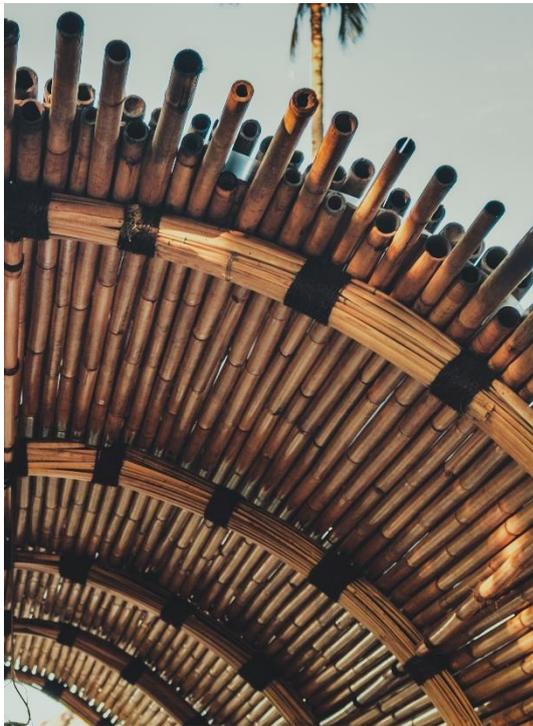




Développement des filières terre et bambou sur les territoires de Martinique, de Guadeloupe et de Guyane



Note d'introduction au document

Ce document regroupe les versions finales des différents livrables de l'étude « Développement des filières terre et bambou sur les territoires de Martinique, de Guadeloupe et de Guyane ». Le regroupement ayant été fait directement sur la version pdf, vous trouverez deux paginations : celle du document complet en haut à droite (chiffre en gris), celle du livrable en bas à droite (page x en bleu).

Plan de l'assemblage des différents rapports :

-Livrable 1: Etat des lieux - connaissances scientifiques et expression des conditions locales - Partie Terre Crue	p 2
-Livrable 2: Etat des lieux - connaissances scientifiques et expression des conditions locales - Partie Bambou.....	p 59
-Livrable 3: Proposition de stratégies de développement des filières terre crue et bambou	p 129
-Livrable 4: Matériaux versus impact territoriaux (environnementaux et socio-économiques).....	p 171
-Annexe: Références construites	p 209



Développement des filières
terre et bambou sur les
territoires de Martinique, de
Guadeloupe et de Guyane

