



NOTE MÉTHODOLOGIQUE

EVALMETAB : Outil d'évaluation du
métabolisme d'un projet



Chaire
Economie circulaire
et métabolisme urbain



Métropole
du Grand Paris

**Société
des Grands
Projets**

Table des matières

1.	Introduction et présentation de l'outil EvalMetab	3
1.1.	Présentation générale	3
1.2.	Fonctionnement de l'outil EvalMetab	4
2.	Estimation du stock de matériaux contenu dans les bâtiments existants	5
3.	Stock construction	7
3.1.	Construction classique	7
3.2.	Construction en terre crue	9
3.3.	Construction en bois	9
3.4.	Construction de parking	11
3.5.	Synthèse des modes constructifs	13
4.	Terres excavées	13
5.	Bilan de matière	15
6.	Comparaisons des scénarios et estimation des possibilités de recyclage	16
6.1.	Stratégies de recyclages	16
7.	Logistique	17
7.1.	Ratios de coûts et d'émissions de CO ₂	17
7.2.	Approvisionnement	18
7.3.	Evacuation	18
8.	Exemple d'utilisation du logiciel : Application sur la ZAC Gare des Ardoines	19
9.	Annexes	20
10.	Bibliographie	21

Date de révision de la documentation : 2025

Organisme référent : Chaire Economie Circulaire, Université Gustave Eiffel, Marne la Vallée

Auteurs/ contributeurs : Emmanuelle Moesch, Laura Astier, Juan-David Giraldo Betancur, Florence Mainguenaud, Lauricia Mbakop Tchatat, Christelle Okoman, David Rosset, Paul Vilain

Direction de recherche : Corinne Blanquart

EvalMetab est enregistré sous licence CeCILL (<https://cecill.info/licences.fr.html>)



ZAC gare des ardoines © EPA Orsa / TGTFP / Yam studio

1. Introduction et présentation de l'outil EvalMetab

Le développement durable est une préoccupation croissante des collectivités locales. Indispensable au développement des territoires, le secteur du BTP est le principal producteur de déchets et consommateur de matières dans le monde, et est responsable de 30% des émissions de gaz à effet de serre. L'analyse du métabolisme des chantiers et l'application des principes d'économie circulaire peuvent être des outils pour réduire ces impacts.

Afin d'accompagner les maîtres d'ouvrages et aménageurs dans leur réflexions sur ce sujet, l'Université Gustave Eiffel a créé un outil permettant d'analyser le métabolisme des matériaux de BTP à l'échelle d'une opération d'aménagement et les impacts de la logistique associée.

1.1. Présentation générale

EvalMetab est un outil permettant :



- L'estimation de la nature et des quantités des flux du métabolisme (flux entrants et flux sortants, recyclage) résultants la démolition et/ou construction d'un ou plusieurs bâtiments et infrastructures sur un espace donné
- Le calcul des impacts de la logistique associé à l'approvisionnement en matière première et acheminement de déchets vers les exutoires pour les principaux flux.

Basé sur des moyennes nationales de matériaux, EvalMetab peut être utilisé très en amont d'un projet, fournissant des résultats en quelques heures à partir de données simples telles que :

- La surface de plancher (SP) des bâtiments à déconstruire et à construire (en m²).
- Le type de bâtiments : usage et matériau principal (cf annexes)
- L'identification des exutoires des déchets du BTP et la distance entre le chantier et ces exutoires.

L'outil est conçu pour être accessible même aux acteurs non techniciens du BTP et de l'aménagement, leur permettant d'obtenir rapidement une première vision des principaux flux de matériaux, d'identifier les points d'attention, de tester différents scénarios, et ainsi d'anticiper une gestion circulaire des ressources du chantier. EvalMetab est mobilisé en phase amont, avant que le scénario d'aménagement ne soit définitivement arrêté.

1.1.1. Articulation avec les diagnostic PEMD



EvalMetab ne remplace pas le diagnostic PEMD (Produits, Équipements et Matériaux de Déconstruction), qui est obligatoire pour certaines opérations. Le diagnostic PEMD est réalisé sur site par des opérateurs agréés selon une démarche normée. EvalMetab sert plutôt d'outil d'aide à la décision préliminaire, permettant d'orienter les réflexions avant la réalisation du diagnostic PEMD.

1.1.2. Articulation avec l'outil Geremi



Geremi (Gestion des Ressources Minérales) est un outil numérique développé par le Cerema pour accompagner la planification et la gestion des ressources minérales, notamment les granulats, dans le secteur du BTP. Il vise à faciliter la planification territoriale des ressources minérales, en intégrant les enjeux de l'économie circulaire.

Geremi permet de produire des indicateurs d'aide à la décision à différentes échelles territoriales (région, département, bassin de vie) et de modéliser des scénarios d'approvisionnement en granulats en fonction des besoins et des disponibilités, tout en prenant en compte les coûts énergétiques liés au transport.


EvalMetab et Geremi sont complémentaires dans la gestion durable des matériaux du BTP :

- EvalMetab s'utilise à l'échelle d'un projet d'aménagement pour estimer les flux de matériaux et les impacts logistiques associés, en phase amont.
- Geremi intervient à une échelle territoriale plus large, aidant à la planification et à la gestion des ressources minérales sur un territoire, en intégrant les données de production, consommation, et recyclage.

Ainsi, EvalMetab peut alimenter les réflexions locales sur les flux de matériaux, tandis que Geremi offre un cadre stratégique pour la planification territoriale des ressources, facilitant la cohérence entre les projets locaux et les politiques régionales de gestion des matériaux.

1.2. Fonctionnement de l'outil EvalMetab

L'outil EvalMetab adopte une approche arborescente, permettant à l'utilisateur d'explorer différentes options à chaque étape du projet. Le processus se déroule selon les étapes suivantes :

	1) Estimation des matières dans l'existant	L'outil commence par évaluer les quantités et la nature des matériaux présents dans les bâtiments ou infrastructures à déconstruire. Cette étape fournit une base précise pour anticiper les flux de matières issus de la déconstruction.
	2) Estimation des matières du projet futur	Ensuite, EvalMetab permet de simuler les besoins en matériaux pour le projet à venir. Plusieurs scénarios constructifs peuvent être testés, chaque scénario générant une nouvelle branche dans l'arborescence. <ul style="list-style-type: none"> ○ L'utilisateur peut ainsi comparer, pour chaque scénario, le bilan matière entre la déconstruction et la construction, facilitant l'identification des solutions les plus sobres en ressources.
	3) Choix des stratégies de recyclage	Sur la base des matériaux issus de la déconstruction et des besoins du projet, l'outil propose de tester différentes stratégies de recyclage. Plusieurs taux de recyclage peuvent être appliqués, générant de nouvelles ramifications dans l'analyse. <ul style="list-style-type: none"> ○ L'utilisateur visualise alors l'impact de chaque stratégie de recyclage sur la gestion des ressources et la réduction des déchets.
	4) Choix des stratégies logistiques	Enfin, l'outil permet de définir les modalités logistiques, notamment pour l'évacuation des déchets (choix des destinations et modes de transport). Si les stratégies d'approvisionnement sont fixes, plusieurs options d'évacuation peuvent être comparées. <ul style="list-style-type: none"> ○ L'utilisateur peut ainsi évaluer l'impact de chaque stratégie logistique, tant en termes de coûts que d'émissions de gaz à effet de serre, pour optimiser la gestion environnementale du chantier.



