

**Mémoire de fin d'études : "Construction de murs en terre crue avec granulats
p̃yrecyclés mis en Suvre à l'aide d'une guniteuse".**

Auteur : Renson, Vincent

Promoteur(s) : Courard, Luc

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18192>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



UNIVERSITÉ DE LIÈGE – FACULTÉ D'ARCHITECTURE

CONSTRUCTION DE MURS EN TERRE CRUE AVEC GRANULATS RECYCLÉS MIS EN ŒUVRE À L'AIDE D'UNE GUNITEUSE

Travail de fin d'études présenté par Vincent RENSON en vue de l'obtention du grade de
Master en Architecture

Sous la direction de : Luc COURARD
Année académique 2022-2023

Résumé

Aujourd'hui, le béton domine le secteur de la construction avec une consommation moyenne d'environ une tonne par personne chaque année. Cette consommation abondante est favorisée par sa facilité d'utilisation et son prix attractif. Cependant, l'utilisation massive du béton a un impact néfaste sur l'environnement et génère une part considérable des déchets mondiaux, à savoir 40 % à 50 %. Se pose ainsi la question de la gestion de ces déchets. Pour répondre à cette situation, des chercheurs explorent des alternatives intégrant des débris issus de la démolition dans des méthodes de construction en terre crue. Ces chercheurs envisagent l'utilisation de granulats recyclés dans des techniques comme le pisé ou la brique de terre comprimée, offrant des avantages tels que la préservation des ressources naturelles et la réduction des émissions de carbone. Néanmoins, malgré ces atouts, ces méthodes demeurent toujours dépendantes du ciment.

En parallèle, les méthodes traditionnelles de construction en terre crue suscitent à nouveau de l'intérêt. Et pour cause, elles permettent de diminuer considérablement l'emploi du béton et privilégient une économie circulaire et écologique. Par ailleurs, malgré la richesse en ressources naturelles, la construction en terre crue reste bien souvent coûteuse en raison de sa mise en œuvre chronophage.

Ce travail vise à fusionner ces deux approches alternatives en expérimentant une technique d'application plus rapide et accessible pour la terre crue, à savoir la projection par voie sèche, tout en incorporant des granulats recyclés dans les constructions.

Abstract

Today, concrete dominates the construction sector, with an average consumption of around one tonne per person per year. This abundant consumption is encouraged by its ease of use and financial advantage. However, the massive use of concrete has a harmful impact on the environment and generates a considerable part of the world's waste, i.e. 40% to 50%. This raises the question of how to manage this waste. In response to this, researchers are exploring alternatives that incorporate demolition debris into soil construction methods. These researchers consider the use of recycled aggregates in techniques such as rammed earth or compressed earth bricks, giving advantages such as preserving natural resources and reducing carbon emissions. However, despite these advantages, these methods still depend on cement.

At the same time, traditional soil construction methods are once again arousing interest. And with good reason: they considerably reduce the use of concrete and promote a circular and ecological economy. On the other hand, despite its wealth of natural resources, building with soil is often time-consuming and therefore expensive.

This work aims to merge these two alternative approaches by experimenting a faster and more affordable application technique for soil, namely dry spraying, while incorporating recycled aggregates into constructions.

Remerciements

À Luc Courard, mon promoteur, pour son encadrement tout au long de ce travail.

À Etienne Guillaume, de la société Élémenterre, sans qui l'ensemble des expérimentations n'aurait pu voir le jour.

À Amaury Daras, membre du personnel technique du laboratoire de la faculté d'ingénierie.

À ma famille pour leur soutien, leurs relectures et l'intérêt porté à mon travail.

Table des matières

1. Introduction	1
1.1 Contexte et problématique.....	1
1.2 Objectif de la recherche	8
1.3 Questions de recherche	8
1.4 Méthodologie	9
 2. État de l'art	 10
2.1 La terre crue	10
2.1.1 Contexte historique	10
2.1.2 Avantages de la terre crue	11
2.1.3 Limites de la terre crue.....	15
2.1.4 La terre, un matériau granulaire	16
2.1.5 Techniques de construction en terre crue	18
2.2 Le pisé	19
2.2.1 Contexte	19
2.2.2 Le pisé durant le XX ^e siècle	20
2.2.3 Avantages du pisé	20
2.2.4 Performances mécaniques	21
2.2.5 Retraits et fissures	23
2.2.6 Mise en œuvre	24
2.2.7 Modernisation du pisé	25
2.2.8 Vitesse de construction	27
2.2.9 Coût	27
2.3 Les granulats recyclés	28
2.3.1 Contexte	28
2.3.2 Transformation de déchets de construction et de démolition en granulats recyclés	30
2.3.3 Caractéristiques	33
2.3.4 Évaluation environnementale	35
2.3.5 Applications	36
2.4 Le gunitage	38
2.4.1 Le béton projeté	38
2.4.2 Projection par voie humide	38
2.4.3 Projection par voie sèche	39
2.4.4 Applications	40

3. Expérimentations	46
3.1 Briques de terre comprimée.....	46
3.1.1 Matériaux	46
3.1.2 Matériel	48
3.1.3 Réalisation des briques	49
3.1.4 Essais de compression simple et résultats	50
3.2 Caractérisation des matériaux utilisés	52
3.2.1 La terre	52
3.2.2 Les granulats recyclés	58
3.2.3 Eau	61
3.2.4 Chaux	61
3.3 Échantillons de terre projetée	61
3.3.1 Préparation des mélanges de terre	61
3.3.2 Matériel	62
3.3.3 Réalisation des échantillons	64
3.3.4 Essais de compression simple et résultats	66
3.4 Voile en terre projetée	68
3.4.1 Mise en œuvre	68
3.4.2 Temps unitaire et comparaisons	70
3.4.3 Énergie grise	71
3.4.4 Esthétique	73
4. Conclusion	75
5. Bibliographie	79
6. Liste des figures	85
7. Liste des tableaux	90
8. Annexes	92

1. Introduction

1.1 Contexte et problématique

Le béton tel que nous le connaissons actuellement, est un mélange d'eau, de granulats, de sable et de ciment. Ce matériau est apparu au début du XIX^e siècle. Le béton n'a pas été découvert du jour au lendemain. En effet, il y a de cela 2 000 ans, les Romains ont été les premiers à employer un liant hydraulique composé de chaux vive et de pouzzolanes naturelles (cendres du Vésuve), combiné à des pierres concassées afin d'obtenir du mortier (Genestrier & Gras, 2015). Depuis, ce mortier a connu énormément de transformations et d'améliorations. Actuellement, le béton de ciment est le matériau le plus largement utilisé dans le monde, atteignant l'équivalent d'une tonne par an par personne. En raison de l'urbanisation rapide, il est considéré comme étant le plus rentable et facile à utiliser. En Europe, la France se place en deuxième position derrière l'Allemagne en termes de production de béton de ciment prêt à l'emploi. En 2017, la France a produit environ 39 millions de m³ de béton de ciment (Buttin - 2020 - Le béton, mis au défi des enjeux environnementaux.pdf, s. d).

Son utilisation massive est survenue durant la première moitié du XX^e siècle (Universalis, s. d.). Alors que la Première Guerre mondiale éclatait, le béton était considéré comme une véritable révolution. Ses excellentes performances en termes de résistance ont fait de lui un matériau de défense. Cela se manifestait notamment au travers des bunkers, des tourelles blindées et, en Belgique, par les forts autour de Liège, Namur et Anvers.

« La reconstruction se fera par le béton ou ne se fera pas » (Genestrier & Gras, 2015). À la fin de la Seconde Guerre mondiale, le béton écrase de toute sa puissance les autres matériaux. Que ce soit dans les bâtiments individuels, immeubles collectifs ou n'importe quelle infrastructure, le béton couvre les dalles, murs, plafonds, toitures, caves. Il est partout. Ses nombreuses possibilités et performances structurelles font que, encore aujourd'hui, aucun matériau n'est en mesure de rivaliser avec le béton. Outre ses caractéristiques techniques exceptionnelles, il est également très prisé pour

son esthétique et ses qualités plastiques. Des architectes tels que le Corbusier, Mies van de Rohe, Louis Khan mais aussi Tadao Ando se sont notamment fait connaître avec leurs projets brutalistes en béton (Hegger & Auch-Schenk, 2009).



Figure 1.1 : Théâtre du manège de Mons (2006), Pierre Hebbelinck
Parement intérieur imitant la rythmique des notes de musique



Figure 1.2 : Église de la lumière (1989), Tadao Ando

Cependant, il est important de souligner que le béton, malgré ses nombreux avantages techniques, technologiques et pratiques, a un impact significatif et néfaste sur l'environnement et la gestion des ressources naturelles. En effet, si l'on prend en compte tous les éléments constituant le béton armé (le ciment, le sable + les granulats, l'eau, les armatures, le transport routier), une tonne de béton coulé génère une émission de plus d'une tonne de CO₂ (Madec, 2021). Pour mieux se rendre compte de ce que cela signifie, si le béton utilisé sur la terre était un pays, il serait le troisième émetteur mondial de gaz à effet de serre derrière la Chine et les Etats-Unis (Genestrier & Gras, 2015).

Et pourtant, la fabrication du béton en soi n'est pas très complexe et ne nécessite pas d'actions spécifiquement « polluantes ». Le problème réside principalement dans les composants utilisés pour fabriquer le béton. Alors, quels sont, parmi les composants du béton, ceux qui émettent du CO₂ ? En réalité, les granulats (sable + gravier) et le ciment sont les deux éléments qui impactent le plus l'environnement et le bilan environnemental du béton. Quelles sont alors les raisons de ces impacts ?

Afin de produire du ciment, il est nécessaire de chauffer de la matière minérale (20 % d'argile et 80 % de calcaire) à une température de 1 450 °C dans des fours à clinker, ce qui demande évidemment une très grande quantité d'énergie thermique. Une fois cuite, elle se solidifie, puis est broyée afin d'obtenir de la poudre de ciment. La fabrication d'une tonne de ciment Portland produit 930 kg de CO₂ (Madec, 2021). Le ciment représente donc à lui seul 11 % des émissions de l'industrie (Buttin - 2020 - Le béton, mis au défi des enjeux environnementaux.pdf, s. d.).

L'utilisation de granulats a également un rôle néfaste pour l'environnement. Bien que le sable soit la deuxième plus grande ressource naturelle en volume après l'eau, son usage excessif nous conduira inévitablement vers une future pénurie (Sand_and_sustainability_UNEP_2019.pdf, s. d.). En effet, seul le sable marin (représentant moins de 5 % du sable sur terre), issu de l'érosion de la pierre, peut être utilisé dans la fabrication de béton. Le sable du désert n'ayant pas une forme adéquate (grains trop ronds) ne peut être utilisé pour le béton. Il faut compter entre 100 et 1 000 ans pour que le sable atteigne la mer. Par ailleurs, 25 % du sable ne l'atteindra pas, étant stoppé par les barrages. Ainsi, chaque année, ce sont 40 milliards de tonnes de sable qui sont extraits des fonds marins pour nourrir le secteur du bâtiment (Sand_and_sustainability_UNEP_2019.pdf, s. d.). Il est donc clair que nous extrayons beaucoup plus de sable que la terre n'est capable d'en produire (Genestrier & Gras, 2015).

En Belgique, l'extraction de sable dans les terres devient de plus en plus compliquée. D'après les estimations de la plus grande exploitation de sable de Belgique, située à Mont Saint-Gibert, si l'extraction se poursuit au rythme actuel, il ne sera plus possible d'extraire du sable d'ici environ 25 ans (Newmedia, 2022). Cette prévision soulève des inquiétudes quant à la disponibilité future de cette ressource essentielle à la fabrication du béton. Il est crucial de prendre des mesures immédiates pour gérer durablement l'exploitation du sable et éviter cette éventuelle pénurie à long terme.

Outre cette potentielle pénurie pour le secteur de la construction, l'extraction du sable génère de sérieuses conséquences écologiques dont il faut prendre

conscience. De fait, cette action menace également les activités de pêche, la biodiversité, la disponibilité en eau douce et modifie le pH des eaux par l'érosion des rivières et des côtes (Genestrier & Gras, 2015). De plus, le dragage intensif fait également disparaître certaines plages. Effectivement, lorsque le sable marin est extrait, c'est le sable des plages qui redescend. La disparition de ces plages empêche la protection naturelle contre certains éléments tels que les ouragans. Parmi les 3,5 millions de m³ de sable extraits en mer du Nord, 15 % sont directement réintroduits sur les plages pour assurer leur maintenance, 30 % sont directement exportés à l'étranger (Pays-Bas, France et Royaume-Uni) et 55 % sont déchargés dans les ports belges (Tout savoir sur l'extraction de sable en mer, 2021).

Pour revenir au secteur européen de la construction, ce dernier représente, à lui seul, près de 50 % de la consommation des ressources naturelles, mais ce n'est pas tout. Il génère également près de 40 % de la production des déchets sur l'ensemble du territoire européen (La construction et la rénovation écologiques, 2015). Dès lors, ce secteur apparaît comme une importante source de dégradation de l'environnement. De plus, des études ont prouvé que le changement climatique impacte directement la santé des habitants (Rapport 2022 du Giec, 2022).

Face à ces enjeux, l'Union européenne et les pays membres ont réagi en mettant en place divers protocoles. La première mesure a été la mise en place du rapport Brundtland en 1987. Ce rapport s'articulait en trois parties. La première traitait des préoccupations communes et de la nécessité de mettre en place un développement durable. C'est d'ailleurs la première fois que le terme développement durable est clairement défini : « le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » (Développement durable, 2022). La deuxième partie exposait les problèmes communs. Et la troisième faisait des propositions en matière d'efforts communs (Développement durable et impacts environnementaux - Rapport Brundtland, 1987.).

Quelques années plus tard, est apparu le rapport de Kyoto. Celui-ci visait à mettre en place les mesures nécessaires pour diminuer l'émission de gaz à effet de

serre. Bien que le protocole ait vu le jour en 1997, suite à l'attitude des Etats-Unis et de la Russie, il n'a été mis en vigueur qu'en 2005. La première phase de ce protocole a débuté en 2008 et s'est terminée en 2012. La seconde phase a, quant à elle, commencé en 2013 et devait prendre fin en 2021. Malheureusement, il y a eu des confusions et des désaccords entre certains pays révisant l'accord en 2015 à Paris. Cet accord est plutôt ambitieux puisqu'il vise à limiter l'élévation de la température sous les 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle mais aussi à augmenter la capacité des pays à s'adapter au réchauffement climatique, s'assurer la transition vers une société bas carbone et rendre les flux financiers compatibles avec la transition bas carbone (Accord de Paris, s. d.).

Bien que cet idéal de société bas carbone soit encore loin d'être atteint, la Belgique s'efforce d'agir pour réduire l'impact des déchets issus du secteur de la construction. Ces dernières années, certaines initiatives ont émergé pour explorer l'utilisation de déchets dans diverses applications. L'objectif principal de ces initiatives est de passer d'une économie linéaire à une économie circulaire d'ici 2025. Les entreprises locales sont d'ailleurs invitées à soumettre des projets circulaires dans le cadre de « Be Circular, Be Brussels » (Programme régional en économie circulaire, s. d.).

Effectivement, en Wallonie, des initiatives en faveur de la circularité sont déjà présentes, notamment dans le domaine de la construction. Une des propositions est d'envisager les bâtiments existants comme futurs, comme stocks de matériaux. La destruction ayant un coût, l'économie circulaire envisage la valeur des éléments construits selon leur potentiel de déconstruction, de réemploi, de préfabrication ou de recyclage (Rapport Circular Wallonia_DEF_v6_0.pdf, s. d.).

Dernièrement, certains projets novateurs ont vu le jour, notamment le projet ZIN à Bruxelles (ZIN, s. d.), où des déchets de construction ont été intégrés dans la production de nouveaux bétons. L'immeuble ZIN a été construit sur un site déjà occupé par les tours WTC (World Trade Center), dans le but de réduire au maximum l'empreinte écologique du nouveau bâtiment en recyclant les déchets de démolition provenant des tours WTC. Ce projet d'immeuble ZIN constitue une première dans le

BENELUX en ce qui concerne l'utilisation de coulées de béton circulaire C2C (cradle to cradle). Cette approche, littéralement « du berceau au berceau », représente un concept d'éco-conception. L'idée du béton circulaire est de récupérer les débris de démolition afin de les recycler en granulats utilisables pour de nouveaux projets de construction. Environ 30 000 tonnes de gravats ont été collectées et transformées en 3 500 tonnes de granulats par des entreprises situées en périphérie du bâtiment. Ces granulats recyclés ont ensuite été utilisés pour produire 30 000 tonnes de béton certifié C2C silver, contenant 30 % de granulats recyclés (ZIN, s. d.). Cette démarche montre une avancée significative vers une construction durable et responsable.

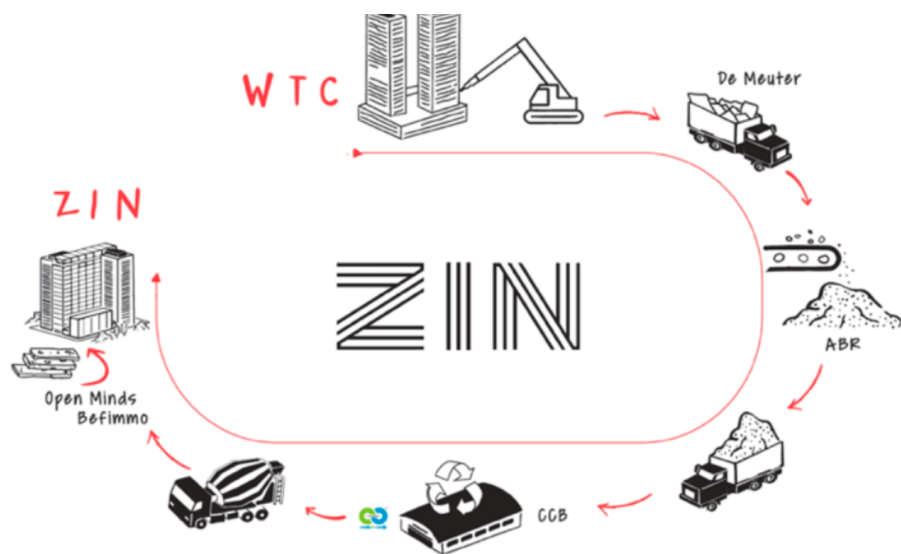


Figure 1.3 : Processus de circularité – Immeuble ZIN

Cette initiative résout un des problèmes évoqués : l'utilisation des déchets de construction. Cependant, même s'il le diminue, cette méthode continue d'utiliser du béton. N'y a-t-il donc pas moyen de trouver une solution plus efficace et encore plus respectueuse de l'environnement ?

Des chercheurs ont étudié comment valoriser les déchets de démolition en les intégrant dans les techniques de construction en terre crue. L'objectif de ces recherches est de réduire la dépendance aux matériaux traditionnels en utilisant ces déchets de construction tout en leur donnant une valeur ajoutée. Par exemple, certains chercheurs se sont intéressés à l'utilisation de granulats recyclés comprimés. Ils sont alors mis en œuvre via la technique du pisé. Les granulats sont alors

compactés, couche après couche. Cette approche présente plusieurs avantages évidents, notamment la préservation des ressources naturelles, la réduction des émissions de carbone et la diminution des déchets envoyés en décharge. De plus, certains envisagent l'utilisation de granulats recyclés dans le cadre de la construction en brique de terre comprimée. Cependant, il est essentiel de souligner que ces techniques nécessitent toujours l'utilisation de ciment, ce qui n'est évidemment pas idéal du point de vue environnemental. Pour parvenir à des approches plus durables, il serait donc important de continuer à explorer des méthodes qui permettent de se passer du ciment tout en valorisant les déchets de démolition, afin de contribuer à la protection de l'environnement tout en répondant aux besoins de construction de manière efficace et responsable.

En parallèle, d'autres études explorent des approches alternatives et s'intéressent aux méthodes traditionnelles de construction en terre crue. L'objectif est ici d'éliminer l'utilisation de ciment et de béton, tout en promouvant l'économie circulaire et en réduisant l'impact environnemental. Contrairement au béton, la terre est une ressource naturelle abondante, largement disponible dans le monde entier, ce qui suscite actuellement un regain d'intérêt pour la construction en terre crue.

Actuellement, la terre damée, également connue sous le nom de pisé, connaît un renouveau d'intérêt et revient à la mode. Malgré son attrait en raison de sa texture riche, la technique du pisé demeure relativement exclusive en raison de son coût élevé dû à sa mise en œuvre fastidieuse. Même avec une modernisation de la méthode, elle reste une option coûteuse. En effet, il est important de noter que la mise en œuvre de cette approche peut être chronophage et engendrer des dépenses élevées (Doat, Houben, et Guillaud, 1986). Dans cette optique, il serait avisé d'explorer des alternatives plus rapides pour la réalisation de ces constructions, afin de promouvoir des pratiques respectueuses de l'environnement tout en restant financièrement viables.

Dans cette perspective, ne serait-il pas envisageable d'explorer l'introduction de granulats recyclés dans les constructions en terre ? Cette approche pourrait constituer une alternative plus durable et économique, contribuant ainsi à favoriser

une démarche plus respectueuse de l'environnement dans le domaine de la construction.

1.2 Objectif de la recherche

Cette étude s'intéresse à l'introduction des granulats recyclés dans les constructions en terre damée. Cependant, comme mentionné précédemment, la méthode traditionnelle de terre damée, le pisé, est connue pour être chronophage et coûteuse. Dans cette étude, l'objectif est d'explorer et de tester une nouvelle technique de mise en œuvre plus rapide, rendant ainsi les constructions en terre plus abordables pour le grand public. Pour atteindre cet objectif, la recherche se concentre sur l'expérimentation de la technique de projection de terre crue par voie sèche. Cette méthode, qui est généralement utilisée pour le béton, permettra une application nettement plus rapide par rapport à la technique du pisé, répondant ainsi à l'objectif recherché.

1.3 Questions de recherche

Ce travail vise à étudier l'incorporation de fines de recyclage dans la terre projetée. Après une analyse et une interprétation de divers travaux sur le sujet, l'étude se concentrera sur l'expérimentation de cette nouvelle méthode de mise en œuvre. Les questions de recherche liées à ce sujet sont :

1. Un mur en terre projetée est-il comparable à un mur en pisé traditionnel en termes de résistance ?
2. L'introduction de granulats recyclés dans le mélange améliore-t-elle les résistances mécaniques du mur en terre projeté ?
3. Quel impact génère une utilisation plus abondante de machines par rapport à la méthode traditionnelle du pisé sur la consommation d'énergie nécessaire pour réaliser cette technique ?
4. La projection de terre crue apporte-t-elle un réel intérêt économique par rapport à la technique du pisé, la maçonnerie traditionnelle en blocs de béton ou un voile en béton ?

5. Alors que les murs en pisé présentent une esthétique minimaliste, brute et très sensible, quelle sera l'apparence des murs en terre projetée ?

1.4 Méthodologie

Ce travail est structuré en deux parties. La première partie, de nature plus théorique, consiste en une recherche documentaire visant à explorer différents sujets. Dans un premier temps, il s'agit de se documenter sur les constructions en terre crue, et plus particulièrement la technique du pisé. Une seconde rubrique s'intéressera aux granulats recyclés, à leur contexte, leurs origines, leurs caractéristiques ainsi que leurs applications. Enfin, la technique de projection, également connue sous le nom de gunitage, sera expérimentée.

Cette partie théorique permet d'acquérir une connaissance suffisante et approfondie du sujet, de le documenter et de le contextualiser avant d'aborder la deuxième partie, qui sera davantage axée sur la pratique. Cette seconde partie a pour objectif de mener des expérimentations sur une nouvelle technique de mise en œuvre pour la terre : la projection. Les détails de la méthodologie de ces expérimentations seront développés dans la suite du travail.

