortuitement proches, expliquent au final l'équilibre que suggère une lecture rapide de la figure 8, équilibre

qui n'implique néanmoins pas nécessairement une réduction des flux. Il résulte deux conséquences importantes pour notre problématique.

55 La première concerne la recherche plus systémique de potentielles boucles matérielles. Elle permet une saisie précise des enjeux liés aux deux boucles – ou leviers d'améliorations – détectées. Le premier levier potentiel concerne le béton contenu dans les bâtiments existants. Nous avons vu que l'option de réemploi de cette matière représente un levier possible du point de vue du recyclage, notamment sous certaines conditions de modification des pratiques. Mais elle reste toutefois marginale en termes de volumes. Le second levier de bouclage concerne les terres contaminées dont le volume est très important et dont nous avons vu que le réemploi est possible sous certaines conditions. Au final, la prise en considération de ces deux boucles indique un potentiel de réemploi sur place de l'ordre de 42 % du stock existant et de 38 % du stock futur, ce dernier chiffre correspondant à la proportion des terres mobilisées en remblais pour le futur projet. Du point de vue de l'analyse des stocks, la recherche de bouclage des flux concerne en fait majoritairement les terres anthropisées.

56 La seconde conséquence réside dans la mise en évidence des deux grandes autres masses, incontournables et amenées à former les flux massifs des années à venir. Il s'agit des imports de bétons et des exports de terres d'origine géologique issues du puits d'extraction du tunnel de métro. Leur équilibre fortuit suggéré par la figure 8 ne doit pas masquer qu'il s'agit là en réalité des flux les plus importants.

57 De tels flux ont pour causes principales d'une part l'absence de réemploi ou recyclage concernant les terres d'origine géologique et d'autre part les typologies constructives qui privilégient majoritairement le béton. Ils ont pour conséquences prévisibles des impacts sur les extractions de sables et de granulats en d'autres points du territoire, tandis qu'en sortie les terres d'origine géologique restent à éliminer en tant que déchets inertes, à valoriser à travers les remblaiements d'autres opérations d'urbanisme ou par le comblement de carrières. Ces flux, estimables à plus d'un million et demi de tonnes au cours des années à venir, l'équivalent de plus de cent mille trajets pleins en camions, auront un impact paysager, écologique, territorial qui reste à caractériser. Ils représentent de fait la matérialité des impacts du projet d'urbanisme au sein du métabolisme urbain. La recherche d'innovations en termes de circularité semble se situer à cet endroit.

Les perspectives

58 Le point de départ de ce travail réside dans la mise en évidence par le métabolisme territorial que les grandes masses de la consommation de ressources et de la production de déchets au sein des villes occidentales sont liées à la construction et à la déconstruction. Depuis le milieu des années 2000 dans le contexte du Grand Paris qui se caractérise notamment par la relance de grandes opérations d'urbanisme d'initiatives étatiques suivies plus récemment par celles d'aménageurs locaux (ORF, 2014), lesdits projets sont un terrain privilégié pour développer une méthode d'analyse du projet d'urbanisme par la matière qu'il mobilise. Une meilleure compréhension des mécaniques à l'œuvre apparaît importante pour caractériser les effets à venir sur le métabolisme territorial. En effet, tandis que l'orientation politique récente privilégie les grands projets de construction visant à une production massive de logements neufs, les documents-cadres de l'urbanisme préconisent par ailleurs la fin de l'étalement urbain et une ville plus économe en ressources.

59 La méthode mise en place repose sur l'observation initiale que le projet d'urbanisme est pensé, dessiné puis mis en œuvre par les professions impliquées comme un changement de stock au sein d'un espace donné. La méthode est développée sur la base de l'appréhension topographique prenant en compte le contexte topo-historique du lieu où le projet prend place, le contexte réglementaire ainsi que les pratiques de l'aménagement et de la construction qui l'entourent. Elle se base par ailleurs sur les outils des systèmes d'information géographique, alimentés par un maximum de données libres et par celles produites par le maître d'ouvrage au cours de l'évolution du projet. Elle vise donc à la reproductibilité pour des projets d'urbanismes issus de maîtres d'ouvrages plus variés que le seul exemple étudié.

