



Programme inter-Outre-Mer pour des Bâtiments Résilients et Économes en Énergie

Porté par



A permis de présenter le projet



Terres d'Outre-Mer Améliorées

Réalisé par



Élaboration et caractérisation des performances de matériaux de construction

Rapport final

Résumé du rapport

Suite aux travaux menés dans l'Axe 1 du projet TOMA, différentes solutions constructives associant BTC et bioressources disponibles ont été développées.

Sur le territoire de Mayotte, ce sont plus de vingt formulations de Briques de Terre Comprimées Fibrées (BTCF) à base de fibres de coco, de feuilles de bananiers et de feuilles de manguiers qui ont été mises en œuvre et testées.

En Guyane, quatre typologies constructives ont été étudiées :

- Mélange terre-bagasse sous formes de briques (Adobe, BTCS) ou d'enduit isolant ;
- Système constructif associant sous formes de couches BTC et bagasse en vrac ou stabilisées ;
- Doublage isolant fibré et stabilisé (bagasse et chaux) ;
- Mélange terre-bagasse sous formes de mortier de rejointoiement et d'enduit de finition.

Les caractéristiques physiques (dimensions, masse volumique), thermiques (conductivité, diffusivité, capacité calorifique) et hydriques (isothermes d'adsorption) des différents matériaux mis en œuvre ont été déterminées, ce qui a permis de faire émerger trois formulations particulièrement prometteuses dans l'optique de futurs développements.

À Mayotte, ce sont les BTCF contenant respectivement un volume de feuilles de bananiers pour deux volumes de terre et un volume de feuilles de manguiers pour un volume de terre qui se sont avérées les plus intéressantes aussi bien pour leur bonne tenue mécanique que pour leur faible densité (0,84 soit environ deux fois moins qu'une BTC) et leur faible conductivité thermique sèche (0,149 W/m.K soit environ 2,5 fois moins qu'une BTC). Celle contenant des fibres de feuilles de manguiers est toutefois beaucoup plus sensible à la vapeur d'eau ce qui devrait limiter légèrement son impact sur la réduction des besoins en climatisation d'un bâtiment construit avec ce type de matériau.

En Guyane, l'isolant fibré et stabilisé constitué d'un volume de chaux NHL 3,5 et de cinq volumes de fibres de bagasse est nettement ressorti du lot. Sa très bonne cohésion mécanique, sa faible masse volumique (380 kg/m³), sa faible conductivité thermique sèche (0,117 W/m.K) et son fort potentiel hygroscopique font de lui un excellent correcteur thermique sur des solutions parpaing par exemple.

Sommaire

1. Introduction / Contexte	3
2. Elaboration de matériaux de construction	5
2.1 <i>Matériels et préparation des matériaux - Mayotte</i>	<i>5</i>
2.2 <i>Matériels et préparation des matériaux – Guyane</i>	<i>11</i>
3. Caractérisation des performances des matériaux	21
3.1 <i>Inventaire des matériaux et caractéristiques physiques</i>	<i>21</i>
3.2 <i>Caractérisation des propriétés thermiques</i>	<i>36</i>
3.3 <i>Détermination des isothermes d'adsorption</i>	<i>45</i>
4. Conclusions.....	50
Liste des figures et tableaux	51
Bibliographie	53

1. Introduction / Contexte

OBJECTIFS DE L'AXE 2 : OPTIMISATION TECHNIQUE DES SOLUTIONS CONSTRUCTIVES

Cet axe vise à caractériser différentes solutions constructives (matériau et système constructif) associant BTC et bioressources disponibles. Il est constitué de trois tâches :

2.1 Elaboration de matériaux de construction

Différents matériaux pour la construction (matériaux en vrac, mortiers et bétons végétaux à base de terre crue) sont fabriqués à partir des bioressources sélectionnées dans l'Axe 1. L'objectif est d'associer l'inertie thermique favorable de la BTC avec la capacité d'isolation des bioressources (faible conductivité thermique, gestion des transferts hygrothermiques).

2.2 Caractérisation des performances des matériaux

Les performances des matériaux et systèmes constructifs mis en œuvre à la tâche 2.1 sont déterminés dans l'optique des simulations numériques à mener dans le cadre de la tâche 2.3.

2.3 Optimisation et caractérisation des performances de bâtiments bioclimatiques

Les performances énergétiques et environnementales de bâtiments bioclimatiques construits avec les BTC et les matériaux et systèmes constructifs développés dans la tâche 2.1 sont qualifiées et optimisées.

Ce livrable synthétise les travaux menés dans le cadre des tâches 2.1 et 2.2.

INTRODUCTION :

La terre est un matériau utilisé à des fins de construction depuis environ 9 000 ans ⁽¹⁾. Après la révolution industrielle fin des années 1800, la dépendance vis-à-vis des énergies non renouvelables a considérablement augmenté ⁽²⁾. Les nouveaux matériaux de construction tels que le fer, l'acier et le béton ont considérablement amélioré les standards de vie humaine, permettant des processus de construction plus rapides, une normalisation et des bâtiments avec une durée de vie plus longue. Néanmoins, ils ont également conduit à une forte augmentation des émissions de carbone et à la perte de techniques constructives, d'architectures dites « vernaculaires » produites à partir des ressources d'un territoire (terre, fibres végétales ou animales...) se rapportant à une identité locale ⁽³⁾. L'usage des bâtiments contemporains et la consommation d'énergie associée à leur construction représentent environ 40 % des émissions mondiales de CO₂, dont 15 % sont liées à la production de matériaux de construction ⁽⁴⁾. Par conséquent, substituer des matériaux de construction synthétiques par des matériaux naturels plus respectueux de l'environnement est un objectif à atteindre de nos jours.

La terre en tant que matériau de construction est de plus en plus étudiée pour son faible impact environnemental. Les matériaux en terre sont préférés en raison de leur disponibilité ⁽⁵⁾, de leur recyclabilité ⁽⁶⁾, de leurs bonnes propriétés hygrométriques et acoustiques ⁽⁷⁾, de leur résistance au feu ⁽⁵⁾ et de leurs coûts potentiellement inférieurs aux matériaux conventionnels (parpaing, béton banché, briques cuites...) ^(2; 7). De plus, le processus principal de fabrication des matériaux en terre génère peu d'émissions de CO₂ ⁽⁸⁾.

Parmi les 12 techniques de construction en terre existantes ⁽⁹⁾, le Bloc de Terre Comprimée (BTC) issu du compactage de la terre est un matériau de plus en plus demandé en raison de son processus de production relativement simple, nécessitant une main d'œuvre peu qualifiée ⁽¹⁰⁾.

Selon le système constructif choisi et les conditions climatiques du territoire où l'on se trouve, le BTC peut manifester un comportement fragile en cas de contact avec l'eau.

A Mayotte, des premières constructions (début des années 80) jusqu'à nos jours, le choix de stabiliser la BTC au ciment a été retenu en raison de la pluviométrie importante mais également de l'utilisation apparente du matériau en façade bien que protégé par des débords de toiture. On parle alors de Brique de Terre Comprimée Stabilisée (BTCS). Typiquement, la quantité de ciment (liant) varie de 5 à 10 % en volume. L'utilisation du ciment augmente à la fois le coût du produit et son impact sur l'environnement. D'autres liants comme la chaux, le gypse ou le bitume sont également utilisés dans d'autres contextes. La stabilisation du BTC permet d'améliorer sa résistance à l'eau, ses propriétés mécaniques (résistance à la compression) et potentiellement sa durabilité ainsi que celle de l'ouvrage ^(11; 12; 13).

Afin de réduire voire supprimer l'usage du liant ciment, chaux ou bitume, de nombreux chercheurs explorent la possibilité d'utiliser à la place des fibres végétales, animales, résidus ou sous-produits issus de filières industriels (agricole, alimentaire, textile) ^(12; 14; 15; 16; 17).

Ces recherches sont largement documentées dans la littérature et permettent d'améliorer les performances énergétiques, le coût et l'impact environnemental des BTCS ^(18; 19; 20; 21; 22).

Les fibres sont généralement introduites dans les BTC pour réduire le retrait des blocs pendant le processus de séchage, mais il est largement admis qu'elles influencent positivement d'autres propriétés thermo-physiques et mécaniques en raison de leur faible densité et conductivité thermique. L'addition de tels composants à la matière première terre contribue à la production de matériaux isolants, présentant une meilleure résistance à la traction et aux tremblements de terre ^(23; 24; 25; 26).

L'incorporation à la matière première terre, de fibres naturelles comme la paille, le sisal, la laine, la fibre de noix de palme, la fibre de banane et la fibre de coco dans l'optique de produire des adobes et BTC Fibrés a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques valorisant l'apport des fibres aux matériaux terre crue. Notre recherche s'inscrit dans ce cadre, elle vise à améliorer les performances hygrothermiques de la BTCS et son impact environnemental via la formulation de Briques de Terre Comprimées Fibrées (BTCF) utilisant les bioressources de Mayotte : terre, feuilles de bananier et manguier, fibres de coco ^(8; 24; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33).

En Guyane, les travaux de l'Axe 1 ont permis de faire émerger 3 bioressources : le bois, le wassaï et la bagasse. Les études préliminaires ont conduit à privilégier cette dernière, coproduit issu de la fabrication du rhum, pour concevoir différents matériaux de construction.

2. Elaboration de matériaux de construction

2.1 Matériels et préparation des matériaux - Mayotte

2.1.1 TERRE

La terre utilisée pour la formulation des Briques de Terre Comprimées Fibrées (BTCF) est issue du décaissage d'un chantier situé à moins de 5 kilomètres du lieu de production. Elle a fait l'objet d'analyse granulométrique, de détermination des limites de liquidité (LL) et plasticité (LP) et caractérisation de la nature du sol. Pour la production de BTC, la terre doit être composée de 4 types de grains : graviers (≥ 2 mm), sables ($2-0,02$ mm), limons ($0,02-0,002$ mm) et argiles (moins de $0,002$ mm) ⁽⁹⁾.

L'échantillon de terre analysé (courbe en violet) par la méthode de tamisage et sédimentation est constitué de : 8% de graviers, 17% de sables gros, 27% de sables fins, 38% de limons (silts) et 10% d'argiles (**Figure 1**). Une composition granulaire assez fine se rapprochant d'un sol sablo-limoneux est obtenue, permettant ainsi de se passer d'opération de tamisage de la terre dans le cadre de la production de BTC et/ou BTCF. Cependant, les proportions en grains obtenues ne s'insèrent pas dans le fuseau granulométrique théorique recommandé pour les terres favorables à la BTC. Cette observation théorique doit se vérifier par la pratique. Des terres ne coïncidant pas avec les zones données peuvent s'avérer bonnes pour la production de blocs.

L'indice de plasticité (IP) de 10% (**Tableau 1**) correspond à une terre de plasticité moyenne possédant des argiles faiblement cohésives (**Figure 2**).



Figure 1 : Courbes granulométrique

Terre d'analyse	
Granulométrie (%)	Argiles
	Limons
	Sables fins
	Sables gros
	Graviers
Limites d'Atterberg (%)	LL (Limite de Liquidité)
	LP (Limite de Plasticité)
	IP (Indice de Plasticité)

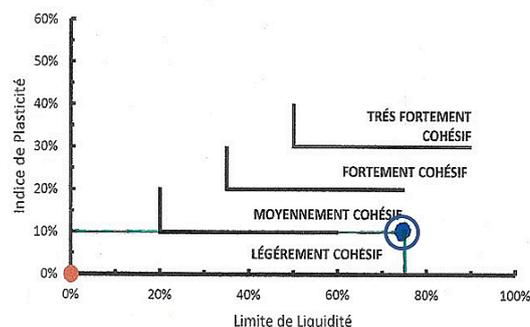


Tableau 1 : Propriétés de la terre d'analyse / Figure 2 : Evaluation du caractère cohésif des argiles

2.1.2 FIBRES/FEUILLES VEGETALES

Les fibres naturelles sont utilisées dans la construction depuis longtemps et dans de nombreuses régions en raison de leur disponibilité et de leur faible coût^(34; 35). Même si les fibres synthétiques ont montré de meilleures performances, l'utilisation de fibres naturelles est bénéfique car elles sont de faible densité, biodégradables, économes en énergie et respectueuses de l'environnement⁽³⁶⁾. Dans le cadre des travaux de recherche menés sur les blocs de maçonnerie, la majorité des recherches ont été réalisées avec des blocs ciment-sable^(30; 37; 38) et de l'adobe^(39; 40). Il a été démontré que l'ajout de fibres naturelles à la terre améliore la résistance à la traction, le caractère isolant du matériau et accélère le processus de séchage de ce dernier. D'autres études ont prouvé que l'utilisation de fibres de coco^(41; 42), fibres de bananier^(43; 44) et fibres de bagasse ou de canne à sucre⁽⁴⁵⁾ dans le cadre de la production de matériaux terre/fibres (mortiers, adobes et BTCF) a permis d'améliorer les propriétés mécaniques et thermo-physiques des blocs formulés. Cependant, les performances observées dépendent des caractéristiques des fibres que sont : la rugosité de surface, la longueur et le caractère hydrophile⁽⁴⁶⁾.

Dans le cadre de ce projet, fibres de coco, feuilles de bananiers et manguiers ont été utilisées pour la production de BTCF.

- **Feuilles de bananier**

Plus de 10 millions d'hectares de bananeraies, avec une moyenne de 1500 plants par hectare, existent dans plus de 160 pays dans le monde, créant des tonnes de déchets. La décomposition de ces déchets émet une grande quantité de méthane et de dioxyde de carbone. Chaque tonne de déchets de bananes rejette en moyenne une demi-tonne de dioxyde de carbone par an⁽⁴⁷⁾.

A Mayotte, 57.000 tonnes de bananes sont produites par an⁽⁴⁸⁾, il paraît donc indispensable de valoriser ce déchet agricole au sein de matériau de construction. La littérature nous informe que seules les fibres de bananiers traitées le plus souvent en milieu alcalin (trempage dans une solution de soude) ont été utilisées dans le cadre de la production de BTCF^(30; 47).

Notre choix s'est porté sur l'emploi de feuilles de bananiers bien plus facile à extraire et découper. Les feuilles sèches ont été coupées des bananiers puis découpées finement à la machette à des longueurs comprises entre 1-5 cm (**Figure 3**).



Figure 3 : Découpe des feuilles de bananiers séchées

- **Feuilles de manguier**

Selon les prévisions de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la production mondiale de mangues devrait atteindre 65 millions de tonnes en 2028 ⁽⁴⁹⁾.

A Mayotte, le rendement est plutôt faible par rapport à la banane. Le caractère cyclique lié à la culture de ce fruit explique ce constat.

L'usage de feuilles de manguiers pour la production de matériaux terre/fibres est peu voire non documenté dans la littérature. Leur relative disponibilité a guidé notre choix dans un contexte d'innovation scientifique. Les feuilles ont été ramassées au sol, découpées finement à la machette puis mises à sécher (**Figure 4**).



Figure 4 : Feuilles de manguiers découpées puis hachées

- **Fibres de coco**

La production mondiale de noix de coco est estimée à près de 62 millions de tonnes en 2020 ⁽⁵⁰⁾. 50% de la noix de coco est constitué de coque, à partir de laquelle sont extraits : morceaux de coques (a), fibres de coco (b) et résidus (c) issus de la séparation des fibres et morceaux de coques (**Figure 5**). Pour notre étude, nous avons utilisé des fibres de coco. Le processus d'extraction des fibres décrit **Figure 6**, illustre la séparation manuelle des fibres et coques. La dernière étape consiste à piler les fibres afin de les réduire en particules fines, de taille inférieure à 2 cm. Au cours de ce procédé, les morceaux de coques et résidus sont jetés en tant que déchets mais pourraient très bien être insérés dans la fabrication de substrats de culture.