2. État de l'art

2.1 La terre crue

2.1.1 Contexte historique

Si l'on peut penser que les constructions en terre sont rares, force est de constater que près de la moitié de la population mondiale habite dans des habitations de ce type. Selon le département américain de l'énergie, environ 50 % de la population mondiale vit dans des constructions qui utilisent la terre crue comme matériau de base (Anger & Fontaine, 2009). De plus, il est estimé que 15 % des œuvres architecturales inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO sont construites en terre crue (Anger & Fontaine, 2009).

La Grande Muraille de Chine est indéniablement l'ouvrage architectural le plus remarquable jamais créé sur notre planète. Contrairement à la croyance populaire, elle n'est pas entièrement construite en pierre. Sur des milliers de kilomètres, elle est en réalité constituée de différents matériaux en fonction de la nature du sol : en pierre sur la pierre, en terre sur la terre, et parfois même en sable sur le sable (Anger & Fontaine, 2009). La règle qui a guidé le choix des matériaux est simple : construire en utilisant ce qui est disponible sur place.

Cette philosophie est en réalité à l'origine des constructions en terre crue. Initialement, les hommes et les femmes bâtissaient leur habitat en utilisant les matériaux locaux. Pour ce faire, la terre était bien souvent le seul matériau disponible. Cette tradition, qui remonte à plus de 11 000 ans, a donné naissance à la pratique de la construction durable, évoluant progressivement du hameau au village puis à la ville (Anger & Fontaine, 2009).

En réalité, la construction en terre a accompagné l'histoire de notre civilisation depuis ses débuts. Bien que les constructions en terre aient perdu de leur popularité dans les pays développés après la Seconde Guerre mondiale, ce mouvement connaît

aujourd'hui un regain d'intérêt, notamment pour ses atouts environnementaux, mais également ses qualités techniques, son confort... (Anger & Fontaine, 2009).

2.1.2 Avantages de la terre crue

Les bénéfices de l'utilisation de la terre crue sont multiples. Particulièrement dans le contexte actuel, cette approche peut résoudre des problèmes environnementaux tout en offrant des performances avantageuses dans divers domaines.

Faible impact environnemental

Il est indéniable qu'en choisissant de construire avec de la terre, on assure une approche nettement plus respectueuse de l'environnement. En effet, la terre, que l'on trouve sous nos pieds, offre une solution séduisante, surtout dans le contexte actuel où les matériaux sont souvent importés de différentes régions, engendrant ainsi une pollution considérable due au transport (Dethier, 2022).

En optant pour l'utilisation de la terre, il suffit « simplement » de creuser pour extraire le matériau de construction. La terre crue, comme son nom l'indique, est un matériau qui ne se cuit pas. La terre va sécher à température ambiante. Il n'y a donc pas besoin de dépenser de l'énergie pour la cuire contrairement au ciment, composant du béton, qui nécessite une température minimum de 1 450 °C pour sa cuisson. La construction en pisé consomme très peu d'énergie grise¹ (Bouregaya, 2018).

De plus, l'un des principaux avantages de la terre réside dans le fait qu'elle est présente sur tous les continents habités, ce qui la rend universellement disponible (Fontaine & Anger, 2009). Cette matière première, facilement accessible, a l'avantage d'être économique. Néanmoins, cet aspect peut rapidement devenir problématique, car les coûts peuvent varier considérablement en fonction des diverses méthodes de mise en œuvre, comme nous le verrons ultérieurement dans le chapitre consacré au pisé.

¹ L'énergie grise est la somme des énergies nécessaires au cycle de vie d'un objet/matériau.

Réintégration dans la nature

La terre est un matériau recyclable, qui peut être utilisé tel quel, sans nécessiter de cuisson ou de transformation chimique.

À la fin de son cycle de vie, le bâtiment peut être démantelé et la terre qui n'a subi aucune altération peut être réutilisée pour construire une nouvelle structure ou être réintégrée dans le sol d'où elle a été extraite. Cette approche s'aligne parfaitement avec l'idéal d'une économie circulaire vers laquelle nous aspirons à tendre (Dethier, 2022).

Résistance au feu

Du fait de sa composition physique et chimique, la terre démontre une remarquable stabilité et une résistance au feu considérablement supérieure à celle de l'acier ou de la brique industrielle (Koungang & Morino, 2021).

Confort

Il convient de souligner que les constructions en terre offrent un niveau de confort de vie et d'utilisation particulièrement appréciable. Les murs et enduits en terre crue créent un environnement intérieur sain en ne diffusant aucune substance toxique tout en absorbant les odeurs. La structure granulaire de ce matériau, ainsi que sa porosité et sa capacité de changement de phase, lui permettent de réguler naturellement l'hygrométrie en laissant passer la vapeur d'eau (Dethier, 2022).

Par ailleurs, les murs en terre, grâce à leur poids et à leur densité, présentent une inertie thermique remarquable qui ralentit significativement les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (Dethier, 2022). Cela signifie que la chaleur accumulée pendant la journée dans l'épaisseur des parois est progressivement diffusée pendant la nuit, contribuant ainsi à maintenir une fraîcheur agréable dans les maisons pendant l'été.

Enfin, en raison de leur compacité, les murs en terre agissent également comme des barrières efficaces contre les bruits extérieurs indésirables tout en ayant la capacité d'absorber les sons produits à l'intérieur de la maison (Dethier, 2022). Ces

propriétés intrinsèques de la construction en terre ajoutent un niveau supplémentaire de confort et de bien-être pour les occupants, faisant de cette approche une option attrayante pour des espaces de vie sains, écologiques et agréables.

Résistance des matériaux

Les constructions en terre ont démontré leur aptitude à être solides et durables. Les exemples issus de l'architecture traditionnelle illustrent clairement la robustesse de ce matériau. Un exemple indéniable qui met en évidence ses remarquables capacités de résistance est le « Manhattan du désert », au Yémen et plus précisément à Shibam. Cette cité est renommée comme étant la plus ancienne ville de gratte-ciel. Avec uniquement de la terre et leurs compétences, les maçons de Shibam ont érigé des immeubles atteignant plus de 29 m de hauteur. Cette prouesse témoigne de manière impressionnante de l'utilisation ingénieuse et durable de la terre comme matériau de construction (Anger & Fontaine, 2009).



Figure 2.1 : Tours de Shibam



Figure 2.2 : Vue aérienne de Shibam

Les constructions en terre crue sont abondamment présentes dans toute l'Afrique, le Moyen-Orient et l'Amérique latine, et elles constituent également des habitats vernaculaires en Chine et en Inde. Toutefois, en Europe, cette méthode de construction a été largement délaissée, bien que des vestiges de bâtiments en terre crue subsistent encore dans le paysage, témoignant du passé. On peut trouver des exemples de ces édifices au Danemark, en Suède, en Allemagne, dans les pays de l'Europe de l'Est, ainsi qu'en Espagne, en France, en Grande-Bretagne et en Belgique

(Doat et al., 1979). La terre présente effectivement le potentiel d'être utilisable dans tous les climats, pourvu que l'on mette en place une conception adéquate incluant des mesures de protection telles que des fondations solides et une couverture adéquate, agissant comme des bottes et un chapeau protecteurs.

Esthétique

La terre offre une esthétique minimaliste et sensible. En tant que matériau vivant, elle présente une texture naturelle et captivante. De plus, chaque type de terre possède ses propriétés distinctes et convient à une mise en œuvre spécifique. Cette diversité contribue à enraciner davantage les constructions dans leur contexte, évitant ainsi l'uniformisation des styles à travers le monde. Cet aspect revêt une importance particulière en architecture car les constructions en terre permettent de préserver la diversité culturelle (Dethier, 2022).

Dans le contexte actuel de mondialisation et d'urbanisation rapide, de nombreuses pratiques culturelles architecturales uniques et riches en histoire sont menacées de disparition. Les tendances dominantes vers des constructions standardisées, caractérisées par des façades uniformes et planes, peuvent engendrer un appauvrissement du patrimoine architectural et culturel de différentes régions du monde.

Ces expressions architecturales vernaculaires, qui se sont développées au fil des siècles en harmonie avec l'environnement local, reflètent souvent les coutumes, les traditions et les valeurs propres à une communauté. Elles sont le fruit d'un savoir-faire transmis de génération en génération et sont imprégnées d'une identité culturelle unique. Cependant, face à la modernisation rapide des villes et à la recherche d'efficacité économique, ces pratiques sont de plus en plus négligées, voire oubliées.

Il est donc urgent que des recherches soient menées pour documenter, préserver et valoriser ces expressions architecturales vernaculaires. Ces études devraient s'intéresser non seulement à leur conception et à leur construction, mais aussi à leur contexte historique, social et culturel. L'inclusion de ces connaissances dans l'enseignement de la construction permettrait de sensibiliser les futurs

architectes, urbanistes et professionnels du bâtiment à la richesse et à l'importance de ces pratiques.

En protégeant et en valorisant ces expressions architecturales vernaculaires, nous contribuons non seulement à la préservation du patrimoine culturel, mais aussi à la diversité et à la richesse esthétique des paysages urbains et ruraux. Ces pratiques sont une source d'inspiration inestimable pour les futures générations et offrent la possibilité de concevoir des bâtiments plus respectueux de l'environnement, en tirant parti des enseignements du passé pour construire un avenir durable (Joffroy, 2016).

2.1.3 Limites de la terre crue

Vulnérabilité face à l'eau

Dans les régions à climat tempéré, telles que la Belgique, les propriétés mécaniques de la terre crue peuvent être altérées et sa durabilité limitée en raison des précipitations et du gel. De même, dans les régions équatoriales, les variations importantes d'humidité rendent les matériaux en terre crue instables, entraînant une érosion saisonnière. En l'absence de liant stabilisateur, le matériau peut se détériorer et produire de la poussière. Le contact avec l'eau et l'humidité rend également son utilisation plus complexe (Anger & Fontaine, 2009).

C'est pourquoi lors de la construction en terre crue, il est essentiel de prendre des précautions adéquates, comme avoir des fondations solides et un bon toit protecteur. En effet, pour préserver la solidité d'un édifice en terre, il est crucial de protéger le haut du mur contre la pluie. C'est pourquoi de nombreuses maisons en terre sont équipées d'une toiture à débordement. De même, il est tout aussi important de protéger le bas du mur. Souvent, un bloc en pierre ou en béton est utilisé comme soubassement pour éviter les infiltrations d'eau. En prenant ces mesures, on assure une meilleure résistance et une plus grande durabilité aux constructions en terre crue (Anger & Fontaine, 2009).

Fragilité sismique

Les structures en terre crue peuvent être vulnérables aux séismes, mais leur résistance peut être renforcée grâce à des techniques simples de construction. Des mesures telles que l'utilisation d'une forme octogonale pour la maison, des toits légers et rigides, ou des murs plus courts, permettent d'accroître leur capacité à faire face aux tremblements de terre. Ces approches offrent des solutions efficaces pour améliorer la résilience des constructions en terre crue lors de ces événements sismiques (Koungang & Morino, 2021).

2.1.4 La terre, un matériau granulaire

Avant d'aller plus loin, il est essentiel d'examiner le matériau qu'est la terre, sa composition, ses constituants et leur organisation spatiale.

Il est essentiel de noter que la terre utilisée dans la construction est généralement prélevée dans la deuxième couche du sol (Anger & Fontaine, 2009). En examinant la coupe verticale du sol de la figure 2.3, on peut identifier plusieurs couches horizontales superposées, également appelées « horizons ». L'horizon A, qui se trouve en surface et présente une teinte plus sombre que les couches inférieures, correspond à la terre végétale. Toutefois, cette couche n'est pas appropriée pour la construction car elle contient une quantité excessive de matières organiques. L'utilisation de matériaux provenant de l'horizon A donnerait lieu à des produits insuffisamment résistants, susceptibles de favoriser la croissance de végétaux indésirables.

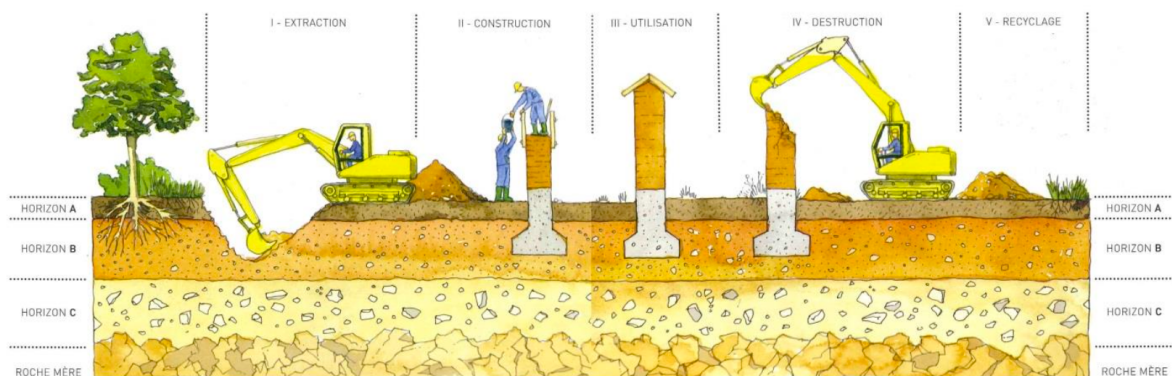


Figure 2.3 : La terre, un matériau recyclable

L'horizon B, en revanche, est la terre utilisée dans la construction (Anger & Fontaine, 2009). En-dessous de l'horizon C, qui correspond à de la roche en décomposition et se situe à mi-chemin entre la roche et la terre, se trouve la roche mère. La terre, étant déjà un matériau désagrégé, ne se détériore pas avec le temps (lorsqu'elle est correctement protégée de l'eau), contrairement aux autres matériaux de construction qui peuvent rouiller, pourrir ou subir des attaques chimiques. Cette caractéristique confère un avantage significatif au matériau terre par rapport aux autres matériaux : une fois le bâtiment arrivé en fin de vie, la terre peut être réutilisée pour construire un nouvel édifice, ou bien elle peut être rendue au sol d'où elle provient (Anger & Fontaine, 2009). Cette capacité de recyclage et de retour au sol contribue à la durabilité et à la pérennité des constructions en terre.

La terre, de la même manière que le sable ou le béton, se compose de grains, ce qui en fait un matériau divisé (Paulus, 2015). Chaque terre est un mélange de grains de différentes tailles, ayant des noms spécifiques en fonction de leurs dimensions. Dans l'ordre décroissant de taille, on trouve les cailloux, les graviers, les sables, les silts et les argiles, dont les proportions varient selon le type de terre.

Les graviers et le sable constituent les éléments grossiers de la terre utilisée dans la construction. Ils forment le squelette du matériau et améliorent sa perméabilité à l'eau. De plus, la fraction sableuse contribue à limiter le gonflement et le retrait de la terre, ce qui est bénéfique pour la stabilité et la durabilité des constructions en terre (Paulus, 2015).

	Taille
Cailloux	entre 20 cm et 2 cm
Graviers	entre 2 cm et 2 mm
Sables	entre 2 mm et 60 μ m
Silts	entre 60 μ m et 2 μ m
Argiles	au-dessous de 2 μ m

Figure 2.4 : Classification des grains

En revanche, la fraction fine de la terre, appelée argile et mesurant moins de 2 μ m, est quelque peu distincte. Les particules qui la composent sont si minuscules et plates qu'elles sont invisibles à l'œil nu. Lorsqu'elles sont mélangées à de l'eau, elles forment une pâte d'apparence homogène, ressemblant à une sorte de colle (Anger &

Fontaine, 2009). La terre est souvent considérée comme un béton dont l'argile serait le liant. L'argile est constituée de grains dont la taille et la forme particulières permettent aux forces capillaires d'être beaucoup plus intenses. En réalité, la terre fonctionne pratiquement de la même manière que le béton, composé lui aussi de graviers et de sable. Ce qui différencie le pisé du béton est le liant : du ciment pour le béton et l'argile pour la terre (Anger & Fontaine, 2009).

2.1.5 Techniques de construction en terre crue

Comme nous l'avons vu précédemment, chaque type de terre possède ses particularités, ce qui la rend unique. Certaines terres peuvent être riches en argile, tandis que d'autres seront plus riches en granulats. En raison de ces différentes caractéristiques, il est indéniable que ces terres doivent être utilisées et mises en œuvre selon leurs spécificités. C'est dans cette perspective que les constructions vernaculaires en terre, étudiées à travers le monde, présentent des caractéristiques qui leur sont propres en fonction de leur localisation géographique. L'analyse des méthodes traditionnelles de construction a conduit à l'identification de douze approches différentes pour l'exploitation de ce matériau (Dethier, 2022). La figure 2.5 illustre les douze principes d'utilisation de la terre crue, qui peuvent être associés à trois grandes catégories de techniques constructives. La première catégorie utilise la terre pour créer une structure porteuse préalable. La deuxième catégorie met en œuvre la terre sous forme de structures monolithiques et massives. Enfin, la troisième option consiste à utiliser la terre sous forme de maçonnerie composée de petits éléments (Dethier, 2022).

Chacune de ces approches s'adapte aux propriétés spécifiques de la terre utilisée, démontrant ainsi une utilisation réfléchie et adaptée de ce matériau selon les conditions locales.

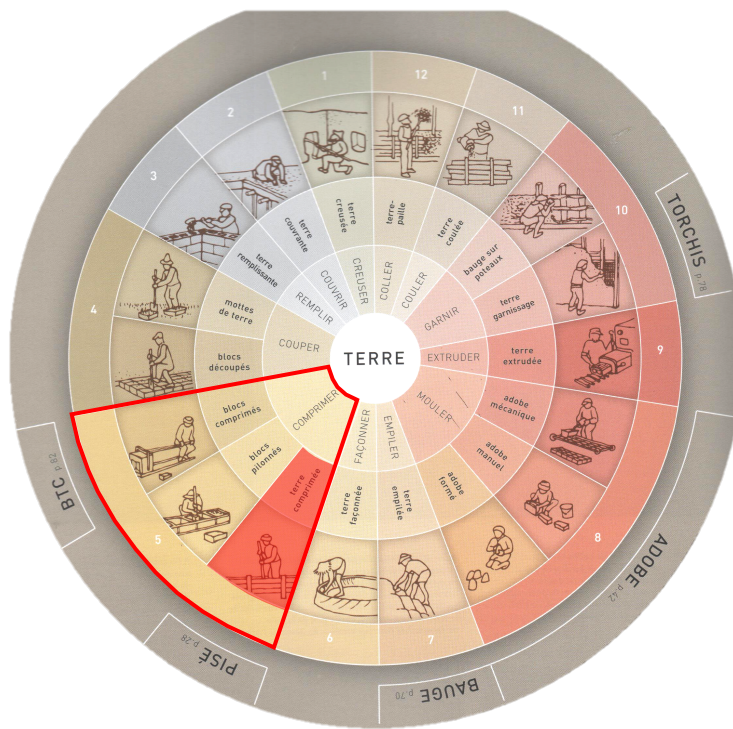


Figure 2.5 : Méthodes d'utilisation de la terre dans les constructions

2.2 Le pisé

2.2.1 Contexte

Dans cette étude, l'accent sera principalement mis sur la catégorie de murs massif en terre comprimée, communément appelée pisé, qui est mis en évidence dans la figure 2.5. L'objectif de cette recherche est de mettre en œuvre des murs monolithiques en terre comprimée, tels que le pisé, tout en cherchant à améliorer leur efficacité grâce à des expérimentations approfondies. Ainsi, une attention particulière sera accordée à la technique du pisé dans ce chapitre.

Le pisé est une technique qui existe depuis au moins trois millénaires (Guillaud et al., 2016). Cette technique de construction consiste à réaliser des murs massifs, généralement porteurs, en terre crue en la compactant dans un coffrage par lits successifs (Gandreau et al., 2018). La technique du pisé consiste à compacter des sols, parfois stabilisés avec du ciment ou d'autres liants, entre des planches verticales de coffrage, puis à les retirer en laissant un mur de terre en masse. Cette technique est surtout utilisée dans certaines régions dont la composition du sol ne convient pas à la fabrication de briques d'argile séchées au soleil (McHenry, 1989). On constate également qu'elle a été utilisée dans les régions arides d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient, où la terre n'était qu'un matériau de construction logique et les hauts

murs massifs avec quelques petites ouvertures qui sont une protection contre la chaleur et la poussière du désert.

2.2.2 Le pisé durant le XX^e siècle

La construction en pisé va persister bien des années. C'est dans le courant du XX^e siècle que ce savoir-faire du pisé disparaîtra progressivement. Effectivement, nombreux sont les spécialistes de cette technique qui sont morts durant la Première Guerre mondiale. Plus tard, après la Seconde Guerre mondiale, les impératifs de reconstruction imposeront un retour massif au béton de ciment, laissant la technique de pisé au passé (Gandreau et al., 2018).

Il faudra attendre la deuxième moitié du XX^e siècle pour que la technique du pisé revoie le jour. En effet, avec la « crise de l'énergie » survenue en 1973, nos recherches se sont tournées vers des alternatives face à la forte consommation des ressources et énergies non renouvelables. Ainsi, les années 70-80 furent le début de la recherche en matière de réponses bioclimatiques exploitant les caractéristiques et performances thermiques avantageuses du matériau terre (Joffroy et al., 2013). De plus, ce mouvement a été considérablement dynamisé par un événement culturel : l'exposition « Des architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire » présentée en 1981 au Centre Pompidou à Paris puis dans les grandes capitales du monde (Guillaud, 1996).

2.2.3 Avantages du pisé

Les avantages de cette mise en œuvre sont inévitablement liés et fortement similaires à ceux évoqués précédemment dans la section sur la terre crue.

En ce qui concerne la durabilité dans la construction, plusieurs études ont confirmé que différentes formes de matériaux en terre ont le plus faible impact environnemental. Comme l'illustre la figure 2.6, le pisé affiche une consommation intrinsèque d'énergie considérablement inférieure à celle d'autres matériaux de construction.

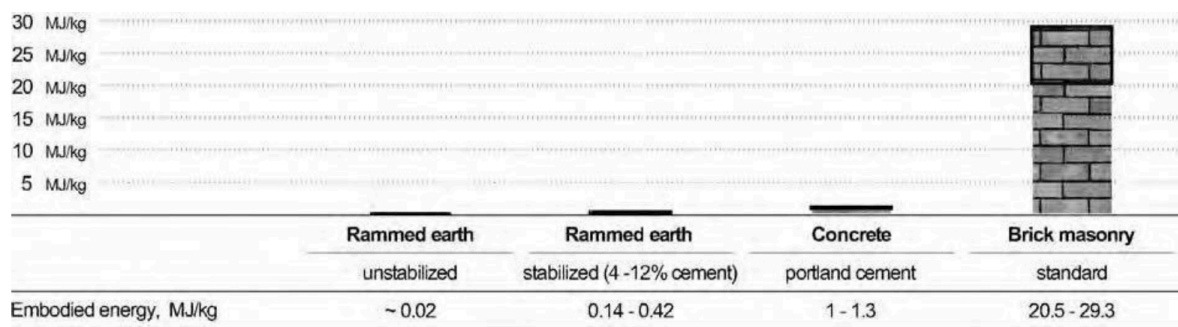


Figure 2.6 : Énergie intrinsèque du pisé par rapport au béton et à la brique

De plus, le pisé présente des avantages en termes de confort, d'isolation acoustique et d'esthétique, comme évoqué précédemment.

2.2.4 Performances mécaniques

Le pisé offre indéniablement un avantage majeur puisqu'il permet d'être porteur (Comte, s. d.). Malgré tout, la résistance mécanique du pisé peut varier en raison de plusieurs facteurs liés à la composition des matériaux, à la technologie de construction et à son utilisation. Les performances mécaniques dépendent notamment de la proportion et des propriétés des mélanges de terre comprimée utilisés. Les différentes argiles ont une structure lamellaire de minéraux, tandis que le sable et les graviers peuvent présenter des agrégats aux formes variées, allant des angles aigus aux agrégats plus lisses. Ces légères variations dans la structure du sol peuvent se répercuter sur les performances mécaniques de la construction (Long, 2021).