ZAC gare des ardoines © EPA Orsa / TGTFP / Yam studio

2. Estimation du stock de matériaux contenu dans les bâtiments existants



Les estimations du stock existant reposent sur les données issues du rapport final du projet **ANR ASURET** portant sur l'analyse de flux de matière du secteur de la construction, qui s'appuie principalement sur une étude menée dans la région d'Orléans. Pour différents types de bâtiments, cette étude quantifie la quantité de différents matériaux par m² de construction (voir p.5).

Les types de matériaux observés sont les suivants :

Tableau 1 : Ensemble des matériaux observés dans les bâtiments

Types de matériaux observés	
Béton (béton armé, béton préfabriqué, blocs de bétons)	Terre cuite (briques, terre cuite)
Métaux / Alliages (acier)	Bois
Plâtre	Torchis
Isolation (laine minérale)	Pierre
Verre	Polyuréthane
Enrobés (asphaltes, asphaltes sablés)	Autre (Polystyrène et PVC)

Les types de bâtiments sont les suivants :

Tableau 2 : typologie de bâtiment - volet déconstruction

Classifications de bâtiment retenues	(Sources : Projet ANR ASURET, pp 51-61 et pp 65-73)
Habitat ancien / petit commerce (centre historique) - typo 1	R+2, ossature bois, remplissage brique, fondation pierre et charpentes bois
Habitat ancien / petit commerce (centre historique) - typo 2	R+2, maçonnerie en pierre, planchers et charpentes bois
Habitat / petit commerce	R+1, maçonnerie mixte, planchers et charpentes en bois
Logement individuel pre-1950	Maison individuelle R+1, maçonnerie en pierre naturelles, charpente bois, couverture tuile
Logement individuel 50-70	Maison individuelle R+1, maçonnerie mixte pierre naturelle et bloc béton, charpente bois, couverture tuile
Logement individuel période récent	Maison individuelle, plain-pied maçonnerie bloc ou brique creuse, charpente bois, couverture tuile
Logement collectif 50-70	R+5, structure points porteurs en BA, remplissage ext en maçonnerie, toiture terrasse
Logement collectif période récente	R+3, SS-1, structure voile béton, toiture terrasse
Commercial	struct métallique, bardage et couverture en acier laqué
Tertiaire ancien, bureaux anciens	Maçonnerie en pierre ou mixte pierre/briques ou blocs béton, planchers et charpentes en bois
Bâtiment industriel	struct métallique, bardage acier, toiture terrasse
Bâtiments militaires	Hangars, structure mixte façade maçonnerie début XXIème
Bureaux	R+3, SS-1, structure voile béton, toiture terrasse
Bâtiments d'école primaire, secondaire, Lycées	R+3, SS-1, structure voile béton, toiture terrasse
Parkings de surface	Espaces de stationnement à ciel ouvert situés au niveau du sol
Parkings silo	Structures de stationnement sur plusieurs niveaux, situées au-dessus du sol,

Les bâtiments anciens en pierre sont plus présents dans la région Orléanaise : lors de l'utilisation de l'outil, il est donc préférable de prendre en compte la composition en matériaux pour sélectionner le type de bâtiment plutôt que le nom de catégorie seul.

Note : Les ratios de matériaux de cette étude sont exprimés en kg/m² SHOB, unité reprise dans l'outil. Si les informations disponibles pour le bâti existant sont exprimées en surface de plancher (SP), il est nécessaire de les convertir en SHOB pour que l'outil fonctionne correctement. S'il n'existe pas de conversion exacte, la formule ci-dessous peut être utilisée.

$$m^2 SP * 1,47 = m^2 SHOB$$

Tableau 3 : ratios de matériaux par m2 de construction - issus de l'étude ASURET

Type de bâtiment	Matériaux (kg/m² SHOB)													TOTAL
	Béton	Métaux / Alliage	Isolation	Verre	Plâtre	Enrobé (asf)	Terre cuite	Bois	Torchis	Pierre	Polyuréthane	Autres		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Habitat ancien /petit commerce (centre historiq	0,0	0,0	0,0	2,0	1,4	14,4	0,0	52,5	118,3	416,7	416,7	0,0	0,0	1021,89
Habitat ancien /petit commerce (centre historiq	368,6	0,0	0,0	2,4	1,4	14,4	0,0	151,1	74,9	0,0	1385,9	0,0	0,0	1998,73
Habitat / petit commerce	0,0	0,0	0,0	3,1	1,4	14,4	0,0	189,2	92,3	0,0	1512,5	0,0	0,0	1812,78
Logement individuel pre-1950	0,0	0,0	0,0	3,4	1,4	14,4	0,0	63,8	91,0	0,0	1684,8	0,0	0,0	1858,74
Logement individuel 50-70	373,4	0,0	0,0	3,4	1,4	14,4	0,0	63,8	91,1	0,0	546,4	0,0	0,0	1093,88
Logement individuel période récent	759,9	3,3	7,2	2,1	2,9	29,9	0,0	102,8	102,4	0,0	0,0	0,0	1,4	1008,87
Logement collectif 50-70	1595,7	29,8	1,8	2,6	2,9	29,8	5,8	63,8	6,0	0,0	0,0	0,0	2,7	1737,68
Logement collectif période récente	1525,8	40,2	1,6	3,2	3,2	28,5	17,0	0,0	22,1	0,0	0,0	2,6	2,1	1642,99
Commercial	400,0	76,0	4,0	2,0	2,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	483,75
Tertiaire ancien, bureaux anciens	0,0	0,0	2,5	1,4	1,4	14,4	0,0	52,4	73,4	0,0	1441,8	0,0	0,0	1585,95
Bâtiment industriel/ Equipements	400,0	83,4	4,0	0,6	0,6	1,1	33,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	522,09
Bâtiments militaires	500,0	65,8	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	101,2	0,0	0,0	200,0	0,0	0,0	867,5
Bureaux récents	1525,8	40,2	1,6	3,2	3,2	28,5	17,0	0,0	22,1	0,0	0,0	2,6	2,1	1642,99
Bâtiments scolaires - universitaire	1525,8	40,2	1,6	3,2	3,2	28,5	17,0	0,0	22,1	0,0	0,0	2,6	2,1	1642,99

Masses volumiques

L'outil propose également de convertir ces tonnages en volume. Les masses volumiques (MV) en kg/m³ utilisées sont présentées dans le [Tableau 4](#).

Tableau 4 : Valeurs des masses volumiques retenues et sources

Matériaux	Masse volumique (kg/m ³)	Sources
Béton	2200,0	http://www.guid beton.com/masse-volumique-beton
Métaux / Alliages	7800,0	https://www.infociments.fr/betons/armatures
Isolation	100,0	https://www.climaxion.fr/sites/climaxion/files/docutheque/guide-materiaux-isolants.pdf
Verre	2500,0	https://fr.wikipedia.org/wiki/Verre
Plâtre	1000,0	https://www.placo.fr/placolog/Produit/PR00021418/Placoplatre-R-BA-13
Enrobé	2300,0	http://massevolumique.com/reponse.php?id=6
Terre cuite	1800,0	http://ecoconstruction.rpn.univ-lorraine.fr/co/Module_UVEDTEST_157.html
Bois	900,0	http://markuspopp.me/Table_des_masses_volumiques.pdf
Torchis	120,0	https://www.climaxion.fr/sites/climaxion/files/docutheque/guide-materiaux-isolants.pdf
Pierre	1500,0	http://ecoconstruction.rpn.univ-lorraine.fr/co/Module_UVEDTEST_160.html
Polyuréthane	40	https://www.soprema.fr/fr/article/dossier-thematique/tout-savoir-sur-la-mousse-polyurethane
Terre crue	1400,0	https://fr.wikipedia.org/wiki/Terre_crue#Masse_volumique
Autres	NA	

3. Stock construction

Le métabolisme de construction diffère du métabolisme de l'existant car il s'appuie sur les modes constructifs actuels mais propose également d'explorer de nouveaux systèmes constructifs. En effet dans une démarche écoresponsable les aménageurs et constructeurs peuvent être amenés à chercher des alternatives au béton ; à cette fin nous avons définis de nouveaux systèmes constructifs incluant l'utilisation de la terre crue et du bois en plus du système de construction classique.

