

Modélisation de la logistique des chantiers à l'échelle du territoire à partir de l'analyse de flux de matière

GALASSI LUQUEZI Leonardo

Encadrants: Adrien Beziat (SPLOTT, UGE), Adeline Heitz (LIRSA, CNAM-Paris)

Projet de recherche: POPSU Transitions (1 année de post-doctorat)

1. Introduction

Logistique de chantiers et dynamiques territoriales

La logistique des chantiers

- Flux importants :

Les minéraux de construction représentent 31 % du tonnage transporté et 21 % des kilomètres parcourus par les poids lourds. (Île-de-France)

- Interfaces entre la logistique des chantiers et l'aménagement urbain :

Domaine peu étudié et peu intégré dans les documents d'aménagement.



Les matériaux entrants et sortants

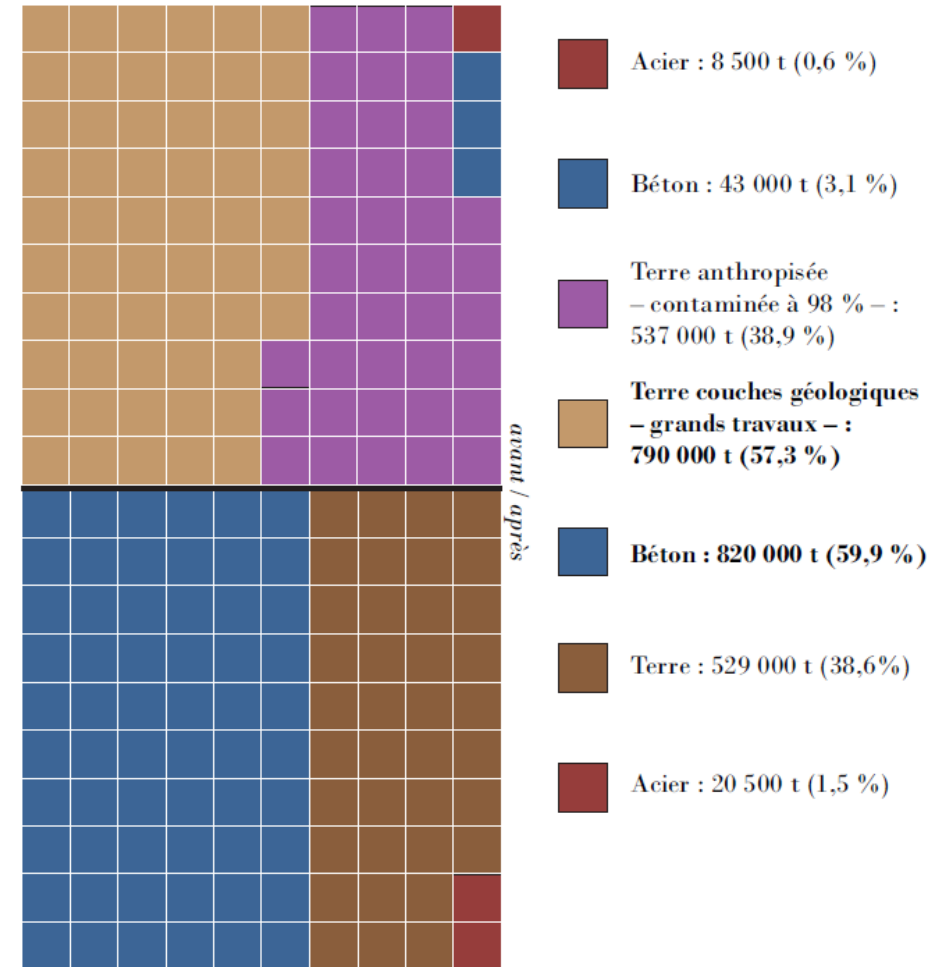
ZAC des Ardoines à Vitry-sur-Seine

700 000 m² de surface neuve

Logements et bureaux.

Figure 2. Analyse par les grandes masses du projet d'urbanisme

Masse extraite du stock : 1 379 000 t



Masse introduite dans le stock : 1 370 000 t

Réalisation : Mathieu Fernandez (Fernandez, Blanquart, Verdeil, 2018)

Les enjeux de la logistique des chantiers

- Sobriété et efficacité dans la gestion des ressources de construction;

Politiques d'économie circulaire et le rôle de la logistique.

- Mitigation des externalités des transports;

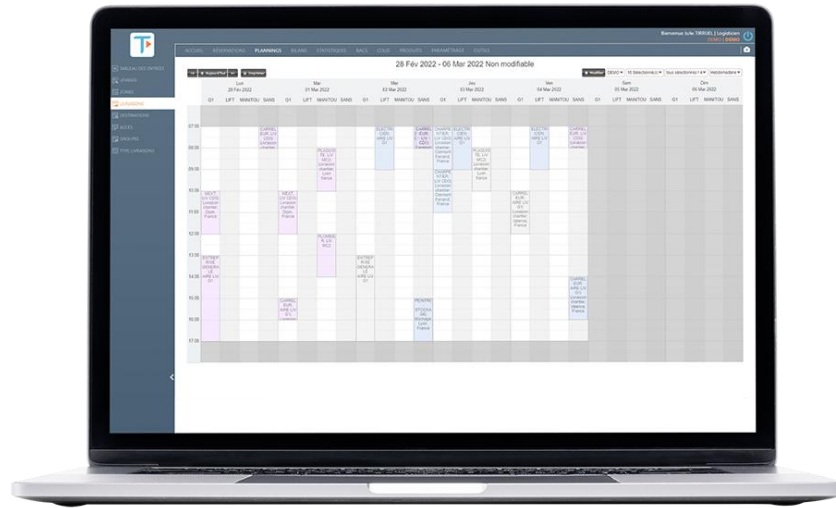
Décarbonation (e.g. rapport modal), réduction de l'exposition aux polluants, etc.

- Maitrise de l'empreinte foncière des nouvelles solutions logistiques;

Arbitrages avec les objectifs de zéro artificialisation nette.

Manque d'outils et d'approches d'aide à la décision à l'échelle territoriale

Outils d'optimisation d'un seul chantier



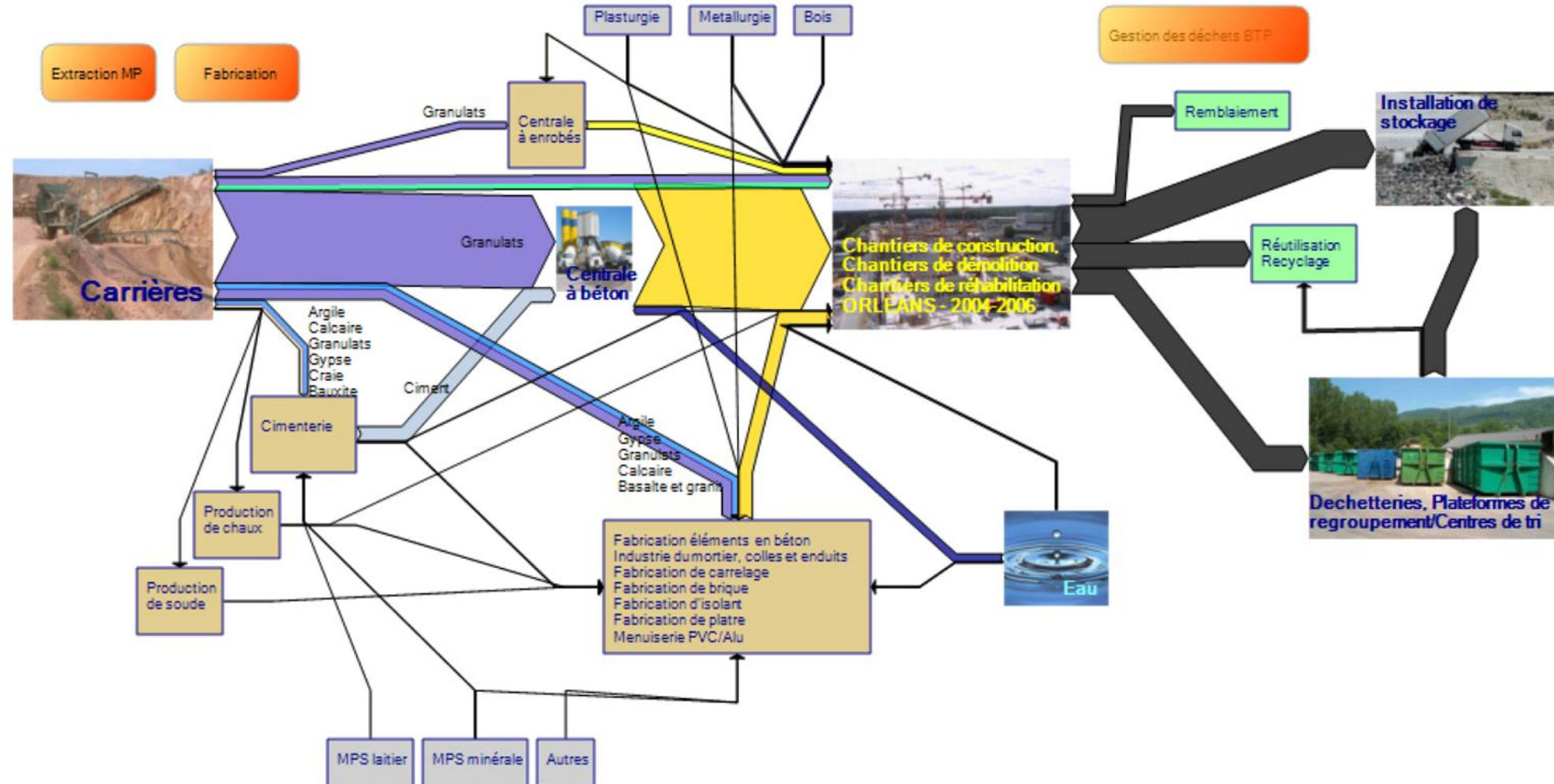
Avec notre logiciel [Teamoty Logistics](#), vous coordonnez et planifiez les flux de livraison au travers d'une seule et unique plateforme avec l'ensemble des acteurs et fournisseurs du projet de construction.