60 Les principaux résultats quantitatifs indiquent que la terre et le béton sont de loin les principales matières identifiées en tant que vecteurs de variations des stocks existant et projeté. Sur cette base quantitative, nous saisissons la contradiction principale avec l'ambition affichée de développer une circularité accrue de la matière. Elle réside, lors du processus d'aménagement, dans l'import massif de matières liés aux processus standards de productions de bâtiments – constituées à 95 % de bétons – combinée à l'export massif de terres. Une contradiction propre à l'exemple étudié apparaît dans l'exportation des terres les moins contaminées par le passé industriel du site alors que les terres contaminées resteront sur place dans le contexte juridique du réemploi. Ce dernier leur évite de prendre un onéreux statut de déchets et permet par ailleurs de remplir la condition de conformité aux règles du plan de prévention des inondations.

61 Mettant la focale sur les flux de matières provenant de l'extraction ou allant vers le statut de déchet stocké, de telles contradictions illustrent une façon de renouveler la ville structurellement peu circulaire. Dans le cas étudié, des travaux exceptionnels consistant en une extraction massive de terres se surajoutent aux flux induits par les travaux, sans que la Société du Grand Paris n'ait pour mission spécifique de les diminuer.

62 Ceci nous conduit à réfléchir de manière critique au concept de densification urbaine en prenant en considération les injonctions courantes à la valorisation et au recyclage prônées par l'économie circulaire. La matière comprise dans l'emprise du projet est insuffisante pour envisager de reconstruire la ville sur la ville si l'on se cantonne aux artefacts bâtis. Cependant, l'intérêt fortuit du cas d'étude réside en la présence des terres massivement extraites du sous-sol en vue de la construction d'une ligne de métro. Il permet de pointer une autre option pour une diminution des prélèvements en ressources dans l'environnement. Dans le paradigme de l'analyse des stocks avant/après projet, il apparaît que la construction massive d'artefacts bâtis en terre pourrait améliorer l'impact métabolique en permettant un bouclage entre les extractions de

ressources et la production de déchets. L'actualité montre que des réflexions se multiplient qui voient dans la construction en terre une alternative à la consommation de béton, parmi les architectes et maintenant parmi les maîtres d'ouvrage et d'œuvre qui expérimentent des procédés constructifs accordant une place accrue à la terre. C'était par exemple l'objet de l'exposition *Terres de Paris*, organisée en 2017 au Pavillon de l'Arsenal (Joly et Loiret, 2016) ou d'initiatives comme celle de la Ville de Sevran ou du promoteur Quartus à Ivry-sur-Seine.

63 Au final, l'étude permet de formaliser une approche matérielle de la circularité sur la base de l'approche métabolique et de pointer des contradictions à résoudre. Après avoir observé les mécanismes associés aux pratiques les provoquant de manière structurelle et chronique, la construction en terre crue apparaît comme une piste à creuser pour répondre aux enjeux soulevés par le cas étudié. Une conclusion corolaire est que certaines contradictions s'avèrent insolubles sur un espace limité géré par des maîtrises d'ouvrages aux missions très segmentées. Dans l'hypothèse de procédés permettant un bouclage des stocks de matières, des flux s'avèrent nécessaires, par exemple avec des territoires disposant de centres de production et de transformation – que l'on pense à un centre de production de granulats recyclés pour bétons ou à un centre de production de matériaux de construction en terre crue. La question devient alors celle des flux à planifier au-delà d'un périmètre foncier limité, à une échelle élargie.

Remerciements

64 Ce travail a été réalisé grâce au soutien du Labex Futurs Urbains de l'université Paris-Est Marne-la-Vallée. Le travail graphique de la figure 4 bénéficie d'une aide de Terric Jouaillec.

Bibliography

Adisson, F. et A. Brun, 2011, Renouvellement urbain et risque inondation : le plan-guide « Seine-Ardoines », *CyberGeo : European Journal of Geography* [En ligne], 571, URL : https://journals.openedition.org/cybergeo/24751, Consulté le 01/01/2019.

Athanassiadis, A., P. Bouillard, R. H. Crawford et A. Z. Khan, 2016, Towards a dynamic approach to urban metabolism, *Journal of Industrial Ecology*, 21, 2, pp. 307-319

Augiseau, V. et S. Barles, 2016, Studying construction materials flows and stock : a review, *Resources, Conservation and Recycling*, 123, pp. 153-164
DOI : 10.1016/j.resconrec.2016.09.002

Augiseau, V., 2017, *La dimension matérielle de l'urbanisation. Flux et stocks de matériaux de construction en Île-de-France*, thèse de l'Université Paris I Panthéon-Sorbonne sous la direction de Sabine Barles, 554 p.