3.1. Construction classique



Les ratios de matériaux pour des bâtiments utilisant les méthodes dominantes de construction (appelées ici « classiques ») sont extraits de l'étude « **Prospective de consommation de matériaux pour la construction des bâtiments neufs aux horizons 2035 et 2050** », rédigée par l'ADEME en 2019 en partenariat avec le CSTB. Pour différents types de bâtiments, cette étude quantifie la quantité de différents matériaux par m² de construction ([Tableau 3](#)). Les ratios pour la terre crue ont été calculés pour cet outil en s'appuyant sur les résultats du projet Cycle Terre.

Les types de matériaux observés dans l'ensemble de ces scénarios se retrouvent dans le [Tableau 5](#) suivant.

Tableau 5 : Type de matériaux observés dans les constructions

Types de matériaux observés dans les constructions	
granulats	isolation
sable	verre
ciment	terre crue
acier	fibres
plâtre	autres (métaux, plastiques, ardoises, autres)
terre cuite	
bois	

On considère ici les matériaux nécessaires à la construction, plutôt que les éléments constructifs. On prendra donc en compte le granulat, le sable et le ciment plutôt que le béton, ou encore la terre crue et le sable plutôt que la brique de terre comprimée.

Les types de bâtiments proposés se retrouvent dans le [Tableau 6](#) suivant

Tableau 6 : typologie de bâtiments - volet construction



MI diffuses - classique
MI groupées - classique
Logement collectif - classique
EHPAD - classique
Bureaux - classique
Hotels - classique
Commerces - classique
Enseignement - classique
Parking en silo
Parking de surface
Logement collectif – terre crue
Bureaux – terre crue
Commerces – terre crue
Enseignement – terre crue
Logement collectif – bois
Logement collectif – mixte bois-béton

La catégorie logement de l'étude CSTB/ADEME regroupe 4 typologies de bâtiments :

- Logement individuel diffus
- Logement individuel groupé
- Logement collectif
- EHPAD.

Les chiffres donnés par l'étude sont une estimation pour l'année 2015 (m2 construits par typologie, consommation totale par type de matériaux, répartition des consommations pour chaque catégorie de logement...) qui permettent de calculer des ratios en kg/m².

La catégorie tertiaire de l'étude CSTB/ADEME regroupe 4 typologies :

- Bureaux
- Hébergement hôtelier
- Commerces
- Enseignement-Recherche

Les volumes des bâtiments font partie des résultats d'exploitation des données de SITADEL 2 de 2000 à 2015. A l'instar de la catégorie Logement, des ratios en kg/m² ont été estimés.

Le cas de la catégorie Commerces se distingue par sa grande variété de bâti des grandes surfaces aux commerces de proximité. Ont été considérés dans l'étude les surfaces neuves de centres commerciaux et de parc d'activité commerciale, hypothèse provenant de l'estimation des surfaces neuves de grande distribution réalisée à partir de « l'observatoire des sites commerciaux 2015 » publié par le CNCC.

3.2. Construction en terre crue

L'introduction de la terre crue peut se faire avec des éléments, des types d'application et des taux d'utilisation variés. Les éléments pris en compte ici sont

- **Briques en terre compressée (BTC)** : composition terre crue et sable
- **Mortier de pose (MP)** : terre crue et de sable
- **Panneaux en argile extrudée (PAE)** : terre crue et fibre végétale

Trois types de modalité d'intégration de ces éléments dans les bâtiments sont définis, qui ont été certifiés en 2021 par des Appréciations Techniques d'Expérimentation (ATEX) :

- 1re application : BTC en utilisation extérieure en comblement d'une ossature en béton, qui permet d'assurer une stabilité dans le temps et préserve les briques des remontées d'humidité.
- 2e application : BTC en cloison séparative : paroi intérieure « semi-porteuse »
- 3e application : panneaux en terre extrudée (PAE) en cloison distributive.

Ces applications et la composition des murs associés sont précisées dans le [Tableau 7](#).

Tableau 7 : Synthèse des applications d'éléments en terre crue

Application	Éléments Cycle Terre utilisés	Composition mur ou cloison	Éléments « classiques » remplacés
1. Remplissage d'ossature extérieure	– Briques en terre compressée standard 31,5 × 9,5 × ep. 15 cm 8,7 kg – 1900 kg/m ³ – Mortier de pose 1800 kg/m ³	20 % béton 64 % BTC 16 % MP Soit 80 % d'éléments en terre crue	Structure 100 % béton d'épaisseur 18 cm
2. Cloison séparative	– Briques en terre compressée standard 31,5 × 9,5 × ep. 15 cm 8,7 kg – 1900 kg/m ³ – Mortier de pose 1800 kg/m ³	80 % BTC 20 % mortier	Cloison 100 % béton épaisseur 16 cm
3. Cloison distributive	– Panneaux en argile extrudée 120 × 2,5 × ep. 2 cm 20 kg = 1333 kg/m ³	100 % PAE en double pose	Plaque de plâtre type BA13 en double pose

Les quantités de matériaux en terre crue ont été estimées sur un exemple de ZAC, avec calcul des volumes de matériaux remplacés par des éléments en terre crue ramenés au m² pour chaque type de bâtiment. En partant des ratios classiques, en ajoutant les quantités de terre crue et sable et en retranchant les matériaux remplacés, on obtient ainsi des ratios constructifs adaptés aux scénarios terre crue.

3.3. Construction en bois



La construction bois est envisagée comme une alternative écoresponsable au béton. Deux approches constructives sont prises en compte : des systèmes majoritairement bois (plus de 80 %) et des systèmes hybrides bois-béton (moins de 80 % de bois). Les ratios associés à ces constructions ont été élaborés spécifiquement dans le cadre de la Chaire ECMU ([Tableau 9](#)).

Tableau 8 : Détail quantitatif des matériaux selon les deux hypothèses constructives

Hypothèse 1 : plus 80% de bois							
Matériau	Ratio (kg/m ²)	Surface (m ²) ¹	Masse volumique (kg/m ³)	Volume (m ³)	total	Masse totale (kg)	Source

¹ Surface plancher utile

Bois	258,00	800	900	229,34	206 403,67	EvalMetab
Connecteurs acier	38,70	800	15 % ²	206 403,67 ³	30 960,55	Elioth
Vitrage	5,00	800	2 500	1,60	4 000,00	EvalMetab
Tuile en terre cuite	16,85	800	2 300	5,86	13 478,00	EvalMetab
Hypothèse 2 : systèmes hybrides bois-béton (moins de 80 % de bois)						
Matériau	Ratio (kg/m ²)	Surface ⁴ (m ²)	Masse volumique (kg/m ³)	Volume total (m ³)	Masse totale (kg)	Source
Bois	171,82	800	900	152,73	137 456,47	EvalMetab
Connecteurs acier	25,77	800	15 %	137 456,47 ⁵	20 618,47	Elioth
Vitrage	5,00	800	2 500	1,60	4 000	EvalMetab
Châssis aluminium	4,54	800	2 700	1,34	3 629	massevolumique.com
Tuile en terre cuite	16,85	800	2 300	5,86	13 478	EvalMetab
Acier (dans béton)	8,99	800	25 kg/m ³ → ≈ 25 kg/m ³	287,58	7 189,43	btp-cours.com
Béton (plancher + escalier)	790,84	800	2 200	287,58	632 669,40	EvalMetab
Matériau	Ratio (kg/m ²)	Surface (m ²)	Dosage (kg/m ³)	Volume total béton (m ³)	Masse totale (kg)	Source ⁶
Ciment (dans béton)	125,81	800	350	287,58	100 652 (ciment)	travauxbeton.fr
Sable (dans béton)	294,77	800	820	287,58	235 813 (sable)	travauxbeton.fr
Granulats (dans béton)	404,41	800	1125	287,58	323 524 (granulats)	travauxbeton.fr

Ces ratios, exprimés en kilogrammes par mètre carré de surface de plancher utile (kg/m²), résultent de calculs ad hoc fondés sur des données architecturales précises, intégrant les volumes de bois mis en œuvre ainsi que les matériaux connexes (connecteurs, vitrages, tuiles, etc.).