« L'importance accordée aux performances individuelles des projets et les procédures d'appel d'offres concurrentielles constituent les principaux obstacles à l'efficacité et à l'innovation dans le secteur de la construction. »

- Dubois et Gadde (2000)

Analyse des flux de matière à l'échelle territoriale

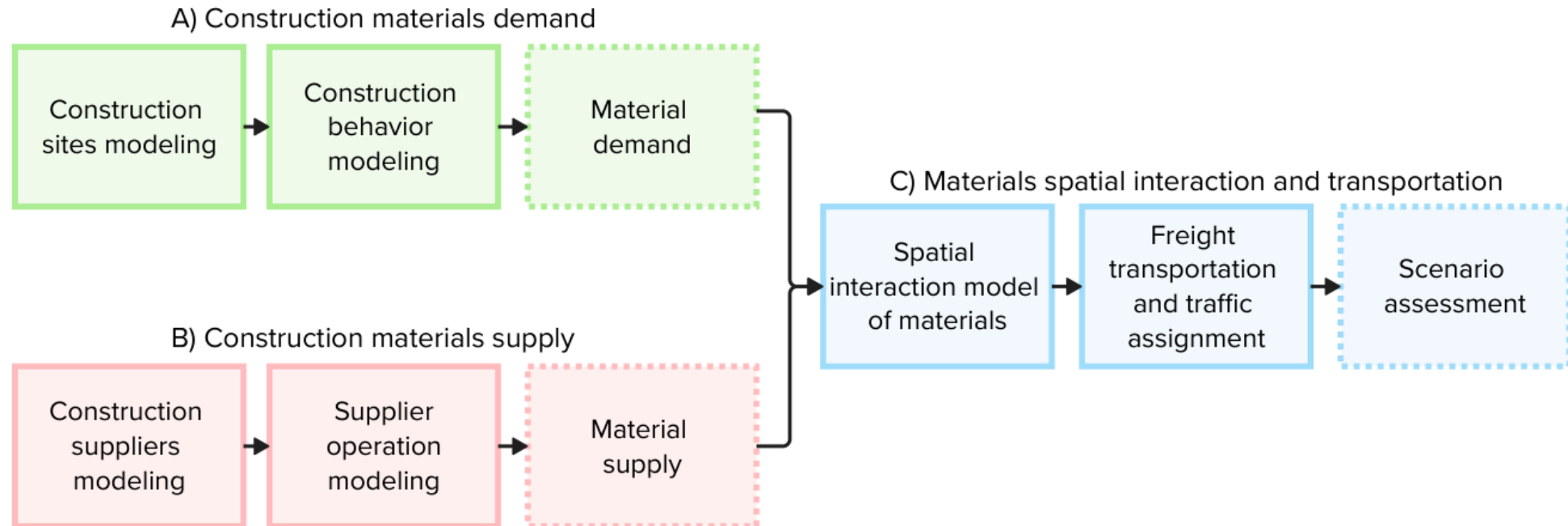
Figure : Diagramme de Sankey des flux de matières des chantiers d'Orléans (2004 – 2006)



2. Méthode : Modélisation de la logistique des chantiers

Une approche ascendante par filière

Modélisation conceptuelle de la logistique de chantier



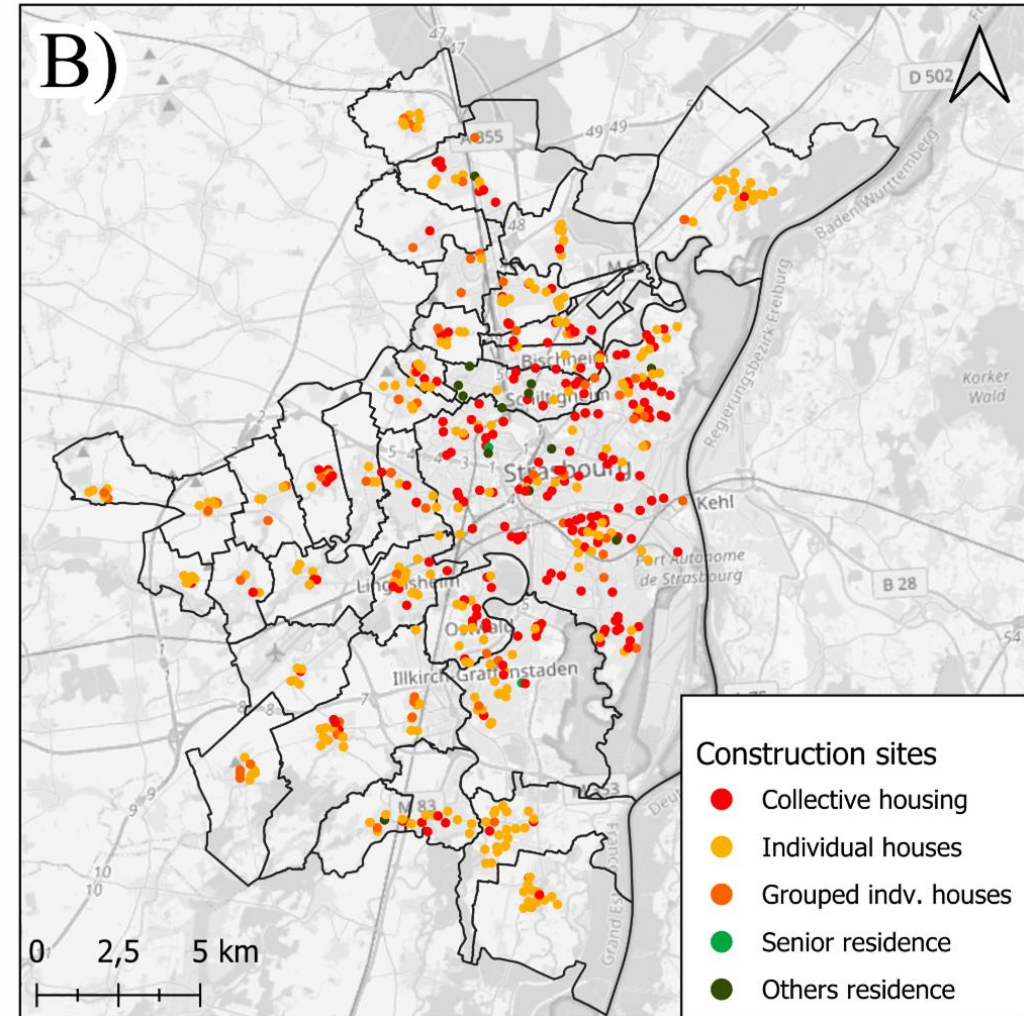
- ❖ Cadre de travail open-source basée sur des données ouvertes
- ❖ Approche ascendante : du chantier au territoire
- ❖ Approche par filière de matériaux

