



HAL
open science

Le réemploi des terres d'excavation, un outil pour répondre à la transition écologique : le cas de la future ligne M3, à Toulouse

Bénédicte Givelet

► To cite this version:

Bénédicte Givelet. Le réemploi des terres d'excavation, un outil pour répondre à la transition écologique : le cas de la future ligne M3, à Toulouse. Architecture, aménagement de l'espace. 2021. dumas-04111706

HAL Id: dumas-04111706

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04111706v1>

Submitted on 31 May 2023

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.



Le réemploi des terres d'excavation, un outil pour répondre à la transition écologique

Le cas de la future ligne M3, à Toulouse

Bénédicte Givelet - ENSAP Bordeaux - 2020/2021-Directrice de mémoire : Géraldine Ginestet

Page de couverture : crédit Richard Damoret/REA

Remerciements

Avant de commencer ce mémoire, je tiens à remercier l'ensemble des personnes impliquées qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de master.

Tout d'abord, je tiens à remercier ma directrice de mémoire, Madame Géraldine Ginestet qui a accepté de m'accompagner durant l'élaboration de ce mémoire. Son expertise, son intérêt pour ce sujet mais aussi sa disponibilité et ses conseils m'ont permis de faire évoluer mon travail vers plus de réflexion et de professionnalisme. Je lui en suis extrêmement reconnaissante.

Mes remerciements s'adressent également à l'équipe enseignante, Aline Bartet et Sylvain Shoonbaert pour leur disponibilité et leurs précieux conseils.

Je souhaite aussi témoigner de ma gratitude à Monsieur de Lamballerie, ingénieur chez Tisséo Ingénierie, à Monsieur Vincent Savatier ingénieur géotechnicien chez Egis, et à Monsieur Michel Fournier responsable ingénierie études et chantiers innovations, de Saint-Gobain solutions France d'avoir accepté de m'accorder de leur temps afin de me fournir des données qui ont contribué à l'enrichissement de ce mémoire. Je remercie également Madame Marie-France Dubourg et Monsieur Jérôme Dubourg, directeurs et gestionnaires de la céramique Dubourg pour leur disponibilité et d'avoir accepté une visite de leur fabrique. Je remercie également Monsieur Bazin, gérant de la briquetterie des terres cuites du saves, Madame et Monsieur Blanc de la briqueterie de Nagen et Monsieur Thierry Courau, directeur de la communication de Semtcar.

Un grand merci à mes amis, ma famille, mon compagnon Damien et mes enfants Raphaël et Julian qui grâce à leurs sourires et leurs joies de vivre m'ont soutenu et donné le courage de réaliser ce que j'aime faire.

Remerciements

Introduction

Motivations personnelles
Problématique
Organisation du mémoire

9-11

PARTIE 1 : Les atouts de la construction en terre crue pour inciter l'émergence de filières de valorisation des terres excavées

1/ Comprendre cette matière à travers ses représentations symboliques

- a/ La terre, une forte charge symbolique 15-16
- b/ La terre, une matière source d'émotions 16-18
- c/ La terre, un cycle infini ? 19
- d/ La terre, un rite de passage entre la vie et la mort 20

2/ Comprendre cette matière à travers ses propriétés techniques

- a/ Une matière qui nous relie et qui fait émerger une culture constructive 20
- b/ La terre, un moteur pour une transition écologique et sociale 21
- c/ Des contraintes de mise en œuvre qui freinent le développement de pratiques constructives 22

3/ Exemples de conceptions architecturales, employant une technique monolithe et de remplissage

- a/ Une construction employant une technique monolithe : Bâtiment 5 de l'îlot Ydeal Confluence sur la ZAC 2, Clément Vergély, Lyon Confluence 24-25
- b/ Une construction employant une technique de remplissage et de finition : Maison B - Atelier Belenfant Daubas 26-27
- c/ Une construction employant une technique de brique de terre crue structurelle. L'Aria, médiathèque et salle de spectacles, à Cornebarrieu - Atelier Philippe Madec 27-28

Conclusion de la partie 1

29

PARTIE 2 : Analyse d'opérations de travaux souterrains, (types construction de métro) questionnant la revalorisation des terres excavées

1/ Le chantier du Grand-Paris : la ligne 16

- a/ Présentation des travaux 33-34
- b/ Quantités et qualités estimées des déblais 34-36
- c/ Analyse des formations géologiques traversées et réflexion des potentiels de valorisation de la matière 37-38
- d/ Potentiel d'un transport alternatif 38-39
- e/ Un exemple de revalorisation : le projet cycle terre 40-47

2/ Le métro de Rennes : la ligne B	
a/ Présentation des travaux	48
b/ Quantités et qualités estimées des déblais	49
c/ Analyse des formations géologiques traversées et réflexion des potentiels de valorisation de la matière.	49
d/ Potentiel d'un transport alternatif	50
	51
3/ Le métro de Lyon : la ligne E	52-53
Conclusion de la partie 2	52-53

PARTIE 3 : Gestion des terres de déblais de la future ligne M3, à Toulouse. Réflexion sur une stratégie générale

1/ Présentation du projet M3	57
2/ Caractérisation des formations géologiques.	
a/ Les contextes environnementaux : pédologie, géologie, hydrogéologie	58-60
b/ Les contextes chimico-environnementales	61
3/ Les différentes techniques d'extraction et leur impact sur la qualité des déblais excavés	
a/ Les tunneliers à pression de terre	61-62
b/ Les tunneliers à pression de boue	63-64
c/ Les parois moulées et l'excavation par méthodes traditionnelles	64-65
d/ L'organisation prévisionnelle des tunneliers	65-66
4/ Le choix des modes de transport des terres au coeur d'une optimisation des flux	66-71
Conclusion de la partie 3	71

PARTIE 4 : Pistes de valorisation des terres de déblais de la future ligne M3, à Toulouse

1/ Transformation de la matière en matériaux de construction, interroger la filière de la terre cuite	
a/ L'histoire d'une brique	75-76
b/ Enquête sur les capacités à réemployer les process industriels de la terre cuite	77-79
c/ Projection sur la métropole toulousaine	80-81

2/ La terre crue, un matériau au service du développement urbain	
a/ L'articulation du développement urbain et du système de transport collectif	82-83
b/ L'intégration du matériau terre dans la conception et la réalisation d'un projet architectural	84-85
c/ L'industrialisation de la filière terre au service de l'innovation technique	85-88
d/ Estimation et comparaison de la consommation d'énergie grise, selon les techniques de construction et les volumes de terre employée. Exemple d'un bâtiment collectifs de 16 logements, type R+3	89-93
3/ Le réemploi des terres d'excavation en support fertile, pour la végétalisation de la métropole toulousaine	
a/ Le projet urbain toulousain, ville rose / ville verte	94-96
b/ Valorisation des terres inertes extraites des travaux souterrains en substrat fertile	96-100
c/ Exemple de la ZAC de Rivel, Socoval, à Baziege et Montgiscard	100-101
d/ Un besoin grandissant de terres fertiles pour compenser l'imperméabilisation des sols	102
Conclusion de la partie 4	102-103
Conclusion générale	104-105
Rappel de la problématique	
Méthode de travail et perspectives	
Bibliographie	108-111
Table des illustrations	112-114
Annexes	

Le 5 juillet 2017, le comité syndical de Tisséo-Collectivités a approuvé le tracé de la ligne M3, à Toulouse. Ce projet vise à créer une troisième ligne de métro automatique qui desservira l'agglomération toulousaine et à prolonger la ligne B existante, pour horizon 2025. Le tracé, long de 27 km, desservira les zones majeures d'emplois, notamment celles de la zone industrielle aéronautique. Ce chantier colossal, qui va se dérouler sur une période de 4 à 5 années, va générer une grande quantité de déchets inertes et de déblais. Selon Tisséo (maître d'ouvrage délégué de l'opération), il semblerait que l'ensemble des chantiers produise plus de 2,5 millions de m³ de déblais, soit l'équivalent de 250 000 camions poids lourds.

Tisséo annonce cependant un objectif de valorisation d'au moins 20% de ces déblais :

- En remblaiement de carrières.
- En réemploi pour des projets d'infrastructures, tels que l'autoroute Toulouse Castres.
- En banque de matériaux.
- En filière innovante de réutilisation.

Cette volonté de recyclage reste pour le moment à être développée. La piste actuelle privilégiée par Tisséo semblerait être le stockage en carrière ou en ISDI (installation de stockage de déchets inertes). Pour cela, il compte s'appuyer sur des lieux de stockage existants et souhaite viser de nouveaux sites, notamment des carrières en eau, qui toujours selon Tisséo seraient en nombre suffisants autour de Toulouse pour répondre au besoin du projet¹. Dans les rapports et enquêtes rendues publiques, la solution du stockage apparaît comme la seule issue viable pour répondre à l'envergure de ce projet. Pourtant, nous pouvons aussi imaginer que le réemploi des déblais sur site, l'élimination des déchets et surtout la valorisation de la matière peut être une réelle réponse, bien plus satisfaisante. Les modes d'évacuation des déblais et le stockage de ces déchets inertes dans ces carrières et ISDI vont avoir de réels impacts environnementaux, et de grosses conséquences sur les riverains et les usagers qui occupent ces zones impactées. L'utilisation exclusive de la route pour l'évacuation d'un volume considérable de matière inerte va générer un nombre important de rotations de poids lourds, sur des secteurs urbains régulièrement saturés. De plus, la création de nouvelles zones de stockage provisoires ou définitives va forcément artificialiser un espace, impacter les territoires et les milieux naturels. Les risques pour l'environnement sont alors nombreux : pollution des eaux souterraines, destruction de la biodiversité, émissions atmosphériques, qualité de l'air, surconsommation d'énergie...

Le chantier du Grand Paris va générer lui aussi d'énormes quantités de déchets et à une échelle bien plus importante que celle de la ligne M3 à Toulouse. Il est confronté aux mêmes problématiques, à savoir comment gérer de manière durable ces déchets inertes. Aujourd'hui, nous vivons une tension sur les ressources disponibles. D'une part, nous développons des projets gourmands et consommateurs en ressources et d'autre part, nous devons faire attention, et diminuer notre consommation de ces mêmes ressources. Pour répondre à ces enjeux, il faut réinventer un système de construction, une manière différente de concevoir et s'interroger sur des procédés beaucoup moins

1 *Projet Toulouse Aerospace Express 3e ligne de métro et ligne aéroport express et connexion ligne B*, Avis de l'autorité environnementale sur le dossier présentant le projet et comprenant l'étude d'impact au titre d'une évaluation environnemental commune émis le 11 avril 2019, site internet : <http://www.mrae.developpement-durable.gouv.fr/>

consommateurs, plus sobres, et plus respectueux de notre environnement naturel. La terre crue peut donc avoir un rôle majeur dans cette transition et dans ces projets de grandes envergures. Pour cela, il faut repenser un nouveau système économique qui doit absolument tenir compte des éléments naturels qui nous entourent.

MOTIVATIONS PERSONNELLES

Le secteur du bâtiment rejette chaque année 25 % du total des émissions de CO₂, contre 28 % pour les transports, 22 % pour l'industrie, 12 % pour l'agriculture/sylviculture et 10 % pour les secteurs divers. Si l'on considère les énergies consommées, le secteur du bâtiment représente à lui seul 45,8 % du total des énergies contre 27,7 % pour l'industrie, 23,9 % pour les transports et 2,60 % pour les autres secteurs.

Le secteur du bâtiment et de la construction détient donc un énorme potentiel insuffisamment exploité pour réduire les émissions de CO₂. Il est temps de prendre des mesures radicales afin de permettre au secteur mondial et national du bâtiment et de la construction de réduire son empreinte carbone, conformément aux accords nationaux.

La SNBC² a été adoptée pour la première fois en 2015 et elle a été révisée en 2018-2019, visant à atteindre la neutralité Carbone en 2050. Dans ce cadre, l'Ademe et le Carbone 4 publient une étude pour que le secteur du bâtiment puisse s'inscrire dans une démarche zéro émission nette³, et présente 3 axes d'action sur lequel les acteurs du bâtiment peuvent participer à la neutralité territoriale :

- La réduction des émissions du bâti (sobriété énergétique des bâtiments, priorité à la chaleur renouvelable, équipements « bas carbone »...)
- L'accompagnement à la réduction des empreintes carbone (offre de produits et de services permettant aux occupants de réduire leur impact climatique.
- La contribution à l'augmentation des puits carbone (limitation de l'artificialisation des sols, biomasse associée au stockage du carbone, produits biosourcés...)

Ce nouveau tournant montre bien qu'il n'est plus possible de consommer des ressources constructives extrêmement lointaines et en même temps de produire des déchets sans se préoccuper de leur devenir. On ne peut plus rester dans l'illusion de l'abondance, consommer et jeter. Nous devons repenser un nouveau système, questionner le réemploi, le recyclage, il faut réussir à quitter l'ancien système, ce qui demande à l'ensemble des acteurs de la construction de se repositionner. Il faut opérer des changements très profonds dans les manières de concevoir et de prescrire. Pour cela, la terre est une matière fabuleuse puisqu'elle est abondante et recyclable à l'infini. Profiter de travaux souterrains, tels que le chantier de la future ligne M3, à Toulouse, pourrait rendre cette matière facilement accessible localement, et en grande abondance. De plus, elle est très peu cher, valorise le savoir-faire, ce qui n'est pas l'orientation actuelle de la filière BTP de ces dernières années, qui cherche plus à rationaliser et à industrialiser des procédés de construction. Il faut donc revoir les grands paradigmes qui se basent sur des ques-

2 *Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)*, site internet : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr>, site internet : strategie-nationale-bas-carbone-snbc

3 *Neutralité & Bâtiment : comment les acteurs du secteur peuvent s'inscrire dans une démarche zéro émission nette*, site internet : <http://www.carbone4.com/publication-neutralite-batiment/>

tions purement financières et qui ne prennent pas suffisamment en compte les questions environnementales. Cela implique donc que l'ensemble des opérateurs et des acteurs de la construction modifient leur rôle et leur position historique pour une vraie remise en cause profonde. Ils doivent également questionner leurs aprioris sur ce matériau, bien trop nombreux et persistants encore aujourd'hui. A ce sujet, Ronald Rael⁴ écrit en 2009 : « *L'hégémonie du monde industrialisé a été responsable pendant des décennies du complexe d'infériorité des cultures de la construction en terre crue. Aujourd'hui, ce matériau de construction le plus répandu sur la planète est étiqueté comme « alternatif » ou pire « primitif ».*

PROBLÉMATIQUE

En quoi le réemploi des terres d'excavation du chantier de la ligne M3, à Toulouse, peut-il être un outil pour répondre à la transition écologique et au développement d'une économie locale ? Comment transformer en ressources ces terres de déblais, considérées comme déchets ?

ORGANISATION DU MÉMOIRE

Afin de répondre à cette problématique et à toutes les questions qu'elle engendrent, ce mémoire pourrait se développer en quatre parties.

Dans un premier temps, il s'agira de questionner les représentations symboliques, sensorielles, émotionnelles, et les propriétés techniques de la terre crue, pour comprendre les atouts et les défauts de cette matière.

Dans un second temps, il s'agira d'effectuer une analyse de différents travaux souterrains, similaires à celui du M3 et employant l'utilisation de tunneliers et de techniques traditionnelles d'extraction. Le but est de construire une démarche comparative pour évaluer la performance des processus mis en place ou non dans le réemploi des terres d'excavation. Cette comparaison permettrait de préciser les avantages et les faiblesses de chaque projet et d'en identifier les voies d'amélioration. Le but est donc de faire ressortir une logique de bonnes pratiques applicable au chantier M3, à Toulouse. Puis, cette troisième partie portera sur l'élaboration et la compréhension d'éléments plus ou moins techniques, nécessaires pour porter une réflexion contextuelle sur le réemploi des terres excavées. Nous verrons également dans cette partie l'importance d'anticiper un grand nombre de paramètres en phase chantier afin de parvenir à une éventuelle revalorisation de la matière.

Pour finir, il s'agira de détailler dans une dernière partie quelques projections, de mettre en perspectives des solutions de réemploi, en adéquation avec l'activité de la métropole toulousaine. Ces quatre temps sont indispensables pour à la fois :

- Comprendre l'essence de la matière en tant que telle et l'impact qu'elle pourrait avoir sur notre environnement et nos perceptions.
- Analyser, comparer la capacité de réemploi des terres avec d'autres travaux souterrains afin d'en dégager les échecs et les réussites.
- Exploiter ces connaissances pour les travaux du M3, à Toulouse. Déterminer les différentes particularités de ce chantier pour en dégager un potentiel de valorisation.

4 *Earth architecture*, Rael Ronald, Princeton Architectural Press, November 2008, p.15.

Cette question du réemploi des terres d'excavation, qui est le sujet principal de ce mémoire, n'est fondé que sur l'intérêt sociétal, écologique, économique que peut susciter cette matière. Il est donc nécessaire, avant même d'approfondir cette question, de s'interroger sur la pertinence de l'utilisation de la terre crue dans la construction, et d'une manière plus générale.

Pourquoi valoriser la terre crue ? Quelles sont les qualités de cette matière ? Et les contraintes liées à sa mise en œuvre ? Quel est l'intérêt de réemployer cette matière dans notre environnement quotidien ?

PARTIE 1 : Les atouts de la construction en terre crue pour inciter l'émergence de filières de valorisation des terres excavées

1/ Comprendre cette matière à travers les représentations symboliques

1.a/ La terre, une forte charge symbolique

Pourquoi la terre ? Quel lien entretient-on avec elle ? Quelle place prend-t-elle dans nos cultures et les symboles de nos origines ? De quoi parlons-nous avec le mot "Terre" ? Du fondement et des origines de notre vie ? D'une matière à cultiver, symbole de fertilité ? D'une matière à respecter, à protéger, parce qu'elle représente le foyer de l'humanité ? Quelle place prend-t-elle dans notre quotidien ? Quelle en est notre perception ?

Selon le philosophe Henri Maldiney, il y a quatre éléments (la terre, l'eau, l'air et le feu), qui ont participé pour les grecs à la théorie de la formation de l'univers. « *au départ des anciennes cosmogonies grecques, ce qui veut dire que chacun a été le commencement à partir duquel le monde s'est constitué et déroulé. (...) Les Grecs les ont choisis parce que ce n'était pas pour eux simplement des objets. Un objet ne peut pas être à l'origine du monde. Il est déjà compris dans un mode représenté. La rencontre avec l'élément est autre chose qu'une perception objective. Elle implique une ouverture de l'homme à son monde à travers cet élément.* »⁵ Ces éléments, et la terre en particulier, sont donc à la fois perçus dans des composants réels mais qui font appel aussi à notre imaginaire et à des symboles, en lien avec nos cultures et nos croyances.

La terre fait partie de nous, elle est en nous puisqu'elle nous raconte l'origine de notre monde, notre propre histoire. Elle est directement associée à la création du premier homme "Adam", à "notre chair humaine". Adam, Adama en hébreux, signifie "fait de terre rouge" ou "homme façonné avec de la terre rouge comme le sang", "argile". Dans la religion judéo-chrétienne, Adam est le premier homme créé par Dieu le sixième jour de la création du monde. Dans nos croyances, la terre a été modelée, dans un objectif de création humaine. Elle nous a fait sortir de terre pour recevoir l'empreinte du vivant. "Alors Yahvé Dieu modela l'homme avec la glaise du sol, il insuffla dans ses narines une haleine de vie et l'homme devint un être vivant. Yahvé Dieu planta un jardin en éden, à l'orient, et il y mit l'homme qu'il avait modelé."⁶ Dans certaines représentations religieuses, la terre est la constituante principale de l'homme, c'est notre matière élémentaire. Il s'agit de la matière première, c'est-à-dire l'élément, l'ingrédient initial qui a servi à la fabrication de l'homme.

La terre porte également une forte charge symbolique dans la mythologie grecque. Dans la Théogonie d'Hésiode⁷, la terre est représentée par une divinité très importante, Gaïa, qui signifie "pays" ou "terre" en grec. Elle est représentée comme l'élément primordial pour la naissance des races divines. Effectivement, il s'agit de la mère des Titans, et des Titanides mais aussi d'un nombre incalculable de d'autres enfants. Elle a également donné naissance à Ouranos, la personnification du Ciel, à Ouréa (les montagnes et

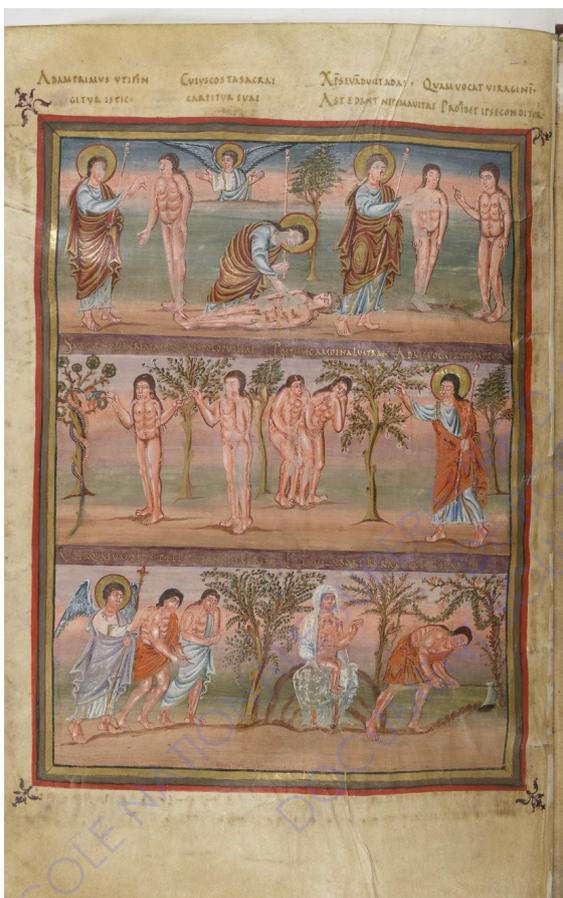
5 *Rencontre avec Henri Maldiney : l'eau, la terre, l'air, le feu*, Philosophie, ville et architecture. La renaissance des quatre éléments, C. Younès et Th. Paquot (dir.), La Découverte, 2002.

6 *La Genèse*, Bible de Vivien, dite "Première Bible de Charles le Chauve", Saint-Martin de Tours, 845-851. BnF, Manuscrits, Latin 1f.10v.

7 *Hésiode, Théogonie*, Traduction et édition Paul Mazon, Les belles Lettres, 1982, p36-39 et 48-50. (Théogonie 'du grec theos, dieu et gonos, génération) : doctrine relative à l'origine et à la généalogie des dieux : ensemble des divinités d'une mythologie donnée).

Pontus (la mer). Gaïa est la deuxième créature à apparaître au moment de la création de l'univers. Dans l'art, Gaïa a toujours été représenté comme une femme féconde, et matrone dont sa fertilité est un vrai symbole. Souvent accompagnée de fruits ou d'éléments qui personnifient les saisons, elle est représentée aussi comme une déesse agricole.

La terre a été une grande source d'inspiration et a donné lieu à de nombreux récits, dans les religions, la mythologie, comme symbole de création, et portant l'image de la fertilité et de la fécondité. La terre est à la fois un homme à l'origine de l'espèce humaine ou une femme créatrice, qui porte en elle la force, l'image féconde et nourricier, à travers l'expression de la "terre mère". La terre porte donc une forte charge symbolique et onirique. La terre convoque nos rêves, nos mythes, nos croyances qu'elles soient religieuses ou qu'il soit juste empruntée d'une culture.



En haut : fig 1, Biblia (Bible de Vivien, dite Première Bible de Charles le Chauve) Maître C. Enlumineur. Source : gallica.bnf.fr

En bas : fig 2, Partie centrale d'une grande mosaïque de sol, provenant d'une villa romaine de Sentinum, Italie, vers 200-250 après JC. Devant le dieu de l'éternité (Aion) est assise la déesse de la terre-mère, Tellus (l'homologue romaine de Gaïa), avec ses quatre enfants. Source : gallica.bnf.fr



1.b/ La terre, une matière source d'émotions

La matière terre fait preuve d'une grande plasticité. Elle est à la fois malléable, elle garde l'empreinte de la main qui la transforme. C'est une matière qui reçoit, qui accueille avec facilité la main de l'homme contrairement au métal par exemple qui a tendance à résister. Elle offre de grands potentiels expressifs, très souvent employée dans un grand nombre de domaines artistiques ou artisanaux. Si on décide de la convoquer et de rechercher son essence, elle est capable de générer une grande palette de textures, de couleurs, et donc de sensations : matière graveleuse du Pisé, surface lisse et brillante de certains enduits....

Le collectif ALBA⁸, travaille sur la poésie de la terre en exprimant à travers leurs oeuvres d'émotions profondes et des images liées aux souvenirs. Il expérimente la terre comme une matière brute, capable d'accepter et de laisser subir les actions du temps. Pour ce collectif, la terre est une matière vivante, qui mute, et qui se charge d'histoire au fil du temps. A travers leur travail, ils mettent en exergue et dénoncent la société de consommation qui nous incite à consommer des objets issus de filières industrielles. Selon eux, les matières lisses et transformées, sans âme forment notre environnement quotidien et nous détachent de nos origines. Les nouvelles technologies, comme les réalités augmentées ou les images de synthèse nous déconnectent de notre environnement naturel et nous font fusionner avec un monde artificiel. *“Contrairement à ces matériaux, les matières brutes s'inscrivent dans un cycle de vie infini. Elles sont en perpétuelles transformations car elles subissent l'action du temps et, par là-même, renvoient à l'origine du monde.”*⁹ L'atelier utilise donc le bois et la terre et s'en sert comme support d'expression. Ils travaillent, sur la beauté naturelle, propre à l'aspect brut de la matière, pour un souci de respect et de véracité. Ils veulent restituer l'authenticité de la matière en travaillant en parallèle sur les formes évocatrices que seule la matière peut offrir. Le travail de la terre développe le sens du toucher. Nous devons faire corps avec la matière, la mélanger, la malaxer. Un dialogue charnel s'opère à ce moment entre elle et l'individu qu'il la travaille.

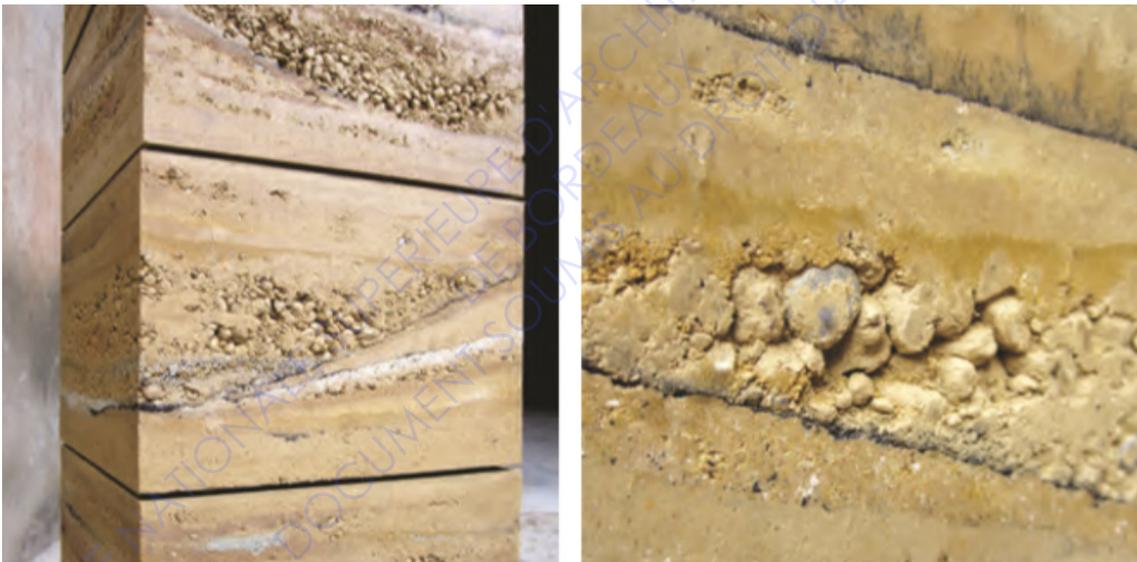


Fig 3, Géopillier, Salpêtrière 2011. Source : Atelier Alba.

La terre devient alors une matière sensorielle et peut profondément nous recentrer dans une idée d'unité, de symbiose entre le corps et la matière. Dans leur travail, les paysages qui nous entourent se retrouvent dans l'expérimentation de la matière. Cet exemple est flagrant, les qualités plastiques de la terre dévoilent subtilement des paysages : dans un évier des sillons ressemblants à des rivières, dans une terre compactée des strates de terre, des veines de roche, des reliefs montagneux, et les lignes

8 Collectif créé en 2008 par Mathilde et Nicolas Béguin. Ils développent un travail basé sur l'expérimentation de la matière brute, à travers la création artistique, à travers les arts, le design et l'architecture.

9 *Matières infinies*, Mathilde & Nicolas Béguin, Atelier Alba, le philotopie n°12, MaT(i)erre(s), déc 2016.

courbes d'un horizon....

Selon Antoni Tapies¹⁰, "*dans un simple morceau d'argile, on peut voir tout l'univers*" ou que nous puissions "*voir un monde dans un grain de sable*". La terre invite à la poésie et à l'imaginaire. Les échelles macros/micro peuvent alors se confondre dans l'expression de cette matière.

L'argile très utilisée également en art-thérapie puisqu'elle nous reconnecte à nos sens. Cette activité de modelage implique une mise en jeu du corps, (...). Le corps à corps entre le sujet et la matière représente à la fois quelque chose du corporel et de l'esprit. Le modelage met en œuvre la sensorialité et les affects.¹¹ Le travail de la terre est un puissant relaxant qui offre la possibilité avec simplicité d'éprouver, d'expérimenter le volume, le relief, la solidité, l'épaisseur... Cette matière accueille avec facilité l'expérimentation, la transformation, elle constitue très peu d'obstacles aux changements. Le travail de la terre nous autorise de se salir. Elle nous fait revivre avec intensité des souvenirs de l'enfance. La terre nous ouvre les portes de notre passé émotionnel et sensoriel "elle donne lieu à un transfert d'émotions et des affects". Le travail de la terre permet de libérer nos émotions. La terre est tolérante et accessible. Elle laisse nous exprimer, même notre violence et notre colère.

C'est le cas de l'artiste néerlandaise Alexandra Engelfriet, qui exprime un "corps à corps" brutal avec l'argile. Elle manifeste un combat tellurique avec force, elle cogne, elle modèle avec violence. Elle fait corps avec la matière et en laisse l'empreinte.



Fig 4, Photographies d'Alexandra Engelfriet, *Sonorité d'Argile*, 2013 (Ciry-le-Noble, France).
Source : photographes Bertrand Lauprêtre (gauche) et Ad Baars (droite).

La terre renvoie également à l'idée de l'éclosion. On la façonne entre nos doigts pour en créer une matière transformée. C'est donc notre être tout entier qui est mobilisé pour la transformer. Le fait-main, le savoir-faire prend alors toute une dimension dans l'approche sensorielle de cette matière.

Le décoffrage d'un mur pisé devient un instant magique, un événement. C'est un moment révélateur, comme une naissance, où la matière dicte et l'homme se laisse surprendre.

10 *Rien n'est mesquin*, La pratique de l'art, Antoni Tapies, Idées, 1970.

11 *Atelier thérapeutique argile. Création, destruction et trace*, Brun, Michaël, Clarisse Jeghers, et Audrey van Caeyseele, Cliniques, vol. 1, no. 1, 2011, p. 158-174.

En faisant appel à l'imaginaire et à la rêverie, la terre est une matière qui cherche à nous transformer tout autant que nous la transformons. L'homme qui la façonne se laisse guider par elle.

1.c/ La terre, un cycle infini ?

D'un point de vue géologique, la terre est une matière qui s'inscrit dans un cycle infini, qui nous dépasse complètement. Elle nous raconte l'origine du monde et nous emmène en voyage à travers le temps. C'est la matière première de toutes les matières, le commencement de tout, bien avant l'arrivée de l'eau. C'est elle qui offre l'espace pour le développement des organismes vivants, celle qui accueille tout être. C'est la matière la plus originelle et la plus fondamentale à toute création. Celle qui offre la capacité de relier l'ensemble des êtres vivants au monde et d'offrir un espace hospitalier.

Cependant, Hannah Arendt¹² constate que la conquête de l'espace marque une progression dans le manque de soin à l'encontre de la Terre. A cette période, l'Homme fantasme sur le fait de se séparer de la Terre Mère. Elle repère des expressions telles "*premiers pas d'évasion des hommes hors de la prison Terre*" (cf Levinas à propos de Gagarine). A travers son ouvrage, "*la condition de l'homme moderne*", ce désir futuriste et les challenges technologiques marquent bien une volonté de quitter la terre, de la rejeter. Elle insiste au contraire sur le fait que "*la terre est seule à procurer à l'homme un habitat*" et qu'il faut la protéger, faire en sorte qu'elle reste habitable.

Pour autant, Paul Josef Crutzen¹³, météorologue et chimiste de l'atmosphère, popularise le terme d'anthropocène", qui signifie "l'ère de l'humain", pour déterminer une époque de l'histoire de la Terre. Effectivement, à la fin du XVIIIe siècle, avec la révolution industrielle, les activités humaines ont une incidence globale et extrêmement désastreuse sur l'écosystème terrestre, puisqu'elles produisent des événements géologiques et des bouleversements écologiques qui rendent progressivement la terre de moins en moins accueillante. On constate encore une fois, l'Homme dans sa volonté de conquête veut tout maîtriser et devenir un influent majeur, prédominer son milieu terrestre.

D'une part, la terre porte la dimension de puissance, de force, de permanence, de résistance puisqu'elle est à l'origine du monde. D'autre part, elle est plastique, malléable, qui se comporte comme un miroir de nos actes et de nos état d'âme. L'activité humaine la fragilise progressivement, la salie, l'use et la tue à petit feu et crée une déconnection avec la matière.

« Chaque poignée, c'est tenir dans sa main le cosmos. Dans une seule poignée, l'histoire de la planète et de la relation aux hommes. Si le sol est sale, c'est que la vie va de travers. Est-ce que nous-mêmes nous ne retournerons pas au sol ? »¹⁴

12 *Condition de l'homme moderne*, H. arendt, Calmann-Lévy, 1983, p.33-39.

13 Paul Josef Crutzen, né le 3 décembre 1933 à Amsterdam, est un météorologue et chimiste de l'atmosphère néerlandais. Il est colauréat du prix Nobel de chimie 1995.

14 *Celui qui invente les couleurs de la terre*, Koichi Kurita, cité par François Bon dans, Tiers livre Éditeur, 2007.

1.d/ La terre, un rite de passage entre la vie et la mort

Enterrer : mettre en terre, l'enfouir dans le sol, le recouvrir de terre.

La terre représente autant la symbolique de la fertilité, de la création et de la naissance, que celle de la mort. Enterrer les morts devient un élément essentiel pour certains et se présente comme un rite de passage incontournable, un rituel funéraire qui sert à conjurer la peur des vivants face à la mort.

Mourir c'est retourner à la terre. « *C'est à la sueur de ton visage que tu mangeras du pain, jusqu'à ce que tu retournes dans la terre, d'où tu as été pris ; car tu es né poussière, et tu retourneras dans la poussière.* »¹⁵

Cette image illustre bien que la terre dans la religion chrétienne est au cœur du cycle de la vie et de la mort, qu'elle se situe dans notre rapport au monde. Cette citation nous montre que les être vivants sont des êtres de passage contrairement à la terre qui présente une forme de permanence. A travers cette citation, l'homme n'est qu'une poussière que la terre a fait émerger, et qu'elle fera disparaître. La terre évoque ainsi la force ultime qui offre, fertilise, et reprends, altère une substance organique par le temps, désagrège. La nature reprend ses droits.

2/ Comprendre cette matière à travers ses propriétés techniques.

2.a/ Une matière qui nous relie et qui fait émerger une culture constructive

Les architectures qui nous entourent sont souvent décontextualisées, comme un objet hors-sol, totalement délocalisé, à l'image de l'homme qu'il entretient avec son environnement et la matière première qui l'entoure. L'architecture de terre et le travail de la matière donnent la capacité de restaurer ce lien rompu entre l'homme et son environnement. Nos origines, nos souvenirs, nos racines plongent dans la matière et nous obligent à revoir le rapport que l'on a avec la nature. L'architecture de terre ne peut pas être coupée de son milieu puisque bien souvent elle exploite les ressources locales et renouvelables. L'utilisation importante de la main-d'œuvre la reconnecte également aux besoins en ressources humaines. La terre, c'est la chair de l'architecture puisqu'elle nous relie à nous même par l'aspect sensorielle qu'elle envoie, nous relie au monde qui nous entoure grâce à son approche "in-situ". Elle permet alors la reconnection avec la matière et l'environnement qui nous entoure.

La terre est source de notre mémoire collective, elle nous relie avec une histoire, une culture commune, qu'il faut s'efforcer de protéger et de transmettre.

*"L'impermanence de la matière terre devient alors un facteur de permanence du lien social et de la mémoire collective."*¹⁶

Se relier, c'est donc perdurer, prolonger une histoire avec comme base les savoirs, les connaissances du passé mais aussi dans l'instant présent à travers la transdisciplinarité. La construction en terre nécessite une grande pédagogie et une capacité de "faire-ensemble", c'est l'occasion de partager des moments importants (décoffrage d'un mur

15 La Genèse, Premier livre de la Bible.

16 *Matières à trans-former*, Zoé Tric et l'équipe amàco, Le philotope n°12, MaT(i)erre(s), déc 2016.

pisé, le moment du mélange...) et de générer du lien social. Il faut donc pour cela inciter, renforcer, réactiver certaines connaissances ancestrales de la construction en terre crue dans le but de remettre au goût du jour une culture constructive.

2.b/ La terre, un moteur pour une transition écologique et sociale

Au-delà de ses valeurs symboliques et oniriques, la terre a un certain nombre de qualités techniques qui positionnent cette matière dans les enjeux environnementaux actuels. Nous allons donc les énumérer, puisqu'il est bon de connaître les propriétés de ce matériau :

- Réversibilité : La terre crue est totalement réversible, et peut repasser facilement de l'état de matériau à l'état de matière. Elle est totalement recyclable et après utilisation dans le bâtiment, elle peut devenir un substrat pour le sol. De plus, sa réversibilité facilite l'entretien des bâtiments puisque les reprises et réparations sont aisées et accessibles.
- Confort hygrométrique : La terre facilite la régulation de l'humidité de l'air intérieur, grâce à un équilibre de l'hygrométrie. Cela évite donc les problèmes de condensation et d'accumulation d'humidité du mur. Perméabilité à la vapeur d'eau des parois extérieures
- Confort thermique : La terre permet de stocker facilement le froid et la chaleur et de favoriser l'énergie solaire passive. Elle détient une bonne masse thermique qui régule efficacement la température.
- Confort acoustique : la terre offre une bonne isolation phonique et une correction acoustique.
- Confort sanitaire : elle ne dégage aucun composés volatiles chimiques et potentiellement toxiques. Pas besoin de traitement ignifuge, ce qui favorise également la qualité de l'air intérieur. L'utilisation de la terre ne provoque donc pas d'allergies.
- Une faible énergie de construction : le coût énergétique à la production est faible, la terre dépense peu d'énergie grise contrairement au béton de ciment. De plus, il s'agit d'une ressource renouvelable abondante et locale.
- Valorisation des savoirs-faire et de la main d'œuvre : le matériau terre amène une valeur sociale dans l'acte de construire puisqu'il permet la rencontre et l'échange approfondi entre le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre et les artisans. Le savoir-faire et la culture constructive sont fortement valorisés, puisque c'est essentiel. La main-d'œuvre est certes onéreuse mais il y a une économie importante sur la transformation des ressources naturelles, sur l'économie d'énergies et de transport.

De quelle manière la terre peut-elle participer dans la transition écologique et sociale ? Dans un premier temps, les terres issues du terrassement et des fondations peuvent être mises de côté pour servir de matière première à la production des matériaux, pour le chantier en question. Il faut pour cela avoir un espace suffisant pour stocker cette matière avant d'être mise en œuvre sur le chantier. Cette technique permet de transformer la matière en matériau, avec très peu d'eau et d'énergie. Elle réduit considérablement les transports de matière et participe à la réduction de son empreinte carbone.

La terre, qu'elle soit sèche ou humide offre un panel important de techniques:

- monolithes : la bauge, le pisé, l'adobe, et la terre coulée...
- de remplissage : le torchis et la terre allégée (la barbotine)...

Ces techniques de construction offrent la possibilité de porter, de franchir, de protéger,

et de décorer. Elles peuvent s'appliquer dans une variété d'usages, de localisation, de climat et de cultures puisque plus d'un tiers de la population mondiale vit dans un habitat en terre crue, sur l'ensemble des continents.

2.c/ Des contraintes de mise en œuvre qui empêche le développement de pratiques constructives

Des obstacles à la construction en terre crue ressortent :

- Un manque de formation des professionnels du bâtiment, aux différentes techniques de construction, à la fois chez les architectes, les maîtres d'ouvrage, mais aussi les entreprises qui réalisent les travaux.
- Des référentiels techniques presque inexistants et une culture constructive traditionnelle et contemporaine peu diffusée.
- Des choix techniques difficilement argumentés par rapport aux exigences thermiques, sismiques et assurantielles actuelles et un manque de cadre normatif (DTU, ATEX).
- Des contraintes constructives au moment du chantier, par rapport à un temps d'exécution des ouvrages parfois rallongé à cause de mauvaises conditions climatiques qui retardent la mise en œuvre (gestion de l'humidité, contexte urbain...)
- Contraintes économiques avec certaines solutions terres crue encore trop peu développées.