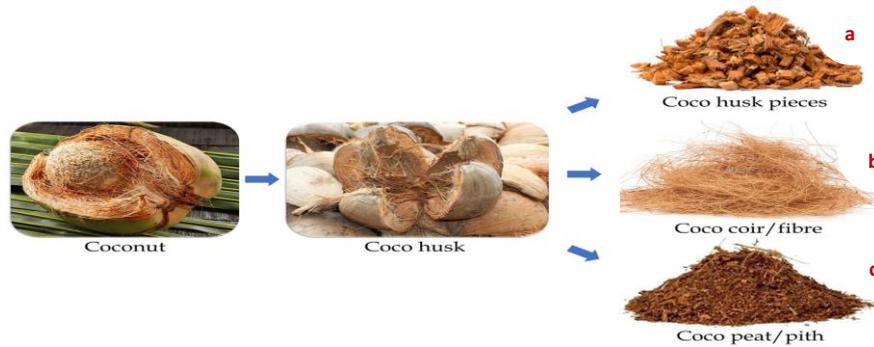


Figure 5 : Séparation morceaux de coques (a), fibres de coco (b), résidus (c) ⁽⁵¹⁾



Figure 6 : Fibres de coco : extraites (e), pilées (f), résidus séparation fibres/coques (g), rugosité de surface d'une fibre de coco observée au Microscope Electronique à Balayage (échelle 300µm) (h)

La littérature publiée fait état de certains avantages relatifs à l'intégration de la fibre de coco dans le béton ⁽⁵²⁾, le mortier de ciment ⁽⁵³⁾, les briques de terre stabilisées ⁽⁵⁴⁾ et les panneaux de ciment ⁽⁵⁵⁾. L'incorporation de fibres de coco dans ces matériaux de construction s'est avérée améliorer la ductilité et la résistance à la flexion grâce à la bonne adhésion de la terre aux fibres favorisée par l'état de surface rugueux de ces-derniers ⁽⁵⁶⁾.

2.1.3 PROPORTIONS DES MELANGES

Plus de 20 formulations de BTCF ont été testées en faisant varier principalement le ratio terre/fibres ou feuilles. Notre choix s'est porté sur 6 mélanges terre et matières biosourcées (feuilles de bananiers, manguiers ou fibres de coco) en raison de la plus ou moins bonne tenue mécanique des blocs, de leur faible variation dimensionnelle et de leur reproductibilité. La majorité des BTCF ont été formulées à partir d'un mélange de terre sablo-limoneuse (voir description partie 2.1.1) et Matières Biosourcées (MB). Seul un échantillon contient des additifs supplémentaires : pouzzolane et ciment. La quantité d'eau, terre et fibres varient en fonction des mélanges, cependant la longueur des feuilles/fibres reste plus ou moins constante conformément à ce qui a été décrit plus haut. Le **tableau 2** résume les différents mélanges réalisés dans le cadre de la production de BTCF. Les préfixes BAN, MANG et COCO renvoient respectivement à l'utilisation de feuilles de bananiers (BAN), feuilles de manguiers (MANG), fibres de coco (COCO). L'échantillon TER11 (Terre) correspond à notre témoin, il représente une BTC sans fibres, ciment et pouzzolane.

Echantillon	Terre (kg)	Matières Biosourcées (kg)			Rapport MB/Terre (en volume)	Eau (L)
TER11	11,800	-			-	2
BAN11	9,060	0,8			1/2	1,5
BAN21	9,513	0,8			10/21	1,5
MANG41	4,530	0,96			6/5	1,5
MANG51	4,530	0,8			1/1	1,5
COCO11	4,077	0,975			5/3	0,75

Echantillon spécifique	Terre (kg)	Fibres (kg)	Pouzzolane (kg)	Ciment (kg)	Rapport MB/Terre (en volume)	Eau (L)
COCO21	5,436	0,975	2,480	0,547	5/4	0,5

Tableau 2 : Compositions BTC (TERR11) et BTCF

2.1.4 PREPARATION ET PROCESSUS DE PRODUCTION DES BTC ET BTCF

Le processus de production des BTCF est similaire à celle des BTC (**figure 7**).

En considérant les fibres ou feuilles extraites puis découpées, le cycle de production des BTCF peut être décomposé en 4 étapes (**figure 8**).

- **Etape 1 : Pesée des Matières Premières (MP)**

A l'aide d'une balance la terre, l'eau et les fibres ou feuilles sont pesées.

- **Etape 2 : Malaxage**

La terre puis les fibres ou feuilles sont versées dans la bétonnière. Un premier mélange à sec est réalisé, l'eau y est ensuite rajoutée progressivement tout en malaxant. Un contrôle visuel permet d'apprécier l'homogénéité du mélange.

- **Etape 3 : Mise en forme des BTCF**

La formulation est introduite dans le fond du moule, tassée puis comprimée à l'aide d'une presse manuelle TERSTARAM. Après compression, les blocs sont éjectés du moule.

- **Etape 4 : Séchage des BTCF**

Les BTCF obtenues sont stockés sur palette pour une étape de séchage à l'air libre, sous un abri couvert, pendant une durée de 10 jours minimum.

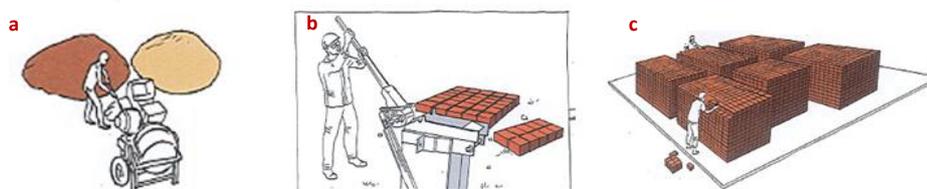


Figure 7 : Etapes de production des BTC : mélange terre/sable à la bétonnière (a), compression du mélange à l'aide d'une presse manuelle (b), séchage et stockage des matériaux (c)
dessins issus du livre « Construire en terre au Sahel »



Figure 8 : 4 étapes de production des BTCF : Pesage des matières premières (a), Malaxage des MP terre et fibres/feuilles (b), Remplissage du moule de la presse et éjection du bloc (c, d), Stockage sur palette et séchage à l'abri des blocs (e)

2.1.5 PRESENTATION DES MATERIAUX : OBSERVATIONS ET REMARQUES

L'aspect, la tenue mécanique et la variation dimensionnelle des BTCF sèches ont été évalués (**tableau 3 et 4**). Les matériaux présentent une tenue mécanique acceptable permettant leur manutention et leur transport. L'ajout de matières biosourcées augmente les dimensions (L, l et h) des blocs de 0,5 à 1,5 cm. Cet effet est sans doute lié au compactage qui exercerait une pression trop forte (20 bars) sur les fibres/feuilles provoquant un phénomène de compression puis relaxation de ces dernières. En comparaison avec le bloc témoin TER11 (BTC sans matières biosourcées, pouzzolane, ciment), les BTCF conservent la forme initiale du bloc (parallélépipède) et présentent un caractère compact ou fragile. Le comportement fragile de certains BTCF peut entraîner l'aspect friable des matériaux sans remettre en cause leur tenue mécanique. Cette observation peut s'expliquer par la quantité insuffisante d'argile ne permettant pas d'assurer la cohésion entre la terre et les fibres/feuilles.

Echantillon	BTCF/BTC	Aspect	Tenue mécanique	Variation dimensionnelle
TER11*		- brique compacte, - arrêtes rectilignes, - faces planes, - pas de fissures,	Bonne	Aucune variation de longueur, largeur ou hauteur (dimension standard : 29,5 x 14 x 9,5 cm)
BAN11		- brique compacte, - arrêtes rectilignes, - faces planes, - pas de fissures,	Bonne	Gain de 1cm sur les 3 dimensions (L x l x h)
BAN21		- brique compacte, - arrêtes rectilignes mais friable, - faces planes,	Moyenne	Gain de 1cm en largeur et hauteur, et 0,5cm en longueur

* échantillon de référence (sans fibres/feuilles, pouzzolane, ciment)

Tableau 3 : Présentation et évaluation des matériaux (partie 1)

Echantillon	BTCF	Aspect	Tenue mécanique	Variation dimensionnelle
MANG41		-brique fragile, -fissures apparentes, -gonflement du bloc visible, -face du dessus non plane,	Moyenne	Gain de 0,5cm en largeur et hauteur, et 1cm en longueur
MANG51		- brique fragile, -fissures apparentes, -gonflement du bloc visible,	Moyenne	Gain de 0,5cm en longueur et hauteur, et 1,5cm en largeur
COCO11		-brique fragile, -fissures apparentes, -arrêtes friables, -épaufures visibles	Moyenne	Gain de 0,5cm en largeur et hauteur, et 1cm en longueur
COCO21		-brique compacte, -légère fissuration, -arrêtes rectilignes mais friables, -faces planes,	Bonne	Gain de 0,5cm en largeur et hauteur, et 1cm en longueur

Tableau 4 : Présentation et évaluation des matériaux (partie 2)

2.2 Matériels et préparation des matériaux – Guyane

En Guyane, 3 bio ressources ont été sélectionnée dans l’Axe 1 : le bois, le wassaï et la bagasse.

Néanmoins, la production guyanaise n’étant pas mise en place de façon structurée lors du démarrage du projet TOMA (notamment l’inauguration de l’Usine Yana Wassai, qui s’est finalement faite en septembre 2022, retardée par la crise), il n’a pas été possible d’intégrer cette ressource dans le présent programme de recherche.

La sciure de bois a tendance à faire fariner la brique produite et à favoriser le délitement de ces dernières. Elle absorbe toute l’eau destinée à hydrater le liant. Compte-tenu de ces observations, l’utilisation de coproduits de scierie a été mis de côté pour le projet TOMA actuel.

Les bioressources finalement retenues sont donc les fibres de bagasse (**figure 9**), coproduits issus de la fabrication du rhum.



Figure 9 : Bioressources retenues : bagasse

Deux orientations ont premièrement été envisagées :

- Mélange terre-bioressources sous formes de briques (Adobe, BTC) ou d'enduit isolant ;
- Système constructif associant sous formes de couches BTC et bioressources en vrac ou stabilisées.

Elles ont donné lieu à l'expérimentation d'autres solutions :

- Doublage isolant fibré et stabilisé
- Mélange terre-bioressources sous formes de mortier de rejointoiement et d'enduit de finition

2.2.1 TERRE

La terre utilisée provient de la carrière du bassin Mine d'Or, à 10 km de l'usine de production. Elle a été broyée puis a fait l'objet d'analyse granulométrique et de détermination des limites de liquidité (LL) et plasticité (LP).

Pour la production de BTC, la terre doit être composée de 4 types de grains : graviers (≥ 2 mm), sables (2–0,02 mm), limons (0,02–0,002 mm) et argiles (moins de 0,002 mm) ⁽⁹⁾.

L'échantillon de terre analysé (courbe en vert) par la méthode de tamisage et sédimentation est constitué de : 6% de graviers, 22% de sables grossiers, 30% de sables fins, 24% de limons (silts) et 18% d'argiles (Figure 10).

L'indice de plasticité (Ip) de 11.4% (Tableau 5) associé à une limite de liquidité (LI) de 45% correspond à une terre de plasticité et cohésion moyennes.

Catégorie	Sol	IP (pourcentage)	Degré de plasticité
I	Sable ou limon	0- 1	Non plastique
	+ traces d'argile	1- 5	Très faible plasticité
	+ un peu d'argile	5-10	Faible plasticité
II	Limon argileux	10-20	Moyenne plasticité
III	Argile silteuse	20-35	Grande plasticité
	Argile	>35	Très grande plasticité

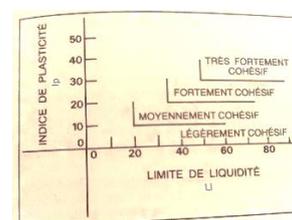


Figure 10 : Degré de plasticité et cohésion des terres en fonction des limites de liquidité et plasticité (H. Houben, H. Guillaud. *Traité de construction en terre*. Paranthèses, 2006. p 87)

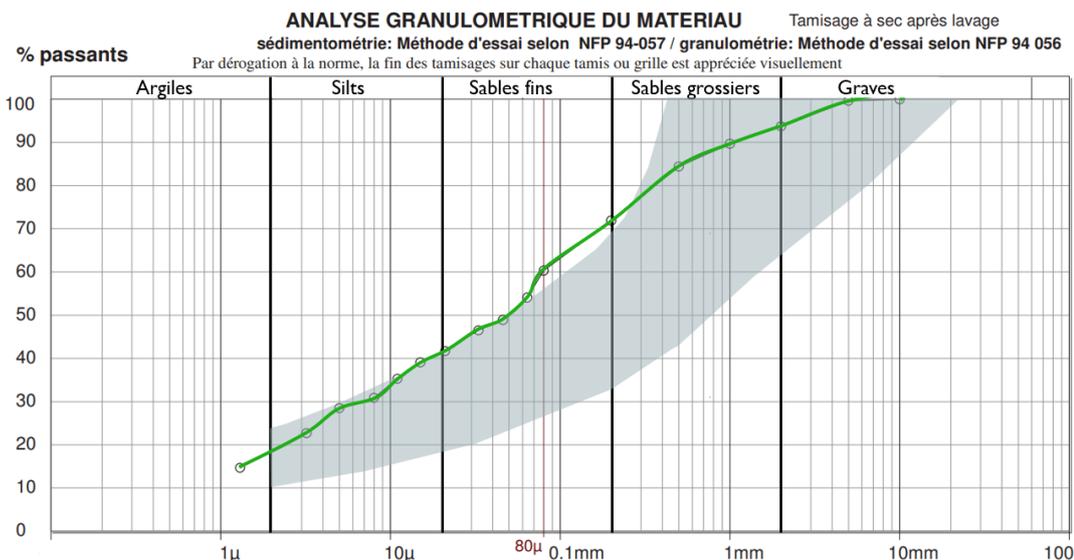


Figure 11 : Courbe granulométrique de la terre d'analyse (Résultats Guyane) et zone recommandée pour la fabrication de blocs comprimés (H. Houben, H. Guillaud. *Traité de construction en terre*. Paranthèses, 2006. p 120)

Granulométrie (%)	Argiles	18
	Limons	24
	Sables fins	30
	Sables gros	22
	Graviers	6
Limites d'Atterberg (%)	LI (Limite de liquidité)	45
	Lp (Limite de plasticité)	33.6
	Ip (Indice de plasticité)	11.4

Tableau 5 : Données sur la granularité et plasticité de la terre d'analyse (Guyane)

Les briques produites ont une conductivité thermique λ de 0.9 W/m/K (Figure 12). A titre de comparaison, le béton plein a une conductivité de 2 W/m/K et un isolant tel que la laine de roche, de 0,041 W/m/K.

