

#### MALAXTERRE

# ETUDE DE L'IMPACT MECANIQUE, **ENVIRONNEMENTAL ET ECONOMIQUE DU MELANGE MECANISE DE BAUGE**

RAPPORT AVRIL 2020



Grégory Bosi, Robert Junalik

#### **REDACTION**

Bogdan Cazacliu









izerianique et retrairiologique ège : 14-20 bd Newton – Cité escartes, Champs-sur-Marne – 77447 larne-la-Vallée Cedex 2 33(0)1 81 66 80 00 – F. +33(0)1 81 66 80



#### MALAXTERRE

# ETUDE DE L'IMPACT MECANIQUE, ENVIRONNEMENTAL ET ECONOMIQUE DU MELANGE MECANISE DE BAUGE

RAPPORT AVRIL 2020

#### **A**UTEURS

Erwan Hamard, Université Gustave Eiffel - MAST - GPEM, Lauredan Le Guen, Université Gustave Eiffel - MAST - GPEM, David Hamon, Université Gustave Eiffel - MAST - GPEM, Samuel Dugelay, Entreprise Makjo, Grégory Bosi, Entreprise Maison en Terre, Robert Junalik, Entreprise Junalik



Ce rapport d'études est mis à disposition par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de Rennes et les auteurs selon les termes de la licence Creative Commons Attribution-Utilisation non commerciale-Pas d'Œuvre dérivée 4.0 International (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.fr). Merci par avance pour votre intérêt, votre partage et votre valorisation des travaux scientifiques menés en pluridisciplinarité, publiés ou non, provenant d'établissements d'enseignement et de recherche, et de bien vouloir respecter entre autres les droits de paternité.

#### Référence électronique du document

Erwan Hamard, Lauredan Le Guen, David Hamon, Samuel Dugelay, Grégory Bosi, Robert Junalik, 2020. « Étude de l'impact mécanique, environnemental et économique du mélange mécanisé de bauge ». Malaxterre, R&D Écomaterre. 20 p. http://www.iaur.fr/r-et-d-ecomaterre/malaxterre/

#### **Images**

Les droits d'auteur pour les photos du rapport : Université Gustave Eiffel Les droits d'auteur pour la photo de couverture : IAUR – R&D Écomaterre

#### Contact

HAMARD Erwan ITPE Ingénieur

Téléphone : 33 (0)2 40 84 56 51 erwan.hamard@univ-eiffel.fr

## MALAXTERRE

# **SOMMAIRE**

1. CONTEXTE ET ENJEUX	4
2. MATERIAUX ET METHODES	6
2.1. MALAXEUR	6
2.2. MATERIAU	7
2.3. FABRICATION DES LEVEES	9
2.4. FABRICATION DES EPROUVETTES	9
2.5. MESURE DES CONSOMMATIONS ET DU RENDEMENT	10
3. RESULTATS	10
3.1. CARACTERISATION DES LEVEES	10
3.2. COMPORTEMENT MECANIQUE	13
3.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL	15
3.4. Couts	16
4. DISCUSSION	17
5. CONCLUSION	18
6. REMERCIEMENTS	18
7. BIBLIOGRAPHIE	19

# 1. Contexte et enjeux

La terre crue est employée depuis le Néolithique pour la construction. Après son déclin en Occident au début du  $20^{\rm ème}$  siècle, la construction en terre crue connaît un regain d'intérêt du fait de son faible impact environnemental au regard de celui des matériaux de construction conventionnels [1–4]. Et pour cause, le secteur du bâtiment est le plus grand consommateur de ressources naturelles [2,5,6], il génère de grandes quantités de déchets [5,7] et est responsable de l'émission de gaz à effet de serre qui participent au changement climatique [7–11]. L'énergie grise (énergie consommée lors de la construction) et l'énergie en vie de service (énergie consommée lors de l'utilisation) du secteur du bâtiment représentent environ 40 % de la consommation globale [5,7,8,11]. Jusque dans les années 2000, seule l'énergie en vie de service était prise en compte du fait de la part prépondérante qu'elle représentait dans le cycle de vie global du bâtiment. Depuis, l'utilisation d'équipements et d'isolants de plus en plus performants a modifié le rapport entre énergie grise et énergie en vie de service, et la part de l'énergie grise a augmenté [7,11,12]. Afin de poursuivre les efforts de réduction d'énergie, le prochain défi du secteur du bâtiment sera celui de la réduction de l'énergie grise.





Figure 1. Malaxage de bauge par piétinement et à l'aide d'un malaxeur à arbre vertical (entreprise Junalik)

Les procédés traditionnels de construction en terre disposent de nombreux avantages environnementaux, sociaux et sanitaires, mais leur lenteur d'exécution et leur besoin important en main d'œuvre les rendent peu adaptés aux économies occidentales contemporaines [1,13-16]. Afin de mieux répondre aux contraintes économiques, tout en préservant ses bénéfices environnementaux. deux options sont envisageables : l'auto-construction mécanisation/préfabrication. Les auto-constructeurs disposent généralement de peu d'équipements de chantier et utilisent par conséquent le procédé manuel, à très faible impact environnemental. Mais cette solution ne peut satisfaire qu'une faible partie de la demande de logements. L'autre solution consiste à poursuivre les efforts de développement de mécanisation/préfabrication, or ces évolutions consomment plus d'énergie et créent moins d'emplois que le procédé traditionnel, réduisant d'autant les bénéfices environnementaux et sociétaux de la construction en terre. Un équilibre doit être trouvé entre un procédé traditionnel à émission de gaz à effet de serre quasiment nulle et une construction en terre à bas coût et à mise en œuvre rapide. Le futur de la construction en terre sera le résultat d'une optimisation de la soutenabilité économique et environnementale du procédé [17].