Fig 5, Carte montrant la répartition des architectures de terre dans le monde.

Source : A. Misse/CRAterre.

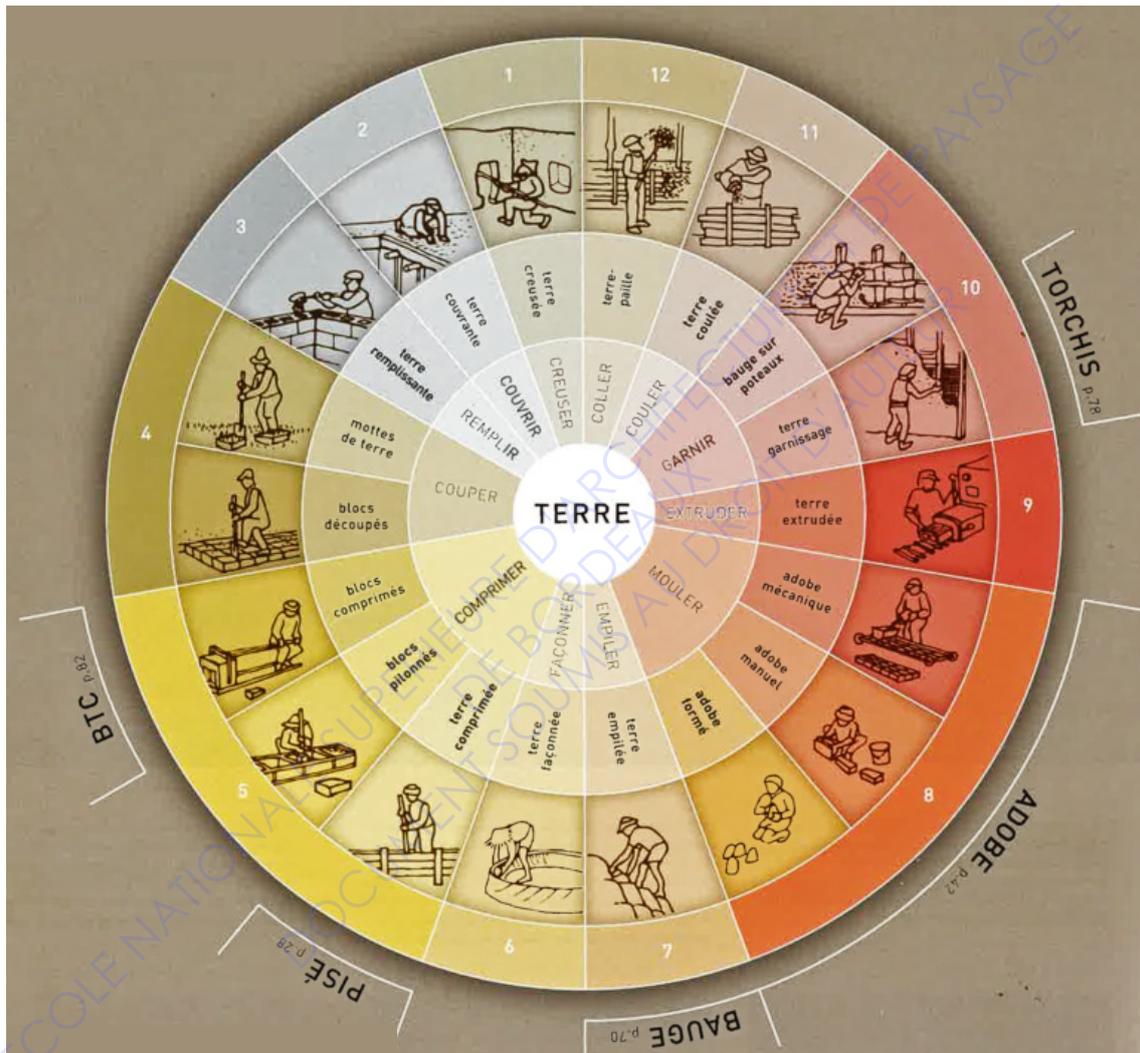


Fig 6, La roue des techniques, d'après H. Houben et H. Guillaud, traité de construction en terre, édition Parenthèses, 1989.

3/ Exemples de conceptions architecturales, employant une technique monolithique et de remplissage

3.a/ Une construction employant une technique monolithique : Bâtiment 5 de l'îlot Ydeal Confluence sur la ZAC 2, Clément Vergély, Lyon Confluence¹⁷

Fig 7, Bâtiment 5 de l'îlot Ydeal Confluence sur la ZAC 2, Clément Vergély, Lyon Confluence.
Source : Clément Vergély Architectes.



Fiche technique

Aménageur : SPL. Urbaniste : Herzog & de Meuron / Maîtrise d'ouvrage : Ogic / Maîtrise d'œuvre : Clément Vergély (Lyon) et Diener & Diener (Suisse) / BET structure : Batiserf. Entreprise : Le Pisé (terre crue), Nugues (ossature bois) / Bureau de contrôle : Socotec. Coût du marché de l'entreprise Le Pisé 570 000€ sur près de 3 M€HT/ Livraison juin 2020 Surface : environ 1000m².

Une solution constructive locale et bas carbone :

Composition de la façade : 40% de terre crue pour des murs variant de 80 cm pour les piles à 50 cm en partie courante / 25% en ossature bois / 32% menuiseries bois aluminium / 3% pour les pieds de piles en pierre locale.

Lieu de prélèvement : chantier de terrassement situé à Saint-Quentin-Fallavier (38), soit à moins de 30 km du site. La terre de la parcelle était trop polluée pour être utilisable.

Mise en œuvre de la matière : Stockage sur une aire de préfabrication à proximité immédiate du chantier. Fabrication sur place de blocs compactés de terre crue aux dimensions souhaitées, grâce à une station de préfabrication foraine. Aucun ajout d'additif.

17 *Une enveloppe thermique en pisé pour un bâtiment économe en énergie.* Site internet : <https://www.construction21.org/france/articles/h/une-enveloppe-thermique-en-pise-pour-un-batiment-econome-en-energie.html>

Poids carbone du matériau : égal au seul transport de 351 tonnes de matériaux.
 Eléments de comparaison : 1 m² de mur pisé présente un poids carbone 10 fois moins grand que les murs à ossature bois constituant l'intérieur des arches, ou encore 20 fois moins grand qu'un mur de béton de 20 cm. Sur ce projet, la terre crue représente 40 % de la surface de la façade.

Une enveloppe pisé et RT2012

Aucun doublage (ni intérieur, ni extérieur) pour les façades pisé.
 La conductivité thermique du pisé $\lambda = 0,9 \text{ W/m.K}$ et la résistance thermique des façades pisé varie de $R = 0,75 \text{ W/m}^2.\text{K}$ à $R = 0,90 \text{ W/m}^2.\text{K}$
 La résistance thermique des façades pleines, intégrant les parties en ossature bois : $2,1 \text{ W/m}^2.\text{K}$. Le projet respecte largement les exigences thermiques réglementaires puisque les performances obtenues sur le projet au regard de la RT 2012 correspondent à Cep-20% et Bbiomax – 12%

Une enveloppe pisé et performance thermique prévisionnelle

Si les besoins de chauffage sont augmentés de 50% par rapport à un bâtiment présentant une résistance thermique de façade $R = 5 \text{ W/m}^2.\text{K}$, sur le total des consommations énergétiques, la surconsommation associée sur une année type n'est que de 2%.
 Ces résultats permettent de relativiser l'impact d'une moindre isolation de l'enveloppe thermique sur les consommations en énergie primaire. Bilan de consommations obtenues par simulations thermiques dynamiques (ETAMINE).

Une enveloppe pisé et confort thermique d'été

Cette étude montre que le pisé non isolé permet un gain significatif de confort d'été, en particulier lorsque le bâtiment ne fait l'objet d'aucun système de rafraîchissement actif. Ainsi, le pisé agit comme un « retardateur de climatisation », en complément de d'autres dispositifs comme la ventilation naturelle nocturne, les brasseurs d'air. En cas de canicule, un rafraîchissement actif de l'air soufflé dans les plateaux de bureaux suffit. Ce matériau historique est extrêmement pertinent aujourd'hui pour répondre aux situations caniculaires.

Usage	Consommation [kWhEP / m ² / an]		
	Isolé	Non Isolé	Écart [%]
Chauffage	4.0	6.1	+54%
PAC froid	14.2	14.1	-1%
Ventilation	25.6	25.6	+0%
Éclairage	11.1	11.1	+0%
Autres usages	50.0	50.0	+0%
Total	104.9	106.9	+2%

Fig 8, Tableau des consommations.

Source : construction21.

3.b/ Une construction employant une technique de remplissage et de finition : Maison B - Atelier Belenfant Daubas¹⁸

Fig 9, Maison B - Atelier Belenfant Daubas. Source : Germain Herriau, Michel Ogier.



Fiche technique

Maîtrise d'ouvrage : particulier / Maîtrise d'œuvre - architecte mandataire : Atelier Belenfant et Daubas / BET thermique : Aireo Energies / Entreprises du lot bois : charpentier menuisier Atelier Isac, et autre lot de la construction LB Eco Habitat Aceis, fournisseurs bois Piveteau Bois. Surface totale du bâtiment : 250 m² / Coût total HT (hors foncier, hors VRD) : 266 667€

Cette maison a été conçue de manière la moins impactante possible en intégrant du bois Douglas, issu des forêts françaises pour la charpente, du béton de chanvre pour les murs extérieurs, une isolation en liège et en laine de bois. De plus, la terre crue, prélevée sur site a été transformée pour réaliser des briques d'adobe en remplissage de murs en ossature bois mais également en enduit à appliquer directement en finition sur le béton de chanvre. Ces murs intérieurs, positionnés à proximité d'un poêle à granulés de bois (pour assurer les besoins en chauffage de la maison en hiver) vont favoriser l'accumulation de chaleur et la restituer progressivement. Cette technique de construction améliore l'inertie de la maison. C'est un exemple de construction employant des matériaux bio-sourcés qui apportent un confort hygro-thermique et une conception bio-climatique. Une installation photovoltaïque assure une production annuelle de 9.000 kwh d'électricité, prioritairement auto-consommée.

Le niveau BEPOS est atteint. La maison produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme et l'excédent de production s'élève à 50 kwh/m².an. Ce projet a dû faire appel à des savoir-faire

18 Site internet de l'atelier Belenfant Daubas : <https://www.atelierbelenfantdaubas.org/maison-b/>

traditionnels dans une construction contemporaine.

Composition structurelle / enveloppes :

Structure verticale : panneau ossature bois douglas

Structure horizontale : dalle bois douglas / Plancher béton

Charpente : caisson de toiture Douglas

Bardage extérieur : lame bois massif Douglas

Isolation entre-montants des murs : béton de chanvre (350mm)

Isolation extérieure des murs : fibre de bois (40mm)

Isolation entre-montant de la toiture : 220 mm / isolation extérieur de la toiture : 80mm

Finitions intérieures en terre ; briques d'adobe et finition enduit de terre.

Cet exemple de construction montre bien l'intérêt d'associer la terre crue avec d'autres matériaux tels que le chanvre et le bois. Le matériau est placé au bon endroit tout en ayant une réflexion sur l'optimisation de la matière.

3.c/ Une construction employant une technique de brique de terre crue structurelle. L'Aria, médiathèque et salle de spectacles, à Cornebarrieu.¹⁹ - Atelier Philippe Madec

Fig 10, L' Aria - Atelier Philippe Madec. Source : (APM) Architecture & associé



Fiche technique

Maîtrise d'ouvrage : la ville de Cornebarrieu/ Maîtrise d'œuvre - architecte mandataire : Atelier Philippe Madec, Paysage : Coloco, Scénographie : Scène / BET fluides et environnement : Inex / BET structure : c&e ingénierie, BET acoustique : AAB / Entreprises Gros Oeuvre: DE

¹⁹ <https://www.construction21.org/france/case-studies/h/aria-mediatheque-et-salle-de-spectacles-a-cornebarrieu.html>

MATHIEU&BARD, entreprise charpente Bardage menuiserie extérieure : ARBONIS (SATO),
Surface totale du bâtiment : 3135 m² SHON / Coût total de construction : 8 300 000€

Dans cette architecture, la mise en oeuvre de matériaux bio-sourcés tel que le bois et la terre crue apporte un maximum de qualités environnementales. (énergie grise basse, stockage de carbone, durabilité...). De plus, l'utilisation de la brique de terre crue structurelle est une première en France et a permis d'obtenir un agrément par le bureau de contrôle. (ATEX 2016). La terre crue permet une bonne régulation hygrométrique et une inertie qui permet de stocker les calories et les frigories, offrant ainsi une régulation passive de la température des espaces. Les besoins en chauffage (assuré par une chaufferie bois à granulés) sont inférieurs à 15KWh/m².an.

La méthode de calcul de la consommation énergétique s'est fixé sur la réglementation technique 2005. Au moment des études, la RT2012 n'était pas applicable aux salles des fetes et médiathèques. Cependant, il obtient le niveau BBC (bâtiment basse consommation).

Schéma récapitulatif :

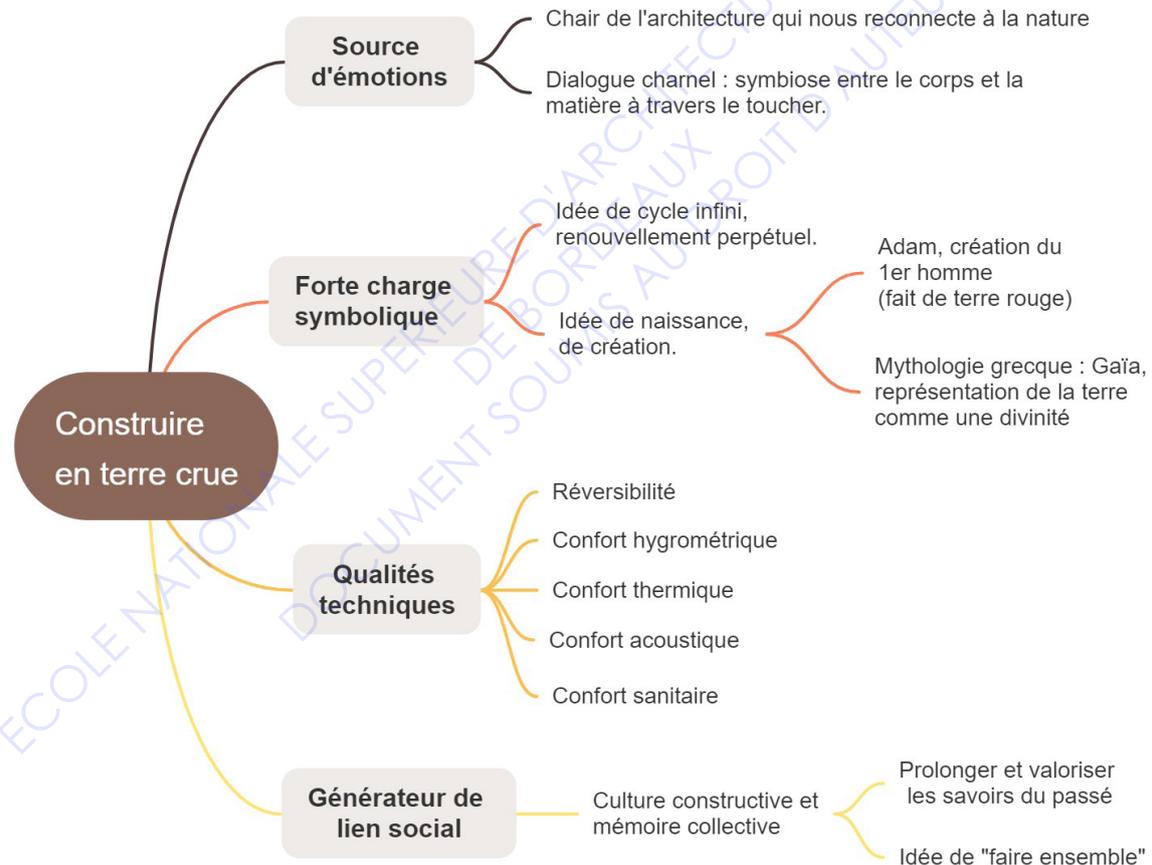


Fig 11, Schéma récapitulatif représentant les différents atouts de la construction en terre crue.

Conclusion de la partie 1

Les différents exemples présentés réutilisent soit la terre de la parcelle elle-même, soit celle à proximité du chantier. La terre et en particulier le réemploi des terres d'excavation peut améliorer considérablement le bilan carbone d'une construction, grâce à l'aspect de renouvelabilité. Nous avons vu également dans cette partie que c'est à la fois une matière porteuse de charges symboliques fortes, qui nous renvoient à notre propre genèse et un matériau qui présente des performances thermiques (confort d'été) et hygroscopiques (évacuation de la vapeur d'eau) très intéressantes. A travers ces propriétés, l'utilisation de la terre crue dans l'architecture peut tout à fait répondre aux enjeux écologiques de demain. Cependant, des contraintes de mise en œuvre, et un manque de référentiels techniques empêchent le développement de pratiques constructives. Ce constat tend à évoluer grâce à l'arrivée de la réglementation environnementale 2020 qui va inciter les industriels de la construction à intégrer dans leur recherches et développements des solutions moins énergivores, plus saines pour les occupants, d'une manière plus générale, plus respectueuse pour l'environnement.

Aujourd'hui, des travaux souterrains pour construire de nouveaux métros se multiplient en France, pour améliorer la qualité de vie et favoriser les mobilités au sein des métropoles. La problématique liée à la gestion des déblais excavés est systématiquement soulevée, puisqu'elle représente un impact économique et écologique important, qui pèse sur ses types de travaux souterrains. Comment réussir à transformer en ressources ces terres excavées, alors qu'elles sont considérées comme déchets ? Comment rendre possible une revalorisation de cette matière, afin de développer un matériau en adéquation avec les exigences environnementales de la construction de demain ?

Le travail de cette deuxième partie consiste à présenter et à analyser la manière de valoriser les déblais issus des travaux d'excavation, au travers de trois projets de métros en cours de réalisation :

- La ligne 16 du Grand-Paris.
- La seconde ligne B du métro à Rennes, en cours de construction et normalement mis en service à l'horizon 2020.

- La ligne E du métro de Lyon

J'ai sélectionné ces trois projets puisqu'ils ont des échelles similaires à celui du M3 et parce que j'ai pu obtenir un certain nombre de données. Le but est de dégager des pratiques intéressantes, de les adapter à la gestion et la valorisation des terres d'excavation du chantier du M3, à Toulouse.

PARTIE 2 : Analyse d'opérations de travaux souterrains, (types construction de métro) questionnant la revalorisation des terres excavées.

1/ Le chantier du Grand-Paris : la ligne 16 (voir annexes)

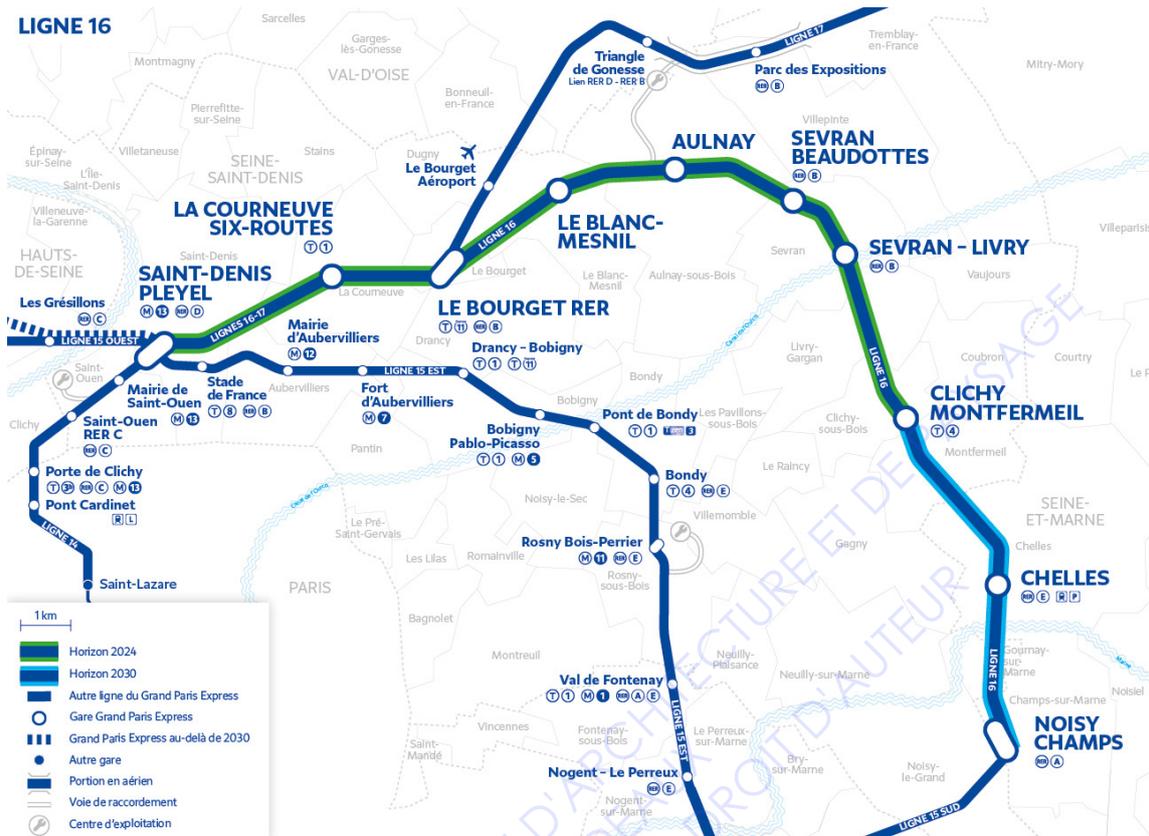


Fig 12, Carte montrant le tracé de la ligne 16. Source : Société du Grand Paris.

Ce tronçon est à l'échelle du chantier de la future ligne M3, à Toulouse, en terme de coût global et de longueur de ligne, puisqu'il fait 27.5km

1.a/ Présentation des travaux

Les travaux de la ligne 16 s'effectuent entre la gare de Saint-Denis Pleyel (gare comprise) et la gare de Noisy-Champs (gare non comprise), en passant par la gare du Bourget RER.

- Début des travaux préparatoires, avec terrassements : septembre 2016
- Début des travaux de génie civil : 1er trimestre 2018
- Longueur de ligne : 27.5km, située majoritairement en site urbain dense, et entièrement en souterrain. La ligne traverse les départements de la Seine-Saint-Denis (93) et de Seine-et-Marne (77). Le tracé de cette ligne intègre un passage sous-fluvial sous la Marne (à Chelles / Champs-sur-Marne) et trois passages sous canaux (Canal Saint-Denis à Aubervilliers, Canal de l'Ourcq à Sevrans et Canal de Chelles à Chelles).

La ligne 16 comporte dix gares dont sept gares interconnectées :

- La gare de Saint-Denis-Pleyel, interconnectée avec le RER D et les futures lignes 14, 15 et 16 du réseau de transport public du Grand Paris.
- La gare de La Courneuve Six Routes, interconnectée avec le Tramway T1.
- La gare du Bourget RER, interconnectée avec le RER B et la TLN (Tangentielle Nord).

- Les gares du Blanc-Mesnil et d'Aulnay-sous-Bois, sans interconnexion.
- Les gares de Sevrans-Beaudottes et Sevrans-Livry interconnectées avec le RER B.
- La gare de Clichy Montfermeil interconnectée avec le Tramway T4.
- La gare de Chelles interconnectée avec le RER E et le Transilien P.
- Un raccordement à un Site de Maintenance et de Remisage (SMR) et de Maintenance des Infrastructures (SMI), à Aulnay.

La ligne 16 intègre également dans son périmètre la construction de deux tunnels monovoie et l'ouvrage de raccordement au tunnel monovoie de la ligne 17 Nord, situé sur la commune du Bourget à l'est de la gare et cinq ouvrages annexes limitrophes, non implantés directement sur la ligne 16 :

- L'OA 631 sur la ligne 15 Est, situé sur la commune de Saint-Denis.
- L'OA 641 sur la ligne 15 Est, situé sur la commune d'Aubervilliers.
- La gare de Stade de France (SDF) sur la ligne 15 Est, située sur la commune de Saint Denis.
- L'OA 3202P sur la ligne 15 Ouest, situé sur L'Île-Saint-Denis.
- L'OA 3202P sur la ligne 15 Ouest, situé sur L'Île-Saint-Denis.

Le chantier de la ligne 16 a été confiée au groupement mené par EGIS-rail et se compose de : TRACTEBEL Engineering, AREP, BERRANGER & VINCENT Architectes, SARL d'Architectures BECKMANN-N'THÉPÉ, Aldric BECKMANN, Agence DUTHILLEUL, Atelier SCHALL. La mission de Maîtrise d'Œuvre du site de maintenance et de remisage des trains (SMR) d'Aulnay est SETEC.

1.b/ Quantités et qualités estimées des déblais²⁰

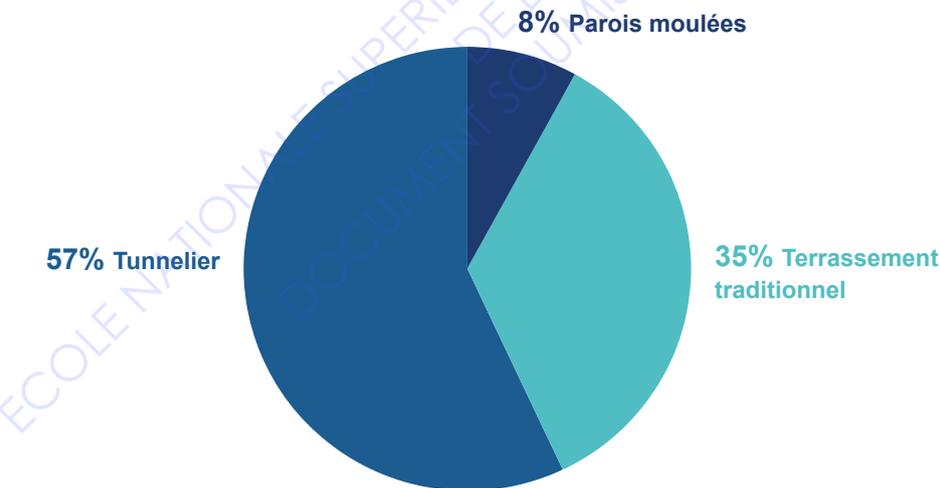


Fig 13, Graphique représentant les proportions des techniques d'excavation, de la ligne 16, chantier du Grand Paris. Données fournies par la Société du Grand-Paris.

Extraction tunnelier : 5.07 millions de tonnes de terre.

Extraction méthode traditionnelle : 3.12 en millions de tonnes.

Extraction parois moulées : 0.71 en millions de tonnes.

Soit au total 8,9 millions de tonnes

20 Le catalogue des fiches déblais par ligne, société du Grand Paris.
site internet : www.societedugrandparis.fr

	Inerte			non inerte faiblement sulfaté			non inerte fortement sulfaté			non inerte inorganique faiblement concentré		
	Tunneliers	tradi.	P. moulées	Tunneliers	tradi.	P. moulées	Tunneliers	tradi.	P. moulées	Tunneliers	tradi.	P. moulées
2018	0	455	4	0	13	34	0	116	66	0	92	14
2019	438	716	0	331	34	6	119	113	38	243	379	28
2020	700	397	0	450	6	7	440	27	16	651	161	3
2021	125	80	0	61	4	0	103	7	0	156	25	0
2022	54	0	0	0	0	0	38	0	0	51	0	0
Total	1317	1648	4	842	57	47	700	263	120	1101	657	45

	non inerte inorganique fortement concentré (ND)			non inerte inorganique très fortement concentré (ND)			non inerte organique (biocentre)			TOTAL Année
	Tunneliers	tradi.	P. moulées	Tunneliers	tradi.	P. moulées	Tunneliers	tradi.	P. moulées	
2018	0	67	381	0	4	0	0	0	1	1247
2019	230	225	132	2	12	0	0	0	2	3048
2020	623	84	22	63	2	0	0	0	5	3657
2021	115	56	0	4	0	0	0	0	0	736
2022	27	0	0	6	0	0	0	0	0	176
Total	995	432	535	75	18	0	0	0	8	8864

Fig 14, tableau représentant par année, les estimations de production de déblais par qualité, sur l'ensemble de la ligne 16 du Grand Paris et pour l'ensemble des types de terrassement (traditionnel, parois moulées et tunneliers). Données fournies par la Société du Grand-Paris.

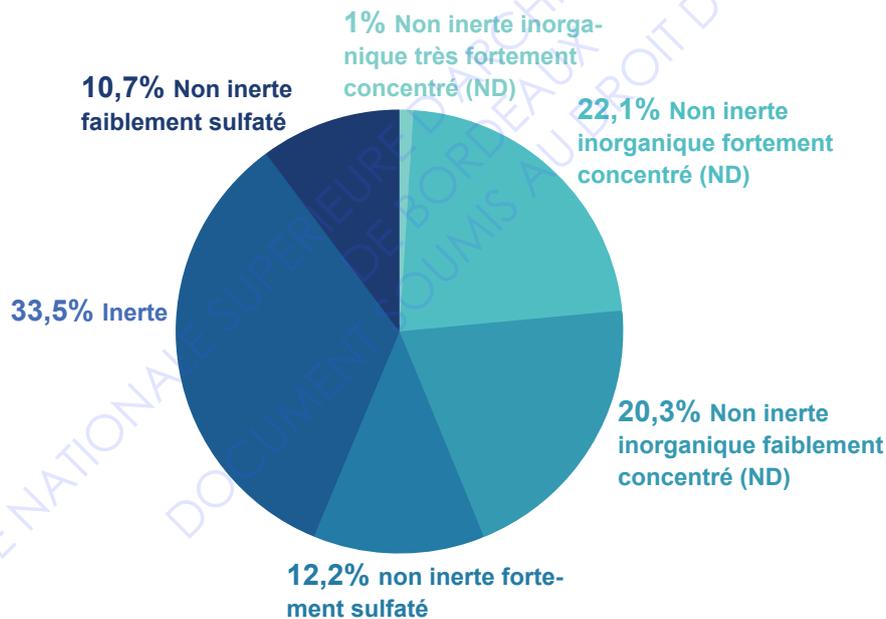


Fig 15, graphique représentant la proportion des différentes qualités des terres excavées de la ligne 16, chantier du Grand-Paris. Données fournies par la Société du Grand-Paris.

L'analyse de la qualité des terres excavées permet de regrouper sous plusieurs familles différentes :

- Terres inertes : déchets non dangereux inertes, (DND) qui regroupent les matières naturelles non souillées et non polluées, qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction chimique, physique ou biologique durant le stockage.
- Terres non inertes faiblement ou fortement sulfatées, terres gypsifères.
- Terres non inertes inorganiques faiblement, fortement, et très fortement concentrées (ND).

Ils ne présentent aucune caractéristique spécifique aux déchets dangereux et peuvent selon leur origine et leur nature avoir des filières de traitement ou de valorisation adaptées.

- Terres non inertes organiques (biocentre) : Ces terres comportent des matières organiques biodégradables.

Les deux principales filières concernant la gestion des terres excavées pour le chantier de la ligne 16, sont :

- Filière 1, le stockage en site adapté en l'absence de solution de réemploi en :
 - ISDI : installations de stockage de déchets inertes si leur caractère inerte est prouvé.
 - ISDND : Installation de stockage de déchets non dangereux, si les terres ne sont ni inertes, ni dangereuses, au sens de la réglementation 37.
 - ISDD : stockage des déchets dangereux.

- Filière 2, la valorisation avant ou après traitement, à travers :
 - Une aire de stockage transitoire, temporaire, pour faciliter la logistique des déchets pour un réemploi ultérieur, plateformes de regroupement et de transit.
 - Les remblaiement de carrière, notamment de Gypse.
 - Les aménagements : chantiers de construction à Sevran utilisant la terre crue.

Dans les deux cas, il convient de prendre en compte, en amont de l'organisation des flux, les critères d'admission statuant de la faisabilité de l'élimination envisagée et surtout de mettre en place une traçabilité des terres.

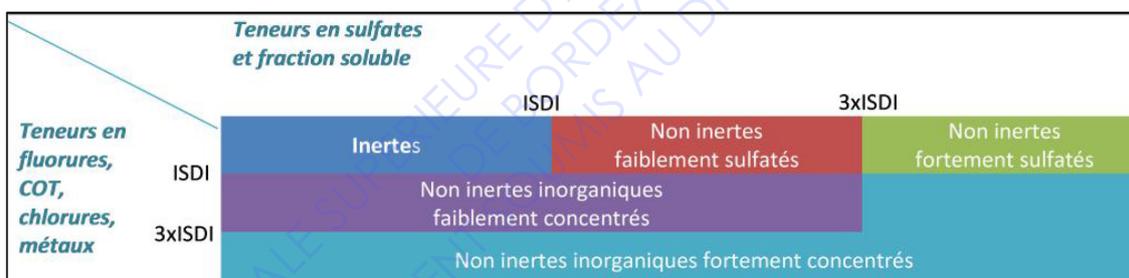


Fig 16, Tableau montrant la répartition des stockages des terres selon leur degré de pollution. Source : Société du Grand Paris.

Un dispositif informatisé de suivi de la traçabilité des déblais en temps réel a été développé par la société du Grand Paris, pour suivre le parcours de toutes les terres excavées, entre les différents sites. Cette application permet de contrôler la réglementation. Les utilisateurs sont les entreprises de génie civil, les exploitants de sites intermédiaires, les gestionnaires d'exutoires, ainsi que les maîtres d'œuvre et le maître d'ouvrage. Chaque acteur a un rôle et un périmètre d'intervention bien déterminé et défini au travers de son profil de connexion.

Cette application permet de rentrer la pesée des terres, d'informer sur la qualité des déblais, de renseigner sur les filières envisagées (valorisation ou élimination), d'informatiser le processus en traçant avec précision les étapes successives concernant les déblais et leur devenir et de connaître le parcours en temps réel, de l'émission, à la réception de chaque lot de déblais. Cet outil peut également établir des bordereaux de transport pour chaque lot de déblais (émetteur, maille d'origine, quantités, date et heure de prise en

charge, transporteur, installation de destination), et permet la validation de la réception des lots de déblais par les gestionnaires d'exutoires ou de plateformes par simple saisie informatique. Toute anomalie dans la gestion peut être détectée rapidement.

1.c/ Analyse des formations géologiques traversées et réflexion des potentiels de valorisation de la matière.

Il est nécessaire d'effectuer une analyse précise de la nature des sols afin de déterminer les valorisations éventuelles de la matière excavée.

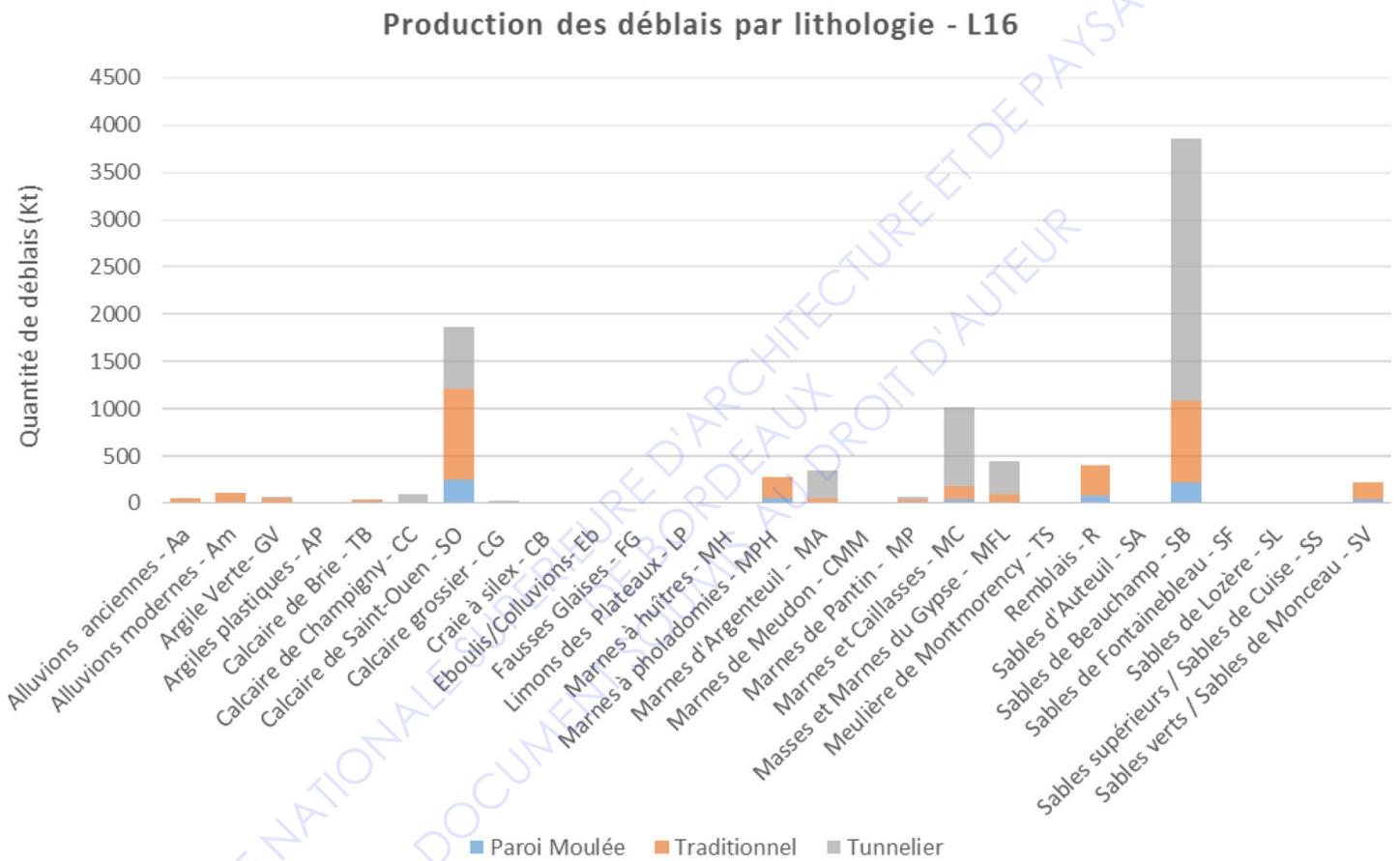


Fig 17, graphique montrant la production des déblais par lithologie et par techniques d'extraction, de la ligne 16. Source : Société du Grand Paris.

Cette analyse des formations géologiques a permis ainsi de déterminer quel type de déblais pouvait être réutilisé ou valorisé :

- La Grave : il s'agit d'un granulat, composé d'un mélange de sable et de gravillons. Ce matériau est essentiellement utilisé en corps de chaussées ou de plateformes. Habituellement, il est produit soit directement en carrières, soit reconstitué en centrale selon la granulométrie et les propriétés physiques recherchées. Plusieurs formations géologiques rencontrées peuvent être valorisables pour l'obtention de graves, à savoir : les alluvions anciennes, les remblais, les sables de Fontainebleau, le calcaire de Champigny, le calcaire grossier, le calcaire de Saint-Ouen, les sables de Beauchamp...

- Les couches d'étanchéité : Certains matériaux ont des caractéristiques de porosité et de perméabilité qui permettent de les utiliser en couches d'étanchéité, comme par exemple pour des digues, ou en tant que barrière de protection passive dans les installations de stockage de déchets, pour protéger les sols et les eaux souterraines (dignes). Les formations géologiques concernées sont : les limons des plateaux et les calcaires de Brie, les calcaires de Saint-Ouen, les sables de Beauchamp.

- Les crus de cimenterie : il s'agit de matières premières qui entrent dans la fabrication du ciment et qui sont généralement extraites de roche calcaire, de craie, de schiste ou d'argile. Des essais sont en cours avec les cimentiers afin d'évaluer les possibilités et conditions techniques de valorisation de certaines formations géologiques extraites, à savoir : les calcaires de Champigny, et des argiles plastiques.

- Les constructions en terre crue : elles se composent de terre (argile, limons et sable), d'eau et éventuellement d'un liant comme de la chaux ou du ciment pour augmenter la résistance mécanique. Les formations géologiques favorables à la construction en terre crue sont : les argiles vertes, les limons, les argiles plastiques. Le projet cycle terre prévoit la création d'une usine de transformation d'une partie des déblais du lot 2 de la ligne 16 en matériaux de construction en terre crue. Ils seront utilisés pour des chantiers de construction à Sevran, notamment Terre d'Avenir, et sur le territoire métropolitain. La superficie de l'usine fera 1,8 ha. La capacité totale de l'usine sera 25000 t au total et 500 t/j. La quantité prévisionnelle de matériaux produite sera de 10000 t/an.

- Les sables pour béton ou mortier, à partir des sables de Beauchamps et de Fontainebleau dans la mesure du possible puisqu'il est nécessaire de laver cette matière pour la rendre compatible avec certains usages du béton ou du mortier et pour retirer des teneurs relativement élevées en sulfates.

- Les remblais courants : à partir des formations géologiques telles que les alluvions anciennes, les remblais, les sables de Fontainebleau, les calcaires de Champigny, les calcaires grossiers, les calcaires de Saint-Ouen, et les sables de Beauchamp.