	RAPPORT	Réf	RE18018002004
		Edition	1
		Révision	0
		Date	07/02/2018
		Page	14/15
CONDUCTIVITE THERMIQUE DE BRIQUES			
Diffusivité thermique (m ² /s)	6,03E-07		
Capacité volumique (J/m ³ /K)	1,52E+06		
Conductivité thermique (W/m/K)	9,16E-01		
Effusivité thermique (J/m ² /K/s ^{1/2})	1,18E+03		

Figure 12 : Extrait des propriétés thermiques des BTCS usuels (non fibrés) de La Brique de Guyane, Rapport Epsilon 2018 p14-15

2.2.2 FIBRES NATURELLES

- **Fibre de bagasse**

La fibre de bagasse étudiée est issue de la rhumerie St Maurice, seule usine fabricant les différents Rhums de Guyane. Elle se situe à Saint-Laurent du Maroni, à 50km de la briqueterie. Chaque année, le producteur traite 9000 tonnes de canne à sucre. Le jus constitue 70% de la matière et le résidu fibreux, la bagasse, les 30% restants. Une partie de la bagasse alimente la chaudière à vapeur responsable du fonctionnement des moulins de broyage. Pour l'instant, l'autre partie de la bagasse s'entasse à l'air libre sur le site, par monticules de plusieurs mètres.

Des études ont déjà démontré les atouts de l'intégration de fibres de bagasse dans des matériaux de construction. Ce matériau, disponible en quantité en constitue un fort potentiel. Néanmoins, une étape de séchage et de tri des fibres (**Tableau 6**) est nécessaire pour garantir une homogénéité et de bonnes performances du matériau élaboré.

		
		
(a)	(b)	(c)
Trop poussiéreux et consommateurs d'eau (effet d'éponges)	A utiliser : bonnes dimensions et plutôt homogènes	Trop épais, trop longs, pas assez de rugosité

Tableau 6 : Groupement de la bagasse en 3 catégories (a,b,c), élaboration propre.

Les fibres sont triées par passage dans un crible rotatif et les mélanges sont préparés à la bétonnière.



Figure 13 : bétonnière de 120L pour la réalisation des mélanges

2.2.3 MELANGE TERRE-BIORESSOURCES SOUS FORMES DE BRIQUES OU ENDUIT ISOLANT

- **Briques BTCS**

Des premiers mélanges terre-bioressources ont été envisagés sous forme de briques de terres comprimées stabilisées BTCS. Des essais de formulation ont été réalisés avec la formulation actuelle de la brique de Guyane et ajout de différents pourcentages de fibres. Ceux-ci ne sont pas avérés concluants pour ce projet. En effet, l'ajout de fibres conférerait une variation dimensionnelle trop irrégulière (+ 0.5 à 1 cm de gonflement en sortie de presse), ce qui est notamment problématique pour le système par emboîtement que commercialise l'entreprise.



Figures 14 et 15 : Gonflement en sortie de presse d'une BTCS fibrée

Cependant, ces expérimentations ont mis en avant la nécessité d'un travail plus approfondi (dimension et état des fibres, répartition dans le mélange, homogénéité, pression à appliquer, teneur en eau de moulage du mélange) qui fera finalement l'objet d'une thèse doctorale de 2023 à 2025.

- **Briques d'adobe (moulées)**

Des briques d'adobes fibrées ont été moulées. Les adobes sont fabriqués à partir d'une consistance de la terre plus humide que les BTCS. Ceci engendre un temps de séchage plus conséquent, d'environ 3 semaines. De plus, alors que les BTCS sont manipulables (avec précaution et uniquement pour leur stockage empilé) dès leur sortie des presses, cette action est impossible avec les adobes frais. Cela augmente la surface à mobiliser pour le séchage par rapport aux BTCS.



Figure 16 : Démoulage et séchage d'une brique d'adobe terre-fibres

Ainsi, bien qu'ils soient étudiés pour leurs performances dans le cadre de ce projet, les adobes ne présentent pas d'avantages de production par rapport à la chaîne de fabrication actuelle des BTCS.

- **Enduits isolants**

Une nouvelle piste a été envisagée : celle d'enduits isolants. Leur application directe aux murs évite la préfabrication en usine. Bien que les formulations d'enduits s'étalent bien et restent cohésifs sur les 5 premiers cm, les savoir-faire sur la mise en œuvre de ce type de matériau restent à maîtriser pour des épaisseurs plus importantes.



Figures 17 et 18 : Enduit isolant terre-fibres

2.2.4 SYSTEME CONSTRUCTIF ASSOCIANT BTC ET BIORESSOURCES EN VRAC OU STABILISEES

- **Double paroi de BTCS avec bagasse en vrac**

Des mesures de températures ont été réalisées dans des démonstrateurs composés de deux parois de BTCS séparés par une lame d'air de 12,5 cm remplie ou non de bagasse en vrac.

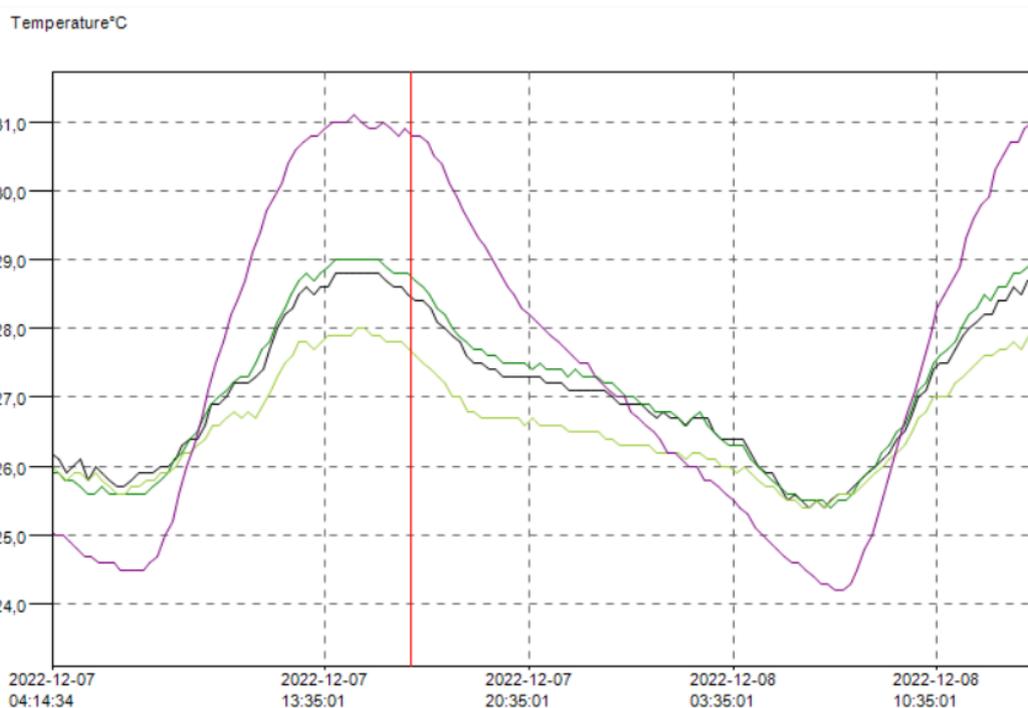


Figure 19 : Evolution dans le temps de la température des solutions parpaing (rose) ; double paroi de BTCS collé (vert foncé) et séparés de 12,5cm (noir) ; double paroi+bagasse en vrac dans les 12,5cm (vert clair)

La température la plus chaude est d'un degré de moins dans le démonstrateur contenant la bagasse en vrac.

Dans nos latitudes proches de l'équateur, c'est la toiture qui est la surface la plus exposée à la chaleur. Une isolation sous comble avec de la bagasse en vrac n'est cependant pas envisageable étant donné les phénomènes de condensations observables sous les toitures de tôles qui putréfieraient les fibres. Et un traitement chimique enlèverait le caractère respectueux de l'environnement que présente cette solution de bagasse en vrac.

La fibre, stabilisée, a cependant été étudiée en tant que correcteur thermique sur des constructions en parpaing classique dans le système constructif qui suit.

2.2.5 DOUBLAGE ISOLANT FIBRE ET STABILISE

- **Doublage isolant bagasse et chaux**

Les isolants biosourcés à base de bois, lin, chanvre, coton, herbe, paille sont prometteurs dans le contexte environnemental actuel. Néanmoins, les fibres de ces isolants dits « naturels » sont souvent liées par des produits issus de la chimie du pétrole telles que les fibres thermofusibles de polyester. La brique de Guyane utilisant un procédé de fabrication à froid de ses briques et cherchant à valoriser des ressources biosourcées ou ressourcees, ce procédé n'a pas été envisagé. Un isolant allégé (sans terre), aéré, uniquement à base de fibres de bagasse et de chaux hydraulique a été formulé. Le doublage d'abord fait en plaques moulées (**figure 20**) a laissé place à un « enduit banché » (**figure 21**) pour la production à grande échelle.

L'idée est de comparer ce correcteur thermique à une construction en parpaing et à une double paroi de BTCS.



Figures 20 et 21 : Doublage isolant de bagasse stabilisée à la chaux

2.2.6 MELANGE TERRE-BIORESSOURCES SOUS FORMES DE MORTIER DE REJOINTOIEMENT ET D'ENDUIT DE FINITION

- **Mortier de rejointoiment**

Un mortier de rejointoiment à base de terre a été formulé (**figure 22**). Il donne un aspect plus naturel que les recettes classiques composées essentiellement de ciment.



Figure 22 : Mortier de rejointoiement à base de terre

- **Enduit de finition**

Enfin, un enduit décoratif terre-bioressource a été mis en œuvre. Il recouvre l'isolant banché qui a été produit précédemment.



Figure 23 : Isolant mis en œuvre dans un démonstrateur

2.2.7 PROPORTIONS DES MELANGES

Au total, 14 solutions constructives ont été produites dans le cadre du projet TOMA. Les proportions à sec des mélanges sont présentées dans le tableau qui suit.

Solution	Nom	Volumes							% Fibres en volume à sec	Proportions à sec		
		terre	bioressource			sable	chaux	ciment				
			bagasse	sciure de bois	copeau de bois	wassai						
ADOBES	Aa14010x	1	4						1	0,67		
	Ab41100x	4	1					1		0,17		
	Ac41100x	4		1				1		0,17		
	Ad41100x	4			1			1		0,17		
	Ae31100x	3	1						1		0,20	
ENDUITS ISOLANTS	Ea24010x	2	4						1	0,57		
	Eb24421x	2	4					4	2	1	0,31	
FIBRES VRAC entre parois BTCS	Va010000		1							1,00		
DOUBLAGE ISOLANT SANS TERRE	Ia03010x		3						1	0,75		
	Ib04010x		4						1	0,80		
	Ic05010x		5						1	0,83		
ENDUIT DE FINITION	Fa11310x	1	1					3	1	0,17		
	Ec31210x	3	1					2	1	0,14		
MORTIER DE REJOINTOIEMENT	Ra10301x	1						3	1	0,00		

Tableau 7 : Proportions des 14 solutions constructives produites

2.2.8 PREPARATION ET PROCESSUS DE PRODUCTION

Le processus de production des solutions listées précédemment suit les étapes suivantes :

- **Etape 1 : Tri des fibres**

Les fibres sont triées au crible rotatif et stockées à l'abri des intempéries.

- **Etape 2 : Mélanges liants-eau**

La terre et les éventuels stabilisants sont versés dans la bétonnière. Un premier mélange à sec est réalisé, l'eau y est ensuite rajoutée progressivement tout en malaxant. Un contrôle visuel permet d'apprécier l'homogénéité du mélange.

- **Etape 3 : Ajout des fibres au mélange**

Les fibres sont introduites progressivement tout en malaxant. Elles doivent être totalement imprégnées du mélange liant-eau.

- **Etape 4 : Mise en œuvre et séchage**

Les matières sont mises en œuvre soit dans des moules (cas des adobes) soit directement sur les surfaces murales. Ces dernières doivent avoir été mouillées la veille afin qu'elles n'absorbent pas l'eau du mélange au risque de fissures.

Un séchage d'au moins 4 semaines doit être respecté.

3. Caractérisation des performances des matériaux

Les différentes briques mises en œuvre en Guyane et à Mayotte dans le cadre de la tâche 2.1 à partir des bioressources sélectionnées dans l'Axe 1 ont été acheminées jusqu'en métropole et caractérisées.

Leurs caractéristiques physiques (dimensions, masse volumique), thermiques (conductivité, diffusivité, capacité calorifique) et hydriques (isothermes d'adsorption) ont été déterminées. Ce chapitre retranscrit l'ensemble des mesures effectuées en explicitant les procédures d'essai adoptées et les limites des données expérimentales recueillies. Ces dernières ont ensuite été implémentées dans les logiciels de simulation hygrothermique dynamique au sein de la tâche 2.3.

En revanche, les caractéristiques acoustiques des briques n'ont pas pu être déterminées, le protocole de préparation des échantillons n'étant pas compatible avec la nature des matériaux étudiés.

3.1 Inventaire des matériaux et caractéristiques physiques

3.1.1 MATERIAUX DE GUYANE

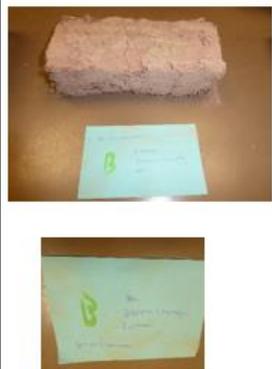
Sept formulations de briques ont été fabriquées dans le cadre du projet TOMA. Dans la suite du rapport, ces formulations sont répertoriées par des lettres allant de A à G.

3.1.1.1 DESCRIPTION GENERALE

La description des sept matériaux fabriqués est rappelée au sein des trois tableaux ci-après. La deuxième ligne précise la tenue mécanique des matériaux tandis que la troisième ligne redonne la composition des briques inscrite sur les feuilles accompagnant les échantillons.

Les briques notées de A à F sont composées de terre, de bagasse (résidu fibreux issu du broyage de la canne à sucre), de chaux (NHL 3,5) et d'eau selon des proportions différentes à chaque fois. Certaines sont composées des 4 éléments, d'autres sont sans chaux ou sans terre.

Le matériau G, quant à lui, est constitué de terre, de sable et de sciure de bois.

Repère	A	B	C
Apparence	Aspect brique fibrée avec liant Bonne tenue aux manipulations. Pas de pertes de matériaux	Aspect brique fibrée avec liant Bonne tenue aux manipulations. Pas de pertes de matériaux	Aspect brique fibrée. Très fragile. Se délite lors des manipulations. Fortes pertes de matériaux
Noté sur étiquette	Adobe 1 chaux NHL 3,5 2 Terre 4 Bagasse Eau Proportion en volume?	Adobe/panneau 1 Terre Bagasse à saturation Eau	Adobe/panneau 1 Chaux NHL 3,5 1 Terre Bagasse à saturation Eau
Dimensions (long large haut en mm)	160*120*110	200*90*50	140*130*55
Photos			

Repère	D	E	F
Apparence	Aspect brique fibrée avec forte cohésion due au liant Bonne tenue aux manipulations. Pas de pertes de matériaux	Aspect brique fibrée. Bonne tenue aux manipulations. Perte de fibres lors des manipulations	Aspect brique fibrée. Bonne tenue aux manipulations. Perte de fibres lors des manipulations
Noté sur étiquette	Enduit VOLUME 1 Chaux 3,5 NHL 2 Terre 4 Bagasse Eau	Adobe Volume 1 chaux 3,5NHL 1 Terre 4 Bagasse Eau	1 chaux 5 bagasse
Dimensions (long large haut en mm)	145*150*55 irrégulière	165*150*120	250*125*60
Photo			

Repère	G	Sac
Apparence	Aspect brique terre et sable. Bonne tenue aux manipulations. Perte de grains de sable.	Copeaux de bois + - 1kg
Noté sur etiquette	4 t 1 s 1 sb 03/08/2022	En vrac
Dimensions (long large haut en mm)	brique initiale 240*120*80 brique cassée reste 160*120*80	
Photo	 	 

Tableau 8 : Description des matériaux de Guyane

3.1.1.2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Les sept échantillons de l'étude ont été scindés en deux dans l'optique de leur caractérisation thermique au Hot Disk puis séchés en étuve à 50°C pendant 72 heures. Les dimensions et la masse de chaque demi-brique ont ainsi été déterminées. Les caractéristiques physiques des matériaux sont données dans le **tableau 9**.