La résistance structurelle de la terre comprimée peut être comparée à celle du béton, bien qu'elle présente une performance significativement inférieure. Lorsqu'elle n'est pas stabilisée, la terre comprimée montre une faible résistance à la tension, mais une bonne résistance à la compression. La résistance à la compression, illustrée à la figure 2.7, des éléments de construction en terre sèche, tels que les murs en terre comprimée et les blocs de terre, se situe généralement entre 0,5 et 5 MPa (Minke, 2006). Ce chiffre dépend également de la quantité et du type d'argile, de la distribution

granulométrie du limon, du sable et des agrégats plus grands impliqués, ainsi que de la méthode de préparation et de compactage.

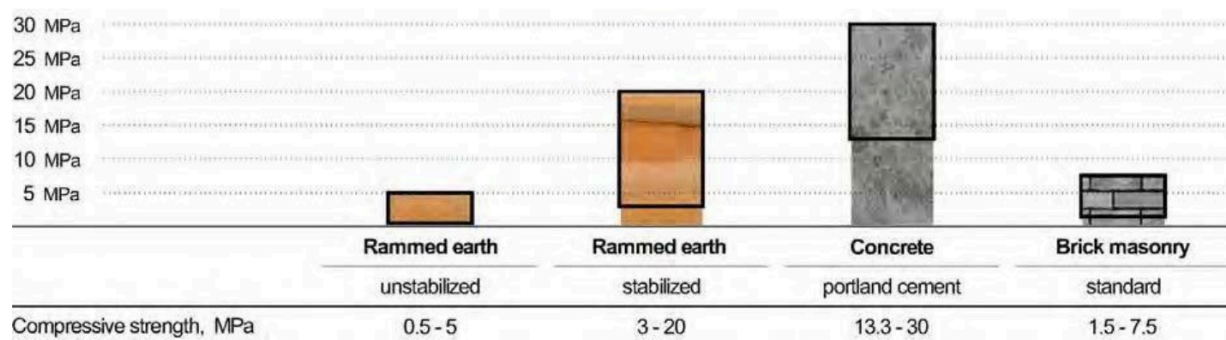


Figure 2.7 : Résistance caractéristique à la compression de la terre comprimée, du béton et de la maçonnerie de briques

Minke² (2006) a réalisé des essais de force de liaison et de chargement excentrique qui ont clairement démontré l'inaptitude des matériaux à supporter des conditions de tension considérable. Les valeurs critiques de résistance à la traction (figure 2.8) et au cisaillement se situent entre 25 et 500 g/cm², représentant généralement environ 10 à 13 % de la résistance à la compression. Ces résultats soulignent la limitation des propriétés mécaniques des matériaux en termes de résistance à la traction et au cisaillement.

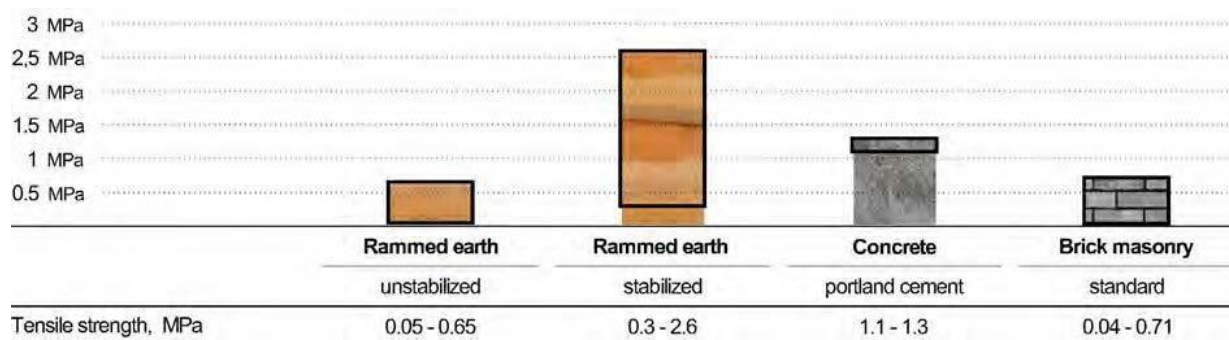


Figure 2.8 : Résistance caractéristique en traction de la terre comprimée, du béton et de la maçonnerie de briques

Dans la terre comprimée, l'amélioration significative de la performance du matériau peut être mise en œuvre avec la stabilisation. Avec 5 à 8 % de ciment dans le mélange typique de terre, la résistance à la compression peut être augmentée

² Gernot Minke est un architecte allemand spécialisé dans les constructions écologiques qui a écrit de nombreux ouvrages sur la construction en terre-argile.

jusqu'à 18 MPa, ce qui n'est pas très différent de la valeur typique de 25 MPa pour le béton classique (Guettala et al., 2006).

2.2.5 Retraits et fissures

La plupart des études indiquent que la terre comprimée peut subir un rétrécissement et se fissurer, ce qui constitue un événement indésirable en raison des risques de réduction de la résistance et des dommages permanents tels que l'érosion due à l'entrée d'humidité (Birznieks, 2013). Le risque de déformation le plus important se produit lorsque le matériau sèche ou est en contact direct avec l'humidité, selon Minke (2006). Des expériences en laboratoire ont prouvé la relation linéaire entre le rétrécissement et la teneur en eau. Les mélanges de terre humide, avec une teneur en eau plus élevée, ont tendance à se rétracter de manière proportionnelle et risquent de se fissurer davantage que les mélanges plus secs. Par exemple, les mélanges de terre composée de 4 % d'argile, 25 % de limon et 71 % de sable atteignent un retrait linéaire de 1 % pour une réduction de 10 % de la teneur en eau, et de 2,5 % pour une teneur en eau de 25 % dans des conditions environnementales spécifiques.

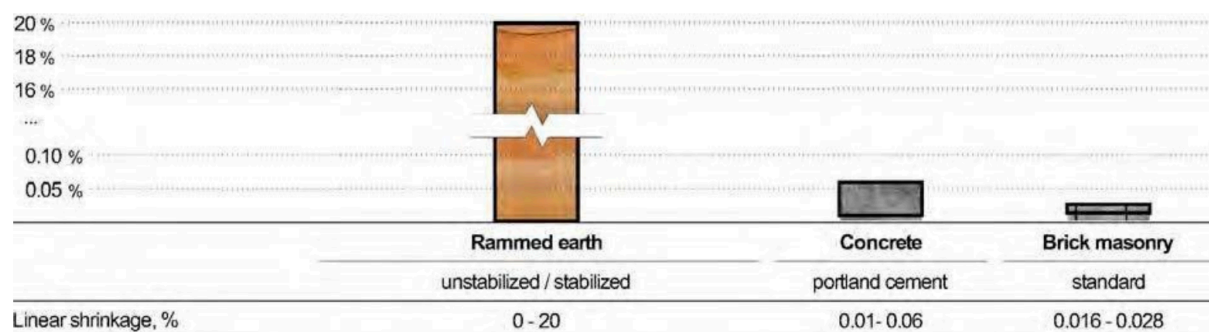


Figure 2.9 : Retrait linéaire caractéristique

La proportion et le type d'argile utilisés peuvent également influencer le rétrécissement. L'argile pure peut présenter un rétrécissement de 4 % à 25 %. La distribution granulométrique des agrégats joue également un rôle déterminant dans le rétrécissement (Minke, 2006).

De même, la température et l'humidité de l'air ambiant sont des facteurs importants. La terre comprimée a tendance à sécher plus rapidement que la brique cuite et le béton, ce qui accentue le risque de fissuration. Afin de ralentir le séchage,

l'humidité de l'air ambiant et la protection contre une exposition directe au soleil sont prises en compte.

Pour la terre stabilisée au ciment, le rétrécissement peut augmenter rapidement au cours des quatre premiers jours, puis ralentir progressivement (Bahar et al., 2004). Pour réduire le rétrécissement de séchage et la fissuration, il est donc recommandé de contrôler la phase de durcissement pendant les quatre premiers jours. Les particules de sable contribuent également à réduire le rétrécissement, car elles s'opposent au mouvement de rétraction.

2.2.6 Mise en œuvre



Figure 2.10 : Mise en œuvre du pisé traditionnel

La mise en œuvre du pisé est illustrée à la figure 2.10 et se déroule de la manière suivante : une fois la terre extraite du sol, elle est versée dans un coffrage à l'aide d'un seau. Les planches du coffrage sont soutenues par des chevrons, maintenus par de solides traverses appelées « clés », afin de résister aux poussées horizontales de la terre. De fines couches de terre (10-20 cm d'épaisseur) sont ensuite étalées puis damées à l'aide d'un psoir. Cet outil est constitué d'un manche en bois sur lequel est fixée une masse en bois ou en métal. Une fois que le coffrage est plein, il est déplacé horizontalement le long du mur.

Le mélange de terre crue étant relativement sec, le décoffrage peut se faire directement après le tassement. Le tassement se fait « couche par couche » à l'aide des outils nommés psoir, fouloir et dame.

Ainsi, on voit apparaître des strates horizontales, qui deviennent dès lors une caractéristique esthétique majeure du pisé. La texture riche par son grain et sa couleur

confère au pisé une esthétique brute et minérale (Gozin-Müller, s. d.). Sa couleur, variant selon les régions, lui confère une bonne intégration dans le paysage. Suivant les caractéristiques du sol, elle peut prendre une teinte rouge, jaune, gris et orange (Long, 2021). Les strates horizontales déterminent les « paliers de tassement » de la terre. Sa texture peut prendre différents aspects en ajoutant des pigments de couleur, en jouant sur les épaisseurs des strates... laissant ainsi une grande liberté de conception esthétique (Paulus, 2015.).



Figure 2.11: Aerie House de The Construction Zone 2009, Sedona AZ

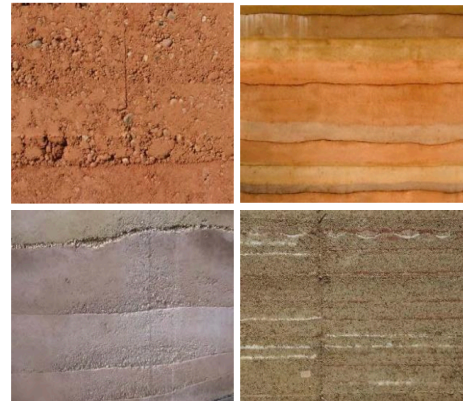


Figure 2.12 : Variations de couleur et de texture de la terre pisée naturelle

2.2.7 Modernisation du pisé

Cette technique constructive évolue pour devenir plus efficace et rapide, grâce aux innovations de pionniers tels que Martin Rauch, un architecte autrichien. Ses réalisations, aux formes nouvelles et modernes, visent à associer la tradition constructive du pisé avec l'architecture contemporaine.

La technique de mise en œuvre s'améliore avec des outils perfectionnés et mécanisés, comme les fouloirs pneumatiques capables de donner 1 800 coups par minute pour tasser la terre.



Figure 2.13 : Fouloir pneumatique en action



Figure 2.14 : Différents modèles de fouloirs pneumatiques

De plus, les systèmes de coffrage ont beaucoup évolué et sont devenus très diversifiés, la plupart étant issus de l'industrie du béton. Par exemple, certains d'entre eux, comme les coffrages grimpants, permettent une progression verticale plus rapide que la progression horizontale traditionnelle.

Afin de gagner du temps, certaines entreprises utilisent la méthode de préfabrication, qui limite les déplacements de matière sur le chantier tout en améliorant la qualité des blocs de pisé. Les dernières avancées technologiques permettent également de créer des coffrages spécifiques pour les formes complexes à l'aide de modélisation 3D et de découpes au laser (Développement de l'architecture contemporaine en pisé, freins et leviers, l'Orangerie à Lyon by Calliope Trouillet - Issuu, s. d.). Ces progrès contribuent à rendre la construction en pisé plus attrayante et compétitive dans le contexte de l'architecture contemporaine.



Figure 2.15: Earth dome, Dome de terre réalisé en 2014, Martin Rauch accompagné de ses étudiants



Figure 2.16 : L'orangerie, Lyon, 2020

2.2.8 Vitesse de construction

Bien que des améliorations aient été apportées, la technique du pisé reste toujours relativement complexe et exigeante. En effet, la mise en œuvre de travaux en terre comprimée nécessite généralement la collaboration d'une équipe composée d'au moins trois travailleurs, chacun ayant des tâches spécifiques. Un membre est chargé de la livraison du matériau, un autre du nivellement de la terre non compactée, tandis que le dernier est responsable du battage. Selon les pratiques de construction, une équipe peut accomplir entre 10 à 15 m² de mur massif d'une épaisseur de 300 mm par jour, ou entre 3 à 5 m² par personne respectivement. Ce rythme est considéré comme plus lent par rapport à la construction avec du béton ou des briques (Hall & Swaney, 2005). Nous aurons l'occasion de comparer les méthodes de mise en œuvre et leurs temps unitaires³ plus tard dans ce travail. Cela permettra d'observer les différences entre le pisé, le béton et la terre projetée à partir des résultats de nos expérimentations.

2.2.9 Coût

Malheureusement, le coût de construction en pisé est toujours un des freins majeurs quant à sa mise en œuvre. Bien que la matière première soit peu coûteuse, la technique de mise en œuvre représente un sérieux investissement. Effectivement, la réalisation d'un mur en pisé nécessite un temps considérable, certaines sources affirment une augmentation du coût de 5 à 15 % par rapport aux autres types de construction. Par ailleurs, le prix de la mise en œuvre va dépendre du développement économique du pays dans lequel le travail sera effectué. Par exemple, dans un pays faiblement développé le prix sera bien plus faible que dans un pays développé dû à un faible coût de la main-d'œuvre (Long, M. 2021).

Cette mise en œuvre est également fortement tributaire des conditions météorologiques lorsqu'elle est réalisée sur place, car elle est vulnérable à la pluie et

³ Les valeurs de temps unitaire (TU) correspondent à des durées de travail d'un ouvrier moyen pour réaliser à lui seul une unité d'ouvrage.

au gel. De plus, la mise en œuvre du pisé exige une main-d'œuvre qualifiée avec une formation spécifique (Gozin-Müller, s. d.).

2.3 Les granulats recyclés

2.3.1 Contexte

Le secteur de la construction est le principal consommateur de matières premières et de matériaux. La politique actuelle veut que l'on renouvelle nos bâtiments et nos voiries. Cette tendance à la (re)construction et la démolition engendre environ 33 % des déchets produits annuellement en Europe. En Belgique, nous produisons un peu plus de 20 millions de tonnes de déchets de construction par an, ce qui correspond à 1,5 tonne de déchets par habitant en une année (Utilisation de granulats de béton recyclés dans le béton., s. d.). Ces déchets ont longtemps été considérés comme des éléments inintéressants et ont été utilisés en tant que remblais afin de libérer les décharges.

Pourtant, ces déchets inertes (béton, tuiles, briques, tarmac, carrelages...) présentent un réel potentiel de valorisation. En effet, les connaissances et techniques de construction s'améliorent. Ainsi, de plus en plus de normes et méthodes ont vu le jour afin de pouvoir revaloriser ces déchets.

De plus, le recyclage de ces déchets inertes présente un réel atout écologique. D'un côté, l'extraction de granulats naturels a un impact non-négligeable sur l'environnement : en plus de représenter un coût énergétique élevé, les détonations d'explosifs provoquent des nuisances sonores et vibratoires (Wiomont, 2022). C'est la raison pour laquelle les pouvoirs publics se montrent de plus en plus réticents quant à l'octroi de permis d'urbanisme pour ce type d'activité. D'un autre côté, le recyclage des déchets inertes de construction et de démolition s'inscrit dans un modèle d'économie circulaire. Il est cependant important de noter que, pour que cette réallocation des déchets inertes conserve son caractère positif sur l'environnement, certaines règles doivent être respectées (RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf, s. d.). Le [tableau 2.1] ci-dessous

synthétise les points sur lesquels il s'agit d'être vigilant en fonction du type d'utilisation des granulats recyclés :

Application	Exigences associées aux déchets collectés	Points de vigilance	Leviers environnementaux
Béton de granulats recyclés	Elevée (homogénéité, traçabilité...)	<ul style="list-style-type: none"> Formulation du béton (augmentation du taux de ciment, d'additif). Distances de transport (du déchet au site de traitement, et de ce site au site d'utilisation VS situation du site de fabrication des granulats vierges) Consommation d'énergie associée au procédé de recyclage pour lequel le niveau de qualité requise des granulats recyclés est élevé (proche de celui des granulats vierges : dimensions, substances...) 	<ul style="list-style-type: none"> Trier et recycler les déchets sur chantier à l'aide de machines mobiles amenées sur site si cela permet d'assurer des distances de transport autour de 30 km. Maximiser les flux de matières traités par les machines (concasseurs...) afin d'amortir leur consommation d'énergies fossiles. Assurer un taux de valorisation maximal du processus de recyclage afin de minimiser les pertes non valorisées et envoyées en ISDNI. Pour les déchets de béton armé, recycler l'acier.
Sous couches de voirie et chemins forestiers	Moyenne	<ul style="list-style-type: none"> Distances de transport (du déchet au site de traitement, et de ce site au site d'utilisation VS situation du site de fabrication des granulats vierges) Consommation d'énergie associée au procédé de recyclage. Substances polluantes éventuelles. 	<ul style="list-style-type: none"> Trier et recycler les déchets sur chantier à l'aide de machines mobiles amenées sur site si cela permet d'assurer des distances de transport autour de 30 km. Maximiser les flux de matières traités par les machines (concasseurs...) afin d'amortir leur consommation d'énergies fossiles. Assurer un traitement (tri, concassage, criblage) minimal permettant de répondre au CdC demandé pour le granulat. Assurer un taux de valorisation maximal du processus de recyclage afin de minimiser les pertes non valorisées et envoyées en ISDNI. Pour les déchets de béton armé, recycler l'acier.
Remblaiement de carrières	Faible	<ul style="list-style-type: none"> Distances de transport (du chantier à la carrière). Niveau de traitement. Quantité d'indésirables et polluants. 	<ul style="list-style-type: none"> Trier et traiter les déchets sur chantier ou sur le site de la carrière à réhabiliter. Assurer le tri permettant la séparation de la quantité minimale d'indésirables et de valoriser les métaux, puis peu ou pas traiter mécaniquement.

Tableau 2.1 : Points de vigilance et leviers environnementaux en fonction du type d'utilisation des granulats recyclés

Selon la Directive Européenne 2008/98/CE (« Waste Framework Directive »), les états membres sont obligés de recycler et de valoriser au moins 70 % des déchets inertes de construction et de démolition non-dangereux depuis 2020 (Simon et al. - UTILISATION DES SABLES ET GRANULATS RECYCLÉS DANS .pdf, s. d.).

En Belgique, la législation concernant le recyclage de ces déchets est régionalisée, ce qui signifie que la Flandre, la Wallonie et Bruxelles-Capitale possèdent chacune leurs propres directives. En ce qui concerne la Wallonie, le recyclage des déchets de construction et de démolition non-dangereux a été rendu obligatoire depuis le 1^{er} janvier 2006 en vertu de l'Arrêté du Gouvernement Wallon du 18 mars 2004 (Simon et al. - UTILISATION DES SABLES ET GRANULATS RECYCLÉS DANS .pdf, s. d.).

Depuis, il est interdit de mettre les déchets inertes en décharge. Cette réglementation, autorisant l'utilisation de sable et de granulats recyclés dans les couches de fondation et de sous-fondation, vise à encourager le recyclage et la valorisation des déchets de construction et de démolition.

2.3.2 Transformation de déchets de construction et de démolition en granulats recyclés

Les granulats recyclés sont obtenus à partir de déchets inertes de construction et de démolition. Ces derniers sont définis par la Directive 1999/31/CE du conseil du 26 avril 1999 comme étant des déchets qui « *ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine* » (RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf, s. d.).



Figure 2.17 : Granulats recyclés

Les déchets inertes de construction et de démolition, pour être transformés en granulats, doivent suivre un processus composé de différentes phases de tri et de broyage (RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf, s. d.). Celles-ci peuvent être synthétisées de la sorte :

Récupération des déchets

La première étape consiste à récolter les déchets inertes issus de la construction et de la démolition et de transporter ceux-ci en camion vers des centres de tri et de gestion des déchets. Afin de diminuer l'impact écologique de cette phase, il convient d'acheminer les déchets vers un centre le plus proche possible de l'endroit de démolition. Selon le guide réalisé dans le cadre du projet Interreg Poctefa RCDiGreen (RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf, s. d.), une distance moyenne de 30 km entre le site de fabrication des granulats recyclés et le chantier sur lequel ils seront utilisés est adéquate.

Contrôle

Pour atteindre un niveau de recyclage maximal, les granulats doivent être de la meilleure qualité possible. Pour ce faire, un premier contrôle visuel et magnétique permettant d'extraire les impuretés et les éléments métalliques est réalisé. Ce tri permet, entre autres, de dissocier les différents matériaux. Les déchets doivent alors être triés en privilégiant la déconstruction à la démolition. En effet, contrairement à la démolition, la déconstruction permet de faire un premier tri évitant de mélanger les déchets de plâtre, bois, plastiques, etc.

Extraction des déchets valorisables en granulats recyclés

Le processus se poursuit par une étape de broyage et concassage des déchets à l'aide de machines telles que des brises roche hydrauliques, des pinces hydrauliques ou des concasseurs à percussion. Certains centres permettent de réaliser le tri par flottaison. Une fois que tout est nettoyé, on procède à la démolition. Trois manières sont possibles, soit à la main (pour les petits volumes), soit à l'aide d'engins (pelleteuse, etc.), soit par dynamitage (pour les bâtiments de grande envergure). Il est certain que ces étapes prennent plus de temps et sont plus onéreuses, néanmoins elles peuvent impacter la qualité du béton (De Larrard & Colina, 2018).

Traitement secondaire

Il s'agit d'un second processus de concassage et de criblage permettant d'obtenir le type de granulats recyclés requis en fonction de leur future utilisation. Les déchets sont stockés et à nouveau triés dans un centre de recyclage. Après cela, ils peuvent être concassés et criblés (tri sur base de la taille des granulats) (L'urban mining : vers une construction circulaire | Les granulats recyclés, s. d.). Le résultat obtenu donne un ensemble hétérogène se présentant sous forme d'un mélange de granulats naturels, de pâte de ciment durci, de brique, de tuile. Un contrôle environnemental et de qualité est effectué sur les granulats leur attestant la conformité aux normes européennes. Enfin, depuis le 1er juillet 2021, les granulats recyclés peuvent sortir du statut de déchet et être mis sur le marché s'ils respectent la conformité technique et environnementale (De Larrard & Colina, 2018).

Transport

Cette dernière étape consiste à déplacer les granulats recyclés obtenus vers le chantier sur lequel ils seront valorisés. À nouveau, il est important de minimiser la distance de transport puisque cette étape représente l'impact le plus important sur l'environnement.