1.d/ Potentiel d'un transport alternatif

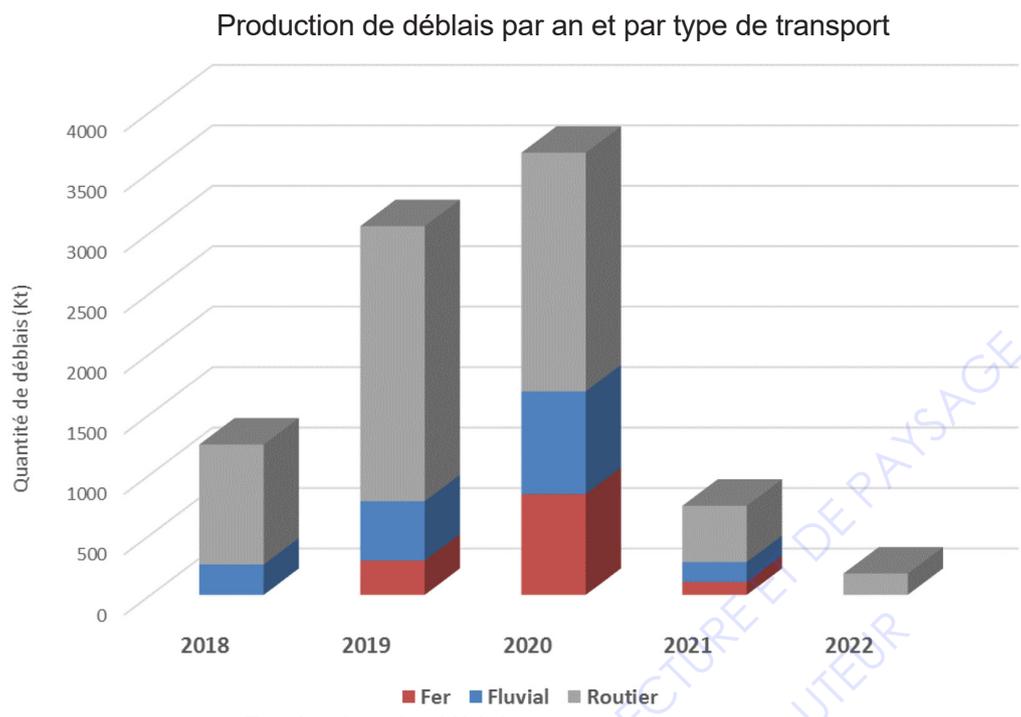
	ferroviaire	fluvial	routier
2018	0	252	992
2019	283	491	2276
2020	833	850	1974
2021	107	164	465
2022	0	0	176
Total	1223	1757	5883

Deux types de transport alternatifs, en plus de celle de la voie routière ont été imaginés :

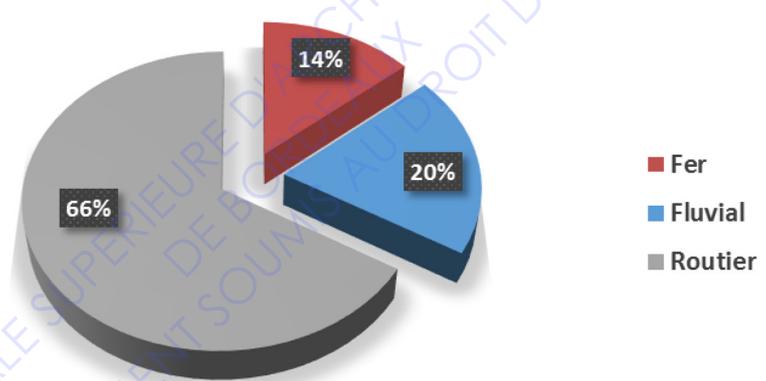
- Fluvial : pour les chantiers en lien avec la gare de Saint Denis Pleyel, OA 3300P, OA 3302P, OA 3303P, Gare de Stade de France, OA 6401P, Tunnelier n°1 (3302P-6302P), Tunnelier n°2a (3303P-3300P).

- Ferroviaire : Tunnelier n°3 (0100P-3303P), Tunnelier n°4a (0100P-3406P), Tunnelier n°4b (0100P-3406P), Tunnelier n°5 (0100P-0104P).

Fig 18, Tableau montrant la répartition, en millions de tonnes, des différents transports de terres.



Production de déblais par type de transport



Type de transport suivant le type de terrassement

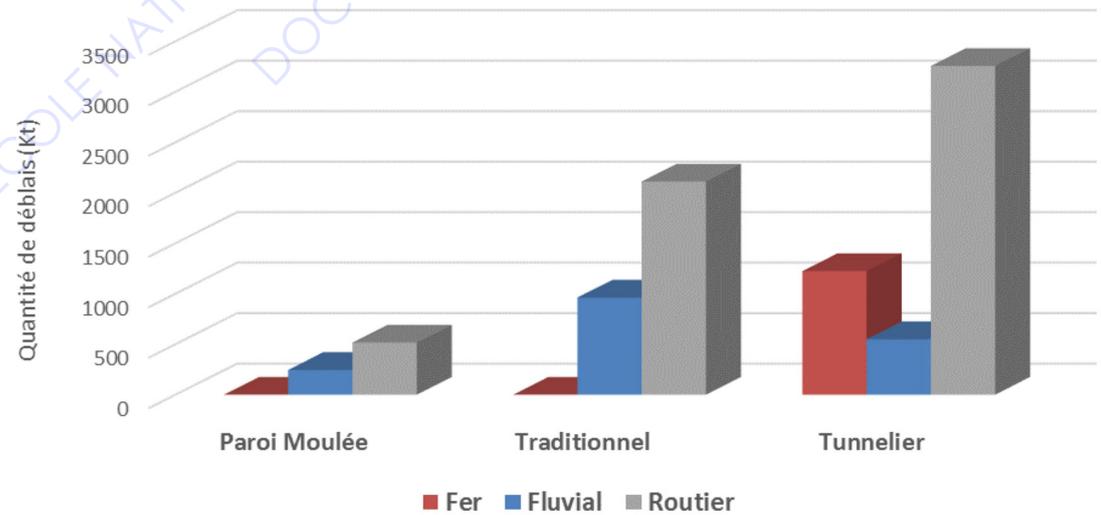


Fig 19, Graphiques montrant les répartitions des déblais, selon les types de terrassement, et les types de transports, de la ligne 16. Source : Société du Grand Paris.

1.e/ Un exemple de revalorisation : le projet cycle terre²¹

Le projet cycle terre a été développé en lien avec la problématique des déblais du chantier du Grand Paris. Cycle terre propose de réutiliser les terres excavées non polluées pour développer une économie circulaire locale afin de favoriser la construction en matériaux biosourcés et en terre crue de nouveaux quartiers du Grand Paris, notamment celui d'Ivry sur Seine²², avec la manufacture sur Seine. Ce projet montre que la terre issue de l'excavation, était en premier lieu considérée comme une matière encombrante et inutilisable pour finalement s'avérer être une ressource considérable, capable de construire des millions de mètres carrés en employant ces terres plutôt que de les stocker et en transformant cette matière en matériau. Développer cette démarche est un réel enjeu politique, économique et social. Elle doit être impulsée par différents acteurs pluridisciplinaires pour mener à bien ce projet.

Effectivement, le maire de Sevrans est l'un des acteurs essentiels qui a permis de développer ce projet, aux travers de volontés politiques. Effectivement, Il porte le projet Cycle Terre dans sa dimension politique et urbaine. Il a parfaitement compris que la création de deux nouvelles gares de métro allait faire vivre à sa commune une transformation urbaine de grande ampleur. Il souhaite que Sevrans devienne le territoire idéal pour expérimenter, innover, développer une économie de projet en résilience avec son territoire, développer une nouvelle filière d'emplois intégrant la composante environnementale.

Le projet cycle terre a également été soutenu par Grand Paris Aménagement à travers une volonté d'imposer aux promoteurs immobiliers l'utilisation de matériaux biosourcés, notamment issus des terres d'excavations. Comme la mairie de Sevrans, ils peuvent porter politiquement ce projet, à l'échelle urbaine et territoriale. Si l'expérience Cycle Terre fait ses preuves, l'objectif est de rendre obligatoire la mise en œuvre de terres crues, à un pourcentage donné dans la conception et la construction de promotions immobilières. Lancer cette filière doit forcément passer par la commande publique en programmant des projets intégrant la terre crue. Ainsi, la commande et l'outil de production (qui permet d'avoir des matériaux) doivent se nourrir l'un de l'autre. Malgré tout, cette expérimentation a demandé à l'ensemble des acteurs de prendre un risque, un engagement pour avancer puisque cette filière est pour le moment à ses débuts.

Ce projet Cycle terre a pu bénéficier d'un financement à hauteur de 80% de l'Europe puisqu'il a été lauréat d'un appel à projet européen UIA, Urban Innovative Actions, visant à financer des projets démonstrateurs et expérimentaux pour la ville soutenable.

La fabrique de matériaux en terre crue, située à Sevrans, et conçue par l'agence d'architecture Joly&Loiret permet de retraiter une partie des déblais du lot 2 de la ligne 16 en matériaux de construction en terre crue. La superficie totale de cette fabrique fera 1,8 ha. La capacité totale de l'usine sera de 25000 t de terres au total et 500 t/j. La quantité prévisionnelle de matériaux produite sera de 10000 t/an.

21 <https://www.cycle-terre.eu/>

22 Quartier de logements, bureaux et autres activités à Ivry-sur-Seine. Lauréat du concours Appel à projets « Réinventer la seine », Equipe : Amateur Architecture Studio (Wang Shu & Lu Wenyu), Lipsky + Rollet, Jolly&Loiret. site internet : <http://jolyloiret.com/projets/sen1/>



Fig 20, Image de synthèse montrant la future fabrique de matériaux en terre crue, située à Sevrans. Source : Agence Joly&Loiret.

Cycle terre reste pour le moment une expérimentation, un démonstrateur. Il ne s'agit ni d'une usine, ni d'un atelier artisanal mais d'un espace intermédiaire, à l'échelle de la fabrique. Le but à long terme serait de déployer ce principe à proximité d'autres sites d'extractions. Ces nouvelles unités de production pourraient ainsi alimenter d'autres chantiers et raccourcir les parcours d'acheminement de certains matériaux. L'échelle de ce projet est certes anecdotique par rapport aux quantités importantes des déblais extraites chaque année. Selon mes calculs, cela correspondrait à 1% de la totalité des déblais de la ligne 16 produite en 2021 (année de l'inauguration de la fabrique Cycle terre).

Cependant, le but est de pouvoir dupliquer ce projet pour limiter les flux logistiques, se positionner à proximité des sites excavateurs, pour gérer les terres excavées dans un périmètre assez restreint.

Quelques chiffres :

6 millions d'euros d'investissement de l'Europe

25 000 tonnes de matières traitées par an.

= 10 millions de briques standards (ou enduits, panneaux, BTC...)

10 millions de briques = 140 000m² de parois

Réflexion d'un modèle économique pour cette nouvelle filière

Pour que cette nouvelle filière se développe, il faut des gouvernances qui portent le projet mais également qui développent un modèle économique viable. Il ne faut pas que ces nouveaux modes constructifs ne soient plus onéreux que les matériaux actuels si on souhaite concurrencer le béton ou le remplacer. Il faut donc résoudre cette équation; utiliser une mixité de matériaux en les mettant au bon endroit. Cycle terre travaille donc à la fois sur la production de cette ressource mais également sur son modèle économique. A titre d'exemple, les solutions de murs pisé ne seront pas développées dans cette fabrique mais plus des blocs de terres comprimées plus ou moins épais afin de rechercher une certaine compétitivité économique et développer son marché. Cycle terre travaillera essentiellement sur des matériaux de remplissage, de parement, de doublage et de finitions intérieures ou extérieures, sur un principe de mise en œuvre et de transport facilité.



Bloc de terre comprimée stabilisée (BTS)



Panneau d'argile extrudé (PAE)

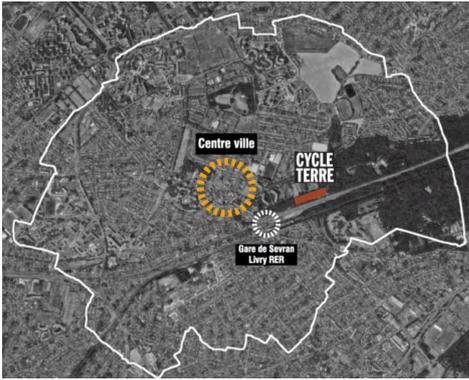


Mortier de pose terre crue (MP)

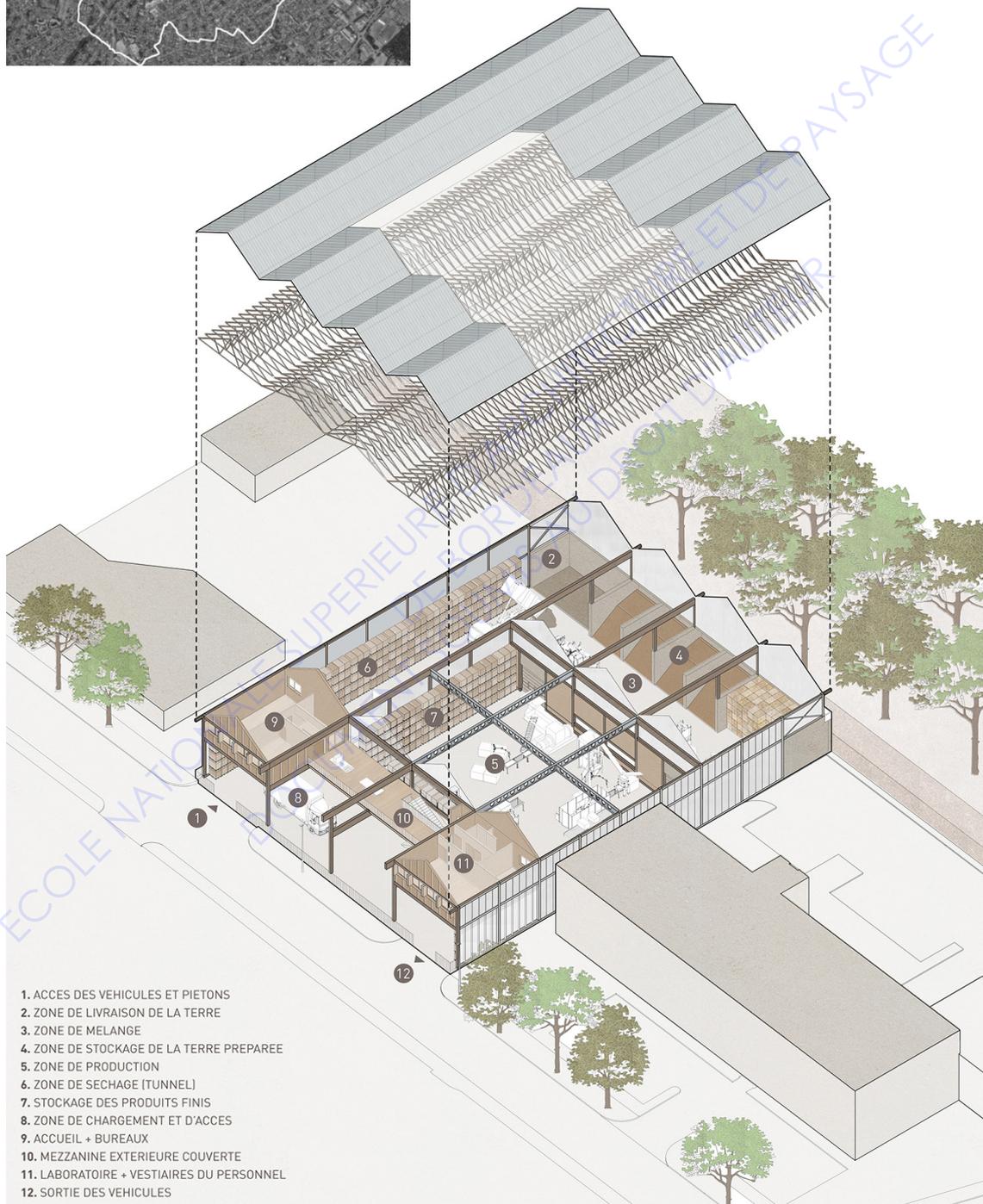


Mortier d'enduit de corps ou de finition en terre crue (MEC)

Fig 21, Images extraites des documentations fiches produits. Source : Cycle terre.
<https://www.cycle-terre.eu/>

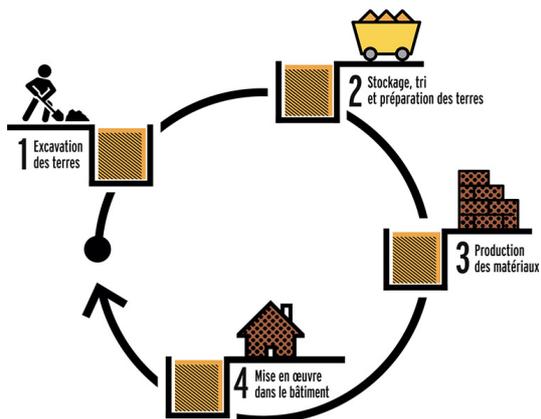


Cycle terre sera situé au centre ville de sevrans, à proximité des gares. Volontairement inscrit dans son territoire, la fabrique sera connectée à la ville dans le but d'accueillir du monde, d'en faire un lieu de vie. Cycle terre conservera une échelle humaine, un intermédiaire entre l'usine et l'atelier, avec malgré tout trois lignes de production.



1. ACCES DES VEHICULES ET PIETONS
2. ZONE DE LIVRAISON DE LA TERRE
3. ZONE DE MELANGE
4. ZONE DE STOCKAGE DE LA TERRE PREPAREE
5. ZONE DE PRODUCTION
6. ZONE DE SECHAGE (TUNNEL)
7. STOCKAGE DES PRODUITS FINIS
8. ZONE DE CHARGEMENT ET D'ACCES
9. ACCUEIL + BUREAUX
10. MEZZANINE EXTERIEURE COUVERTE
11. LABORATOIRE + VESTIAIRES DU PERSONNEL
12. SORTIE DES VEHICULES

Fig 22, Axonométrie programmatique et carte de situation montrant la future fabrique de matériaux en terre crue, située à Sevrans. Source : Agence Joly&Loiret.



CRAterre et Antea vont analyser la diversité des terres qu'ils vont pouvoir récupérer et mettre en place une traçabilité. Amàco va regarder la faisabilité de transformer trois types de terres à travers leur caractéristiques physiques pour produire de bons matériaux de construction: une terre fine et marron, une terre argileuse et caillouteuse, puis une marne argileuse avec des cailloux.

1. L'excavation des terres, la sélection, l'analyse et la traçabilité



Exclusivement les terres non polluées seront utilisées (ce qui représente environ 45%). Pour cela, une analyse pointue et une traçabilité devra s'effectuer.

2. Tri, préparation, stockage et mélange



Ces terres vont être broyées, mélangées pour créer différentes formulations selon vers quoi elles vont être produites.

3. Production, séchage et stockage



Ensuite ces terres passent dans des processus de production : ligne extrusion pour panneaux et briques / ligne de compression pour les blocs / ligne pour terres et enduits prêt à l'emploi.

4. Mise en oeuvre



La matière est transformée en matériaux, prêt à être à l'emploi dans la construction. Il reste un gros travail de normalisation qui va être développé pour utiliser plus facilement ses matériaux, ainsi que la formation de manière à développer ces nouvelles techniques de construction.

Fig 23, Photographies extraites du site internet <https://www.cycle-terre.eu/>
Source : Cycle terre.

Les partenaires



LA VILLE DE SEVRAN²³

Commune en Seine Saint Denis (93), elle porte le projet dans sa dimension politique et urbaine. La ville de Sevrant est le territoire idéal pour tester cette capacité de recyclage puisqu'elle va vivre une transformation urbaine de grande ampleur en accueillant deux nouvelles gares, dans le cadre des travaux du Grand-Paris et en développant environ 120 ha sur son territoire.

GRAND PARIS AMENAGEMENT²⁴

Il s'agit du plus gros aménageur urbain public d'île de France avec une centaine d'opérations. Il permet également de repositionner le travail de l'aménageur et des processus habituels pour construire la ville différemment. Il peut ainsi s'impliquer dans le développement de cette nouvelle filière de matériaux pour rendre plus durable son modèle de développement, en imposant aux promoteurs privés d'utiliser certains matériaux comme la terre crue dans certaines opérations immobilières.

ANTEA GROUP²⁵

Cette entreprise étudie les couches géologiques. Ce sont les spécialistes de la géologie du sous-sol, puisqu'ils ont une très bonne connaissance et à grande échelle des sous-sols parisiens. Ils travaillent sur la traçabilité de la ressource terre. Cette société est impliquée dans la planification urbaine et l'économie circulaire pour une meilleure utilisation des ressources locales des territoires. Elle agit en qualité d'expert en gestion du sol et en contrôle des systèmes de données des matériaux.

23 <https://www.ville-sevrant.fr/>

24 <http://www.grandparisamenagement.fr/>

25 <https://anteagroup.fr/>

SOCIETE DU GRAND PARIS²⁶

Il s'agit du commanditaire, d'une autorité publique créée par la loi en 2010. Sa mission principale est de concevoir et construire les 4 lignes de métro du Grand Paris Express avec les 68 gares. Elle met en lumière la problématique du retraitement de ces déblais et elle va fournir à la fabrique les terres excavées nécessaires à la production.

QUARTUS²⁷

Il s'agit d'un promoteur immobilier qui essaye de se tourner vers de nouveaux usages. Il se spécialise à la fois dans la construction de quartiers mixtes et partagés et il s'engage dans la transition écologique grâce à la construction en matériaux biosourcés, en particulier avec la terre crue.

JOLY LOIRET AGENCE D'ARCHITECTURE²⁸

Il s'agit d'une agence d'architecture française qui est à l'origine de l'exposition «Terres de Paris, de la matière au matériau». Elle se spécialise dans la construction en matériaux naturels dont la terre crue et travaille à la fois sur le projet Cycle Terre et sur le projet d'aménagement urbain de la ville d'Ivry sur seine avec l'architecte Wang shu et le promoteur immobilier Quartus.

UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL²⁹

Il s'agit d'une fusion de l'université Paris-Est Marne la Vallée et de l'IFSTTAR. Elle a pour vocation de développer des collaborations pour répondre aux enjeux sociétaux, de comprendre les flux à gérer lorsque l'on construit la ville de demain. Ils vont analyser l'impact de cycle terre sur l'ensemble de ses flux pour limiter les impacts sur des territoires éloignés et sur la production des déchets.

SCIENCES PO³⁰

Ils développent leurs compétences dans la mise en œuvre d'un projet d'économie circulaire et dans le domaine des études de gouvernance urbaine. Ils analysent les interactions entre l'ensemble des acteurs du projet pour déterminer le bon ou mauvais fonctionnement et repérer les potentiels et limites des processus pour les prochains projets.

L'ENSAG ET LE LABORATOIRE AE&CC³¹

Il travaille sur la caractérisation de la matière, dans l'enregistrement et la fiabilisation des performances du matériau. Ce laboratoire a permis l'élaboration de normes en matière de technique de construction en terre mais aussi de référentiels de formation (ECVET).

26 <https://www.societedugrandparis.fr/>

27 <https://www.groupe-quartus.com/>

28 <http://jolyloiret.com/>

29 <https://www.ifsttar.fr/accueil/>

30 <http://www.sciencespo.fr/ceri/>

31 <https://aecc.hypotheses.org/>

AMÀCO³²

Il s'agit d'un centre de recherches, composé d'une équipe pluridisciplinaire (architectes, ingénieurs, artisans, artistes...) spécialistes de la matière, plus particulièrement de la terre crue et des fibres végétales. Cette structure accompagne les professionnels de la construction, de l'architecture et du design dans la conception et la réalisation de projets transformant les matières naturelles disponibles localement en matériaux de construction. Il accompagne également le développement de filières de production de matériaux en terre crue et en fibres végétales, à l'échelle du territoire.

CRAterre³³

L'équipe a été créée en 1979 à l'initiative d'un groupe d'étudiants de l'École d'Architecture de Grenoble. Elle s'est progressivement agrandie pour atteindre aujourd'hui une trentaine de personnes de nationalités diverses et une forte pluridisciplinarité (architecture, anthropologie, sociologie, ingénierie, archéologie...). Ils réfléchissent plus aux systèmes constructifs, à la transformation de la matière en matériau à l'échelle du bâtiment. Ils mènent des actions combinées de recherche, de formation et de diffusion des connaissances.

COMPETENCE EMPLOI³⁴

Il s'agit d'une association qui forme des personnes sans emploi, pour un retour à l'emploi pour les habitants et les entreprises du territoire. Elle apporte sa connaissance du marché et de l'économie locale afin de s'assurer que sa mise en œuvre accorde une place aux demandeurs d'emploi et aux entrepreneurs locaux développant de nouvelles compétences.

ECT³⁵

La société ECT travaille dans une stratégie d'économie circulaire en utilisant les terres inertes des chantiers franciliens. Elle devient ainsi un partenaire auprès des collectivités locales pour des projets d'aménagements durables. Sa vocation est d'aménager des sites par la valorisation des terres inertes et le traitement des terres polluées et autres déblais de chantiers.

L'ensemble de ses acteurs pluridisciplinaires se sont investis dans la création de Cycle Terre, chacun à leur échelle et selon leur domaine de compétences mais de manière collaborative.

32 <http://www.amaco.org/>

33 <http://craterre.org/>

34 <https://www.ville-sevran.fr/peif/competences-emploi/>

35 <https://www.groupe-ect.com/>

2/ Le métro de Rennes : la ligne B

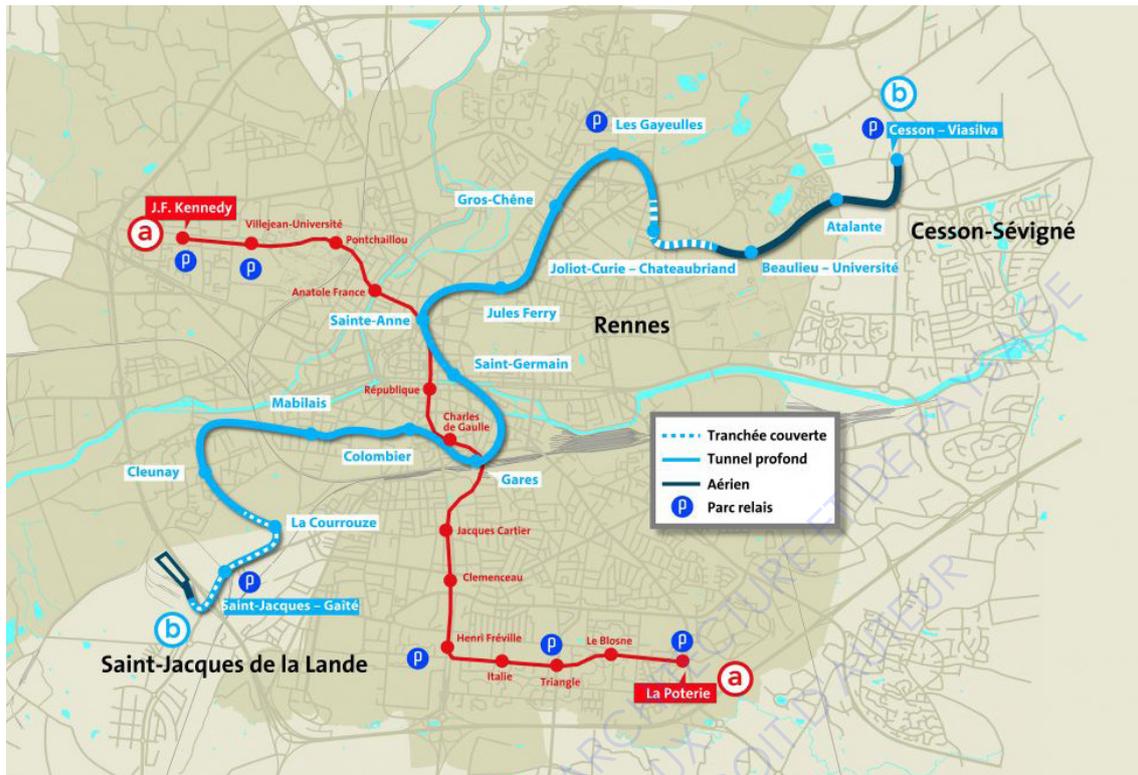


Fig 24, Carte montrant le tracé de la ligne B. Source : Rennes Métropole

Ce tronçon fait la moitié de celui du chantier du M3 en terme de longueur de ligne, puisqu'il fait seulement 14 km avec 15 stations, avec une partie aérienne. Malgré tout, le calendrier des travaux étant plus avancé que celui de Toulouse, il permettra d'avoir un retour d'expérience intéressant, potentiellement exploitable.

2.a/ Présentation des travaux³⁶

Les travaux de la ligne B s'effectue entre la gare de Saint-Jacques de la Lande et la gare de Cesson- Viasilva (gares comprises), avec une partie en aérien sur environ 3km. Début des travaux préparatoires, avec terrassements : 2014

Début des travaux de génie civil : janvier 2015

Longueur de ligne : 14 km, située majoritairement en site urbain dense, et partiellement souterrain (11 km). Le tracé de cette ligne intègre un passage sous-fluvial sous la Marne (à Chelles / Champs-sur-Marne) et trois passages sous canaux (Canal Saint-Denis à Aubervilliers, Canal de l'Ourcq à Sevran et Canal de Chelles à Chelles)

La ligne B comporte quinze gares dont deux gares interconnectées avec la ligne A existante :

- La station Gares
 - La station Sainte-Anne
- La ligne B intègre également dans son périmètre la construction de la construction de 3 parcs relais pour un nombre total de stationnement de 2000

36 <http://www.metro-rennes-metropole.fr/>

places.

Pour la réalisation de ces travaux souterrains, la Semtcar (société d'économie mixte des transports collectifs de l'agglomération Rennaise) a confié au groupement EGIS-rail et se compose de : Egis Bâtiments Centre Ouest, Arcadis, L'Heudé, L'Heudé la maîtrise d'œuvre du génie civil et des équipements non liés au système de transport sur la totalité de la ligne. La Semtcar a été chargée par Rennes Métropole de construire la future ligne. Cette mission s'est effectuée dans le cadre d'un mandat de travaux, mis en œuvre par la Semtcar, au nom et pour le compte de Rennes Métropole.

2.b/ Quantités et qualités estimées des déblais

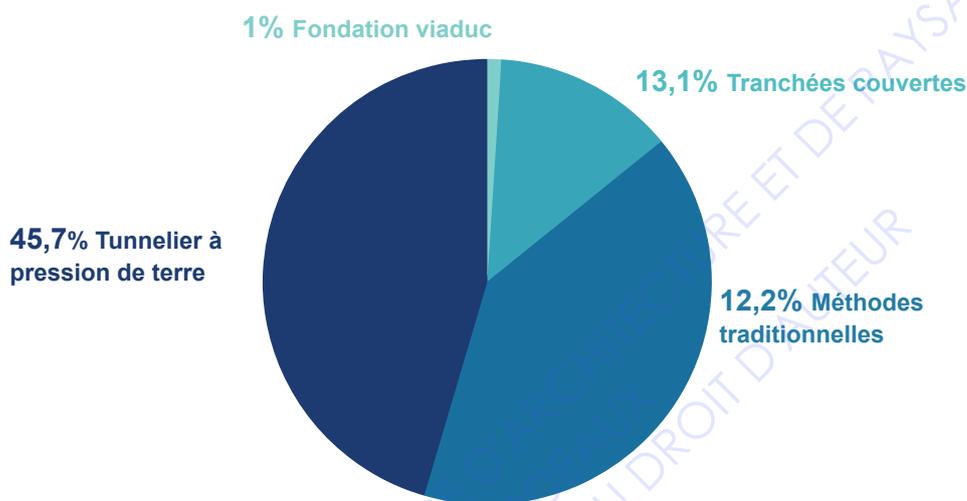


Fig 25, Graphique représentant les proportions des techniques d'excavation concernant les travaux souterrains de la ligne B, à Rennes. Données fournies par la société Semtcar.

Extraction tunnelier (tunnelier à pression de terre) : 1.14 millions de tonnes de terre

Extraction par tranchées couvertes : 0.33 en millions de tonnes.

Extraction pour les fondations des piles de viaduc : 22 800 tonnes.

Extraction méthode traditionnelle / parois moulées correspondant aux 15 stations : 1 million de tonne correspondant à 3 stations souterraines profondes utilisant la technique de parois moulées, 6 stations souterraines profondes utilisant les méthodes d'excavation traditionnelles, 4 puits techniques avec soutènement provisoire et excavation traditionnelle, 3 stations souterraines peu profondes avec soutènement provisoire et excavation traditionnelle.

Soit au total 2.5 millions de tonnes.

2.c/ Analyse des formations géologiques traversées et réflexion des potentiels de valorisation de la matière.

L'analyse des sols permet de les caractériser sous plusieurs familles différentes :

- Terrains de couverture : remblais, alluvions, altérites, schistes altérés
- Substratum: massif rocheux du briovérien hétérogène majoritairement schisteux et légèrement gréseux. Le tunnel recoupe une intrusion de granodiorites et des zones d'altérites.

	ISDI*	Comblement ancien site extraction antimoine**	ISDND***
Extraction tunnelier	0,2755	0,8303	0,0342
Extraction méthode traditionnelle et tranchées couvertes	0,8645		0,0760
TOTAUX (en millions de tonne)	1,1400	0,8303	0,1102
en %	54,8	39,9	5,3

Fig 26, Tableau présentant la répartition concernant le stockage des terres excavées selon la méthode d'extraction pour les travaux souterrains de la ligne B, à Rennes. Données fournies par la société Semtcar.

*ISDI : Installations de stockage de déchets inertes si leur caractère inerte est prouvé.

**Mise en carrière spécifique dont le fonds géochimique présentait des teneurs naturelles très élevées en antimoine (ancien site d'extraction d'Antimoine)

***ISDND : Installation de stockage de déchets non dangereux. terres contenant naturellement de l'Antimoine, dépassant le seuil de 0,18 mg/kg MS.

Concernant les 1.14 millions de tonnes de terres excavées, un plan de gestion des déblais prévoyait plusieurs réemplois possibles pour les terrains inertes, majoritaires :

- Remblaiement de carrières en fin d'exploitation
- Rehaussement de terrains agricoles ou destinés à la construction...

Cas particulier de l'antimoine :

Sur quelques sites de chantiers, les études préalables avaient mis en évidence des terrains pollués par d'anciennes activités industrielles. Les déblais devaient donc faire l'objet de dépôt en installations agréées. Mi 2015 des prélèvements effectués sur le marin (déblai du tunnelier) ont montré la présence d'antimoine (non identifié dans les études préalables) à des seuils ne permettant plus un dépôt en carrière sur le site accueillant jusqu'alors la plupart des déblais inertes du chantier du métro. L'Antimoine ainsi détecté se trouve naturellement dans le sol. C'est un métalloïde aux propriétés intermédiaires entre celles des métaux et des non-métaux. Connu depuis l'antiquité, il fut longtemps utilisé comme médicament, entre autres pour les maladies parasitaires. Aujourd'hui, il est reconnu comme toxique. La réglementation précise qu'au-delà du seuil de 0,06 mg d'antimoine par Kg de matière sèche, le déblai n'est plus considéré comme inerte et doit faire donc l'objet d'un traitement spécifique. Les résultats d'analyses étaient variables au fil des creusements, et en particulier lors de l'avancement du tunnelier, mais à plusieurs reprises cette problématique est apparue. Des démarches entreprises en lien avec les services de la préfecture (DREAL) ont permis d'identifier une carrière dont le fonds géochimique présentait des teneurs naturelles très élevées en antimoine, et compatible avec l'accueil des déblais dès lors que ceux-ci ne dépassaient pas 0.18 mg/kg MS, soit trois fois le seuil d'alerte.

2.d/ Potentiel d'un transport alternatif

Tous les transports ont été effectués par camions. Cependant, selon Semtcar, l'objectif était bien sûr de limiter les kilomètres entre les chantiers de la ligne b et les sites de dépôt de déblais. Cette affirmation reste cependant difficilement vérifiable à ce stade des études. Par ailleurs, pour limiter les risques de nuisances liées au flux de circulation, il a été décidé de ne pas dépasser 160 camions par jour sur ce site.

3/ Le métro de Lyon : la ligne E

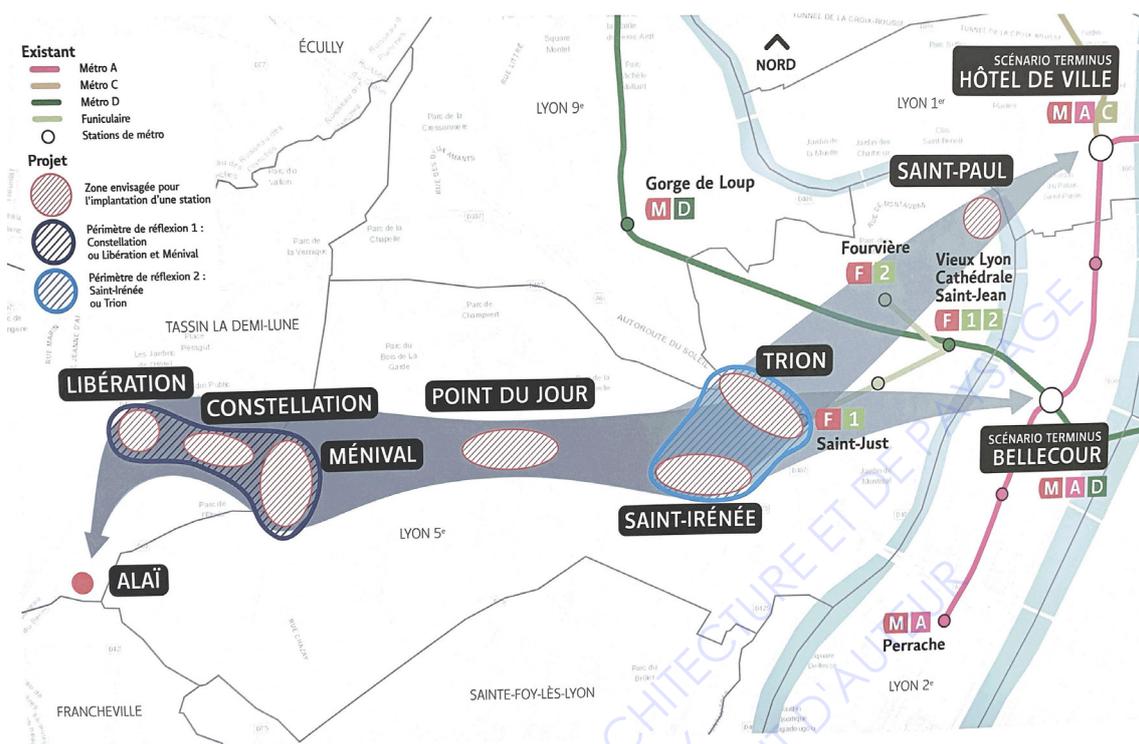


Fig 27, Carte présentant le projet de la ligne E. Source : Lyon Métropole.

Les études du métro E ont été suspendues suite aux élections municipales et métropolitaines. En 2021, le SYTRAL engagera une consultation citoyenne sur l'ensemble du plan métro. Ainsi, ils n'ont pas souhaiter répondre à mes questions.

La création de la ligne E était une promesse de campagne de Gérard Collomb, en 2014. Aujourd'hui, ce n'est plus clairement la priorité du nouveau président de la métropole de Lyon, Bruno Bernard. Durant sa campagne électorale, il avait assuré ne pas vouloir privilégier le métro au profit des télécabines ou encore du tramway. « Je ne souhaite pas de ligne politique qui serait décidée pour faire plaisir à un élu ou répondre à une promesse électorale faite à la va-vite », a déclaré Bruno Bernard dans un magazine local. Selon les études et les estimations effectuées par Sytral, le coût de ce projet reviendrait entre 1,1 et 1,3 milliard d'euros, bien trop cher pour M Bernard Bruno qui préfère aussi privilégier le prolongement de la ligne B jusqu'à Rillieux-la-Pape et de la ligne D jusqu'au quartier industriel de Vaise. Il n'a pas enterré le projet définitivement mais souhaite dans un premier temps organiser des débats publics pour choisir la ligne à développer la plus utile pour les lyonnais.

La création d'un métro répondent à des choix politiques du moment et peuvent rapidement être balayés selon les élections et le renouvellement des classes politiques. Aujourd'hui, les gouvernances politiques sont, plus que jamais, face à un risque d'opinion, qu'il faut tant bien que de mal réussir à maîtriser quitte à passer sous silence certaines choses pour assurer le succès d'une mesure, ou à ralentir ou voir interdire la mise en oeuvre d'une décision.

Conclusion de la partie 2

Le chantier de la ligne 16 du Grand Paris est un exemple qui montre bien l'importance de plusieurs paramètres pour optimiser au mieux la gestion et la revalorisation de la matière excavée. A ce jour, le chantier du Grand Paris peine à valoriser ses terres excavées, seulement 38 % au lieu des 70% annoncés.