Notons que les mesures effectuées sont, pour certaines, imprécise du fait de l'irrégularité des briques et de la friabilité de certaines briques se traduisant par des pertes de matière lors des différentes manipulations en laboratoire.

Echantillons	Dimension Echantillons				Fiabilité mesure, bon, moyen, faible.	Masse (g)	Masse volumique sèche (kg/m ³)	Densité
	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Hauteur (mm)	Volume (mm ³)				
A1	105,00	120,0	75,0	945 000	Moyen	663,60	702,222	0,7022
A2	111,00	128,0	78,0	1 108 224	Moyen	782,70	706,265	0,7063
B1	97,00	85,0	53,0	436 985	Moyen	324,26	742,039	0,7420
B2	97,00	85,0	48,0	395 760	Moyen	312,87	790,555	0,7906
C1	134,00	65,0	49,0	420 540	Faible (perte de morceau)	193,71	460,622	0,4606
C2	135,00	57,00	48,00	354 360	Faible (perte de morceau)	158,17	446,354	0,4464
D1	142,00	72,00	46,00	470 304	Faible	479,49	1 019,532	1,0195
D2	140,00	71,00	51,00	421 190	Faible	472,19	1 121,085	1,1211
E1	145,00	112,00	76,00	1 234 240	Moyen	477,44	386,829	0,3868
E2	145,00	113,00	76,00	1 245 260	Moyen	401,86	322,712	0,3227
F1	124,00	125,00	53,00	821 500	Moyen	311,34	378,990	0,3790
F2	124,00	117,00	58,00	841 464	Moyen	317,39	377,188	0,3772
G1	116,00	81,00	69,00	648 324	Faible	1 099,30	1 695,60	1,6956
G2	121,00	90,00	85,00	925 650	Faible	1 532,90	1 656,03	1,6560

Tableau 9 : Caractéristiques physiques des échantillons de Guyane secs

Numéro	Photo	Composition	Tenue du matériau
A1 A2	 	<p>1 vol. Chaux NHL3,5 2 vol. Terre 4 vol. Bagasse Eau</p>	<p>Aspect brique fibrée avec liant. Bonne tenue aux manipulations. Pas de pertes de matériaux.</p>
B1 B2		<p>1 vol. terre Bagasse à saturation Eau</p>	<p>Aspect brique fibrée avec liant Bonne tenue aux manipulations. Pas de pertes de matériaux.</p>

			
C1 C2		<p>1 vol. Chaux NHL 3,5 1 vol. Terre Bagasse à saturation Eau</p>	<p>Aspect brique fibrée. Très fragile. Se délite lors des manipulations. Fortes pertes de matériaux</p>
D1 D2		<p>1 vol. Chaux NHL 3,5 2 vol. Terre 4 vol. Bagasse Eau</p>	<p>Aspect brique fibrée avec forte cohésion due au liant. Bonne tenue aux manipulations. Pas de pertes de matériaux.</p>

E1 E2		<p>1 vol. Chaux 3.5 NHL 1 vol. Terre 4 vol. Bagasse Eau</p>	<p>Aspect brique fibrée. Bonne tenue aux manipulations. Perte de fibres lors des manipulations.</p>
F1 F2		<p>1 vol. Chaux 5 vol. Bagasse</p>	<p>Aspect brique fibrée. Bonne tenue aux manipulations. Perte de fibres lors des manipulations.</p>

G1 G2			4 vol. Terre 1 vol. Sable 1 vol. Sciure de bois	Aspect brique terre et sable. Bonne tenue aux manipulations. Perte de grains de sable.
-------	---	--	---	--

Tableau 10 : Aspect des échantillons de Guyane coupés en deux

3.1.2 MATERIAUX DE MAYOTTE

Vingt-trois briques de 29,5 cm de longueur, 14,5 cm de largeur et 9,5 cm ont été fabriquées dans le cadre du projet TOMA. Parmi elles, six briques contiennent des fibres de feuilles de bananier, sept briques renferment des fibres de coco, cinq briques comportent des fibres de feuilles de manguier et cinq briques ne contiennent que de la terre.

3.1.2.1 DESCRIPTION GENERALE

La description des vingt-trois briques mises en œuvre est rappelée au sein des quatre tableaux ci-après.

Repère Apparence	Bananier fiche n°1 Brique fibrée Fibres feuilles de bananier fiche1	Bananier fiche n°2 Brique fibrée Fibres feuilles de bananier fiche2	Bananier fiche n°3 Brique fibrée Fibres feuilles de bananier fiche3	Bananier fiche n°4 Brique fibrée Fibres feuilles de bananier fiche4	Bananier fiche n°5 Brique fibrée Fibres feuilles de bananier fiche5	Bananier 6 sans fiche Brique fibrée
Noté sur étiquette	Proportion du mélange en volume Terre 10 Fibres de bananier 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0	Proportion du mélange en volume Terre 10,5 Fibres de bananier 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0	Proportion du mélange en volume Terre 11 Fibres de bananier 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0	Proportion du mélange en volume Terre 11,5 Fibres de bananier 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0	Proportion du mélange en volume Terre 12 Fibres de bananier 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0	Proportion du mélange en volume Terre Chirongui 12 Fibre Bananiers 5 Eau 3 Autres granulats 0
Dimensions (long large haut en mm)	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm
Photo						

Repère Apparence	FIBRE DE COCO Fiche n°1 Brique fibrée	FIBRE DE COCO Fiche n°2 Brique fibrée	FIBRE DE COCO Fiche n°3 Brique fibrée	FIBRE DE COCO Fiche n°4 Brique fibrée	FIBRE DE COCO Fiche n°5 Brique fibrée	Fibre COCO 6 sans etiquette1 Brique fibrée	Fibre COCO 7 sans etiquette2 Brique fibrée
Noté sur etiquette	FIBRES DE COCO Fiche n°1 Proportion du mélange en volume Terre 4,5 Fibres de COCO 7,5 Eau 0,75 Liant 0 Autres granulats 0	FIBRES DE COCO Fiche n°2 Proportion du mélange en volume Terre 6 Fibres de COCO 7,5 1,2 Liant 0,5 ciment Autres granulats 1 pouzzolane	FIBRES DE COCO Fiche n°3 Proportion du mélange en volume Terre 12 Fibres de COCO 4 1,5 Liant 0 Autres granulats 0	FIBRES DE COCO Fiche n°4 Proportion du mélange en volume Terre 10 Fibres de COCO 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0	FIBRES DE COCO Fiche n°5 Proportion du mélange en volume Terre 9 Fibres de COCO 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0	13/06/2022 Proportion du mélange en volume Fibre COCO 8+1+8 (10) TERRE 4 Chirongui Eau 3+1	Proportion du mélange en volume Fibre COCO 8 volumes Terre 24 volumes Eau 3 volumes
Dimensions (long large haut en mm)	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm
Photo							

Repère	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°1	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°2	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°3	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°4	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°5
Apparence	Brique fibrée				
Noté sur étiquette	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°1	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°2	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°3	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°4	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°5
	Proportion du mélange en volume Terre 8 Fibres de Manguier 4 Eau 1,5 Liant 0	Proportion du mélange en volume Terre 7 Fibres de Manguier 4 Eau 1,5 Liant 0	Proportion du mélange en volume Terre 6 Fibres de Manguier 5 Eau 1,5 Liant 0	Proportion du mélange en volume Terre 5 Fibres de Manguier 6 Eau 1,5 Liant 0	Proportion du mélange en volume Terre 5 Fibres de manguier 5 Eau 1,5 Liant 0
Dimensions (long large haut en mm)	Autres granulats 0 9,5*14,5*29,5cm				
Photo					

Repère Apparence	Brique Terre 1 sans étiquette1 Brique terre	Brique Terre 2 sans étiquette2 Brique terre	Brique Terre 3 sans étiquette3 Brique terre	Brique Terre 4 sans étiquette4 Brique terre	Brique Terre 5 sans étiquette5 Brique terre
Noté sur étiquette	Terre pure? Pas de fiche	Terre pure? Pas de fiche	Terre pure? Pas de fiche	Terre pure? Pas de fiche	Terre pure? Pas de fiche
Dimensions (long large haut en mm)	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm	9,5*14,5*29,5cm
Photo					

Tableau 11 : Description des matériaux de Mayotte

Chacune des briques fabriquées correspondant à une formulation bien précise (à l'exception de celles ne contenant que de la terre), nous avons dû réduire le nombre d'échantillons à tester afin de pouvoir respecter le planning expérimental prévu.

Les dix briques les plus pertinentes *a priori* ont donc été sélectionnées dans l'optique de leur caractérisation thermique au Hot Disk (colonne en vert dans les tableaux). Les formulations renfermant les plus fortes proportions de fibres végétales ont notamment été retenues ainsi que deux briques en terre pure pour disposer d'un point de comparaison. Les échantillons sélectionnés sont trois briques contenant des fibres de feuilles de bananier, trois briques renfermant des fibres de coco, deux briques comportant des fibres de feuilles de manguier et, comme indiqué, deux briques de terre pure.

Comme précédemment, les dix briques ont été scindées en deux pour les besoins de l'étude.

Repère	Bananier fiche n°1		Bananier fiche n°2		Bananier 6 sans fiche	
Numérotation	MAY BAN11	MAY BAN12	MAY BAN21	MAY BAN22	MAY BAN61	MAY BAN62
Cerema	MAY BAN11	MAY BAN12	MAY BAN21	MAY BAN22	MAY BAN61	MAY BAN62
Apparence	Brique fibrée		Brique fibrée		Brique fibrée	
	Proportion du mélange en volume Terre 10 Fibres de bananier 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0		Proportion du mélange en volume Terre 10,5 Fibres de bananier 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0		Proportion du mélange en volume Fibre Bananiers 5 Terre Chirongui 12 Eau 3	
Photo						

Repère	FIBRE DE COCO Fiche n°1		FIBRE DE COCO Fiche n°2		Fibre COCO 6sans étiquette1	
Numérotation						
Cerema	MAY COCO11	MAY COCO12	MAY COCO21	MAY COCO22	MAY COCO61	MAY COCO62
Apparence	Brique fibrée Proportion du mélange en volume Terre 4,5 Fibres de COCO 7,5 Eau 0,75 Liant 0 Autres granulats 0		Brique fibrée Proportion du mélange en volume Terre 6 Fibres de COCO 7,5 1,2 Liant 0,5 ciment Autres granulats 1 pouzzolane		Brique fibrée Proportion du mélange en volume Fibre COCO 8+1+8 (10) TERRE 4 Chirongui Eau 3+1	
Photo	 					

Repère	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°4		FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°5		Brique sans étiquette1		Brique sans étiquette2	
Numérotation								
Cerema	MAY MANG41	MAY MANG42	MAY MANG51	MAY MANG52	MAY TER11	MAY TER12	MAY TER21	MAY TER22
Apparence	Brique fibrée Proportion du mélange en volume Terre 5 Fibres de Manguiier 6 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0		Brique fibrée Proportion du mélange en volume Terre 5 Fibres de manguiier 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0		Brique terre Pas de fiche		Brique terre Pas de fiche	
Photo	 				 			

Tableau 12 : Description des échantillons testés

Pour mémoire, des fiches de traçabilité ont été rédigées pour chaque brique confectionnée. Ainsi, la composition des différents mélanges mis en œuvre est parfaitement connue.

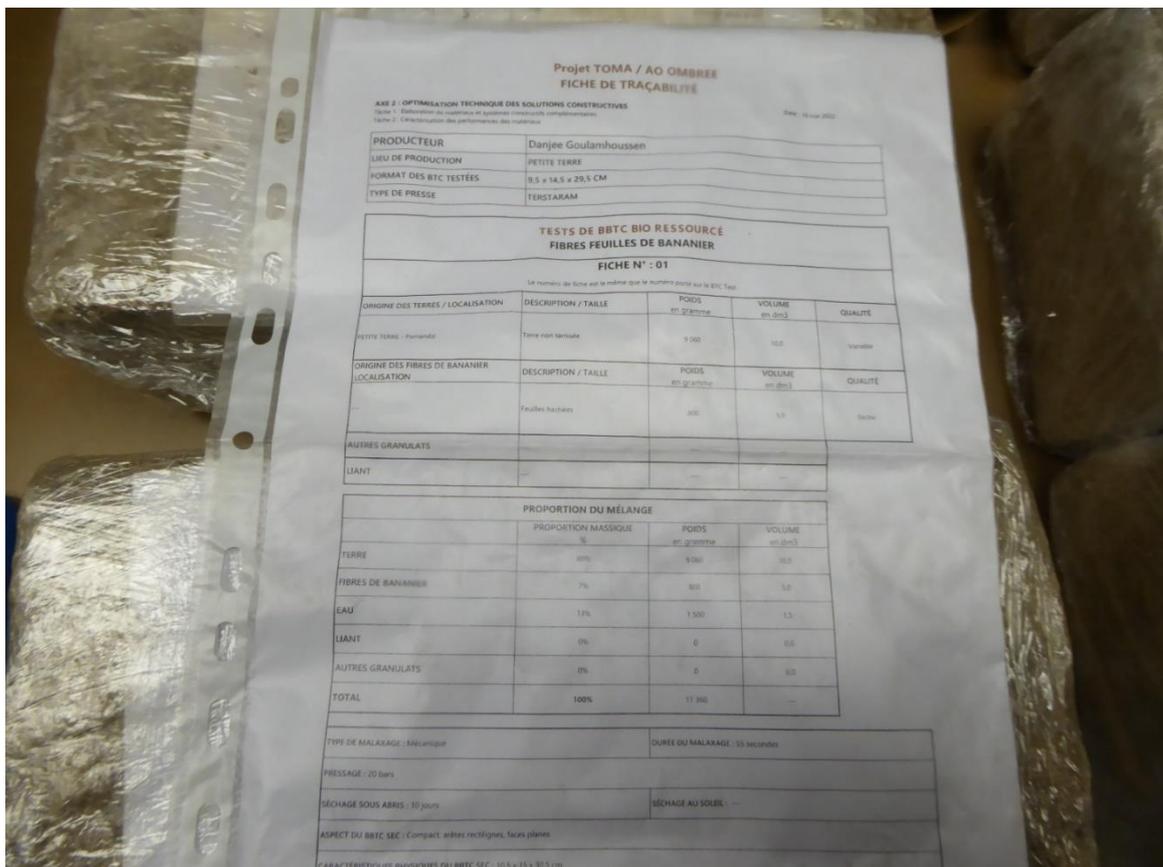


Figure 24 : Fiche de traçabilité de la brique n°1 renfermant des fibres de feuilles de bananier

3.1.2.2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Les dix échantillons retenus ont été coupés en deux dans l'optique de leur caractérisation thermique au Hot Disk puis séchés en étuve à 50°C pendant 72 heures. Les dimensions et la masse de chaque demi-brique ont ainsi été déterminées. Les caractéristiques physiques sèches des différentes demi-briques sont données dans le **tableau 13**.