Le [Tableau 9](#) résume les principaux ratios de matériaux pour chaque hypothèse, permettant une lecture rapide des différences de composition entre une structure bois majoritaire et un système bois-béton hybride.

Tableau 9 : Ratio des deux systèmes constructifs

Hypothèse 1 plus 80% de bois		Hypothèse 2 moins de 80% de bois - mixte béton	
Matériau	Ratio (kg/m ²)	Matériau	Ratio (kg/m ²)
Ratio bois	258,00	Ratio bois	171,82
Ratio connecteurs acier	38,70	Ratio connecteurs acier	25,77

² Part des assemblages

³ Masse totale du bois (kg)

⁴ Surface plancher utile

⁵ Masse totale du bois (kg)

⁶ Part des assemblages

Ratio vitre	5,00	Ratio vitre	5,00
Ratio tuile en terre cuite	16,85	Ratio aluminium	4,54
		Ratio tuile en terre cuite	16,85
		Ratio béton	790,84
		Ratio ciment	125,81
		Ratio sable	294,77
		Ratio granulat	404,41
		Ratio acier	8,99

Une étude de cas portant sur la résidence *Envol* à Vélizy-Villacoublay (Île-de-France) illustre l'application de cette méthodologie. Les ratios obtenus ont permis d'estimer les quantités de matériaux nécessaires (bois, acier, verre, etc.) pour chaque scénario. Ces données ont ensuite été mobilisées pour évaluer les impacts logistiques (émissions, coûts) en fonction de la provenance des matériaux, ainsi que pour comparer les performances environnementales et économiques de la construction bois à celles de solutions classiques ou hybrides.

3.4. Construction de parking



L'intégration des infrastructures de stationnement dans l'outil EvalMetab repose sur une méthodologie rigoureuse, élaborée par la Chaire Économie Circulaire et Métabolisme Urbain, permettant de modéliser les flux de matériaux selon la typologie des parkings, les usages fonctionnels, et les choix constructifs.

Deux types de parkings sont distingués dans l'analyse :

Parking surface	de	Espaces de stationnement à ciel ouvert, souvent situés au niveau du sol. Ils se caractérisent par leur facilité et leur rapidité de construction et leur aspect moins coûteux en termes de construction. Exemples : parkings de supermarchés, de parcs, stationnements en bordure de rue
Parking silo (ou parking étagé)		Structures de stationnement en plusieurs étages, souvent situées au-dessus du sol. Ils ont une capacité de stationnement accrue dans des zones à forte densité urbaine, coût de construction modérée par rapport aux parkings souterrains. (Carpentier, S. 2016). Exemples : parkings des aéroports, des gares, des centres d'affaires

Les parkings de surface sont principalement construits en asphalté avec une sous-base en gravier et des éléments en béton pour les trottoirs et les bordures et les parkings en silo quant à eux, sont généralement construits en béton armé avec des structures métalliques pour le soutien et parfois des éléments en bois pour les finitions intérieures (CERIB 20109).

Pour chacun, la méthodologie d'EvalMetab identifie et quantifie les matériaux dominants :

- **Béton** : pour les dalles, fondations, poteaux, murs porteurs.
- **Acier** : utilisé dans les armatures, charpentes, poutres.
- **Asphalté** : présent dans les couches de roulement et marquages au sol.
- **Matériaux secondaires** : gravier, peinture, verre, bois, utilisés de manière plus marginale.

Estimation des ratios de matériaux nécessaires à la construction d'un parking

Les ratios sont exprimés en kilogrammes par mètre carré (kg/m²) ([Tableau 10](#)). Leur détermination repose sur :

- Des **sources techniques de référence** (guides CERIB, CSTB, ACI, etc.),
- L'analyse de **plans types** et de **retours d'expérience** sur des projets existants,
- La prise en compte de **paramètres clés** : nombre d'étages, capacité d'accueil, dimensions standards des places, types de véhicules accueillis.

Tableau 10 : ratios des matériaux nécessaires à la construction d'un parking

Matériaux	Ratios par m ²	Sources 1	Source 2
Ratios de construction des parkings en silo			
Béton	500 à 700 kg	"Guide pratique : Conception et réalisation des parkings en béton" – CERIB 2019	"ACI 330R-08: Guide for the Design and Construction of Parking Lots" – ACI 2008
Asphalte	80 à 100 kg	"Réhabilitation des voiries en béton" – CSTB 2018	"Design and Construction of Asphalt Parking Lots" – NAPA 2015
Acier	230 à 245 kg	"Conception des structures en béton armé" – AFNOR 2017	"ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete" – ACI 2014
Ratios de construction des parkings de surface			
Béton	240 à 300 kg	"Guide pratique : Conception et réalisation des parkings en béton" – CERIB 2019	"ACI 330R-08: Guide for the Design and Construction of Parking Lots" – ACI 2008
Asphalte	80 à 120 kg	"Réhabilitation des voiries en béton" – CSTB 2018	"Design and Construction of Asphalt Parking Lots" – NAPA 2015
Acier	10 à 15 kg	"Conception des structures en béton armé" – AFNOR 2017	"ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete" – ACI 2014

Estimation des ratios de matériaux déconstruits pour les parkings

De la même manière que pour les ratios de matériaux nécessaires à la construction d'un parking, les ratios de matériaux issus de la déconstruction sont estimés en kilogrammes par mètre carré (kg/m²) (**Tableau 11**). Leur détermination repose sur :

- L'exploitation de retours d'expérience provenant de projets de déconstruction,
- Des sources techniques de référence (CERIB, ADEME, CSTB, etc.),
- La prise en compte des caractéristiques des ouvrages déconstruits : nombre de niveaux, typologie constructive, nature des matériaux initiaux, ancienneté.

Tableau 11 : ratios des matériaux déconstruits pour les parkings

Matériaux	Ratios par m ²	Sources 1	Source 2
Ratios de construction des parkings en silo			
Béton	425 à 630 kg	"Guide pour la gestion des déchets de chantiers du BTP" – ADEME 2020	"Deconstruction and Materials Reuse" - CIRIA C707 2014
Asphalte	72 à 95 kg	"Réhabilitation des voiries en béton" – CSTB 2018	"Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures" – FHWA 2016
Acier	28 à 45 kg	"Recyclage des matériaux de construction" – INIES 2019	"Recycling of Steel in the Construction Industry" - World Steel Association, 2017
Ratios de construction des parkings de surface			
Béton	204 à 285 kg	"Guide pour la gestion des déchets de chantiers du BTP" – ADEME 2020	"Deconstruction and Materials Reuse" - CIRIA C707 2014
Asphalte	72 à 114 kg	"Réhabilitation des voiries en béton" – CSTB 2018	"Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures" – FHWA 2016
Acier	10 à 15kg	"Recyclage des matériaux de construction » INIES 2019	"Recycling of Steel in the Construction Industry" - World

Les **ratios de déconstruction** sont globalement inférieurs à ceux de construction. Cette différence s'explique par plusieurs facteurs :

- Les **pertes de matériaux** au moment de la démolition (bris, contamination, matériaux non récupérables),
- **L'usure des matériaux dans le temps**, notamment pour les éléments en béton,
- La **non-récupérabilité** de certains matériaux secondaires ou composites.