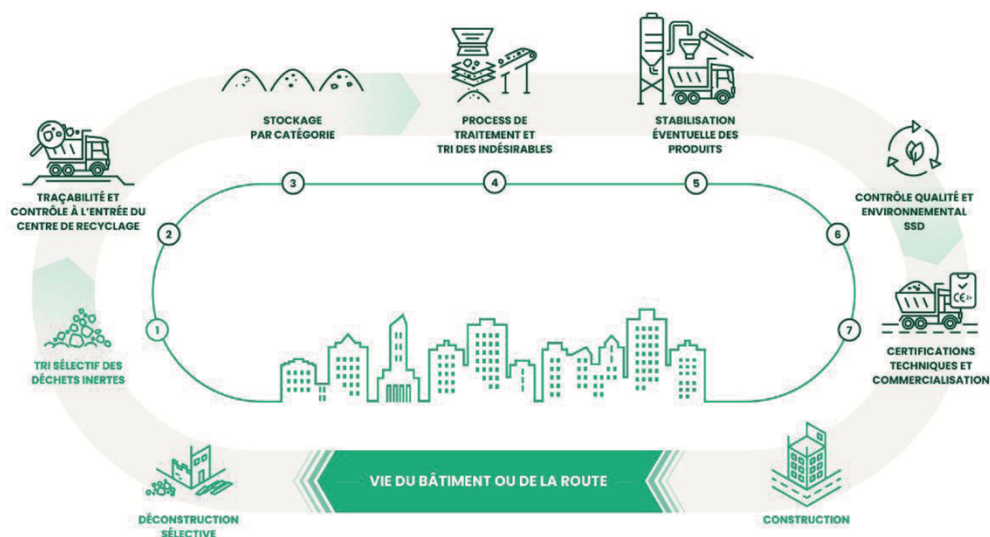


Figure 2.18 : De la déconstruction à la reconstruction

2.3.3 Caractéristiques

Il existe différents types de granulats recyclés. Ces derniers ont été classifiés en fonction de leur composition et de leur qualité. La norme européenne NBN EN 933-11 propose une classification des granulats recyclés en fonction de la composition de leurs constituants. La méthode d'évaluation se base sur l'identification et l'estimation des proportions relatives des différents constituants présents dans la fraction granulaire grossière (> 4 mm) des granulats (COPRO.pdf, 2012.). La classification résultant de cette méthode est décrite dans le [tableau 2.2] ci-dessous :

Composition NBN EN 933-11	Gravillon de béton		Gravillon asphaltique		Gravillon mixte		Gravillon de maçonnerie		Gravillon mixte et asphaltique		Gravillon de béton et asphaltique	
	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie
Rc	≥ 70	Rc ₇₀	Non requis	Rc _{NR}	Non requis	Rc _{NR}	Non requis	Rc _{NR}	Non requis	Rc _{NR}	Non requis	Rc _{NR}
Rcug	≥ 90	Rcug ₉₀	≤ 30	Rcug ₃₀₋	≥ 50	Rcug ₅₀	≤ 40	Rcug ₄₀₋	≥ 30	Rcug ₃₀	≥ 70	Rcug ₇₀
Rb	≤ 10	Rb ₁₀₋	≤ 10	Rb ₁₀₋	≤ 50	Rb ₅₀₋	≥ 60	Rb ₆₀	≤ 50	Rb ₅₀₋	≤ 10	Rb ₁₀₋
Ra	≤ 5	Ra ₅₋	≥ 70	Ra ₇₀	≤ 5	Ra ₅₋	≤ 5	Ra ₅₋	≤ 30	Ra ₃₀₋	≤ 30	Ra ₃₀₋
Rg	≤ 2	Rg ₂₋	≤ 2	Rg ₂₋	≤ 2	Rg ₂₋	≤ 2	Rg ₂₋	≤ 2	Rg ₂₋	≤ 2	Rg ₂₋
X	≤ 1	X ₁₋	≤ 1	X ₁₋	≤ 1	X ₁₋	≤ 1	X ₁₋	≤ 1	X ₁₋	≤ 1	X ₁₋
FL	≤ 5	FL ₅₋	≤ 5	FL ₅₋	≤ 5	FL ₅₋	≤ 5	FL ₅₋	≤ 5	FL ₅₋	≤ 5	FL ₅₋

Tableau 2.2 : Classification des granulats recyclés

Les différentes catégories de constituants sont :

- Rc : béton et mortier
- Rcug : pierre naturelle
- Rb : briques, tuiles, béton cellulaire non-flottant, maçonnerie en silicate de calcium
- Ra : matériaux bitumeux
- Rg : verre
- X : autres (bois, plastique, gypse, plâtre, etc.)
- FL : éléments flottants

La norme européenne NBN EN 12620 définit les caractéristiques minimales requises des granulats utilisés pour le béton. Les valeurs minimales des composants diffèrent suivant qu'il s'agit de granulats mixtes ou de granulats de béton. La norme européenne NBN EN 15-001 précise ces valeurs minimales dans le [tableau 2.3] ci-dessous :

Norme NBN 15-001		
Constituants	Granulats mixtes de type B+	Granulats de béton de type A+
	Pourcentage en masse requis [%]	Pourcentage en masse requis [%]
Rc	≥ 50	≥ 90
Ru	/	
Rcu	≥ 70	≥ 95
Rb	≤ 30	
Ra	≤ 5	≤ 1
XRg	≤ 2	$\leq 0,5$
FL	≤ 2	≤ 2

Tableau 2.3 : Caractéristiques minimales requises des granulats utilisés pour le béton

On distingue également deux types de granulats recyclés en fonction de leur granulométrie :

- les agrégats fins dont le diamètre granulaire est inférieur à 4 mm ;
- les agrégats grossiers dont le diamètre granulaire est supérieur à 4 mm.

	Granulats fins	Granulats grossiers
Granulats recyclés	5.17 %	2.16 %
Granulats naturels	0.92 %	0.91 %

Tableau 2.4 : Coefficient d'absorption eau des granulats recyclés et naturels

En effet, les propriétés des granulats recyclés dépendent de leur granulométrie. La masse volumique des granulats fins varie entre 1 970 et 2 140 kg/m³ alors que celle des granulats grossiers évolue entre 2 120 et 2 430 kg/m³ (Wiomont, 2022). Intuitivement, la densité des granulats recyclés varie en fonction des particules qui les composent. Par ailleurs, la densité des granulats recyclés est inférieure à celles des granulats naturels, qu'il s'agisse de granulats fins ou grossiers. De même, le type de granulats (recyclés/naturels et fins/grossiers) influence leur coefficient d'absorption d'eau [tableau 2.4]. De fait, de manière générale, les granulats recyclés auront une densité plus faible que les granulats non-recyclés et une plus forte absorption d'eau (Wiomont, 2022).

La plus forte absorption des granulats recyclés vient de la forme des particules recyclées et de leur nature. Dans le cas de fines de béton recyclé, une forte absorption granulaire peut être expliquée par une forte teneur en pâte de ciment et une plus grande porosité des particules contenues dans les fines recyclées (Wiomont, 2022).

De plus, la quantité de céramique contenue dans les granulats recyclés influence également leur densité et leur coefficient d'absorption d'eau. Plus la composition en céramique est élevée, plus faible sera la densité. Inversement, plus la teneur en céramique est élevée, plus le coefficient d'absorption d'eau est important (Long, M. 2021).

En conclusion, les différentes propriétés des granulats recyclés dépendent de leur composition et de leur granulométrie.

2.3.4 Évaluation environnementale

Au vu du caractère novateur du process, la littérature scientifique n'offre pas encore de conclusion formelle concernant l'impact environnemental engendré par l'utilisation de granulats recyclés dans la fabrication de béton. Cependant, une méthode a été identifiée pour évaluer l'influence de l'utilisation de granulats recyclés sur l'environnement. Il s'agit de l'analyse du cycle de vie (ou ACV) (*Utilisation de granulats de béton recyclés dans le béton.*, s. d.). Les ACV permettent d'étudier l'impact environnemental tout au long du cycle de vie des matériaux, de leur extraction ou production à leur élimination ou revalorisation. Sur base de cette méthode, des études ont été menées afin de comparer l'impact environnemental d'un béton fabriqué à partir de granulats recyclés à celui d'un béton classique. Les conclusions sont les suivantes :

- La réduction de l'impact environnemental dépend de la quantité de ciment supplémentaire nécessaire à la fabrication de béton à base de granulats recyclés. En effet, les quantités de CO₂ émises lors de la production de ciment sont importantes, ce qui explique les conséquences négatives sur son impact environnemental et sur le réchauffement climatique. In fine, l'avantage

environnemental dépend de la composition du béton et notamment de sa teneur en ciment (RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf, s. d.).

- L'impact environnemental est également fonction des distances de transport nécessaires à la réalisation du process. Selon les études existantes, le trajet séparant le lieu de fabrication des granulats recyclés du chantier sur lequel ils seront utilisés ne devrait pas excéder 30 kilomètres pour conserver l'avantage environnemental du procédé (RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf, s. d.).

Néanmoins, les ACV sont parfois remises en question dans la littérature. En effet, la méthode ne semblerait pas tout à fait adéquate dans le cadre de l'étude de l'impact environnemental des bétons fabriqués à base de granulats recyclés puisque certains paramètres, pourtant déterminants, ne sont pas pris en compte. Il s'agit notamment de critères liés à la préservation des ressources et au non-stockage des déchets de démolition. Effectivement, le gain environnemental réalisé grâce à la réutilisation des déchets de démolition, permettant ainsi d'éviter des coûts de stockage ou d'élimination, n'entre pas en compte dans l'évaluation environnementale proposée par la méthode des ACV (RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf, s. d.) et (Braymand et al., 2017).

2.3.5 Applications

L'utilisation de granulats recyclés dans la production de nouveaux bétons reste relativement rare de nos jours. Selon une enquête réalisée par le cabinet d'audit Deloitte en 2016, les raisons de cette faible utilisation résident dans le manque de confiance des usagers, la faible incitation des pouvoirs publics, la compétition avec les granulats naturels et la présence de particules potentiellement défavorables aux propriétés techniques du béton (Hubert, J et Courard, L.pdf, s. d.). À l'heure actuelle, la majeure partie des déchets recyclés de construction et de démolition est destinée à des utilisations à faible valeur ajoutée telles que les remblais routiers et le remblaiement de carrières parce que cette utilisation requiert un faible niveau d'exigence technique.

La valorisation de granulats recyclés pour des applications à plus haute valeur ajoutée est très prometteuse. Cependant, il semble que l'utilisation de matériaux recyclés soit fortement influencée par les normes et législations qui la régissent. Les exigences quant à la qualité des composants des granulats recyclés destinés au béton sont plus strictes que pour les autres utilisations (NBN EN 12620). Le taux de substitution par des granulats recyclés a une influence sur la résistance finale du béton. En effet, un béton entièrement composé de granulats recyclés présentera une moins bonne résistance à quantité égale d'eau et de ciment (Wiomont, 2022).

Par ailleurs, les granulats grossiers (diamètre supérieur à 4 mm) sont plus facilement intégrables dans la composition du béton en raison de leur plus faible coefficient d'absorption d'eau. Le type de déchet ainsi que les réemplois possibles correspondant sont repris dans le [tableau 2.5] ci-dessous :

Déchet	Valorisations possibles
Bétons cimentaires	Réemploi, Mousses minérales, Isolant en aérogel de silice, Recyclage dans du béton, Sous couche routière , poudre de remplacement de ciment. Chemins forestiers, Remblais routiers , Remblaiement de carrière
Mortiers/enduits chaux ou ciment	Mousses minérales, Sous couche routière, Chemins forestiers, Remblais routiers , Remblaiement de carrière
Produits en terre cuite (briques, tuiles)	Recyclage en Terre battue, Mousses minérales, Recyclage en industrie de la terre cuite, Sous couche routière, Chemins forestiers, Remblais routiers , Remblaiement de carrière
Pierres	Réemploi, Mousses minérales, Sous couche routière, Chemins forestiers Remblais routiers , Remblaiement de carrière
Verre	Réemploi, Mousses minérales, Recyclage en industries matériaux (charges pour composites), Granulats brillants pour enrobés, Liant pour chemins (ex Esportec), Remblaiement de carrière
Terres d'excavations	Remblais routiers , Remblaiement de carrière. Séparation des composants (argile, fines, granulats) pour valorisation des matériaux.
Mélanges bétons, mortiers, briques...	Sous couche routière, Chemins forestiers, Remblais routiers , Remblaiement de carrière

Tableau 2.5 : Déchets inertes issus de la construction ou de la fin de vie de bâtiments ou voiries et valorisations possibles

2.4 Le gunitage

Dans le but de moderniser la technique du pisé, de la rendre plus rapide et plus abordable tout en valorisant les déchets de démolition, la projection de terre crue par voie sèche émerge comme une solution prometteuse. Ce chapitre présente d'abord la méthode du gunitage telle qu'elle est utilisée avec le béton, puis il aborde les connaissances actuelles sur la projection de terre crue par voie sèche.

2.4.1 Le béton projeté

Le béton projeté est une technique permettant de déposer du béton à des endroits difficiles d'accès ou de lui faire prendre des formes complexes. Inventé durant le XX^e siècle, le béton projeté est principalement utilisé pour concevoir des tunnels, piscines, ponts, restauration d'édifices, stabilisation de berges, etc. (Technobeton, 2017). Il existe deux méthodes de projection : le procédé par voie sèche et le procédé par voie humide.

2.4.2 Projection par voie humide

La méthode de projection humide est la plus courante. La matière projetée est un béton ordinaire qui peut être produit sur place à l'aide d'un malaxeur ou être transporté d'une usine de production par camion toupie. Le béton est ensuite poussé dans un tuyau à l'aide d'une pompe à béton jusqu'à la lance. Enfin, le béton est projeté sur une surface grâce à une pompe (Royer, 2013).

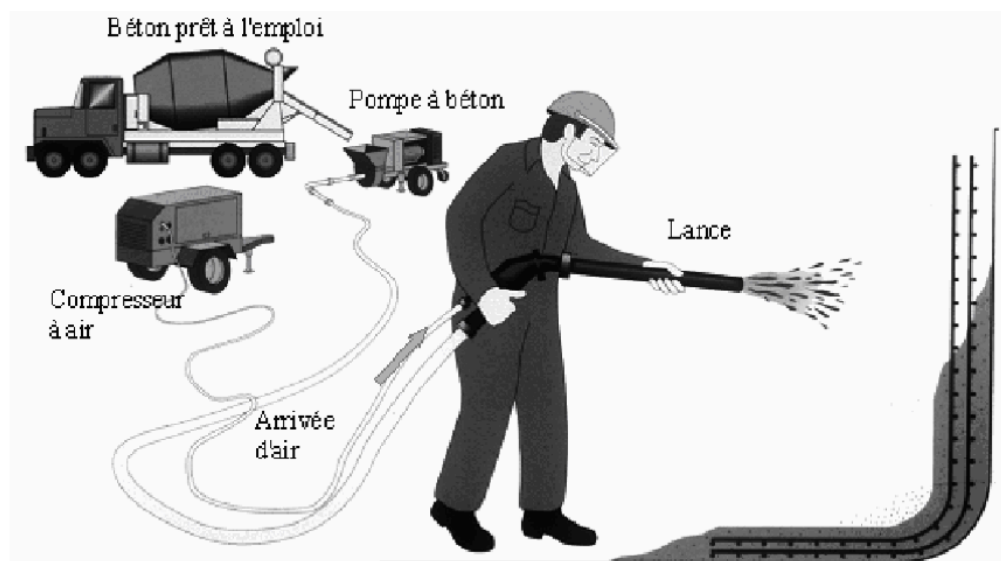


Figure 2.19 : Projection béton par voie humide

2.4.3 Projection par voie sèche

Cette méthode se démarque par son contrôle d'ajout d'eau au niveau de la lance. Les matériaux secs (le ciment et les granulats) sont directement envoyés dans le tuyau grâce à un compresseur à air jusqu'à la lance (béton-projeté.pdf, s. d.).

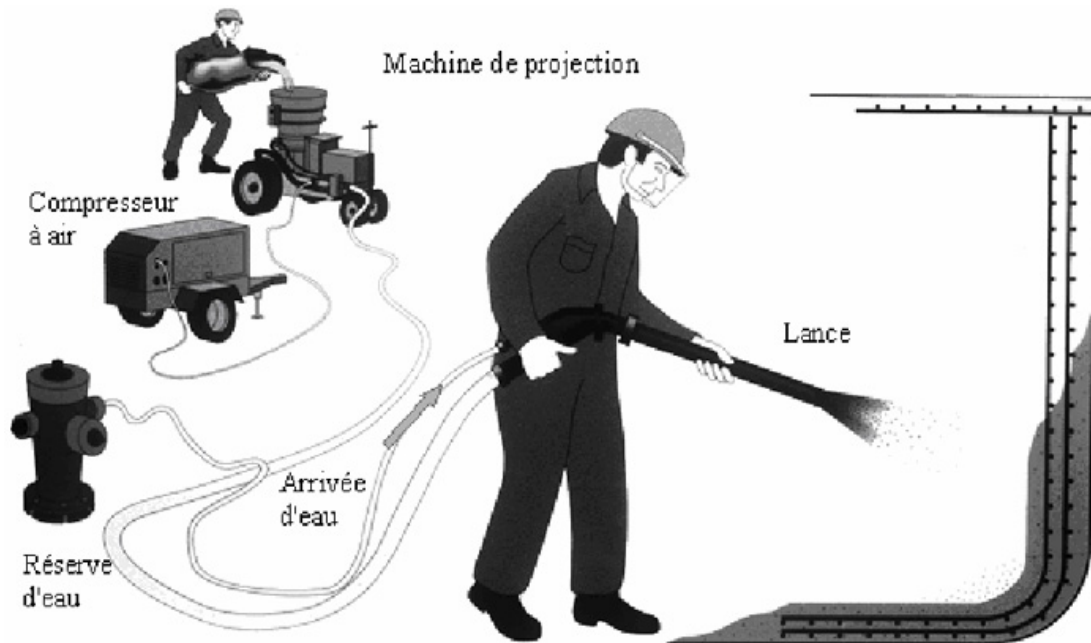


Figure 2.20 : Projection béton par voie sèche

Afin de mélanger correctement l'eau au mélange, la lance est équipée de deux pièces spécifiques :

- l'anneau de mouillage permettant d'introduire l'eau à l'intérieur du tuyau,
- l'embout permettant de créer des turbulences afin de malaxer les constituants et une dispersion des particules pour produire le jet (Siccardi, 2018).

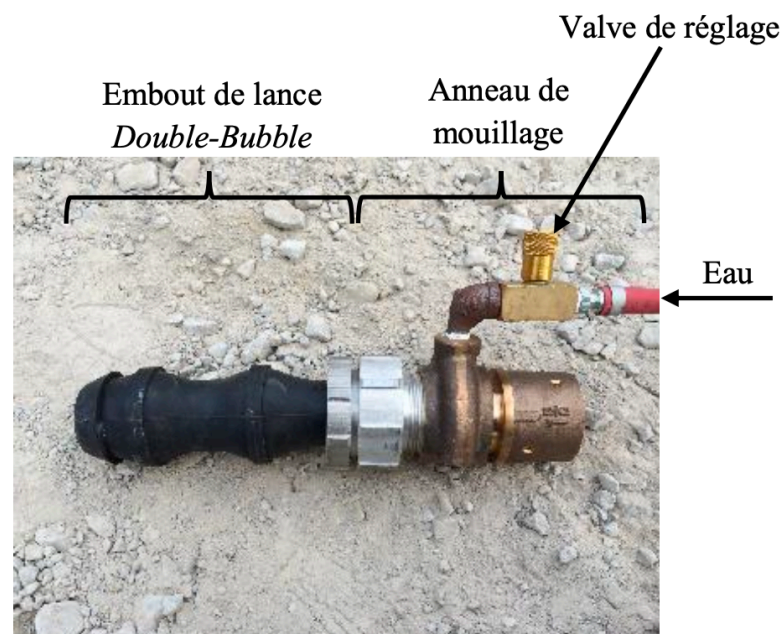


Figure 2.21 : Détail d'une lance

2.4.4 Applications

Comme évoqué précédemment, le béton projeté a essentiellement été utilisé pour des réalisations de tunnels et de voûtes grâce à ses avantages tels que sa rapidité de mise en œuvre, sa résistance ainsi que sa durabilité (FABEM_5.pdf, s. d.). D'un point de vue architectural, cette méthode a permis de construire des bâtiments aux formes complexes et audacieuses.

Les architectes précurseurs du béton projeté, tels que Pascal Häusermann, Claude Costy, Antti Lovag et Jean-Louis Chanéac créent un nouveau style



Figure 2.22 : Maison bulle de Häusermann et Costy à Minzier (1968)



Figure 2.23 : Projection par voie sèche (réparation du tunnel sous la Manche 2006)

architectural nommé « architecture sprayée » à la fin des années 60. Ensemble, ils ont réalisé des essais de constructions en voile de béton. Dès lors, apparaissent les premières « maisons bulles » qui, selon eux, représentaient un choix à la fois économique, esthétique et pratique (Saint-Pierre - 2017 - La parenthèse enchantée des maisons-bulles.pdf, 2017).

Ainsi, le béton projeté a permis de repousser les limites de l'architecture en permettant la création de bâtiments aux formes organiques et fluides, qui s'intègrent harmonieusement dans leur environnement. Ces réalisations sont considérées comme des œuvres d'art à part entière, qui ont marqué l'histoire de l'architecture contemporaine.

Apôtres de l'architecture prospective, Häusermann et ses contemporains étaient persuadés que cette technique de mise en œuvre ainsi que les matériaux

projetés tels que le béton, le polyuréthane et le polyester étaient des matériaux prometteurs pour l'architecture. Toutefois, avec l'urgence environnementale actuelle, le débat s'est recentré sur les enseignements des technologies traditionnelles, potentiellement moins gourmandes en ressources naturelles (El-Wakil, 2017).

Cette réflexion amène à se demander s'il est envisageable de réinterpréter l'« architecture sprayée » en recourant à des matériaux plus respectueux de l'environnement, tels que la terre crue. Cette approche pourrait offrir une solution intéressante pour répondre à l'enjeu de la durabilité environnementale en architecture.

C'est notamment ce qu'a tenté de faire David Easton durant les années 80 aux États-Unis. Avec l'intention de gagner du temps, il cherche à développer une technique plus rapide que le pisé (Anger & Fontaine, 2009).

S'inspirant de la technique du béton projeté, il étudie le mécanisme afin de l'adapter pour projeter de la terre. Après plusieurs essais, il réussit à réaliser des constructions en terre projetée qui ont particulièrement été appréciés par les producteurs de vin en raison de leur excellente inertie thermique à moindre coût.

Ainsi, cette nouvelle méthode permet de gagner énormément de temps et est donc capable de concurrencer les autres systèmes de construction d'aujourd'hui (Easton, 2001).

Néanmoins, le mélange utilisé contenait une proportion importante de ciment, ce qui est devenu moins viable économiquement et écologiquement avec la hausse



Figure 2.24 : Projection de terre



Figure 2.25 : Résultat final voile projeté

des prix du ciment et les préoccupations grandissantes liées au réchauffement climatique. Cette méthode a donc peu à peu été mise de côté (Easton - The future and the common ground.pdf, s. d.).

Depuis l'invention de cette méthode par David Easton, cette technologie alternative n'a pas connu de large diffusion dans le secteur du bâtiment. Cependant, ces dernières années, une entreprise suisse (Pittet Artisans) a réactualisé cette technique. En effet, cette société spécialisée dans l'écoconstruction et la conservation du patrimoine a pour ambition de moderniser les techniques anciennes de construction en adoptant des approches innovantes et durables. En utilisant la terre projetée, Pittet Artisans propose une variété de projets de construction tels que la réalisation de murs, d'enduits, de sols et de finitions (Béton de terre projeté, shot earth Opus Terra, s. d.).



Figure 2.26 : Projection contre mur pour un bouteiller



Figure 2.27 : Projection sur mur en paille pour finition



Figure 2.28 : Aspect du mur



Figure 2.29 : Aspect du mur coupé



Figure 2.30 : Aspect du mur brut coté décoffré

Outre la rapidité de cette technique, la terre projetée présente plusieurs autres avantages par rapport aux différentes méthodes de construction en terre. En effet, la

haute pression d'air fournie par le compresseur permet de pulvériser la matière de sorte qu'elle « s'auto-compacte ». Il n'est donc pas nécessaire de prévoir un compactage mécanique supplémentaire. L'auto-compactage joue un rôle important pour réduire les phénomènes de ségrégation que l'on peut notamment apercevoir sur les murs en pisé (Curto, 2018).