La bauge est un procédé de construction traditionnel qui consiste à empiler des mottes de terres à l'état plastique montées par levées successives [17]. Parmi les pistes envisageables de mécanisation, l'une d'elle consiste à utiliser un malaxeur afin de remplacer la phase de piétinement du mélange de bauge (Figure 1). La mécanisation du procédé permet de réduire le besoin en main d'œuvre sur le chantier, la pénibilité du travail et doit permettre d'améliorer le malaxage. La première mention de mécanisation de la bauge est celle de Clough William-Ellis en 1920 [18], faisant état d'un broyeur à meules motorisé. Depuis, d'autres tentatives de

mécanisation du malaxage ont été proposées, à l'aide de machines telles que des bétonnières [8,19–22], des malaxeurs à mortier [8], des malaxeurs à arbre vertical [23–25], des motoculteurs [8] et des malaxeurs de briquèterie [16]. Le pétrissage de la plupart de ces machines n'est pas suffisant pour mélanger convenablement les fibres et les argiles ensemble. Elles requièrent donc une teneur en eau de fabrication plus élevée que celle de la bauge manuelle, ce qui conduit à des temps de séchage plus longs. Ces machines sont considérées comme inappropriées par de nombreux auteurs pour le malaxage de la bauge [8,19–22]. Une autre technique mécanisée de malaxage de la bauge, développée en Angleterre, consiste à fouler le mélange à l'aide des roues d'un tractopelle et de le mélanger à l'aide de la pelle du tractopelle [8,15,22]. Le résultat du malaxage au tractopelle est jugé comme satisfaisant, mais, comme pour les autres techniques mécanisées, il requiert une teneur en eau de fabrication plus élevée que le malaxage manuel, impliquant de laisser le mélange de bauge sécher quelques temps avant sa mise en œuvre [8,15]. Une teneur en eau plus élevée lors de la fabrication implique également une résistance mécanique moindre du mur une fois sec.



Figure 2. Mélangeur continu à palettes

L'emploi d'un mélangeur continu à palettes (Figure 2), couramment employé dans le domaine des céramiques, nous semble pouvoir répondre aux enjeux de mécanisation des mélanges de bauge et plus généralement des mélanges de terre à l'état plastique. Ces malaxeurs ont en effet une capacité importante de pétrissage, ce qui permet d'homogénéiser la teneur en eau du mélange et de limiter les besoins en eau d'apport. Le mélange est alors plus sec et plus ferme, permettant ainsi d'augmenter la hauteur des levées, réduisant le temps de séchage et améliorant la résistance mécanique du mur. Un autre avantage de ce type de malaxeur, qui fonctionne en continue, est de ne pas avoir à vidanger la cuve lors de chaque gâchée, comme c'est le cas pour un malaxeur à arbre vertical (Figure 1). L'objectif du projet Malaxterre est d'évaluer le potentiel de l'emploi d'un mélangeur continu à palettes pour préparer des mélanges de terre à l'état plastique. La performance mécanique, la réduction des coûts ainsi que l'impact environnemental seront étudiés.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du **programme Écomaterre**, piloté par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de Rennes et financé par le Conseil Régional de Bretagne, des bailleurs sociaux - Néotoa et Archipel Habitat- et du promoteur coopératif la Coop de Construction, tous soucieux de contribuer à l'innovation dans l'habitat et la construction pour de meilleures pratiques territoriales en adéquation avec un patrimoine ainsi qu'une ressource locale. Un des objectifs majeurs du programme de recherche et développement Écomaterre est de permettre la construction d'une quarantaine de logements en terre crue à l'horizon 2025 sur le

territoire de Rennes Métropole, soit un immeuble de logements sociaux en terre sur trois étages et un collectif d'une quinzaine d'habitations en accession à la propriété. Cette étude a également reçu le soutien financier du projet **ANR Resbati** (<a href="https://anr.fr/Projet-ANR-16-CE22-0010">https://anr.fr/Projet-ANR-16-CE22-0010</a>) concernant la remise aux normes du malaxeur afin de permettre la fabrication de murets en bauges qui seront testés dans le cadre de ce projet.

La construction de bâtiments de grande taille en terre crue est un défi, notamment en termes de production de matière et de délai de chantier. En effet, la quantité de terre nécessaire à la construction d'un immeuble de 4 niveaux est de l'ordre du millier de tonne de terre. La mise en œuvre de tels volumes requiert l'emploi d'un procédé de malaxage de terre efficace et un procédé de mise en œuvre rapide. Le développement d'un malaxeur répondant à ces exigences est l'objectif du projet Malaxterre.

# 2. Matériaux et méthodes

#### 2.1. Malaxeur

Le malaxeur a été récupéré dans une briqueterie en cessation d'activité située au Fuilet (49) (Figure 3). Le malaxeur date des années 1960. Il a été remis en état par David Hamon, aidé de Frantz Buisson, techniciens au laboratoire GPEM. La structure d'origine a été traitée contre la corrosion et peinte, la cuve a été garnie d'une tôle en inox, les pales ont été remplacées par des pales confectionnées sur mesure et une structure a été soudée pour soutenir le malaxeur et le positionner à hauteur de travail. Le moteur a été remplacé et un variateur ajouté pour permettre de réguler la vitesse de rotation des axes et disposer les sécurités et arrêts d'urgences réglementaires. Une notice d'utilisation est en cours de rédaction et le dispositif de malaxage est en cours de certification par l'Apave pour une utilisation sur chantier. En plus du malaxeur, deux tapis convoyeurs ont été achetés pour permettre le remplissage et la vidange de la cuve (Figure 4). L'alimentation en eau se fait à l'aide d'un jet d'eau.