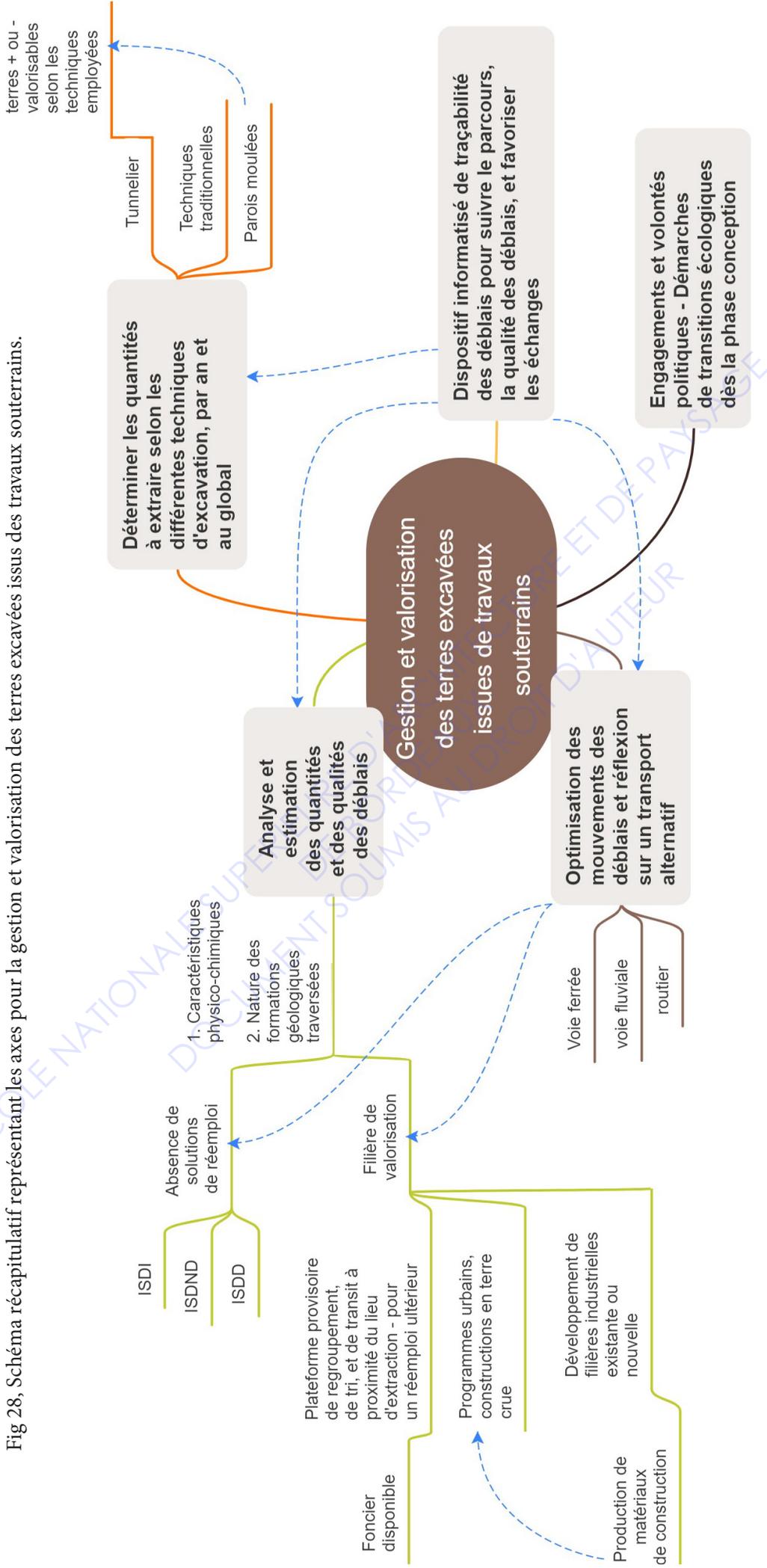
Malgré tout, l'étude de cet exemple permet de dégager trois grandes familles de paramètres à prendre en compte pour le chantier du M3, à Toulouse :

- La traçabilité des terres, pour analyser les taux de pollution des sols, ainsi que les caractéristiques des formations géologiques. Cette analyse permettra de porter des réflexions sur les potentiels de valorisation de la matière et d'y associer des quantités.
- Le choix des techniques d'extraction et leur impact sur la qualité des terres de déblais. Effectivement, certains procédés, comme la technique des parois moulées ou l'utilisation du tunnelier à pression de boue produisent une boue inexploitable qui ne pourra être valorisée.
- Réfléchir à un système de communauté de chantiers, une synergie de réemploi qui vise à réunir les personnes cherchant à évacuer des terres ou à en recevoir, et d'associer les transporteurs, les centres de traitements ou de valorisation. Le but est à la fois d'associer les caractéristiques de la terre excavée, avec les activités locales, les moyens d'acheminement pour valoriser la matière et porter une réflexion pour large sur les volumes.

Pour finir, nous avons vu avec l'exemple de la ligne de métro à Rennes que les volontés politiques sont les éléments essentiels pour susciter et porter des projets de réemploi. Il faut au sein des gouvernances, une prise de conscience et une volonté pour instaurer des démarches de transition écologique.

Carte mentale récapitulative :

Fig 28, Schéma récapitulatif représentant les axes pour la gestion et valorisation des terres excavées issus des travaux souterrains.



Cette troisième partie consiste à développer les trois axes définis dans l'étude des différents travaux souterrains (ligne 16 du Grand Paris, la ligne B, à Rennes et la ligne E à Lyon), pour la future ligne de métro M3, à Toulouse. Il s'agira donc de :

- Récupérer des éléments concernant les quantités et les qualités des déblais.
- Déterminer les quantités à extraire selon les techniques d'excavation et définir leur impact sur un réemploi éventuel.
- Réfléchir sur une optimisation des mouvements des déblais.

Cibler les particularités de ce chantier permettra d'évaluer la capacité ou non d'un réemploi des terres de déblais. Les différentes données présentées dans cette partie sont issues d'entretiens téléphoniques, effectués avec la société Tisséo et Egis. Il s'agit de données estimatives, qui restent relativement généralistes, puisqu'une grande partie des données sont à l'heure actuelle confidentielles et donc inaccessibles.

PARTIE 3 : Gestion des terres de déblais de la future ligne M3, à Toulouse. Réflexion sur une stratégie générale

1/ Présentation du chantier M3

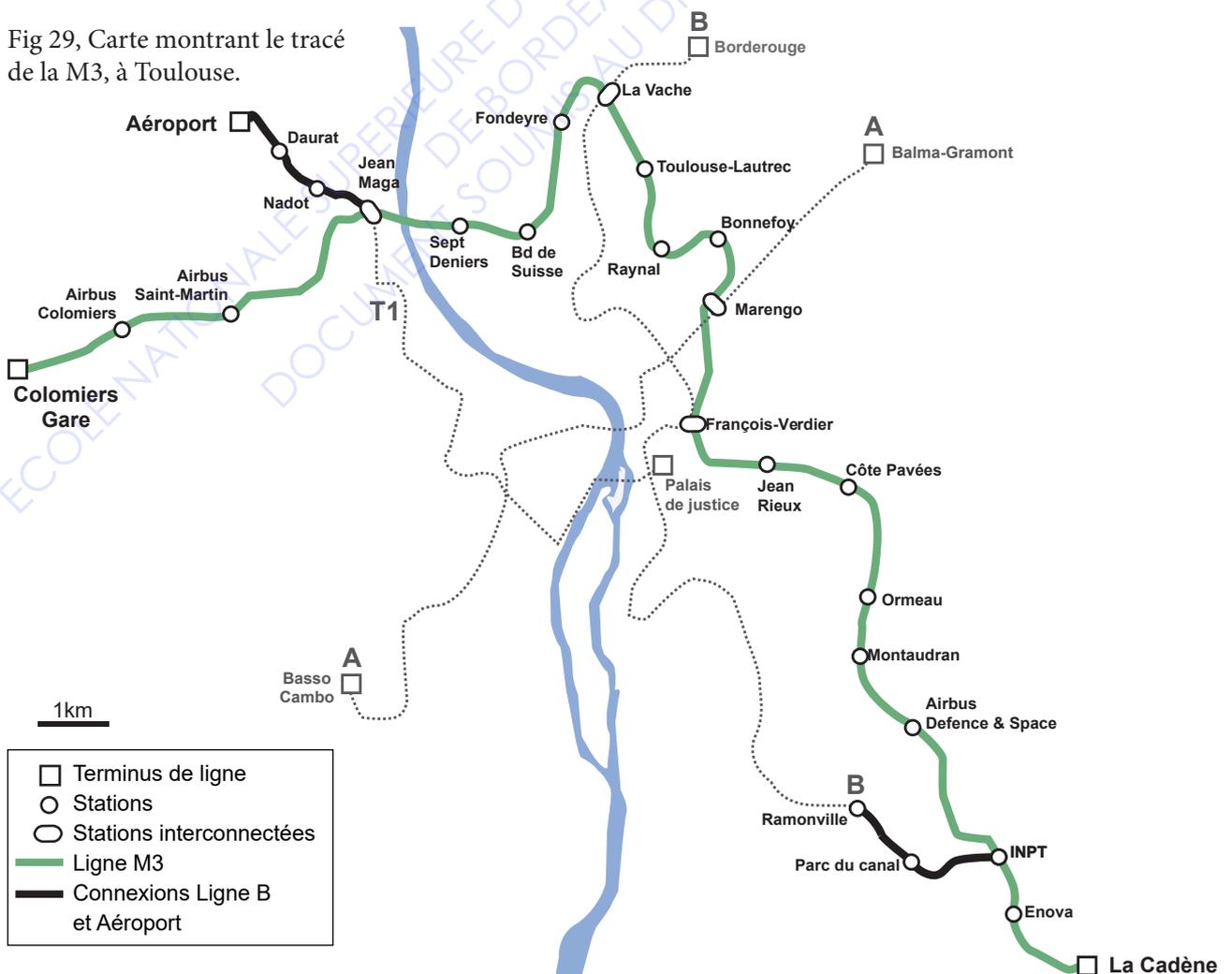
La ligne part de Colomiers au nord-ouest et fait le tour de Toulouse en passant par l'est. La connexion avec l'aéroport s'effectue au niveau de la station Jean Maga. Il s'agit essentiellement d'une mise à niveau de la ligne de tram avec quelques modifications pour améliorer la station d'échange, les matériels roulant et les fréquences.

Cette nouvelle ligne de métro a été conçue pour la connecter le plus souvent possible aux moyens de transports existants :

- Colomiers gare dont le parvis sera connecté avec la future ligne de métro.
- Connexion avec l'aéroport améliorée.
- La station la Vache sera connectée avec la ligne B et dans un futur avec une voie de chemin de fer pour relier les RER qui arrivent du nord de Toulouse.
- Triple connexion à la station Marengo, avec la ligne A et la gare Matabiau.
- Connexion avec la ligne B à la station François Verdier.
- Nouvelle station à côté de la gare SNCF Montaudran pour relier avec les trains arrivant du sud-est, de Carcassonne par exemple.
- Connexion avec la ligne B, au niveau du Carrefour Labège. Construction d'un rameau, en prolongement de la ligne B, depuis Ramonville.
- Labège, connexion avec la voie de chemin de fer.

Quelques données : 27 km de lignes, 21 stations (dont 4 stations en surface), 21 km en tunnel.

Fig 29, Carte montrant le tracé de la M3, à Toulouse.



2/ Caractérisation des formations géologiques

2.a/ Les contextes environnementaux : pédologie, géologie, hydrogéologie

Une grande importance doit être mise sur la reconnaissance de la géologie et de la qualité des terres en faisant des prélèvements jusqu'à dix mètres de profondeur. Ces échantillons sont broyés et mélangés pour ensuite être analysés. La caractérisation d'un mélange est plus judicieux puisque le tunnelier malaxe la terre sur presque 10m de hauteur. Il faut donc définir la granulométrie (la taille des grains), et comprendre sa composition et sa localisation précise.

Ces pré-études permettent de mettre en place une traçabilité des déblais, d'adapter les moyens techniques d'excavation selon la nature du sol et de faciliter la gestion des déblais par la suite.

Une classification des terres est nécessaire pour anticiper un réemploi adapté et éviter d'éventuels surcoûts importants dus à la nécessité d'un traitement non prévu. C'est également un moyen de déterminer les meilleures optimisations, en estimant les quantités extraites selon la classification des sols. Pour cela, différents paramètres doivent être pris en compte :

- la granularité, c'est-à-dire la taille des déblais extraits.
- l'indice de plasticité, ce qui caractérise l'argilosité des sols.
- La valeur de bleu de méthylène (VBS) permettant de caractériser l'argilosité (ou la propreté du sol).
- Les paramètres de comportement mécanique
- Les paramètres d'état, pour déterminer les paramètres en fonction de l'environnement dans lequel il se trouve et les différents états hydriques considérés. (l'état très humide, humide, d'humidité moyenne, l'état sec, l'état très sec).

J'aurais souhaité récupérer l'analyse des contextes environnementaux des sous-sols de manière plus localisée et plus précise, et pas exclusivement des données globales. Cependant, Tisséo constitue actuellement des annexes techniques pour un éventuel appel à projet, et n'est pas en capacité de les diffuser pour le moment.

A1 : Limons peu plastiques, loess, slits alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques

A2 : Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...

B3 : Graves silteuses

B4 : Graves argileuses (peu argileuses)

B5 : Sables et graves très silteux

B6 : Sables et graves argileux à très argileux

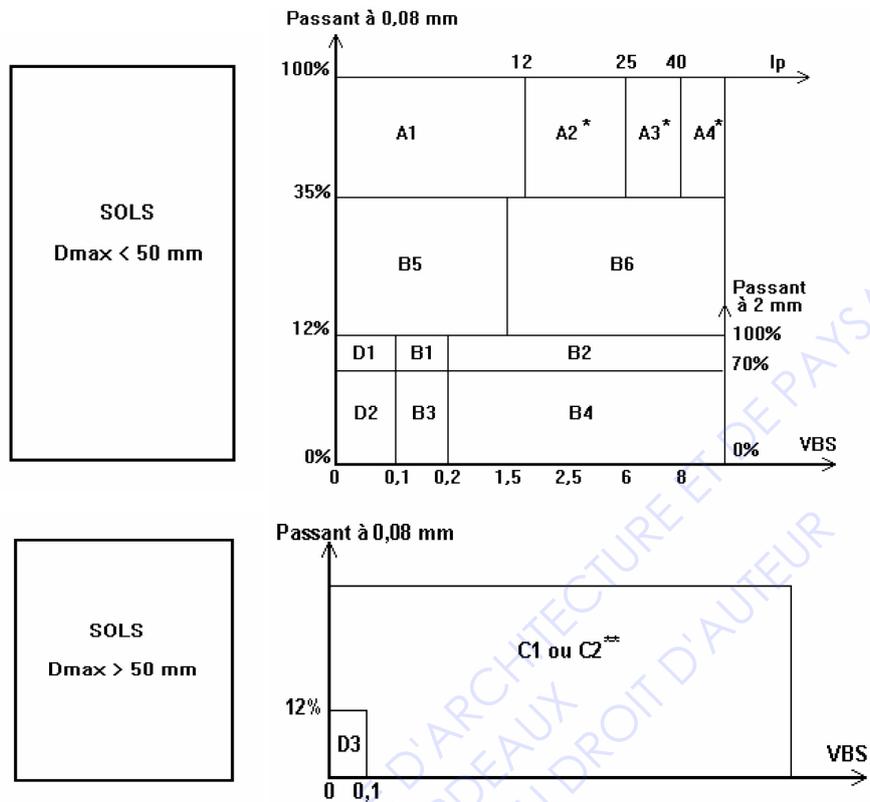
C1B : argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières.

Remblai : opération de terrassement consistant à rapporter des terres pour faire une levée ou combler une cavité.

Molasse : désigne un ensemble de roches sédimentaires, essentiellement détritiques, et post-orogéniques, il s'agit souvent des grès à ciment de calcaire argileux

Alluvions : est un dépôt de débris, tels que du sable, de la vase, de l'argile, des galets, du limon, ou des graviers, transportés par de l'eau courante.

Fig 30, Tableau synoptique de classification française des sols fins et des matériaux rocheux évolutifs.
 Source : SETRA - LCPC.



** C1 : matériaux roulés et matériaux anguleux peu charpentés (0/50 > 60 à 80 %)
 C2 : matériaux anguleux très charpentés (0/50 ≤ 60 à 80 %)

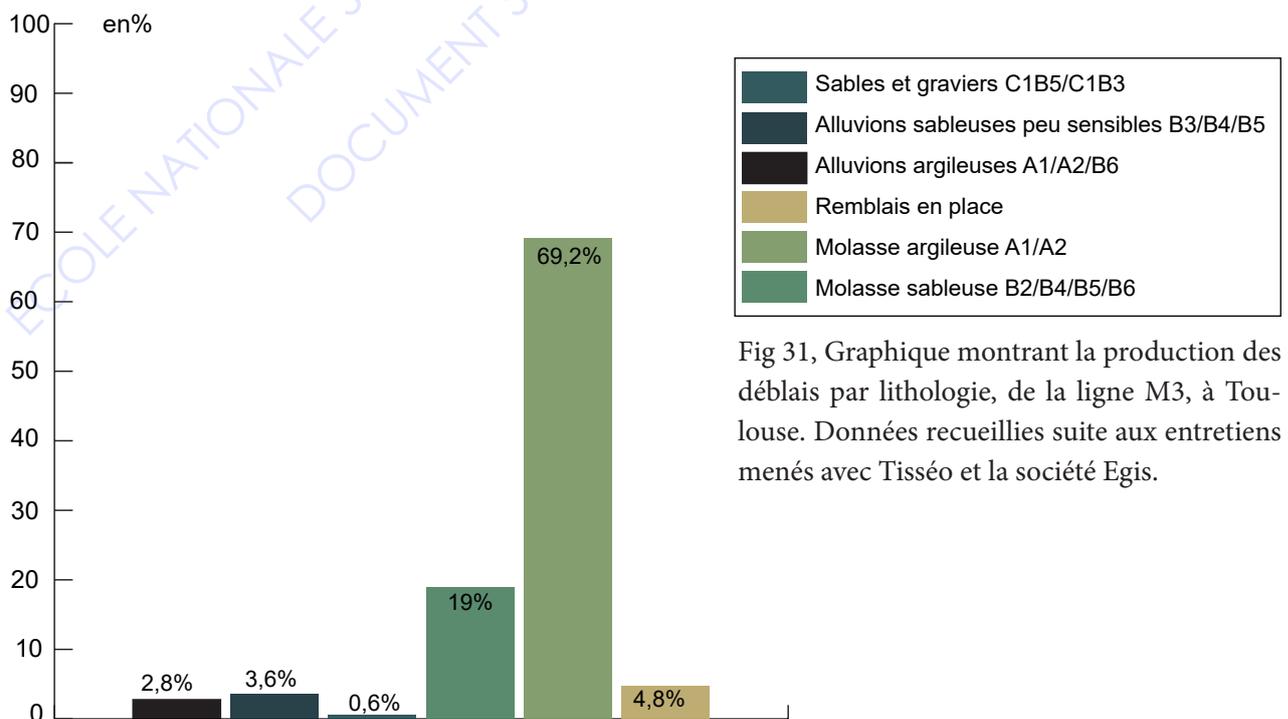


Fig 31, Graphique montrant la production des déblais par lithologie, de la ligne M3, à Toulouse. Données recueillies suite aux entretiens menés avec Tisséo et la société Egis.

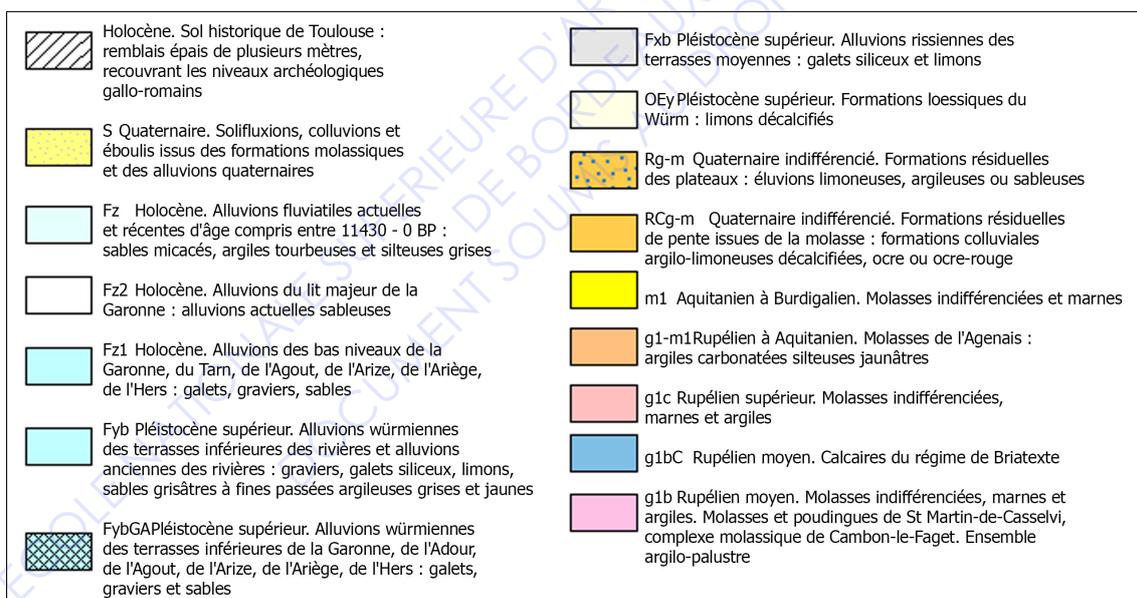
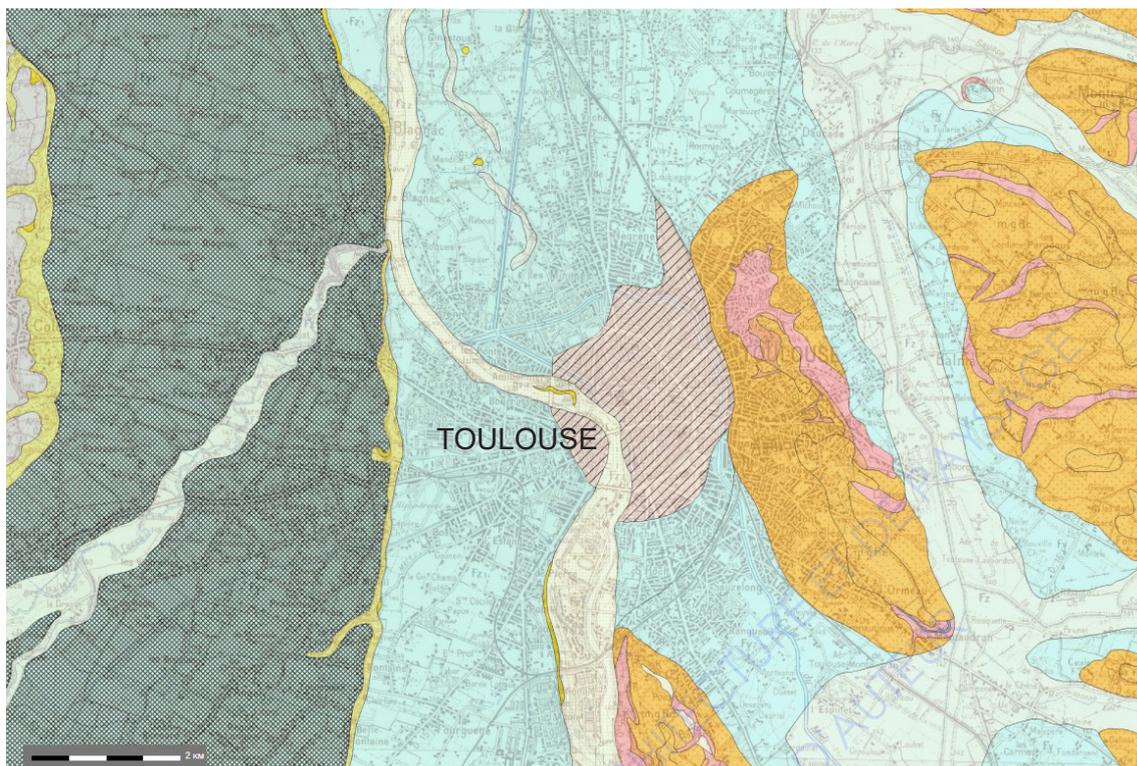


Fig 32, Carte géologique de la métropole toulousaine. Source : <https://infoterre.brgm.fr>

Les sous-sols toulousains se composent en grande partie de molasses argileuses (env 70%) et légèrement sableuse (env 20%). Ces terres de déblais pourraient donc posséder des caractéristiques minéralogiques, et physiques (masse volumique, granulométrie, et indice de plasticité, résistance à la compression et à la flexion...) qui pourraient être propices à un réemploi.

3.b/ Les contextes chimico-environnementaux

Concernant les caractéristiques chimico-environnementales, il semblerait (données transmises lors d'entretiens) que 75% soient des terres non polluées, ce qui offre de belles perspectives, en plus d'une lithologie très intéressante. La caractérisation des sols peut laisser entrevoir des potentiels de réemploi dans la fabrication de crus de cimenteries, d'éléments pour la construction en terre crue et terre cuite, de réemploi des sables pour du béton ou du mortier. L'utilisation de ces terres de déblais peut également être employée en tant que remblais courants pour des chantiers de proximité. Cependant, la nature des sols extraits peut être modifiée par son moyen d'extraction. Nous allons donc les définir, et analyser l'impact sur ces futurs déblais.

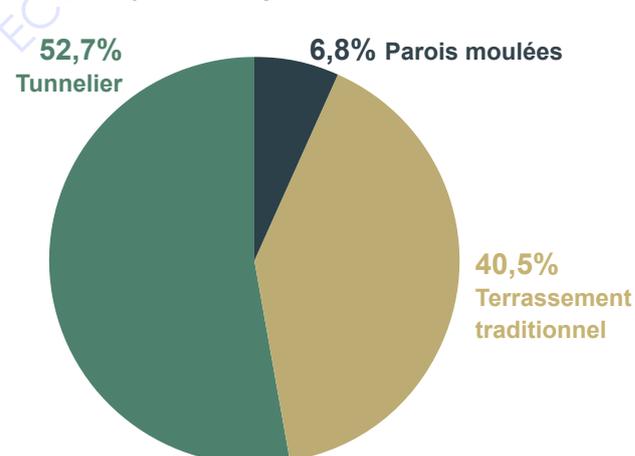
3/ Les différentes techniques d'extraction et leur impact sur la qualité des déblais excavés.

La réalisation des travaux souterrains de la ligne M3 fera appel à trois méthodes d'extraction :

- Le terrassement classique. Il s'agit d'une méthode traditionnelle utilisant une pelle mécanique. Il est aisé de mettre au point un tri et une traçabilité de ces terres excavées.
- La méthode des parois moulées permet de réaliser les parois des gares et des parkings enterrés. Cette méthode consiste à creuser avec une pince une tranchée correspondant à la hauteur du terrassement. La tranchée est remplie d'un mélange d'argile liquide pour éviter son effondrement sur elle-même. Une fois celle-ci achevée, l'argile liquide est remplacée par du béton. Les terres obtenues sont liquides et difficilement exploitables.
- Le creusement par tunneliers. Il existe plusieurs techniques de tunneliers qui permettent ou non le réemploi des terres d'excavation. A titre d'exemple, le tunnelier à pression de terre broie les différentes matières en les mélangeant avec un fluidifiant qui produit une matière liquide, impossible à valoriser. Cette pâte doit être déposée dans des fosses de décantation afin de pouvoir être transportable par la suite.

Les choix précis des techniques d'extraction permettent également d'estimer, (en plus des qualités chimico-environnementales des sols) des quantités de terres potentiellement exploitables.

Deux techniques de tunnelier peuvent être employées mais ne sont pas clairement définies à ce jour. Il s'agit du tunnelier à pression de terre et à pression de boues.



BILAN GLOBAL	Volume en place excavé (m3)
Paroi moulée	186 000
Terrassement traditionnel	1 055 000
Tunnelier	1 411 000
	2 652 000

Fig 33, Graphique représentant les proportions des techniques d'excavation, de la ligne M3, Toulouse. Données recueillies suite aux entretiens menés avec Tiséo et la société Egis.

3.a/ Les tunneliers à pression de terre

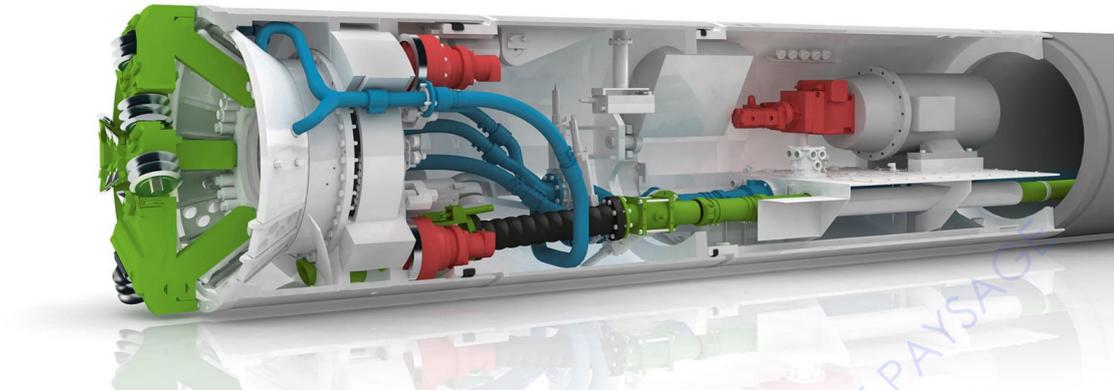


Fig 34, Coupe 3D sur le tunnelier à pression de terre. <https://www.herrenknecht.com>
Source : herrenknecht.

Les tunneliers à pression de terre sont à privilégier pour les sols mous et cohésifs³⁷ (à forte teneur en argile, en limon et à faible perméabilité à l'eau). Les boucliers transforment la matière excavée en une pâte de consistance plastique pour équilibrer la pression en face du tunnel, éviter l'afflux trop important de terre dans la machine et créer un creusement rapide. Le tunnelier à pression de terre permet l'utilisation directe du sol excavé comme support. Une roue de coupe rotative presse sur la face du tunnel et creuse le sol. Ce dernier pénètre dans la chambre d'excavation par des ouvertures, où il se mélange à la pâte de sol qui s'y trouve déjà, jusqu'à obtention d'une texture requise. Le but est de trouver un équilibre, de telle sorte que la pression de la pâte de sol dans la chambre d'excavation soit égale à la pression du sol environnant et des eaux souterraines.

Un convoyeur à vis transporte le matériau excavé de la base de la chambre d'excavation vers un convoyeur à bande. Ce réglage entre débit du convoyeur à vis et vitesse d'avancement du tunnelier permet de contrôler la pression d'appui sur la pâte de terre. Cet équilibre est surveillé en permanence, par le biais de capteurs, ce qui permet d'affiner les paramètres dans des conditions géologiques changeantes. L'avancement du tunnelier est ainsi optimisé et le risque de tassement à la surface minimisé.

Cette pâte, composée d'eau et d'éléments chimiques (polymères et tensions actifs) permettent de modifier la plasticité, la texture et la perméabilité à l'eau du sol et d'améliorer le fonctionnement et l'avancement du tunnelier, même dans des sols hétérogènes, contenant du gravier, du sable ou de l'eau, ou dans des conditions géologiques instables. Cependant, cette pâte n'est ni exploitable, ni transportable. Il faut y ajouter de la chaux pour la rigidifier et la rendre transportable. Cette technique est certes plus rapide, moins chère mais moins fiable et les terres d'excavation pas valorisables.

37 Un matériau est dit cohésif, par opposition à friable ou liquide, pour signaler son aptitude à rester stable sous l'action de forces internes

3.b/ Les tunneliers à pression de boue

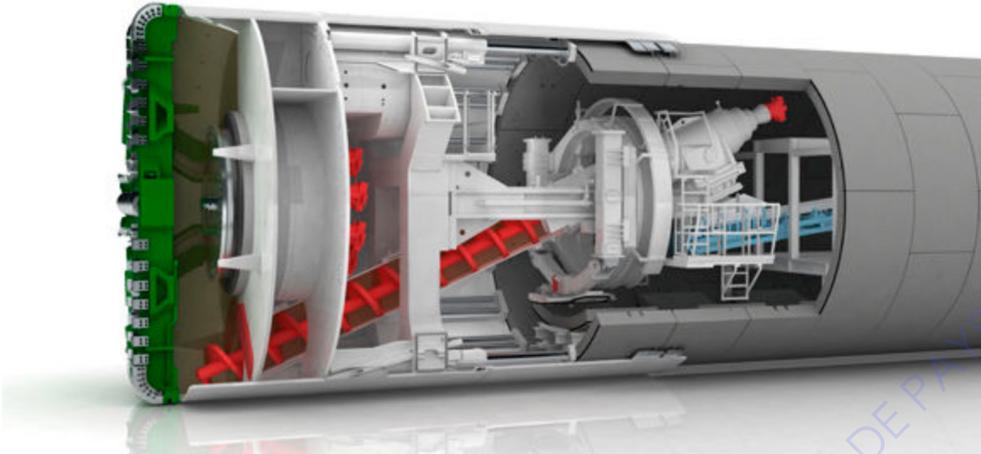


Fig 35, Coupe 3D sur le tunnelier à pression de boue. <https://www.herrenknecht.com>
Source : herrenknecht.

Le tunnelier à pression de boue est utilisable dans presque toutes les conditions du sol (allant du limon à l'argile, aux sols incohésifs, au gravier et à la roche) et avec des pressions d'eau élevées. Cette technique est la plus fiable et sécurisée.

Pour cela, Le sol à excaver est retiré à l'aide d'une tête de coupe adaptée à la géologie. Un concasseur en forme de cône à l'intérieur de la chambre d'excavation émette les pierres et autres obstructions jusqu'à l'obtention d'une taille de grain transportable, tout en creusant le tunnel. Cependant, cette technique nécessite de conserver le cône du concasseur propre et d'éviter le colmatage. Pour cela, des buses d'eau permettent d'injecter de l'eau pour nettoyer le système et de faire face à différentes exigences géologiques.

De plus, on doit effectuer un gros forage, pour récupérer de la boue propre. Devant le tunnelier, on malaxe et on gratte le terrain. Les morceaux reviennent dans une canalisation dans laquelle tout est mélangé : la boue propre et les sédiments. En surface, une usine tamise cette boue pour faire ressortir des déblais, et régénérer de nouveau une boue propre qui sera renvoyée au front (circuit fermé).

Ensuite, il y a trois coupures différentes et successives :

- supérieures à 5-6 mm. C'est une sorte de passoire.
- Le 2ème étage de l'usine enlève le sable, ce qui représente 30 à 40% du tonnage complet. Il s'agit d'un sable pas très propre, composé d'un peu d'argile et donc pas utilisable en l'état pour la construction. Actuellement, des études sont effectuées pour trouver une solution de nettoyage pour que ce sable soit exploitable dans le domaine du BTP.
- La surverse de la passoire : la trommel pour mettre en place une floculation de cette boue grâce à l'ajout d'un adjuvant pour créer une sédimentation (polymères et de la chaux). Une fois la boue épaisse, on la fait rentrer dans un filtre presse. Il s'agit d'une boîte avec 2 parois amovibles avec un filtre, des vérins des 2 côtés qui font ressortir l'eau. On peut ensuite démouler une brique crue, sans sable. Cette technique de tunnelier nécessite plus d'espace foncier disponible. Elle est plus fiable techniquement mais plus coûteuse.

Comparaisons avantages/Inconvénients entre les deux techniques :

	Tunnelier à pression de terre	Tunnelier à pression de boue
Rapidité creusement	+	–
Fiabilité technique	–	+
Coût	+	–
Gestion déblais excavés	–	+
Adaptabilité du terrain	+	+

Le choix du tunnelier est une question essentielle dans la gestion et la valorisation des terres excavées. Ce choix pourra s'effectuer selon un positionnement clair et défini sur l'envie ou non de valoriser les déblais. Faut-il opter pour une technique de tunnelier (à pression de boue) plus onéreuse et réfléchir en parallèle à la possibilité de réinvestir ces terres d'excavation ? Ou bien faut-il privilégier la technique de tunnelier la moins onéreuse (à pression de terre) pour favoriser une rapidité des travaux et mettre de côté la question environnementale ? De plus, ce dernier positionnement oblige à mettre en place une enveloppe budgétaire plus conséquente pour pallier les éventuels dégâts liés aux tassements de terrain puisque la fiabilité technique est moindre par rapport aux tunneliers à pression de boue. Choisir le type de tunnelier est réellement un choix politique et stratégique, un équilibre difficile, basé sur une gestion des risques et des contraintes budgétaires qui peut amenuiser les innovations techniques.

3.c/ Les parois moulées et l'excavation par méthodes traditionnelles

Pour réaliser les gares souterraines, les ouvrages annexes, les sites souterrains de maintenance, et de contrôle, plusieurs méthodes de construction pourront être employées : les parois moulées, les tranchées couvertes, et le creusement traditionnel. Le choix d'une ou plusieurs techniques d'excavation se feront selon la qualité des sols rencontrés, les conditions hydrogéologiques, et le contexte liées aux emprises disponibles et à l'environnement urbain.

Une paroi moulée correspond à un mur en béton armé creusé et coulé à même le sol. Pour effectuer cet ouvrage, il est nécessaire de creuser une tranchée par panneaux adjacents réalisée à la profondeur et avec l'épaisseur voulue. La tenue des parois s'effectue par le biais d'un fluide de stabilisation composé de Bentonite ou de boues polymères. Ces panneaux, équipés d'une armature métalliques, permettent de reprendre les efforts. Le remplissage du béton s'effectue par un tube plongeur. La technique des parois moulées s'est développée avec la densification des villes et la multiplication des infrastructures souterraines. Elle est utilisée principalement pour construire des enceintes souterraines relativement étanche, de type parking, fosse, bassin de stockage, mais aussi pour la réalisation de structures de soutènement de grande hauteur. Cette technique peut s'employer également afin de sécuriser des bâtiments mitoyens ou à proximité d'ouvrages

sensibles, très adaptés pour les lieux urbanisés.

Certains tronçons de la ligne seront creusés en tranchées couvertes, ce qui consiste à creuser depuis la surface une tranchée, à réaliser l'ouvrage aux dimensions et à la profondeur nécessaire, puis à le remblayer. Les tranchées couvertes peuvent être réalisées de différentes manières employant ou non la technique des parois moulées.

Les méthodes traditionnelles correspondent à des ouvrages creusés selon des méthodes de terrassement à l'explosif ou à l'aide d'excavateurs mécaniques tels que la forage Jumbo à deux ou trois bras. Il faut commencer par créer un puits d'attaque qui peut être réalisé en tranchées couvertes et ensuite prévoir un creusement conventionnel pour réaliser la gare souterraine.

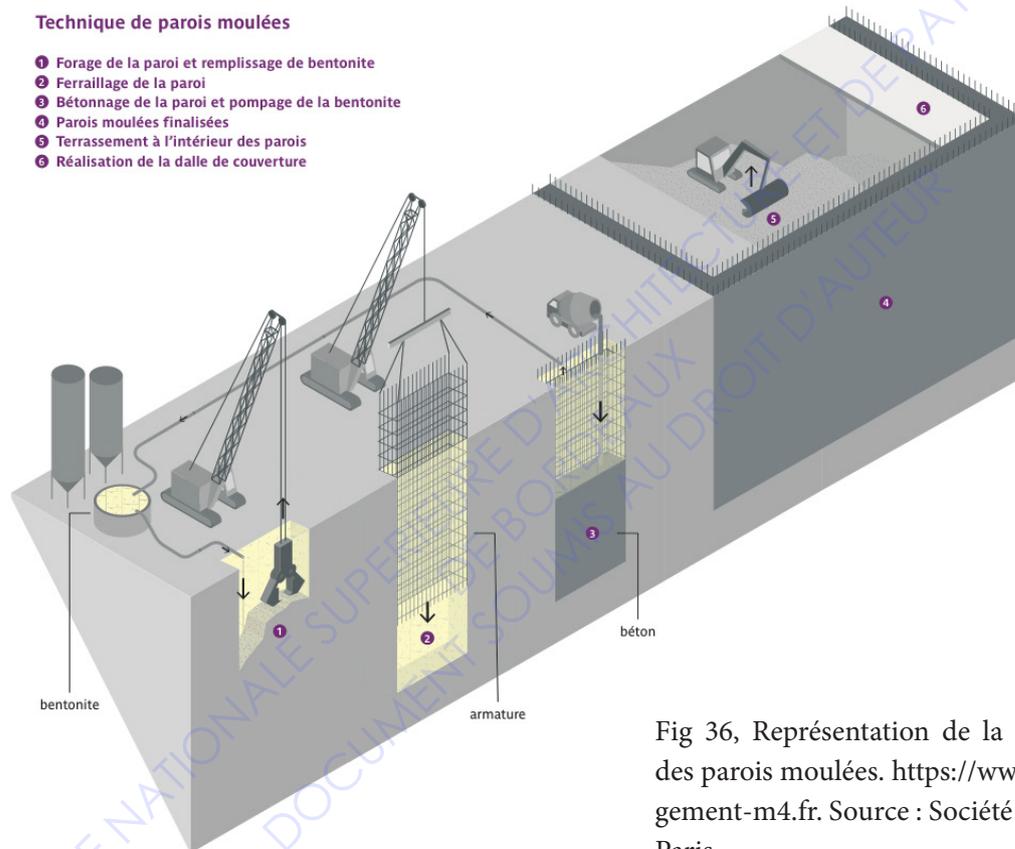
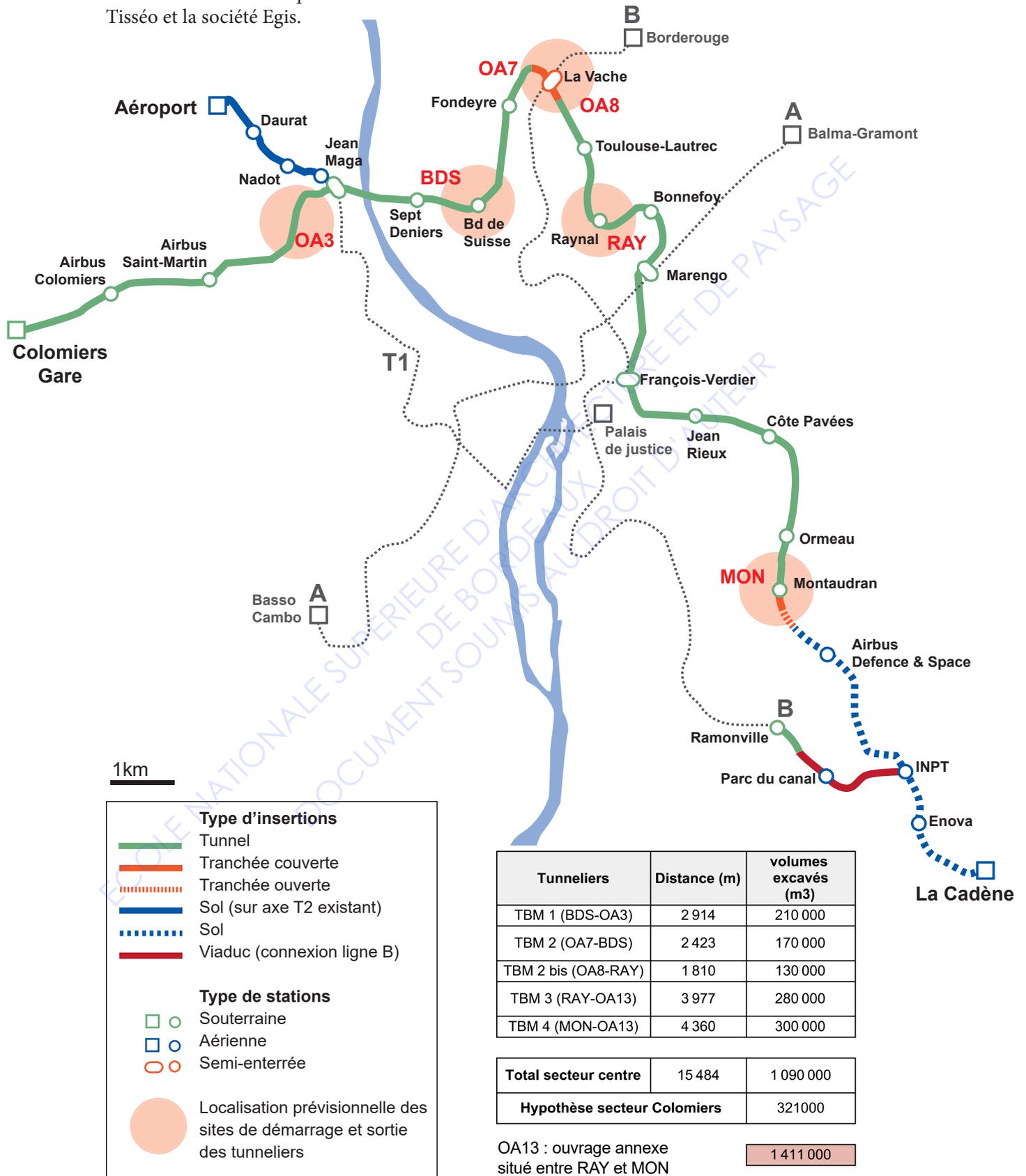


Fig 36, Représentation de la technique des parois moulées. <https://www.prolongement-m4.fr>. Source : Société du Grand Paris.