Un second atout majeur est le fait de pouvoir utiliser les terres de terrassement malgré leur grande variabilité. Le système de projection (gunituse) permet d'utiliser une plus grande gamme de granulométrie, faisant ainsi des économies sur les coûts de transport des terres excavées tout en permettant une circularité exceptionnelle (Béton de terre projeté, shot earth Opus Terra, s. d.).

Concernant le coffrage, il est également simplifié par rapport à celui de la technique du pisé. En effet, la réalisation d'un coffrage pour pisé est similaire au béton coulé, ce qui est donc long et fastidieux. De plus, le damage empêche l'intégration d'éventuelles armatures. D'autre part, pour un mur en terre projetée, une seule paroi de coffrage est nécessaire pour la projection, qui n'est par ailleurs pas gênée par la présence d'armatures (Easton, 2001).

En revanche, la terre projetée compte quelques inconvénients. En effet, lorsque l'on gunit de la terre ou du béton, l'un des principaux effets est le rebond. Ce phénomène provient de la non-adhérence de certaines particules de granulats contre la surface réceptrice. Ce problème cause inévitablement une perte de matériau et donc un désavantage non négligeable de ce procédé. La quantité de granulats perdue suite à ce phénomène dépend de plusieurs facteurs : le pourcentage de granulats recyclés et de stabilisant, la teneur en humidité, l'épaisseur de l'ouvrage, la pression d'air, l'angle et le type de buse (Easton, 2012) et (Paquet, 2021).

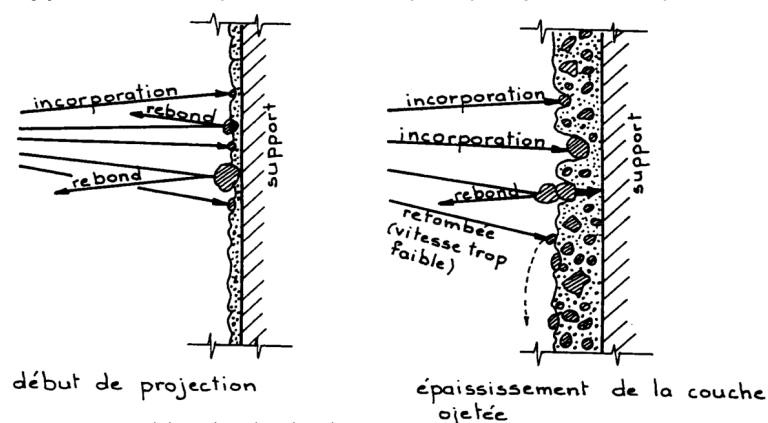


Figure 2.31 : Phénomène du rebond

Dans le cas d'un mur, si l'angle de projection est trop prononcé, certains granulats rebondissent et se placent entre le mur et le coffrage créant une zone non compactée qui pourrait affaiblir le mur (voir figure 2.32). Il est donc conseillé de projeter avec un angle de 30 à 45 ° (CRAterre, 2009).



Figure 2.32 : Particules non compactées, coté inverse de la projection

Le second inconvénient est commun aux autres méthodes de construction en terre, il s'agit du retrait. L'argile, présente dans la terre, gonfle lorsqu'elle est en contact avec l'eau et rétrécit en séchant ce qui provoque des fissures. Bien que la projection de terre se fasse par voie sèche, l'apport d'eau dans la buse est très important. Elle permet l'adhérence des granulats entre eux lors de l'impact contre la surface réceptrice et diminue l'effet rebond. Par ailleurs, une trop grande quantité d'eau causera des fissurations lors du séchage. D'après l'étude « Shot-earth for sustainable construction », la quantité d'eau optimale serait de 3 % (Curto et al., 2020). L'indice de rétrécissement peut également être réduit par l'ajout de sable, de paille ou de petits granulats qui forment une armature, un squelette rigide s'opposant au retrait de l'argile (Anger & Fontaine, 2009). Il conviendra néanmoins de vérifier qu'un élément aussi léger que la paille puisse être projeté jusqu'à la surface réceptrice sans « s'envoler » (Béton de terre projeté, shot earth Opus Terra, s. d.).



Figure 2.33 : Comparaison d'enduits en terre ; a) pas assez de sable ; b) avec sable ajouté ; c) avec paille

Enfin, la terre projetée demande une installation spécifique et coûteuse. Les machines telles que le compresseur (très gros en raison du débit d'air nécessaire), la guniteuse, le tamis, etc. sont non seulement coûteux mais prennent également beaucoup de place, ce qui demande une bonne organisation de l'espace de travail. La terre, quant à elle, doit être totalement sèche ce qui n'est pas toujours évident selon les régions : la stocker sous un abri demanderait (encore) un effort qui ne peut être négligé (CRAterre, 2009).

3. Expérimentations

Ce mémoire vise à expérimenter, à chiffrer et à vérifier le potentiel de la mise en œuvre de projection de terre crue avec granulats recyclés par voie sèche. L'objectif est donc de valider ou non la faisabilité de cette nouvelle pratique. Ce chapitre débute par la partie expérimentale du travail. S'en suit une analyse des résultats de terre projetée. Cette analyse porte sur les aspects scientifiques, économiques, environnementaux et esthétiques.

Le processus expérimental débute par la fabrication de briques en terre comprimée. Différents mélanges ont été utilisés pour fabriquer ces briques dans le but de déterminer lequel d'entre eux sera le plus adapté pour la projection. Ensuite, une analyse granulométrique de la terre et des granulats sera effectuée. Par la suite, plusieurs échantillons de différents mélanges ont été projetés. Pour finir, un mur de plus grandes dimensions (5 m²) a été réalisé avec projection.

Les expérimentations sont réalisées au centre de recyclage Recymo, entreprise spécialisée dans le recyclage de déchets non-dangereux située à Mosan (à proximité de Huy). Ce travail sera assisté par Etienne Guillaume (société Elementerre), spécialiste du matériau terre.

3.1 Briques de terre comprimée

3.1.1 Matériaux

Afin de fabriquer des briques de terre comprimée, les matériaux suivants ont été nécessaires :

- deux types différents de terre ont été utilisés pour réaliser les briques de terre crue : une terre argileuse provenant de Huy (figure 3.1) et une terre plus limoneuse provenant d'Awans (figure 3.2) :



Figure 3.1 : Terre argileuse



Figure 3.2 : Terre limoneuse

- de l'eau ;
- des granulats recyclés provenant de Recymo.

Dans cette démarche, l'objectif est d'explorer et de tester différentes combinaisons de matériaux pour la fabrication de briques de terre comprimée. Diverses variables ont été considérées lors des essais, incluant la sélection de la terre, le dosage d'eau, et la potentialité d'intégrer des fines de recyclage.

Pour commencer, différentes terres ont été évaluées, chacune ayant ses caractéristiques propres en termes de proportion d'argile, de sable et de limon. L'objectif étant de trouver le bon équilibre entre les différents constituants pour obtenir la résistance et la cohésion optimales des briques.

Ensuite, la quantité d'eau ajoutée est un paramètre crucial. Trop d'eau pourrait rendre le mélange trop humide et affaiblir la résistance finale des briques, tandis qu'une quantité insuffisante pourrait rendre le mélange difficile à compacter.

Enfin, une autre variable explorée est l'incorporation de fines de recyclage. Leur ajout dans le mélange de terre comprimée pourrait potentiellement améliorer certaines propriétés du matériau final, comme la résistance et la durabilité.

Une fois les différentes combinaisons testées, des essais en compression ont été réalisés en laboratoire pour évaluer la résistance des briques fabriquées avec chaque composition.

3.1.2 Matériel

Pour réaliser ces briques, ont été nécessaires :

- un tamis : il s'agit d'un tamis rotatif (figure 3.3) équipé d'une grille de 10 mm. Une fois activé, ce dernier fait tomber les composants inférieurs à 10 mm et rejette à la sortie du cylindre les éléments plus gros tels que les cailloux.



Figure 3.3 : Tamis rotatif

- un malaxeur : il permet de mélanger la terre, l'eau et les granulats recyclés de manière homogène.
- une presse à brique : la presse utilisée, comme illustrée dans la figure 3.4, est une Pressaterre. C'est une machine manuelle qui permet de fabriquer des briques de dimensions suivantes : 29 x 14 x +/- 10 cm.

Nombre théorique de briques par jour : 500 à 800.



Figure 3.4 : Presse manuelle

3.1.3 Réalisation des briques

Voici la description des différents essais pour la réalisation des briques. La première photo (à gauche) représente à chaque fois les proportions utilisées pour réaliser les briques.

Le premier essai a été réalisé avec un mélange 100 % de terre limoneuse et un faible ajout d'eau.



Figure 3.5 : Terre limoneuse (-eau)

Lors du second essai, 66 % de terre limoneuse et 33 % de granulats recyclés avec faible ajout d'eau.



Figure 3.6 : Terre limoneuse + granulats recyclés (-eau)

Le troisième essai est un mélange 100 % terre argileuse avec un faible ajout d'eau.



Figure 3.7 : Terre argileuse (-eau)

Le quatrième essai consiste en un mélange à 100 % de terre argileuse, avec un ajout d'eau plus important. C'est le mélange le plus humide parmi les tests réalisés.



Figure 3.8 : Terre argileuse (+eau)

Le cinquième et dernier essai est un mélange 66 % de terre argileuse et 33 % de granulats recyclés avec toujours un faible ajout d'eau.



Figure 3.9 : Terre argileuse + granulats recyclés (-eau)

3.1.4 Essais de compression simple et résultats

Afin de permettre à la terre d'atteindre un niveau de séchage adéquat pour les tests, le test de compression des briques a été effectué 23 jours après leur fabrication.

La presse utilisée pour l'entièreté des tests est un presse uni-axiale INSTRON 5585 à une vitesse de mise en charge de 0,02 mm/s, sur un empilement de deux demi-briques. Le mode opératoire choisi pour les essais de compression (deux demi-briques superposées) est le même que le travail fourni par Philibert NSHIMIYIMANA (Nshimiyimana, 2020). Cette méthode de compression permet de doubler le rapport d'élancement de l'échantillon. Pour ce faire, il faut dans un premier temps, réaliser un test de résistance en fendage, ce qui permettra de diviser la brique en deux blocs.

Ensuite, il est nécessaire de les empiler tout en les collant avec un joint de mortier pour permettre un transfert de contrainte uniforme entre les blocs (Morel et al., 2007). Dans le cas présent, les deux faces qui se superposent sont lisses et ne nécessitent donc pas de joint de mortier.



Figure 3.10 : Test de résistance en fendage



Figure 3.11 : Test de compression sur deux demi-briques empilées

Le [tableau 3.1] ci-dessous reprend les résultats des tests réalisés sur les différentes briques :

Terre utilisée		Longueur x largeur x hauteur (cm)	Masse volumique (kg/m ³)	Contrainte charge max (MPa)	Moyenne
Terre limoneuse (-eau)	1	29 x 14 x 11,6	1737	0,44	0,56
	2	29 x 14 x 10,6	1711	0,77	
	3	29 x 14 x 11,2	1592	0,46	
Terre limoneuse + granulats recyclés (-eau)	1	29 x 14 x 11,4	1681	0,36	0,41
	2	29 x 14 x 11,6	1669	0,32	
	3	29 x 14 x 10,2	1647	0,54	
Terre argileuse (-eau)	1	29 x 14 x 9,5	1672	0,37	0,62
	2	29 x 14 x 9,5	1656	0,42	
	3	29 x 14 x 8,3	1917	1,06	
Terre argileuse (+eau)	1	29 x 14 x 9,5	1840	0,7	0,85
	2	29 x 14 x 8,9	1896	0,84	
	3	29 x 14 x 8,7	1910	1,01	
Terre argileuse + granulats recyclés (-eau)	1	29 x 14 x 9,9	1806	0,58	0,79
	2	29 x 14 x 9,8	1813	0,68	
	3	29 x 14 x 8,2	1919	1,12	

Tableau 3.1 : Résultats des tests en compression des briques

De manière générale, les résultats de compression sont relativement faibles. Par ailleurs, on peut remarquer que les variations de résistance sont assez importantes, même pour des briques provenant du même mélange. La plus résistante de chaque mélange est systématiquement celle qui a la plus faible hauteur et la plus grande masse volumique. Cette constatation pourrait probablement s'expliquer par un manque de pression exercée sur la presse lors de la fabrication des briques.

La deuxième observation révèle que les mélanges utilisant la terre argileuse présentent une plus grande résistance par rapport à la terre limoneuse. Cette différence de comportement peut être attribuée à la composition distincte entre les deux sources de terre. Par conséquent, il semble que le choix de la terre de Huy soit le plus intéressant pour la projection en se basant sur ces critères.

3.2 Caractérisation des matériaux utilisés

Le prochain chapitre se concentrera sur l'analyse des différents matériaux utilisés pour les tests de projection. Dans un premier temps, nous examinerons la terre, puis nous nous pencherons sur les granulats, pour enfin aborder brièvement l'eau et la chaux.

3.2.1 La terre

Comme mentionné précédemment, la terre argileuse sera utilisée pour la suite de l'expérimentation. Afin d'étudier plus précisément cette terre, un test granulométrique a été effectué. Dans un premier temps, la terre brute, extraite du site, a été étalée durant 1 mois sous abri afin d'être séchée. Une fois sèche, la terre a pu être tamisée de la même manière que pour les briques.

1° Analyse granulométrique

À défaut de pouvoir réaliser un test de sédimentométrie, une analyse granulométrique et le test de la bouteille⁴ seront effectués. L'analyse granulométrique ne permet pas de déterminer la masse d'argile et de limons présente dans la terre,

⁴ Ce test sera développé à la p.58

dès lors un tamisage par voie humide a été choisi afin de faciliter l'évacuation et la séparation des « billes » d'argile. Pour obtenir un échantillon homogène et représentatif du tas de terre, la sélection s'est effectuée sur base de la méthode du quartage, illustrée à la figure 3.13. Pour ce faire, nous avons utilisé un diviseur à couloirs (figure 3.12) qui permet d'homogénéiser un échantillon de granulats en fonction de la taille de ces derniers et de scinder l'échantillon en deux parts identiques. L'opération s'est répétée à quatre reprises. À la suite de ces opérations, nous obtenons donc un échantillon homogène de la terre utilisée pour cette expérimentation.

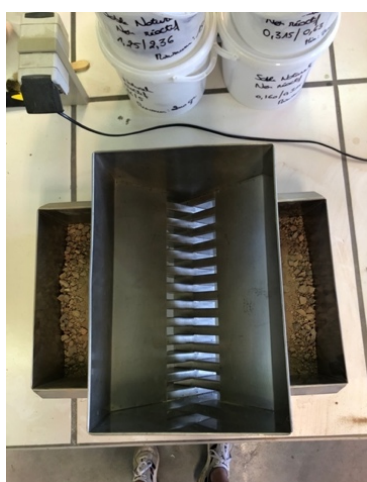


Figure 3.12 : Diviseur à couloirs

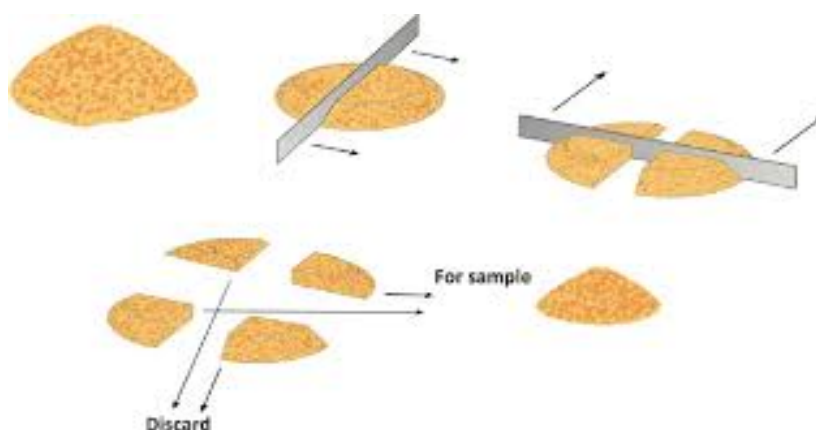


Figure 3.13 : Méthode de division par quartage

Ensuite, le tamisage peut être effectué selon le maillage suivant :

8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	500 μ m	250 μ m	125 μ m
------	------	------	------	-------------	-------------	-------------

Tableau 3.2 : Dimensions des tamis utilisés

Les différents tamis sont positionnés sur une gouttière métallique équipée de tuyaux d'arrosage qui permettent de dissocier les différentes tailles de granulats.



Figure 3.14 : Gouttière métallique avec les tamis



Figure 3.15 : Arrosage de la terre/granulats

La figure 3.16 reprend les différents composants de la terre argileuse.

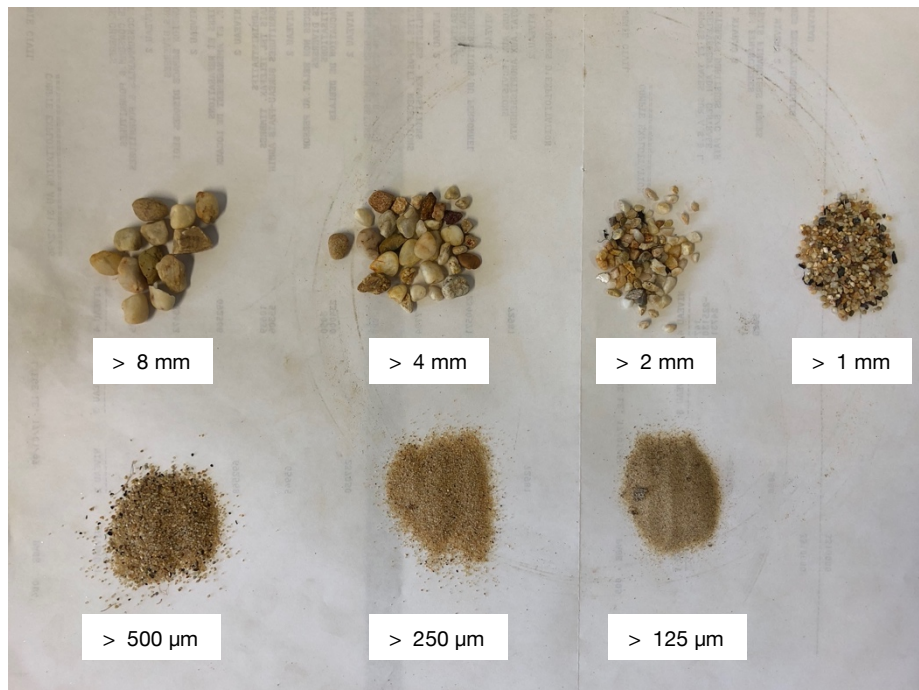


Figure 3.16 : Classement par taille décroissante des cailloux/sables de la terre

Le [tableau 3.3] présente les proportions de refus (éléments retenus au-dessus du tamis) et de passants (éléments passant à travers le tamis) selon chaque tamis. Ces données seront utilisées ultérieurement pour construire la courbe granulométrique de la terre.

Dimension des tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Pourcentage cumulé des passants (%)
8	31	6,2	93,8
4	106	21,2	72,6
2	34	6,8	65,8
1	16	3,2	62,6
0,5	41	8,2	54,4
0,25	100	20	34,4
0,125	33	6,6	27,8
Fond	139	27,8	0
Total	500	100	/

Tableau 3.3: Refus et passants de la terre

2° Test de la bouteille

Le test de la bouteille permet quant à lui de mesurer de manière simplifiée les différentes fractions texturales de la terre sur le terrain. Cette procédure est relativement simple. Premièrement, il faut remplir une bouteille avec de la terre jusqu'au $\frac{1}{4}$ de sa hauteur et compléter les $\frac{3}{4}$ du volume restant avec de l'eau. Il faut ensuite agiter énergétiquement la bouteille puis laisser décanter le mélange. Une heure plus tard, il est nécessaire de secouer une nouvelle fois la bouteille et de laisser à nouveau décanter. Au bout de 45 minutes environ, différentes couches sont observables représentant le sable et graviers (en bas), les silts (au milieu), les argiles (en haut) et enfin les débris organiques (qui flottent au-dessus de l'eau). Ce n'est qu'au bout de 8 heures que l'on peut mesurer les différentes couches. Lors de cette expérience, les mesures ont été réalisées après 24 heures (Houben et al, 1995).

Pour analyser les résultats, il faut mesurer la hauteur de chaque couche de sédiments et les comparer à la hauteur totale des sédiments. Ainsi, on peut obtenir, en pourcentage, la valeur granulaire de chaque élément constituant la terre. Néanmoins, l'appréciation des hauteurs selon ce test reste critiquable. En effet, l'eau ajoutée permettant de décanter les différentes couches fait gonfler les fractions fines (silts et argiles) qui apparaissent donc légèrement plus importantes qu'elles ne le sont réellement. Afin d'obtenir un résultat le plus juste possible, l'opération a été effectuée à deux reprises afin de pouvoir faire une moyenne.

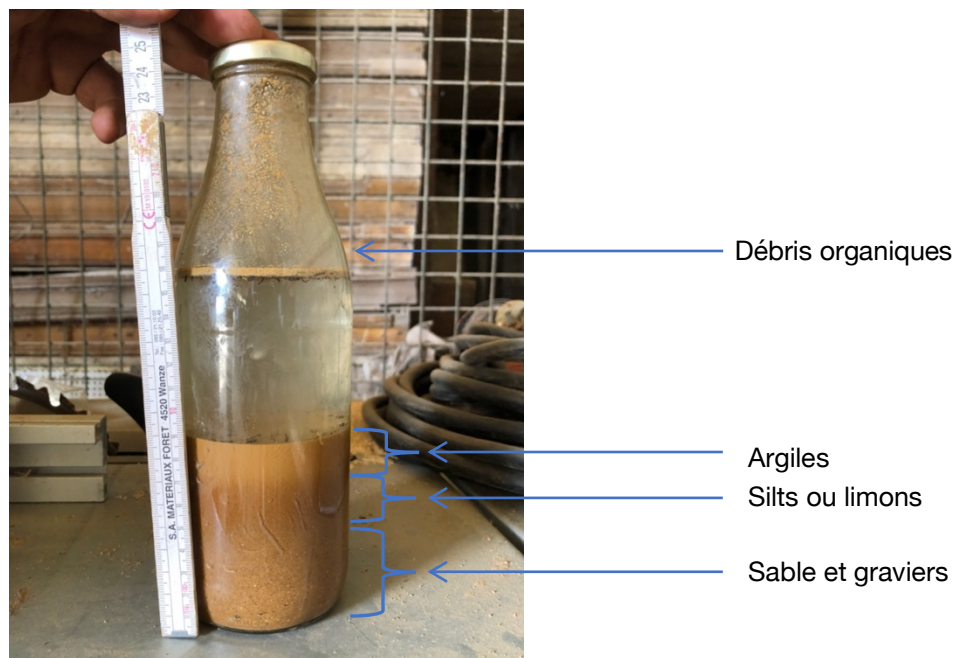


Figure 3.17 : Illustration du test de la bouteille

	Hauteur bouteille 1 (cm)	Hauteur bouteille 2 (cm)	Quantité bouteille 1 (%)	Quantité bouteille 2 (%)	Quantité moyenne (%)
Argiles	1,7	2	19,32	18,18	18,75
Silts	2,6	1,7	29,55	15,45	22,5
Sables et graviers	4,5	7,3	51,13	66,37	58,75
Total	8,8	11	100	100	100

Tableau 3.4: Résultats test de la bouteille

Le graphique ci-dessous reprend les résultats obtenus lors de ces différents tests.