Notons que les mesures effectuées sont, pour certaines, imprécise du fait de l'irrégularité des briques et de la friabilité de certaines briques se traduisant par des pertes de matière lors des différentes manipulations en laboratoire.

Echantillons	Dimension extérieures Echantillons Mayotte				Fiabilité mesure volume: bon, moyen, faible.	Masse (g)	Masse volumique sèche (kg/m ³)	Densité
	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Hauteur (mm)	Volume (mm ³)				
BAN11	143	148	101	2 066 124	moyen	1 792,40	867,52	0,8675
BAN12	151	152	101	2 246 242	moyen	1 820,00	810,24	0,8102
BAN21	153	152	100	2 114 600	faible	1 395,80	660,08	0,6601
BAN22	145	145	100	1 902 500	faible	1 450,70	762,52	0,7625
BAN61	125	131	88	1 395 640	moyen	1 929,40	1 382,45	1,3824
BAN62	145	133	85	1 578 535	moyen	2 108,80	1 335,92	1,3359
COCO11	145	143	100	1 942 500	faible	1 469,50	756,50	0,7565
COCO12	151	150	100	2 098 250	faible	1 730,80	824,88	0,8249
COCO21	155	154	97	2 190 290	moyen	1 935,70	883,76	0,8838
COCO22	148	154	98	2 151 616	moyen	1 952,30	907,36	0,9074
COCO61	131	129	85	1 371 415	moyen	1 427,80	1 041,11	1,0411
COCO62	132	135	88	1 299 360	moyen	1 233,30	949,16	0,9492
MANG41	150	143	95	1 940 750	moyen	1 404,00	723,43	0,7234
MANG42	145	143	93	1 928 328	moyen	1 316,70	682,82	0,6828
MANG51	145	145	93	1 873 425	moyen	1 538,70	821,33	0,8213
MANG52	141	150	88	1 776 700	moyen	1 522,70	857,04	0,8570
TER11	149	150	89	1 899 150	bon	2 501,50	1 317,17	1,3172
TER12	143	143	88	1 719 512	bon	2 438,90	1 418,37	1,4184
TER21	143	148	90	1 832 760	bon	2 647,80	1 444,71	1,4447
TER22	148	148	90	1 887 840	bon	2 648,50	1 402,93	1,4029

Tableau 13 : Caractéristiques physiques des briques de Mayotte sèches

Les masses volumiques mesurées sont globalement cohérentes au regard de la composition des différents mélanges. En effet, les briques de terre pure sont logiquement les plus denses de toutes et les briques contenant le plus de bioressources en volume sont les moins denses.

On remarque toutefois que, pour les formulations comportant des fibres de feuilles de bananier, la brique n°2 a une masse volumique plus faible que la brique n°1 alors qu'elle contient pourtant davantage de terre. Cela s'explique par la moins bonne cohésion de la brique n°2 : du fait de la friabilité du matériau, des pertes de matière ont été observées, conduisant ainsi à une diminution de la masse volumique apparente sèche.

3.2 Caractérisation des propriétés thermiques

3.2.1 PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Dans le cadre de ce travail, les caractéristiques thermiques des matériaux étudiés ont été déterminées au moyen d'une technique de mesure en régime transitoire reposant sur l'utilisation d'une sonde à choc thermique : la méthode du disque chaud (ou « Hot Disk ») ^(57 ; 58 ; 59).

Le principe de base du système est d'appliquer une puissance constante pendant un temps défini à un échantillon initialement isotherme par le biais d'une sonde Hot Disk et de suivre l'évolution en température de l'échantillon en utilisant la sonde comme un thermomètre résistif.

Cette technique permet de mesurer la conductivité thermique λ et la diffusivité thermique a du matériau étudié, puis d'en déduire sa capacité thermique volumique C_V d'après l'équation suivante :

$$C_V = \frac{\lambda}{a}$$

Le dispositif expérimental est simple à mettre en œuvre (**Figure 25**) : une sonde constituée d'une double spirale de Nickel de 10 μm d'épaisseur prise en sandwich entre deux feuilles d'isolant Kapton est insérée entre deux échantillons symétriques du matériau à caractériser.

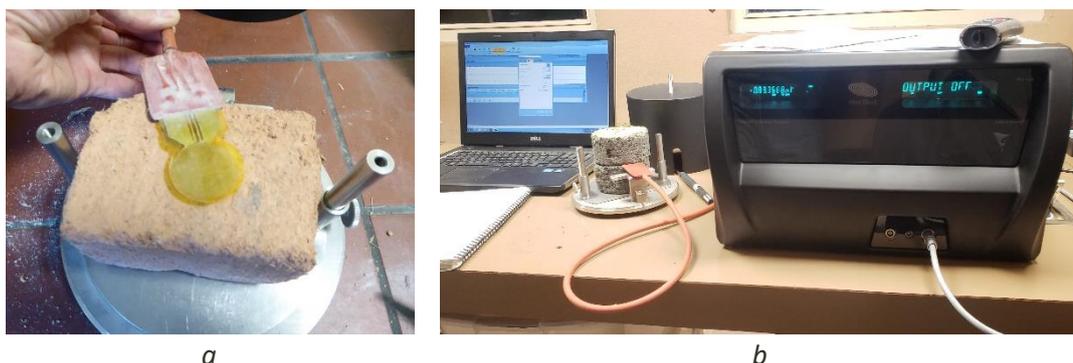


Figure 25 : Sonde Hot Disk (a) et dispositif expérimental complet (b)

La méthode du disque chaud repose sur un modèle qui considère la sonde sous forme d'anneaux sources concentriques (avec un rayon noté r_s). La profondeur de pénétration du flux Δp_{pen} , qui joue un rôle déterminant pour l'estimation des propriétés thermophysiques du milieu, est définie par l'équation suivante :

$$\Delta p_{pen} = \kappa \sqrt{\lambda t_{tot}}$$

où κ est une constante dépendant de la sensibilité des enregistrements de température et t_{tot} est la durée de l'excitation thermique.

Le milieu étudié (supposé cylindrique de rayon r) est considéré comme semi-infini par rapport à la sonde Hot Disk. Durant la partie initiale du régime transitoire, et avant que le flux de chaleur n'atteigne les bords de l'échantillon ($\Delta p_{pen} < r - r_s$), la conductivité thermique du matériau est évaluée à l'aide de la relation suivante qui lie la température moyenne enregistrée par la sonde à la puissance de chauffe et aux caractéristiques de l'échantillon :

$$T(t) = \frac{\psi V}{\pi^{3/2} r_s \lambda} f(\tau)$$

où $\tau = \sqrt{\frac{at}{r_s^2}}$ est une grandeur sans dimension fonction du temps caractéristique de l'élément Hot Disk. La fonction $f(\tau)$ décrit la situation quand l'échantillon a une prolongation limitée dans la direction perpendiculaire à la sonde ^(57 ; 60).

Pour les temps longs ($t > (r - r_s)^2 / \lambda$), et en supposant l'absence totale de pertes thermiques, la température du milieu étudié devient une fonction linéaire du temps, et la chaleur volumique est identifiable facilement ⁽⁶⁰⁾ :

$$T(t) = K_a + \frac{\phi t}{\rho C_p}$$

La difficulté majeure qui apparaît lors de l'utilisation de la méthode du disque chaud est qu'il faut avoir d'avance une idée sur les caractéristiques thermophysiques du milieu. En effet, la connaissance grossière du matériau étudié (géométrie, conductivité thermique) permet de prédire la profondeur de pénétration Δp_{pen} et ainsi de choisir le type de sonde et la puissance de chauffe adéquats pour une mesure au plus juste. C'est la raison pour laquelle, dans le cadre de cette étude, une batterie d'essais préliminaires a dû être menée pour déterminer la puissance et la durée de chauffe les plus pertinentes pour chacun des matériaux testés.

3.2.2 CARACTERISATION DES ECHANTILLONS DE GUYANE

Les propriétés thermiques sèches de chacune des sept formulations fabriquées dans le cadre du projet TOMA ont été déterminées en prenant en sandwich la sonde Hot Disk entre deux demi-briques du matériau à caractériser.

Comme nous ne disposons, pour chaque formulation, que de deux demi-briques, nous avons répété ces essais à entre quatre et six reprises.



Figure 26 : Caractérisation de la formulation A avant (a) et après (b) la pose du capot de protection permettant de s'affranchir des flux convectifs au sein du laboratoire

Dans le tableau suivant, les résultats des différents essais réalisés sont présentés. Le type de sonde utilisé, la puissance de chauffe injectée et la durée de chaque essai sont également précisés.

Essai n°	Date	Heure	Matériaux	Sonde	Hot Disk Puissance (w)	Hot disk Durée (s)	Conductivité thermique (w/mK)	Diffusion thermique (mm²/s)	Chaleur spécifique (MJ/m³K)
3	23/09/22	10h50	A1-A2	4922 rayon 14,6mm	0,2	160	0,1752	0,3369	0,5201
5	28/09/22	17h00	A1-A2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1479	0,2322	0,6370
6	29/09/22	11h45	A1-A2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1532	0,2409	0,6359
7	29/09/22	13h45	A1-A2	4922 rayon 14,6mm	0,2	160	0,1747	0,6301	0,2768
8	29/09/22	16h45	A1-A2	4922 rayon 14,6mm	0,2	160	0,1629	0,3464	0,4702
9	03/10/22	10h30	A1-A2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1491	0,2462	0,6057
						Moyenne:	0,1605	0,3388	0,5243
13	28/09/22	17h30	B1- B2	4922 rayon 14,6mm	0,1	320	0,1931	0,2392	0,8075
14	29/09/22	14h15	B1- B2	4922 rayon 14,6mm	0,1	320	0,1918	0,2343	0,8185
15	29/09/22	17h15	B1- B2	4922 rayon 14,6mm	0,1	320	0,1931	0,2418	0,7985
16	03/10/22	11h00	B1- B2	4922 rayon 14,6mm	0,1	320	0,1896	0,2243	0,8451
						Moyenne:	0,1919	0,2349	0,8174
19	23/09/22	15h15	C1-C2	4922 rayon 14,6mm	0,1	160	0,1133	0,3039	0,373
22	29/09/22	14h30	C1-C2	4922 rayon 14,6mm	0,1	160	0,1063	0,2345	0,4533
24	03/10/22	11h30	C1-C2	4922 rayon 14,6mm	0,1	80	0,1177	0,3494	0,337
25	03/10/22	15h15	C1-C2	8563 Rayon 9,9mm	0,1	160	0,1063	0,2331	0,4561
26	03/10/22	17h00	C1-C2	8563 Rayon 9,9mm	0,1	320	0,1069	0,1902	0,5624
27	04/10/22	8h40	C1-C2	8563 Rayon 9,9mm	0,1	320	0,1122	0,1806	0,6214
						Moyenne:	0,1105	0,2486	0,4672

Essai n°	Date	Heure	Matériaux	Sonde	Hot Disk Puissance (W)	Hot disk Durée (s)	Conductivité thermique (W/mK)	Diffusion thermique (mm²/s)	Chaleur spécifique (MJ/m³K)
29	23/09/22	11h30	D1-D2	4922 rayon 14,6mm	0,2	160	0,2797	0,3213	0,8704
30	23/09/22	15h45	D1-D2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,2879	0,2856	1,008
31	28/09/22	18h15	D1-D2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,2633	0,2788	0,9441
32	29/09/22	15h10	D1-D2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,2484	0,2778	0,8942
33	29/09/22	17h45	D1-D2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,2641	0,3247	0,8133
34	03/10/22	11h40	D1-D2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,2774	0,2326	1,193
						Moyenne:	0,2701	0,2868	0,9538
37	23/09/22	16h05	E1-E2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,09365	0,221	0,4239
38	28/09/22	18H30	E1-E2	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,116	0,182	0,6371
39	29/09/22	15h30	E1-E2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,118	0,2965	0,398
40	29/09/22	18h00	E1-E2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1124	0,3369	0,3336
41	03/10/22	12h50	E1-E2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1112	0,2608	0,4265
						Moyenne:	0,1103	0,2594	0,4438
42	21/09/22	14h40	F1-F2	4922 rayon 14,6mm	0,2	160	0,1152	0,3092	0,3725
44	23/09/22	16h30	F1-F2	4922 rayon 14,6mm	0,1	320	0,1137	0,2578	0,4409
45	29/09/22	11h15	F1-F2	4922 rayon 14,6mm	0,1	320	0,1219	0,3046	0,4001
46	29/09/22	15h45	F1-F2	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1087	0,2184	0,498
47	29/09/22	18h30	F1-F2	4922 rayon 14,6mm	0,1	320	0,1212	0,2623	0,4621
48	03/10/22	13h50	F1-F2	4922 rayon 14,6mm	0,1	320	0,1211	0,257	0,4714
						Moyenne:	0,1170	0,2682	0,4408
49	21/09/22	14h50	G1-G2	4922 rayon 14,6mm	0,4	160	0,6728	0,6198	1,086
51	23/09/22	16h40	G1-G2	4922 rayon 14,6mm	0,4	160	0,6671	0,5871	1,136
52	29/09/22	11h30	G1-G2	4922 rayon 14,6mm	0,4	160	0,6485	0,4956	1,309
53	29/09/22	16h15	G1-G2	4922 rayon 14,6mm	0,4	160	0,6742	0,5474	1,232
54	29/09/22	18h40	G1-G2	4922 rayon 14,6mm	0,4	160	0,6653	0,5399	1,232
55	03/10/22	14h15	G1-G2	4922 rayon 14,6mm	0,4	160	0,6851	0,5937	1,154
						Moyenne:	0,6688	0,5639	1,1915

Tableau 14 : Caractérisation des propriétés thermiques des échantillons de Guyane secs

Le **tableau 14** nous permet de constater que la répétabilité des essais est bonne. En revanche, compte-tenu du fait que nous ne disposons que d'un échantillon pour chaque formulation, la reproductibilité des caractéristiques thermiques des échantillons de Guyane secs n'a pas pu être évaluée.

Les valeurs moyennes mesurées sont récapitulées dans le tableau suivant :

Résultats Hot Disk Guyane: valeurs moyennes			
Matériaux	Conductivité thermique (W/mK)	Diffusion thermique (mm²/s)	Chaleur spécifique (MJ/m³K)
A1-A2	0,1605	0,3388	0,5243
B1- B2	0,1919	0,2349	0,8174
C1-C2	0,1105	0,2486	0,4672
D1-D2	0,2701	0,2868	0,9538
E1-E2	0,1103	0,2594	0,4438
F1-F2	0,1170	0,2682	0,4408
G1-G2	0,6688	0,5639	1,1915

Tableau 15 : Caractéristiques thermiques des échantillons de Guyane secs

Il apparaît donc que, d'un point de vue thermique, les formulations notées C, E et F sont les plus intéressantes. Toutefois, comme le rappelle le **tableau 16**, les formulations C et E présentent une cohésion assez limitée. C'est la raison pour laquelle les modélisations menées dans le cadre de la tâche 2.3 se sont davantage focalisées sur l'utilisation de la formulation F dans un système constructif complet.