Barles, S., H. Galinié et A. Guillerme, 1999, Évolution temporelle des sols urbains, 14 p., Barles, Breysse, Guillerme, Leyval, *Le sol urbain*, Économica, Paris, pp. 261-275

Barles, S., 2005, *L'invention des déchets urbains. France : 1790-1970*, Champ Vallon, Seyssel, 304 p.

Barles, S., 2007, *Mesurer la performance écologique des villes et des territoires. Le métabolisme de Paris et de l'Île-de-France, Rapport de recherche final pour le compte de la ville de Paris*, p. 12, [En ligne] URL : http://metabolisme.paris.fr/data/pdf/Barles-EI-Paris.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Barles, S., 2009, Urban metabolism of Paris and its region, *Journal of industrial ecology*, 13, 6, pp. 898-913
DOI : 10.1111/j.1530-9290.2009.00169.x

Blomqvist, L., B. W. Brook, E. C. Ellis, P. M. Kareiva, T. Nordhaus et T. Shellenberger, 2013, Does the shoe fit ? Real versus imagined ecological footprints, *PLOS Biology* [En ligne], 11, 11, e1001700, URL:. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001700, Consulté le 01/01/2019.
DOI : 10.1371/journal.pbio.1001700

Bureau de la recherche géologique et minière (BRGM), 2005, *Inventaire historique de sites industriels du département du Val-de-Marne (94) en 2005. Rapport final*, 49 p., [En ligne] URL : http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54092-FR.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Buclet, N., S. Barles, J. Cerceau et A. Herbelin, 2015, L'écologie territoriale entre analyse de métabolisme et jeux d'acteurs, 32 p., Buclet, *Essai d'écologie territoriale. L'exemple d'Aussois en Savoie*, CNRS éditions, Paris, pp. 13-45

Cabinet Auxilia et Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), 2014, *Guide méthodologique du développement des stratégies régionales d'économie circulaire en France*, p. 5, [En ligne] URL : http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-strategie-eco-circulaire-201410-rapport-final.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Claval, P. et F. Claval, 1981, *La logique des villes : essai d'anthropologie*, LITEC, Paris, 633 p., XX Pl.

Commissariat général au développement durable (CGDD), 2014, *Comptabilité des flux de matières dans les régions et les départements*. Guide méthodologique, p. 110, [En ligne] URL : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/EIT%20-%20comptabilite%20des%20flux%20de%20matieres.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Cour des comptes, 2015a, *Le rapport public annuel 2015, T. 1 : les observations, vol. 1 : les finances et les politiques publiques*, p. 377, [En ligne] URL : http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/154000108.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Cour des comptes, 2015b, *Rapport particulier. Établissement public d'aménagement Orly-Rungis-Seine amont exercices 2007 à 2012 (actualisation 2013)*, p. 16, [En ligne] URL : https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/EzPublish/20150415-EPA-ORSA-71402.pdf, Consulté le 01/01/2019

Daumas, M. et J. Payen, 1976, *Évolution de la géographie industrielle de Paris et sa proche banlieue au XIXe siècle. Volume 1*, Centre de documentation d'histoire des techniques, Paris, 335 p.

Delesse, A., 1880, *Carte géologique cotée du département de la Seine, publiée d'après les ordres de M. Hérold, sénateur, préfet de la Seine, conformément à la décision du Conseil Général*, L. Wuhrer, Paris, 1 Pl.