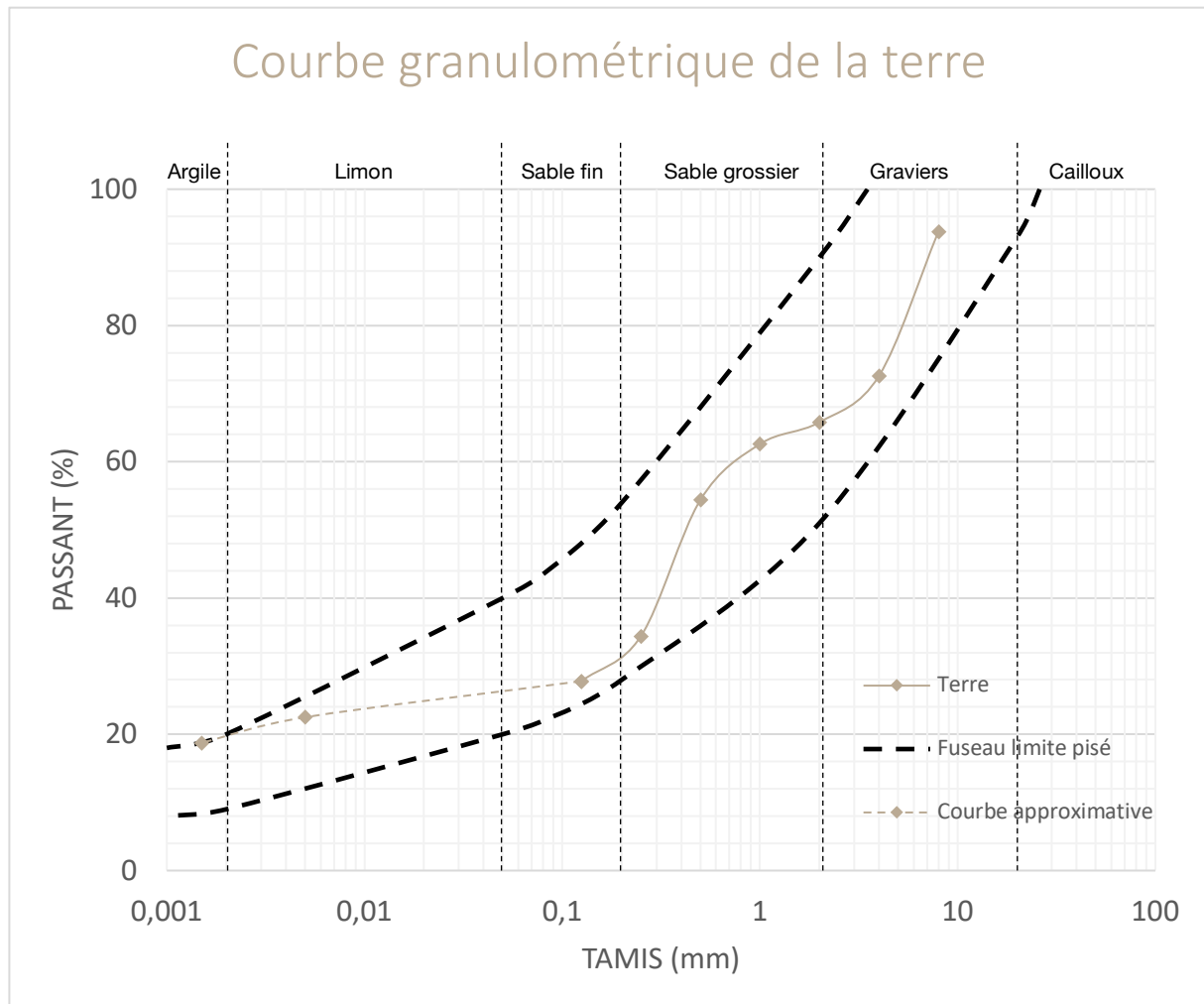


Figure 3.18 : Courbe granulométrique de la terre

En observant le graphique, on remarque que la courbe représentant la terre se situe généralement bien entre les limites théoriques d'une terre idéale pour le pisé, comme le recommande Houben (Houben et al, 1995) et (Rojat et al, 2020).

Par ailleurs, on peut constater un taux d'argile légèrement trop élevé par rapport aux limites. Cela dit, ce taux (18,75 %) a été déterminé selon le test de la bouteille, qui comme expliqué plus haut, est assez approximatif et a plutôt tendance à surestimer le pourcentage d'argile et de limon présent dans la terre.

En conclusion, ces deux tests nous apprennent que la terre correspond bien de manière générale aux caractéristiques requises pour la construction en pisé et devrait donc également convenir pour les tests de terre projetée. Cependant, pour obtenir une courbe granulométrique plus précise, il serait intéressant d'effectuer un test de sédimentométrie. Cela permettrait d'obtenir des données plus fiables sur la répartition granulométrique de la terre et d'affiner davantage les proportions pour les expérimentations futures.

3.2.2 Les granulats recyclés

1° Analyse granulométrique

Les granulats sont des granulats recyclés non lavés provenant de déchets de démolition broyés par l'entreprise Recymo. Ces granulats sont destinés à être utilisés comme remblais et n'ont donc aucune information technique disponible. Par conséquent, une caractérisation technique de ce matériau est nécessaire. Pour ce faire, une analyse granulométrique a été effectuée selon le même mode opératoire que pour la terre (figures 3.14 et 3.15).

Dimension des tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Pourcentage cumulé des passants (%)
8	56	11,2	88,8
4	91	18,2	70,6
2	68	13,6	57
1	50	10	47
0,5	46	9,2	37,8
0,25	49	9,8	28
0,125	38	7,6	20,4
Fond	102	20,4	0
Total	500	100	/

Tableau 3.5: Refus et passants des granulats recyclés

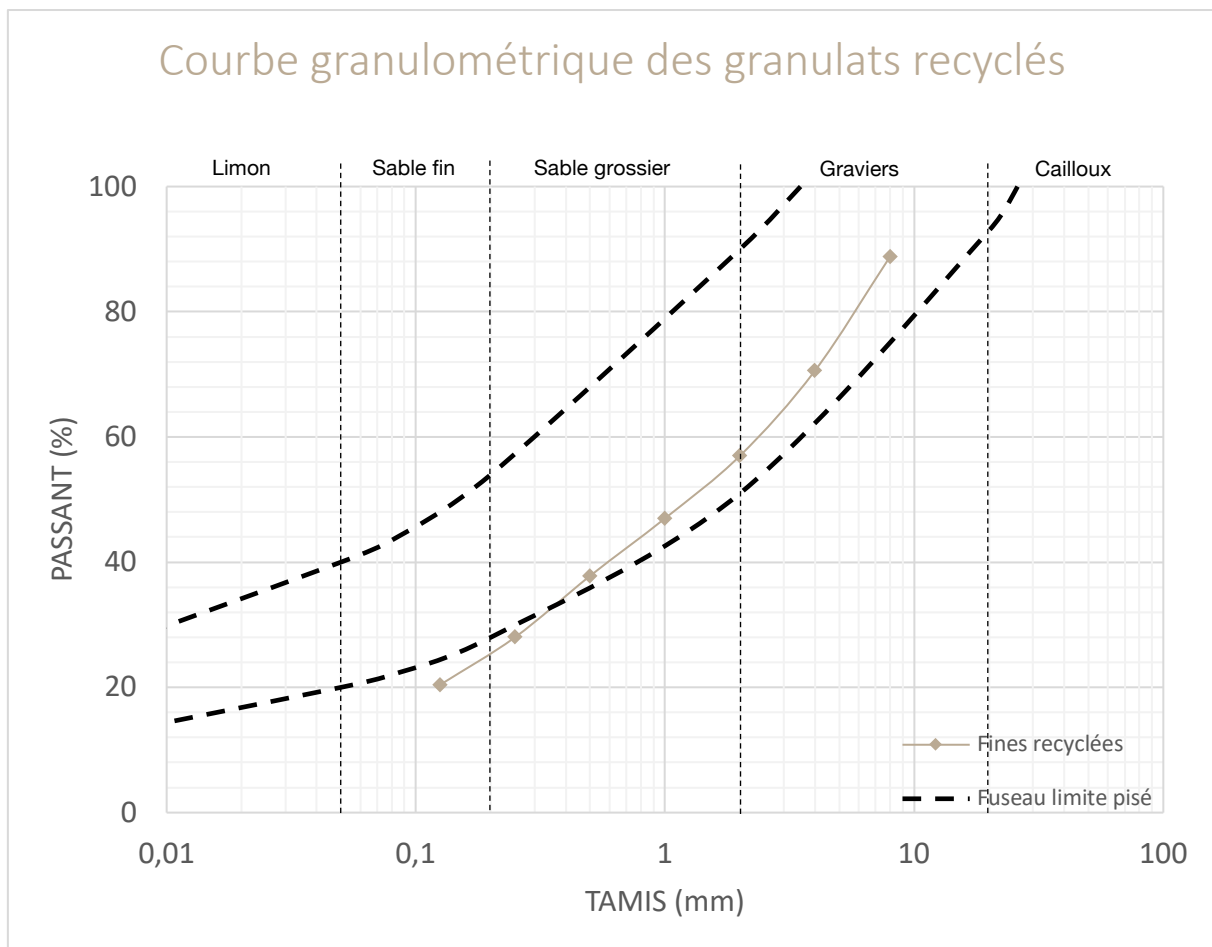


Figure 3.19 : Courbe granulométrique des granulats recyclés

La courbe granulométrique des granulats recyclés correspond de manière partielle à la mise en œuvre d'un mur en pisé. De manière générale, les graviers et une partie des sables grossiers respectent le fuseau limite. Cependant, on peut remarquer un manque de sable fin et de sable grossier inférieur à 0,4 mm qui descendent sous la limite du fuseau idéal pour le pisé.

2° Contrôle visuel

En plus de l'analyse granulométrique, une inspection visuelle a été réalisée sur les granulats recyclés. Le contrôle visuel des granulats permet de déterminer les différentes origines des matières présentes. Pour ce test, les granulats lavés provenant de l'analyse granulométrique ont été utilisés. Conformément à la norme EN-933-11, uniquement les granulats supérieurs à 4 mm sont examinés, triés et enfin pesés. La norme EN 12620 permet de déterminer la nature des constituants de

granulats recyclés (voir tableau 3.6). L'objectif de ce test est de déterminer le pourcentage de chaque élément présent dans les granulats recyclés.

Éléments	Caractéristiques des constituants
Rc	Béton, produits en béton, éléments en béton
Ru	Granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques
Rb	Éléments en argile cuite, en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant
Ra	Matériaux bitumineux/mélanges à base d'hydrocarbures
Rg	Verre
X	Contaminants non flottants : bois, plastique, caoutchouc, argile, plâtre

Tableau 3.6 : Classification des granulats recyclés

			Norme NBN 15-001
Éléments	Masse (g)	Pourcentage (%)	Pourcentage requis (%)
Rc	42	28,57	≥50
Ru	63	42,86	/
Rcug	/	71,43	≥70
Rb	23	15,65	≤ 30
Ra	17	11,56	≤ 5
RG	2	1,36	/
X	<1	<1,0	/
XRg	/	<2,0	≤ 2,0

Tableau 3.7 : Résultats du contrôle visuel des granulats recyclés

Tous les constituants doivent respecter les proportions définies par la norme NBN 15-001. Dans ce cas-ci, on remarque que les granulats en provenance d'éléments en béton (Rc) ne sont pas suffisants par rapport à ce que la norme impose. En ce qui concerne les matériaux bitumineux, la masse présente est plus de deux fois supérieure à la quantité requise.

Il est également essentiel de noter que les fines inférieures à 125 μm n'ont pas été considérées comme des éléments contaminants non flottants (X) étant donné qu'un tamis de 63 μm aurait dû être utilisé pour filtrer une dernière fois les sables de très petite taille.

Pour conclure, ce test montre que les granulats recyclés ne peuvent pas être utilisés comme composants dans la formulation de béton classique. Par ailleurs, aucune information/norme concernant l'incorporation de granulats recyclés dans de la terre destinée à la construction n'est renseignée.

3.2.3 Eau

De l'eau de pluie a été utilisée pour tous les mélanges et a été introduite en fin de lance.

3.2.4 Chaux

La chaux utilisée est de la chaux naturelle hydraulique pure sans additif de type NHL2.

3.3 Échantillons de terre projetée

3.3.1 Préparation des mélanges de terre

Les différents mélanges réalisés ont pour objectif d'étudier l'impact sur les propriétés mécaniques selon la quantité de granulats recyclés et de chaux ajoutés. La teneur en eau est ajoutée aux mélanges (secs) en bout de lance via un robinet. Ce paramètre est donc approximatif étant donné que le robinet ne permet pas de chiffrer avec précision la quantité d'eau envoyée.

Quatre mélanges ont été effectués : un de terre uniquement (T), un de terre-chaux (T-C), un de terre avec granulats recyclés (T-GR) et enfin un de terre-chaux avec granulats recyclés (T-C-GR).

	Terre (%)	Granulats recyclés (%)	Chaux (%)	Nombre de cubes testés
T	100	0	0	2
T-C	95	0	5	1
T-GR	66	33	0	2
T-C-GR	64	31	5	2

Tableau 3.8: Proportions des mélanges

3.3.2 Matériel

La technique utilisée est semblable à celle illustrée à la figure 2.20. Sont donc nécessaires :

- un compresseur,
- une machine de projection,
- une alimentation en eau,
- un coffrage.

De manière plus précise, un compresseur CompAir C130 fonctionnant au diesel a été utilisé. Celui-ci permet de débiter 12,3 m³/min d'air et une pression maximale de 10 bars (Figure 3.21).

La machine de projection par voie sèche utilisée est une SBS A1N alimentée par électricité. Cette machine permet de projeter une quantité de matière allant de 0,3 à 5 m³/h et accepte une granulométrie de 0 à 12 mm. Le diamètre du tuyau d'alimentation en matériau est de 40 mm (Figure 3.20).

L'approvisionnement en eau a été assuré grâce à une cuve d'eau de pluie de 1 000 litres (Figure 3.22).

Les coffrages utilisés se composent d'un cadre métallique avec des panneaux en contreplaqués de dimensions 30 cm x 40 cm x 120 cm (Figure 3.23).

Enfin, pour gérer le déplacement du matériel ainsi que l'approvisionnement en terre, nous nous sommes aidés d'une chargeuse articulée de la marque Schaffer (Figure 3.24).



Figure 3.20 : Guniteuse



Figure 3.21 : Compresseur



Figure 3.22 : Réserve d'eau de pluie



Figure 3.23 : Coffrage



Figure 3.24 : Chargeuse

3.3.3 Réalisation des échantillons

Avant de démarrer les échantillons définitifs, nous avons réalisé des tests à l'extérieur afin de régler les différents paramètres pour que la projection se fasse au mieux. De manière générale, le mélange de terre doit être le plus sec possible afin d'avoir le moins de retrait possible. Or, si la terre est sèche, le phénomène de rebond est important. Durant les premiers essais, ce phénomène était très important et la perte de matière était donc conséquente, comme l'illustre la figure 3.25.

Il s'agit donc dans un premier temps de tester et de faire varier la jauge d'eau et d'air afin d'aboutir au mélange le plus adéquat : sec sans trop de rebond. Il est difficile de quantifier ces variations étant donné que l'ajout d'eau se fait en bout de lance et se gère à l'aide d'une petite vanne, à l'instar du débit d'air qui se règle depuis la machine. Au fur et à mesure des ajustements, nous arrivons donc à une texture souhaitée qui pourra ensuite être projetée dans les coffrages pour les tests.



Figure 3.25 : Projection avec beaucoup de rebond



Figure 3.26 : Projection avec rebond contrôlé

Les complications se sont principalement manifestées lors des mélanges avec granulats recyclés. En effet, les deux mélanges comportant des fines de recyclage

ont eu pour cause de boucher la guniteuse à l'endroit de rencontre entre le mélange et l'air. L'explication la plus probable est que la quantité d'éléments fins arrive trop rapidement au tuyau de projection ce qui provoque un « bourrage » à cet endroit. Un ralentissement de l'apport de matière a permis de corriger cette défaillance.

Les figures ci-dessous montrent les échantillons terminés. De gauche à droite on retrouve, le mélange terre pure, le mélange terre/chaux, le mélange terre/granulats recyclés, et enfin le mélange terre/granulats recyclés/chaux.



Figure 3.27 : Échantillons terminés

Le décoffrage a été effectué quatre jours après la projection. Comme les figures 3.28, 3.29 et 3.30 le montrent, certaines parties des blocs ont adhéré aux parois du coffrage ce qui a provoqué un arrachement important d'une épaisseur allant jusqu'à deux centimètres pour les surfaces lisses et au niveau des coins. Par ailleurs, cette complication a permis de voir un autre problème situé à l'intérieur même du mur. La manifestation de « strates » sur le bloc terre/granulats recyclés (figure 3.30). Ces strates ont certainement été causées suite au problème rencontré avec le bourrage de la guniteuse. En effet, le temps qu'il a fallu pour vider et régler la machine entre deux périodes de projection était assez long (+/- 1h30) et le redémarrage avec une modification de la pression et une arrivée différente de la matière pourraient en être la cause.



Figures 3.28 et 3.29 : Décoffrage des échantillons



Figures 3.30 : Apparition de strates

3.3.4 Essais de compression simple et résultats

Les tests de compression ont été effectués 14 jours après réalisation sur des cubes de 100 x 100 mm découpés dans les blocs. La presse utilisée est la même que pour les briques (INSTRON 5585) avec la même vitesse de mise en charge (0,02 mm/s).



Figure 3.31 : Test de compression sur bloc 100 x 100 mm

Mixte		Longueur x largeur x hauteur (cm)	Contrainte charge max (MPa)	Moyenne (MPa)
T	1	10,1 x 10 x 10	0,80	0,865
	2	10,2 x 10 x 9,9	0,93	
T-C	1	10,9 x 9,94 x 10	0,85	0,85
T-GR	1	10,1 x 10,1 x 10	1,29	1,51
	2	10,2 x 9,9 x 10,2	1,73	
T-C-GR	1	9,8 x 10,2 x 10,1	1,25	1,04
	2	10,2 x 10 x 10,2	0,83	

Tableau 3.9 : Résultats des tests en compression

Bien que les résultats restent assez faibles, il y a une légère augmentation de résistance par rapport aux briques. La première observation est que les échantillons stabilisés à la chaux n'ont pas mieux résistés par rapport aux échantillons non stabilisés. Ceci peut s'expliquer par leur courte cure de séchage ainsi que leurs faibles teneur en chaux hydraulique. L'augmentation de résistance à la compression grâce à la chaux s'étend sur plusieurs semaines, mois qui s'accroît davantage dans une ambiance chaude et humide (Houben et al, 1995).

Ensuite, on peut remarquer que la résistance est supérieure lorsque la terre est composée de granulats recyclés. La projection de ceux-ci a certainement joué un rôle de compaction supplémentaire sur la terre ce qui peut expliquer l'amélioration des performances mécaniques.

Par ailleurs, il est important de noter qu'aucun bloc n'atteint la résistance minimale de 2 MPa qui est la limite pour pouvoir être utilisé comme mur porteur.

3.4 Voile en terre projetée

L'objectif de la réalisation d'un voile est de tester et évaluer différents paramètres tels que les quantités de matière, le temps, la consommation et les vigilances à avoir afin de vérifier si cette technique peut être avantageuse et envisageable dans le secteur de la construction.

3.4.1 Mise en œuvre

Le coffrage employé est similaire à celui adopté pour les échantillons, avec une structure métallique et des panneaux en contreplaqué. Les dimensions du mur sont de 240 cm de hauteur, 270 cm de longueur et 15 cm de profondeur. Du papier-carton a été utilisé pour éviter les problèmes lors du décoffrage des échantillons (figure 3.32).

L'expérience a été réalisée dans des conditions climatiques favorables, avec les machines positionnées à l'extérieur pendant que la mise en œuvre se déroulait à l'intérieur d'un entrepôt.

Pour effectuer l'opération correctement, il est nécessaire d'être au moins deux personnes : une première chargée de la projection et une autre responsable de l'alimentation en terre de la machine.

L'écoulement du premier sac de matériau s'est déroulé en 11 minutes, mais il a été nécessaire d'interrompre l'opération pour ramasser tous les rebonds. En effet, la matière s'étant accumulée au pied du mur, il n'était plus possible de projeter l'épaisseur souhaitée dans le bas du voile (figure 3.33). Le matériau récupéré était relativement sec et a pu être réutilisé pour la suite du mur. Le mur final a pris les dimensions suivantes : 270 cm de longueur, 200 cm de hauteur pour la partie la plus haute, 170 cm pour la plus basse, avec une épaisseur de 15 cm, soit un volume de 0,75 m³. La consommation en terre pour ce test a été de 2,5 big bags de 600 litres.

Un test de projection sans coffrage a également été réalisé dans le but de créer un banc de 100 cm de long, 45 cm de hauteur et 35 cm de large, soit un volume de

0,16 m³. Le travail a duré 1 heure, dont 14 minutes de projection avec environ 45 minutes consacrées au nettoyage et au façonnage. Pour ce test, un big bag de 600 litres a été consommé.

Pour résumer, la réalisation du mur, faisant 5 m² sur 15 cm d'épaisseur, a duré 40 minutes de projection avec 2h de nettoyage et façonnage (tel que décrit au point suivant). Le banc, quant à lui a pris 1h. La somme des différentes opérations est donc de 3h40 avec une consommation de 3,5 big bags de 600 litres (environ 2,1 m³ de terre).



Figure 3.32 : Coffrage avec carton de désolidarisation



Figure 3.33 : Pied du mur encombré par le rebond



Figure 3.34 : Avancement de projection



Figure 3.35 : Voile et banc terminés

3.4.2 Temps unitaire et comparaisons

Afin de pouvoir déterminer le rendement théorique au m² d'un mur en terre projetée, il est nécessaire de calculer son temps unitaire. Pour rappel, le temps unitaire correspond à la durée de travail d'un homme « moyen » pour réaliser à lui seul une unité d'ouvrage (Définitions, 2021).

On peut déterminer cette notion par cette équation :

TU = temps unitaire (exprimé en fraction décimale d'heure)

$$TU = \frac{x \cdot n}{q}$$

x = nombre d'heures de travail
n = nombre d'ouvriers
q = quantité d'ouvrage

Pour effectuer le calcul, seul le temps de projection a été pris en compte, excluant donc la mise en place du coffrage ainsi que le façonnage.

Ainsi, pour la mise en œuvre d'un mur de 5m² et de 15 cm d'épaisseur, on obtient un temps unitaire de 0,27 h/m² ou 1,78 h/m³.

Le banc réalisé sans l'aide de coffrage a duré quant à lui 2,91 h/m³. Avec ces mesures, il est désormais possible de comparer de manière théorique plusieurs types de mise en œuvre.

Le [tableau 4.1] reprend les temps unitaires en fonction des différentes techniques de construction. À noter qu'ici aussi le temps de mise en place du coffrage et de façonnage n'ont pas été pris en compte.

	Unité	T.U
Voile en terre projetée (ép = 15 cm)	m ²	0,27 h
	m ³	1,78 h
Banc en terre projetée	m ³	2,91 h
Voile en béton coulé (ép = 16 cm)	m ³	1 h
Mur en bloc béton (ép = 15 cm)	m ²	1 h
Mur en pisé (ép = 40 cm)	m ³	8 h

Tableau 4.1 : Comparaison des temps unitaires

En analysant ces données, on peut observer que le voile en terre projetée à un temps unitaire relativement compétitif par rapport à celui d'un voile en béton. En effet pour une épaisseur presque équivalente (15 cm pour la terre et 16 cm pour le béton), la mise en œuvre par projection nécessite un temps supplémentaire de 47 minutes par m² effectué. Sachant qu'un seul côté de coffrage est nécessaire pour la terre projetée, la différence de temps entre les deux mises en œuvre sera réduite. La comparaison par rapport à une maçonnerie traditionnelle en bloc de béton est elle aussi très intéressante puisque par m² effectué, la technique en terre projetée est plus avantageuse de 44 minutes. Par ailleurs, un mur en bloc ne nécessite aucun coffrage et n'a pas spécialement besoin de travail de parachèvement.