Repère	A1 A2	B1 B2	C1 C2	D1 D2	E1 E2	F1 F2	G1 G2
Commentaire général	Aspect brique fibrée avec liant. Bonne tenue aux manipulations. Pas de pertes de matériaux	Aspect brique fibrée avec liant. Bonne tenue aux manipulations. Pas de pertes de matériaux	Aspect brique fibrée. Très fragile. Se délite lors des manipulations. Fortes pertes de matériaux	Aspect brique fibrée avec forte cohésion due au liant. Bonne tenue aux manipulations. Pas de pertes de matériaux	Aspect brique fibrée. Bonne tenue aux manipulations. Perte de fibres lors des manipulations	Aspect brique fibrée. Bonne tenue aux manipulations. Perte de fibres lors des manipulations	Aspect brique terre et sable. Bonne tenue aux manipulations. Perte de grains de sable.
Composition	Adobe 1 chaux NHL 3,5 2 Terre 4 Bagasse Eau	Adobe/panneau 1 Terre Bagasse à saturation Eau	Adobe/panneau 1 Chaux NHL 3,5 1 Terre Bagasse à saturation Eau	Enduit VOGURE 1 Chaux 3,5 NHL 2 Terre 4 Bagasse Eau	Adobe Volume 1 chaux 3,5NHL 1 Terre 4 Bagasse Eau	1 ch 5bg	4t 1s 1sb 03/08/2022
							
Conductivité thermique/béton chanvre (W/mK)	0,1605 / 0,06 à 0,10	0,1919 / 0,06 à 0,10	0,11045 / 0,06 à 0,10	0,2701 / 0,06 à 0,10	0,1102 / 0,06 à 0,10	0,1170 / 0,06 à 0,10	0,6688 / 0,06 à 0,10
Diffusion thermique (mm ² /s)	0,3388	0,2349	0,2486	0,2868	0,2594	0,2682	0,5639
Chaleur spécifique (MJ/m ³ K)	0,5243	0,8174	0,4672	0,9538	0,4438	0,4408	1,1915

Tableau 16 : Synthèse des essais thermiques sur les échantillons de Guyane secs

3.2.3 CARACTERISATION DES ECHANTILLONS DE MAYOTTE

Les propriétés thermiques sèches des dix formulations sélectionnées ont été déterminées en prenant en sandwich la sonde Hot Disk entre deux demi-briques du matériau à caractériser.

Comme nous ne disposons, pour chaque formulation, que de deux demi-briques, nous avons répété ces essais à entre quatre et six reprises.

Notons sur la **figure 27** que le capot de protection permettant de s'affranchir des flux convectifs au sein du laboratoire est plus grand que celui utilisé pour les essais sur les échantillons de Guyane en raison de la plus grande taille des briques mahoraises.

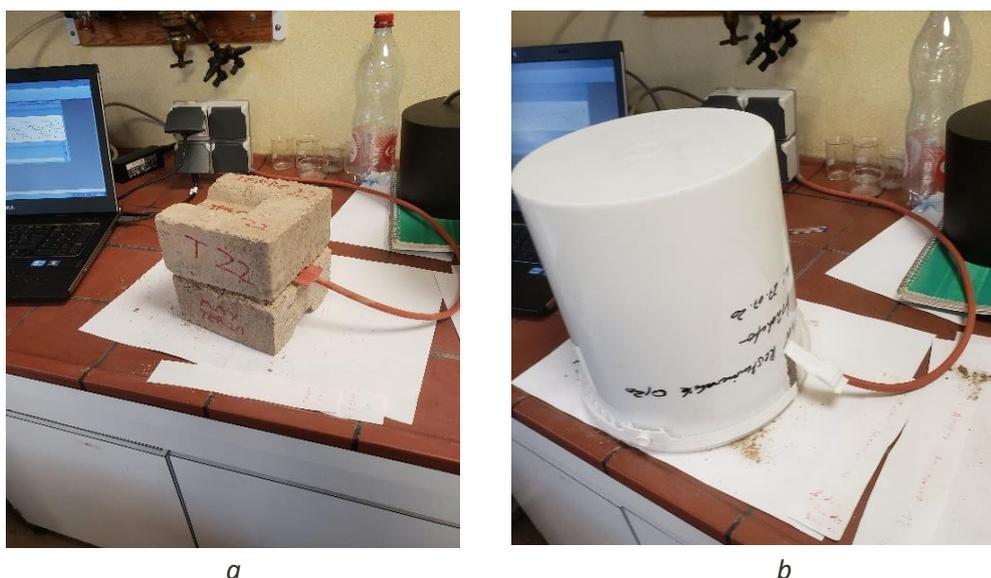


Figure 27 : Caractérisation de la formulation de terre pure n°2 avant (a) et après (b) la pose du capot de protection permettant de s'affranchir des flux convectifs au sein du laboratoire

Dans le tableau suivant, les résultats des différents essais réalisés sont présentés. Le type de sonde utilisé, la puissance de chauffe injectée et la durée de chaque essai sont également précisés.

Date Essai	Heure	Matériaux	Sonde	Hot Disk Puissance (W)	Hot disk Durée (s)	Conductivité thermique (W/mK)	Diffusion thermique (mm²/s)	Chaleur spécifique (MJ/m³K)
19/10/22	10h15	BAN11-BAN12	4922 rayon 14,6mm	0,2	160	0,1493	0,2682	0,5568
20/10/22	13h50	BAN11-BAN12	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1521	0,2141	0,7104
21/10/22	11h45	BAN11-BAN12	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1502	0,2149	0,6988
02/11/22	18h30	BAN11-BAN12	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1486	0,2283	0,6511
03/11/22	16h30	BAN11-BAN12	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1452	0,2286	0,6353
Moyenne:						0,1491	0,2308	0,6505

20/10/22	12H45	BAN21-BAN22	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1467	0,1155	1,2700
20/10/22	14h15	BAN21-BAN22	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1441	0,1895	0,7603
02/11/22	18h40	BAN21-BAN22	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1576	0,1400	1,1260
03/11/22	17h00	BAN21-BAN22	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1390	0,1438	0,9664
Moyenne:						0,1469	0,1472	1,0307

19/10/22	10h45	BAN61-BAN62	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,3441	0,2317	1,4885
20/10/22	14h30	BAN61-BAN62	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,3385	0,1599	2,1170
21/10/22	14h50	BAN61-BAN62	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,3566	0,1457	2,4470
02/11/22	18h50	BAN61-BAN62	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,3574	0,1874	1,9070
03/11/22	17h15	BAN61-BAN62	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,3598	0,1313	2,7410
Moyenne:						0,3513	0,1712	2,1401

20/10/22	11h45	COCO11-12	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1527	0,2054	0,7433
20/10/22	15h00	COCO11-12	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1673	0,2094	0,7988
21/10/22	12h15	COCO11-12	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1499	0,2076	0,7218
02/11/22	17h15	COCO11-12	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1627	0,2019	0,8057
03/11/22	17h45	COCO11-12	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1606	0,1971	0,8146
04/11/22	11h15	COCO11-12	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1579	0,1729	0,9132
Moyenne:						0,1585	0,1991	0,7996

20/10/22	12H00	COCO21-22	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1840	0,2067	0,8899
20/10/22	15h30	COCO21-22	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1793	0,1914	0,9370
21/10/22	12h30	COCO21-22	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1816	0,2152	0,8438
02/11/22	17h30	COCO21-22	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1666	0,1905	0,8744
03/11/22	18h00	COCO21-22	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1572	0,1873	0,8394
04/11/22	11h45	COCO21-22	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1953	0,1807	1,0810
Moyenne:						0,1773	0,1953	0,9109

20/10/22	12h20	COCO61-62	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,2072	0,3366	0,6154
20/10/22	16h00	COCO61-62	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,2051	0,2443	0,8396
21/10/22	12h50	COCO61-62	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,2156	0,3156	0,6832
03/11/22	11h30	COCO61-62	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,2145	0,1612	1,3310
04/11/22	9h30	COCO61-62	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,2059	0,1851	1,1130
04/11/22	12h00	COCO61-62	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1852	0,2592	0,7145
Moyenne:						0,2056	0,2503	0,8828

20/10/22	17h30	MANG41-42	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1802	0,5246	0,3435	
21/10/22	13h30	MANG41-42	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1825	0,3739	0,4880	
02/11/22	16h45	MANG41-42	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1992	0,5232	0,3807	
03/11/22	16h00	MANG41-42	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1919	0,4465	0,4297	
04/11/22	10h00	MANG41-42	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1666	0,5737	0,2904	
						Moyenne:	0,1841	0,4884	0,3865
20/10/22	17h45	MANG51-52	4922 rayon 14,6mm	0,2	320	0,1508	0,2120	0,7110	
21/10/22	13h45	MANG51-52	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1421	0,2465	0,5764	
02/11/22	17h00	MANG51-52	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1531	0,2172	0,7049	
03/11/22	16h15	MANG51-52	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1561	0,1949	0,8011	
04/11/22	10h15	MANG51-52	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1525	0,2398	0,6360	
04/11/22	13h45	MANG51-52	4922 rayon 14,6mm	0,2	640	0,1422	0,2728	0,5212	
						Moyenne:	0,1495	0,2305	0,6584

Tableau 17 : Caractérisation des propriétés thermiques des échantillons de Mayotte secs

Le **tableau 17** nous permet de constater que la répétabilité des essais est bonne. En revanche, compte-tenu du fait que nous ne disposions que d'un échantillon pour chaque formulation, la reproductibilité des caractéristiques thermiques des échantillons de Guyane secs n'a pas pu être évaluée.

Les valeurs moyennes mesurées sont récapitulées dans le tableau suivant :

Résultats Hot Disk Mayotte: valeurs moyennes			
Matériaux	Conductivité thermique (W/mK)	Diffusion thermique (mm ² /s)	Chaleur spécifique (MJ/m ³ K)
BAN11-BAN12	0,1491	0,2308	0,6505
BAN21-BAN22	0,1469	0,1472	1,0307
BAN61-BAN62	0,3513	0,1712	2,1401
COCO11-12	0,1585	0,1991	0,7996
COCO21-22	0,1773	0,1953	0,9109
COCO61-62	0,2056	0,2503	0,8828
MANG41-42	0,1841	0,4884	0,3865
MANG51-52	0,1495	0,2305	0,6584
TER11-12	0,3540	0,3089	1,1518
TER21-22	0,3935	0,3127	1,2660

Tableau 18 : Caractéristiques thermiques des échantillons de Mayotte secs

Les conductivités thermiques sèches obtenues pour les briques renfermant des fibres de feuilles de bananier ou des fibres de coco sont proportionnelles à leur teneur en liant. Ces résultats sont ceux attendus étant donné que la terre a une conductivité thermique supérieure à celle des fibres. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les deux briques de terre pure sont celles ayant la moins bonne résistance thermique. Notons au passage que la terre de Chirongui utilisée lors de la mise en œuvre de la dernière formulation de chaque série a une conductivité thermique beaucoup plus élevée que l'autre terre employée.

Toutefois, pour les briques comportant des fibres de feuilles de manguier, c'est celle contenant le plus de fibres qui a la conductivité thermique sèche la plus élevée. Comme le montre le **tableau 19**, cette brique semble moins homogène que l'autre : la mesure des

propriétés thermiques se faisant en surface, sur les premiers centimètres du matériau, il semblerait que des effets de bords aient faussé le résultat de la mesure.

Repère	Banancier fiche n°1	Banancier fiche n°2	Banancier 6 sans fiche
Numérotation Cerema	MAY BAN11 BAN12	MAY BAN21 BAN22	MAY BAN61 BAN62
Commentaire général	Brique fibrée bien liée par la terre. Peu de perte de matériaux lors des manipulations.	Brique assez bien liée par la terre. Pertes apparues lors du déballage. Peu de pertes lors des manipulations suivantes.	Brique fibrée très dure très bien liée par la terre. Pas de perte de matériaux lors des manipulations.
Composition	Proportion du mélange en volume Terre 10 Fibres de banancier 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0	Proportion du mélange en volume Terre 10,5 Fibres de banancier 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0	Proportion du mélange en volume Fibre Bananiers 5 Terre Chirongui 12 Eau 3
Photo			
Conductivité thermique/ béton chanvre (W/mK)	0,1491 / 0,06 à 0,10	0,2308 / 0,06 à 0,11	0,3513 / 0,06 à 0,12
Diffusion thermique (mm²/s)	0,2308	0,1472	0,1712
Chaleur spécifique (MJ/m3K)	0,6505	1,0307	2,1401

Repère Numérotation Cerema	FIBRE DE COCO Fiche n°1	FIBRE DE COCO Fiche n°2	Fibre COCO 6sans étiquette1
	MAY COCO11 COCO12	MAY COCO21 COCO 22	MAY COCO61 COCO62
Commentaire général	Brique fibrée très fragile. Beaucoup de pertes de matériaux lors du déballage et lors des manipulations suivantes.	Brique fibrée bien liée par terre. Peu de perte de matériaux lors des manipulations.	Brique fibrée très liée par la terre. Brique assez dure comme une brique avec liant type chaux. Pas de pertes de matériaux lors des manipulations.
Composition	Proportion du mélange en volume Terre 4,5 Fibres de COCO 7,5 Eau 0,75 Liant 0 Autres granulats 0	Proportion du mélange en volume Terre 6 Fibres de COCO 7,5 1,2 Liant 0,5 ciment Autres granulats 1 pouzzolane	Proportion du mélange en volume Fibre COCO 8+1+8 (10) TERRE 4 Chirongui Eau 3+1
Photo			
Conductivité thermique/ béton chanvre (W/mK)	0,1585 / 0,06 à 0,10	0,1773 / 0,06 à 0,11	0,2056 / 0,06 à 0,12
Diffusion thermique (mm²/s)	0,1991	0,1953	0,2503
Chaleur spécifique (MJ/m3K)	0,7996	0,9109	0,8828

Repère Numérotation Cerema	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°4	FIBRES FEUILLES DE MANGUIER Fichen°5	Brique sans étiquette1	Brique sans étiquette2
	MAY MANG41 MAN42	MAY MANG51 MANG52	MAY TER11 TER12	MAY TER21 TER22
Commentaire général	Brique fibrée, légère, pertes de matériaux lors des manipulations.	Brique fibrée bien liée, peu de pertes de matériaux.	Brique en terre. Brique très dure, forte cohésion de la brique, pas de perte de matériaux.	Brique en terre. Brique très dure, forte cohésion de la brique, pas de perte de matériaux.
Composition	Proportion du mélange en volume Terre 5 Fibres de Manguiers 6 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0	Proportion du mélange en volume Terre 5 Fibres de manguiers 5 Eau 1,5 Liant 0 Autres granulats 0	Pas de fiche	Pas de fiche
Photo				
Conductivité thermique/ béton chanvre (W/mK)	0,1841 / 0,06 à 0,10	0,1495 / 0,06 à 0,10	0,3540 / 0,06 à 0,10	0,3935 / 0,06 à 0,10
Diffusion thermique (mm²/s)	0,4884	0,2305	0,3089	0,3127
Chaleur spécifique (MJ/m3K)	0,3865	0,6584	1,1518	1,2660

Tableau 19 : Synthèse des essais thermiques sur les échantillons de Mayotte secs

3.3 Détermination des isothermes d'adsorption

3.3.1 PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les isothermes d'adsorption à 20°C ont été obtenues en appliquant le mode opératoire décrit dans la norme NF EN ISO 12571 ⁽⁶¹⁾ à trois ou quatre échantillons distincts de chaque matériau étudié.