Cas d'étude : Eurométropole de Strasbourg

Identification des chantiers à partir des permis de construire (SITADEL)

Chantiers actifs en 2024 (691 chantiers) :

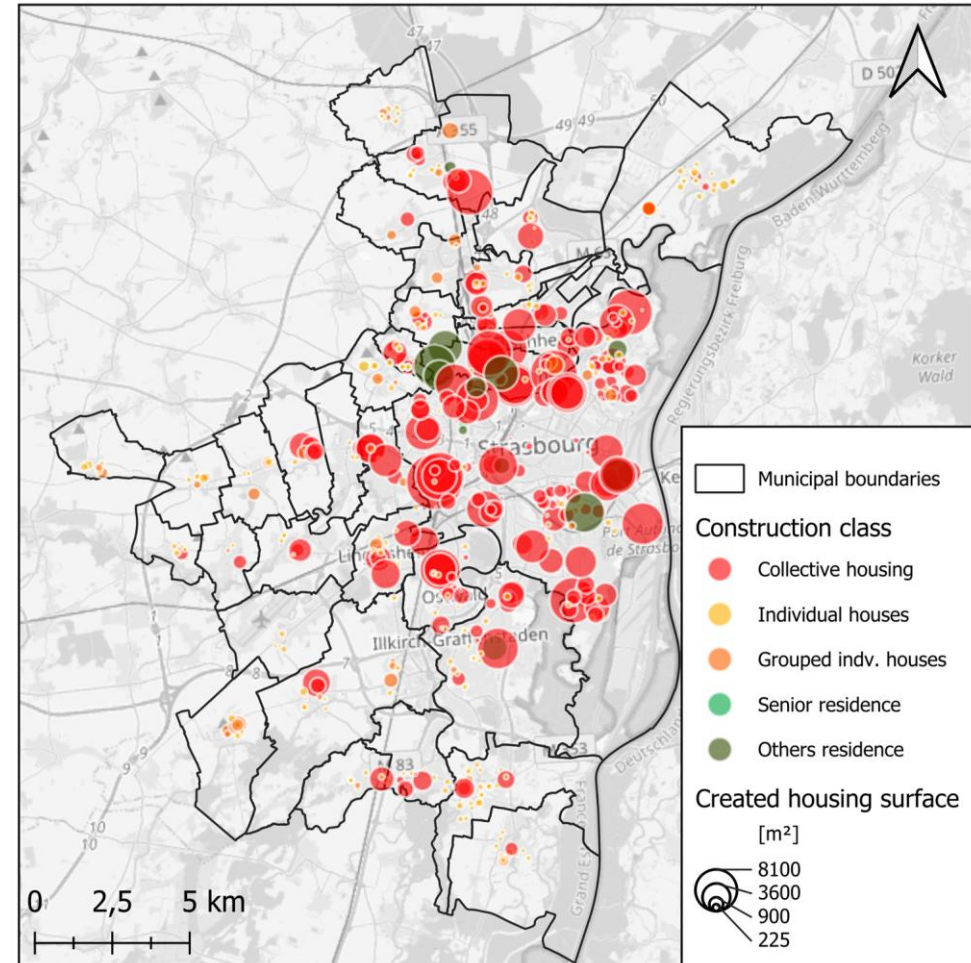
- a) Logements collectifs : 237
- b) Maisons individuelles : 359
- c) Maisons individuelles groupées : 78
- d) Résidences personnes âgées : 2
- e) Autres résidences : 15



Cas d'étude : Eurométropole de Strasbourg

Surface habitable en cours de création pour les chantiers actifs en 2024

- a) Logements collectifs : 541,226 m² (80%)
- b) Maisons individuelles : 50,044 m²
- c) Maisons individuelles groupées : 31,730 m²
- d) Résidences personnes âgées : 3,436 m²
- e) Autres résidences : 43,583 m²



Comportement de construction :

Projet de recherche ANR-ASURET, 2012 :

- Analyse des flux de matières de construction (stock, flux entrants et sortants) de la ville d'Orléans ;
- Focus sur les habitats collectifs (voile béton, toiture terrasse).

Table 1

Material quantity ratios used to model collective housing construction for the period 2004 to 2006, city of Orléans, France; Concrete reinforced wall structure with roof terrace, adapted from Michel et al. (2012).

Construction part	Product	Unit	Quantity/m ² [SHOB]	Assumption
Foundation	Excavated soil	m ³	1.298	Density: 1.45
Structure	Ready-mix concrete	m ³	0.642	For 1 m ³ : 300 kg CEM II cement, 800 kg sand 0/5, 1100 kg gravel 5/20; density: 2.5
Structure	Reinforcement steel	kg	14.901	

Modélisation de la filière logistique du béton

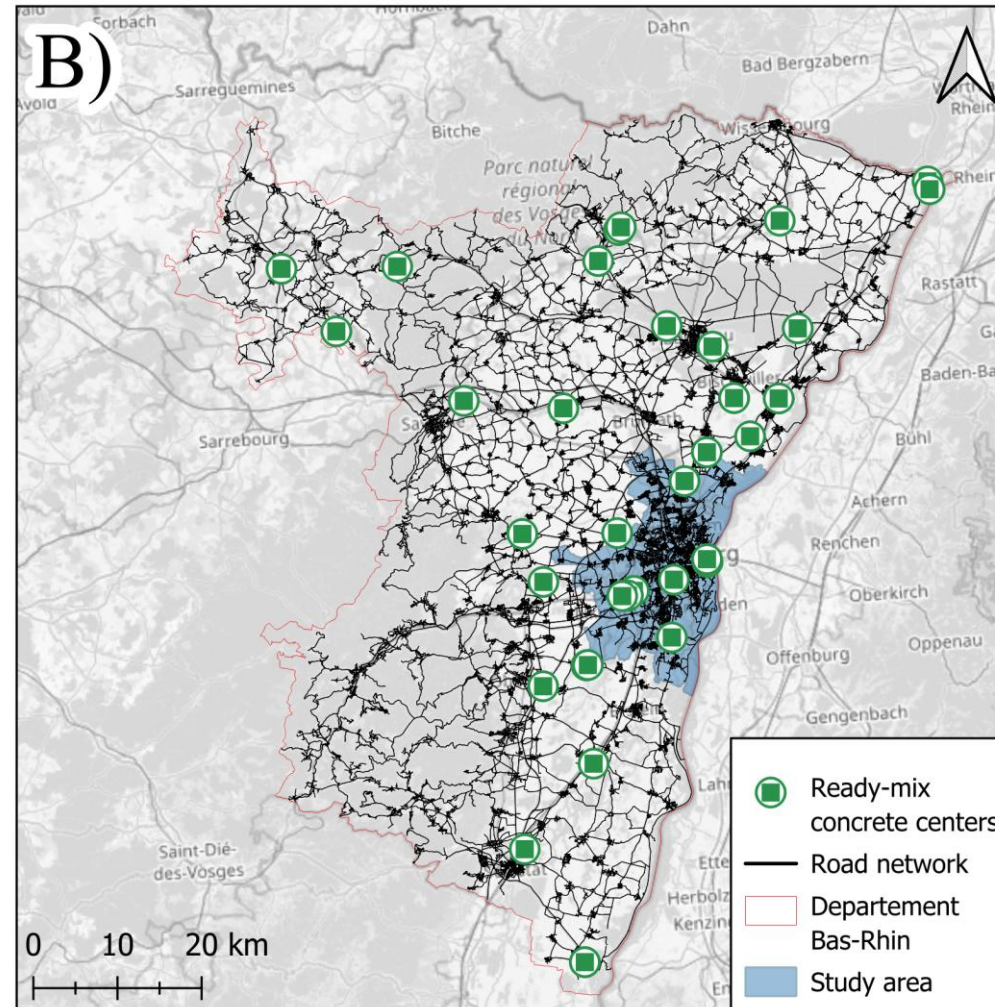
Flux important en masse et volume

Flux maîtrisé et régulier : le béton produit dans des centrales à béton est transporté vers les chantiers quelques heures avant son utilisation

Hypothèse: le béton est livré par camions malaxeurs avec capacité de 6 m³ (Park et al., 2011).