Le **Tableau 12** synthétise les écarts observés entre les deux types de ratios pour les principaux matériaux, selon la typologie des parkings.

Tableau 12 : Ratios comparés : matériaux de construction et de déconstruction des parkings

	Parking de surface	Parking en silo
Béton	-15% à -5%	-28% à -23%
Acier	-10% à -5%	-10% à +50%
Asphalte	Pertes négligeables	-10% à +50%

3.5. Synthèse des modes constructifs

L'outil EvalMetab offre ainsi une comparaison des différents modes constructifs, en se basant sur les matériaux mobilisés et leurs quantités approximatives exprimées en kg/m² de surface utile. Ces ratios, issus de sources techniques et de retours d'expérience, constituent la base pour analyser les flux de matériaux et évaluer les impacts logistiques, comme présenté dans le (**Tableau 13**).

Tableau 13 : Synthèse des ratios de matériaux pour les différents types de bâtiments et modes constructifs

Tableau des coefficients issu de l'étude ADEME-CSTB														
Type de bâtiment et mode constructif	Matériaux kg/m ² SHONRT (CSTB sans fondations)													
	Granulats	sable	Ciment	acier	Plâtre	Terre cuite	Bois	Isolation (la)	Verre	autres (mét)	Terre crue	...		TOTAL
MI diffuses - classique	464,1	367,0	113,2	16,6	43,7	117,0	41,6	8,2	3,0	19,5	0	0	0	1194,0
MI groupées - classique	467,2	360,7	114,0	15,8	45,1	124,3	38,0	6,3	3,0	19,7	0	0	0	1194,0
Logement collectif - classique	717,9	542,7	175,1	28,7	38,9	37,5	10,4	3,1	2,8	15,9	0	0	0	1573,0
EHPAD - classique	718,9	555,0	175,4	27,1	53,4	0,0	15,9	3,8	3,8	19,7	0	0	0	1573,0
Bureaux - classique	550,00	410,00	140,00	42,00	20,00	15,00	14,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1191,0
Hotels - classique	640,00	520,00	170,00	30,00	30,00	16,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1410,0
Commerces - classique	380,00	300,00	100,00	82,00	20,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	892,0
Enseignement - classique	500,00	370,00	130,00	47,00	2,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1059,0

4. Terres excavées

Les ratios de terres excavées intégrés dans EVALMETAB sont issus d'une méthodologie développée par la Chaire fondée sur l'analyse des flux à l'échelle des chantiers et sur l'application des normes géotechniques et réglementaires en vigueur. L'estimation des volumes de terres excavées repose sur une approche structurée, prenant en compte la diversité des projets et des contextes géotechniques rencontrés en Île-de-France. Cette méthodologie s'articule autour des étapes et paramètres suivants :

• Facteurs déterminants :

Le volume de terre à excaver dépend du type de fondation (superficielle ou profonde), de la charge à supporter par la structure, de la nature géotechnique du sol (capacité portante, cohésion, densité) et des exigences réglementaires locales (normes NF DTU, marges de sécurité)

• Calcul de la profondeur des fondations :

Le choix s'est porté sur la formule de Meyerhof, qui permet de déterminer la profondeur minimale d'une fondation à partir de la charge totale (Q), de la surface de la base (A) et de la capacité portante admissible du sol (q_{adm}) : $d = Q / (A * q_{adm})$

où :

- d est la profondeur de la fondation (en mètres).
- Q est la charge totale supportée par la fondation (en kN).
- A est la superficie de la base de la fondation (en m²).

- q_{adm} est la capacité portante admissible du sol (en kN/m^2) (Descaves, 2012 ; Meyerhof, 1975) (CAMINS UPC) (Portal Online de La Construcción)

Les charges structurales sont calculées selon les normes françaises (NF P 06-004), en intégrant les charges permanentes, d'exploitation et accidentelles, puis pondérées par les coefficients de sécurité Eurocode 1⁷ (Tableau 14) et (Tableau 15).

Tableau 14 : Charges admissibles pour la déconstruction pour chaque typologie de bâtiment

Type de Bâtiment	Charges d'exploitation (kN/m^2)	Charges permanentes (kN/m^2)	Charge admissible (kN/m^2)
Habitat ancien / petit commerce (centre historique) - typologie 1	2,5	6	15
Habitat ancien / petit commerce (centre historique) - typologie 2	2,5	5,6	14
Habitat / petit commerce	2,5	5,2	13
Logement individuel pré-1950	2	6	14
Logement individuel 50-70	2,5	6,2	15
Logement individuel période récente	2,5	5,4	13
Logement collectif 50-70	2,5	8,9	20
Logement collectif période récente	3	6,5	16
Commercial	5	7	20
Tertiaire ancien, bureaux	3	6	15
Bâtiment industriel / Equipements	8	9,2	29
Bâtiments militaires	4	8	20
Bureaux récents	3	6,5	16
Bâtiments scolaires - universitaires	3,5	6,5	17

Tableau 15 : Charges admissibles pour la construction pour chaque typologie de bâtiment

Type de Bâtiment	Charges d'exploitation (kN/m^2)	Charges permanentes (kN/m^2)	Charge admissible (kN/m^2)
MI diffuses - classique	2	5	12
MI groupées - classique	2	5	12
Logement collectif - classique	2	6	13,8
EHPAD - classique	1,5	5,5	12,15
Bureaux - classique	3	6	15,3
Hotels - classique	4	6,5	17,7
Commerces - classique	5	6,5	19,2
Enseignement - classique	4	6,5	17,7
Logement collectif - terre crue	2	5	12
Bureaux - terre crue	3	5,5	14,4
Commerces - terre crue	4	6	16,8
Enseignement - terre crue	4	6	16,8
Logement collectif - bois	2	4	10,2
EHPAD - bois	2	4,5	11,1
Bureaux - bois	3	4,5	12,6
Hotels - bois	4	4,5	14,1
Enseignement - bois	4	5	15
Logement collectif - béton-bois	2	5,5	12,9

- Paramètres géotechniques :

⁷ L'Eurocode 1 de 1991 (EN 1991-1-1: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings (phd.eng.br)) recommande l'utilisation d'un coefficient de sécurité pour les charges permanentes entre 1,35 et 1,5, tandis que pour les charges d'exploitation, il recommande un coefficient de sécurité entre 1,5 et 1,8. Par conséquent, pour cette recherche, nous utiliserons 1,5 et 1,8 pour les charges permanentes et d'exploitation respectivement.