Enfin, on peut remarquer une importante différence par rapport à un mur en pisé dont les calculs de temps ont été attestés dans un rapport technique suisse (Comte, s. d.). Bien que le temps pour faire le mélange ait été pris en compte dans les calculs, le temps de construction d'un m³ de mur en pisé prend 7h13 de plus que la terre projetée.

3.4.3 Energie grise

L'énergie grise se définit comme la somme totale des énergies nécessaires pour assurer l'élaboration d'un produit allant de l'extraction du matériau brut, le traitement, la transformation, la mise en œuvre du produit, ainsi que les transports successifs qu'aura nécessité sa mise en œuvre. Elle est exprimée en kWh/m³ ou en MJ/Kg (Niemann, s. d.).

On l'a vu, l'énergie intrinsèque du pisé est extrêmement faible (0,02 MJ/Kg) par rapport aux autres méthodes traditionnelles de construction. La terre projetée, quant à elle, nécessite un matériel spécifique qui a, par ailleurs, des consommations en électricité et en diesel non négligeables.

Bien que la préparation de la terre entraîne une dépense énergétique (extraction, tamisage et malaxage), il est difficile de trouver des chiffres cohérents à intégrer dans le calcul. Pour éviter de fausser le résultat, la phase de préparation de

la terre ne sera donc pas prise en compte. Par ailleurs, pour les granulats recyclés, l'État de l'Environnement wallon indique que la transformation d'1 m³ de béton en granulats recyclés représente 0,27 GJ (270 MJ) (Courard, 2006). Nous avons consommé 2,1 m³ de matière, celle-ci étant composée de 33 % de granulats recyclés, la consommation de ceux-ci sont alors de 0,7 m³. La consommation énergétique de ce matériau a donc été de 189 MJ ou 52,5 kWh (0,7 m³ x 270 MJ).

Le compresseur que nous avons utilisé est d'une part « surpuissant » pour ce genre d'utilisation et d'autre part trop « gourmand » en carburant par rapport à un compresseur plus récent. Le calcul va donc se baser sur un compresseur actuel qui correspond à nos besoins (annexe 8.1). Selon sa fiche technique, à plein régime (10,3 m³/min d'air) il consomme 17,5 l/h de diesel. Ne tournant pas au maximum de ses capacités durant la projection, cette consommation peut être vue à la baisse. Celle-ci était d'environ 7,5 m³/min d'air donc 73 % de ses capacités. De manière approximative, la consommation du compresseur pour la projection est de 12,8 l/h (73 % de 17,5 l/h). La projection ayant duré 40 min (0,67 h) pour le voile, le compresseur a alors consommé 8,6 l de diesel (12,8 l/h X 0,67 h). Sachant que 1 litre de diesel = 10,74 kWh, la consommation a alors été de 91,29 kWh (8,5 l X 10,74 kWh).

Enfin, la guniteuse a une consommation électrique allant de 12 kW à 20 kW. Ne connaissant pas exactement à quel rythme nous utilisons la machine, nous allons prendre la valeur la plus défavorable, soit 20 kW. Pour une durée de 40 min (0,67 h) avec la guniteuse, la consommation est de 13,4 kWh (20 kW X 0,67 h).

La somme totale des dépenses énergétiques pour créer le voile est de 157,19 kWh (52,5 + 91,29 + 13,4). Pour rappel, le mur fait 0,75 m³, donc, pour un mètre cube la consommation sera de 210 kWh/m³. La figure ci-dessous permet de comparer cette valeur à d'autres méthodes de construction pour lesquelles la terre projetée pourrait convenir. Celle-ci se situerait entre la pierre et le béton cellulaire ce qui la classe parmi les méthodes les moins énergivores.

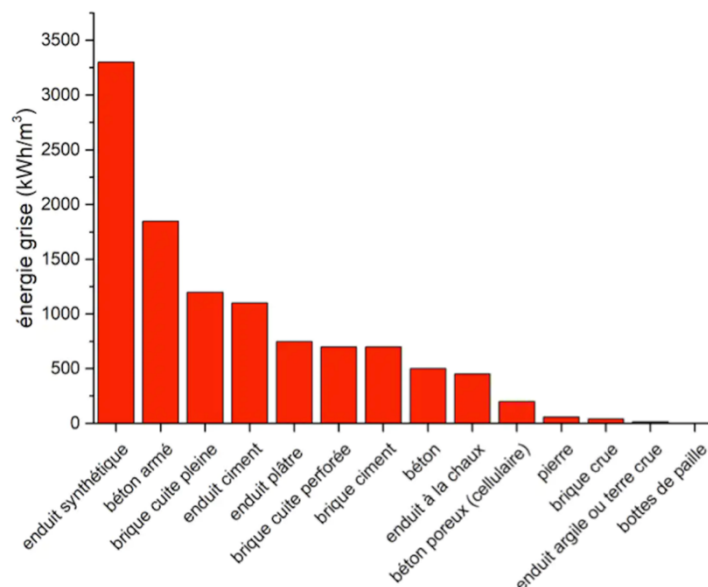


Figure 3.36 : Graphique énergie grise des différents matériaux

3.4.4 Esthétique

Pour rappel, le mur comporte un coffrage à l'arrière et sur les côtés, laissant une seule face sans coffrage. Cette face non-coffrée adoptera, par conséquent, une esthétique particulière. Effectivement, les ondulations de passage de la lance sont grossièrement mises en évidence, rendant la surface irrégulière (figure 3.40). Cette face est très brute et il semble difficile de la laisser telle quelle dans un projet d'architecture. À moins d'être utilisée dans un contexte « fonctionnel », comme dans une cave ou un garage où l'esthétique est moins prioritaire et où l'objectif est d'économiser du temps de main-d'œuvre, il n'y a pas beaucoup d'intérêt à laisser cette surface dans son état brut.

Il est tout à fait possible de donner une forme plus lisse à ce mur pour éviter le caractère brut mentionné précédemment (figures 3.37 et 3.39). Cependant, il est essentiel de réaliser cette étape avant que la terre ne sèche complètement, car elle deviendrait alors trop dure. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé une règle métallique qui



Figure 3.37 : Façonnage

nous a permis d'enlever l'excès de terre et d'obtenir une surface plus plane. Ce processus a révélé les granulats ainsi que les bulles d'air présentes à l'intérieur du mur, créant une texture unique. Incontestablement, cela engendre une tâche additionnelle qui requiert du temps, néanmoins, cela permet d'éviter l'énorme travail associé à un coffrage complet (à double face).

Enfin, la face coffrée (figure 3.38) est celle qui se rapproche le plus d'un béton coulé. En effet, la texture est influencée selon le type de coffrage utilisé (bois, acier ou plastique) et est par défaut lisse. L'homogénéité de la teinte est quant à elle assez aléatoire, on peut observer plusieurs nuances de brun. Celles-ci ont peut-être été influencées d'une part par la quantité d'eau et d'autre part par la légère adhérence de la surface de la terre lors du décoffrage. On peut également apercevoir quelques petites fissures provoquées par le retrait de l'argile.



Figure 3.38 : Face brute



Figure 3.39 : Face coupée (façonnage)



Figure 3.40 : Face coffrée

4. Conclusion

Si la construction en terre existe depuis des milliers d'années, elle a traversé les époques sans pour autant connaître de réelle transformation en termes de mise en œuvre. C'est pourquoi des méthodes plus rapides, pratiques et moins onéreuses telles que le béton ont pris le pas sur les méthodes traditionnelles en terre. Cependant, le contexte environnemental actuel nous pousse à construire différemment et notamment à diminuer, voir à stopper l'utilisation du béton. L'objectif de ce présent travail consiste à investiguer et expérimenter une méthode novatrice pour appliquer la technique de construction en terre, afin d'accélérer le processus et rendre ainsi les constructions à base de terre plus économiquement accessibles à un plus large éventail de personnes. La méthode envisagée dans ce mémoire a été la projection de terre par voie sèche. Cette mise en œuvre, qui est généralement utilisée pour le béton, présente un potentiel avantage de rapidité en termes de mise en œuvre par rapport à la technique du pisé.

Simultanément, un autre enjeu contemporain est lié à la gestion des déchets de construction. Comment traiter efficacement ces déchets ? Peut-on les réutiliser dans de nouvelles structures ? Dans cette optique, cette étude s'est également penchée sur l'incorporation de granulats recyclés au sein des murs en terre.

Ainsi, cette recherche implique une mise en pratique de cette méthode novatrice. Une fois la phase expérimentale menée à bien, il est maintenant possible de reconsidérer les interrogations initiales relatives à l'utilisation de la projection de matière terreuse par procédé sec.

Pour débiter, la première question était de déterminer si la terre projetée possédait une résistance similaire à celle d'un mur en pisé traditionnel. Les résultats obtenus au point [3.3.4 Essais de compression simple et résultats] ont déterminé que les résistances moyennes des différents mixtes allaient de 0,865 à 1,51 MPa, ce qui est comparable à un pisé non stabilisé. Malgré cela, ces valeurs demeurent relativement faibles et l'utilisation de cette méthode pour des éléments structuraux

n'est pas encore envisageable. Pour atteindre cet objectif, il sera indispensable d'explorer d'autres mélanges comportant une proportion plus élevée de liants. Néanmoins, cette technique de mise en œuvre pourrait déjà être mise en application dans le domaine de la construction, notamment pour toutes les cloisons intérieures qui ne sont pas porteuses ou pour des enduits.

La seconde question était : « Les granulats recyclés améliorent-ils les résistances mécaniques ? » Les mixtes contenant des granulats recyclés ont montré qu'ils avaient une meilleure résistance à la compression. Il est possible que l'ajout de ceux-ci ait entraîné une meilleure compaction de la matière durant la projection. Il serait néanmoins intéressant de tester davantage de mixtes contenant différents taux de granulats recyclés afin de mieux appréhender ce phénomène.

Par la suite, l'objectif de l'étude était d'évaluer si l'application de la projection de terre crue présentait un avantage économique réel par rapport aux méthodes traditionnelles telles que le pisé, la maçonnerie classique en blocs de béton ou l'utilisation d'un voile en béton. En réalité, l'intérêt économique va dépendre principalement de deux variantes : le temps de mise en œuvre et le coût de la matière première. Nous avons pu voir que le temps de projection pour un mur de 5m² [3.4.2 Temps unitaire et comparaison] était relativement rapide, au point d'être compétitif avec un mur en béton coulé ou d'une maçonnerie en blocs. Cette analyse ne prenait par ailleurs pas en compte le temps de mise en place du coffrage/décoffrage ainsi que les éventuels parachèvements. D'un autre côté, le temps nécessaire pour réaliser un m³ de pisé est 4 fois plus long que pour la terre projetée. Le coût de la matière première n'a quant à lui pas été calculé. En effet, le coût d'un m³ de béton ou de blocs aujourd'hui est très variable et ne sera déjà plus le même demain. Pour la terre, il est également difficile de la chiffrer étant donné que l'intérêt de cette méthode est avant tout d'utiliser les terres d'excavation. Habituellement, il est nécessaire de faire enlever la terre par un service de camion moyennant des coûts. Évidemment, pour les constructions en terre, cette démarche ne sera pas nécessaire. Par ailleurs, chaque terre a ses propres propriétés, pour la réutiliser il sera nécessaire de la tamiser, de rajouter (ou non) des granulats, et éventuellement de la stabiliser, ce qui fera varier

inévitablement son coût. Pour terminer, la projection de terre crue semble très prometteuse sur ce point et nécessiterait à l'avenir davantage de tests sur de plus grandes surfaces.

En outre, il était important de s'assurer que l'utilisation plus abondante de machines (plus sophistiquées) dans la construction en terre ne contredisait pas les préoccupations en matière de dépense énergétique, notamment en ce qui concerne l'énergie grise. Bien que l'énergie dépensée par le compresseur et la guniteuse soit supérieure à celle nécessaire pour faire fonctionner une dame pneumatique pour un mur en pisé, elle reste extrêmement faible par rapport aux méthodes de construction citées précédemment. Il est également évident de noter que la terre est un matériau recyclable à l'infini et qui ne nécessitera que peu d'effort pour la revaloriser.

En somme, les constructions réalisées en terre projetée par voie sèche peuvent offrir des avantages en termes d'énergie grise, de circularité et d'économie. Toutefois, comme mentionné précédemment, les niveaux de résistance demeurent limités à ce stade. Une autre limite potentielle de cette méthode réside dans la phase de mise en œuvre. La création de murs en terre projetée exige l'utilisation de divers équipements, qui peuvent être coûteux et ainsi décourager les entrepreneurs intéressés par cette approche. Il est également essentiel de noter que ces machines occupent un espace considérable sur le chantier. De plus, il est nécessaire que la terre soit complètement sèche avant d'être projetée, ce qui peut parfois poser des défis en fonction de la localisation du chantier.

Les expérimentations ont soulevé certaines observations/problèmes pouvant servir de recommandations pour les futures expérimentations à ce propos. Tout d'abord, au cours de cette expérimentation, tant la terre que les granulats recyclés ont été prélevés sur le site où les tests ont été effectués. Il serait certainement bénéfique de procéder à des essais avec d'autres types de sol et des granulats mieux adaptés (étant donné que la courbe granulométrique actuelle n'est pas idéale) afin d'identifier ce qui convient le mieux à cette technique.

De plus, il serait judicieux d'explorer des moyens pour réduire l'indice de retrait, qui est notablement élevé dans cette situation (voir figure 3.40). Comme abordé dans la section [2.4 Le gunitage], différents matériaux tels que la paille, le sable ou de petits granulats pourraient contribuer à atténuer ce phénomène de retrait. Au cours de l'expérimentation, seuls les granulats recyclés ont été pris en considération. Par conséquent, il serait envisageable d'entreprendre de nouveaux essais en intégrant du sable ou de la paille pour étudier leur impact sur le retrait.

Lors du décoffrage du mur, qui s'est effectué le jour même, nous avons constaté qu'il n'était pas tout à fait stable. L'augmentation de son épaisseur ou l'utilisation d'un « grillage à poule » comme armature pourrait être envisagé afin d'éviter que le mur ne bascule.

Enfin, l'utilisation d'un carton pour avoir des faces lisses et non collantes lors du décoffrage n'est pas adapté à cette méthode. Avec la pression d'air, celui-ci se décolle et déstructure le mur. Une huile de décoffrage utilisée habituellement pour le béton devrait être plus appropriée.

Pour finir, cette expérimentation introduit une méthode novatrice d'application de la terre, qui demeure encore extrêmement peu explorée jusqu'à présent. Cette approche présente déjà plusieurs avantages et affiche un potentiel de développement considérable. Bien que les résultats actuels ne soient pas encore suffisamment robustes pour une utilisation en tant qu'éléments porteurs, la projection de terre crue par voie sèche avec des granulats recyclés mérite d'être approfondie par de futurs chercheurs. Cette démarche permettrait d'obtenir de meilleurs résultats, ouvrant ainsi la voie à la diffusion de cette technique prometteuse dans l'industrie de la construction.

Je vais conclure ce travail à la première personne du singulier. Cette expérience m'a offert, en tant qu'étudiant en architecture, l'opportunité de me plonger plus profondément dans des méthodes respectueuses de l'environnement et de les comprendre de manière plus approfondie. Alors que je touche à la fin de mon parcours académique, cette étude me pousse à considérer sérieusement des approches alternatives en matière de construction.

5. Bibliographie

Accord de Paris. (s. d.). Klimaat | Climat. Consulté 12 septembre 2022, à l'adresse <https://climat.be/politique-climatique/internationale/accord-de-paris>

Anger, R., & Fontaine, L. (2009). *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*. Belin.

Bahar, R., Benazzoug, M., & Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement and Concrete Composites*, 26, 811-820.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003>

Birznieks, L. (2013). *Designing and building with compressed earth*.

Bouregaya, S. (2018). *Synthèse d'un ciment alitique à moindre impact environnemental à partir de vase de barrage et utilisant le sulfate de zinc comme minéralisateur* [Phdthesis, INSA de Toulouse ; Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf USTO-ORAN].
<https://theses.hal.science/tel-02002458>

Braymand, S., Feraille Fresnet, A., Serres, N., & Feugeas, F. (2017). Analyse du cycle de vie de bétons de granulats recyclés: Influence des paramètres de composition et du transport. *RUGC17 Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC*, 114-117.
<https://hal.science/hal-02124845>

Buttin—2020—Le béton, mis au défi des enjeux environnementaux.pdf. (s. d.). Consulté 12 septembre 2022, à l'adresse https://cdurable.info/IMG/pdf/de_cryptage_n_27_le_beton_mis_au_defi_des_enjeux_environnementaux-vf.pdf

Comte, F. (s. d.). *Mur monolithique en terre crue, Type Pisé*.

COPRO.pdf. (2012.). Consulté 24 avril 2023, à l'adresse <http://qc.spw.wallonie.be/fr/normes/doc/PTV%20406v%204-0%20FR.pdf>

Courard, L. (2006). *Le cycle de vie des matière : les matériaux de construction et de démolition*.
http://etat.environnement.wallonie.be/files/Publications/Rapport%20analytique%202006-2007/Chap07/6_CycleVieMatiereMatConstDemol/dossier_DEC_Courard.pdf

CRAterre, sous le soleil exactement.pdf. (2009). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <http://craterre.org/terre.grenoble.archi.fr/grainsdisere/dl/programme09.pdf>

Curto, A. (2018). *Shot-earth : the new generation of rammed earth for sustainable constructions* {Mémoire non publié}.
<https://morethesis.unimore.it/theses/available/etd-03132018-131121/>

Curto, A., Lanzoni, L., Tarantino, A. M., & Viviani, M. (2020). Shot-earth for sustainable constructions. *Construction and Building Materials*, 239, 117775.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117775>

De Larrard F. et Colina H. (Dir.), *Le béton recyclé*. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.

Dethier, J. (2022). *Habiter la terre : l'art de bâtir en terre crue : traditions, modernité et avenir*. Flammarion.

Développement de l'architecture contemporaine en pisé, freins et leviers, l'Orangerie à Lyon by Calliope Trouillet—Issuu. (s. d.). Consulté 12 septembre 2022, à l'adresse https://issuu.com/calliope.trouillet/docs/trouillet_calliope

Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). *Construire en terre*. Paris, Editions Parenthèses.

Doat, Patrice, Hugo Houben, et Hubert Guillaud. 1986. *Architecture de terre. Production du Pisé*. Ministère de l'urbanisme, du logement et des transports / Bureau de la recherche architecturale (BRA); Ministère de la recherche et de la technologie; Ecole nationale supérieure d'architecture de Grenoble / Association grenobloise pour la recherche architecturale (AGRA) / CRATerre Laboratoire architecture de terre. Research Report. Consulté 4 août 2023, à l'adresse <https://hal.science/hal-01898228>.

Easton, D. (2012). 15—Pneumatically impacted stabilized earth (PISE) construction techniques. In M. R. Hall, R. Lindsay, & M. Krayenhoff (Éds.), *Modern Earth Buildings* (p. 385-400). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.3.385>

Easton—*The future and the common ground.pdf*. (s. d.). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <https://static1.squarespace.com/static/542967bee4b08f7343ca4e09/t/54eb6afee4b0ffad52b95d16/1424714494322/DavidEaston-RammedEarthWorks-ICREC-Keynote.pdf>

El-Wakil, L. (2017). Pascal Häusermann, une architecture libertaire pour délivrer le monde. *Tracés*, 4, 16-19.

FABEM_5.pdf. (s. d.). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse http://www.strres.org/fichier-utilisateur/fichiers/FABEM/FABEM_5.pdf

Gandreau, D., Paccoud, G., Rakotomamonjy, B., Robert, E., Studer, D., & Thierry, J. (2018). Réhabilitation et valorisation du bâti en pisé. CRATERRE.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01979508>

Genestrier, P., & Gras, P. (2015). *Sacré béton ! Fabrique et légende d'un matériaux du futur*, Libel, pp14-33.

Gozin-Müller, D. (s. d.). *Architecture en terre d'aujourd'hui*. [Fichier PDF] .
https://www.architectes.org/sites/default/files/atoms/files/170907_terra_francais.bd_.pdf?fbclid=IwAR10jDUYPcqVvmRBEbnowLEcFhZb2jvbj4OI5c3pNPcAwIU0w1Ln_a2TA_M

Guettala, A., Abibsi, A., & Houari, H. (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, 20, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.001>

Guillaud, H. (1996). Architectures en terre de France : Repères de l'histoire, patrimoine traditionnel et modernité. In *Méditerranée. Architectura de Terra*.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01868776>

Guillaud, H., Doat, P., Misse, A., & Moriset, S. (2016). Pisé "technique" : Traditions, évolutions, résistances, innovations et projections.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01806106>

Hall, M., & Swaney, B. (2005). *Stabilised Rammed Earth (SRE) Wall Construction – Now Available in the UK*. Building Engineer.

Hegger, M., & Auch-Schwelk, V., & Fuchs, M., & Rosenkranz, T. (2009). *Construire Atlas des matériaux*, DETAIL, 58p.

Houben, H., Guillaud, H. (1995). *Traité de construction en terre*. Parenthèses.

Hubert, J et Courard, L.pdf, (s. d.). Consulté 24 avril 2023, à l'adresse
https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/300467/1/ULIEGE_SIM.pdf

Joffroy, T., Guillaud, H., & Le Tiec, J.-M. (2013). Architectures contemporaines en terre crue : Sur les traces de Hassan Fathy. In L. Eloundou & T. Joffroy (Éds.), *Earthen Architecture in today's world : Proceedings of the UNESCO International Colloquium on the Conservation of World Heritage Earthen Architecture*, 17-18 December 2012 | *L'architecture de terre dans le monde d'aujourd'hui : Actes du Colloque international de l'UNESCO sur la conservation de l'architecture de terre du patrimoine mondial*, 17 et 18 décembre 2012 (p. 218-225). UNESCO.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00947949>

Joffroy, T. (2016). Les architectures de terre crue : Des origines à nos jours. In H. Jacquet (Éd.), *Savoir & faire : La terre: Vol. La terre* (p. 333-347). actes sud.
<https://hal.science/hal-01861816>

Koungang, G., & Morino, B. (2021). *Construction en brique de terre comprimée et granulats biosourcés : Une solution pour un habitat durable à Douala*.
<https://orbi.uliege.be/handle/2268/263307>

Long, M. (2021). *Rammed Concrete with Recycled Fine Aggregates* [Mémoire de master, Université de Liège]. Mathéo. <https://matheo.uliege.be/request-copy/2268.2/12955/74168/?step=4&token=f0cb204119179fe024b36348080bb4b1&id=74168>

L'urban mining : Vers une construction circulaire | Les granulats recyclés. (s. d.). Consulté 12 septembre 2022, à l'adresse
<https://www.granulatsrecycles.be/les-granulats-recycles>

Madec, P. (2021). Mieux avec moins, *Terre urbaine*, pp50.

McHenry, P. (1989). *Adobe and rammed earth buildings : design and construction*. Tuscon : univ. of Arizona Pr.

Minke, G. (2006). Construire avec la terre – Conception et technologie d'une architecture durable. Basel : Birkhäuser – Éditeurs d'architecture.

Morel, J-C., Pkla, A., Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21, 303-309.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061805002631?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7f214c4c7ab22e50

Niemann, E. (s. d.). *DANS LA FILIERE BATIMENT ET TRAVAUX PUBLICS*.

Nshimiyimana, P. (2020) *Effect of the type of clay earthen materials and substitution materials on the physico-mechanical properties and durability of compressed earth blocks*. [Thèse, Université de Liège]. Orbi. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/247797>

Paquet, S. (2021). Caractérisation du béton projeté par voie sèche : Une approche rhéologique et énergétique {Mémoire non publié}.
<https://corpus.ulaval.ca/entities/publication/90019e4b-a290-43e2-929a-a6408f509ef2>

Paulus, J. (2015) *Construction en terre crue : Disposition qualitatives, constructives et architecturales*. [Mémoire de master, Université de Liège]. Mathéo.
<https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/2355/1/TFE%20Jehanne%20Paulus.pdf>

Programme régional en économie circulaire. (s. d.). 69.