Direction départementale de l'équipement du Val-de-Marne, 2007, *Règlement du plan de prévention du risque inondation de la Marne et de la Seine dans le département du Val-de-Marne*, p. 30-31, [En ligne] URL : https://www.data.gouv.fr/storage/f/2014-07-05T19-08-18/5e-ppri2.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Duhau, I., 2009, *La Seine en amont de Paris : les sablières, Inventaire général du patrimoine culturel de la Région Île-de-France*, p. 3, [En ligne] URL : http://patrimoines.iledefrance.fr/sites/default/files/medias/2014/07/6-4-sablieres.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Duvigneaud, P. et S. Denaeyer-De Smet, 1977, L'écosystème urbs. L'écosystème urbain bruxellois, 16 p., Duvigneaud, Kestemond, *Productivité biologique en Belgique. Travaux de la section belge du programme biologique international*, Duculot, Gembloux, pp. 581-597

Établissement public d'aménagement Orly-Rungis-Seine amont (EPA-ORSA), 2007, *Protocole Orly-Rungis-Seine amont*, EPA-ORSA, Choisy-le-Roi, 50 p., [En ligne] URL : http://www.epa-orsa.fr/Publications/Protocole, Consulté le 01/01/2019.

Établissement public d'aménagement Orly-Rungis-Seine amont (EPA-ORSA), 2015, *Orly-Rungis-Seine amont, 2015-2020. Le temps des réalisations. Opérations et projets en développement*, EPA-ORSA, Choisy-le-Roi, 66 p., [En ligne] URL : http://www.epa-orsa.fr/Publications/Operations-et-Projets-2015, Consulté le 01/01/2019.

Eurostat, 2001, *Economy wide material flow accounts and balance with derived resource use indicators. A methodological guide*, Office for official publications of the European Communities, Luxembourg, 92 p., [En ligne] URL : https://ec.europa.eu/eurostat/documents/1798247/6191533/3-Economy-wide-material-flow-accounts...-A-methodological-guide-2001-edition.pdf/, Consulté le 01/01/2019.

Faist Emmenegger, M. et R. Frischknecht, 2003, *Métabolisme des activités économiques du canton de Genève. Phase 1. Rapport final*, p. 19, [En ligne] URL : https://www.genie.ch/data/sources/users/3/2003esumanecometabolismedesactiviteseconomiquesducantondegenevephase1.pdf#viewer.action=downloa Consulté le 01/01/2019.

Fernandez, M., 2018, La strate du sol d'une mégapole : observations localisées sur l'Anthropocène. Les couches issues des périodes préindustrielle et industrielle à Paris, *Géocarrefour*, 92-2, [En ligne] URL : http://journals.openedition.org/geocarrefour/12016, Consulté le 01/01/2019.

Fischer-Kowalski, M., F. Krausmann et B. Smetschka, 2004, Modeling scenarios of transport across history from a socio-metabolic perspective, *Review of Fernand Braudel Center*, 27, pp. 307-342

Giusti, C., D. Gramond, Y. Gunnell et G. Chemla, 2015, The urban toposphere and the vertical city. The environmental sustainability of the vertical city, Appert, *Colloque international La ville verticale – Explorer et penser la dimension verticale de l'urbanisation dans le contexte de mondialisation et de changement climatique*, Lyon 2 - Lumière, 25 novembre 2015.

Joly, S. et P.-E. Loiret, 2016, *Terres de Paris. De la matière au matériau*, Éditions du Pavillon de l'Arsenal, Paris, 47 p.

Kampelmann, S., 2016, Mesurer l'économie circulaire à l'échelle territoriale, une analyse systémique de la gestion des matières organiques à Bruxelles, *Revue de l'OFCE*, 145, pp. 161-184

Kennedy, C., J. Cuddihy 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

Kim, E. et S. Barles, 2012, The energy consumption of Paris and its supply areas from the eighteenth century to the present, *Regional Environmental Change*, 12, 2, pp. 295-310
DOI : 10.1007/s10113-011-0275-0

Labat, T. et G. Meulemans, 2016, Le chantier comme enquête : ce que les sols des villes font à l'architecture, 13 p., Mantziaras, Vigano, *Le sol des villes : ressource et projet*, Metispresses, Genève, pp. 145-158

Le Corfec, Y., 2011, *Sites et sols pollués. Gestion des passifs environnementaux*, Dunod, Paris, p. 329

Legrand, M., 2015, *La mise en ordre écologique des parcs urbains. Savoirs, pratiques et paysages*, thèse du Muséum d'histoire naturelle sous la direction d'Anne-Caroline Prévot et d'Anne Sourdril, 417 p., [En ligne] URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01310791/document, Consulté le 01/01/2019.