Cartographie des Centrales à béton * (no. 37) :



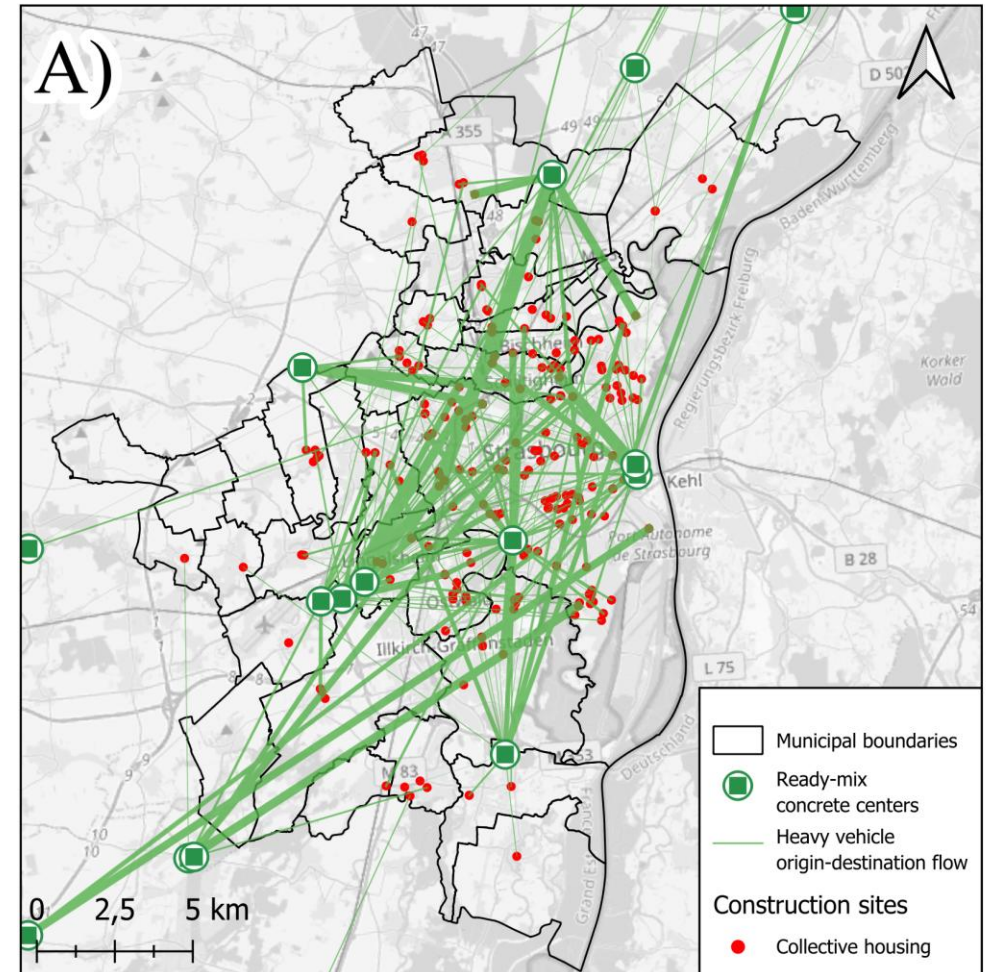
*Code SIRENE - 23.63.10

Modèle d'interaction spatiale :

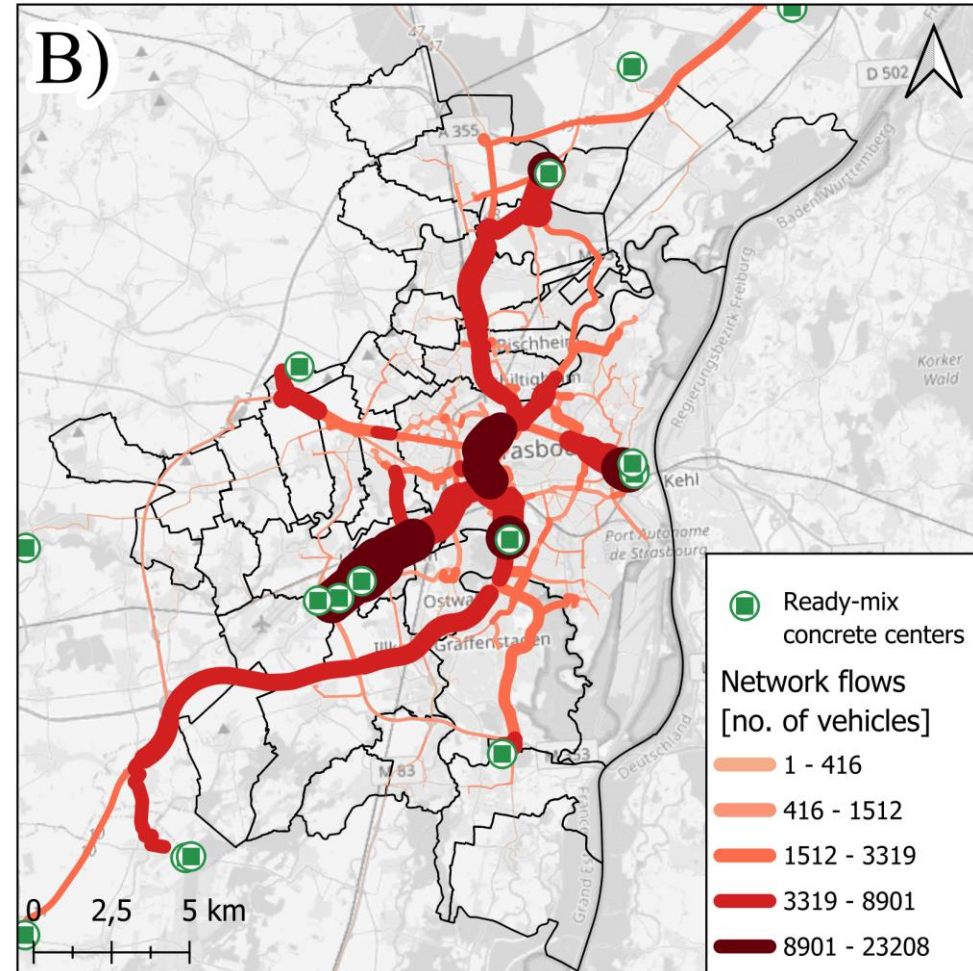
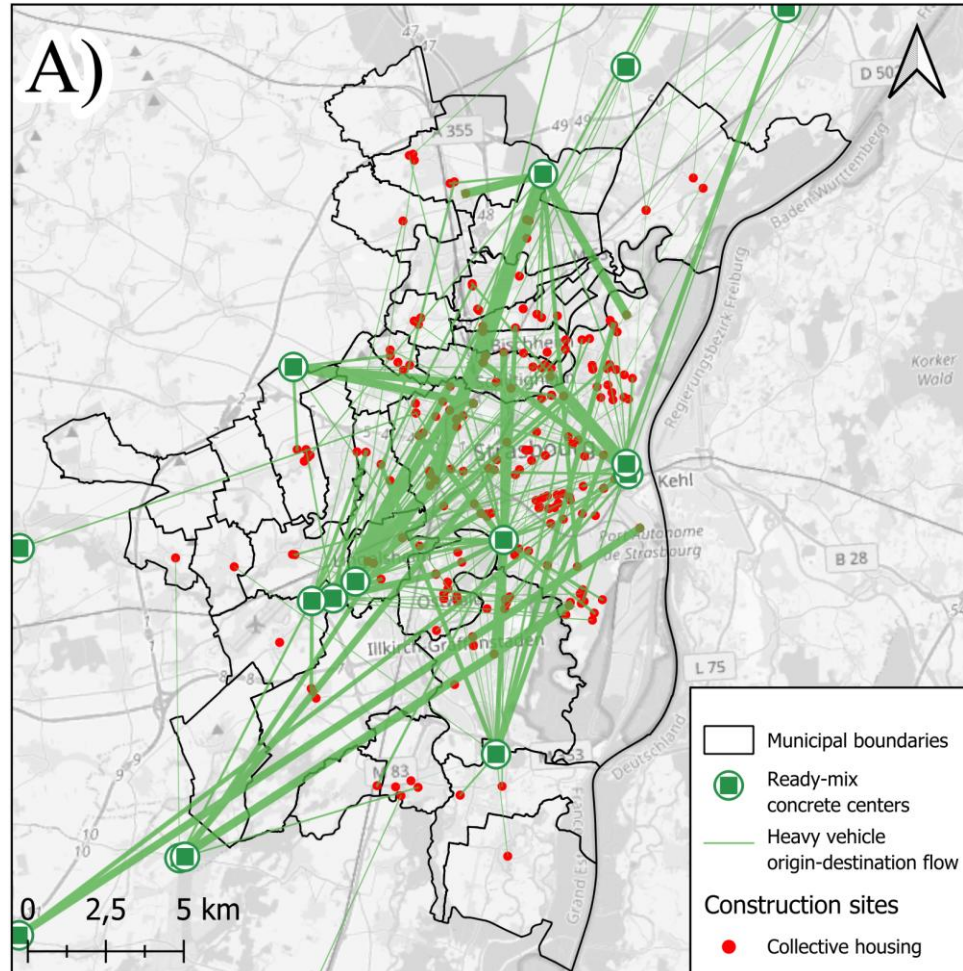
La probabilité P_{ij} que le chantier i soit approvisionné par la centrale j dépend de la distance euclidienne d_{ij} et d'un paramètre de déclin de distance d_0 :