Les valeurs de capacité portante sont déterminées à partir des caractéristiques du sol local (ex : sol argileux francilien), en appliquant un facteur de sécurité et en utilisant les formules de Terzaghi pour affiner les estimations selon les cas de fondations superficielles ou profondes

- **Volumes de sous-sols :**

Les niveaux souterrains sont intégrés au calcul, en considérant une hauteur moyenne de 2,7 m à Paris et une homogénéité de surface entre les étages, afin de refléter les pratiques courantes de conception des bâtiments

- **Ajustement du volume réel :**

Le volume théorique obtenu est multiplié par un facteur de 60 % pour tenir compte des pertes et des pratiques observées sur les chantiers (sur-excavation, marges de sécurité, adaptation aux aléas du terrain)

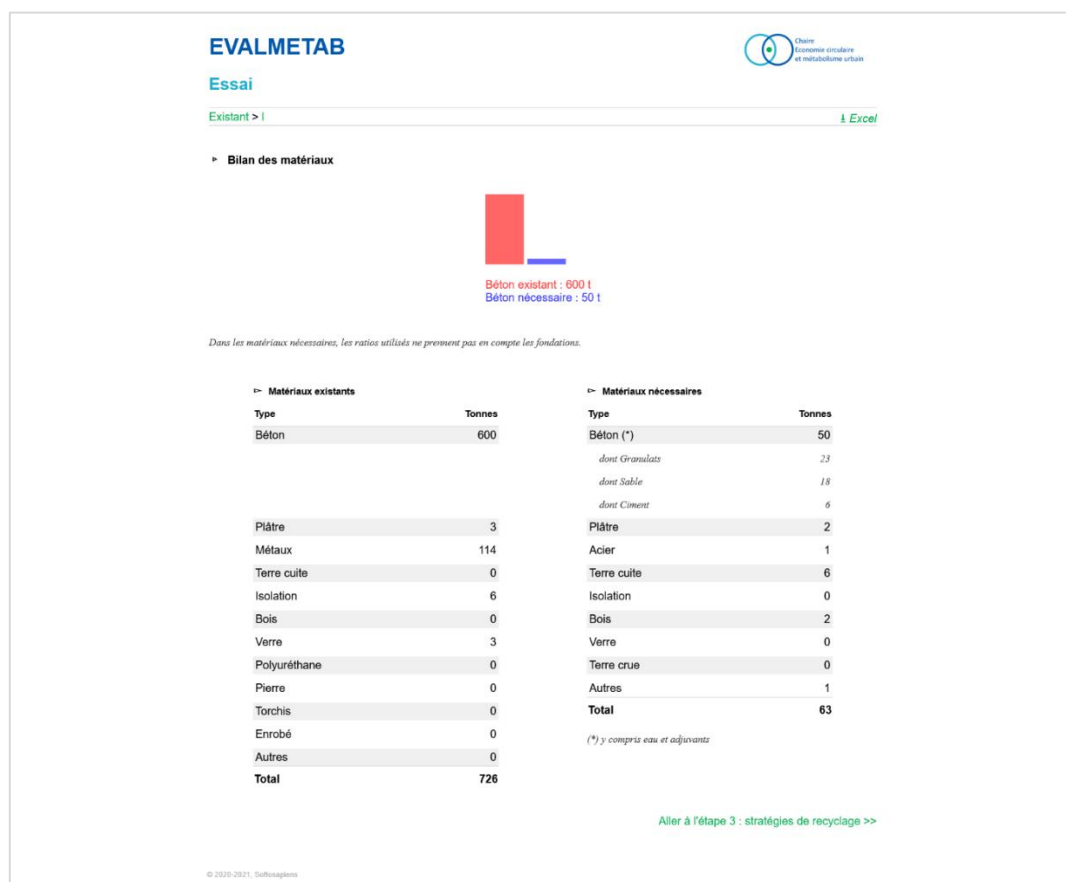
- **Intégration dans l'outil :**

Les ratios de terres excavées ainsi obtenus sont adaptés à chaque typologie de bâtiment et à chaque scénario constructif, offrant une base robuste pour la planification et l'optimisation des projets d'aménagement.

5. Bilan de matière

Une page bilan de matière permet de comparer les principaux matériaux issus de la déconstruction aux matériaux nécessaires à la construction pour un scénario spécifique (Figure 1). A des fins de comparaison, les quantités en granulat, sable et ciment pour la construction sont également exprimées en quantité de béton : on considère une teneur en eau de 6%.

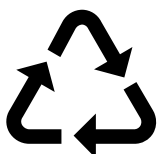
Figure 1 : Illustration d'un bilan matière sur l'outil EVALMETAB



6. Comparaisons des scénarios et estimation des possibilités de recyclage

Une estimation de l'impact des scénarios constructifs choisis est proposée. Tout d'abord un comparatif des tonnages et volumes de matériaux est proposée ainsi qu'une option de recyclage du béton dans le bâti à construire.

6.1. Stratégies de recyclages



Le volet recyclage permet à l'utilisateur de choisir des taux de recyclage et d'en visualiser l'impact. Il présente les quantités disponibles de gravillons de béton recyclé dans l'hypothèse d'un choix de concassage sur place du béton issu de la démolition.

→ On considère que **38,8% du béton déconstruit sera convertit en gravillons utilisables pour refabriquer du béton.**

Basés sur les résultats obtenus dans le cadre du projet E3S⁸, ces quantités tiennent compte de la proportion de béton impropre au concassage et d'un pourcentage de perte lors du concassage.

L'utilisateur peut indiquer le taux de recyclage souhaité lors de la construction. Ce taux est contraint par plusieurs normes françaises et européennes. A titre indicatif, un taux de 26% de gravillons recyclés est proposé : celui-ci correspond à une limite de 15% de granulats⁹ totaux (gravillons + sable) recyclés, utilisée en totalité sur les gravillons (norme Eurocode 2, voir encadré ci-dessous).

Un ATE^x spécifique au projet permet de dépasser ces valeurs, et d'aller jusque 100% de granulats recyclés dans un bâtiment neuf.

Remarque sur la terminologie : Les granulats comprennent dans cette note à la fois les gravillons et le sable (cf. projet national Recybéton). Dans l'interface, la terminologie « granulats » est utilisée pour désigner les gravillons seulement ; le sable est à part (cf. ADEME / CSTB, prospective de consommation des matériaux).

Quel taux de granulats recyclés peut-on utiliser pour la formulation de béton neuf ?

Il n'existe pas de taux unique et fixe pour l'incorporation de granulats recyclés dans le béton neuf. Les taux autorisés varient selon plusieurs paramètres :

- Issu de béton ou de maçonnerie)
- Environnement et contraintes subies)
- Structurel, non structurel)
- Essais de performance, approche performantielle)

1. Conformité à la norme NF EN 206+A2/CN

- **La norme NF EN 206+A2/CN (version 2022/2025)** encadre désormais de façon détaillée l'incorporation de granulats recyclés dans le béton, en fonction :
 - du type de granulats recyclés (type 1 ; type 2),
 - de la classe d'exposition du béton,
 - et du niveau de justification performantielle apporté.

⁸ Concassage du béton des bâtiments de l'ancien campus de l'Ecole Centrale à Chatenay Malabry, à destination du futur éco-quartier La Vallée.

⁹ Les granulats comprennent dans cette note à la fois les gravillons et le sable (cf. projet national Recybéton). Dans l'interface, la terminologie « granulats » est utilisée pour désigner les gravillons seulement ; le sable est à part (cf. ADEME / CSTB, prospective de consommation des matériaux).

Le **Tableau 16** de la norme NF EN 206+A2/CN (2022/2025) fixe, pour chaque classe d'exposition du béton, les pourcentages massiques maximaux de substitution autorisés pour les gravillons recyclés de type 1 et 2 et le sable recyclé.