3.d/ Organisation prévisionnelle des tunneliers

Si les techniques de tunneliers ne sont pour le moment pas définies, la localisation prévisionnelle des points de démarrage et de sorties des tunneliers ainsi que la nature des travaux souterrains et aériens à effectuer sont en partie déterminés. Ce travail de cartographie accompagné d'un calendrier d'extraction par type d'ouvrage permettrait de mieux cibler les localisations et les quantités associées des matières extraites. L'objectif serait d'optimiser, de gérer au mieux les mouvements potentiels des déblais.

Fig 37, Carte montrant les différents types d'insertions, et de stations de la ligne M3, ainsi que la localisation prévisionnelle des points d'attaque des tunneliers, à Toulouse. Estimation des volumes excavés avec la technique du tunnelier. Données recueillies suite aux entretiens menés avec Tisséo et la société Egis.



Les quantités de terres excavées par les tunneliers seraient estimées à 1,4 millions de m³ sur les 2,6 millions de m³ au total (soit plus de la moitié). Les travaux de la ligne M3 devraient durer cinq années. La production des déblais par les tunneliers devrait s'effectuer sur une durée inférieure à deux années et devrait commencer 30 mois après le démarrage des travaux. Selon la technique de tunnelier retenue, il va falloir valoriser de grandes quantités de terres excavées sur une courte période.

L'ensemble des données figurant dans ce mémoire correspond à des volumes en place. Cependant il faudrait y définir des coefficients de foisonnements puisque selon la technique d'extraction, les déblais vont augmenter de volume lors du déplacement de la matière

4/ Le choix des modes de transport des terres au coeur d'une optimisation des flux

Le choix du mode de transport impacte énormément la question des gestion des déblais. Comme le choix de la technique des tunneliers, la question du transport est une équation complexe à résoudre puisqu'il faut allier l'ensemble des paramètres :

- Limiter au maximum les déplacements des déblais.
- Réduire les nuisances générées par la nature du mode de transport et des fréquences associées.
- Réduire l'impact financier.
- Trouver une flexibilité et une continuité entre les réseaux.

Trois types de transports peuvent être utilisés pour acheminer les terres d'excavation: le transport fluvial, ferroviaire et routier.

Le transport par camion est certes la solution la plus flexible puisqu'elle permet d'adapter le nombre de camions par rapport aux quantités nécessaires à évacuer. Cependant, elle cause de nombreuses nuisances (perturbation de la circulation, bruit, poussière...) et c'est celle qui émet le plus de gaz à effet de serre. Tisséo étudie la question du transport fluvial et ferroviaire. Il faut pour cela avoir de grandes quantités de matières à sortir et que les puits des tunneliers soient à proximité des voies ferroviaires ou fluviales, pour maintenir une certaine optimisation. Il faut également que le transport fluvial et ferroviaire soit en mesure d'accepter une surcharge ponctuelle sur leur réseau existant. La localisation précise des puits de tunnelier permettra d'élaborer des plans d'acheminements des terres d'excavation.

A titre indicatif³⁸ :

Un camion : entre 15 et 30 t de terre, 26 000€/km en moyenne.

Une barge fluviale : 2500 t de terres, soit l'équivalent de 100 camions, 2000€/km en moyenne.

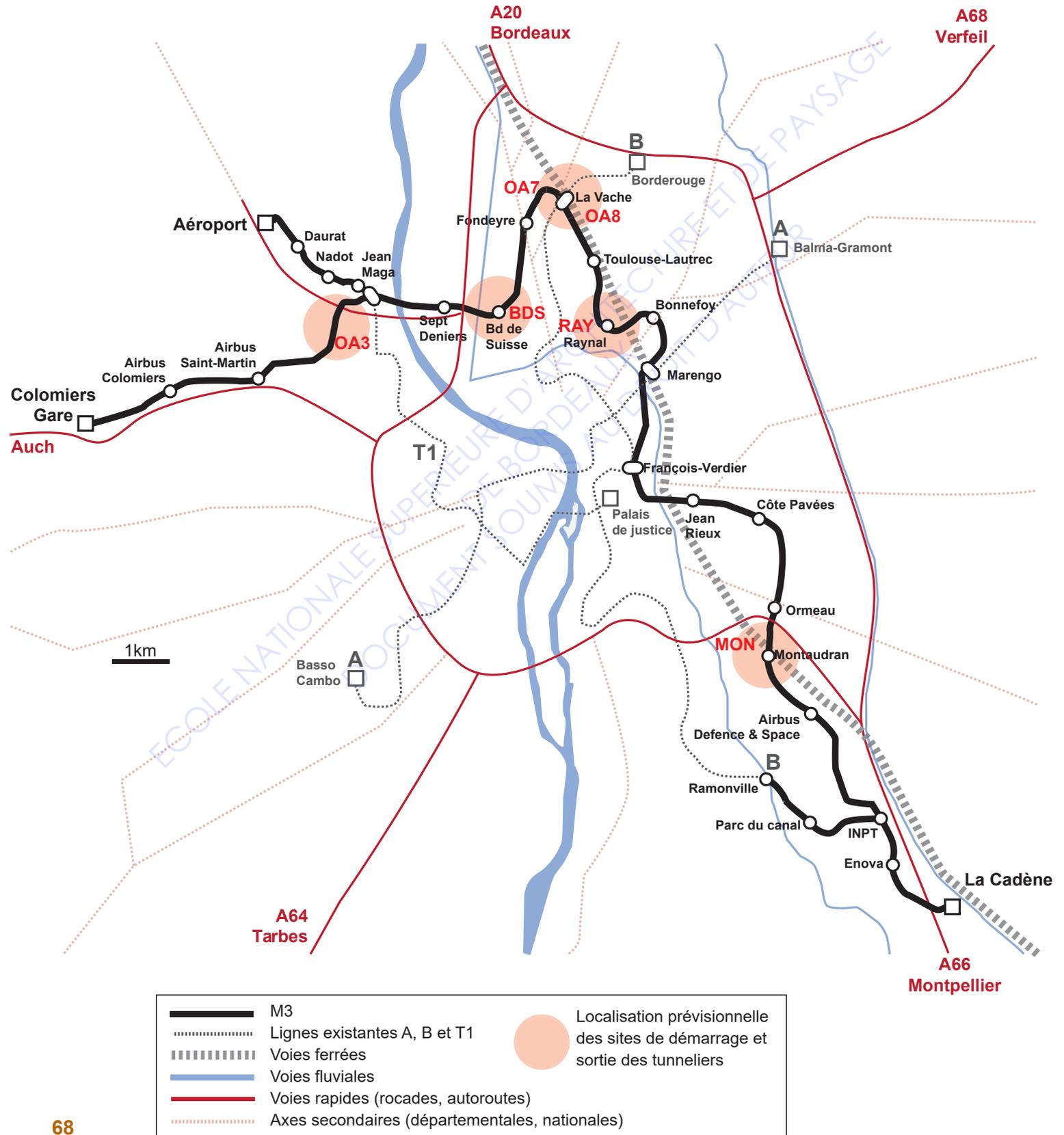
Un train : 1400 t de terre, soit l'équivalent de 50 camions, 6000€/km en moyenne.

Il faut noter également que le recours à d'autres modes de transports n'a de sens que si les sites receveurs des déblais restent à proximité d'une voie fluviale ou d'une voie ferrée. Il faut limiter les transports multimodaux, qui peuvent rajouter des manutentions de matières. De plus, les méthodes de creusements peuvent également impacter les moyens de mise en œuvre de certains types de transports. Les déblais issus des méthodes tra-

38 Le défi de la valorisation des déblais, site internet : <https://www.societedu-grandparis.fr/info/gestion-et-valorisation-des-d%C3%A9blais>

ditionnelles d'excavation peuvent s'adapter à tous les types de transports, contrairement à certaines techniques de parois moulées, et de tunneliers (en particulier à pression de terre) qui peuvent présenter des textures contraignant le transport de matières.

Fig 38, Carte montrant les différents types d'insertions, et de stations de la ligne M3, ainsi que la localisation prévisionnelle des points d'attaque des tunneliers, à Toulouse. Données recueillies suite aux entretiens menés avec Tisséo et la société Egis.



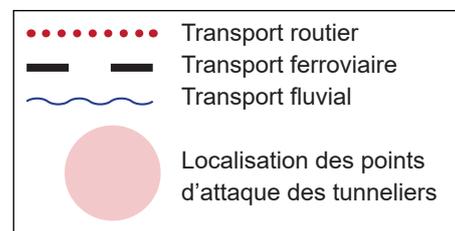
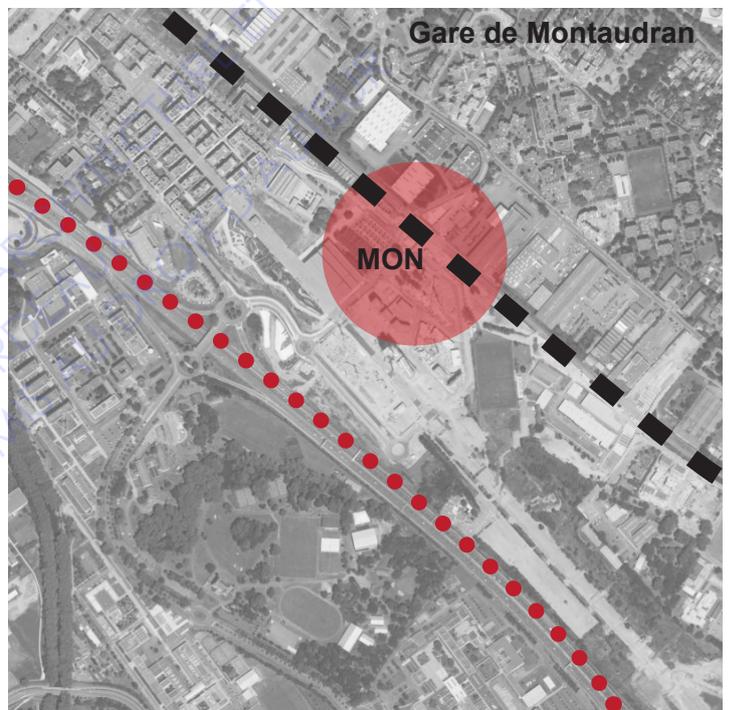
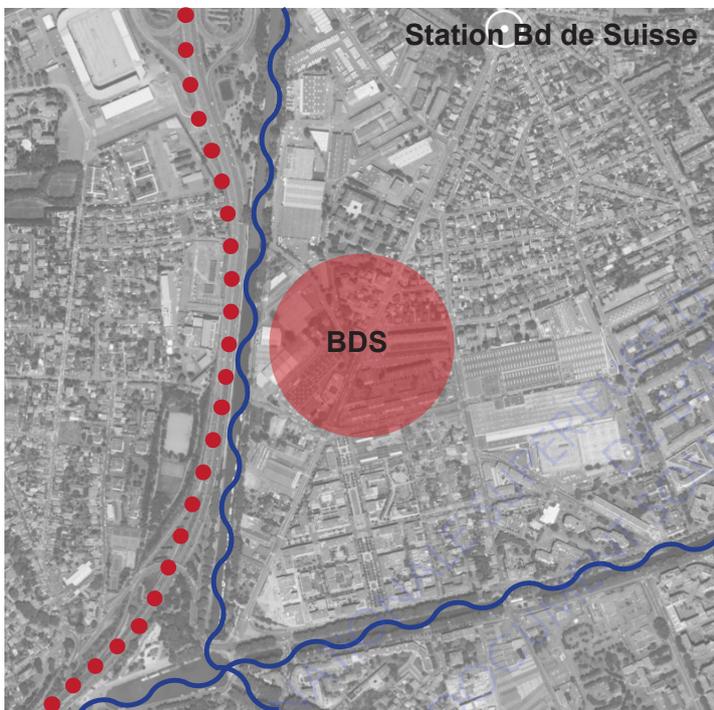
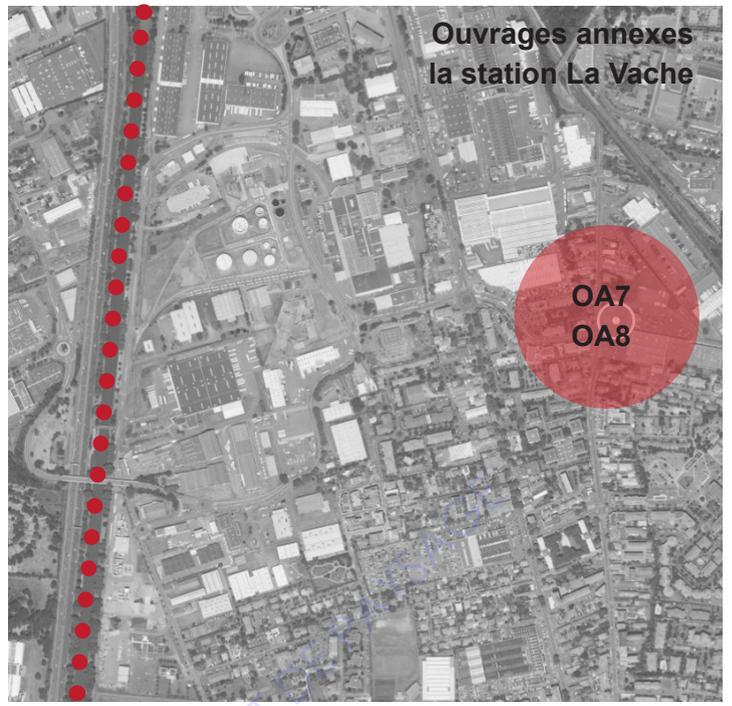
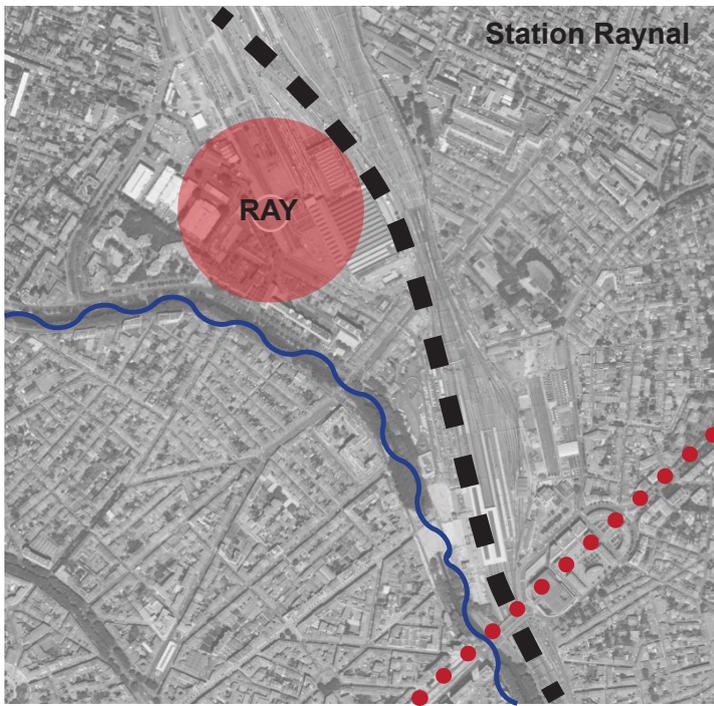


Fig 39, Images satellites localisant les points d'attaque prévisionnels des tunneliers pour le chantier de la ligne M3 et les différents transports pour l'évacuation des déblais.

Les terres excavées qu'elles soient polluées ou non et, lorsqu'elles sortent d'un site, prennent automatiquement le statut de déchet. Effectivement, «au titre de l'article L. 541-1-1, est défini comme un déchet toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire.» Ainsi, la gestion des terres excavées en dehors de leur site d'extraction doit respecter la législation applicable aux déchets pour éviter et maîtriser les impacts sanitaires, et fait partie intégrante de l'organisation du chantier. Il faut donc trouver du foncier disponible si possible in situ ou à proximité pour éviter la délocalisation et le transport de matières. Des sites intermédiaires pourraient être aménagés à proximité de leur lieu d'extraction, pour gérer la caractérisation, le tri et le transit de ces matières. Ces sites pourraient éventuellement accueillir de manière temporaire des processus industriels de criblage, broyage, et concassage, dans le but de pouvoir trier et préparer les déblais vers des filières adaptées de valorisation de recyclage, d'élimination, ou être réemployé à proximité.

Le recensement des établissements de trie, de collecte, de stockage existants, prêts à accueillir les déblais du chantier de la ligne M3 sont des éléments complexes à obtenir à cette phase actuelle du projet, puisqu'il s'agit de données extrêmement sensibles. Cependant, j'ai pu collecté un certain nombre d'informations pour déterminer les distances à parcourir avec les différentes carrières les plus éloignées, pouvant servir d'exutoires aux terres excavées. Ces dernières pourraient être situées au plus loin, autour de Tarbes avec un rayon de plus de 100 km, ainsi qu'à Port la Nouvelle, située à plus de 150 km de Toulouse. Une grande majorité des carrières se situent dans un rayon de 50km autour de la métropole.

Même si certains exutoires peuvent être alimentés par voies ferrées ou fluviales, les distances restent très éloignées et risquent malgré tout de provoquer de fortes émissions de CO₂, dues aux transports de matières. Les solutions à privilégier sont donc de réfléchir à un réemploi limitant les mouvements des terres excavées pour conserver une logique d'économie circulaire.

Dans tous les cas, il faudra développer un moyen collaboratif, un dispositif informatisé pour tracer les déblais, suivre leur parcours pour gérer d'une manière globale le déploiement vers des filières de revalorisation.

Pour cela, l'application TERRASS, commandée et financée intégralement par le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, et développée en 2013 par le BRGM, est une plateforme de gestion de la traçabilité des mouvements de terres excavées. Cet outil interactif et gratuit constitue une plateforme d'information et de mise en relation d'acteurs qui leur permettent d'émettre des offres et des demandes de terres réutilisables géo-localisées et caractérisées au sein d'un système d'échanges appelé «Bourse aux terres réutilisables».³⁹

De plus, Soltracing, créé par la société Hesus, en 2015 travaille également sur la traçabilité des terres de chantier en permettant une mise en relation des acteurs des chantiers «soldating» et une entreprise qui propose de la traçabilité des terres «soltracing. Il s'agit également d'une plateforme qui peut mettre en relation des chantiers émetteurs à des chantiers récepteurs, dans un périmètre maximum de 20km. Le but est donc de réduire

39 Site internet de gestion des terres excavées : <http://terrass.brgm.fr/>

le stockage dans les centres pour une réutilisation sur des chantiers de proximité. Les impacts sont multiples;

Réduction des émissions de CO2 pour une optimisation des flux de matières.

Réduction des coûts supportés par les sites excavateurs puisque le stockage en centre est réduit, et sur les coûts supportés par les sites remblayeurs qui pourra réemployer des terres excavées d'un chantier voisin.

Depuis janvier 2020, le BRGM et Soltracing se sont associés pour créer et renforcer un unique service de traçabilité des terres excavées. Cet outil numérique va permettre à la fois d'anticiper, d'optimiser et de contrôler les flux de terres excavées, en attestant de la traçabilité. Cet outil pourra être un réel support d'échange et de réutilisation.

Conclusion de la partie 3

En développant les différents axes dans cette troisième partie, (contextes environnementaux, les techniques d'extraction et l'optimisation des transports), la question du réemploi doit s'appuyer sur un grand nombre de paramètres pour réussir à aboutir à des propositions pertinentes, et adaptées à une économie locale. D'autres critères plus généraux doivent être également intégrés aux processus de revalorisation :

- le critère technique : s'assurer de la faisabilité des solutions de revalorisation, questionner les moyens nécessaires, les délais de mise en œuvre, la compatibilité des matières excavées.
- le critère réglementaire : contraintes liées à chaque filière de revalorisation. Comment réglementairement sortir du statut de déchet ?
- le critère sociétal : la perception du projet de réemploi par le public et les bénéficiaires, les retombées éventuelles pour l'économie locale.
- le critère environnemental : intégrer les critères de développement durable pour la filière de revalorisation.

Les prises de décisions devront se faire grâce à un positionnement affirmé face à la gestion des risques et devront intégrer l'ensemble des critères.

Quelques exemples d'opérations d'aménagements sont évoqués pour réemployer ces déblais mais ils nécessitent néanmoins une instruction au cas par cas en fonction du contexte de leur réalisation. Des opérations pourraient voir le jour : merlons paysagers, aplanissement de terrain, stabilisation d'anciennes carrières, l'utilisation en sous-couche routière, matériaux de construction....

Ces projets éventuels devraient il me semble être mis en relation direct avec des projets locaux futurs, d'urbanisation et de construction sur la métropole Toulousaine, dans le but de rechercher à la fois une cohérence de calendrier et un réemploi de proximité.

Cette dernière partie consiste à détailler des pistes de réemploi des terres de déblais et de trouver une cohérence revalorisation avec des projets qui pourraient se réaliser à proximité de la future ligne M3.

Effectivement, le développement du système de transport collectif va profiter à certains quartiers en les reconnectant à la métropole Toulousaine. Ce projet va être majeur et va amener des changements profonds avec une densité urbaine plus importante. Cette future ligne de métro va devenir des potentiels d'aménagements urbains qui pourrait absorber la terre d'excavation en tant que ressources. De plus, Toulouse est la ville de la brique et donc de la terre cuite. Elle dispose aujourd'hui d'un potentiel industriel qui pourrait valoriser d'importantes quantités de terres excavées, plus à moins à proximité du chantier de la ligne M3 et avec une adaptation de process à prévoir.

PARTIE 4 : Pistes de valorisation des terres de déblais de la future ligne M3, à Toulouse

1/ Transformation de la matière en matériaux de construction, interroger la filière de la terre cuite.

1.a/ L'histoire d'une brique

La brique foraine est historiquement la plus utilisée dans la région toulousaine. Elle est l'héritière de la brique romaine puisque les briques de terre cuite occupaient une place importante dans la construction à l'époque gallo-romaine. La brique foraine (brique rouge) est la plus résistante des briques en terre cuite. Elles subissent une cuisson plus homogène ce qui renforce leur solidité. La brique de terre cuite a réellement commencé à se répandre à partir du XVIIIe et XIXe siècles, en même temps que l'utilisation de la terre crue. Effectivement la brique de terre crue (brique verte) était utilisée avec ou sans amendement, comme la paille ou d'autres fibres végétales. Avant que la technique de l'adobe s'impose dans la construction en Haute-Garonne durant tout le XIXe siècle, plusieurs techniques telles que le pisé, la bauge, le torchis vont se succéder.

L'adobe était plutôt privilégié dans les constructions de maisons, de fermes, de pigeonniers. La terre cuite était employée dans les édifices plus grands. Après la deuxième guerre mondiale, le besoin de construire plus vite se fait sentir, et le recul de la terre crue est net, au profit de nouveaux matériaux de construction industriels, tels que le béton et l'acier. Les dimensions de la brique foraine sont de 42cm x 28 cm x 5 cm (longueur x largeur x épaisseur/hauteur). Ces dimensions ne sont pas figées, il existe des variantes, nommées sous les noms de violette, passe violette, mulot, tierce...

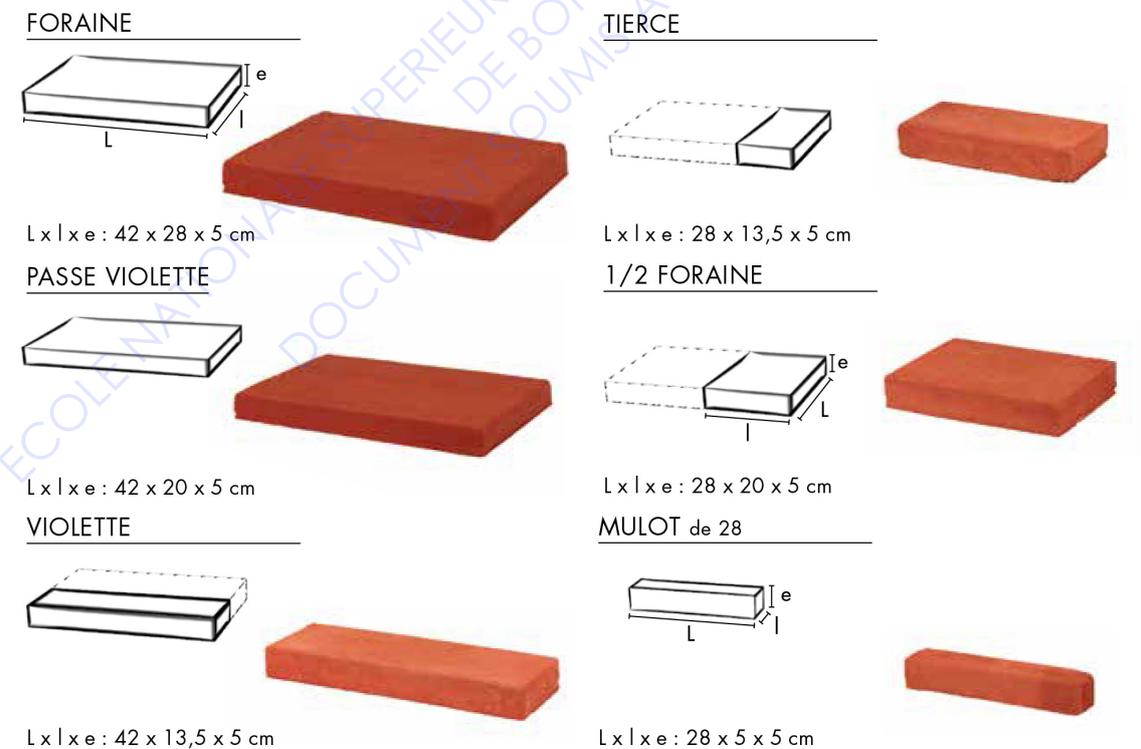


Fig 40, Extrait d'une documentation commerciale, présentant les briques foraines traditionnelles, Source : Terres cuites du Savès.

La brique de terre crue a hérité des dimensions de la brique cuite pour faciliter la combinaison des deux matériaux, le cuit et le cru. La brique cuite, plus résistante pouvait être employée pour des points de structure délicats et la brique de terre crue en remplissage. De plus, pour répondre à l'excès d'humidité, les bâtisseurs avaient recours à des matériaux plus résistants en complément de la terre crue. Pour l'édification de ces murs en adobe, le soubassement pouvait être formé en briques cuites, en moellons, en pierres ou en galets. Les bâtiments étaient alors recouverts d'une couverture de tuile en terre cuite, avec un débord d'au moins 30 cm, pouvant aller jusqu'à 1m. Les façades les plus exposées aux intempéries étaient le plus souvent réalisées en briques de terre cuite. C'est le principe «bonnes bottes, bon chapeau» et par moment «bon manteau».

La standardisation des formats a permis aussi un meilleur rendement (rapport dimensions/poids du matériau) et la création d'un certain automatisme chez les fabricants et les constructeurs.

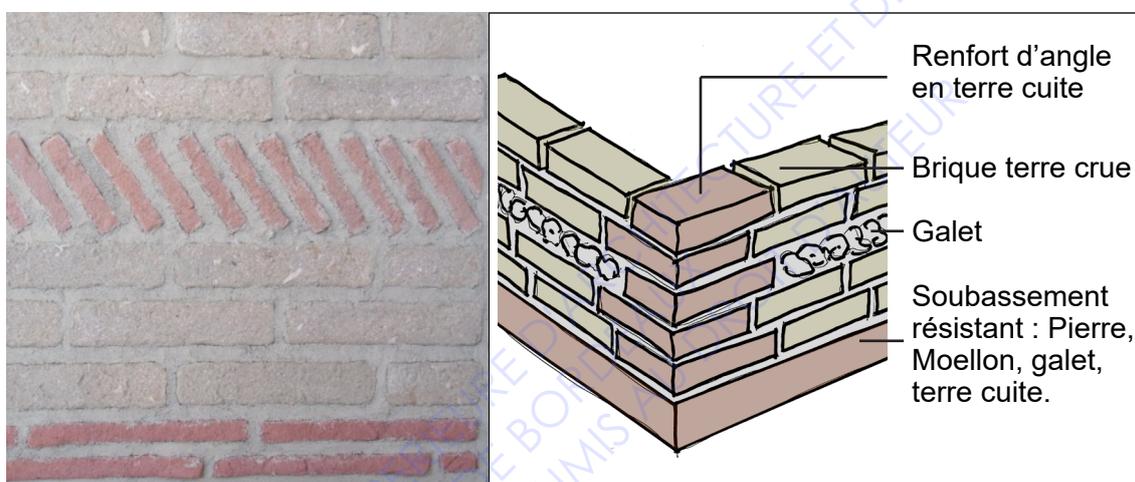


Fig 41, à gauche, réalisation mur avec des briques de terre crue et cuite. Source : Briqueterie Capelle.
Fig 42, à droite, croquis d'un dispositif constructif alternant briques crues, cuites et galets.

Les caractéristiques géologiques des sols du sud-ouest de la France ont permis durant des siècles aux constructeurs de disposer d'une matière première en permanence. L'utilisation de la brique foraine en terre cuite et de l'adobe fait partie de la culture constructive locale et d'un riche patrimoine architectural.

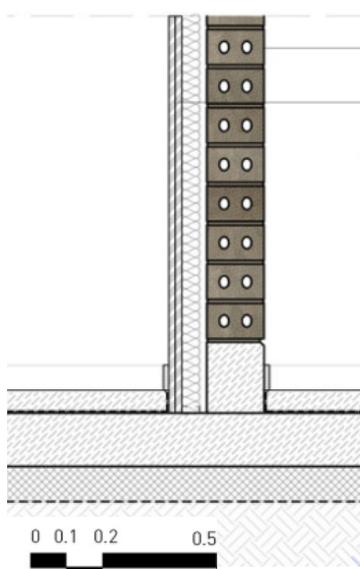
Pour questionner le réemploi des terres d'excavation, il faut à mon sens questionner la ressource locale, qui fait aussi appel aux savoirs-faire et à la culture constructive d'une région. Pour cela, j'ai souhaité questionner la filière de la terre cuite, très présente sur la métropole toulousaine, et me pencher sur les perspectives d'avenir concernant le réemploi des terres issues des travaux d'excavation.

L'atelier Philippe Madec, a expérimenté cette question de réappropriation d'un savoir-faire local, dans la construction du pôle culturel, à Cornebarrieu. Il a souhaité s'inspirer des traditions constructives locales pour donner un aspect «rural» à son bâtiment. Pour cela, il choisit des matériaux utilisés localement, la brique, le bois et met en œuvre des briques de terre crue structurelles pour constituer le mur périphérique de l'auditorium, visible depuis le hall d'accueil. Le centre scientifique et technique du bâtiment a délivré une ATEX autorisant la mise en œuvre de 11 000 briques, représentant une surface de 190m².

1.b/ Enquête sur les capacités à réemployer les process industriels de la terre cuite (voir annexes)

J'ai pu visiter la fabrique de céramiques J-Dubourg, localisée au Barp et interroger sa directrice Marie-France Dubourg puisqu'ils ont dû créer une brique crue pour une opération de logements collectifs, située à Biganos. L'architecte qui s'occupe de cette opération est Paul Emmanuel Loiret. Il a fait appel à cette entreprise familiale locale pour sa renommée et parce qu'elle se situe à proximité du futur chantier.

Il s'agit d'une brique extrudée, réalisée à partir de l'argile récupérée sur place, dans la carrière qu'exploite la briqueterie. Elle sera employée dans les murs de refend entre logements. Une contre-cloison acoustique sera ajoutée à la brique de terre crue.



1. Refend apparent entre logements - cloison terre : brique de terre crue extrudée, de terre locale / Dentée 1700 kg/m³ / Dim Brique : Ep.160 x h.100 x L.400 mm / Brique montées au mortier de terre locale / Comprend 2 trous oblongs de 35 mm x 60 mm max.

2. Refend apparent entre logements - contre cloison acoustique : vide entre cloison et paroi terre de 20mm / Laine minérale de 50mm sur ossature entièrement désolidarisée du mur en brique et des poteaux béton / parement composé de deux plaques de plâtre de 18 mm / finition peinture.

Fig 43, Détail technique mur de refend. Source : agence Joly & Loiret.

Fig 44, Photographies de la carrière et de l'atelier de céramiques Dubourg. Source : Grégoire Grange.



Il me semblait pertinent de les interroger pour comprendre s'il y avait des adaptations à prévoir dans les processus de fabrication en passant du travail de la terre cuite à la terre

40 Collectif d'architectes, USUS, site internet : <https://www.usus.archi/devisu/dubourg.html>

crue. Hormis une composition différente de la matière, le travail de la terre crue effectue les mêmes étapes que celle de la terre cuite.

1. Extraction de la terre issue des carrières
2. Préparation, dosage, mélange, broyage
3. Façonnage, moulage
4. Séchage plus ou moins long s'il s'agit d'un produit terre cuite ou terre crue
5. Cuisson (exclusivement pour la terre cuite)
6. Conditionnement, palettisation
7. Expédition

Le travail de la terre crue peut utiliser le même processus, les mêmes lignes que celles destinées à la terre cuite. Les briqueteries pourraient donc offrir une plus large gamme de produits, en intégrant la terre crue. Cependant, il est difficile pour certaines fabriques d'envisager l'emploi de d'autres terres puisqu'elles ne correspondent pas à celles avec lesquelles ils ont l'habitude de travailler. Selon certains avis, c'est trop incertain d'employer des terres qui risquent d'avoir des caractéristiques instables et variables pour au final réussir à sortir un matériau constant qui a l'obligation de correspondre parfaitement aux caractéristiques techniques attendues.

Dans le cas de la société J-Dubourg, il façonne la même argile pour la fabrication de produits céramiques, depuis plus de 70 ans. La connaissance parfaite de cette matière leur permet d'avoir la capacité d'innover. Leur produit phare est les «pavés» ou «cales» céramiques pour Bordeaux Métropole. Et selon eux «ce qui fait la qualité reconnue de nos produits, c'est d'abord la qualité de notre argile», ce qui incite par ailleurs plus à la production de produits de second œuvre, que de la simple brique de construction. Cette connaissance parfaite de leur matière première leur a permis de développer une gamme de produits importants : carrelages, dalles, briquettes, bétons d'argiles, des murs banchés en terre crues. Ils sont très ouverts à l'expérimentation mais en conservant leur matière première.

De plus, ils doivent reconduire leur arrêté d'exploitation de carrière puisqu'elle se termine en 2020. Cette reconduite engendre des frais importants. Il s'agit également d'une seconde raison pour laquelle ils préfèrent exploiter leur propre gisement que de récupérer des terres à l'extérieur, dont ils n'ont pas la certitude de bien pouvoir l'exploiter en réalisant de bons matériaux.

Il s'agit d'un positionnement d'une seule entreprise, certes très ancrée dans leur savoir-faire, réellement capable d'expérimenter, mais toujours en conservant leur matière première. C'est leur gage de qualité.

La région toulousaine étant une région à briques, nous pouvons espérer que certaines entreprises veuillent bien relever le défi, en retravaillant avec une terre sélectionnée issues des travaux d'excavations, permettant ainsi de limiter l'extraction d'argiles dans les carrières.

J'ai pour cela poursuivi mon travail d'enquête, en repérant les différentes entreprises et usines de terres cuites, à proximité directe avec la future ligne de métro, le but étant

toujours de favoriser les circuits courts et de réfléchir à un principe de réemploi, à proximité directe de son lieu d'extraction. Ainsi, j'ai repéré différentes structures plus ou moins importantes : l'usine Terreal, monier, la briqueterie de Nagen, la briqueterie Capelle, et les terres cuites du Saves....

Je leur ai adressé à tous un questionnaire pour évaluer l'intérêt et la capacité à développer cette filière. Quelques réponses me sont parvenues, exposant des points de vue très diversifiés.

Selon Denis Bazin, gérant de la briqueterie du Saves, l'activité de la terre crue dans le bâtiment est un marché à part entière. Cette briqueterie n'a pas la capacité de s'adapter ou d'ouvrir leur offre commerciale à ce secteur. Il donnent plusieurs raisons :

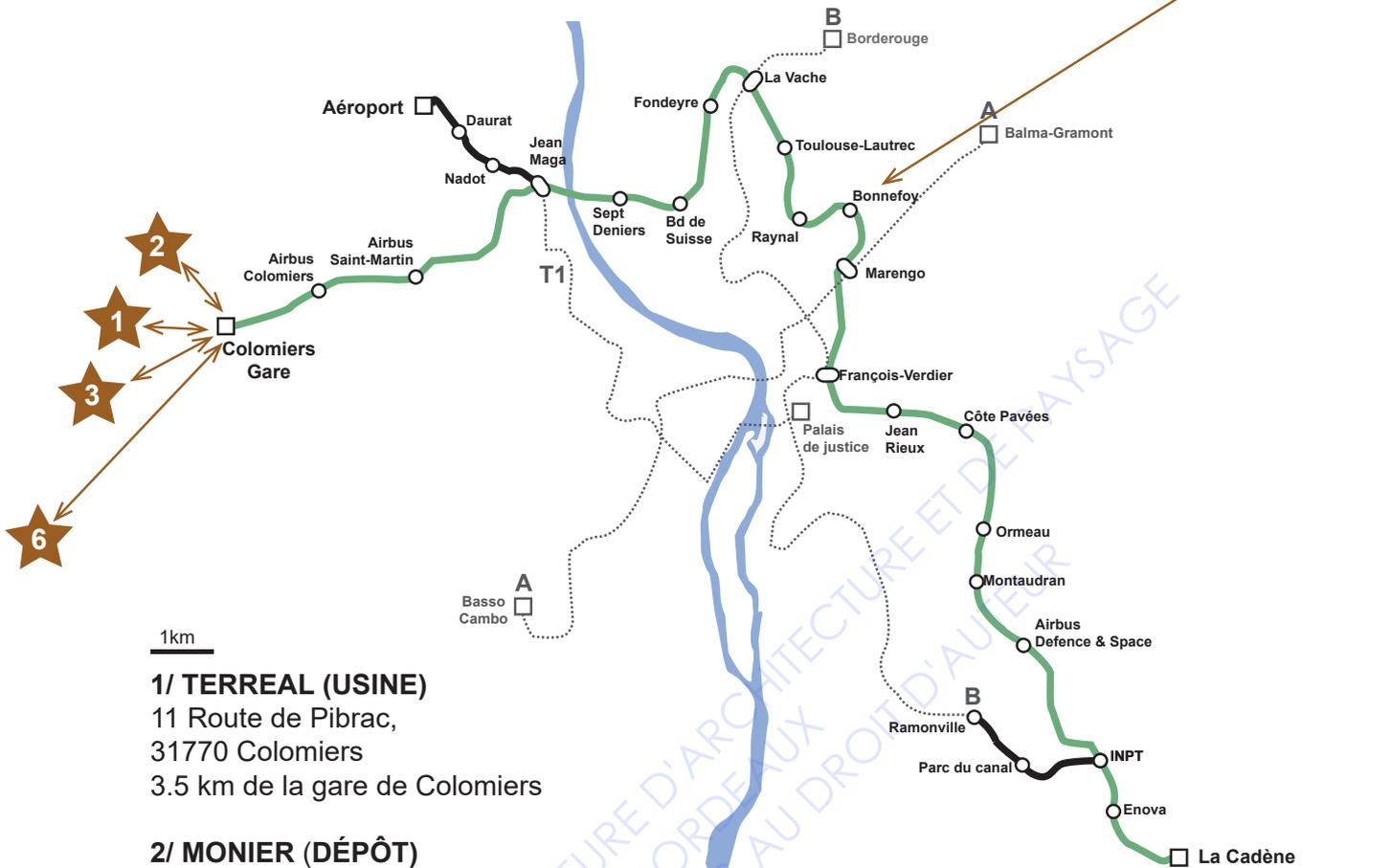
- Même si la terre crue est travaillée avec le même processus que la terre cuite, cette activité nécessite des lieux de stockage abrités très importants puisque la terre crue, en tant que produit fini ne peut être stockée à l'extérieur.