$$P_{ij} \propto \exp\left(-\frac{d_{ij}}{d_0}\right)$$

Les centrales situées à proximité sont donc plus susceptibles d'être choisies, tandis que celles situées plus loin conservent une probabilité faible, mais non nulle, de fournir du béton (comportement pas validé dans cette étude).



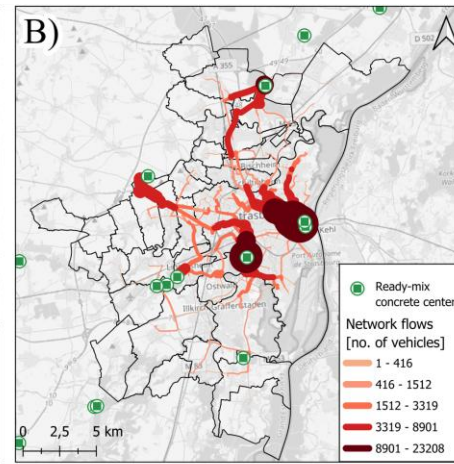
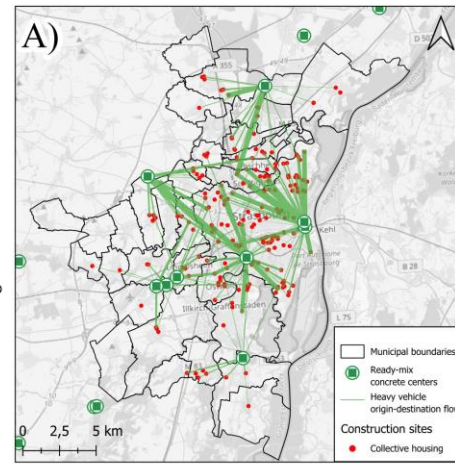
Affectation des flux sur le réseau :



3. Analyse paramétrique exploratoire

Scénario 1

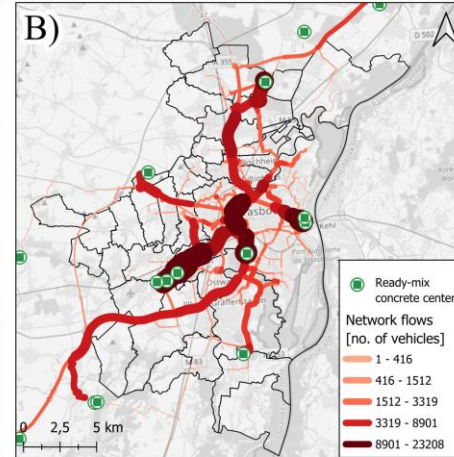
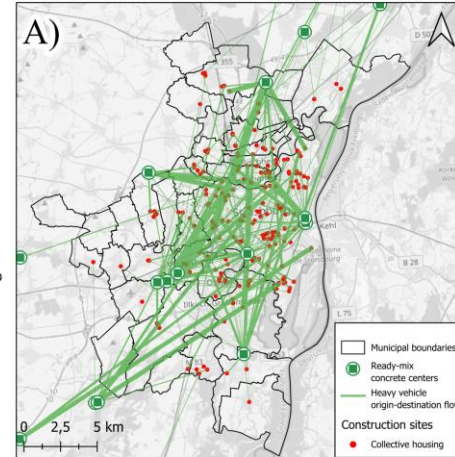
$d_0 = 01 \text{ km}$



~ 400.000 véhicule-kilomètre

Scénario 2

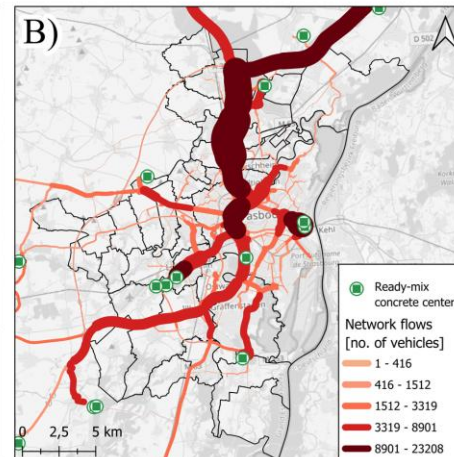
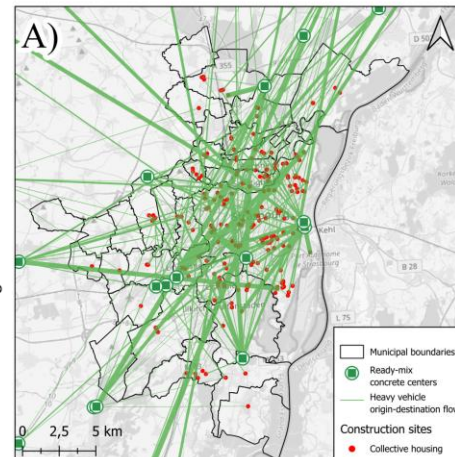
$d_0 = 05 \text{ km}$



~ 800.000 véhicule-kilomètre

Scénario 3

$d_0 = 15 \text{ km}$



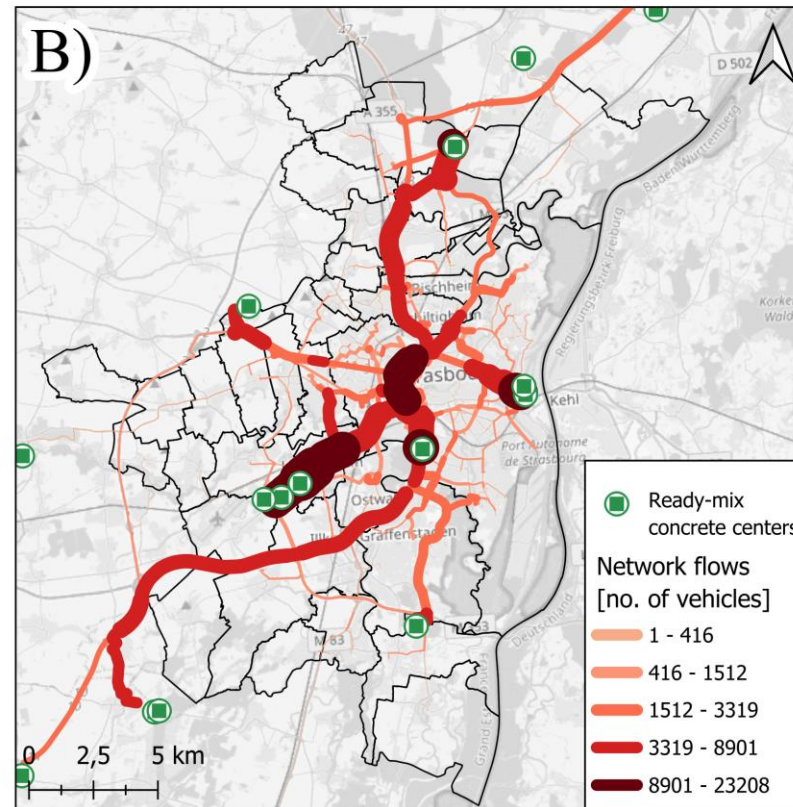
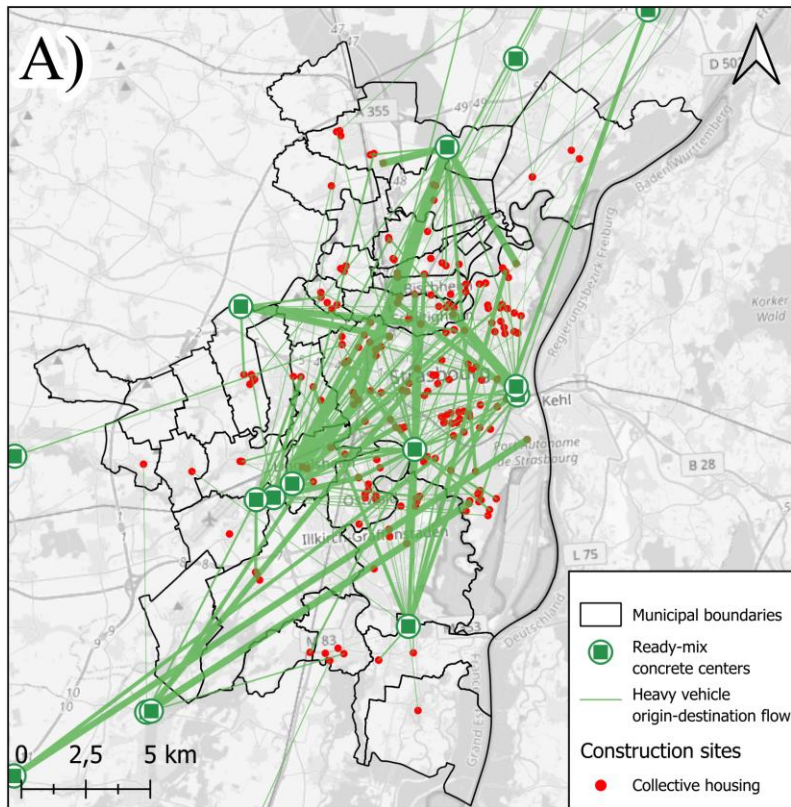
~ 1.4 M véhicule-kilomètre