Tableau 16 : Pourcentage massique maximum pour les granulats recyclés de type 1 et de type 2, et le sable recyclé (selon la classe d'exposition)

Classe d'exposition	X0	XC1, XC2		XC3, XC4, XF1		XD1, XS1		XF2, XD2, XD3		XS2, XS3		XF3, XF4		XA
Gravillon recyclé type 1	60	40	60	30	50	30	50	20	40	10	30	10a	30a	0b
Sable recyclé	30	10	20	10	20	10	20	10	15	10	15	0b	15	0b
Gravillon recyclé type 2	40	20	30	15	25	15	25	10	20	5	15	5a	15a	0b
Sable recyclé	15	5	10	5	10	5	10	5	5	0b	5	0b	5	0b

Tableau selon SBNPE¹⁰

- **Les taux maximaux varient fortement selon la classe d'exposition** du béton : ils sont plus élevés pour les environnements peu agressifs (jusqu'à 60 % pour les gravillons type 1 en X0) et très limités, voire nuls, pour les environnements les plus sévères (classes XA, XF4...).
- **Le sable recyclé** est autorisé à des taux généralement plus faibles que les gravillons, souvent entre 10 % et 20 %.

2. Conformité à la norme Eurocode 2

Le taux d'incorporation de granulats recyclés dans le béton est également encadré par l'**Eurocode 2** (et son annexe nationale française), qui définit les règles de **dimensionnement des structures en béton armé**. Ces règles permettent, entre autres, de calculer les dimensions nécessaires d'un élément pour garantir sa résistance en fonction des caractéristiques du béton.

Les méthodes de calcul standard sont **valides uniquement si le béton contient jusqu'à 15 % de granulats recyclés (gravillons et sable confondus)**.

- **Au-delà de 15 %**, des **recalculs structurels** sont nécessaires, ce qui complique la conception et l'exécution du chantier.
- **Au-delà de 40 %**, des **essais spécifiques (type ATE_x)** doivent être menés pour **vérifier la performance du béton** utilisé.

Ainsi, même si la norme béton (NF EN 206+A2/CN) autorise des taux élevés, l'utilisation dans des éléments porteurs reste limitée à 15 % sans adaptation des calculs structurels, conformément à l'Eurocode 2 et à son annexe nationale.

7. Logistique



Le volet **logistique** de l'outil EvalMetab permet d'évaluer les **coûts** et les **émissions de CO₂** associés aux transports de matériaux, qu'il s'agisse de l'**évacuation** (déchets, matériaux issus de la déconstruction) ou de l'**approvisionnement** (matériaux nécessaires à la construction).

7.1. Ratios de coûts et d'émissions de CO₂

Pour estimer les impacts logistiques, des **ratios moyens** sont appliqués aux flux de matériaux transportés, exprimés en **grammes de CO₂ équivalent par tonne-kilomètre (gCO₂eq/t.km)** pour les émissions, et en **centimes par tonne-kilomètre** pour les coûts :

¹⁰ Webinaire SNBPE (Le Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi) Les principales évolutions de la NF EN 206/CN et le contexte normatif associé

Les ratios de coûts et de démission pris en compte pour le transport des matériaux sont les suivants (Tableau 17) :

Tableau 17 : Ratios d'émissions de CO₂ et de coûts selon le mode de transport

	Emissions de CO ₂ à la tonne-km	Coût moyen à la tonne-km
Route	97,3 gCO ₂ eq/t.km ¹¹	0,16 centimes ¹²
Fleuve	32,4 gCO ₂ eq/t.km ¹³	0,07 centimes ¹⁴

Ces ratios sont ensuite **multipliés par les tonnes-kilomètres**, c'est-à-dire :

- la **masse des matériaux** évacués ou approvisionnés (en tonnes), déterminée dans les étapes précédentes,
- et la **distance de transport** (en km), renseignée dans la section suivante.

Les résultats permettent de **comparer différentes stratégies logistiques** selon leur efficacité environnementale et économique, en cohérence avec le reste de la méthodologie EvalMetab.

7.2. Approvisionnement

L'outil EvalMetab prend en compte les **flux logistiques d'approvisionnement** uniquement pour certains matériaux clés : **granulats, sable, terre crue et bois**. Ces flux sont modélisés à partir de **ratios fixes** de répartition modale (route / fleuve) et de **distances moyennes** observées à l'échelle nationale.

Matériaux pour le béton

Granulats et sable	% de l'approvisionnement en granulats et sable utilisant ce mode	Distance moyenne d'approvisionnement pour ce mode
Fleuve	42%	188 km
Route	58%	50km

Terre crue

Terre crue	% de l'approvisionnement en terre crue utilisant ce mode	Distance moyenne d'approvisionnement pour ce mode
Route	100 %	50km

Bois

Bois	% de l'approvisionnement en bois utilisant ce mode	Distance moyenne d'approvisionnement pour ce mode
Fleuve	42 %	2206km ¹⁵
Route	58 %	1106km

7.3. Evacuation

L'évacuation des matériaux déconstruits est entièrement **personnalisable** par l'utilisateur. Trois **types de destinations** doivent être renseignés dans l'outil :

¹¹ Données observatoire national de la logistique pour l'année 2023, selon Tableau de bord de la logistique. Synthèse du tableau de bord, données 2023. UGE

¹² Hypothèse PL(9,73t). Commissariat général au développement durable. Mobilités Coûts moyens socio-économiques Décembre 2020

¹³ Données observatoire national de la logistique pour l'année 2023, selon Tableau de bord de la logistique. Synthèse du tableau de bord, données 2023. UGE

¹⁴ Hypothèse transport fluvial grand gabarit 1 075 tonnes. Commissariat général au développement durable. Mobilités Coûts moyens socio-économiques Décembre 2020

¹⁵ La provenance du bois de construction en Île-de-France a été déterminée à partir des fiches de traçabilité bois fournies par l'entreprise Eiffage Immobilier. Ces documents précisent l'origine du bois utilisé dans divers projets, en Île-de-France et ailleurs. Leur analyse montre que plus de 80 % du bois employé dans les constructions franciliennes provient de l'étranger, principalement sous forme de bois résineux

1. Déchets inertes (ISDI)
2. Déchets non dangereux (ISDND)
3. Béton déconstruit (recyclage, remblai de carrière ou ISDI)

L'utilisateur sélectionne les destinations souhaitées, idéalement les plus proches du chantier. Un lien vers la **base de données des exutoires de la Fédération Française du Bâtiment (FFB)** est fourni pour faciliter ce choix.

Dans l'outil métabolisme, l'évacuation des matériaux est réalisée soit par la route soit par le fleuve¹⁶, selon le choix de l'utilisateur. Les distances sont également renseignées par l'utilisateur : les distances routières peuvent être estimées via Google Maps, les distances fluviales en utilisant l'outil en ligne Fluvicap.¹⁷

8. Exemple d'utilisation du logiciel : Application sur la ZAC Gare des Ardoines

Contexte du projet

L'outil EvalMetab a été appliqué sur la ZAC Gare des Ardoines (Vitry-sur-Seine, 94) pour comparer quatre scénarios de gestion des matériaux. L'étude a montré que seule l'adaptation des modes constructifs aux ressources locales (ex : terre crue) permettait de réduire significativement la dépendance aux carrières et l'empreinte urbaine, malgré une valorisation maximale des matériaux issus de la déconstruction

La ZAC Gare des Ardoines, à Vitry-sur-Seine (94), est une opération majeure de renouvellement urbain au sein de la Métropole du Grand Paris. Initiée en 2007 par l'EPA ORSA, elle prévoit la construction de 660 000 m² de surface bâtie neuve sur une ancienne zone industrielle, en bordure de Seine et à proximité de la future ligne 15 du métro. Ce projet s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire visant à optimiser la gestion des matériaux et à réduire l'empreinte environnementale du chantier.

Méthodologie appliquée

- **Modélisation du métabolisme** à l'échelle du chantier : quantification des stocks existants (bâti et sol) et estimation des matériaux nécessaires au projet.
- **Analyse topo-historique** du sol pour évaluer les variations d'épaisseur et la pollution éventuelle.
- **Prise en compte des terres excavées** liées à la construction de la ligne 15 du métro et au remblaiement nécessaire pour prévenir les risques d'inondation.
- **Typologie des bâtiments** : distinction selon l'usage et la période de construction pour le bâti existant, et scénarios variés pour le bâti projeté.