- Selon lui, c'est une industrie «de volumes» qui freine une certaine rentabilité de la matière. 1m³ de terre équivaut à 1m³ de briques pleines mais bien plus de briques creuses. La matière est en plus grande quantité dans les produits en terre crue, qui nécessite en plus de lourds investissements pour s'adapter à ses nouveaux process (construction de bâtiments, trouver du foncier pour le stockage, mécanisation...)

- Le manque de visibilité sur le réseau de commercialisation freine l'envie d'innover et d'expérimenter. Selon M Bazin, le marché de la terre crue est différent de celui de la terre cuite, il s'agit exclusivement d'un marché de la construction écologique, avec des acteurs bien spécifiques, avec qui, il ne traite pas actuellement. Personnellement, je trouve que sa vision ne prend pas en compte les évolutions futures, liées à la future réglementation environnementale 2020 qui vise justement une production de bâtiments bas carbone, associée à une performance énergétique renforcée. Cela signifie en effet que tous les matériaux et tous les équipements devront entrer dans cette logique décarbonée. La construction employant la terre crue s'emploie de plus en plus, et sort peu à peu de son marché de niche, exclusivement destiné à la construction écologique. Je pense que cette réticence provient plus d'une crainte de fragiliser la société, et d'une préférence d'attendre que le marché se développe que d'innover.

Contrairement, à ce point de vue, la briqueterie de Nagen a montré une envie de travailler davantage la terre crue par rapport à la terre cuite. L'adaptation à de nouveaux processus de fabrication ne semble pas les effrayer, et la possibilité d'expérimenter une terre issue des travaux d'excavation du métro les intéressent fortement. Il s'agit d'une petite structure qui extrait 800 tonnes de terre chaque année. Cette réticence est moins présente puisqu'ils ont amorcé une production de briques et d'enduits à base de terres crues qui les poussent aussi à vouloir développer ce marché.

1.c/ Projection sur la métropole toulousaine



1/ TERREAL (USINE)

11 Route de Pibrac,
31770 Colomiers
3.5 km de la gare de Colomiers

2/ MONIER (DÉPÔT)

31 Chemin de la Salvetat,
31770 Colomiers
4.5 km de la gare de Colomiers

3/ EDILIANS (USINE)

Lieu-Dit Mulatie,
31490 Lèguevin
6 km de la gare de Colomiers

4/ BRIQUETERIE DE NAGEN (USINE)

32 Avenue Pierre-Paul Riquet,
31590 Saint-Marcel-Paulel
21 km de la station Bonnefoy

5/ BRIQUETERIE CAPELLE SARL (USINE)

10 Route de Labruyère,
31190 Grépiac
23 km de la station La Cadène

6/ TERRES CUITES DU SAVES (USINE)

Le Couzin,
31470 Empeaux
30 km de la gare de Colomiers



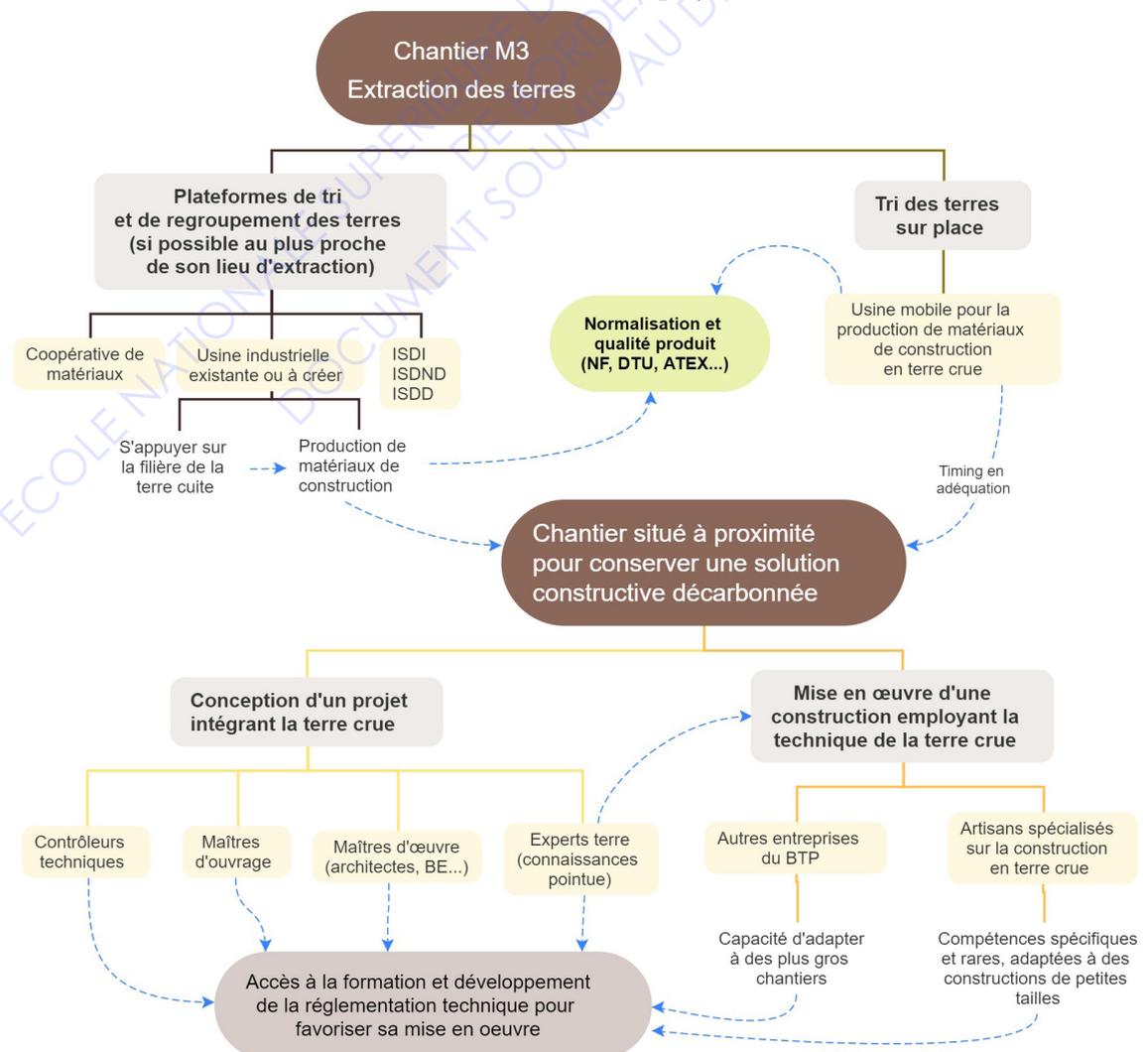
Fig 45, Carte montrant les distances entre des briqueteries en activités et le chantier du M3.

J'ai malheureusement obtenu uniquement trois avis de briqueteries locales, de taille moyenne. J'aurais souhaité obtenir des retours d'acteurs plus importants, tels que Ter-réal, Edilians, Wienerberger, Monier. Mes mails sont malheureusement restés sans réponse.

Pourtant, ce type de société a une réelle capacité d'investir dans la R&D pour l'adaptation de leur process industriel. Leur proximité avec la gare de Colomiers leur permettrait d'absorber d'importantes quantités de m3 de terres de déblais, et de devenir de vrais acteurs d'une filière de réemploi. Cependant le développement d'une filière de production de nouveaux matériaux en terre crue doit répondre avant tout à une demande explicite dans le domaine du BTP. L'offre doit être présente pour que les industriels puissent développer de nouvelles filières. C'est le principe de l'offre et de la demande. En même temps, la prescription de nouveaux systèmes constructifs peut s'effectuer seulement à partir d'une offre de matériaux établie et normalisée. C'est donc une réelle complexité pour trouver le parfait équilibre.

D'une manière générale, le réemploi des terres de déblais dans la construction de bâtiments doit être intégré à un processus global de projet, de la phase conception à la phase chantier, avec un travail collaboratif de l'ensemble des acteurs du projet pour définir les bons choix constructifs selon diverses paramètres (contexte, ressources en terre, compétences et savoirs-faire des entreprises...).

Fig 46, Schéma récapitulatif représentant les étapes de transformations des matières excavées en matériaux de construction et sa mise en œuvre dans un projet de construction.



2/ La terre crue, un matériau au service du développement urbain

2.a/ L'articulation du développement urbain et du système de transport collectif.

Cette future ligne de métro va favoriser à l'échelle de la métropole la mobilité d'une manière générale. Cependant, il est parfois difficile d'analyser les effets des transports sur les modes d'urbanisation car on évalue le plus souvent les transports surtout en fonction de leur taux d'utilisation, leur fréquentation mais pas sa contribution à aménager le territoire. Pourtant, associer la densité urbaine aux transports collectifs, autour des futures stations peut :

- Promouvoir les économies d'énergies, et réduire les rejets de gaz à effet de serre liés aux transports, en favorisant l'usage des modes de déplacements alternatifs.
- Valoriser au mieux les dépenses publiques liées au développement des systèmes de transports.
- Lutter contre l'étalement urbain.
- Développer des formes de développement urbain plus durables, intégrant notamment le réemploi des terres d'excavation de cette future ligne de métro.

Le but est donc dans un premier de repérer un potentiel d'aménagements urbains, au sein de périmètres stratégiques, définis par cette future ligne de métro et dans un second temps, de réfléchir à des moyens d'intégrer un potentiel de réemploi des terres sur ces territoires préalablement définis.

Lille Métropole a justement porté une réflexion sur la capacité d'articuler le développement urbain sur le système de transport collectif. Effectivement, la démarche des DIVAT ⁴¹(Disque de Valorisation des Axes de Transports) vise à tirer parti des axes de transports collectifs existants. Le Divat est un disque de 500 mètres de rayon centré sur les stations de transports métro, tramway, train... Il s'agit de promouvoir "une vie plus intense", plus de densité autour des stations de transports collectifs lourds.

L'acte de recenser, repérer des programmes immobiliers qui vont se développer et modifier l'espace urbain à proximité même des futures stations, peuvent apporter une réponse à la réutilisation des terres d'excavation à proximité même de son lieu d'extraction, seulement si:

- la phase d'excavation et de réemploi se situent dans une temporalité similaire.
- les terres sont conformes à un réemploi à proximité même, sans délocaliser la terre pour un retraitement, ou un tri.
- Présence de foncier pour stocker les terres de manière temporaire pour effectuer des tris.
- Une prise de conscience à travers les politiques de la ville qui pourraient imposer un réemploi, un pourcentage minimum, au travers de la création de programmes immobiliers ou d'aménagements du territoire.

La troisième ligne de métro de Toulouse a pour vocation de relier tous les pôles d'activités économiques de l'agglomération. Il s'agit d'une « artère économique » qui va reconnecter la métropole d'Est en Ouest, rapprochant ainsi les deux principaux pôles de

41 Syndicat mixte du SCOT de Lille Métropole, site internet : <http://www.scot-lille-metropole.org/>

2.b/ L'intégration du matériau terre dans la conception et la réalisation d'un projet architectural⁴²

Les architectes, les maîtres d'œuvre sont des prescripteurs de nouvelles techniques constructives mais restent malgré tout dépendant des bonnes volontés de son maître d'ouvrage pour lequel ils doivent concevoir un projet. L'architecte peut avoir les plus belles volontés en valorisant la place de la terre dans son projet et de mettre en application la technique la plus adaptée. Malgré tout, le maître d'ouvrage reste le moteur essentiel, celui qu'il faut convaincre, celui qui porte ou non des choix innovateurs, celui qui s'engage et qui choisit de lancer des opérations de constructions plus ou moins innovantes. Le maître d'ouvrage peut ainsi vouloir transmettre un signal fort et donc pousser, soutenir les architectes dans leur travail de conception et de prescription.

Les promoteurs immobiliers, les aménageurs détiennent ce pouvoir de construire différemment la ville, en y intégrant ou non une volonté d'innover. Effectivement, les expériences pilotes, l'envie de tester de nouvelles méthodes, d'innover peuvent s'inviter dans la commande publique et privée. Le permis à expérimenter a pour objectif de "faciliter la réalisation des projets de constructions et favoriser l'innovation" (article 49 de la loi pour un Etat au service d'une société de confiance). Le gouvernement permet ainsi de déroger à certaines règles d'urbanisme pour autoriser le maître d'ouvrage à mettre en œuvre des solutions techniques ou architecturales innovantes, si elles sont justifiées. Cette loi permet de sortir du cadre et de déroger de manière légale.

D'autres acteurs sont aussi importants : les bureaux de contrôle, les industriels de la construction, les entreprises du BTP...

La volonté de construire différemment, d'innover, doit s'accompagner par la mise sur le marché de nouvelles solutions techniques qui permettent la mise en œuvre des concepts de l'architecte. Les industriels de la construction doivent être force de proposition et s'adapter à l'évolution du marché, aux envies des maîtres d'ouvrage et maître d'œuvre. Ces innovations constructives doivent également s'accompagner par une évolution des compétences des entreprises du BTP, capable de se former, s'adapter, quitte à faire appel à des experts. Chaque acteur du BTP a un rôle à jouer dans l'envie de construire différemment, d'intégrer la terre crue dans leur quotidien. L'architecte, en tant que prescripteur, le maître d'ouvrage en tant que porteur, initiateur du projet, les bureaux de contrôle dans l'acte de faire évaluer ou d'adapter les cadres normatifs, et les entreprises BTP dans la volonté de faire évaluer leur savoir-faire constructif...

Le processus de conception et de réalisation d'un projet terre doit être le plus optimisé possible en y intégrant des acteurs sensibilisés à cette matière et doit faire appel à un travail collaboratif.

42 *Construire en terres d'excavation, un enjeu pour la ville durable*, thèse Hugo Gasnier, juin 2019.

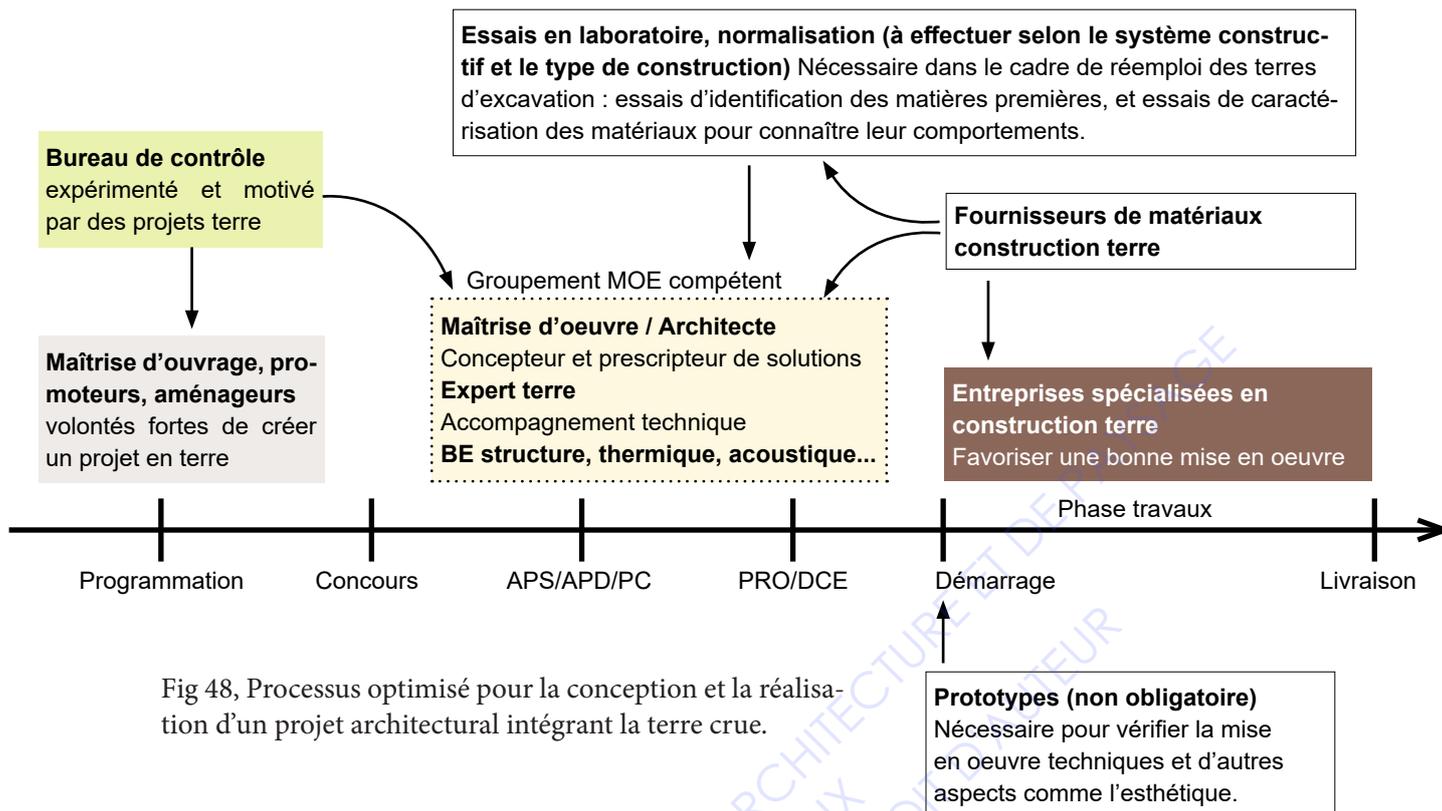


Fig 48, Processus optimisé pour la conception et la réalisation d'un projet architectural intégrant la terre crue.

2.c/ L'industrialisation de la filière terre au service de l'innovation technique

Depuis quelques années, les industriels tels que Saint-Gobain et des start-up se lancent dans des recherches pour réemployer les terres d'excavation dans des systèmes constructifs. Pour développer ces innovations, certains s'appuient sur des projets pilotes, démonstrateurs. Le but n'est pas de remplacer les techniques ancestrales de la terre crue mais plutôt d'adapter certains procédés aux techniques et aux mises en œuvre actuelles de la construction, tout en respectant les enjeux environnementaux actuels. Innover dans les techniques constructives est aujourd'hui essentiel pour proposer une architecture plus durable, et démocratiser des savoir-faire.

La technique de la terre projetée dans une ossature bois, Saint Gobain et Norper⁴³

Le groupe St Gobain Distribution Bâtiment France et l'entreprise Norper, ont mis au point un système constructif intégrant la terre d'excavation. Ils ont porté une réflexion sur la capacité à développer une économie circulaire optimisant ainsi la logistique des chantiers, en employant des matériaux en place ou à proximité.

Pour Saint-Gobain, proposer des solutions techniques viables économiquement, avec une mise en œuvre facilitée permet d'ouvrir les champs des possibles, et de motiver les acteurs de construction à les employer. La terre crue commence à s'ouvrir sur de

43 *Saint Gobain réinvente la terre*, site internet : <https://www.saint-gobain.com/fr/saint-gobain-reinvente-la-terre>

nouvelles cultures constructives, en s'affranchissant des savoir-faire ancestraux, auparavant destinée exclusivement au secteur de l'éco-construction. Grâce à ces avancées, l'utilisation de la terre crue va se démocratiser, puisque ces nouvelles techniques vont devenir accessibles, et vont sortir ainsi d'une niche constructive.

La solution St Gobain et Norper propose un béton naturel projeté dans une ossature bois, adapté à la RE 2020, composé de terre d'excavation, de déchets de carrière, et fibres naturelles (chanvre, cosses de riz de camargue...), sans liant ciment. Ce procédé comporte plusieurs étapes :

- La préparation de la terre : les différents composants doivent être criblée, calibrée et mélangés
- La fabrication du béton naturel de terre : Dans une cuve de malaxage, il s'agit de créer la formulation du béton naturel en y incorporant les différents composants, de l'eau, des liants sans ciment et de les malaxer.
- La projection du béton naturel de terre : mise en place d'une pompe à vis fixée sur la cuve de malaxage, de la lance à projeter et de la buse. La projection s'effectue dans une structure bois avec un contreventement en OSB et une grille métallique type treillis soudé, positionnée à mi-cadre. La projection doit s'effectuer en deux phases successives avec un délai de recouvrement de 30 minutes entre chaque couche. Cette technique est plus rapide, et le temps de séchage facilité par rapport à la technique du pisé qui peut poser de nombreuses contraintes de mise en œuvre et de coûts global.

Cette technique facilite également les aspects normatifs de la construction puisque les cadres bois effectuent le rôle structurel et la terre est simplement un élément de remplissage qui va renforcer les éléments porteurs et apporter de nombreuses qualités, telles qu'une inertie thermique importante, une hydro-régulation performante, et une isolation acoustique efficace. L'emploi de cette technique propose un faible impact carbone, une notion qui va largement devoir s'intégrer à l'architecture, avec l'arrivée de la RE 2020.

Fig 49, Détail constructif en plan, principe mur ossature bois, avec remplissage terre, ITE complexe fibre de bois et finition extérieure en enduit à la chaux. Réflexion sur un système constructif, pour le concours St-Gobain. (voir annexes)

1. Soubassement de protection couloir (Ht=130cm)
2. Enduit intérieur terre crue posé sur nergalto
3. Grille métallique type treillis soudé, positionnée à mi-cadre
4. Remplissage par projection de terre crue
5. Montant bois de l'ossature bois
6. Voile travaillant / contreventement
7. Complexe ITE panneaux rigide de fibre de bois (EP.200mm), collés et vissés avec des chevilles spécifiques sur l'ossature bois
8. Aarmature fibre de verre
9. Enduit extérieur de finition à la chaux

0 10 50cm

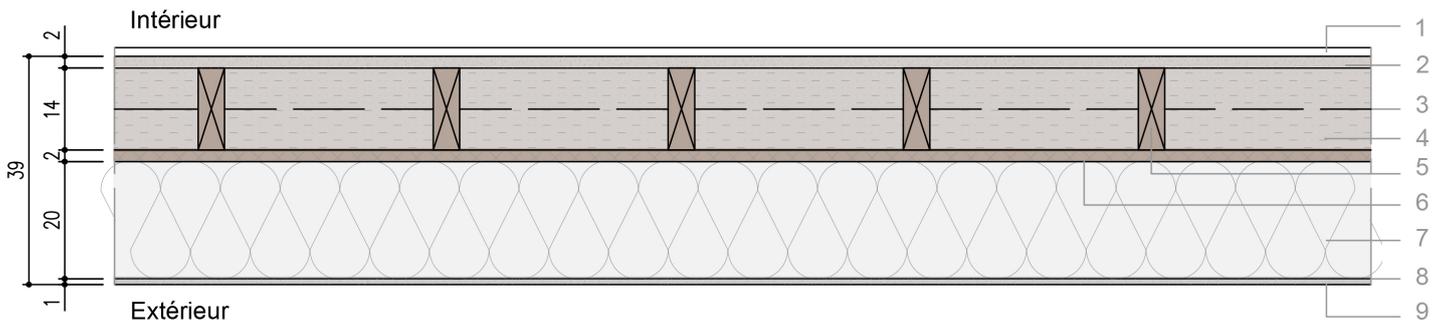




Fig 50, photographies de la mise en œuvre de la solution terre St Gobain/Norper. <https://www.lemoniteur.fr/article/la-terre-crue-se-projette-dans-l-avenir.2103304>

Source : Joseph Melin.

Étape 1 : La terre est calibrée dans une cribleuse.

Étape 2 : elle est préparée dans une cuve de malaxage.

Étape 3 : elle est projetée dans l'ossature bois par une pompe à vis.

Conception de bétons structurels en terre coulée , Materr'up⁴⁴

Il s'agit d'une start-up industrielle spécialisée dans la conception de bétons structurels à partir de ciment d'argile, dans le but de décarboner la construction. Ils proposent deux types de bétons prêt à l'emploi :

- Un béton d'argile autoplaçant à base d'argile de carrière
- Un béton de site autoplaçant issus de terres excavées de chantier. (équivalent à un béton de classe C25/30)

A la différence de la solution technique de St Gobain, Materr'up propose une solution constructive structurelle, avec une mise en œuvre identique au béton «classique», à base de ciment Portland. Le liant Materr'UP est combiné aux terres issues de l'excavation, après une étude de faisabilité et une analyse poussée de la nature des terres. Cette technique, une fois développée dans son ensemble offrira un matériau nouveau mais conservera une mise en œuvre déjà acquise par les entreprises du BTP, celle de la technique banchée ou préfabriquée.

Une première usine pilote doit voir le jour en 2021 pour faire basculer ce procédé innovant à l'étape semi-industrielle. Pour cela, la start-up vient de débloquer un financement de 3 millions d'euros. Un autre objectif est d'obtenir la certification CSTB pour attester de la performance et de la qualité de son produit pour pouvoir envisager une mise sur le marché.

Cependant, cette solution constructive nécessite d'ajouter des adjuvants pour la stabilisation, et améliorer la résistance à la compression, à l'érosion et à la traction. Par moment, ces adjuvants réduisent la capacité à recycler le mur en terre, et dégradent l'aspect décarboné de la construction, puisqu'il est nécessaire d'employer des engins énergivores pour le détruire et concasser le mur, surtout si cette adjuvant est du ciment.

Fiche technique :

Masse volumique sèche : 2300 kg/m³

Classe de résistance C12/15 à C25/30

Classe structurale S1 à S5

Classe d'exposition XC4

Toutes ces innovations se butent à des freins qui restent à lever pour développer des filières à une échelle industrielle, dans le but de démocratiser ces techniques de construction et les rendre accessibles. Les réglementations restent pour le moment inadaptées, avec une absence de cadres réglementaires et normatifs pour ce principe constructif. Les bureaux de contrôle exigent très souvent des mises en œuvre conformes aux DTU ou avis technique. La multiplication des exigences et certifications nécessaire pour l'emploi du solution constructive pèse évidemment sur les entreprises, les prescripteurs et freinent considérablement l'expérimentation et l'innovation dans le domaine de la construction.

44 Start'up, Materr'up, solutions bas carbone, site internet : <https://materrup.com/>

2.d/ Estimation et comparaison de la consommation d'énergie grise, selon les techniques de construction et les volumes de terre employée. Exemple d'un bâtiment collectifs de 16 logements, type R+3

Aujourd'hui, il est assez facile sur le papier de réaliser des bâtiments faiblement consommateurs d'énergie, c'est-à-dire de réduire au maximum le besoin en énergie d'exploitation. Les différents exemples d'architectures présentés dans la première partie du mémoire montrent bien que la terre crue, au travers de différentes méthodes constructives, peut répondre aux exigences de la RT2012 et peut également supplanter d'autres techniques constructives, notamment dans l'amélioration du confort d'été et la gestion hygrothermique.

On sait donc construire aujourd'hui des bâtiments économes en énergie, confortables, et sains. En ajoutant des systèmes de production d'énergie intégrés, il est possible également de créer des bâtiments à énergie positive, c'est-à-dire qu'ils produisent plus d'énergie, qu'ils n'en consomment. Ces principes restent malgré tout à être généralisés dans l'ensemble de la construction neuve mais aussi dans la réhabilitation.

Cependant, les consommations nécessaires à la fabrication, à l'entretien, à la maintenance, et à la déconstruction des bâtiments questionnent et paraissent aujourd'hui une notion extrêmement importante à prendre en compte dans la manière de concevoir les bâtiments.

Cette analyse permet de comparer et de déterminer si l'emploi de la terre crue peut améliorer la consommation d'énergie grise liée. L'énergie grise d'un bâtiment, selon l'ICEB¹, est «la somme des énergies grises des matériaux et équipements qui le composent, à laquelle on ajoute :

- L'énergie nécessaire au déplacement de ses matériaux et équipements entre l'usine et le chantier.
- La consommation d'énergie du chantier complémentaire à celle déjà intégrée dans l'énergie grise des composants et équipements (base vie, énergie de mise en œuvre, transport des personnes),
- Les énergies grises liées au renouvellement des matériaux et équipements qui ont une durée de vie inférieure à celle du bâtiment,
- L'énergie nécessaire à la déconstruction de l'ouvrage.»

L'énergie grise dépensée dans la construction devient un enjeu aussi important que de diminuer la consommation d'énergie à l'utilisation.

Cette estimation s'effectue donc sur un bâtiment de logements collectifs de type R+3, composé de 16 appartements. Le calcul et la comparaison de la quantité d'énergie grise, s'effectuera exclusivement sur l'enveloppe de la façade et les murs de refends. La plâtrerie, l'isolation et le reste des lots ne rentrent pas dans cette estimation. La méthode de calcul de l'énergie grise s'appuie sur les préconisations de l'ADEME (agence de la transition environnementale). Pour cela, il faut prendre en compte :

- La masse volumique apparente, en kg/m³
- La valeur de l'énergie grise, en kWh/kg ou kWh/m³ et la durée de vie de référence (DVR). Ces données sont présentes sur la base INIES² ou KBOB³.

45 Institut pour la Conception Eco-responsable du Bâti, <http://www.asso-iceb.org/>

46 Les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment, <https://www.inies.fr/accueil/>

47 Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des

Cette comparaison s'effectuera sur quatre types de matériaux : le béton armé, le pisé, la brique terre crue et la terre coulée. La technique de la terre projetée dans une ossature bois, développée par St Gobain et Norper ne pourra pas être étudiée, puisque je n'ai pas pu obtenir des données concernant l'énergie grise. Malgré tout, ce principe constructif aurait très certainement obtenu les résultats les moins convaincants, par rapport aux autres employant la terre crue. Effectivement, les liants mélangés à la terre crue peuvent renforcer les propriétés mécaniques et physiques. Cependant, l'ajout de liants minéraux, d'origine inorganique, dégrade sérieusement le bilan carbone du matériau. Avoir recours au ciment et à la chaux pour stabiliser la terre crue pose des questions sur le caractère «écologique» puisque l'empreinte carbone de ces liants minéraux reste élevée.

Dans un premier temps, j'ai effectué une recherche de données techniques sur les quatre matériaux employés.

Le béton armé :

Masse volumique : 2500 kg/m³

La valeur de l'énergie grise : 1850 kWh/m³

Durée de vie : 100 ans

Le pisé :

Masse volumique : 2000 kg/m³

La valeur de l'énergie grise : 100 kWh/m³

Durée de vie : 100 ans

La brique de terre crue :

Masse volumique : 1900 kg/m³

La valeur de l'énergie grise : 120 kWh/m³

Durée de vie : 100 ans

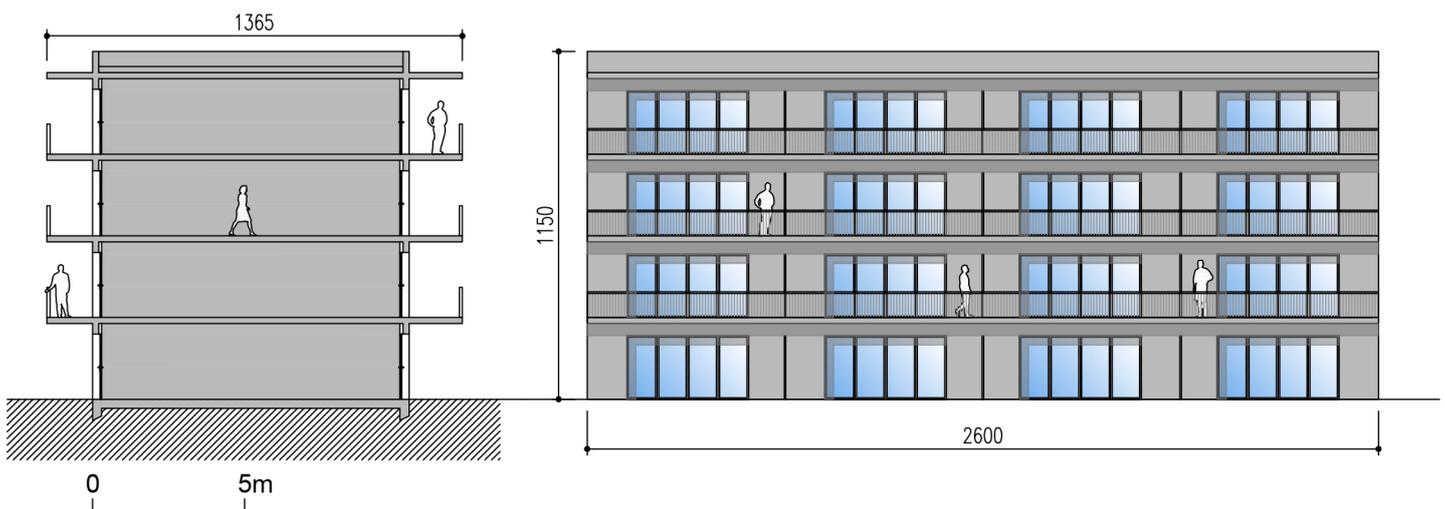
La terre coulée (source Materr'up) :

Masse volumique : 2 300 kg/m³

La valeur de l'énergie grise : 370 kWh/m³

Durée de vie : 100 ans

Scénario 1, logement collectif R+3, version tout béton armé (Fig 51)



Quantité de béton armé :Mur périphérique grand côté : 330 m³Mur périphérique petit côté : 240 m³Dalles + balcons : 355 m³Murs de refend : 240m³**Total : 1165 m³**Calcul de l'énergie grise par m³ de l'élément béton armé : $2500\text{kg/m}^3 \times 1850\text{kWh/m}^3 = 4\,625\,000 \text{ kWh/m}^3$ soit 4625 MWh/m³**Calcul de l'énergie grise par m³ de l'élément et par an :** $4625 \text{ MWh/m}^3 / 100 = 46.25 \text{ MWh/m}^3$ par an**46.25 MWh/m³ par an x 1165 = 53 880 MWh par an****Scénario 2. logement collectif R+3, version béton armé / BTC (Fig 52)**

Le bâtiment se compose de dalles, et de poteaux poutres en béton armé et remplissage briques de terres crues non structurales.

**Quantité de béton armé :**Mur périphérique grand côté, poteaux poutres : 45 m³Mur périphérique petit côté poteaux poutres : 40 m³Dalles + balcons : 71m³ x 5 = 355 m³**Total : 440 m³****Quantité de BTC :**Murs de refend : 20m³ x 12 = 240 m³Mur périphérique grand côté remplissage : 285 m³Mur périphérique petit côté remplissage : 200 m³**Total : 725 m³**Calcul de l'énergie grise par m³ du béton armé :**46.25 MWh/m³ par an x 440 = 20 350 MWh par an**

Calcul de l'énergie grise par m³ de la brique de terre crue :
 $1900\text{kg/m}^3 \times 120\text{kWh/m}^3 = 228\,000\text{ kWh/m}^3$ soit 228 MWh/m^3

Calcul de l'énergie grise par m³ de l'élément et par an :

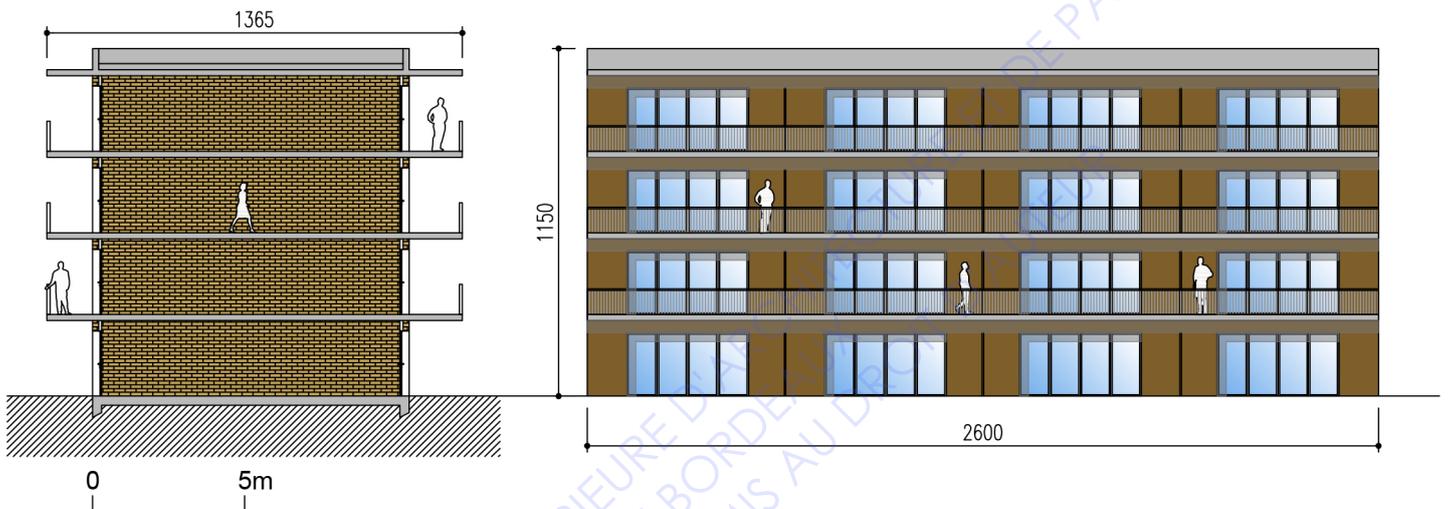
$228\text{ MWh/m}^3 / 100 = 2.28\text{ MWh/m}^3$ par an

2.28 MWh/m^3 par an $\times 725 = 1653\text{ MWh}$ par an.

Soit au total $22\,0003\text{ MWh}$ par an, et une réduction de 59% par rapport au scénario n°1

Scénario 3, logement collectif R+3, version béton armé / Pisé / BTC (Fig 53)

Le bâtiment se compose de dalles en béton armé et de murs extérieurs en pisé, et de murs de refends en BTC.



Quantité de béton armé :

Mur périphérique grand côté : 46 m^3

Mur périphérique petit côté : 20 m^3

Dalles + balcons : $71\text{ m}^3 \times 5 = 355\text{ m}^3$

Total : 421 m^3

Quantité de BTC :

Murs de refend : $20\text{ m}^3 \times 12 = 240\text{ m}^3$

Total : 240 m^3

Quantité de Pisé :

Mur périphérique grand côté : 284 m^3

Mur périphérique petit côté : 220 m^3

Total : 504 m^3

Calcul de l'énergie grise par m³ de l'élément béton armé :

46.25 MWh/m^3 par an $\times 421 = 19\,471\text{ MWh}$ par an

Calcul de l'énergie grise par m³ de la BTC :

2.28 MWh/m^3 par an $\times 240 = 547\text{ MWh}$ par an.

Calcul de l'énergie grise par m³ du pisé :

$2000\text{kg/m}^3 \times 100\text{kWh/m}^3 = 200\,000\text{ kWh/m}^3$ soit 200 MWh/m^3

Calcul de l'énergie grise par m³ de l'élément et par an :

$200\text{ MWh/m}^3 / 100 = 2\text{ MWh/m}^3$ par an

2 MWh/m^3 par an x $504 = 1008\text{ MWh}$ par an.

Soit au total $21\,026\text{ MWh}$ par an, et une réduction de 61% par rapport au scénario n°1

Scénario 4, logement collectif R+3, version béton armé / Pisé remplacé par la solution Materr'up avec la terre coulée / BTC (Fig 54)

Le bâtiment se compose de dalles en béton armé et de murs extérieurs en terre coulée, et de murs de refends en BTC.

Calcul de l'énergie grise par m³ de la terre coulée :

$2300\text{kg/m}^3 \times 370\text{kWh/m}^3 = 851\,000\text{ kWh/m}^3$ soit 851 MWh/m^3

Calcul de l'énergie grise par m³ de l'élément et par an :

$851\text{ MWh/m}^3 / 100 = 8.51\text{ MWh/m}^3$ par an

8.51 MWh/m^3 par an x $504 = 4290\text{ MWh}$ par an.

Soit au total $24\,770\text{ MWh}$ par an, et une augmentation de 18% par rapport au scénario n°3

Cette simulation permet de démontrer que l'emploi des matériaux en terre crue a un intérêt en terme de consommation de volume de terres issues des travaux d'excavation mais aussi en terme d'économie d'énergie grise nécessaire à la construction et à l'impact sur la durée du bâtiment. Cette donnée est très importante et devra s'appliquer au travers de la RE 2020. Cette future réglementation sera la continuité de la RT 2012 sur l'aspect énergétique. Cependant, la prise en compte des émissions de gaz à effet de serre et l'empreinte carbone sur le cycle de vie du bâtiment deviendra également une question centrale. La terre crue présente une vraie solution pour réduire la quantité d'énergie grise dans le secteur du bâtiment, en plus de ces qualités physico-chimiques.

3/ Le réemploi des terres d'excavation en support fertile, pour la végétalisation de la métropole toulousaine

3.a/ le projet urbain toulousain, ville rose/ville verte⁴⁸

En mars 2019, Jean-Luc Moudenc et Annette Laigneau, ont présenté le second volet d'un plan guide présentant les orientations pour la métropole toulousaine.