Figure 3. État du malaxeur avant et après remise en état par l'équipe technique du laboratoire GPEM



Figure 4. Dispositif de malaxage

### 2.2. Matériau

La terre utilisée pour les fabrications provient de travaux d'excavation d'un centre sportif de la commune de Saint-Sulpice-la-Forêt. La texture du sol a été déterminée par sédimentation et prélèvement à la pipette de Robinson selon la norme NF X 31-107 ainsi que par tamisage à sec selon la norme NF P 94-056. La Valeur de Bleu du Sol (VBS) a été déterminée d'après la norme NF P 94-068 et les limites d'Atterberg selon la norme NF P 94-051. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1.

Argiles (0 - 2 μm) (%)	15
Limons (2 - 50 μm) (%)	33
Sables (50 μm - 2 mm) (%)	15
Graviers (> 2 mm) (%)	37
VBS (g/100g)	1,01
Limite de plasticité - W₽ (%)	29,1
Limite de liquidité - $W_L$ (%)	44,8
Indice de plasticité - IP	15,7
Activité au bleu - A <sub>CB</sub>	7
	normalement active
Activité du sol - Ac	1
	normale

Tableau 1. Caractéristiques de la terre de Saint Sulpice la Forêt

La commune de Saint-Sulpice-la-Forêt est située au Nord-Est de Rennes dans une zone où la probabilité de trouver de la terre convenant à la construction en bauge est de 80 à 100 % (Figure 5) [6]. Les caractéristiques géotechniques de la terre de Saint-Sulpice-la-Forêt prélevée pour cette étude sont compatibles avec les caractéristiques proposées par [6] pour la construction en bauge

(Figure 6). Enfin, ce gisement est employé par plusieurs maçons expérimentés pour l'entretien du patrimoine et la construction de logements neufs en bauge. Cette terre peut donc être qualifiée de « terre à bauge ».

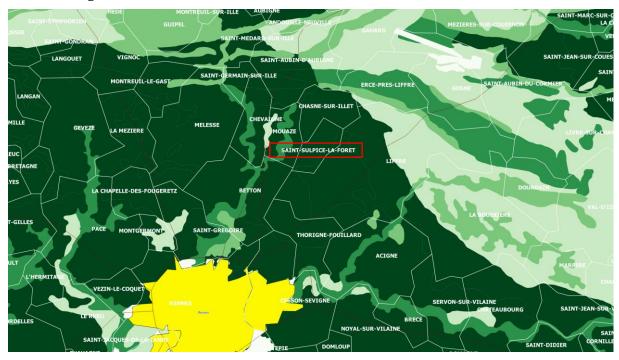


Figure 5. Carte de la disponibilité de la ressource en terre à bauge d'après [6]. La zone verte foncée correspond à une probabilité de 80 à 100 % de trouver de la terre à bauge.

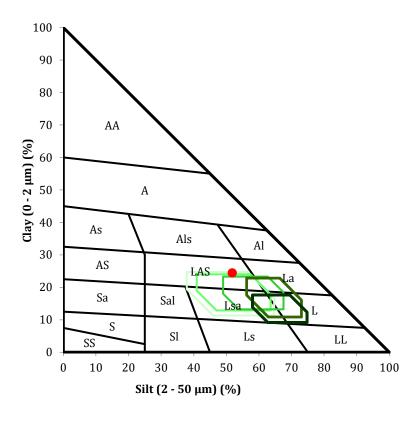


Figure 6. Convenance de la terre de Saint Sulpice la Forêt au regard des classes de convenances proposées par [6]

#### 2.3. Fabrication des levées

Deux levées ont été réalisées pour tester le potentiel d'utilisation du malaxeur. Une première levée (levée 1), de 130 cm, a été construite le 1er décembre 2017 sous la direction de trois maçons spécialistes de la bauge : Robert Junalik, Grégory Bosi et Samuel Dugelay. La seconde levée (levée 2), de 120 cm, a été réalisée par les étudiants de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Bretagne encadrés par Rozenn Kervella et Loïc Daubas le 12 avril 2018 (Figure 7). Les levées sont construites par empilement de mottes non fibrées, pétries au malaxeur et le fibrage est réalisé entre chaque couche de mottes (cas a Fig. 7 de [17]). Une tentative de mélange avec fibres longues (60 cm) s'est révélée infructueuse. Les fibres s'entouraient autour des axes et bloquaient leur rotation.

Le retrait en cours de séchage est mesuré pour la levée 2 à l'aide de repères fixés dans le mur. Après séchage, des prélèvements sont réalisés dans chacune des deux levées pour mesurer la variation de masse volumique et de teneur en eau dans les murs.





Figure 7. Fabrication des levées 1 (01/12/17) à gauche et 2 (12/04/18) à droite

# 2.4. Fabrication des éprouvettes

Les éprouvettes de bauge sont réalisées d'après le protocole proposé par [26]. Ce protocole prévoit le compactage du mélange de bauge en 8 couches compactées par 25 coups chacune à l'aide d'une dame Proctor dans un moule de diamètre 15cm et de hauteur 30cm, recouvert par une chaussette pour faciliter le démoulage (Figure 8). Les éprouvettes fabriquées lors de la levée 1 sont sans fibres, tandis que pour celles de la levée 2, une couche de fibre est ajoutée toutes les deux couches de terre.