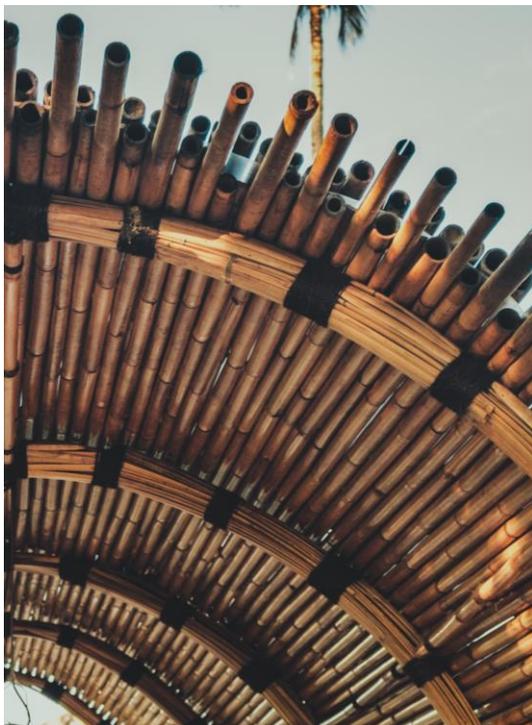


TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION – HISTORIQUE ET CONTEXTE DE L’ETUDE.....	4
1.1 <i>Etudes préalables.....</i>	4
1.2 <i>Contexte et objectif.....</i>	6
METHODOLOGIE.....	8
CONNAISSANCES TECHNIQUES SUR LE MATERIAU TERRE CRUE.....	10
1.3 <i>Conditions locales constructives et climatiques et critères de sélection des techniques.....</i>	10
1.4 <i>Présentation des différents procédés constructifs.....</i>	12
1.4.1 Adobes.....	12
1.4.2 BTC.....	13
1.4.3 Pisé.....	15
1.4.4 Béton de terre.....	16
1.4.5 Torchis.....	18
1.4.6 Terre allégée.....	19
1.4.7 Enduits et panneau de finition.....	21
1.4.8 Points d'attentions.....	23
1.4.8.1 Gestion de l’eau liquide.....	23
1.4.8.2 La stabilisation du matériau.....	24
1.5 <i>Caractéristiques techniques.....</i>	28
1.5.1 Mécaniques.....	28
1.5.2 Hygrothermiques.....	31
1.5.2.1 Conductivité thermique et teneur en eau.....	31
1.5.2.2 Changement de phase.....	32
1.5.2.3 Récapitulatif.....	33
1.5.3 Acoustiques.....	34
1.5.4 Sécurité incendie.....	35
1.5.4.1 Réaction au feu.....	35
1.5.4.2 Résistance au feu.....	35
1.5.5 Sismiques.....	36
1.5.5.1 Observation du patrimoine terre.....	36
1.5.5.2 Littérature scientifique.....	37
1.5.5.3 Réponse architecturale.....	37

1.6	<i>Cadre normatif et assurantiel</i>	39
1.7	<i>Coûts de mise en œuvre et de construction</i>	40
2	<i>Contexte socio-historique et économique des constructions terre crue et/ou bambou aux Antilles et en Guyane</i>	41
2.1.1	Histoire et patrimoine	41
2.1.2	Durabilité et écologie	46
2.1.3	Contexte économique	47
2.1.3.1	Importations et coûts des matériaux	47
2.1.3.2	Coût élevé des terrains.....	48
2.1.3.3	Caractéristiques principales des entreprises.....	49
2.1.4	Mode d'habiter	50
	CONTACTS	51
	BIBLIOGRAPHIE	52
	ANNEXE :	56
2.2	<i>Concepts scientifiques</i>	56
2.2.1	Limites d'Atterberg :.....	56
2.2.2	Capillarité :.....	56
2.3	<i>Documents supplémentaires</i>	56
2.3.1	Tableaux de caractéristiques techniques des techniques de construction en terre (issu de [68])	56

Introduction – Historique et contexte de l'étude

Les territoires ultra-marins français ont des contextes constructifs spécifiques et particulièrement différents du territoire métropolitain : Conditions climatiques, risques environnementaux, réglementation de la construction, matériaux disponibles, coûts... Or, pour répondre aux enjeux climatiques et environnementaux actuels, le secteur de la construction doit chercher à développer l'utilisation de matériaux locaux peu transformés, voir capable de stocker du carbone. Ce développement est déjà bien engagé en territoire métropolitain : filière chanvre en fort développement [1], de forte volonté pour le développement du matériaux terre [2], des innovations en cours sur de nombreux territoires (Ielo pour de la paille hachée insufflée [3], Cycle Terre [4] et Brique Technique Concept [5] pour les briques de terre crue, projection de terre-chanvre avec Eco-Pertica [6] ou Chanvre Nouvelle Aquitaine[7])... Mais les territoires ultra-marins ne bénéficient pas ou peu de ces avancées, du fait de leur éloignement et leur contexte très différent.

1.1 Etudes préalables

Plusieurs études ont déjà été réalisées sur les trois territoires visés, nous reprenons ici la synthèse de certaines de ces études.