Jusqu'à présent, le développement de la ville de Toulouse s'est présenté comme un étalement urbain et un grignotage progressif des terres agricoles ou maraîchères, plaines et coteaux... Peu à peu la nature s'est retirée de la ville. Une des orientations de ce plan guide est de retrouver un équilibre écologique et une qualité de vie au cœur de la métropole, en promouvant une ville verte. Pour cela, un travail va à la fois s'effectuer à la grande et à la plus petite échelle, à travers la création de cinq grands parcs toulousains, et la multiplication de jardins de proximité.

Ces cinq grands parcs se développeront autour des 5 cours d'eau qui traversent la ville de Toulouse (l'Hers, la Garonne, le Touch, Les canaux, les coteaux de Margelle). Le souhait est de mettre en valeur ces grandes artères naturelles, qui irriguent la ville. De plus, un grand nombre d'études scientifiques ont montré l'importance de développer en milieu urbain des espaces verts pour à la fois permettre la filtration et la réduction des polluants de l'air, pour limiter les eaux de ruissellement et éviter l'imperméabilité des sols, et réduire les effets d'îlot de chaleur, en créant des zones d'ombres et par l'évapotranspiration des végétaux. Le but de ces parcs est également de développer des corridors écologiques et développer une biodiversité de la faune et de la flore, en milieu urbain.

La demande en terres végétales est croissante et la pression sur cette ressource augmente sans cesse. Certaines entreprises, comme Valorhiz, ECT travaillent justement sur la possibilité de réutiliser sur place ou dans un espace proche ces terres inertes, qualifiées de déchets et issus de chantiers d'excavation. Les intérêts sont multiples :

- Eviter les transports vers des filières de stockage, pour réduire les émissions de CO², sachant que le fret est en majeure partie responsable des émissions.
- Répondre à la baisse des capacités de stockage dans les ISDI existantes, et économiser les volumes de vide de fouille (espace encore disponible pour le stockage des déchets), en limitant les volumes de déchets inertes en employant une filière de valorisation.
- Empêcher l'ouverture de nouvelles installations de stockage de déchets inertes.
- Valoriser économiquement des matériaux considérés comme déchets, en créant des opportunités commerciales, et en développant une nouvelle filière de réemploi. La transformation de ces déchets inertes en substrats fertiles pourrait offrir des opportunités d'économie circulaire, avec des emplois à la clef.
- Réduire l'importation de terre végétale pour reconstituer un sol fertile, en employant et en transformant in situ les terres inertes en substrat fertile.

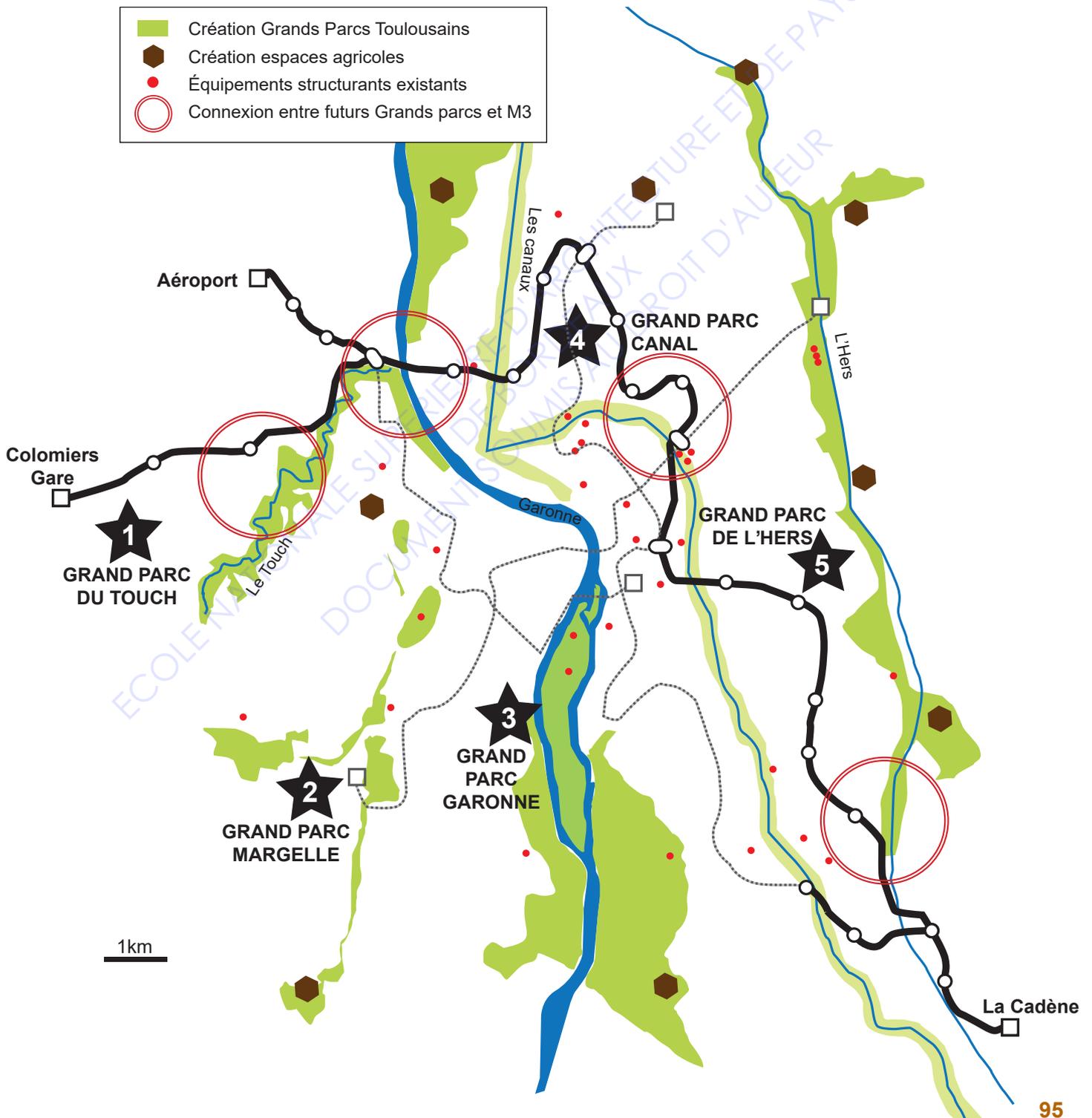
La métropole toulousaine prévoit à travers chaque parc (sauf celui de Margelle) des connexions avec cette future ligne de métro, ce qui peut offrir un réel potentiel de reva-

48 *Plan guide : Toulouse ville rose, ville verte*, AUAT, publié le 12 avril 2019, site internet : <https://www.aa-toulouse.org>

lorisation de ces terres inertes, à proximité même des sites d'excavation.
 Le besoin de sol fertile en milieu urbain et la valorisation des terres inertes du métro sont deux problématiques environnementales qui peuvent se neutraliser ensemble.
 Malgré tout, cette solution nécessite du foncier disponible à proximité des sites d'excavation, pour développer des plateformes de production de substrat fertile. Il faudrait à la fois que les collectivités mettent à disposition des espaces pour développer et valoriser ces matières inertes et communiquer auprès des citoyens pour faciliter une meilleure acceptabilité de cette nouvelle activité dans leur environnement proche.

Fig 54, page de gauche, carte montrant le positionnement des futurs parcs et espaces agricoles par rapport à la future ligne de métro M3, à Toulouse.

1. Grand parc du Touch (6.5 km)



Limite ouest de Toulouse. Il fera le lien naturel entre la grande base de loisirs de la Ramée et la Garonne. Il se situera à proximité de la future station Jean Maga de la troisième ligne de métro. Le projet consistera à aménager les bords du Touch pour les rendre accessibles. Des programmes sont actuellement à l'étude pour y intégrer des aires de détente, des sports de plein air, mais aussi faciliter les déplacements des piétons et des cyclistes.

2. Grand parc Margelle (8 km)

A proximité de l'hôpital Purpan et jusqu'à l'extrémité sud et à proximité de la zone commerciale de Portet-sur Garonne. Il permettra de faire le lien aussi avec le Zénith de Toulouse, l'école hôtelière et il reliera les châteaux de Candie, Reynerie, Mirail et le jardin du Barry.

3. Grand parc Garonne (16 km)

Au départ de l'île du Ramier et à cheval sur les deux berges de la Garonne, Il traversera l'oncopole à l'ouest et le Pech David à l'est, en passant par Sesquières.

4. Grand parc Canal (18.5 km)

C'est un aménagement de verdure le long du canal du Midi, du canal du Brienne et du canal Latéral pour l'intégrer dans le projet urbain.

5. Grand parc de l'Hers (13.5 km)

Situé à l'est de la ville. Ce futur parc débutera à la limite avec Aucamville pour descendre jusqu'à Montaudran.

Une des volontés politiques est également de développer des jardins de proximité pour compléter la vingtaine de parcs et jardins existants. La métropole prévoit 16 nouveaux lieux végétalisés au cœur de la ville. Cette politique de la ville se renforcera à travers une volonté d'inciter la création d'espaces verts dans les projets urbains privés.

Pour compléter l'ensemble de ce programme, la mairie compte planter 60 000 arbres à horizon 2030. Au travers ce programme, il est pour le moment impossible d'estimer les besoins en substrat fertile et de déterminer plus précisément les quantités concernées permettant le réemploi de terres d'excavation. Les aménagements paysagers sont actuellement en cours de définition. Cependant, la part de futurs aménagements, à l'échelle de la métropole, va nécessiter un besoin important en terre fertile.

3.b/ Valorisation des terres inertes extraites des travaux souterrains en substrat fertile

L'entreprise Valorhiz⁴⁹ a développé un procédé TerraGenese®, qui valorise ses sous-produits, ses déblais stériles, qui n'ont aucun nutriments nécessaires pour une végétalisation mais qui se composent d'une bonne granulométrie (graviers, sable, limons, argiles...) favorables à leur transformations en supports de cultures.

Il est effectivement possible de remettre en vie des terres inertes en support de cultures en ajoutant des minéraux, des amendements, des additifs chimiques, et biologiques, en ajoutant de la matière organique, issue par exemple d'une usine de compostage, des

49 <http://valorhiz.com>

champignons, des bactéries...

Une fois que le substrat transformé, les applications souhaitées sont très variées :

- Grands paysages (modelage paysager)
- Les friches industrielles (réhabilitation des sols dégradés)
- Les aménagements urbains (substrat de plantation)
- Les infrastructures linéaires (nappage de talus...)

La création des Grands parcs urbains nécessiterait un besoin important en terre fertile pour à la fois modeler les paysages et planter des végétaux. La proximité de ces futurs parcs avec les travaux de la ligne M3 permettrait de réemployer directement une partie de ces délaix en les transformant en terre fertile.

Une première phase consiste à identifier ces terres inertes disponibles afin de déterminer précisément leur composition, c'est-à-dire d'établir une caractérisation chimique, et organo-biologique.

Une deuxième phase consiste en laboratoire à créer une formulation du substrat, c'est-à-dire une «recette», qui permet de fertiliser la terre à partir de sous-produits localement disponibles (notamment agricoles) et pour l'adapter aux usages futurs.

Des phases de tests permettent d'aboutir à un cahier des charges précis permettant d'établir un process adapté pour transformer ces terres inertes caractérisées en substrat fertile. L'entreprise Valorhiz intègre dans leur ingénierie la notion d'économie circulaire pour minimiser les impacts sur l'environnement, puisqu'ils intègrent dans leur réflexion l'utilisation de matériaux peu valorisables in situ et la réduction de l'impact des transports.

L'entreprise ECT⁵⁰ travaille également sur la question de la production de substrats fertiles à partir de terres inertes en place. Ils ont par ailleurs financé une thèse⁵¹ présentée en 2018, afin d'étudier la fertilité et la viabilité de Technosols reconstitués pour des plantations agricoles et urbaines. Pour cela, ils ont créé une surface expérimentale, à Villeneuve-sous-Dammartin (77), sur une des ISDI de l'entreprise, pour développer des technosols. Suite à cette phase de recherches, ils ont mis en place un site expérimental au bois de Vincennes, sur une parcelle de 2000m² pour analyser le développement de la végétalisation (prairies, de plantations d'arbres) sur les technosols élaborés à partir de remblais, de graves, de compost, et de boues de curages des lacs présents dans le parc. Cette expérimentation se situe en milieu urbain, ce qui permettait de vérifier la capacité de réemployer des matières produites au sein même du parc. Ce projet expérimental consistait à réaménager la voie Bourbon du Bois de Vincennes, anciennement accessible à la circulation automobile, en voie pédestre et cyclistes. Pour cela, ce réaménagement nécessitait d'importer de la terre végétale pour permettre la plantation d'arbres en alignement et l'aménagement de prairies. Cette expérimentation a été suivie en parallèle par un bureau d'étude IETI qui a effectué un retour d'expérience sur les différents impacts de ce projet.

Ce dernier a effectué une évaluation, réalisée sur la comparaison de deux scénarios. Le premier scénario, (de référence et habituellement employé pour ce type d'aménage-

50 <https://www.groupe-ect.com/>

51 *Potentiel de la biodiversité dans la construction de technosols, à partir de déchets urbains*, thèse de Charlotte Pruvost, novembre 2019.

ment) consistait à évacuer les matériaux inertes issus des chantiers parisiens vers des ISDI et d'importer les terres végétales de la grande couronne pour l'aménagement de ces nouveaux espaces verts urbains.

L'autre scénario, celui qui fait l'objet de l'expérimentation, consistait à reconstituer par l'entreprise ECT un substrat fertile issu de boues de curage séchées, de graves, de béton concassé provenant de l'ancienne chaussée, et d'apport de terre excavées sur des chantiers proches. L'ensemble des matières ont été préalablement analysées pour vérifier l'absence de polluants.

Cette analyse comparative de ces deux scénarios a permis de montrer :

- une diminution de 90% des émissions de CO₂, dans le fait d'éviter l'import de terres végétales d'une part et d'autre part l'export des matières (terres + boues) excavées en ISDI. Le transport étant la principale source d'émission de CO₂.
- une diminution de 40% du coût supporté du site excavateur des sols, pour la mise en décharge de ces déchets, puisqu'une l'entreprise qui effectue les excavations peut s'affranchir d'une partie des frais d'enlèvement.
- Une diminution de 10% du coût pour la mise en place de cette solution par rapport à l'importation de terre végétale. Le bureau d'étude avait estimé que l'économie engendrée par cette dépense évitée correspondait à 2€/m³.

Ce travail d'expérimentation a été mis en perspective à une plus grande échelle, celle du chantier du Grand Paris express. Ce dernier va engendrer plus de 43 millions de tonnes de terres excavées, chaque année (source - société du Grand Paris).

Le bureau d'étude IETI estime que 10% pourrait être valorisé. Ainsi une économie importante liée à leur non-mise en ISDI pourrait être réalisée. On peut rajouter à cela, les économies liées aux volumes de terres végétales qui ne seront ni achetées, ni acheminés au site d'aménagements paysagers.

Pour ce projet expérimental de 2000m² se compose de :

- 18 parcelles de prairies de 5x10x0,5m
- 33 fosses de 3x3x1.20m pour les arbres de l'espèce Acer campestre
- 36 fosses de 3x3x1,20m pour les arbres de l'espèce Tilia cordata
- 590 m³ de remblai
- 339 m³ de grave
- 648 m³ de béton concassé (20-31.5mm et 40-80mm) issus de la déconstruction de la route Bourbon
- 68 m³ de compost du Bois de Vincennes
- 68 m³ de boues de curage des lacs du Bois de Vincennes.

Sur cette expérimentation, les remblais et les graves provenant de chantiers de construction et de déconstruction proche du bois de Vincennes, ont été livrés par camions benne et l'implantation des Technosols a été effectuée en place puisque les volumes et la configuration du site le permettait. L'enjeu était également de pouvoir tester les différents matériaux produits localement et de ne pas envisager de sortie du site, ce qui n'aurait pas rendu le projet viable sur différents aspects (économiques et écologiques). De plus, ces matériaux produits sur site ne sont plus soumis à la législation des déchets puisqu'ils

restent sur le site d'extraction. Cependant, des analyses ont été effectuées pour éviter tous risques sanitaires.



Fig 55, Photographies des réceptions des terres excavées issues de chantier et un tractopelle mélangeant les matériaux pour les fosses d'arbres. Source : Charlotte Pruvost.

La nature des plantations définit une variété de technisols, élaborés pour une adéquation optimisée avec le végétal. Il faut donc connaître précisément les essences que l'on souhaite planter.

Dans ce cas précis, plusieurs essais ont été effectués. J'ai pu récupérer les différents mélanges mais malheureusement pas les résultats des différentes compositions après expérimentation. Il y a un caractère confidentiel à ces différents éléments.

Les différents mélanges pour les prairies :

- 90% sous-sol excavé + 10% compost
- 90% sous-sol excavé + 10% boues de curage
- 90% sous-sol excavé + 5% boues de curage + 5% compost
- 90% grave + 10% compost
- 90% grave + 10% boues de curage
- 90% grave + 5 % compost + 5% boues de curage

Les différents mélanges pour les arbres sont :

- 30% sous-sol excavé + 70% béton 20-30,5 mm
- 30% sous-sol excavé + 70% béton 40-80 mm
- 20% sous-sol excavé + 70% béton 20-30,5 mm + 10% compost

- 20% sous-sol excavé + 70% béton 40-80 mm + 10% compost
- 20% sous-sol excavé + 70% béton 20-30,5 mm + 10% boues de curage
- 20% sous-sol excavé + 70% béton 40-80 mm + 10% boues de curages



Fig 56, Photographies des matériaux utilisés pour la constitution des technisols, site d'expérimentation Bois de Vincennes. Source : Charlotte Pruvost.

Cette technique nécessite d'intégrer plusieurs paramètres, à la fois l'ensemble des matériaux disponibles à la composition du technisol et de l'adapter aux besoins particuliers de chaque végétal. Il faut également porter une réflexion sur la constitution de ce substrat fertile, si possible à proximité du lieu d'extraction et optimiser au maximum les surfaces disponibles pour effectuer ses mélanges. L'élaboration d'un substrat fertile nécessite de faire appel à une ingénierie adaptative, qui nécessite d'élaborer des écosystèmes diversifiés, dans le but de rendre le Technisol en adéquation avec l'habitat de chaque espèce. Cette technique montre qu'elle peut être une solution viable, consommatrice de volumes importants, si elle conserve un coût acceptable de transformation.

3.c/ Exemple de la ZAC de Rivel, Socoval, à Baziege et Montgiscard

De plus, des ZAC vont voir le jour autour de la métropole toulousaine. Ces futurs aménagements pourront également employer cette technique pour la plantation d'espaces verts. Cela pourrait être le cas du parc d'activités du Rivel, situé sur la commune de Baziege et Montgiscard.

Le but de la création de cette ZAC est de rééquilibrer l'offre économique dans le Sud du territoire grâce à un projet à forte valeur ajoutée d'un point de vue environnemental. Ce parc d'activités de 110 hectares est idéalement situé, à proximité de l'échangeur

autoroutier de Montgiscard et de la voie de chemin de fer Bordeaux-Sète. Cette donnée n'est pas négligeable, puisque l'acheminement des terres pourrait s'effectuer assez facilement. Il sera aménagé en trois phases, sur 15 ans : la partie sud entre 2020 et 2023, de 2023 à 2028 pour la zone est, et la partie ouest entre 2028 et 2033, ce qui lui confère également un intérêt puisque ces aménagements pourraient s'effectuer sur une même temporalité que le métro Toulousain.

De plus, le maître d'ouvrage le Sicoval souhaite faire de la Zac du Rivel le premier parc à énergie positive de la région Occitanie. Les qualités paysagères et environnementales du site seront un point très important du projet. Une réflexion a été lancée afin d'évaluer la faisabilité d'une valorisation agricole aux abords du ruisseau (le Rivel), traversant le parc d'activité. Ces substrats pourraient donc être également l'occasion d'améliorer la fertilité des sols. La surface des espaces verts est estimée à 27 ha, ce qui peut représenter également une solution consommatrice de terres issue des travaux d'excavation. Si nous partons exclusivement sur un apport de 50cm pour réaliser une simple prairie, sur 27ha, le besoin en substrat serait de 135 000m³. Cette rapide estimation peut être largement majorée par la réalisation de fosses pour la plantation d'arbres.

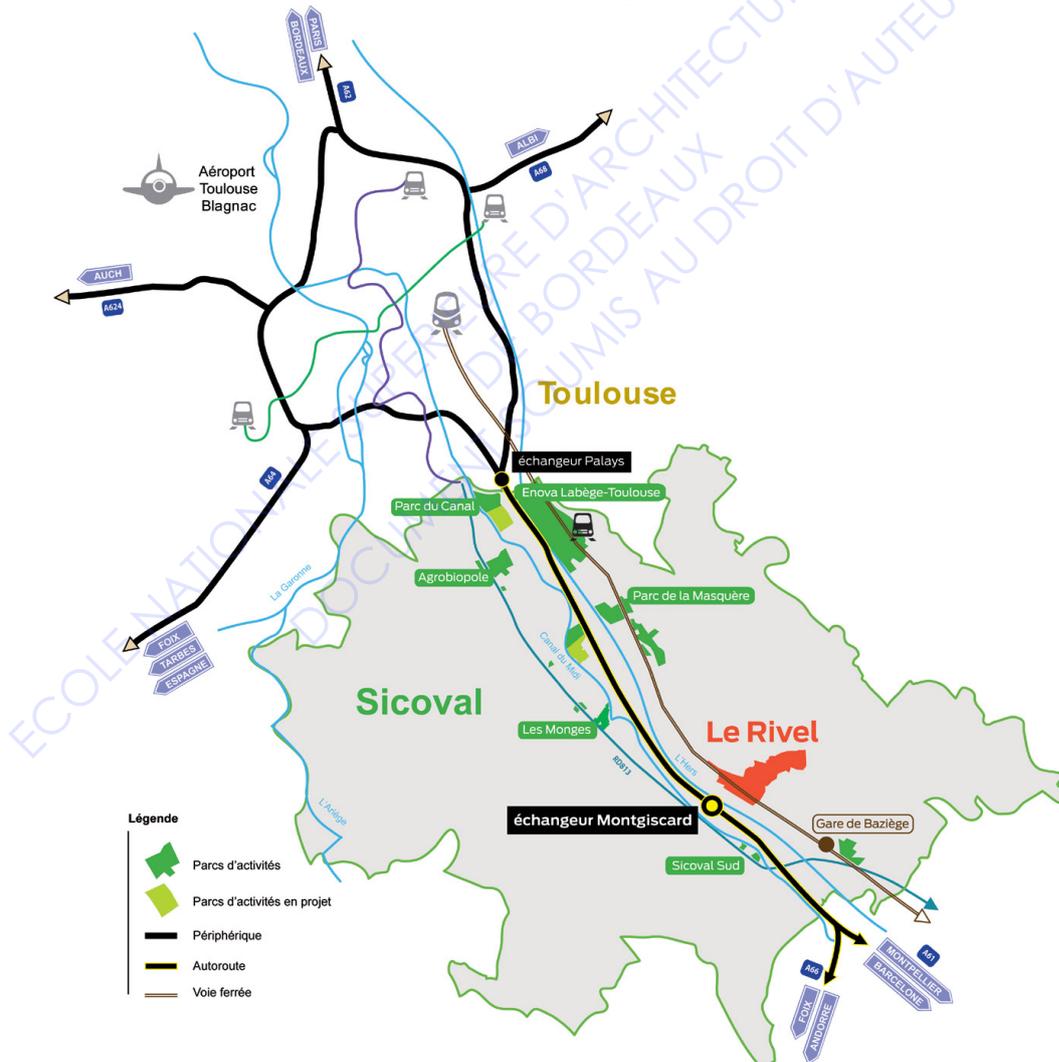


Fig 57, Carte présentant la localisation de la future ZAC du Rivel. Source : brochure en quête publique du 14 octobre au 18 novembre 2019, Sicoval.

3.d/ Un besoin grandissant de terres fertiles pour compenser l'imperméabilisation des sols

Ce procédé peut répondre également à une stratégie qui vise à stopper l'imperméabilisation des sols, dans les milieux urbains. Effectivement, au cours des dernières décennies, l'artificialisation des sols a considérablement augmenté, à cause de l'urbanisation et du développement des infrastructures. Le recouvrement des sols par un matériau imperméable tel que le béton ou l'asphalte dégrade les sols, et induit des problématiques dans la gestion des eaux pluviales, en causant des inondations et des pénuries d'eau, ce qui contribue au réchauffement climatique et la menace de la biodiversité.

Pourtant certaines approches peuvent lutter contre ce phénomène. La limitation de l'imperméabilisation des sols peut prendre deux aspects : soit en limitant la conversion des espaces naturels, agricoles, et forestiers en zone urbanisées, dans le but de stopper l'artificialisation des sols, soit en convertissant des sols imperméables situés en zone urbaine en revégétalisant la ville et en requalifiant des espaces délaissés... Le renforcement des infrastructures de transports publics peut également restreindre l'usage de la voiture et le déploiement des voies routières asphaltées.

La réduction des îlots de chaleur en ville par la végétalisation va également nécessiter un besoin de terres fertiles pour l'ensemble des plantations. Ces espaces verts vont apporter de la fraîcheur en ville, des lieux ventilés. Ils vont également permettre de limiter les eaux de ruissellement excessif en milieu urbain, et de soulager les systèmes de canalisation... Le développement de ces infrastructures vertes consiste à développer des espaces de plantation plus ou moins denses d'arbustes, d'arbres, des espaces verts à l'intérieur de zones urbaines et périurbaines. Ces infrastructures vertes ont également l'avantage de créer des espaces à vocation sociale, revitalisant les quartiers et offrant des lieux de récréations et d'échanges.

Ces aménagements publics ou privés vont être consommateurs de terres fertiles qu'il faudrait importer en temps normal. Alors, la revalorisation des terres d'excavation en substrat fertile devient un réel enjeu pour à la fois régénérer les sols, pour désimperméabiliser, et pour créer des infrastructures vertes dans la métropole toulousaine.

Conclusion de la partie 4

L'ensemble de ces pistes de valorisation des terres de déblais pourrait s'inscrire dans un renouvellement urbain et permettre le développement d'une économie circulaire locale. Le but serait de développer un modèle économique durable, qui permettrait à la fois de limiter l'impact environnemental, le gaspillage de ressources, et la production de déchets. Cependant, ces initiatives doivent être portées par les volontés politiques engagées pour financer en partie des projets novateurs et communiquer auprès de la population.

Certaines pistes de réemploi sont freinées à cause d'une absence de cadre réglementaire qui pèse sur les entreprises et les prescripteurs et freinent considérablement l'expérimentation et l'innovation.

De plus, une des problématiques, non négligeable pour revaloriser les terres d'exca-

vation, est le manque de foncier en milieu urbain. Il faut minimiser au maximum les mouvements de matières pour rendre ses solutions de réemploi le moins impactant possible pour l'environnement et trouver des espaces de tri pour acheminer les matières au bon endroit et éviter au maximum des stockages temporaires éloignés de leur lieu de réemploi. Il faut donc réunir toutes les conditions nécessaires pour répondre aux enjeux actuels pour la préservation de l'environnement.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE ET DE PAYSAGE
DE BORDEAUX
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Conclusion générale

Rappel de la problématique

En quoi le réemploi des terres d'excavation du chantier de la future ligne M3, à Toulouse peut-il être un outil pour répondre à la transition écologique et au développement d'une économie locale ? Comment transformer en ressources ces terres excavées, considérées comme déchets ?

Au cours de l'élaboration de ce mémoire, cette problématique m'a amené à me poser d'autres questions sur ce sujet. Quel est l'intérêt de valoriser la terre crue dans notre environnement quotidien ? Quelles sont les qualités de cette matière et les contraintes liées à sa mise en œuvre ? Comment développer une stratégie de réemploi des terres de déblais et quels potentiels offrent-ils ? Comment valoriser cette matière pour développer un matériau en adéquation avec les exigences environnementales ?

Méthode de travail et perspectives

Pour y répondre, j'ai tout d'abord mené des recherches sur les qualités intrinsèques de la terre. Cette matière présente à la fois de fortes charges symboliques et des performances techniques très intéressantes. Il manque actuellement des référentiels techniques suffisants pour favoriser sa mise en œuvre et pour démocratiser ses systèmes constructifs, même s'ils font appels à des savoir-faire ancestraux. Ce manque de normalisations techniques et l'absence de formations freinent considérablement le déploiement de ces systèmes constructifs, au profit de solutions industrialisées comme le béton.

Dans un second temps, pour élaborer une stratégie globale de réemploi, j'ai étudié plusieurs réalisations de métros : la ligne 16 du Grand-Paris, la ligne B à Rennes et la ligne E à Lyon. Ces exemples m'ont permis de mettre en avant des axes importants : la traçabilité des terres, le choix et la localisation des systèmes d'extractions, l'optimisation des mouvements des déblais, et l'engagement des pouvoirs politiques pour porter des initiatives. Ces études de cas m'ont permis de cibler les éléments importants pour déterminer un réemploi des terres issus du chantier du M3. Pour développer ce travail, j'ai pu interviewer à deux reprises M Lamballerie, de Tisséo et M Savatier de la société Egis. Ces entretiens avec des ingénieurs géotechniciens m'ont fait prendre conscience de la complexité du sujet. Les orientations, les prises de décisions doivent s'équilibrer entre une compréhension multicritères spécifiques au projet et une gestion des risques assumée.

La crise sanitaire a réellement eu un impact sur les échanges que j'aurais souhaité avoir avec d'autres interlocuteurs. J'ai privilégié les mails qui pour certains sont restés sans réponse malgré de nombreuses relances. Cette situation a je pense dégrader la qualité des échanges, et a par moment réduit le travail de recherches et d'enquêtes.

Cette dernière partie de mon mémoire a été l'occasion de réfléchir à des solutions de réemploi en relation directe avec des projets d'urbanisation de la métropole toulousaine. L'arrivée de la ligne M3 va bouleverser la mobilité et la morphologie de la métropole.

Réemployer ces excédents de terre excavée dans des projets qui vont accompagner cette mutation urbaine me semble être le plus pertinent pour développer localement des solutions de valorisation et développer ainsi une économie locale. Dans cette dernière partie, trois axes ont été développés :

- La transformation de la matière en matériaux de construction, en s'appuyant sur l'industrie existante de la terre cuite.
- La terre crue, un matériau au service de la construction urbaine et métropolitaine.
- Le réemploi des terres d'excavation en support fertile pour la végétalisation de la métropole.

Ces pistes de réflexion nécessiteraient d'être développées au cas par cas, auprès de spécialistes, pour en vérifier la faisabilité, sur des aspects techniques et financiers. Il s'agira peut-être de la prochaine étape, en collaboration avec M Savatier de la société Egis, puisque Tisséo souhaite lancer un appel à projet sur le sujet de la valorisation des terres d'excavation du chantier M3, au premier trimestre 2021.

Le réemploi des terres d'excavation est possible pour construire l'architecture et la ville de demain. Il existe de vrais potentiels, à la fois qualitatifs grâce à la durabilité des matériaux terre et quantitatif puisque la ressource est largement disponible. Cependant, il faut des acteurs présents et motivés pour développer des stratégies de valorisation, pour porter et défendre avec ferveur des réflexions prospectives, pour réussir à lever les freins.

La clef est d'engager un travail collaboratif dans lequel chaque acteur participe, s'engage, et intègre ces compétences, pour les faire fusionner avec d'autres. La valorisation des terres de déblais est réellement un sujet moteur qui peut participer favorablement à une transition écologique et environnementale. J'ai pu constater que durant ce travail de mémoire d'une année, de nombreuses expérimentations se sont multipliées, ce qui peut laisser présager une évolution favorable, productrices d'innovations et de nouvelles pratiques dans l'acte de concevoir et de construire.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE ET DE PAYSAGE
DE BORDEAUX
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Bibliographie

Table des illustrations

BIBLIOGRAPHIE

Sites internet officiels :

Réseau ecobâtir, réseau d'acteurs de la construction écologique.

Site internet : <http://site.reseau-ecobatir.org/>

Collectif ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, ATOUTERRE, CAPEB, FFB, Réseau Ecobatir, TERA... Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue (Bauge, Brique de terre crue, enduit en terre, Pisé, Terre allégée, Torchis), 13 décembre 2018.

Site internet : <https://www.asterre.org/les-guides-de-bonne-pratique/>

Amàco, Atelier matières à construire, Enseigner la matière pour construire durable.

Site internet : <http://www.amaco.org/>

CRATerre, cultures constructives et développement durable.

Site internet : <http://craterre.org/>

TERRA Award, 1er prix mondial des architectures contemporaines en terre crue (amàco, ENSAG, CRATerre, UNESCO-Unitwin, AECC, ANR-IDEFI).

Site internet : <http://terra-award.org>

Formation en ligne «Construire en terre crue aujourd'hui», Mooc Bâtiment durable.

Site internet : <https://www.mooc-batiment-durable.fr/>

Atelier Belenfant Daubas. Site internet : <https://www.atelierbelenfantdaubas.org/maison-b/>

Projet cycle terre pour la valorisation des terres d'excavation du projet du Grand Paris en matériau de construction. Site internet : <https://www.cycle-terre.eu/>

Le catalogue des fiches déblais par ligne, société du Grand Paris. Site internet : www.societedugrandparis.fr

Territoire grand paris nord,

- Cycle terre démonstrateur industriel pour la ville durable, 19 juin 2017.

- Cycle terre : une économie circulaire du Grand Paris, 05 avril 2019.

- Le catalogue des fiches déblais par ligne, société du Grand Paris

Sites internet : <http://www.grandparisamenagement.fr> et <https://www.cycle-terre.eu/>

Ministère de la transition écologique et solidaire, Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). Site internet : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

Neutralité & Bâtiment : comment les acteurs du secteur peuvent s'inscrire dans une démarche zéro émission nette. Site internet : <http://www.carbone4.com/publication-neutralite-batiment/>

Gestion des terres excavées. Site internet : <http://terrass.brgm.fr/>

Quartier de logements, bureaux et autres activités à Ivry-sur-Seine. Lauréat du concours Appel à projets « Réinventer la seine », Equipe : Amateur Architecture Studio (Wang Shu & Lu Wenyu), Lipsky + Rollet, Jolly&Loiret. Site internet : <http://jolyloiret.com/projets/sen1/>

Une enveloppe thermique en pisé pour un bâtiment économe en énergie. Site internet : <https://www.construction21.org/france/articles/h/une-enveloppe-thermique-en-pise-pour-un-batiment-econome-en-energie.html>

SAS J.Dubourg. Site internet : <http://terreceramiquegascogne.com/accueil/>

Collectif d'architectes, USUS. Site internet : <https://www.usus.archi/devisu/dubourg.html>

Le défi de la valorisation des déblais. Site internet : <https://www.societedugrandparis.fr/info/gestion-et-valorisation-des-d%C3%A9blais>

Syndicat mixte du SCOT de Lille Métropole. Site internet : <http://www.scot-lille-metropole.org/>

Start'up, Materr'up, solutions bas carbone. Site internet : <https://materrup.com/>

Saint Gobain réinvente la terre. Site internet : <https://www.saint-gobain.com/fr/saint-gobain-reinvente-la-terre>

Futur métro ligne B, à Rennes. Site internet : <http://www.metro-rennes-metropole.fr/>

Commune de Sevran. Site internet : <https://www.ville-sevran.fr/>

Grand Paris aménagement, l'aménageur public de référence en Ile-de-France du Grand Paris et de la métropole du Grand Paris. Site internet : <http://www.grandparisamenagement.fr/>

AnteaGroup, société d'ingénierie et de conseil en environnement. Site internet : <https://anteagroup.fr/>

QUARTUS promoteur immobilier et ensemblier urbain. Site internet : <https://www.groupe-quartus.com/>

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux. Site internet : <https://www.ifsttar.fr/accueil/>

Sciences Po Ceri, Centre de recherches internationales (CERI). Site internet : <http://www.sciencespo.fr/ceri/>

Unité de recherche AE&CC. Site internet : <https://aecc.hypotheses.org/>

ECT, entreprise qui valorise et réutilise les terres du BTP en Aménagements.

Site internet : <http://valorhiz.com>

BRGM, site internet sur la Géosciences. Site internet : <https://infoterre.brgm.fr>

Institut pour la Conception Eco-responsable du Bâti.

Site internet : <http://www.asso-iceb.org/>

Les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment.

Site internet : <https://www.inies.fr/accueil/>

Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics KBOB.

Site internet : <https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home.html>

Documents audiovisuels

Les nouveaux habits de la terre et les révolutions de la terre, Le Bayon François, Lieu-rac Productions, Paris, 2004.

Documents officiels :

Projet Toulouse Aerospace Express 3e ligne de métro et ligne aéroport express et connexion ligne B, Avis de l'autorité environnementale sur le dossier présentant le projet et comprenant l'étude d'impact au titre d'une évaluation environnemental commune émis le 11 avril 2019, site internet : <http://www.mrae.developpement-durable.gouv.fr/>

Déclaration de projet, 3ème ligne de métro & ligne aéroport Express, Mémoire en réponse à l'avis de la Mission Régionale de l'Autorité Environnementale, Tisséo, novembre 2019.

Plan guide : Toulouse ville rose, ville verte, AUAT, publié le 12 avril 2019. Site internet : <https://www.aua-toulouse.org>

Brochures et ouvrages

Earth architecture, Rael Ronald, Princeton Architectural Press, November 2008, p.15.

Rencontre avec Henri Maldiney : l'eau, la terre, l'air, le feu, Philosophie, ville et architecture. La renaissance des quatre éléments, C. Younès et Th. Paquot (dir.), La Découverte, 2002.

La Genèse, Premier livre de la Bible.

La Théogonie, Hésiode, Traduction et édition Paul Mazon, Les belles Lettres, 1982,

p36-39 et 48-50.

Matières infinies, Mathilde & Nicolas Béguin, Atelier Alba, le philotopie n°12, MaT(i)erre(s), déc 2016.

Matières à trans-former, Zoé Tric et l'équipe amàco, Le philotopie n°12, MaT(i)erre(s), déc 2016.

Celui qui invente les couleurs de la terre, Koichi Kurita, cité par François Bon dans, Tiers livre Éditeur, 2007.

Rien n'est mesquin, La pratique de l'art, Antoni Tapies, Idées, 1970.
Atelier thérapeutique argile. Création, destruction et trace, Brun, Michaël, Clarisse Jeghers, et Audrey van Caeyseele, Cliniques, vol. 1, no. 1, 2011, p. 158-174.

Condition de l'homme moderne, H. arendt, Calmann-Lévy, 1983, p.33-39.

Brochure béton d'argile environnemental, Amàco, CRAterre-AE&CC-ENSAG, CRAterre éditions, Villefontaine, juillet 2016.

La filière terre crue en France - enjeux, freins et perspectives, E. Leylavergne, Article disponible dans les actes du colloque Terra 2016.

Une terre promise pour l'architecture, des ressources considérables pour une émergence de l'utilisation du matériau terre crue en architecture, Aguiar Valentine, mémoire de Master soutenu à l'École supérieure d'architecture de Nantes, septembre 2017.

Construire en terres d'excavation, un enjeu pour la ville durable, Gasnier Hugo, thèse soutenue le 10 mai 2019.

Traité de la Construction en terre, Houben Hugo, Guillaud Hubert, Editions Parenthèses, Collection Habitat Ressource, janvier 2006.

Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture, Anger Romain, Fontaine Laetitia, Berlin, Cité des sciences et de l'industrie, 2009.

Potentiel de la biodiversité dans la construction de technosols, à partir de déchets urbains, thèse de Charlotte Pruvost, novembre 2019.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Fig 1, Biblia (Bible de Vivien, dite Première Bible de Charles le Chauve) Maître C.Enlumineur. Source : gallica.bnf.fr

Fig 2, Partie centrale d'une grande mosaïque de sol, provenant d'une villa romaine de Sentinum, Italie, vers 200-250 après JC. Devant le dieu de l'éternité (Aion) est assise la déesse de la terre-mère, Tellus (l'homologue romaine de Gaïa), avec ses quatre enfants. Source : gallica.bnf.fr

Fig 3, Géopillier, Salpêtrière 2011. Source : atelier Alba.

Fig 4, Photographies d'Alexandra Engelfriet, Sonorité d'Argile, 2013 (Ciry-le-Noble, France). Source : photographes Bertrand Lauprête (gauche) et Ad Baars (droite).

Fig 5, La roue des techniques, d'après H. Houben et H.Guillaud, traité de construction en terre, édition Parenthèses, 1989.

Fig 6, Carte montrant la répartition des architectures de terre dans le monde. Source : A. Misse/CRAterre.

Fig 7, Bâtiment 5 de l'îlot Ydeal Confluence sur la ZAC 2, Clément Vergély, Lyon Confluence. Source : Clément Vergély Architectes.

Fig 8, Tableau des consommations. Source : construction21.

Fig 9, Maison B - Atelier Belenfant Daubas. Source : Germain Herriau, Michel Ogier.

Fig 10, L' Aria - Atelier Philippe Madec. Source : (APM) Architecture & associé

Fig 11, Schéma récapitulatif représentant les différents atouts de la construction en terre crue.

Fig 12, Carte montrant le tracé de la ligne 16. Source : Société du Grand Paris.

Fig 13, Graphique représentant les proportions des techniques d'excavation, de la ligne 16, chantier du Grand Paris. Données fournies par la Société du Grand-Paris.

Fig 14, tableau représentant par année, les estimations de production de déblais par qualité, sur l'ensemble de la ligne 16 du Grand Paris et pour l'ensemble des types de terrassement (traditionnel, parois moulées et tunneliers). Données fournies par la Société du Grand-Paris.