Pour commencer, toutes les éprouvettes ont été séchées à 60°C dans une étuve pendant une semaine puis placées dans des dessiccateurs contenant du gel de silice. Leurs masses sèches ont alors été déterminées puis les échantillons ont été placés dans plusieurs boîtes hermétiques conservées à l'intérieur d'une pièce climatisée à 20°C et au sein desquelles l'hygrométrie était contrôlée au moyen de solutions salines saturées.

Solution saline saturée	Humidité relative à 20°C (%)
MgCl ₂ .6H ₂ O	33
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	53
NaCl	75
KCl	85
K ₂ SO ₄	94

Tableau 20 : Solutions salines saturées employées et hygrométries correspondantes à 20°C

Les masses des différents échantillons ont alors été suivies quotidiennement jusqu'à leur stabilisation à l'aide d'une balance AE200 munie d'une cage de pesée, de manière à s'affranchir des perturbations causées par les mouvements d'air dans la salle d'essai, et ayant une portée de 205 g et une précision de mesure de 1 mg.



Figure 28 : Photographie de la balance AE200 utilisée pour la pesée des échantillons

D'après la norme NF EN ISO 12571 ⁽⁶¹⁾, une éprouvette est en équilibre hygroscopique avec l'air environnant quand la variation de masse enregistrée entre trois pesées successives réalisées à 24 heures d'intervalle minimum est inférieure à 0,1% de sa masse totale m . Dès lors, la teneur en eau massique ω d'un échantillon peut être calculée attendu que sa masse sèche m_0 a été évaluée précédemment :

$$\omega [\%] = 100 \times \frac{m - m_0}{m_0}$$

Même si les solutions salines saturées sont peu sensibles aux fluctuations de température extérieure, les conditions de température et d'humidité relative au sein des boîtes ont été régulièrement contrôlées afin de s'assurer de la fiabilité des mesures effectuées.

3.3.2 CARACTERISATION DES ECHANTILLONS DE GUYANE

Suite aux essais de caractérisation des propriétés thermiques sèches des matériaux, nous avons choisi de nous focaliser plus spécifiquement sur quatre des sept formulations étudiées, à savoir les formulations notées de C à F. En effet, ce sont celles qui présentent le plus d'intérêt pour de futurs développements : on retrouve ainsi les trois formulations présentant les conductivités thermiques les plus faibles (C, E et F) et une formulation qui semble assez intéressante mécaniquement (D).

Pour chaque formulation sélectionnée, vingt échantillons ont été préparés et répartis dans chacune des cinq boîtes hermétiques correspondant à une humidité relative donnée. Chaque boîte contenait donc seize échantillons (quatre échantillons de chaque formulation) comme on peut l'observer sur la **Figure 29.a**.



Figure 29 : Exemple de la boîte contenant une solution saline saturée de KCl (régulation de l'humidité à 85%)

L'humidité relative au sein des boîtes a été contrôlée au moyen de deux thermo-hygromètres de marque Hobo placés à l'intérieur de ces dernières (cf. **Figure 29.a**) et d'un thermo-hygromètre de marque Rotronic dont le boîtier d'acquisition est placé sur le couvercle de la boîte (cf. **Figure 29.b**).

Pour chaque formulation et chaque niveau d'humidité, la teneur en eau massique du matériau a été déterminée en calculant la moyenne des masses stabilisées des quatre éprouvettes au cours des trois derniers jours, conformément à la norme NF EN ISO 12571 ⁽⁶¹⁾. Les isothermes d'adsorption à 20°C des quatre formulations ont alors pu être tracées :

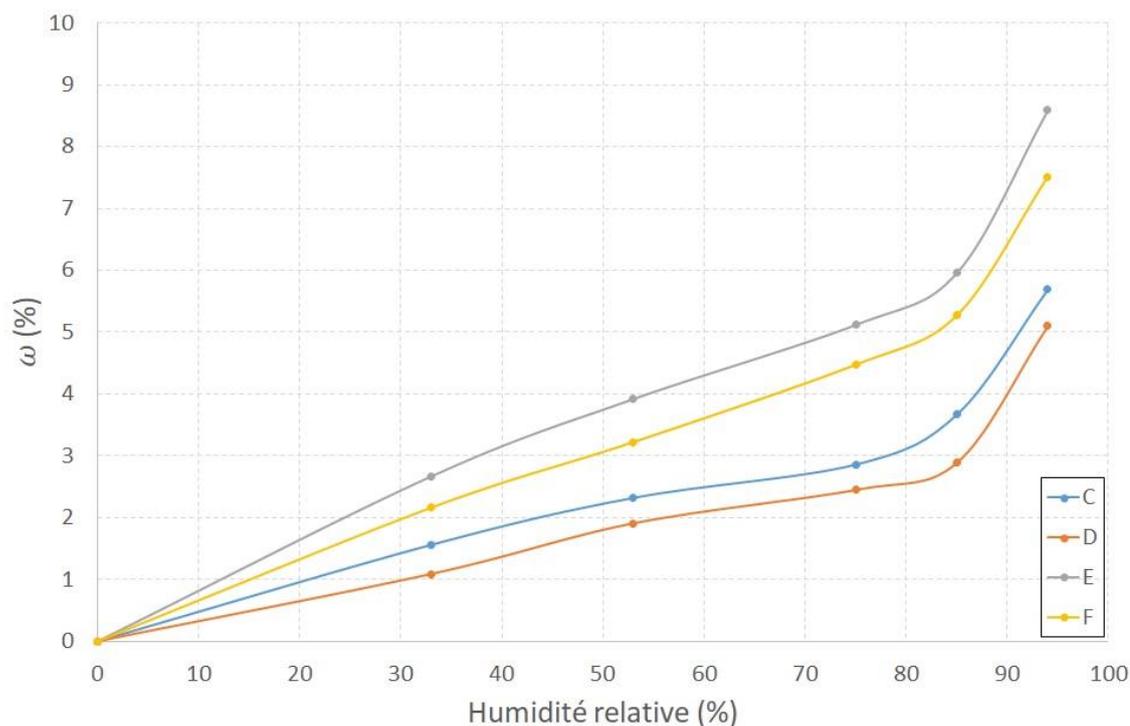


Figure 30 : Isothermes d'adsorption à 20°C des échantillons de Guyane

Il est intéressant de noter que les formulations C, E et F, qui ont sensiblement les mêmes masses volumiques et les mêmes conductivités thermiques sèches ont des isothermes de sorption assez différentes avec des écarts pouvant atteindre les 80% sur certains points de mesure. Les procédés de fabrication ont donc fortement influé sur la structure porale des matériaux.

3.3.3 CARACTERISATION DES ECHANTILLONS DE MAYOTTE

Suite aux essais de caractérisation des propriétés thermiques sèches des matériaux, nous avons choisi de ne pas exclure de formulation pour pouvoir notamment évaluer l'impact de la teneur en fibres des briques sur leurs isothermes d'adsorption. Nous avons simplement écarté une brique de terre pure pour pouvoir optimiser l'espace de stockage dans les boîtes.

Ainsi, pour chaque formulation sélectionnée, quinze échantillons ont été préparés et répartis dans chacune des cinq boîtes hermétiques correspondant à une humidité relative donnée. Chaque boîte contenait donc vingt-sept échantillons (trois échantillons de chaque formulation) comme on peut l'observer sur la **Figure 31.a**.



Figure 31 : Exemple de la boîte contenant une solution saline saturée de $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (régulation de l'humidité à 53%)

L'humidité relative au sein des boîtes a été contrôlée au moyen de deux thermo-hygromètres de marque Hobo placés à l'intérieur de ces dernières (cf. **Figure 31.a**) et d'un thermo-hygromètre de marque Rotronic dont le boîtier d'acquisition est placé sur le couvercle de la boîte (cf. **Figure 31.b**).

Pour chaque formulation et chaque niveau d'humidité, la teneur en eau massique du matériau a été déterminée en calculant la moyenne des masses stabilisées des trois éprouvettes au cours des trois derniers jours, conformément à la norme NF EN ISO 12571 ⁽⁶¹⁾. Les isothermes d'adsorption à 20°C des neuf formulations ont alors pu être tracées :

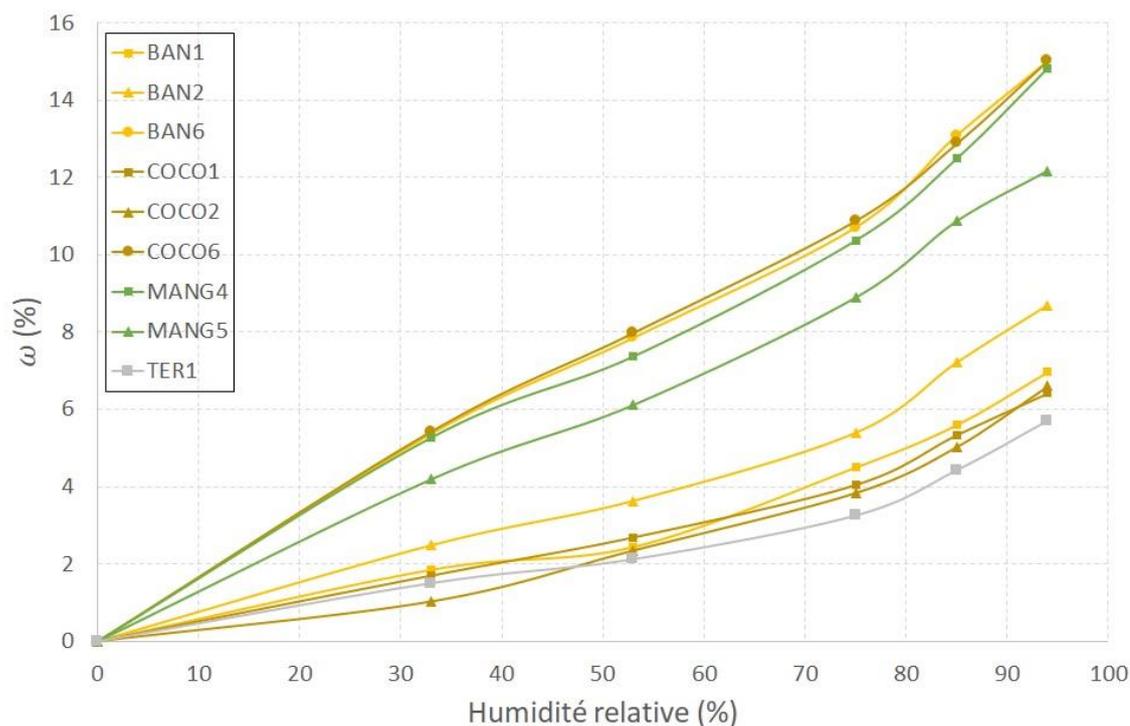


Figure 32 : Isothermes d'adsorption à 20°C des échantillons de Mayotte

Il n'apparaît pas de corrélation claire entre le taux de fibres et l'isotherme d'adsorption d'une brique. En effet, on remarque que si l'isotherme la plus basse correspond à la brique de terre pure, les deux isothermes les plus hautes correspondent aux briques les moins dosées en fibres : cette anomalie pourrait s'expliquer par le fait que la terre utilisée dans ces deux dernières (la terre de Chirongui) est différente de celle utilisée pour les autres mélanges. Toutefois, les briques contenant le plus de fibres, à savoir les briques renfermant des fibres de coco numérotées 1 et 2 et celles comportant des fibres de feuilles de manguier numérotées 4 et 5, se trouvent elles-aussi aux deux extrémités du graphique de la **figure 32**.

Par conséquent, comme précédemment, on constate que les procédés de fabrication et la nature des fibres utilisées ont fortement influé sur la structure porale des matériaux, davantage que le taux de fibres en lui-même.

4. Conclusions

Suite aux travaux menés dans l'Axe 1 du projet TOMA, différentes solutions constructives associant BTC et bioressources disponibles ont été développées.

Sur le territoire de Mayotte, ce sont plus de vingt formulations de Briques de Terre Comprimées Fibrées (BTFC) à base de fibres de coco, de feuilles de bananiers et de feuilles de manguiers qui ont été mises en œuvre et testées.

En Guyane, quatre typologies constructives ont été étudiées :

- Mélange terre-bagasse sous formes de briques (Adobe, BTCS) ou d'enduit isolant ;
- Système constructif associant sous formes de couches BTC et bagasse en vrac ou stabilisées ;
- Doublage isolant fibré et stabilisé (bagasse et chaux) ;
- Mélange terre-bagasse sous formes de mortier de rejointoiement et d'enduit de finition.

Les caractéristiques physiques (dimensions, masse volumique), thermiques (conductivité, diffusivité, capacité calorifique) et hydriques (isothermes d'adsorption) des différents matériaux mis en œuvre ont été déterminées, ce qui a permis de faire émerger trois formulations particulièrement prometteuses dans l'optique de futurs développements.

À Mayotte, ce sont les BTFC contenant respectivement un volume de feuilles de bananiers pour deux volumes de terre et un volume de feuilles de manguiers pour un volume de terre qui se sont avérées les plus intéressantes aussi bien pour leur bonne tenue mécanique que pour leur faible densité (0,84 soit environ deux fois moins qu'une BTC) et leur faible conductivité thermique sèche (0,149 W/m.K soit environ 2,5 fois moins qu'une BTC). Celle contenant des fibres de feuilles de manguiers est toutefois beaucoup plus sensible à la vapeur d'eau ce qui devrait limiter légèrement son impact sur la réduction des besoins en climatisation d'un bâtiment construit avec ce type de matériau.

En Guyane, l'isolant fibré et stabilisé constitué d'un volume de chaux NHL 3,5 et de cinq volumes de fibres de bagasse est nettement ressorti du lot. Sa très bonne cohésion mécanique, sa faible masse volumique (380 kg/m³), sa faible conductivité thermique sèche (0,117 W/m.K) et son fort potentiel hygroscopique font de lui un excellent correcteur thermique sur des solutions parpaing par exemple.