Mat, N., J. Cerceau, G. Junqua, B. Duret, F. Margaine, J.-B. Bahers et F. Julien Saint-Amand, 2012, *Projet DEPART : de la gestion des déchets à l'économie circulaire, étude de l'émergence de nouvelles dynamiques partenariales. Cas pratiques et perspectives dans les territoires industrialo portuaires. Rapport final*, ADEME, Paris, 199 p.

Michel, P., M. Serrand, D. Montfort-Climent, E. Jayr, P.-E. Papinot et L. Rouvreau, 2012, *Projet ANR ASURET : rapport final. Tâche 4.2 : analyse de flux de matière du secteur de la construction à l'échelle de l'ouvrage et du territoire*, 131 p., [En ligne] URL : http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61849-FR.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Mongeart, L., 2017, De la démolition à la production de graves recyclées : analyse des logiques de proximité d'une filière dans l'agglomération lyonnaise, *Flux*, 108, pp. 64-79
DOI : 10.3917/flux1.108.0064

Obernosterer, R., P. Brunner, H. Daxbeck, T. Gagan, E. Glenck, C. Hendricks, L. Morf, R. Paumann et I. Reiner, 1998, *Urban metabolism : the city of Vienna*, Vienna university of technology, Institute for water quality end waste management, Department of waste management, p. 25, [En ligne] URL : https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_143905.pdf Consulté le 01/01/2019.

Observatoire régional du foncier en Île-de-France (ORF), 2014, *La relance de l'urbanisme opérationnel : quelles pistes d'innovation ?*, 60 p., [En ligne] URL : http://www.orf.asso.fr/wp-content/uploads/2017/04/orf_rapport2014_la_relance_de_lurbanisme_operationnel_quelles_pistes_dinnovation.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Programme d'action pour la qualité de la construction et la transition énergétique (PACTE), 2017, *Analyse détaillée du parc résidentiel existant : version 2.0*, 128 p., [En ligne] URL : http://www.programmepacte.fr/sites/default/files/pdf/ranalyseparcresidentielexistantneufrenojuil17073web.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Proquite, H., 1930, *L'évolution contemporaine de Vitry-sur-Seine*, thèse de doctorat de l'institut d'urbanisme de l'université de Paris sous la direction de Marcel Poëte, 79 p.

Région Île-de-France, 2013, *Schéma directeur de la région d'Île-de-France (SDRIF), cahier 2 : défis, projet spatial régional et objectifs*, p. 93, [En ligne] URL : http://www.iau-idf.fr/fileadmin/DataStorage/SavoirFaire/NosTravaux/planification/sdrif/Fasc-2.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Région Île-de-France, 2015, *Plan régional de prévention et de gestion des déchets issus des chantiers du bâtiment et des travaux publics (PREDEC)*, 256 p., [En ligne] URL : https://www.iledefrance.fr/sites/default/files/predec_adopte_avec_couverture.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Région Île-de-France, CRHH, 2016, *Schéma régional de l'habitat et de l'hébergement : déclinaison territoriale des orientations, Volet 2*, p. 10., [En ligne] URL : http://www.drihl.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/volet_2__CRHH18octobre_cle7a4afd.pdf, Consulté le 01/01/2019.

Société du Grand Paris (SGP), 2012, *Dossier d'enquête préalable à utilité publique. Tronçon Pont-de-Sèvres Noisy-Champs (ligne rouge - 15 sud). Pièce G.6.3 : schéma d'évacuation des déblais*, p. 126, [En ligne] URL : http://www.enquetepubliquelignerouge15sud.fr/dossier-enquete-publique/Document_G-63/, Consulté le 01/01/2019.

TGTFP (architecture & urbanisme), Florence Mercier (paysagiste), IGREC (VRD et génie civil), INFRA Services (ingénierie de l'hydraulique), JPH Conseil (consultant ferroviaire), 2016, *EPA-ORSA, ZAC Gare Ardoines. Plan de référence*, EPA-ORSA, Choisy-le-Roi, 72 p.

Wackernagel, M., 1994, *Ecological footprint and appropriated carrying capacity : a tool for planning toward substainability*, thèse de University of British Colombia, 347 p., [En ligne] URL : https://www.circle.ubc.ca/bitstream/handle/2429/7132/ubc_1994-954027.pdf?sequence=1, Consulté le 01/01/2019.