Les éprouvettes sont séchées à l'étuve à 40°C, puis conditionnées dans une salle régulée à 20°C pendant au moins 3 semaines, avant d'être testées mécaniquement afin de déterminer leur module pseudo-élastique (moyenne des modules sécants calculés à partir des déformations mesurées dans le tiers central de l'éprouvette par un extensomètre dans le domaine des petites déformations) et leur résistance en compression maximale (Figure 8) [26].





Figure 8. Fabrication et test mécanique des éprouvettes de bauge

#### 2.5. Mesure des consommations et du rendement

La masse de terre produite sur un temps donné est estimée afin de calculer le rendement du malaxeur. En parallèle, le variateur du malaxeur étant équipé d'un dispositif de mesure de l'ampérage en temps réel qui permet de calculer la puissance délivrée, la consommation d'énergie par unité de masse est estimée. Une Analyse du Cycle de Vie (méthode d'évaluation des impacts environnementaux) du procédé a été réalisée afin de comparer l'impact environnemental de ce procédé avec les procédés manuels et conventionnels.

# 3. Résultats

#### 3.1. Caractérisation des levées

Les retraits verticaux, mesurés sur la levée 2, sont plus importants que les retraits horizontaux et sont plus marqués dans le bas de la levée (Figure 9). Ceci peut s'expliquer par le retrait de la levée sous poids propre qui a pour effet d'accroître le retrait dans le bas de la levée. Le temps nécessaire pour atteindre 95% du retrait final est calculé pour chacun des tronçons de la levée (Tableau 2). Le retrait vertical est plus long (43 jours) que le retrait horizontal (33 jours) lui-même plus long que le retrait transversal (23 jours).

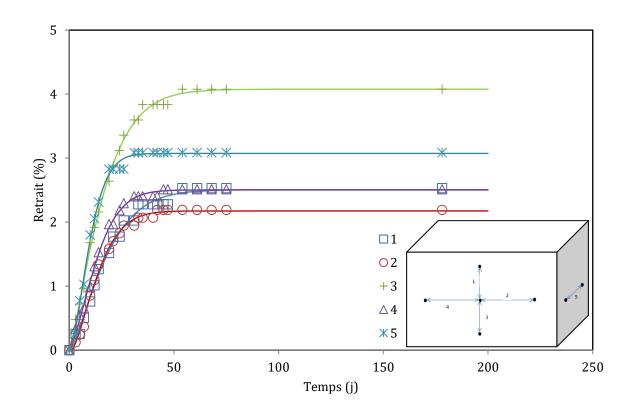


Figure 9. Suivi du retrait de la levée 2 pour 5 tronçons

Tronçon de levée	Temps 95% retrait (j)
1	44
2	33
3	42
4	32
5	23
Moyenne	35

Tableau 2. Temps nécessaire pour atteindre 95% du retrait maximal pour chacun des tronçons de la levée 2 (Figure 9)

Les teneurs en eau de la levée 1 sont mesurées après 10 mois de séchage et celles de la levée 2 après 6 mois de séchage (Figure 10). La teneur en eau moyenne de la levée 1 est de 3,1±1,4% et celle de la levée 2 de 6,6±0,8%. Ces valeurs sont supérieures aux teneurs en eau des éprouvettes de bauge conditionnées dans une salle à 20°C, considéré comme la teneur en eau d'équilibre, qui est de 1,7%. Les prélèvements ont donc été réalisés alors que les levées n'étaient pas sèches, dans l'état « bauge humide » comme défini dans [27]. Les variations de teneur en eau à l'intérieur des levées sont peu marquées et sont relativement homogènes. Ce n'est pas le cas pour les variations de densité sèche à l'intérieur des levées (Figure 11). Une tendance semble indiquer une augmentation de la densité pour les parties hautes des levées, ce qui est en contradiction avec les valeurs de retraits qui sont plus importantes dans les parties basses des levées. Une analyse complémentaire des densités sèches, séchées par sublimation, est en cours pour vérifier cette tendance.

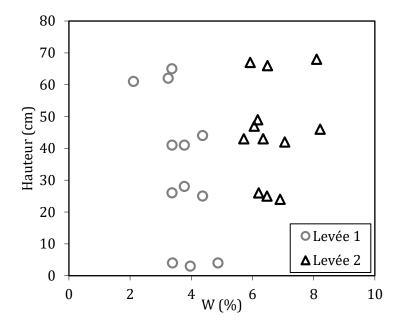


Figure 10. Teneur en eau en fonction de la hauteur dans la levée 1 après 10 mois de séchage et dans la levée 2 après 6 mois de séchage

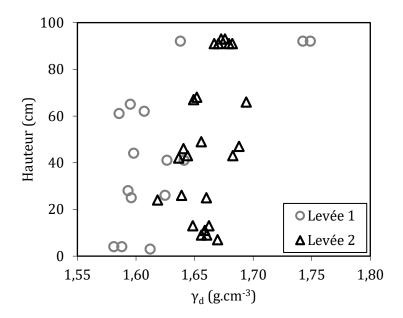


Figure 11. Densité sèche en fonction de la hauteur dans la levée

À l'aide des teneurs en eau de fabrication et des levées, après 6 et 10 mois de séchage, il est possible d'établir une courbe de séchage pour une levée de bauge réalisée avec la terre de Saint-Sulpice-la-Forêt (Figure 12). Cette courbe est tracée à l'aide d'une régression non-linéaire de type quadratique. Une tentative de corrélation des états des levées Malaxterre avec les états définis dans le Guide des Bonnes Pratiques de la Bauge [27] est proposée dans la Figure 12. Cette corrélation permet une estimation des durées des différentes phases de séchage d'une levée en bauge construite avec le malaxeur.