Fig 15, graphique représentant la proportion des différentes qualités des terres excavées de la ligne 16, chantier du Grand-Paris. Données fournies par la Société du Grand-Paris.

Fig 16, Tableau montrant la répartition des stockages des terres selon leur degré de pollution. Source : Société du Grand Paris.

Fig 17, graphique montrant la production des déblais par lithologie et par techniques d'extraction, de la ligne 16. Source : Société du Grand Paris.

Fig 18, Tableau montrant la répartition, en millions de tonnes, des différents transports de terres. Données fournies par la Société du Grand-Paris.

Fig 19, Graphiques montrant les répartitions des déblais, selon les types de terrassement, et les types de transports, de la ligne 16. Source : Société du Grand Paris.

Fig 20, Image de synthèse montrant la future fabrique de matériaux en terre crue, située à Sevran. Source : Agence Joly&Loiret.

Fig 21, Images extraites des documentations fiches produits. Source : Cycle terre.

Fig 22, Axonométrie programmatique et carte de situation montrant la future fabrique de matériaux en terre crue, située à Sevran. Source : Agence Joly&Loiret.

Fig 23, Photographies extraites du site internet <https://www.cycle-terre.eu/>
Source : Cycle terre.

Fig 24, Carte montrant le tracé de la ligne B. Source : Rennes Métropole

Fig 25, Graphique représentant les proportions des techniques d'excavation concernant les travaux souterrains de la ligne B, à Rennes. Données fournies par la société Semtcar.

Fig 26, Tableau présentant la répartition concernant le stockage des terres excavées selon la méthode d'extraction pour les travaux souterrains de la ligne B, à Rennes. Données fournies par la société Semtcar.

Fig 27, Carte présentant le projet de la ligne E. Source : Lyon Métropole.

Fig 28, Schéma récapitulatif représentant les axes pour la gestion et valorisation des terres excavées issus des travaux souterrains.

Fig 29, Carte montrant le tracé de la M3, à Toulouse.

Fig 30, Tableau synoptique de classification française des sols fins et des matériaux rocheux évolutifs. Source : SETRA - LCPC.

Fig 31, Graphique montrant la production des déblais par lithologie, de la ligne M3, à Toulouse. Données recueillies suite aux entretiens menés avec Tisséo et la société Egis.

Fig 32, Carte géologique de la métropole toulousaine. Source : <https://infoterre.brgm.fr/page/cartes-geologiques>

Fig 33, Graphique représentant les proportions des techniques d'excavation, de la ligne M3, Toulouse. Données recueillies suite aux entretiens menés avec Tisséo et la société Egis.

Fig 34, Coupe 3D sur le tunnelier à pression de terre. Source : herrenknecht.

Fig 35, Coupe 3D sur le tunnelier à pression de boue. Source : herrenknecht.

Fig 36, Représentation de la technique des parois moulées.
<https://www.prolongement-m4.fr>. Source : Société du Grand Paris.

Fig 37, Carte montrant les différents types d'insertions, et de stations de la ligne M3, ainsi que la localisation prévisionnelle des points d'attaque des tunneliers, à Toulouse. Estimation des volimes excavées avec la technique du tunnelier. Données recueillies suite aux entretiens menés avec Tisséo et la société Egis.

Fig 38, Carte montrant les différents types d'insertions, et de stations de la ligne M3, ainsi que la localisation prévisionnelle des points d'attaque des tunneliers, à Toulouse. Données recueillies suite aux entretiens menés avec Tisséo et la société Egis.

Fig 39, Images satellites localisant les points d'attaque prévisionnels des tunneliers pour le chantier M3 et les différents transports pour l'évacuation des déblais.

Fig 40, Extrait d'une documentation commerciale, présentant les briques foraines traditionnelles, Source : Terres cuites du Savès.

Fig 41, à gauche, réalisation mur avec des briques de terre crue et cuite. Source : Briqueterie Capelle.

Fig 42, à droite, croquis d'un dispositif constructif alternant briques crues, cuites et galets.

Fig 43, Détail technique mur de refend. Source : agence Joly & Loiret.

Fig 44, Photographies de la carrière et de l'atelier de céramiques Dubourg. Source : Grégoire Grange.

Fig 45, Carte montrant les distances entre des briqueteries en activités et le chantier du M3.

Fig 46, Schéma récapitulatif représentant les étapes de transformations des matières excavées en matériaux de construction et sa mise en œuvre dans un projet de construction

Fig 47, Carte montrant les bassins d'emplois et les futurs quartiers en développement, en lien avec l'arrivée de la ligne M3, à Toulouse.

Fig 48, Processus optimisé pour la conception et la réalisation d'un projet architectural intégrant la terre crue.

Fig 49, Détail constructif en plan, principe mur ossature bois, avec remplissage terre, ITE complexe fibre de bois et finition extérieure en enduit à la chaux. Réflexion sur un système constructif, pour le concours St-Gobain.

Fig 50, photographies de la mise en œuvre de la solution terre St Gobain/Norper. <https://www.lemoniteur.fr/article/la-terre-crue-se-projette-dans-l-avenir.2103304>

Source : Joseph Melin.

Fig 51, Scénario 1, logement collectif R+3, version tout béton armé.

Fig 52, Scénario 2, logement collectif R+3, version béton armé / BTC

Fig 53, Scénario 3, logement collectif R+3, version béton armé / Pisé / BTC

Fig 54, Carte montrant le positionnement des futurs parcs et espaces agricoles par rapport à la future ligne de métro M3, à Toulouse.

Fig 55, Photographies des réceptions des terres excavées issues de chantier et un tractopelle mélangeant les matériaux pour les fosses d'arbres. Source : Charlotte Pruvost.

Fig 56, Photographies des matériaux utilisés pour la constitution des technisols, site d'expérimentation Bois de Vincennes. Source : Charlotte Pruvost.

Fig 57, Carte présentant la localisation de la future ZAC du Rivel. Source : brochure en quête publique du 14 octobre au 18 novembre 2019. Source : Sicoval.

Les illustrations originales qui composent ce mémoire sont les figures 11, 13, 14, 15, 18, 25, 26, 28, 29, 31, 33, 38, 42, 45, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 54 .

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE ET DE PAYSAGE
DE BORDEAUX
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Annexes

LIGNE 15 Est (Grand-Paris)

Longueur : 23 km

Extraction tunnelier	Extraction méthode tradi	Extraction parois moulées	Total
44	46	10	100
3,74	3,91	0,85	8,5

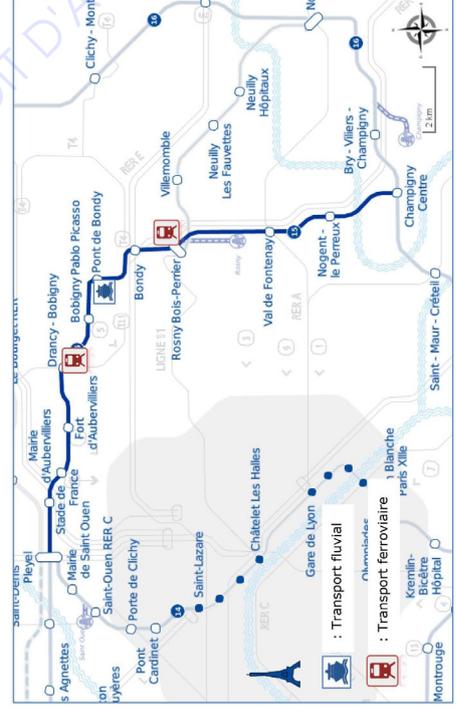
en pourcentage
en millions de tonne

en KT

Année	Inerte		non inerte faiblement sulfaté		non inerte fortement sulfaté		non inerte inorganique faiblement concentré		non inerte inorganique fortement concentré (ND)		non inerte inorganique très fortement concentré (ND)		non inerte organique (biocentre)		TOTAL Année		
	Tunneliers	tradi.	P. moulées	tradi.	P. moulées	Tunneliers	tradi.	Tunneliers	tradi.	P. moulées	Tunneliers	tradi.	P. moulées	Tunneliers		P. moulées	
2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2020	0	275	223	0	16	0	141	0	31	79	0	347	57	0	0	0	
2021	412	911	106	3	50	51	432	48	302	52	194	558	30	15	8	1	
2022	609	306	15	14	1	226	218	16	437	13	313	72	6	16	2	0	
2023	299	16	4	10	0	226	19	0	207	3	160	10	2	3	0	0	
2024	77	0	0	2	0	26	0	0	65	0	48	0	0	1	0	0	
Total	1397	1508	348	67	71	529	791	205	1011	147	715	987	95	35	10	3	0

3263	158	1525	1722	1797	48	8503
------	-----	------	------	------	----	------

	ferroviaire	fluvial	routier	
2019	0	0	0	0
2020	539	50	710	1299
2021	1242	724	1594	3560
2022	894	270	1289	2453
2023	103	0	871	974
2024	0	0	218	218
2025	0	0	0	0
Total	2778	1044	4662	8504



LIGNE 15 Ouest (Grand-Paris)

Longueur : 21 km

Extraction tunnelier	Extraction méthode tradi.	Extraction parois moulées	Total
48	43	9	100
2,88	2,58	0,54	6

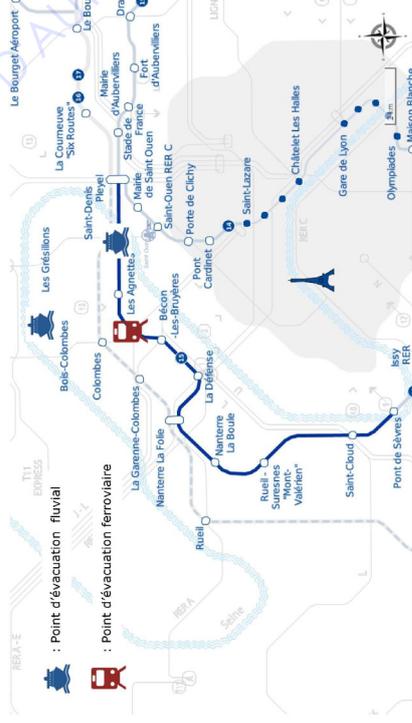
en pourcentage
en millions de tonne

en KT

	Inerte		non inerte faiblement sulfaté		non inerte fortement sulfaté		non inerte inorganique faiblement concentré		non inerte inorganique fortement concentré (ND)		non inerte inorganique très fortement concentré (ND)		non inerte organique (biocentre)		TOTAL Année
	Tunneliers	tradi.	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	tradi.	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	tradi.	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	
2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019	0	61	22	0	17	3	0	54	27	0	49	20	0	3	0
2020	0	151	91	0	16	13	0	113	37	0	49	52	0	2	568
2021	65	272	48	2	28	11	7	114	160	22	75	150	33	0	1051
2022	312	261	17	30	49	4	85	154	153	7	344	188	7	10	1697
2023	173	180	21	11	24	5	30	36	7	453	91	10	9	0	1450
2024	187	74	1	7	13	0	22	23	0	129	22	1	4	0	705
2025	67	21	0	3	0	0	8	7	0	24	23	0	2	0	227
Total	804	1020	201	53	150	36	152	174	37	621	106	880	124	46	5973

2025	239	363	1675	1576	76	5973
------	-----	-----	------	------	----	------

	ferroviaire	fluvial	routier
2016			0
2017			0
2018	0	0	5
2019	0	165	107
2020	0	346	221
2021	0	665	385
2022	23	773	903
2023	138	830	482
2024	87	389	228
2025	88	140	0
Total	336	3308	2331
			5975



LIGNE 15 SUD TRONCON 2 (Grand-Paris)

Longueur : 21 km

Extraction tunnelier	Extraction méthode tradi	Extraction parois moulées	Total
38	52	10	100
3,23	4,42	0,85	8,5

en pourcentage

en millions de tonne

en KT

	Inerte		non inerte faiblement sulfaté		non inerte fortement sulfaté		non inerte inorganique faiblement concentré		non inerte inorganique fortement concentré (ND)		non inerte inorganique très fortement concentré (ND)		non inerte organique (biocentre)		TOTAL Année
	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	
2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017	0	336	269	11	9	61	56	189	124	0	75	82	0	2	5
2018	175	966	106	1	46	317	17	361	70	57	418	83	0	7	16
2019	546	458	15	26	91	106	2	521	250	10	245	317	24	0	4
2020	293	71	0	17	5	104	22	237	0	27	490	88	0	0	0
2021	31	5	0	1	0	5	0	18	3	0	12	16	0	0	0
2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	1045	1836	390	34	265	506	75	1137	204	804	914	189	2	0	25

3271	137	846	2373	1907	13	30
------	-----	-----	------	------	----	----

	ferroviaire	fluvial	routier
2016	0	0	0
2017	51	98	1079
2018	290	309	2674
2019	250	550	1834
2020	62	612	679
2021	0	28	63
Total	653	1597	6329



LIGNE 15 SUD TRONCON 3 (Grand-Paris)

Longueur : 13 km

Extraction tunnelier	Extraction méthode tradi	Extraction parois moulées	Total
35	54	11	100
1,79	2,75	0,56	5,1

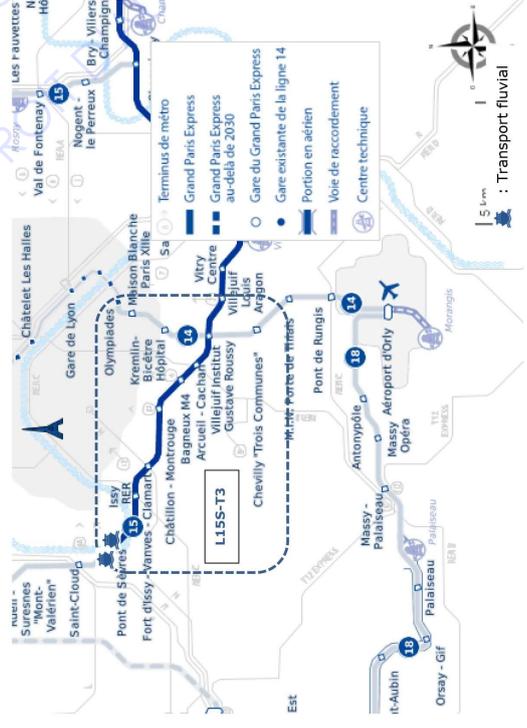
en pourcentage
en millions de tonne

en KT

	Inerte		non inerte faiblement sulfaté		non inerte fortement sulfaté		non inerte inorganique faiblement concentré		non inerte inorganique fortement concentré (ND)		non inerte inorganique très fortement concentré (ND)		non inerte organique (biocentre)		TOTAL Année
	Tunneliers	tradi.	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	
2016	0	19	5	0	0	8	5	0	3	0	3	5	0	0	60
2017	0	95	69	0	2	156	20	0	196	0	79	54	0	0	740
2018	69	362	142	3	10	63	21	22	184	44	32	42	0	0	1165
2019	404	316	54	5	20	44	8	164	294	18	4	14	0	22	1719
2020	192	278	12	0	20	37	2	117	259	1	0	100	0	0	1211
2021	0	112	0	0	8	8	0	0	30	0	0	0	0	0	200
2022	0	1	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	12
Total	665	1183	282	8	60	316	56	303	676	112	3	116	5	22	5107

2130	75	567	799	1376	133	27	5107
------	----	-----	-----	------	-----	----	------

	ferroviaire	fluvial	routier
2016	0	0	59
2017	0	63	672
2018	0	206	960
2019	0	362	1356
2020	0	517	693
2021	0	0	200
2022	0	0	12
Total	0	1148	3952



LIGNE 16 (Grand-Paris)

Longueur : 27.5 km

Extraction tunnelier	Extraction méthode tradi	Extraction parois moulées	Total
57	35	8	100
5,07	3,12	0,71	8,9

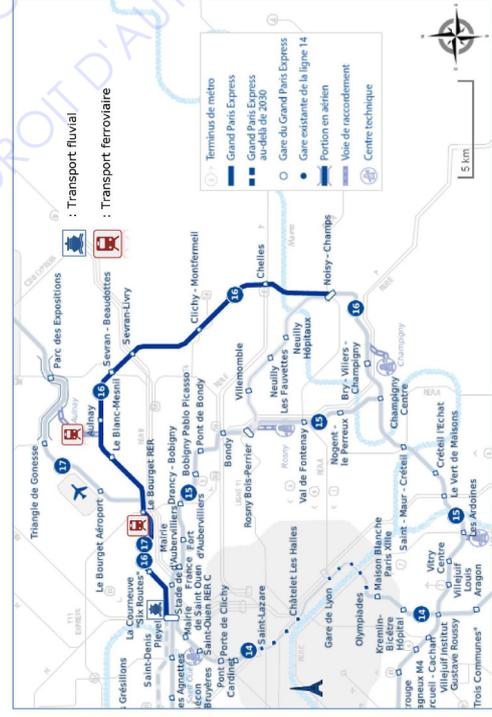
en pourcentage
en millions de tonne

en KT

Année	Inerte		non inerte faiblement sulfaté		non inerte fortement sulfaté		non inerte inorganique faiblement concentré		non inerte inorganique fortement concentré (ND)		non inerte inorganique très fortement concentré (ND)		non inerte organique (biocentre)		TOTAL Année
	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	
2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2018	0	455	4	13	34	66	0	92	14	0	0	0	0	0	0
2019	438	716	0	34	6	113	38	243	28	230	132	2	0	0	1 1247
2020	700	397	0	6	7	27	16	651	3	623	84	22	0	0	2 3048
2021	125	80	0	4	0	7	0	156	0	115	56	0	0	0	5 3657
2022	54	0	0	0	38	0	0	51	0	27	0	0	0	0	0 736
Total	1317	1648	4	57	700	263	120	1101	45	995	432	75	18	0	8 8864

2969	946	1083	1803	1962	93	8	8864
------	-----	------	------	------	----	---	------

	ferroviaire	fluvial	routier	
2018	0	252	992	1244
2019	283	491	2276	3050
2020	833	850	1974	3657
2021	107	164	465	736
2022	0	0	176	176
Total	1223	1757	5883	8863



LIGNE 15 SUD T2 / 15 SUD T3 / 16 / 15 EST / 15 Ouest / 18 (Grand-Paris)

Longueur : 35 km

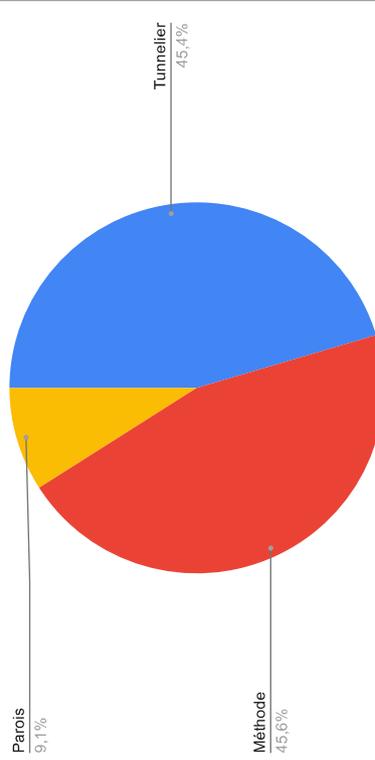
Tunnelier	Méthode tradi	Parois moulées	Total
45,39	45,56	9,06	100
19,20	19,27	3,83	42,30

en pourcentage
en millions de tonne

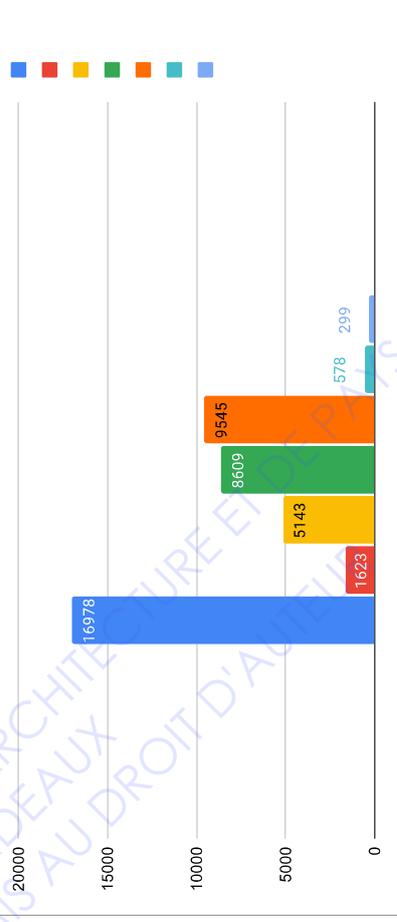
en KT

Inerte	non inerte faiblement sulfaté		non inerte fortement sulfaté		non inerte inorganique faiblement concentré		non inerte inorganique fortement concentré (ND)		non inerte inorganique très fortement concentré (DD)		non inerte organique (biocentre)		TOTAL Année					
	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées	Tunneliers	P. moulées						
tradi.	8872	1424	452	133	2320	2288	535	4615	3358	636	4501	1110	413	31	0	265	34	42775
	16978			1623	5143		8609		9545		578		578		299		42775	

Répartition des déblais selon leur méthode d'excavation (Lignes 15 SUD T2 / 15 SUD T3 / 16 / 15 EST / 15 Ouest / 18)



Répartition de la qualité des déblais (Lignes 15 SUD T2 / 15 SUD T3 / 16 / 15 EST / 15 Ouest / 18)



TUNNELIERS DU GRAND PARIS EXPRESS

Nom du tunnelier	lignes	distances	Puits
Steffie – Orbival	Champigny-sur-Marne / Villiers-sur-Marne	2183 m	Sentier des marins
Aïcha	LIGNE 15	3000 m	gare de Bry, Salengro (Champigny s/Marne)
Malala	LIGNE 15	4700 m	Rû de Nesle à Noisy-Champs.
Camille	LIGNE 15	4200 m	Gare Créteil l'échat / Salengro (champigny s/Marne) en 2021
Marina	LIGNE 15	--- m	friche Arrighi, Vitry-sur-seine / Gare Créteil l'échat
Aby	LIGNE 15	4300 m	friche Arrighi, Vitry-sur-seine / Villejuif-Institut Gustave Roussy
Amandine	LIGNE 15	3400 m	Villejuif-Institut Gustave Roussy/Villejuif Louis-Aragon
Ellen	LIGNE 15	3900 m	Villejuif Louis-Aragon / gare Fort d'Issy - Vanves - Clamart + Puits Robespierre et gare Arcueil - Cachan
Laurence	LIGNE 15	4200 m	entre le puits Île de Monsieur et la gare Fort d'Issy - Vanves - Clamart

Koumba	LIGNE 14	4500 m	entre Morangis et Pont de Rungis
Claire	LIGNE 14	4500 m	jusqu'à Thiais à l'Hay-les-Roses
Alison	LIGNE 14	4600 m	dépuis Thiais à l'Hay-les-Roses, au départ du chantier Jean Prouvé
Valérie	LIGNE 14	1700 m	dépuis le puit Mandela / future gare St Denis Pleyel Ouvrage des Acrobates et ouvrage Cachin

Armelle	LIGNE 16	3300 m	du puit Braque, à Aulnay-sous-bois vers l'ouvrage Hugo, Blanc-Mesnil
Inès	LIGNE 16	3100 m	jusqu'à l'ouvrage Hugo, au Blanc-Mesnil
Bantan	LIGNE 16 et 17	3800 m	jusqu'au puit du Canal, à Aubervilliers
Dorine	LIGNE 17	1300 m+1400m	jusqu'à l'ouvrage Rolland / jusqu'au Bourget

Quantités des déblais : 43 millions de t
 Nombre de stations : 68
 Longueurs tracés : 200 km
 % travaux souterrains :

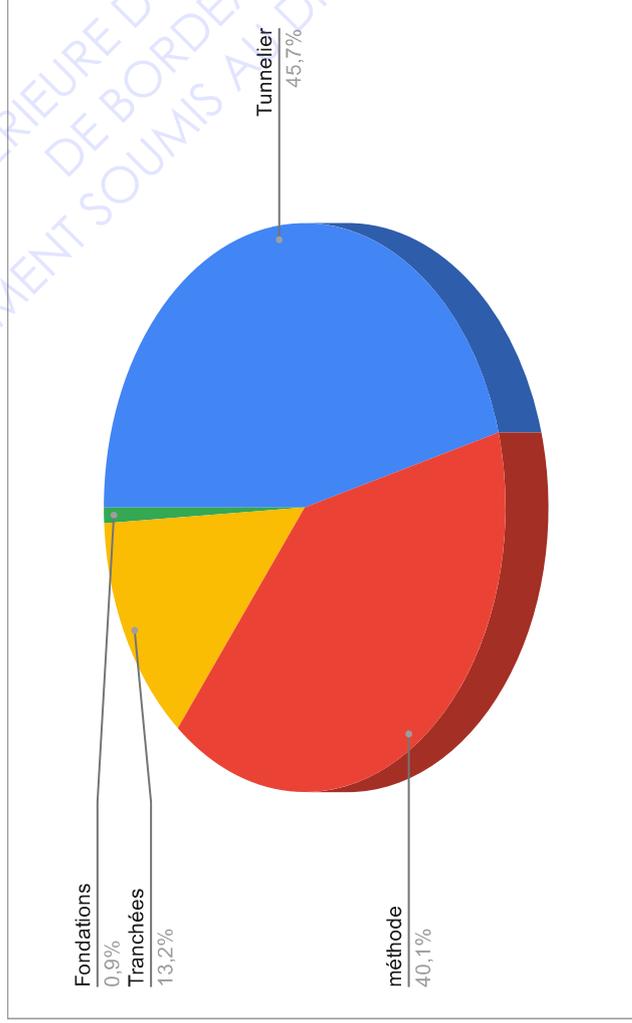
Rennes ligne B

Longueur : 14 km

Tunnelier	méthode tradi	Tranchées couvertes	Fondations viaduc	Total
45,75	40,13	13,24	0,88	100,00
1,14	1,00	0,33	0,02	2,492

en %

en millions de tonne



	ISDI*	Comblement ancien site extraction antimoine**	ISDND***
Extraction tunnelier	0,2755	0,8303	0,0342
Extraction méthode traditionnelle et tranchées couvertes	0,8645		0,0760
TOTAUX (en millions de tonne)	1,1400	0,8303	0,1102
en %	54,8	39,9	5,3

Enquête auprès de briqueteries et fabricants de matériaux en terres cuites

Questions	Terres Cuites Du Saves	Briqueterie de Nagen	Dubourg J Terres & Céramiques de Gascogne
Seriez-vous intéressés de travailler davantage la terre crue par rapport à la terre cuite ?	<p>Le Couzin, 31470 Empeaux</p> <p>Non, cette activité est une activité à part entière. Elle diffère en plusieurs points :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) le marché est différent, c'est un marché de la construction écologique avec des acteurs bien spécifiques. 2) le réseau de commercialisation est différent. 	<p>32 Avenue Pierre-Paul Riquet, 31590 Saint-Marcel-Paulel</p> <p>OUI</p>	<p>1 Chemin de Pourtiche, 33114 Le Barp</p> <p>OUI, ils travaillent déjà un peu la terre crue.</p>
Y-a-t-il des adaptations de process à prévoir qui pourraient engendrer des coûts supplémentaires de fabrication (temps de séchage plus long, stockage à l'abris...)?	<p>Oui, cette activité nécessite des lieux de stockage énorme. (la terre crue, en tant que produit fini, ne peut pas être stockée à l'extérieur). De plus, C'est une industrie de volume : 1 m3 de terre = 1 m3 de briques (pleine) alors bien plus de briques creuse. Cela nécessite de lourds investissements : bâtiment, terrain, mécanisation.....</p>	<p>Pas d'adaptation particulière pour leur terre crue. Ils travaillent déjà la terre crue.</p>	<p>Pas d'adaptation particulière. Ils ont l'espace nécessaire pour le séchage à l'abris et le stockage.</p>
Tisséo effectue actuellement des études de sols poussées pour établir une cartographie précise des sous-sols toulousains. Ils sont dans une phase de caractérisation chimico-organique, dans le but d'envisager un réemploi ou non de ces déblais. Seriez-vous potentiellement intéressés d'expérimenter ces argiles si elles présentent des compositions adéquates)	<p>Il préfère conserver leurs habitudes. "Il est très difficile pour nous, acteur très modeste, de faire changer les habitudes de construction. Ce n'est pas à notre portée. En tout cas, je ne veux pas fragiliser ma société pour un marché qui n'est pas encore prêt à construire en terre crue."</p>	<p>OUI, ils sont intéressés d'expérimenter les terres de déblais du chantier de la ligne M3, à Toulouse.</p>	<p>Non, ils préfèrent continuer de travailler la terre provenant de leur carrière. Ils connaissent parfaitement bien les qualités de leur terre et ne veulent pas prendre de risques avec une terre inconnue. De plus, ils payent pour renouveler les droits d'exploitation de leur carrière, ils préfèrent donc continuer d'exploiter leur gisement. Comment acheminer la terre issue des déblais, la trier...</p>
Ou préférez-vous conserver absolument l'extraction de vos argiles dans votre carrière habituelle ?	<p>3000 m3 de terre par an.</p>	<p>environ 800 Tonnes de terre (fabrication terre cuite et terre crue), soit env 1500m3 de terre.</p>	<p>Leur carrière se situe à proximité de leur usine. Extraction de 1200 et 1500 tonnes d'argiles, soit env 2000m3 de terre.</p>
Où se situe votre carrière, et quelles sont les quantités extraites chaque année ?			

Finition extérieure
Enduit à la chaux

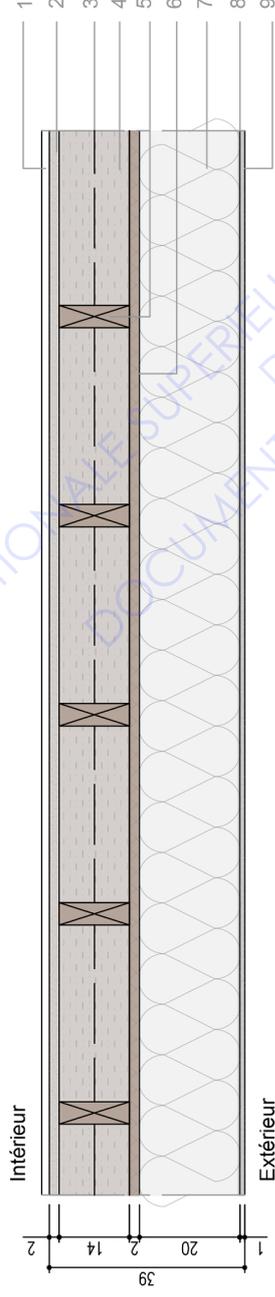


Finition intérieure
terre + ossature bois



Principe mur ossature bois/ Remplissage terre / ITE complexe fibre de bois / Finition extérieure enduit à la chaux (en Rdc)

0 10 50cm



1. Soubassement de protection couloir école (Ht=130cm)
2. Enduit intérieur terre crue posé sur nergallo
3. Grille métallique type treillis soudé positionnée à mi-cadre
4. Remplissage par projection de terre crue
5. Montant bois de l'ossature bois
6. Voile travaillant / contreventement
7. Complexe ITE panneaux rigide de fibre de bois (Ep. 200mm, à définir), collés et vissés avec des chevilles spécifiques sur l'ossature bois
8. Armature fibre de verre
9. Enduit extérieur de finition à la chaux

Finition extérieure
Bardage bois
(pose verticale)

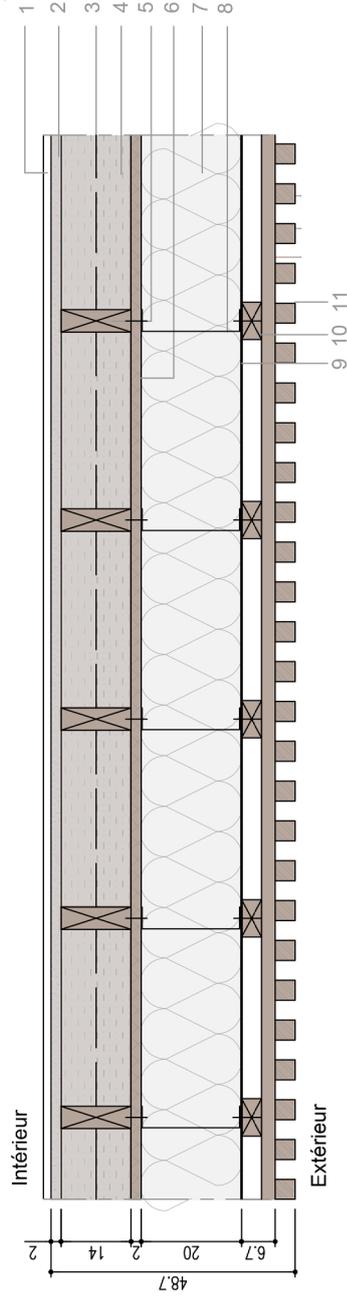


Finition intérieure
terre + ossature bois



Principe mur ossature bois/ Remplissage terre / ITE complexe fibre de bois / Finition bardage vertical (Etages)

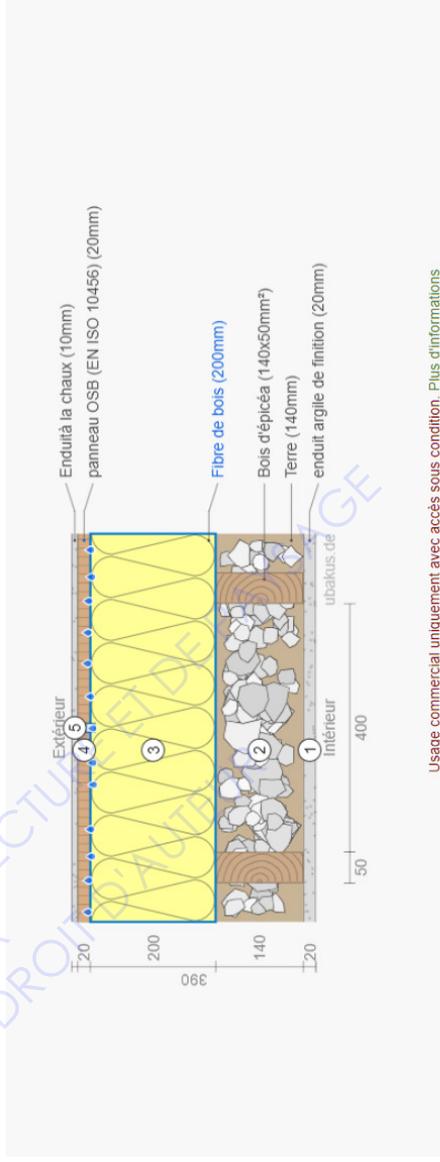
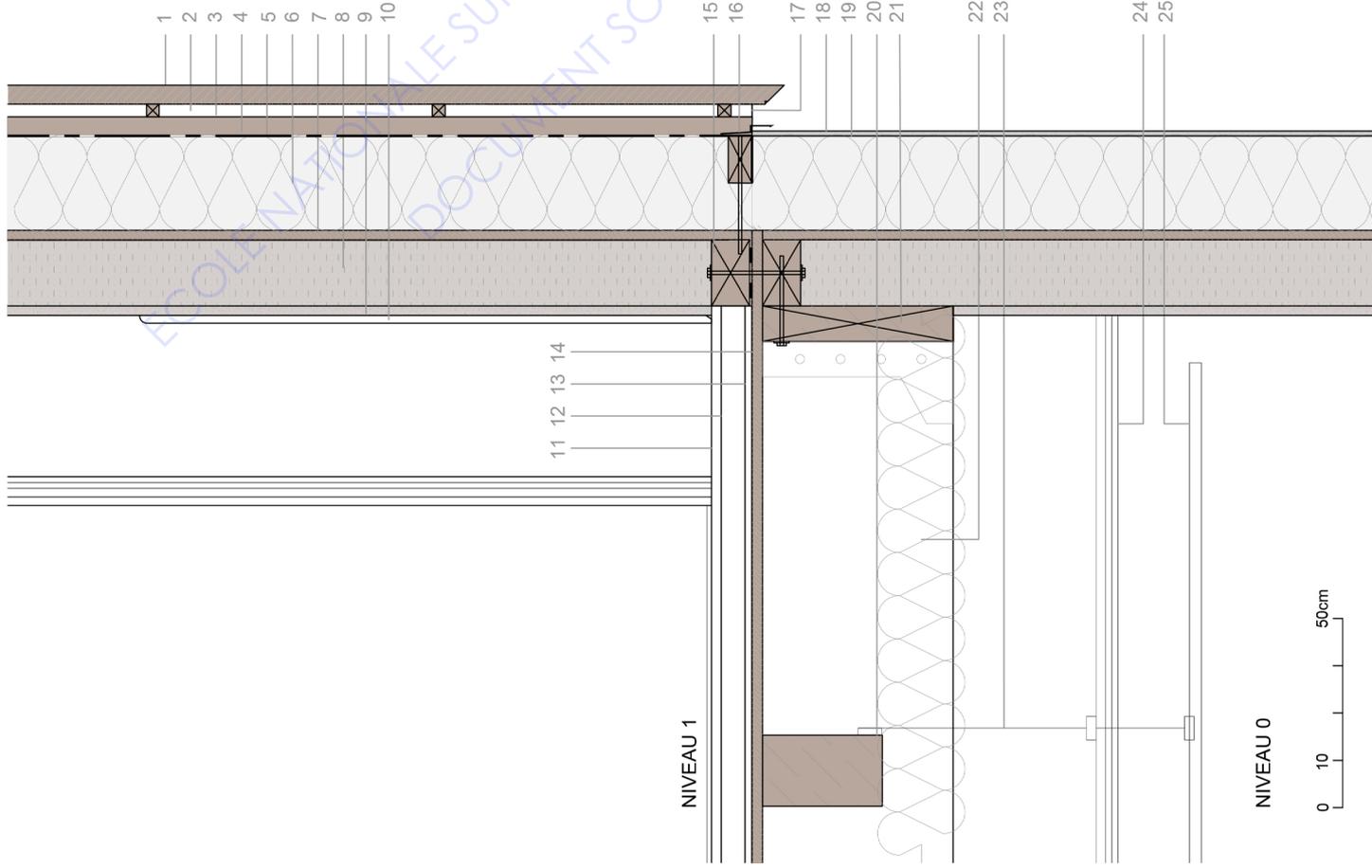
0 10 50cm



1. Soubassement de protection couloir école (Ht=130cm)
2. Enduit intérieur de finition en terre crue posé sur un nergallo
3. Grille métallique type treillis soudé positionnée à mi-cadre
4. Remplissage par projection de terre crue
5. Montant bois de l'ossature bois
6. Voile travaillant / contreventement
7. Complexe ITE panneaux rigide de fibre de bois (Ep. 200mm, à définir), collés et vissés avec des chevilles spécifiques sur l'ossature bois
8. Fixation déportée pour bardage (en phase développement St Gobain)
9. Ecran pare-pluie continu (à définir)
10. Tasseaux verticaux et horizontaux + Lame d'air
11. Bardage bois pose verticale

Principe jonctions parois verticales (finitions enduits/bardage) avec le plancher d'étage

1. Bardage pose verticale
 2. Liteaux horizontaux pour la pose du bardage
 3. Lame d'air ventilée
 4. Liteaux verticaux
 5. Ecran pare-pluie continu (à définir)
 6. ITE isolant fibre de bois rigide (Ep. 200mm, à définir),
 7. Voile travaillant / contreventement
 8. Remplissage par projection de terre crue dans l'ossature bois
 9. Enduit intérieur terre crue posé nergallo
 10. Soubassement de protection, Ht = 130cm (couloir école)
 11. Revêtement de sol souple, de type Marmoleum, Forbo
 12. Chape
 13. Résilient
 14. Panneau OSB
 15. Fixation ossature bois sur lisse basse
 16. Bavette de recouvrement pare-pluie + pièces d'appui en bois
 17. Grille anti-rongeur / ventilation
 18. Enduit extérieur de finition à la chaux, type Weber
 19. Armature fibre de verre
 20. Solives
 21. Muraille
 22. Isolation acoustique entre solives
 23. Suspente métallique anti-vibratile
 24. Pafonds 2BA13
 25. Plénum acoustique faux plafonds acoustique Ecophon Solo™
26. Revêtement de sol souple, de type Marmoleum, Forbo
 27. Chape flottante 70mm
 28. Isolant polystyrène extrudé
 29. Tirefond posé en quinconces
 30. Traverse basse 50x150mm
 31. Lisse basse 50x150mm
 32. Dalle de compression + planchers béton bas carbone UL TIBAT® sur poutrelles et hourdis (entrevous en polystyrène) hourdissimo® Placo St-Gobain/Hirsch isolation.
 33. Compriband
 34. Cheville d'ancrage de la lisse basse
 35. Feutre bitumeux
 36. Caillebotis
 37. Profilé enfonçable en aluminium, pour ep d'enduit 10mm.
 38. Profilé de socle pour ITE, fixé à lisse basse
 39. Isolant de socle résistant à l'humidité
 40. Parement de finition
 41. Etanchéité et drainage du soubassement
 42. Gravier (drainage)
 43. mur béton de soutènement
 44. Terrain naturel



Usage commercial uniquement avec accès sous condition. Plus d'informations

Valeur U : 0,175 W/m²K

Condensation: 0,023 kg/m³

Valeur sd: 7,5 m

Atténuation des ampl. de Temp.: > 100

ENEc Bestand: U ≤ 0,24*

Humidité du bois: +0,2 %

Surface Intérieure: 10,9°C (54%)

Déphasage: 18 h

Contribution à l'effet de serre:

Temps de séchage: 3 jours

Réserve de séchage: 815 g/m²a

Capacité de chaleur int.: 207 kJ/m²K