Rapport Circular Wallonia_DEF_v6_0.pdf. (s. d.). Consulté 12 septembre 2022, à l'adresse https://economiecirculaire.wallonie.be/sites/ec/files/user_uploads/Rapport%20Circular%20Wallonia_DEF_v6_0.pdf

Rapport 2022 Du Giec : Une Nouvelle Alerte Face Au Réchauffement Climatique - Statistiques Publiques, Rapports Et études Pour L'analyse Du Monde. (2022, mars 1). <https://www.statistiques-publiques.fr/2022/03/01/rapport-2022-du-giec-une-nouvelle-alerte-face-au-rechauffement-climatique/>

RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf. (s. d.). Consulté 24 avril 2023, à l'adresse https://blog.nobatek.inef4.com/wp-content/uploads/2021/12/RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf

Rojat, F., Hamard, E., Fabbri, A., Carnus, B., McGregor, F. (2020) Towards an easy decision tool to assess soil suitability for earth building. *Construction and Building Materials*, 257, 119-144.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182031549X>

Royer, J-M. (2013). *Étude de la mise en place et compaction du béton projeté.* {Mémoire non publié}. <https://corpus.ulaval.ca/entities/publication/14d2a06d-8006-4c64-a0f1-6044cbc63d8f>

Sand_and_sustainability_UNEP_2019.pdf. (s. d.). Consulté 2 août 2023, à l'adresse https://unepgrid.ch/storage/app/media/legacy/89/Sand_and_sustainability_UNEP_2019.pdf

Siccardi, P. (2018). *Influence de la lance de projection de béton : homogénéité et rebond* {Mémoire non publié}.
<https://corpus.ulaval.ca/entities/publication/179e92f8-6ee7-4d0f-ab56-c6a0894c6aa1/full>

Simon et al. - UTILISATION DES SABLES ET GRANULATS RECYCLÉS DANS .pdf. (s. d.). Consulté 22 avril 2023, à l'adresse <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/228451/1/Article%20publi%C3%A9.pdf>

Utilisation de granulats de béton recyclés dans le béton. (s. d.). CSTC. Consulté 1 juin 2022, à l'adresse <https://www.cstc.be/publications/monographies/32/>

Wiomont, F. (2022). Comportement des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés [Mémoire non publié].
<https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/14340>

Autres sources :

Béton de terre projeté, shot earth Opus Terra. (s. d.). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <http://www.opus-terra.ch/pages/beton-de-terre/>

Béton-projeté.pdf. (s. d.). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/b%C3%A9ton-projet%C3%A9.pdf>

Définitions: Taches, calcul des durées des taches, temps unitaire et rendement et les plannings. (2021, novembre 19).

<https://www.4geniecivil.com/2014/10/definitions-taches-calcul-des-durees.html>

Développement durable. (2022). In *Wikipédia*.

https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=D%C3%A9veloppement_durable&oldid=194051454

DÉVELOPPEMENT DURABLE ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX - Rapport Brundtland (1987). (s. d.). Consulté 12 septembre 2022, à l'adresse

http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap01/co/ch01_070_1-4-4_1.html

La construction et la rénovation écologiques. (2015, octobre 1). écoconso.

<https://www.ecoconso.be/fr/content/la-construction-et-la-renovation-ecologiques>

Newmedia, R. T. L. (2022, avril 30). *Le sable est la deuxième ressource la plus utilisée... et il risque d'en manquer en Belgique*: « Le territoire est trop petit pour s'étendre ». RTL Info. <https://www.rtl.be/info/belgique/economie/le-sable-est-la-deuxieme-ressource-la-plus-visitee-et-il-risque-de-manquer-en-belgique-1373403.aspx>

Saint-Pierre—2017—La parenthèse enchantée des maisons-bulles.pdf. (s. d.).

Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=bts-004%3A2017%3A143%3A%3A1004>

technobeton, A. (2017, décembre 11). Le béton projeté. *Technologie des bétons*.

<https://technobeton.wordpress.com/2017/12/11/le-beton-projete/>

Tout savoir sur l'extraction de sable en mer. (2021, février 5). FOD Economie salle de presse. <http://news.economie.fgov.be/196012-tout-savoir-sur-l-extraction-de-sable-en-mer>

Universalis, E. (s. d.). BÉTON. Encyclopædia Universalis. Consulté 1 juin 2022, à l'adresse <https://www.universalis.fr/encyclopedie/beton/>

ZIN. s. d. « First pouring of circular concrete in the Benelux | ZIN ». Consulté 2 août 2023 (<https://zin.brussels/fr/news/premiere-coulee-de-beton-circulaire-dans-le-benelux/>).

6. Liste des figures

Figure 1.1 : Théâtre du manège de Mons (2006), Pierre Hebbelinck. Parement intérieur imitant la rythmique des notes de musique

Source : Théâtre du manège : Mons. (2006). [Photographie]. Atelier d'architecture Pierre Hebbelinck. <http://www.pierrehebbelinck.net/fr/projets/260>

Figure 1.2 : Église de la lumière (1989), Tadao Ando

Source : Église de la Lumière. (2021). [Photographie]. La culture en partage. <http://frederic-morin-salome.fr/Mod-Ando-1989.html>

Figure 1.3 : Processus de circularité – Immeuble ZIN

Source : ZIN. (s. d.). *First pouring of circular concrete in the Benelux* | ZIN. Consulté 5 août 2023, à l'adresse <https://zin.brussels/fr/news/premiere-coulee-de-beton-circulaire-dans-le-benelux/>

Figure 2.1 : Tours de Shibam

Source : Colas, F. (2014, juillet 17). *Shibam, le Manhattan du désert au Yémen*. GenerationVoyage. <https://generationvoyage.fr/shibam-manhattan-du-desert-yemen/>

Figure 2.2 : Vue aérienne de Shibam

Source : redac. (2020, novembre 2). *Au Yémen, le « Manhattan du désert » épargné par la guerre, menacé par les pluies*. GoodPlanet mag'. <https://www.goodplanet.info/2020/11/02/au-yemen-le-manhattan-du-desert-epargne-par-la-guerre-menace-par-les-pluies/>

Figure 2.3 : La terre, un matériau

Source : Anger, R., & Fontaine, L. (2009). *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*. Belin.

Figure 2.4 : Classification des grains

Source : Anger, R., & Fontaine, L. (2009). *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*. Belin.

Figure 2.5 : Méthodes d'utilisation de la terre dans les constructions

Source : Anger, R., & Fontaine, L. (2009). *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*. Belin.

Figure 2.6 : Énergie intrinsèque du pisé par rapport au béton et à la brique

Source : Birznies, L. (2013). *Designing and building with compressed earth*.

Figure 2.7 : Résistance caractéristique à la compression de la terre comprimée, du béton et de la maçonnerie de briques

Source : Birznies, L. (2013). *Designing and building with compressed earth*.

Figure 2.8 : Résistance caractéristique en traction de la terre comprimée, du béton et de la maçonnerie de briques

Source : Birznies, L. (2013). *Designing and building with compressed earth*.

Figure 2.9 : Retrait linéaire caractéristique

Source : Birznies, L. (2013). *Designing and building with compressed earth*.

Figure 2.10 : Mise en œuvre du pisé traditionnel

Source : Gozin-Müller, D. (s. d.). *Architecture en terre d'aujourd'hui*. [Fichier PDF] . https://www.architectes.org/sites/default/files/atoms/files/170907_terra_francais.bd_.pdf?fbclid=IwAR10jDUYPcqVvmRBEbnowLEcFhZb2jvbj4OI5c3pNPcAwIU0w1Lna2TA_M

Figure 2.11 : Aerie House de The Construction Zone 2009, Sedona AZ

Source : *Aerie House by The Construction Zone*. (2013, juin 28). HomeAdore.
<https://homeadore.com/2013/06/28/aerie-house-construction-zone/>

Figure 2.12 : Variations de couleur et de texture de la terre pisée naturelle

Source : Birznies, L. (2013). *Designing and building with compressed earth*.

Figure 2.13 : Fouloir pneumatique en action

Source : Anger, R., & Fontaine, L. (2009). *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*. Belin.

Figure 2.14 : Différents modèles de fouloirs pneumatiques

Source : Anger, R., & Fontaine, L. (2009). *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*. Belin.

Figure 2.15 : Earth dome, Dome de terre réalisé en 2014, Martin Rauch accompagné de ses étudiants

Source : *1_2_3 REFORMULATION DU MATERIAU*. (s. d.). Issuu. Consulté 7 août 2023, à l'adresse
https://issuu.com/calliope.trouillet/docs/trouillet_calliope/s/13489233

Figure 2.16 : L'orangerie, Lyon

Source : *Îlot B2—Lyon Confluence*. (2018, juillet 25). Clément Vergély architectes.
<http://www.vergelyarchitectes.com/ilot-b2-lyon-confluence/>

Figure 2.17 : Granulats recyclés

Source : L'urban mining : Vers une construction circulaire | Les granulats recyclés. (s. d.). Consulté 12 septembre 2022, à l'adresse <https://www.granulatsrecycles.be/les-granulats-recycles>

Figure 2.18 : De la déconstruction à la reconstruction

Source : L'urban mining : Vers une construction circulaire | Les granulats recyclés. (s. d.). Consulté 12 septembre 2022, à l'adresse <https://www.granulatsrecycles.be/les-granulats-recycles>

Figure 2.19 : Projection béton par voie humide

Source : Royer, J-M. (2013). *Étude de la mise en place et compaction du béton projeté*. {Mémoire non publié}. <https://corpus.ulaval.ca/entities/publication/14d2a06d-8006-4c64-a0f1-6044cbc63d8f>

Figure 2.20 : Projection béton par voie sèche

Source : Royer, J-M. (2013). *Étude de la mise en place et compaction du béton projeté*. {Mémoire non publié}. <https://corpus.ulaval.ca/entities/publication/14d2a06d-8006-4c64-a0f1-6044cbc63d8f>

Figure 2.21 : Détail d'une lance

Source : Siccardi, P. (2018). *Influence de la lance de projection de béton : homogénéité et rebond* {Mémoire non publié}. <https://corpus.ulaval.ca/entities/publication/179e92f8-6ee7-4d0f-ab56-c6a0894c6aa1/full>

Figure 2.22 : Maison bulle de Häusermann et Costy

Source : *Saint-Pierre—2017—La parenthèse enchantée des maisons-bulles.pdf*. (s. d.). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=bts-004%3A2017%3A143%3A%3A1004>

Figure 2.23 : Projection par voie sèche (tunnel sous la Manche)

Source : *Armengaud—Optimisation des propriétés des bétons projetés pa.pdf*. (s. d.). Consulté 22 avril 2023, à l'adresse <https://hal.science/tel-01528798v1/document>

Figure 2.24 : Projection de terre

Source : *Easton — The future and the common ground.pdf*. (s. d.). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <https://static1.squarespace.com/static/542967bee4b08f7343ca4e09/t/54eb6afee4b0ffad52b95d16/1424714494322/DavidEaston-RammedEarthWorks-ICREC-Keynote.pdf>

Figure 2.25: Résultat final voile projeté

Source : *Easton — The future and the common ground.pdf*. (s. d.). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <https://static1.squarespace.com/static/542967bee4b08f7343ca4e09/t/54eb6afee4b0ffad52b95d16/1424714494322/DavidEaston-RammedEarthWorks-ICREC-Keynote.pdf>

Figure 2.26 : Projection contre mur pour un boutellier

Source : Pittet Artisans. (2017). *Echantillons de démonstration de béton de terre projeté « shot-earth »* [Photo]. <https://www.flickr.com/photos/pittet-artisans/51788472482/>

Figure 2.27 : Projection sur mur en paille pour finition

Source : Pittet Artisans. (2017). *Echantillons de démonstration de béton de terre projeté « shot-earth »* [Photo]. <https://www.flickr.com/photos/pittet-artisans/51788472482/>

Figure 2.28 : Aspet mur

Source : *Béton de terre projeté, shot earth Opus Terra*. (s. d.). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <http://www.opus-terra.ch/pages/beton-de-terre/>

Figure 2.29 : Aspet mur coupé

Source : *Béton de terre projeté, shot earth Opus Terra*. (s. d.). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <http://www.opus-terra.ch/pages/beton-de-terre/>

Figure 2.30 : Aspect du mur brut coté décoffré

Source : *Béton de terre projeté, shot earth Opus Terra*. (s. d.). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <http://www.opus-terra.ch/pages/beton-de-terre/>

Figure 2.31 : Phénomène du rebond

Source : *Béton-projeté.pdf*. (s. d.). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/b%C3%A9ton-projet%C3%A9.pdf>

Figure 2.32 : Particules non compactées, coté inverse de la projection

Source : *CRAterre, sous le soleil exactement.pdf*. (2009). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <http://craterre.org/terre.grenoble.archi.fr/grainsdisere/dl/programme09.pdf>

Figure 2.33 : Comparaison d'enduits en terre ; a) pas assez de sable ; b) avec sable ajouté ; c) avec paille

Source : Anger, R & Fontaine, L. (2009). *Bâtir en terre, du grain de sable à l'architecture*. Berlin, 162p.

Figure 3.1: Terre argileuse

Source : photographie personnelle

Figure 3.2 : Terre limoneuse

Source : photographie personnelle

Figure 3.3 : Tamis rotatif

Source : photographie personnelle

Figure 3.4 : Presse manuelle

Source : photographie personnelle

Figure 3.5 : Terre limoneuse (-eau)

Source : photographie personnelle

Figure 3.6 : Terre limoneuse + granulats recyclés (-eau)

Source : photographie personnelle

Figure 3.7 : Terre argileuse (-eau)

Source : photographie personnelle

Figure 3.8 : Terre argileuse (+eau)

Source : photographie personnelle

Figure 3.9 : Terre argileuse + granulats recyclés (-eau)

Source : photographie personnelle

Figure 3.10 : Test de résistance en fendage

Source : photographie personnelle

Figure 3.11 : Test de compression sur deux demi-briques empilées

Source : photographie personnelle

Figure 3.12 : Diviseur à couloirs

Source : photographie personnelle

Figure 3.13 : Méthode de division par quartage

Source : Bonnes pratiques d'échantillonnage pour l'analyse des lots en herboristerie de gros. (s. d.). *Produire Bio*. Consulté 6 août 2023, à l'adresse <https://www.produire-bio.fr/articles-pratiques/bonnes-pratiques-dechantillonnage-lanalyse-lots-herboristerie-de-gros/>

Figure 3.14 : Gouttière métallique avec les tamis

Source : photographie personnelle

Figure 3.15 : Arrosage de la terre/granulats

Source : photographie personnelle

Figure 3.16 : Classement par tailles décroissantes des cailloux/sables de la terre

Source : photographie personnelle

Figure 3.17 : Illustration du test de la bouteille

Source : photographie personnelle

Figure 3.18 : Courbe granulométrique de la terre

Source : document personnel

Figure 3.19 : Courbe granulométrique des granulats recyclés

Source : document personnel

Figure 3.20 : Guniteuse

Source : photographie personnelle

Figure 3.21 : Compresseur

Source : photographie personnelle

Figure 3.22 : Réserve eau de pluie

Source : photographie personnelle

Figure 3.23 : Coffrage

Source : photographie personnelle

Figure 3.24 : Chargeuse

Source : photographie personnelle

Figure 3.25 : Projection avec beaucoup de rebond

Source : photographie personnelle

Figure 3.26 : Projection avec rebond contrôlé

Source : photographie personnelle

Figure 3.27 : Échantillons terminés

Source : photographie personnelle

Figure 3.28 et 29 : Décoffrage des échantillons

Source : photographie personnelle

Figure 3.30 : Apparition de strates

Source : photographie personnelle

Figure 3.31 : Test de compression sur bloc 100 x 100 mm

Source : photographie personnelle

Figure 3.32 : Coffrage avec carton de désolidarisation

Source : photographie personnelle

Figure 3.33 : Pied de mur encombré par le rebond

Source : photographie personnelle

Figure 3.34 : Avancement de projection

Source : photographie personnelle

Figure 3.35 : Voile et banc terminés

Source : photographie personnelle

Figure 3.36

Source : Maachi, A., & Sonnier, R. (2020, mars 26). *Le plus vieux matériau de construction au monde est aussi le plus écoresponsable*. The Conversation. <http://theconversation.com/le-plus-vieux-matériau-de-construction-au-monde-est-aussi-le-plus-écoresponsable-133587>

Figure 3.37 : Façonnage

Source : photographie personnelle

Figure 3.38 : Face brute

Source : photographie personnelle

Figure 3.39 : Face coupée (façonnage)

Source : photographie personnelle

Figure 3.40 : Face coffrée

Source : photographie personnelle

7. Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Points de vigilance et leviers environnementaux en fonction du type d'utilisation des granulats recyclés

Source : *RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf*. (s. d.). Consulté 24 avril 2023, à l'adresse https://blog.nobatek.inef4.com/wp-content/uploads/2021/12/RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf

Tableau 2.2 : Classification granulats recyclés

Source : *COPRO.pdf*. (2012.). Consulté 24 avril 2023, à l'adresse <http://qc.spw.wallonie.be/fr/normes/doc/PTV%20406v%204-0%20FR.pdf>

Tableau 2.3 : Caractéristiques minimales requises des granulats utilisés pour le béton

Source : Wiomont, F. (2022). Comportement des briques comprimées produites à partir de granulats fins recyclés [Mémoire non publié]. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/14340>

Tableau 2.4 : Coefficient d'absorption eau des granulats recyclés et naturels

Source : Production personnelle

Tableau 2.5 : Déchets inertes issus de la construction ou de la fin de vie de bâtiments ou voiries et valorisations possibles

Source : *RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf*. (s. d.). Consulté 24 avril 2023, à l'adresse https://blog.nobatek.inef4.com/wp-content/uploads/2021/12/RCDiGreen_Guide_Granulats-recycles_Enjeux-impacts-environnementaux.pdf

Tableau 3.1 : Résultats test en compression des briques

Source : document personnel

Tableau 3.2 : Dimensions des tamis utilisés

Source : document personnel

Tableau 3.3 : Refus et passants de la terre

Source : document personnel

Tableau 3.4 : Résultats du test de la bouteille

Source : document personnel

Tableau 3.5 : Refus et passants des granulats recyclés

Source : document personnel

Tableau 3.6 : Classification des granulats recyclés

Source : document personnel

Tableau 3.7 : Résultats du contrôle visuel des granulats recyclés

Source : document personnel

Tableau 3.8 : Proportion des mélanges

Source : document personnel

Tableau 3.9 : Résultats des tests en compression

Source : document personnel

Tableau 4.1 : Comparaison des temps unitaires

Source : document personnel

8. Annexes

8.1 Compresseur

CARACTERISTIQUES FNTP XAS 186 DD - ATLAS COPCO

DESCRIPTION DU MODÈLE



CARACTÉRISTIQUES MATÉRIEL

Avce freinage

 Mise en Service : 1999	 Longueur (L) : 4.35 m × Largeur (l) : 1.7 m × Hauteur (H) : 1.61 m	
 Puissance : 82 kW	 Masse : 1.82 t	Protection contre le vol : NON / Actuel : OUI

GENERALITES

Sur remorque routiere : (O)ui - (N)on
Sur remorque T.P. : (O)ui - (N)on
Sur skid : (O)ui - (N)on

O	Capacité du réservoir d'air	42l
N	Débit d'air refoulé (conditions d'aspiration)	10,3m3/mn
O	Pression maxi d'utilisation	1,40MPa

MOTEUR

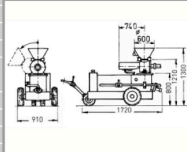
Type : (D)iesel - (E)lectrique	D
Capacité du réservoir de carburant	175l
Consommation horaire à pleine puissance	17,5lh
Marque	DEUTZ
Type	BF 4M 2012 C / TCD2012
Refroidissement : (H)uile - (A)ir - (E)au	A

8.2 Gunitewe

Technische Daten

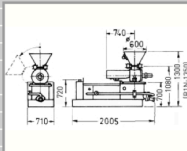
Typ A1N

Praktische Förderleistung	(m³/h)	0,3 - 5
Korngröße der Zuschlagstoffe	(mm)	0 - 12
Materialförderschlauchanschluß	(ø mm)	25/ 32/ 40
Luftbedarf, abhängig von Schlauch-ø und Förderweite	(m³/min)	3 - 9
Förderweite	(m)	bis 700
Förderhöhe	(m)	bis 150
Länge/ Breite/ Höhe	(mm)	1.720 x 910 x 1.300
Gewicht	(kg)	900



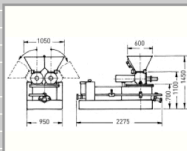
Typ TSN/ B1N

Praktische Förderleistung	(m³/h)	0,3 - 8
Korngröße der Zuschlagstoffe	(mm)	0 - 16
Materialförderschlauchanschluß	(ø mm)	25/ 32/ 40/ 50/ 65
Luftbedarf, abhängig von Schlauch-ø und Förderweite	(m³/min)	4 - 20
Förderweite	(m)	bis 1.500
Förderhöhe	(m)	bis 150
Länge/ Breite/ Höhe	(mm)	2.005 x 710 x 1.300
Gewicht	(kg)	1.120/ 1.150



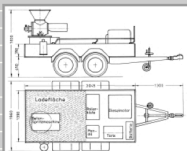
Typ C1N

Praktische Förderleistung	(m³/h)	5 - 15
Korngröße der Zuschlagstoffe	(mm)	0 - 16
Materialförderschlauchanschluß	(ø mm)	50/ 65/ 70/ 80
Luftbedarf, abhängig von Schlauch-ø und Förderweite	(m³/min)	12 - 35
Förderweite	(m)	bis 1.500
Förderhöhe	(m)	bis 150
Länge/ Breite/ Höhe	(mm)	2.275 x 1.050 x 1.450
Gewicht	(kg)	1.950



Typ 208 „Sanierexpress“

Praktische Förderleistung	(m³/h)	0,3 - 5
Korngröße der Zuschlagstoffe	(mm)	0 - 12
Materialförderschlauchanschluß	(ø mm)	25/ 32/ 40
Luftbedarf, abhängig von Schlauch-ø und Förderweite	(m³/min)	3 - 9
Förderweite	(m)	bis 700
Förderhöhe	(m)	bis 150
Länge/ Breite/ Höhe	(mm)	3.045 x 1.860 x 1.830
Gewicht	(kg)	1.640



Technische Änderungen vorbehalten | Stand 07/ 2006

Betranspritzmaschinen

für Spritzbeton, Spritzmörtel und Feuerfestmassen

CLEVER & CO
Betranspritztechnik
Elektro- und Maschinenfabrik GmbH

Entwickelt für

- Profieinsätze unter härtesten Bedingungen
- ofentrockene und vorbefeuchtete Gemische
- staubfreie Arbeitsplätze
- höchste Wirtschaftlichkeit



Clever & Co. Telefon: +49/ (0)201/ 86 611-0
Elektro- und Maschinenfabrik GmbH Telefax: +49/ (0)201/ 66 08 74
Laubenhof 14-18 E-Mail: info@clever-co.de
45326 Essen/ Germany www.clever-co.de



8.3 Presse à briques



Presse à Brique de Terre

à partir de : 975,00 € HT

Pratique, ne nécessite aucune alimentation électrique.

Vocation écologique.

- 1 +

DEMANDER UN DEVIS

 Mode Emploi-Pressaterre

Share:   

DESCRIPTION **INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES** BRIQUE DE TERRE COMPRIMÉE (BTC)

Structure	Acier
Protection	Peinture Epoxy cuite au four
Poids	45 Kg
Taille du moule	295 x 140 x 75 mm
Hauteur des briques	de 50 à 75 mm
Production journalière (1 personne)	500 briques
Production journalière (2 personnes)	800 briques