En 2012, une étude systémique en deux phases [8], [9] a été réalisée sur les matériaux locaux disponibles en Martinique pour la construction. Le rapport de la première phase statuait sur le potentiel de différents systèmes constructifs : Bois local de construction (Mahogany), Bardage et palissade en bois locaux, Terre crue et fibre de bananier, Isolants à base de ouate de cellulose, Isolants à base de fibre de coco, Isolant à base de fibre de bois, Tuiles en Mahogany, Couverture en feuille de palmier, Bambou local. Ce potentiel est présenté par la réponse des matériaux à 4 critères : Economie, Environnement, Développement local et Propriétés. En dehors de la fibre de bois, les solutions ne semblent pas présenter d'intérêts économiques importants. En effet, comme il s'agit de mettre en place des procédés à faible impact environnemental, produisant des matériaux peu transformés, les produits sortants ont ainsi peu de valeur ajoutée, et demande malgré tout une main d'œuvre relativement importante. A cette date, la terre crue avec fibres de bananier et le bambou sont considérés comme ayant aucun intérêt économique, de très forts intérêts environnementaux et pour le développement local. La Figure 1 présente ces éléments sous forme graphique :

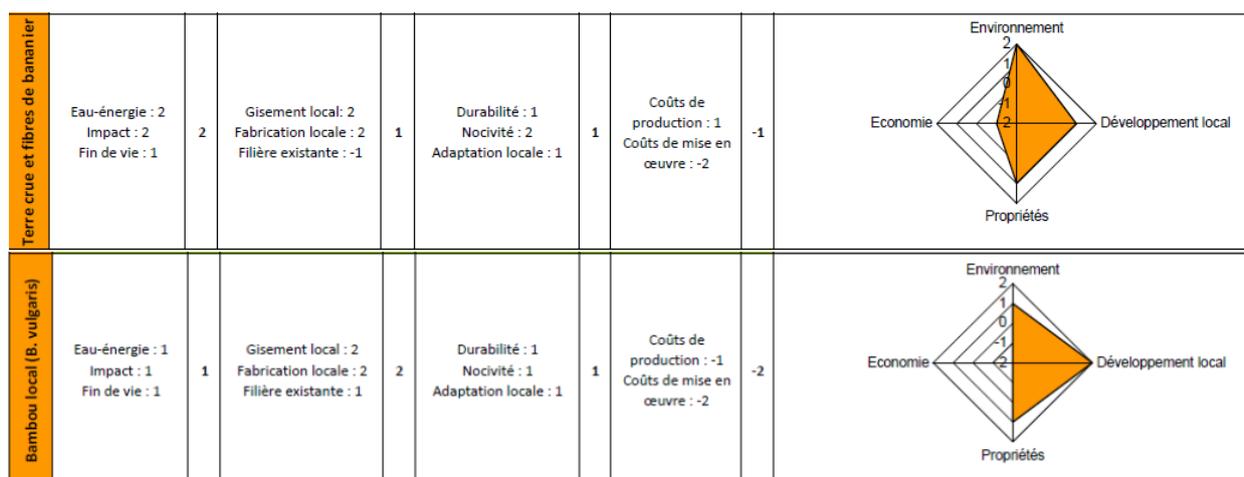


Figure 1: Bilan des potentiels de la terre crue et du bambou selon différents critères. Un résultat positif élevé montre un potentiel fort.

La 2nde phase de cette première étude avait mis l'accent sur les filières de différents matériaux locaux. Ce second rapport, présente dans un premier temps les filières sous un angle systémique, puis en donne une analyse synthétique (forces, faiblesses, opportunités et menaces). Ici, la filière terre crue est présentée à travers des scénarios de développement de Briques de Terre Comprimées (BTC) ou d'Adobes (Les auteurs indiquent que les terres de la poterie des trois îlets n'est pas adapté à la construction terre crue, ce qui est largement réfutable). Sur la filière Bambou, des scénarios de valorisation énergétique, et de valorisation de la chaume en construction sont établis. Sur ces deux filières, les auteurs présentent des tableaux d'analyse relativement équilibrés entre forces et faiblesses. Dans un second temps et au sein de ce même rapport, une étude de faisabilité économique et étude des impacts environnementaux sont présentés. Les différents cas étudiés (adobes, btc, bambou valorisé pour la construction) sont considérés comme viables au bout de 3 ans, et les impacts environnementaux calculés sur les transports et l'énergie de transformation sont faibles :