Scénario d'efficacité des transports :

75 % des livraisons sont effectuées avec des camions de 6 m³ et 25 % avec des camions de 12 m³, tout en conservant les mêmes schémas origine-destination que dans le scénario 2 ($d_0 = 5$ km).

Scénario 5

$d_0 = 5$ km



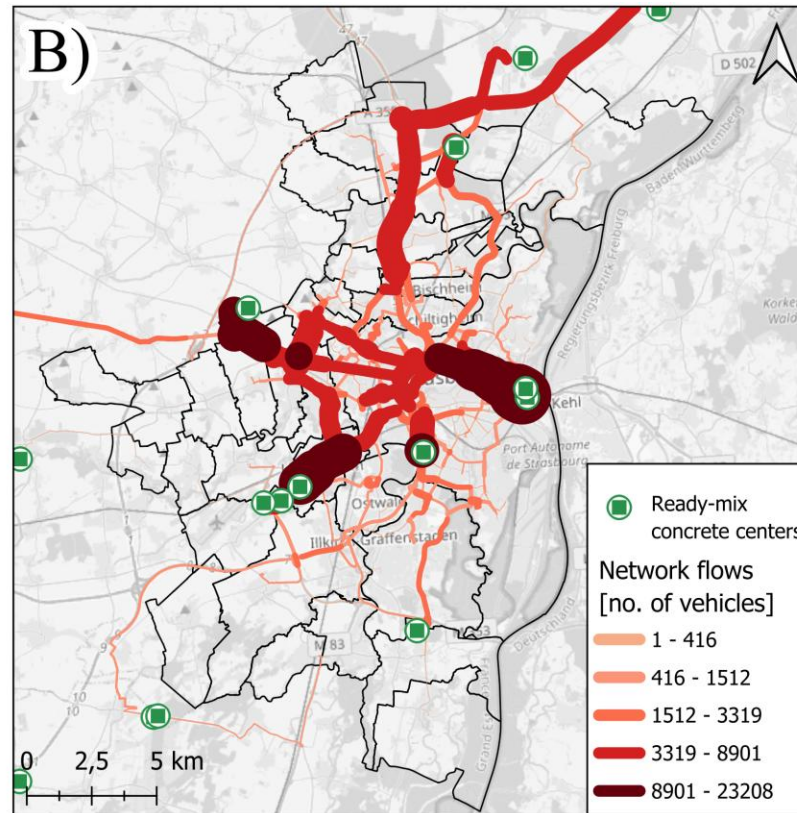
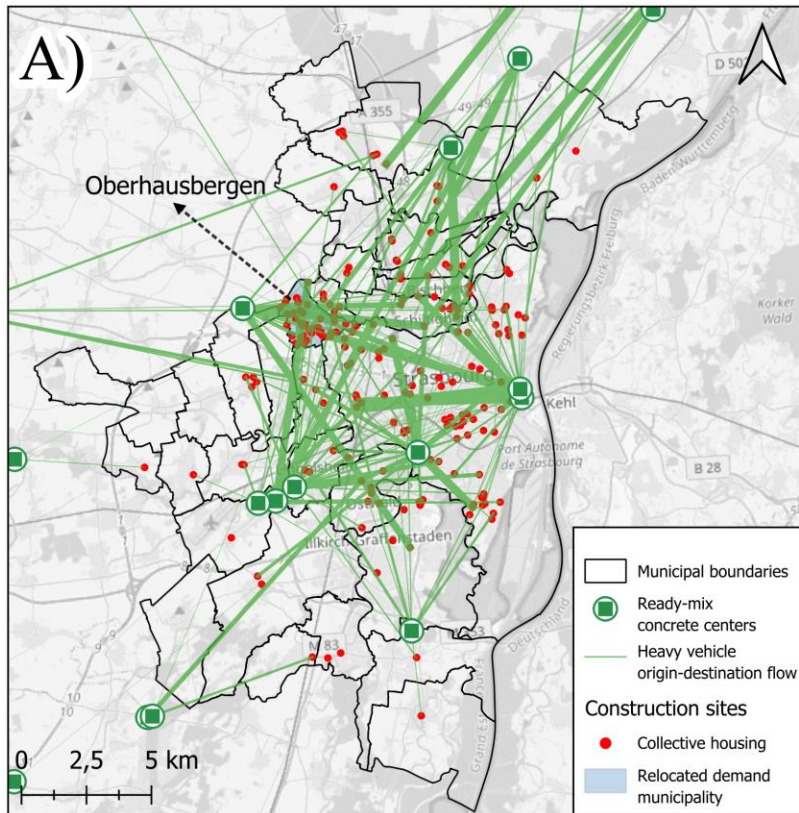
Réduction de 12 % des vkm par rapport au Scénario 2

Scénario de relocalisation de la demande :

20 % de la demande totale de logements collectifs est relocalisée de manière aléatoire vers une commune périphérique de la zone métropolitaine (Oberhausbergen), avec une répartition spatiale aléatoire au sein de cette zone ($d0 = 5$ km).

Scénario 5

$d0 = 5$ km



Vkm de même ordre de grandeur (Scénario 2), mais avec une nouvelle répartition spatiale.

Table 4

Summary of scenario results : Concrete logistics from batching plants to collective housing sites for active sites in 2024

Scenario	Demand	Fleet composition	d_0 (km)	Total vkm	Avg. trip dist. (Median)
1 (Figure 4)	Active sites (2024)	6 m ³ (100%)	1	396,689	5.13 km (5.03 km)
2 (Figure 4)	Active sites (2024)	6 m ³ (100%)	5	795,219	10.30 km (8.66 km)
3 (Figure 4)	Active sites (2024)	6 m ³ (100%)	15	1,439,682	18.03 km (13.73 km)
4 (Figure 5)	Active sites (2024)	6 m ³ (75%) 12 m ³ (25%)	5	698,620	10.33 km (8.52 km)
5 (Figure 6)	20% relocated demand	6 m ³ (100%)	5	815,962	10.04 km (8.28 km)

4. Discussion

Avantages et limitations du cadre de modélisation :

Avantages :

- Modélisation de la demande en matériaux de construction > Prospection et analyse de scénarios ;
- Flexibilité pour modéliser le comportement de construction des chantiers ;
- Représentation spatiale détaillée des activités de construction et des opérations logistiques ;

Limitations :

- Résolution temporelle de l'analyse des flux de matières (matériaux/cycle de vie) ;
- Manque de disponibilité de données ;
- Validation du modèle ;

Ouverture de nouveaux axes de recherche :