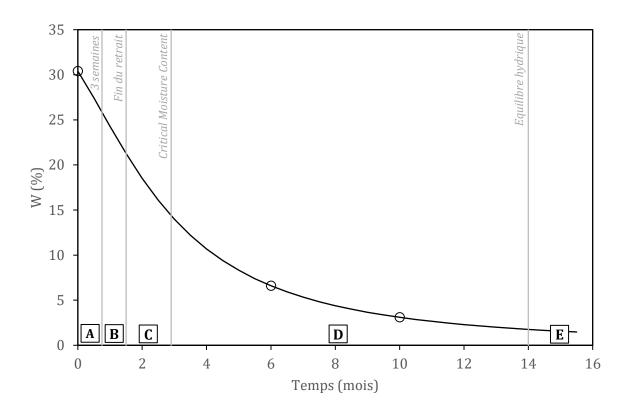


Figure 12. Tentative de corrélation des états des levées Malaxterre avec les états définis dans le Guides des Bonnes Pratiques Bauge [27] : A : Bauge plastique ; B : Bauge ferme ; C : Bauge en cours de séchage ; D : Bauge humide ; E : Bauge sèche. Le « Critical Moisture Content » est défini dans [8]

# 3.2. Comportement mécanique

La teneur en eau de fabrication de la bauge produite au malaxeur avec la terre de Saint Sulpice-la-Forêt est en moyenne de  $30.4\pm1.8\%$  (Figure 13). Cette teneur en eau est très proche de la limite de plasticité de ce sol ( $W_P=29.1\%$ , Tableau 1) ainsi que de la teneur en eau de fabrication par piétinement, mesurée sur des fabrications de laboratoire avec la même terre [26], qui est en moyenne de  $33.5\pm1.6\%$  (Figure 13). Le mélangeur continu à palettes permet la production de mélanges à l'état plastique ferme, proche de l'état solide. Il permet de travailler le mélange de bauge à des teneurs en eau équivalentes à celles du piétinement, quand les autres procédés mécanisés de malaxages requièrent des teneurs en eau plus élevées (Paragraphe 0). La densité sèche finale des éléments de bauge est d'autant plus grande que la teneur en eau de fabrication est faible, ce qui est vérifié dans les résultats de cette étude (Figure 13).

Pour une même terre, il existe une corrélation entre la densité sèche et la résistance mécanique. Travailler à des teneurs en eau plus basses permet d'augmenter la densité sèche et donc la résistance mécanique de l'élément de bauge. Ceci est confirmé par les résultats de cette étude (Figure 14). Cependant, pour la bauge, la densité sèche est contrôlée par la teneur en eau de fabrication ainsi que par la teneur en fibres. C'est la raison pour laquelle la corrélation entre résistance mécanique et densité sèche (Figure 15) est meilleure (R²=0,92) que celle avec la teneur en eau de fabrication (Figure 14, R²=0,72).

Pour des raisons de facilité de production, les éprouvettes de la levée 1 ont été réalisées sans fibres, alors que celles de la levée 2 ont été fibrées par couches afin de reproduire la mise en œuvre du mur. Les couches de fibres des éprouvettes de la levée 2 les ont fragilisées et sur les 4 éprouvettes réalisées une seule a pu être testée. Les éprouvettes de la levée 1, sans fibres, ont donc des densités sèches et des résistances mécaniques plus élevées que les éprouvettes réalisées par piétinement (Figure 15). Cependant l'éprouvette réalisée au malaxeur avec fibre a une densité sèche et une résistance mécanique équivalente à celle des éprouvettes réalisées par piétinement

(Figure 15). La résistance mécanique des éléments de bauges réalisés avec le malaxeur est donc du même ordre de grandeur que ceux réalisés par piétinement.

La résistance mécanique étant corrélée à la densité sèche, il est possible d'estimer l'impact des hétérogénéités de densités sèches mesurées dans les levées (Figure 11) sur l'hétérogénéité des valeurs de résistances mécaniques dans les levées (Tableau 3). On en déduit une résistance mécanique moyenne pour les levées 1 et 2 sont de 0,8±0,1MPa.

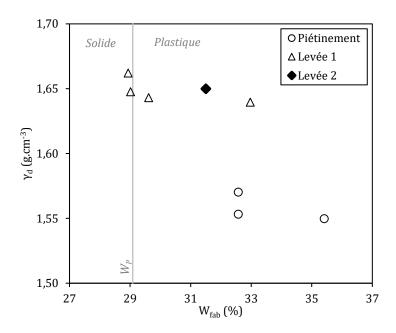


Figure 13. Évolution de la densité sèche des éléments de bauge  $(\gamma_d)$  en fonction de la teneur en eau de fabrication  $(W_{fab})$  pour le procédé par piétinement et par malaxage. La limite de plasticité (WP) est matérialisée pour délimiter les états solides et plastiques

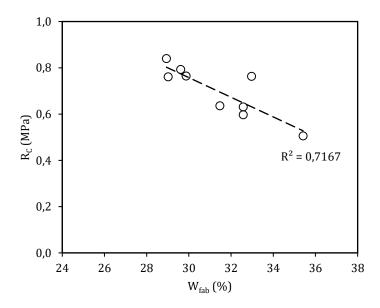


Figure 14. Résistance maximale des éprouvettes de bauge  $(R_C)$  en fonction de la teneur en eau de fabrication  $(W_{fab})$ 