Wackernagel, M. et W. E. Rees, 1996, *Our ecological footprint : reducing human impact on the Earth*, New Society Publishers, Gabriola Island (Canada), 160 p.

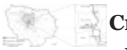
YPREMA, 2016, *Rapport développement durable*, 46 p., [En ligne] URL : http://www.yprema.fr/index.php?rub=developpement_durable, Consulté le 01/01/2019.

Zeller, O., 2017, Structurations de l'espace fécal à Lyon au XVIIIe siècle, *Flux*, 108, pp. 8-21
DOI : 10.3917/flux1.108.0008

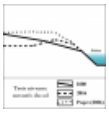
Notes

1 Ces entretiens techniques, qui ont fait l'objet de comptes rendus, ont été réalisés avec la maîtrise d'ouvrage du projet (l'aménageur EPA-ORSA), la direction de l'ingénierie territoriale de l'aménageur Grand Paris Aménagement et avec la direction technique de l'entreprise SEMOFI spécialisée dans la géotechnique et la dépollution des sols.

List of illustrations

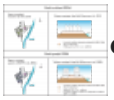


Title	Figure 1. Situation de la ZAC Ardoines dans les entités administratives l'englobant : Région, Métropole, communes.
Credits	Crédit : auteurs.
URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/23302/img-1.png
File	image/, 240k

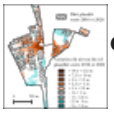


Title	Figure 2. Schéma de principe illustrant trois états historiques mesurés du niveau du sol.
Credits	Crédit : auteurs
URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/23302/img-2.png
File	image/, 24k

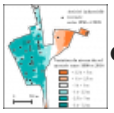
Title	Figure 3. Adresses répertoriées d'activités industrielles polluantes aux XIXe et XXe siècles sur la ZAC des Ardoines à Vitry-sur-Seine.
Credits	Crédits : auteurs et extraction des données libres de la base de données BASIAS du Bureau de la recherche géologique et minière (BRGM)
URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/23302/img-3.png
File	image/, 139k



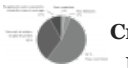
Title	Figure 4. Graphisme illustrant la conversion des données planimétriques en données volumétriques.
Credits	Crédit : auteurs.
URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/23302/img-4.png
File	image/, 214k



Title	Figure 5. Variation du niveau du sol planifiée au terme du projet.
Credits	Crédit : auteurs.
URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/23302/img-5.png
File	image/, 208k

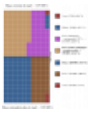


Title	Figure 6. Variation du niveau du sol mesurée entre 1880 et 2016 et activités industrielles recensées entre 1850 et 2005.
Credits	Crédit : auteurs.
URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/23302/img-6.png
File	image/, 211k



Title	Figure 7. Devenir des terres excavées durant le projet selon l'étude commanditée par le maître d'ouvrage.
Credits	Crédit : auteurs et EPA-ORSA.
URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/23302/img-7.png
File	image/, 77k

Title	Figure 8. Le bâti traduit en masses selon les typologies de matériaux.
Credits	Crédit : auteurs.
URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/23302/img-8.png
File	image/, 151k



Title	Figure 9. Masses de matières extraites et introduites par le projet – d'après les résultats du tableau 3.
Credits	Crédit : auteurs.
URL	http://journals.openedition.org/vertigo/docannexe/image/23302/img-9.png
File	image/, 117k

References

Electronic reference
Mathieu Fernandez, Corinne Blanquart and Éric Verdeil, « La terre et le béton : le projet d'urbanisme considéré sous l'angle du métabolisme territorial », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [Online], Volume 18 Numéro 3 | décembre 2018, Online since 05 December 2018, connection on 19 August 2019. URL : http://journals.openedition.org/vertigo/23302 ; DOI : 10.4000/vertigo.23302

About the authors

Mathieu Fernandez
Chercheur, LABEX Futurs Urbains - Ifsttar AME SPLOTT, Marne-la-Vallée, France, courriel : mathieu.fernandez@ifsttar.fr, mathieufernandez@yahoo.fr

Corinne Blanquart
Directrice de recherche, Ifsttar AME, Villeneuve d'Ascq, France.

Éric Verdeil
Professeur des universités, Sciences Po CERI-CNRS, Paris, France.

Copyright

Les contenus de *VertigO* sont mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.