Axes de recherche horizontaux :

Modélisation des chaînes logistiques par filière :

- Modélisation d'autres acteurs logistiques (e.g. flux entre carrières et centrale à béton) ;
- Modélisation d'autres matériaux (e.g. terres excavées) ;
- Consolidation de données logistiques pour améliorer les hypothèses de modélisation ;

Axes de recherche verticaux :

Typologies de chantier:

- Modélisation d'autres chantiers (locaux non-résidentiels, démolitions, etc.) ;
- Étude des étapes des chantiers, leur temporalité, et leur demande de matériaux ;
- Étude de la cadence journalière de construction des chantiers ;

5. Conclusions

Conclusions :

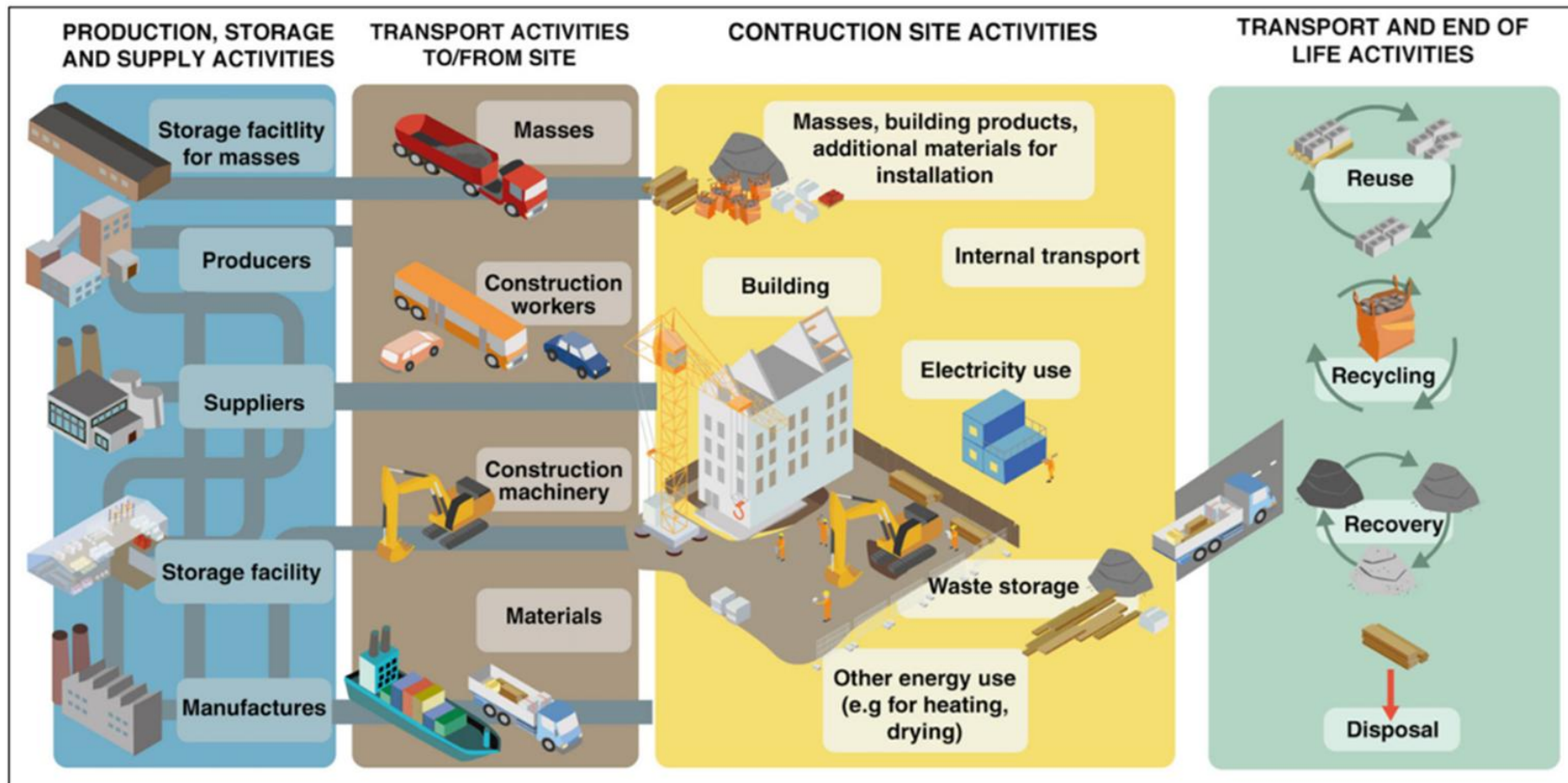
- ❖ Présentation d'un cadre préliminaire pour la modélisation de la logistique des chantiers à l'échelle du territoire ;
- ❖ Modélisation à partir de données désagrégées à l'échelle de la ville ;
- ❖ Première application axée sur le béton prêt à l'emploi dans la métropole strasbourgeoise ;
- ❖ Identification de l'apport de cette approche stratégique et ses défis de modélisation

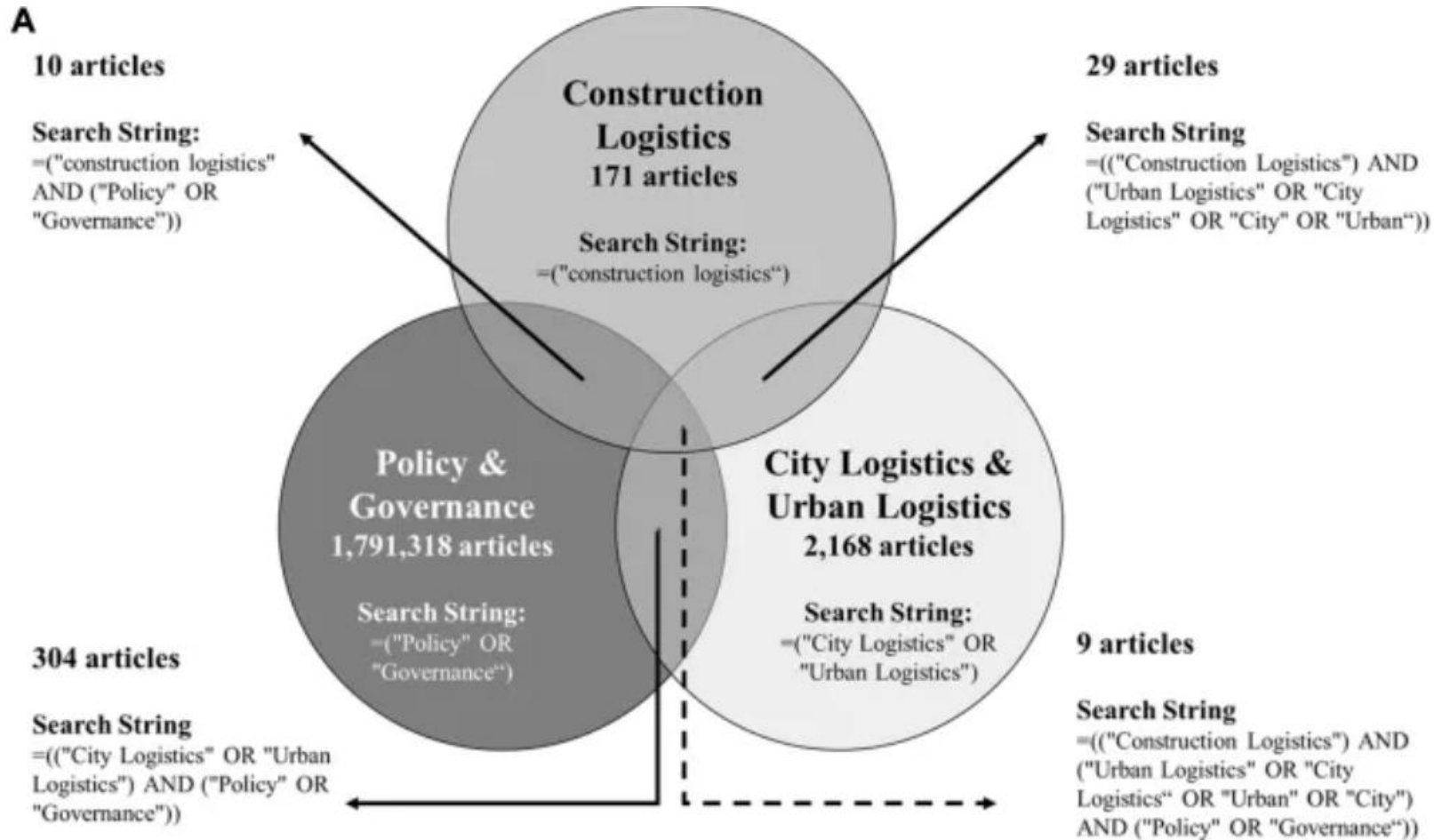
Rapprochement de trois domaines d'étude : Logistique urbaine, analyse des flux de matières et modélisation des transports.