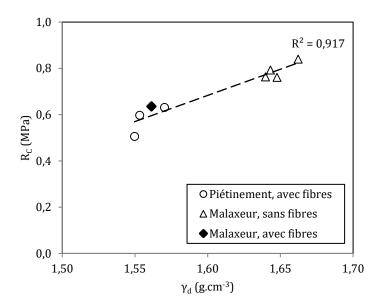


Figure 15. Résistance maximale en fonction de la densité sèche pour les éprouvettes de bauge réalisées par piétinement (avec fibres), au malaxeur sans et avec fibres

	γ <sub>d</sub> (g.cm <sup>-3</sup> )	R <sub>C</sub> (MPa)
<i>Moy</i> + σ	1.69	0.9
Moy	1.65	0.8
Moy - σ	1.61	0.7

Tableau 3. Impact de l'hétérogénéité de densité sèche ( $\gamma_d$ ) dans une levée, estimée à partir de sa moyenne (Moy) et de son écart-type ( $\sigma$ ), sur la résistance en compression ( $R_c$ ) pour l'état Bauge sèche [27]

# 3.3. Impact environnemental

L'impact environnemental du procédé mécanisé de mélange de bauge et sa comparaison avec les procédés traditionnels est traité dans le mémoire de Marine Le Bouedec [28]. Nous ne reproduisons ici que les résultats majeurs de cette étude.

Trois scénarios de construction en bauge sont étudiés :

- 1. Un procédé de bauge manuelle : prise en compte de l'excavation de la terre par une pelle mécanique, transport par un camion de 30 tonnes sur une distance de 20 km puis malaxage par piétinement,
- 2. Un procédé de bauge mécanisée réseau : prise en compte de l'excavation de la terre par une pelle mécanique, transport par un camion de 30 tonnes sur une distance de 20 km puis malaxage avec le malaxeur branché sur le réseau électrique,
- 3. Un procédé de bauge mécanisée groupe électrogène : prise en compte de l'excavation de la terre par une pelle mécanique, transport par un camion de 30 tonnes sur une distance de 20 km puis malaxage avec le malaxeur branché sur un groupe électrogène.

Ces trois scénarios sont comparés à deux procédés de construction conventionnels (parpaing et brique creuse) (Figure 16). Les émissions de CO<sub>2</sub> du procédé manuel sont de l'ordre de 83 à 95 fois moindre que celles des procédés conventionnels. L'emploi d'un malaxeur altère nécessairement le bilan environnemental du procédé, la question étant de savoir dans quelle mesure. Dans le cas du malaxeur branché sur le réseau, les émissions de CO<sub>2</sub> sont multipliées par

2 par rapport au procédé manuel. Cependant, les gains sont encore très importants en comparaison des émissions des procédés conventionnels (réduction d'un facteur 40 à 47). Par contre, dans le cas du malaxeur branché sur un groupe électrogène, les émissions de  $CO_2$  sont multipliées par 38 par rapport au procédé manuel, ce qui ne permet de réduire les émissions de  $CO_2$  que d'un facteur 2 à 2,5 par rapport aux procédés conventionnels.

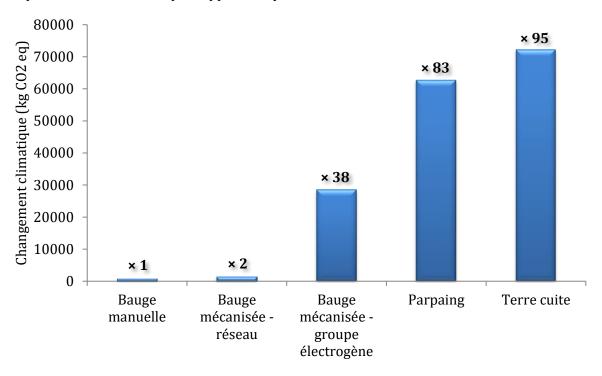


Figure 16. Comparaison des émissions de CO2 pour les différents scénarios envisagés

#### **3.4.** Coûts

La quantité de mélange de bauge produite par unité de temps a été mesurée lors des deux fabrications. Cette mesure a permis d'estimer le masse et la surface de mur réalisable en une journée (Tableau 4). Le malaxeur est en mesure de produire 3 à 4 fois plus de mélange que la technique traditionnelle par piétinement.

	Manuel	Fabrication 1	Fabrication 2
Masse de terre produite (t.j-1)	7	30	20
Surface de mur produite (m².j-1)	9	37	25

Tableau 4. Capacité de production du malaxeur de bauge

Le coût de production du mélange de bauge au malaxeur et par piétinement est calculé en prenant en compte les frais de main d'œuvre (300€/homme.jour) ainsi que les frais de location du malaxeur (estimés à 100€ par jour). Les frais de transports du malaxeur ne sont pas pris en compte. Avec une alimentation en terre automatisée, le pilotage du malaxeur ne requiert qu'une seule personne au lieu de 3 pour le piétinement. Comme le malaxeur permet de produire plus de mélange que le procédé par piétinement, un coût par m³ de mélange produit a été estimé (Tableau 5). Le coût du m³ de mélange de bauge est de l'ordre de 6 à 8 fois moindre avec le malaxeur.