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : Courbes granulométrique	5
Figure 2 : Evaluation du caractère cohésif des argiles	6
Figure 3 : Découpe des feuilles de bananiers séchées	7
Figure 4 : Feuilles de manguiers découpées puis hachées	7
Figure 5 : Séparation morceaux de coques (a), fibres de coco (b), résidus (c) ⁽⁵¹⁾	8
Figure 6 : Fibres de coco : extraites (e), pilées (f), résidus séparation fibres/coques (g), rugosité de surface d'une fibre de coco observée au Microscope Electronique à Balayage (échelle 300µm) (h)	8
Figure 7 : Etapes de production des BTC : mélange terre/sable à la bétonnière (a), compression du mélange à l'aide d'une presse manuelle (b), séchage et stockage des matériaux (c) <i>dessins issus du livre « Construire en terre au Sahel »</i>	9
Figure 8 : 4 étapes de production des BTCS : Pesage des matières premières (a), Malaxage des MP terre et fibres/feuilles (b), Remplissage du moule de la presse et éjection du bloc (c, d), Stockage sur palette et séchage à l'abri des blocs (e)	10
Figure 9 : Bioressources retenues : bagasse	12
Figure 10 : Degré de plasticité et cohésion des terres en fonction des limites de liquidité et plasticité (H. Houben, H. Guillaud. <i>Traité de construction en terre</i> . Paranthèses, 2006. p 87)	12
Figure 11 : Courbe granulométrique de la terre d'analyse (Résultats Guyane) et zone recommandée pour la fabrication de blocs comprimés (H. Houben, H. Guillaud. <i>Traité de construction en terre</i> . Paranthèses, 2006. p 120)	13
Figure 12 : Extrait des propriétés thermiques des BTCS usuels (non fibrés) de La Brique de Guyane, Rapport Epsilon 2018 p14-15	13
Figure 13 : bétonnière de 120L pour la réalisation des mélanges	14
Figures 14 et 15 : Gonflement en sortie de presse d'une BTCS fibrée	15
Figure 16 : Démoulage et séchage d'une brique d'adobe terre-fibres	15
Figures 17 et 18 : Enduit isolant terre-fibres	16
Figure 19 : Evolution dans le temps de la température des solutions parpaing (rose) ; double paroi de BTCS collé (vert foncé) et séparés de 12,5cm (noir) ; double paroi+bagasse en vrac dans les 12,5cm (vert clair)	16
Figures 20 et 21 : Doublage isolant de bagasse stabilisée à la chaux	17
Figure 22 : Mortier de rejointoiement à base de terre	18
Figure 23 : Isolant mis en œuvre dans un démonstrateur	18
Figure 24 : Fiche de traçabilité de la brique n°1 renfermant des fibres de feuilles de bananier	35
Figure 25 : Sonde Hot Disk (a) et dispositif expérimental complet (b)	37
Figure 26 : Caractérisation de la formulation A avant (a) et après (b) la pose du capot de protection permettant de s'affranchir des flux convectifs au sein du laboratoire	38
Figure 27 : Caractérisation de la formulation de terre pure n°2 avant (a) et après (b) la pose du capot de protection permettant de s'affranchir des flux convectifs au sein du laboratoire	40

Figure 28 : Photographie de la balance AE200 utilisée pour la pesée des échantillons	45
Figure 29 : Exemple de la boîte contenant une solution saline saturée de KCl (régulation de l'humidité à 85%)	46
Figure 30 : Isothermes d'adsorption à 20°C des échantillons de Guyane	47
Figure 31 : Exemple de la boîte contenant une solution saline saturée de Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O (régulation de l'humidité à 53%)	48
Figure 32 : Isothermes d'adsorption à 20°C des échantillons de Mayotte	49

Tableau 1 : Propriétés de la terre d'analyse	6
Tableau 2 : Compositions BTC (TERR11) et BTCF	9
Tableau 3 : Présentation et évaluation des matériaux (partie 1)	10
Tableau 4 : Présentation et évaluation des matériaux (partie 2)	11
Tableau 5 : Données sur la granularité et plasticité de la terre d'analyse (Guyane)	13
Tableau 6 : Groupement de la bagasse en 3 catégories (a,b,c), élaboration propre.	14
Tableau 7 : Proportions des 14 solutions constructives produites	19
Tableau 8 : Description des matériaux de Guyane	24
Tableau 9 : Caractéristiques physiques des échantillons de Guyane secs	25
Tableau 10 : Aspect des échantillons de Guyane coupés en deux	28
Tableau 11 : Description des matériaux de Mayotte	32
Tableau 12 : Description des échantillons testés	34
Tableau 13 : Caractéristiques physiques des briques de Mayotte sèches	36
Tableau 14 : Caractérisation des propriétés thermiques des échantillons de Guyane secs	39
Tableau 15 : Caractéristiques thermiques des échantillons de Guyane secs	39
Tableau 16 : Synthèse des essais thermiques sur les échantillons de Guyane secs	40
Tableau 17 : Caractérisation des propriétés thermiques des échantillons de Mayotte secs	42
Tableau 18 : Caractéristiques thermiques des échantillons de Mayotte secs	42
Tableau 19 : Synthèse des essais thermiques sur les échantillons de Mayotte secs	44
Tableau 20 : Solutions salines saturées employées et hygrométries correspondantes à 20°C	45

Bibliographie

1. **Minke, G.** *Building with Earth : Design and Technology of a Sustainable Architecture.* Basel : Birkhauser , 2013.
2. *Indulge & Explore Natural Fiber Composites .* **Tambyrajah, Dilip.** 2015.
3. *Fundamentos da Arquitetura.* **Castelnou, Antonio.** 2014, Curitiba: UFPR.
4. *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction.* **Mizi Fan, Feng Fu,** 2017, London: Woodhead Publishing.
5. *A review on bricks and stabilized compressed earth blocks.* **S. Deboucha, R. Hashim,** 3, 2011 , Sci. Res. Essays, Vol. 6 , pp. 499–506.
6. *Experimental research on the recyclability of the clay material used in the fabrication of adobe bricks type masonry units.* **G. Calatan, A. Hegyi, C. Dico, C. Mircea.** 2017, Vol. 181, pp. 363–369.
7. *Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency.* **M. Hall, Y. Djerbib,** 4, 2004, Constr. Build. Mater., Vol. 18, pp. 281–286.
8. *The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes.* **S. Yetgin, Ö. Çavdar, A. Çavdar,** 3, 2008, Constr. Build. Mater. , Vol. 22, pp. 222–227.
9. **H. Houben, H. Guillaud,** *Traité de construction en terre.* s.l. : Paranthèses, 2006.
10. *Strength and erosion characteristics of earth blocks and earth block masonry.* **Walker, P.J.** 2004, J. Mater. Civ. Eng, Vol. 16, pp. 497–506.
11. *Inorganic stabilisation methods for extruded earth masonry units.* **D. Maskell, A. Heath, P. Walker,** 2014, Constr. Build. Mater., Vol. 71, pp. 602–609.
12. *Soil Stabilization Using Rice Husk Ash and Natural Lime as an Alternative to Cutting and Filling in Road Construction.* **T.R. Karatai, J.W. Kaluli, C. Kabubo, G. Thiong'o,** 2017, J. Constr. Eng. Manag., Vol. 143.
13. *Effect of short polymeric fibers on crack development in clays.* **S. Ziegler, D. Leshchinsky, H.L. Ling, E.B. Perry,** 2008, Soils Found., Vol. 38, pp. 247–253.
14. *Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers.* **K.Q. Tran, T. Satomi, H. Takahashi,** 2018, Constr. Build. Mater., Vol. 178, pp. 204–210.
15. *Engineering characteristics of compressed earth blocks stabilized with cement and fly ash.* **T.E. Elahi, A.R. Shahriar, M.S. Islam,** 2021, Constr. Build. Mater., Vol. 277 .
16. *Soil Stabilization Using Bottom Ash and Areca Fiber: Experimental Investigations and Reliability Analysis.* **S.P. Sudhakaran, A.K. Sharma, S. Kolathayar,** 2018, J. Mater. Civ. Eng., Vol. 30.
17. *Effectiveness of saw dust ash and cement for fabrication of compressed stabilized earth blocks.* **T.E. Elahi, A.R. Shahriar, M.K. Alam, M.Z. Abedin,** 2020, Constr. Build. Mater., Vol. 259.
18. *Dynamic Properties of Straw Fiber Reinforced and Gypsum Stabilized Adobe.* **M.S. Islam, H. Watanabe,** 2004, pp. 959–964.
19. *The effects of waste marble dust and polypropylene fiber contents on mechanical properties of gypsum stabilized earthen.* **Balkis, A. Pekrioglu.** 2017, Constr. Build. Mater., Vol. 134 , pp. 556–562.

20. *An investigation into the effects of lime on compressive and shear strength characteristics of fiber-reinforced clays.* **M.R. Abdi, A. Ghalandarzadeh, L.S. Chafi,** 2021, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, Vol. 13, pp. 885–898.
21. *Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil.* **C. Tang, B. Shi, W. Gao, F. Chen, Y. Cai,** 2007, *Geotext. Geomembranes.*, Vol. 25, pp. 194–202.
22. *Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils.* **I. Yilmaz, B. Civelekoglu,** 2009, *Appl. Clay Sci.*, Vol. 44, pp. 166–172.
23. *Earthquake Resistance of Adobe Reinforced by Low Cost Traditional Materials.* **M.S. Islam, K. Iwashita,** 2010, *J. Nat. Disaster Sci.*, Vol. 32, pp. 1–21.
24. *Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste.* **R.M. Gandia, F.C. Gomes, A.A.R. Correa, M.C. Rodrigues, R.F. Mendes,** 2019, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 222, pp. 168–182.
25. *Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials.* **H. Binici, O. Aksogan, M.N. Bodur, E. Akca, S. Kapur,** 2007, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 21, pp. 901–906.
26. *Application of agro and non-agro waste materials for unfired earth blocks construction: A review.* **N. Jannat, A. Hussien, B. Abdullah, A. Cotgrave,** 2020, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 254.
27. *Experimental investigation on mud bricks reinforced with natural additives under compressive and tensile tests.* **A. Vatani Oskouei, M. Afzali, M. Madadipour,** 2017, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 142, pp. 137–147.
28. *Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material.* **H. Binici, O. Aksogan, T. Shah,** 4, 2005, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 19, pp. 313–318.
29. *Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres.* **K. Ghavami, R.D. Toledo Filho, N.P. Barbosa,** 1, 1999, *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 21, pp. 39–48.
30. *Case studies in construction materials experimental analysis of compressed earth block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces, Case Stud.* **M. Mostafa, N. Uddin,** 2016, *Constr. Mater.*, Vol. 5, pp. 53–63.
31. *Determining the optimum addition of vegetable materials in adobe bricks.* **G. Calatan, A. Hegyi, C. Dico, C. Mircea,** 2016, *Proc. Technol.*, Vol. 22, pp. 259–265.
32. *Effect of reinforcing wool fibres on fracture and energy absorption properties of an earthen material.* **F. Aymerich, L. Fenu, P. Meloni,** 1, 2012, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 27, pp. 66–72.
33. *The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient roman adobe bricks.* **E. Quagliarini, S. Lenci,** 3, 2010, *J. Cult. Herit.*, Vol. 11, pp. 309–314.
34. *Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites.* **J. Savastano, P. Warden, R. Coutts,** 5, 2000, *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 22, pp. 379–384.
35. *Strength and stiffness response of coir fiber reinforced tropical soil.* **B. Sivakumar, A. Vasudevan,** 9, 2008, *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 20, pp. 571–577.
36. *Effects of short coconut fiber on the mechanical properties, plastic cracking behavior, and impact resistance of cementitious composites.* **C.L. Hwang, V.A. Tran, J.W. Hong, Y.C. Hsieh,** 2016, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 127, pp. 984–992.
37. *Influence of coconut fibres and lime on properties of soil-cement mortar.* **H. Danso, D. Manu,** 2020, *Case Stud. Constr. Mater.*, Vol. 12.

38. *Reinforcing rammed earth with plant fibers: a case study.* **A. Koutous, E. Hilali**, . 2021, Case Stud. Constr. Mater., Vol. 14.
39. *Experimental evaluation of adobe mix- tures reinforced with jute fibers.* **G. Araya-Letelier, F.C. Antico , C. Burbano-Garcia , J. Concha-Riedel , J. Norambuena-Contreras , J. Concha , E.I. Saavedra Flores**, . 2021, Constr. Build. Mater., Vol. 276.
40. *Mechanisms by which the inclusion of natural fibres enhance the properties of soil blocks for construction.* **H. Danso, D.B. Martinson , M. Ali , J.B. Williams**, . 27, 2017, J. Compos. Mater., Vol. 51, pp. 3835–3845.
41. **B. Gaw, S. Zamora**,. *Soil Reinforcement With Natural fibers for Low-income Housing Communities.* Worcester Polytechnic Institute. 2011.
42. *Application of sisal, bamboo, coir and jute natural composites in structural upgradation.* **T. Sen, H.N.J. Reddy**,. 3, 2011 , Int. J. Innov. Manag. Technol., Vol. 2, pp. 186–191.
43. *Study on the effects of marine clay stabilized with banana fibre.* **T. Sunny, A. Joy**,. 3, 2016, Int. J. Sci. Eng. Res., Vol. 4, pp. 96–98.
44. *Effect of banana fibers on mechanical and physical properties of light weight concrete blocks.* **W. Deelaman, K. Chaochanchaikul, K. Tungsudjawong**,. 2018 , Appl. Mech. Mater., Vol. 879, pp. 151–155.
45. *Effect of sugarcane bagasse fibre on the strength properties of soil blocks.* **H. Danso, B. Martinson, M. Ali, J. Williams**,. Clermont-Ferrand, France : s.n., 2015. 1st International Conference on bio-based building materials. pp. 251–256.
46. *Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview.* **M.M. Kabir, H. Wang, K.T. Lau, F. Cardona**,. 7, 2012 , Compos. Part B Eng., Vol. 43, pp. 2883–2892.
47. *Effect of Banana Fibers on the Compressive and Flexural Strength of Compressed Earth Blocks.* **Uddin, Marwan Mostafa and Nasim**. 2015, Buildings, Vol. 5, pp. 282-296.
48. **d'outre-mer, Office de développement de l'économie agricole.** *Filières végétales : Guadeloupe, Guyane, Martinique, Mayotte, La Réunion, Saint-Barthélemy, Saint-Martin, Saint-Pierre-et-Miquelon.* 2018.
49. **l'agriculture, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et.** *Perspectives à moyen terme : perspectives concernant la production et le commerce mondiaux des bananes et des fruits tropicaux 2019-2028.* Rome : s.n., 2020.
50. **Statista.** [En ligne] 2022. <https://www.statista.com/statistics/577497/world-coconut-production/>.
51. *Sustainable use of coco pith in cement-sand mortar for masonry block production: Mechanical characteristics, durability and environmental benefit.* **N. Sathiparan, A. Anburuvel, M. Muralitharan, D.A.I Kothalawala**,. 2022, Journal of Cleaner Production, Vol. 360.
52. *Sustainable production of concrete using coir fibres.* **Kore, S.D.** 1, 2021, IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. , Vol. 795.
53. *Performance of coconut coir reinforced hydraulic cement mortar for surface plastering application.* **N. Sathiparan, M.N. Rupasinghe, B.Pavithra**,. 2017, Construct. Build. Mater., Vol. 142, pp. 23–30.
54. *A review of coir fibre and coir fibre reinforced cement-based composite materials (2000–2021).* **B. Wang, L. Yan, B. Kasal**,. 2022, J. Clean. Prod., Vol. 338.
55. *Coconut fiber cement panels as wall insulation and structural diaphragm.* **A. Brose, J. Kongoletos, L. Glicksman**,. 2019, Front. Energy Res., Vol. 7.

56. *Properties of coconut, Oil Palm and bagasse fibres: As potential building materials.* **Danso, H.** 2017 , *Procedia Eng.*, Vol. 200, pp. 1–9.

57. *Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials.* **S.E. Gustafsson**, *Review of Scientific Instruments*, vol. 62, no. 3, p. 797–804, 1991.

58. *Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of thin samples from transient measurements with hot disk sensors.* **M. Gustavsson, E. Karawacki et S.E. Gustafsson**, *Review of Scientific Instruments*, vol. 65, no. 12, p. 3856–3859, 1994.

59. *NF EN ISO 22007-2. Plastiques - Détermination de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique - Partie 2 : méthode de la source plane transitoire (disque chaud).* Norme française, AFNOR, juin 2022.

60. *Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor : Part 1. Theoretical considerations.* **Y. He**, *Thermochimica Acta*, vol. 436, no. 1-2, p. 122–129, 2005.

61. *NF EN ISO 12571. Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique.* Norme française, AFNOR, novembre 2021.