Appendices

Cadre de travail de la logistique des chantiers

Figure : System boundaries for physical construction logistic activities





“Turning a spotlight on construction logistics for a sustainable urban environment—a review of current policy concepts and literature” Phillip Haag and Hans Christian Jünger

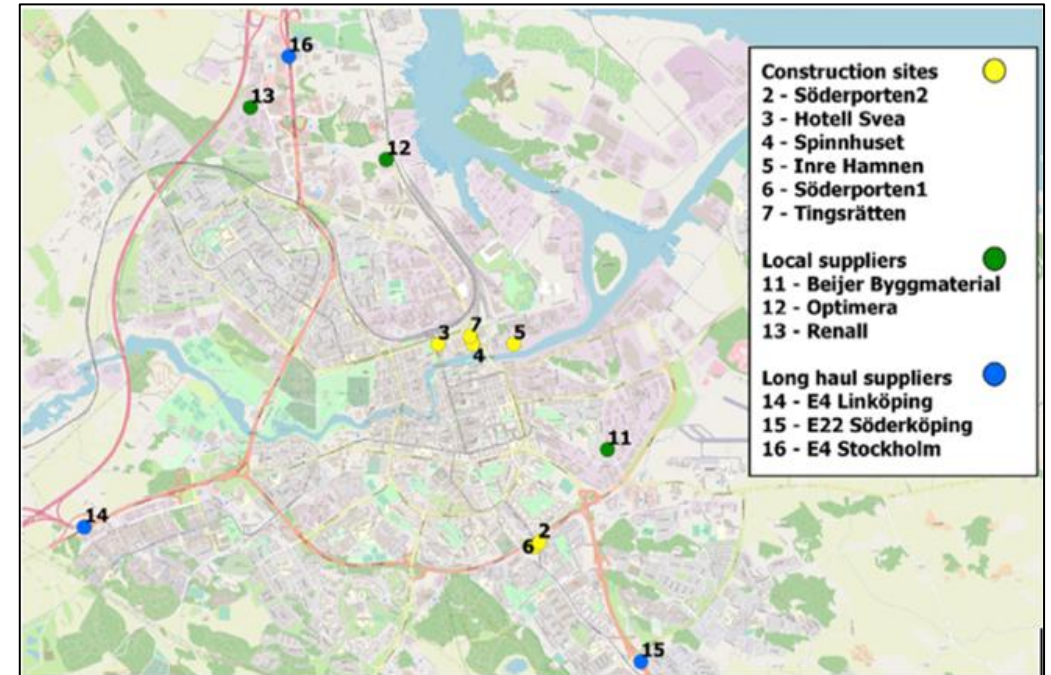
Logistique urbaine et dynamiques territoriales :

Decision support for improved construction traffic management and planning (Brusselaers et al. 2024).

Méthode : simulation multi-agents (MATSim) + simulation des flux logistiques d'approvisionnement.

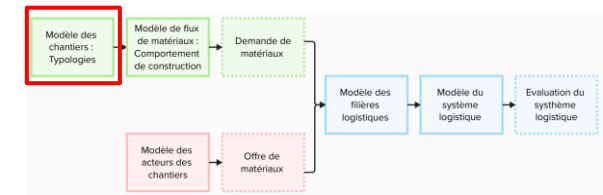
Données d'entrée : Données de livraison spécifiques à six projets à Norrköping (Suède).

Scénario : l'augmentation des demandes de transport a été évaluée sur la base de différents scénarios de livraison par rapport aux créneaux horaires de référence.



Location of construction sites and construction suppliers (Norrköping, Sweden).

Modélisation des chantiers :



Base de données SITADEL - Permis de construire des logements:

- Surface de plancher créée [m²];
- Date d'ouverture et de fin du chantier;
- Type de logement : habitat individuel, habitat individuel groupé, habitat collectif, résidence pour personnes âgées, autres résidences;
- Label de l'adresse (commune, rue, numéro).

Base de données BD-TOPO - Adresses:

- Localisation des communes, rues et adresses

Modélisation de la construction :

Projet de recherche ANR-ASURET, 2012 :

- Analyse des flux de matières de construction (stock, flux entrants et sortants) de la ville d'Orléans ;
- Ressources minérales clés utilisées dans la construction : bitume, plastique, métaux, bois, granulats, etc ;
- Focus sur les habitats collectifs (voile béton, toiture terrasse).

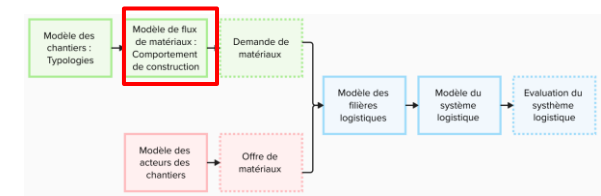
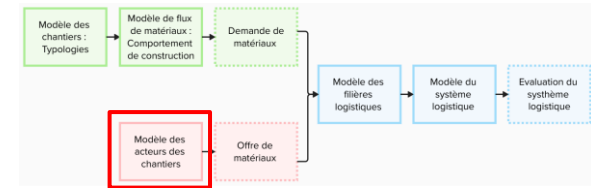


Tableau 29: Ratios de quantité de matière utilisés pour modéliser les constructions de logements collectif sur la période 2004 – 2006. Structure voile béton (ville d'Orléans).

Partie ouvrage	Produit	Unité	Quantité/m ² SHON
Fondation	Fouilles enlevées	m ³	1,298
Structure	Béton BPE à 300 kg de ciment	m ³	0,642
Structure	Acier Pour béton	kg	14,901

$$*S_{shon} = 1.47 \times S_{sp}$$

Modélisation des acteurs des chantiers :



Les centrales à béton sur la base *SIRENE des entreprises et de leurs établissements :

- Répertoire des établissements et ses activités économiques :

23 FABRICATION D'AUTRES PRODUITS MINÉRAUX NON MÉTALLIQUES

=> 23.6 OUVRAGES EN BÉTON, EN CIMENT OU EN PLÂTRE

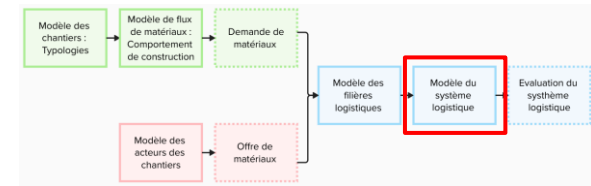
==> 23.63.10 Béton prêt à l'emploi

- Il est possible de télécharger la localisation des établissements :

3.1. La description des variables

Variable	Description
SIRET	Identifiant de l'établissement
X	coordonnée X (selon le système de coordonnées précisé dans EPSG)
Y	coordonnée Y (selon le système de coordonnées précisé dans EPSG)
QUALITE_XY	Indicateur de la qualité du codage de l'adresse : 11 : Voie Sûre, Numéro trouvé 12 : Voie Sûre, Position aléatoire dans la voie 21 : Voie probable, Numéro trouvé 22 : Voie probable, Position aléatoire dans la voie 33 : Voie inconnue, Position aléatoire dans la commune Note : dans les cas où les coordonnées auraient été retrouvées à partir de la cotisation foncière des entreprises, l'adresse fiscale a été comparée avec l'adresse de SIRENE. La variable indique alors le degré de cohérence entre ces deux adresses

Modélisation du système logistique :



Hypothèses d'approvisionnement des chantiers :

- Le chantier est approvisionné par la centrale à béton la plus proche
- Le trajet des camions correspond au trajet qui minimise le temps en prenant en compte le réseau routier.
- Les camions ne font pas de tournée
- Les camions se déplacent à la vitesse moyenne du tronçon

Road speed classification :

Motorway = 90 km/h

Trunk = 80 km/h

Primary = 70 km/h

Secondary = 60 km/h

Tertiary = 50 km/h

Residential = 30 km/h

Unclassified = 40 km/h