Type malaxage	Masse de terre (t)	Homme.jour	Coût main d'œuvre (€)	Location (par jour)	Coût (€.m <sup>-3</sup> )
Manuel	7	3	900	0	120
Fabrication 1	30	1	300	100	14
Fabrication 2	20	1	300	100	20

Tableau 5. Estimation des coûts de production du mélange de bauge

# 4. Discussion

Le mélangeur continu à palette utilisé dans cette étude permet de produire un mélange de bauge à une teneur en eau équivalente à celui produit par piétinement. Ceci est possible grâce à l'effet de pétrissage du malaxeur. À notre connaissance, c'est le seul type de malaxeur qui permette de travailler des mélanges de bauge avec des teneurs en eau aussi basses. L'avantage est d'obtenir un mélange plus ferme à l'état frais et donc de monter des levées plus hautes. Dans ce cas, la hauteur des levées (130 et 120 cm) est deux fois plus importante que celle des levées de bauge moyennes (60 cm, [17]). Cette hauteur permet d'atteindre, sans difficulté et en une seule levée, la hauteur des appuis de fenêtre. Un autre avantage de travailler le mélange de bauge à basse teneur en eau est de produire un matériau plus dense et donc des éléments ayant une meilleure résistance mécanique. Par piétinement, la résistance mécanique du mur est de l'ordre de 0,7 MPa et elle est de l'ordre de 0,8 MPa pour les levées construites à l'aide du malaxeur. Ces valeurs ne sont valables que pour la terre de Saint-Sulpice-la-Forêt utilisée dans cette étude.

Il n'a pas été possible de mélanger les fibres de paille longue (60 cm en moyenne) dans le malaxeur. Les brins de pailles se liaient aux pales des deux axes qui tournent dans des sens opposés et ont provoquées l'arrêt du malaxeur. Le fibrage a donc été réalisé directement dans le mur. La distance entre les deux axes étant de 20 cm, il doit être envisageable de produire de la bauge à fibres courtes (20 cm, [17]).

Le malaxeur permet de produire de 3 à 4 fois plus de mélange de bauge que la méthode par piétinement et de diviser les coûts par m³ d'un facteur 6 à 8 pour la partie malaxage. Cependant, la grande capacité de production du malaxeur requiert une main d'œuvre importante et une mise en œuvre de volume important. Le malaxage étant continu et efficace une fois la cuve pleine, le malaxeur est adapté aux chantiers nécessitant une production importante et continue de mélange. De plus, le transport et la mise en place du malaxeur génèrent des coûts fixes incompressibles. Il est donc adapté à des chantiers de construction en bauge de grande envergure ou pour la production d'éléments préfabriqués.

La mécanisation du malaxage altère le bilan environnemental du procédé d'un facteur 2 s'il est branché sur le réseau électrique et d'un facteur 38 s'il est branché sur un groupe électrogène. Le choix de la source d'électricité est donc déterminant pour limiter l'impact environnemental du malaxeur.

L'alimentation en eau se fait actuellement par un jet d'eau. La mise en place d'un dispositif d'arrosage automatique permettrait de réduire encore la main-d'œuvre nécessaire pour l'utilisation du malaxeur. L'emploie d'un trommel permettant de cribler et d'émotter la terre à sa teneur en eau naturelle serait également à considérer sur chantier. Un traitement du mélange par une extrudeuse ou un dispositif de compactage des mottes en sortie du malaxeur permettrait de réduire encore la teneur en eau de fabrication ainsi que la porosité du mélange et ainsi d'améliorer les propriétés mécaniques des éléments d'ouvrages en bauge. Il serait également intéressant de tester des terres plus argileuses que celles couramment employées pour la bauge qui doivent pouvoir être traitées par le malaxeur.

Dans le cadre de la certification du malaxeur par l'APAVE pour une utilisation en toute sécurité sur chantier, une série de modifications seront prochainement apportées au malaxeur afin de le mettre en conformité avec la réglementation et une notice sera rédigée.

### 5. Conclusion

Le malaxeur continu à palette, couramment employé pour la production de mélanges pour la production de céramique, permet de produire un mélange de bauge à des teneurs en eau très basses grâce à son effet de pétrissage. Les éléments de bauge produits ont une meilleure résistance mécanique aussi bien à l'état frais, ce qui permet de monter des levées plus hautes, qu'à l'état sec. Le temps de séchage du mur s'en retrouve également réduit. Le malaxeur est en mesure de produire 3 à 4 fois plus de mélange de bauge avec moins de main-d'œuvre, ce qui permet de réduire significativement les coûts de la phase de production du mélange. La production de volumes importants en continue de mélange est adapté pour des chantiers de construction en terre d'envergure et/ou de préfabrication. Si le malaxeur est branché sur le réseau électrique la production de de CO<sub>2</sub> est multipliée par 2 par rapport au procédé manuel, mais reste de l'ordre de 40 à 45 fois moins émetteur de CO2 comparé au parpaing et à la terre cuite. Dans le cadre de la certification du malaxeur par l'APAVE, certaines améliorations y seront apportées afin de permettre une utilisation sur chantier en toute sécurité. Le projet Malaxterre a permis le développement d'un malaxeur permettant d'optimiser les impacts financiers et économiques de la phase de production d'un mélange de terre à l'état plastique qui peut être utilisé pour des constructions en bauge, en bauge préfabriquée ou en adobe.

### 6. Remerciements

L'équipe Malaxterre souhaite remercier Écomaterre, qui a financé cette étude (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de Rennes, Conseil Régional de Bretagne, Néotoa, Archipel Habitat, Coop de Construction). Cette étude a également reçu le soutien financier du projet ANR Resbati (<a href="https://anr.fr/Projet-ANR-16-CE22-0010">https://anr.fr/Projet-ANR-16-CE22-0010</a>). Nous souhaitons remercier vivement les étudiants de l'ENSAB ainsi que leurs encadrants, Rozenn Kervella et Loïc Daubas, qui ont réalisé la levée 2, ainsi que Marine Le Bouedec, Solenn Follézou, Ashmat Froz, Simon Guihéneuf, Ali Harrir, Marta Miranda, Corentin Mouraud, Philippe Poullain, Anna Robert, André Sauvage pour leur participation active lors de la construction des levées.