Scénarios étudiés

Quatre scénarios ont été évalués pour optimiser la consommation de ressources et l'impact environnemental :

- **Scénario standard** : pratiques dominantes du BTP, prédominance du béton, valorisation limitée des matières issues de la démolition.
- **Scénario de valorisation maximale** : réutilisation hors site des terres excavées, recyclage du béton en granulats.
- **Scénario d'optimisation du transport** : acheminement des matériaux et évacuation des déchets par voie fluviale.

¹⁶ L'accessibilité à la voie d'eau est une spécificité de l'Île de France

¹⁷ <http://www.fluviacarte.com/fr/fluviacap>

- **Scénario de valorisation innovante** : approvisionnement en matériaux locaux et structuration de filières innovantes (terre crue, béton recyclé, mâchefers).

Résultats comparatifs

Scénario	Taux de valorisation matière	Émissions CO ₂ transport (t)	Volume extension urbaine (Mm ³)
Standard	42,7 %	3 940 à 14 350	2,7
Valorisation maximale	99,4 %	6 040 à 23 860	2,5
Optimisation du transport	99,4 %	2 230	2,5
Valorisation innovante	99,4 %	2 440 à 10 020	0,8

Enseignements clés

- **Différentiel marqué** entre matériaux valorisables issus de la déconstruction et besoins du projet : la construction nécessite une importation massive de béton.
- **Limite du recyclage seul** : la couverture des besoins par les granulats recyclés reste faible, nécessitant un approvisionnement externe important.
- **Intérêt des filières locales** : seule l'adaptation des modes constructifs aux ressources locales (terre crue, filière innovante) permet de réduire significativement la dépendance aux carrières et l'empreinte urbaine.
- **Impact logistique** : le transport fluvial réduit les émissions, mais la localisation des exutoires reste déterminante.
- **Structuration de filières** : la réussite d'une démarche circulaire dépend de la structuration de filières locales de valorisation et de production de matériaux innovants.

9. Annexes

Classification des bâtiments pour l'estimation d'un stock pré-existant (démolition) ([Tableau 18](#)).

Tableau 18 : Classification des bâtiments pour l'estimation d'un stock pré-existant (démolition)

Classifications de bâtiment retenues	(Sources : Projet ANR ASURET, pp 51-61 et pp 65-73)
Habitat ancien / petit commerce (centre historique) - typo 1	R+2, ossature bois, remplissage brique, fondation pierre et charpentes bois
Habitat ancien / petit commerce (centre historique) - typo 2	R+2, maçonnerie en pierre, planchers et charpentes bois
Habitat / petit commerce	R+1, maçonnerie mixte, planchers et charpentes en bois
Logement individuel pre-1950	Maison individuelle R+1, maçonnerie en pierre naturelles, charpente bois, couverture tuile
Logement individuel 50-70	Maison individuelle R+1, maçonnerie mixte pierre naturelle et bloc béton, charpente bois, couverture tuile
Logement individuel période récent	Maison individuelle, plain-pied maçonnerie bloc ou brique creuse, charpente bois, couverture tuile
Logement collectif 50-70	R+5, structure points porteurs en BA, remplissage ext en maçonnerie, toiture terrasse
Logement collectif période récente	R+3, SS-1, structure voile béton, toiture terrasse
Commercial	struct métallique, bardage et couverture en acier laqué
Tertiaire ancien, bureaux anciens	Maçonnerie en pierre ou mixte pierre/briques ou blocs béton, planchers et charpentes en bois
Bâtiment industriel	struct métallique, bardage acier, toiture terrasse
Bâtiments militaires	Hangars, structure mixte façade maçonnerie début XXIème
Bureaux	R+3, SS-1, structure voile béton, toiture terrasse
Bâtiments d'école primaire, secondaire, Lycées	R+3, SS-1, structure voile béton, toiture terrasse
Parkings de surface	Espaces de stationnement à ciel ouvert situés au niveau du sol
Parkings silo	Structures de stationnement sur plusieurs niveaux, situées au-dessus du sol,

Classification des bâtiments pour l'estimation de construction (Tableau 19).

Tableau 19 : Classification des bâtiments pour l'estimation d'un stock pré-existant (démolition)

MI diffuses - classique
MI groupées - classique
Logement collectif - classique
EHPAD - classique
Bureaux - classique
Hotels - classique
Commerces - classique
Enseignement - classique
Parking en silo
Parking de surface
Logement collectif – terre crue
Bureaux – terre crue
Commerces – terre crue
Enseignement – terre cure
Logement collectif – bois
Logement collectif – mixte bois-béton

Tableau 20 : Tableau des coefficients ASURET utilisés pour les estimations du stock de matière existant

Type de bâtiment	Béton	Métaux / Alliages (Acier)	Isolation (laine minérale et polystyrène, polyuréthane)	Verre	Plâtre	Enrobé (asphaltes)	Terre cuite	Bois	Torchis	Pierre	Polyuréthane	Autres
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Habitat ancien / petit commerce (centre historique) – typologie 1	0	0	2	1,4	14,4	0	52,5	118,25	416,67	416,67	0	0
Habitat ancien / petit commerce (centre historique) – typologie 2	368,59	0	2,41	1,4	14,4	0	151,11	74,92	0	1385,9	0	0
Habitat / petit commerce	0	0	3,08	1,4	14,4	0	189,15	92,25	0	1512,5	0	0
Logement individuel pre-1950	0	0	3,4	1,4	14,4	0	63,75	90,97	0	1684,82	0	0
Logement individuel 50-70	373,39	0	3,4	1,4	14,4	0	63,75	91,11	0	546,43	0	0
Logement individuel période récent	759,86	3,27	7,18	2,1	29,89	0	102,79	102,38	0	0	0	1,4
Logement collectif 50-70	1595,65	29,75	1,75	2,55	29,75	5,83	63,75	5,95	0	0	0	2,7
Logement collectif période récente	1525,75	40,21	1,57	3,19	28,49	17	0	22,1	0	0	2,55	2,13
Commercial	400	75,95	4	2	1,8	0	0	0	0	0	0	0
Tertiaire ancien, bureaux	0	0	2,53	1,4	14,4	0	52,37	73,44	0	1441,81	0	0
Bâtiment industriel / Equipements	400	83,39	4	0,6	1,1	33	0	0	0	0	0	0
Bâtiments militaires	500	65,8	0	0	0,5	0	101,2	0	0	200	0	0
Bureaux récents	1525,75	40,21	1,57	3,19	28,49	17	0	22,1	0	0	2,55	2,13
Bâtiments d'école primaire et secondaire, Lycées, Universités, Maternelles	1525,75	40,21	1,57	3,19	28,49	17	0	22,1	0	0	2,55	2,13

10. Bibliographie

Sous la coordination de L. Rouvreau: Michel P., Serrand M., Montfort-Climent D. (BRGM), Jayr E. (CSTB), Papinot P.E. (13 Développement) (2012) - **Projet ANR ASURET** -Analyse de flux de matière du secteur de la construction à l'échelle de l'ouvrage et du territoire (tâche 4.2) -Rapport final. BRGM/RP-61849-FR, 131 p., 27 fig., 48 tabl., 1 ann.

ADEME, LEONARDON Philiipe, CSTB, LAURENCEAU Sylvain, LOUERAT Mathilde. CORE E, 2019. **Prospective de consommation de matériaux pour la construction des bâtiments neufs aux horizons 2035 et 2050**,. 113 pages.