# 7. Bibliographie

- [1] B. King, The renaissance of earthen architecture a fresh and updated look at clay-based construction, in: Buildwell Symp., 2010: pp. 1–23.
- [2] J.-C. Morel, A. Mesbah, M. Oggero, P. Walker, Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction, Build. Environ. 36 (2001) 1119–1126. doi:10.1016/S0360-1323(00)00054-8.
- [3] H. Niroumand, M.F.. Zain, M. Jamil, A guideline for assessing of critical parameters on Earth architecture and Earth buildings as a sustainable architecture in various countries, Renew. Sustain. Energy Rev. 28 (2013) 130–165. doi:10.1016/j.rser.2013.07.020.
- [4] M. Lyn Ford, The development of a methodology for creating an earthen building inventory, PhD, University of Plymouth, 2002. https://pearl.plymouth.ac.uk/handle/10026.1/1115.
- [5] L. Floissac, A. Marcom, A.-S. Colas, Q.-B. Bui, J.-C. Morel, How to assess the sustainability of building construction processes, in: Fifth Urban Res. Symp., 2009: pp. 1–17.
- [6] E. Hamard, B. Lemercier, B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa, J.-C. Morel, A new methodology to identify and quantify material resource at a large scale for earth construction Application to cob in Brittany, Constr. Build. Mater. 170 (2018) 485–497. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.097.
- [7] M.K. Dixit, J.L. Fernández-Solís, S. Lavy, C.H. Culp, Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review, Energy Build. 42 (2010) 1238–1247. doi:10.1016/j.enbuild.2010.02.016.
- [8] L. Keefe, Earth Building Methods and materials, repair and conservation, Taylor & Francis Group, Abingdon (UK), 2005.
- [9] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, Earth construction: Lessons from the past for future ecoefficient construction, Constr. Build. Mater. 29 (2012) 512–519. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054.
- [10] U. Röhlen, C. Ziegert, Construire en terre crue Construction Rénovation Finition, Le Moniteur, Paris, 2013.
- [11] S. Mandley, R. Harmsen, E. Worrell, Identifying the potential for resource and embodied energy savings within the UK building sector, Energy Build. 86 (2015) 841–851. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.044.
- [12] B. Rosselló-Batle, C. Ribas, A. Moià-Pol, V. Martínez-Moll, An assessment of the relationship between embodied and thermal energy demands in dwellings in a Mediterranean climate, Energy Build. 109 (2015) 230–244. doi:10.1016/j.enbuild.2015.10.007.
- [13] C. Williams, S. Goodhew, R. Griffiths, L. Watson, The feasibility of earth block masonry for building sustainable walling in the United Kingdom, J. Build. Apprais. 6 (2010) 99–108. doi:10.1057/jba.2010.15.
- [14] M. Laestander, An economic sustainability comparison between the natural building technique; cob and the conventional technique; concrete for residential buildings in Matagalpa, Nicaragua, Mid Sweden University, 2014.
- [15] L. Watson, K. McCabe, The cob building technique. Past, present and future, Inf. La Construcción. 63 (2011) 59–70. doi:10.3989/ic.10.018.

- [16] E. Quagliarini, A. Stazi, E. Pasqualini, E. Fratalocchi, Cob construction in Italy: Some lessons from the past, Sustainability. 2 (2010) 3291–3308. doi:10.3390/su2103291.
- [17] E. Hamard, B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa, J.-C. Morel, Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building, Build. Environ. 106 (2016) 103–119. doi:10.1016/j.buildenv.2016.06.009.
- [18] B. Clough Williams-Ellis, Cottage Building in Cob, Pisé, Chalk & Clay a renaissance (2nd edition), London (UK), 1920. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- [19] M.J. Addison Greer, The effect of moisture content and composition on the compressive strength and rigidity of cob made from soil of the Breccia Measures near Teignmouth, Devon, PhD, Plymouth School of Architecture, 1996. doi:10.1029/2003GL016963.
- [20] I. Evans, M.G. Smith, L. Smiley, The Hand-Sculpted House, A Practical and Philosophical Guide to Building a Cob Cottage, Chelsea Green Publishing Company, White River Junction, Vermont (USA), 2002.
- [21] R.H. Saxton, The performance of cob as a building material, Struct. Eng. 73 (1995) 111–115.
- [22] A. Weismann, K. Bryce, Construire en terre facilement La technique du cob, La Plage, Sète, 2010.
- [23] Collectif, Construire en terre, la recherche d'un habitat chaleureux, ArMen. 15 (1988) 38–45.
- [24] S. Rafitoson, Modèle d'habitat traditionnel en terre pour Antananarivo Madagascar, TPFE, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, 2007.
- [25] P. Lebas, C. Lacheray, C. Pontvianne, X. Savary, P. Schmidt, F. Streiff, La terre crue en Basse-Normandie, De la matière à la manière de bâtir, Centre Rég, Caen (France), 2007.
- [26] T. Vinceslas, E. Hamard, A. Razakamanantsoa, F. Bendahmane, Further development of a laboratory procedure to assess the mechanical performance of cob, Environ. Geotech. (2018) 1–8. doi:10.1680/jenge.17.00056.
- [27] Collectif Terreux Armoricains, Guide de Bonnes Pratiques de la Construction en Terre Crue Bauge, (2019) 53. https://docs.wixstatic.com/ugd/b9f81f\_4323908f49104e18b0eb275ca8105e73.pdf.
- [28] M. Le Bouedec, Méthode de collecte de données relatives à l'Analyse du Cycle de Vie des procédés de construction en terre crue, Université Gustave Eiffel, R&D Écomaterre, 2018.