Matériau	Impact carbone d'un habitat
Adobe	2,2 tonnes de CO ₂
BTC	1,3 tonne de CO ₂
Bambou (<i>vulgaris</i>)	0,04 kg de CO ₂

Au final, cet étude présente ces deux filières comme ayant de forts intérêts environnementaux, mais considère que leurs opportunités de développement ne sont pas aussi importantes comparées aux filières Coco ou Bois de Mahogany par exemple.

Un travail similaire a été réalisé sur le territoire Guadeloupéen, en Octobre 2016, par notre entreprise Karibati et en partenariat avec Caraïbes Environnement [10]. Le panorama des ressources locales avait permis d'identifier les matériaux suivants : Noix de coco, bois local (Mahogany, Cocotier et Pin Maritime), Textile recyclé, Bambou, Sargasse, Bananier et Banane, Canne à sucre et Papier recyclé. Une synthèse de la maturité économique de ces filières vis-à-vis de leur potentiel technique était présenté comme suit (Figure 2) :

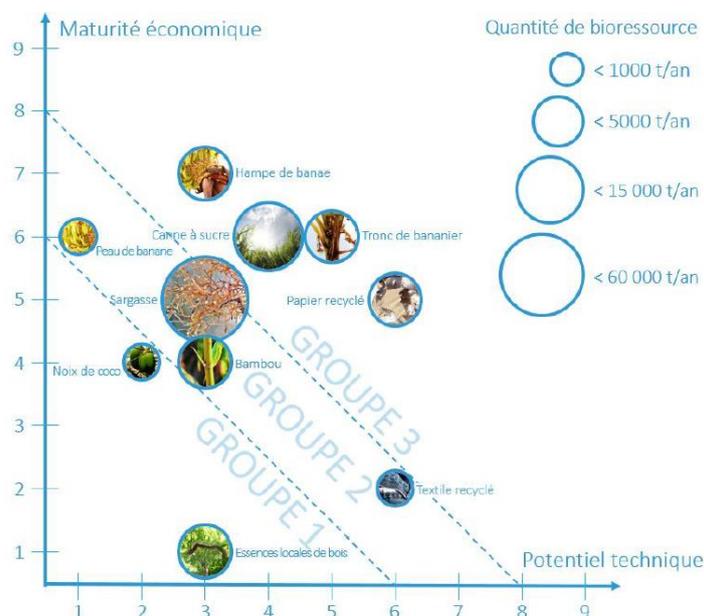


Figure 2: Potentiel technique vs maturité économique de différentes filières en Guadeloupe

Les trois groupes dégagés de l'analyse sont les suivants :

- Groupe 1 : Ressources nécessitant de lever un blocage important avant d'envisager tout développement. Il s'agit généralement d'une problématique liée à la ressource, trop faible et/ou disséminée ;
- Groupe 2 : Ressources dont les développements produits se heurtent avant tout à une problématique technique, les connaissances sur ces produits étant généralement très faibles ;
- Groupe 3 : Ressources pour lesquelles les quantités sont potentiellement suffisantes et facilement accessibles pour envisager des développements et les développements techniques envisageables plutôt porteurs.

Dans cette étude, le bambou est présenté comme ayant une maturité économique intéressante, mais la filière se heurte à des problématiques techniques (notamment les connaissances des caractéristiques des essences locales).

Troisièmement, nous trouvons pour la Guyane un travail très récent réalisé par l'association AQUAA pour le Parc Naturel Régional de Guyane [11]. De la même façon que les autres travaux sur les territoires Antillais, l'idée est de réaliser une analyse des matières disponibles localement, valorisable pour le bâtiment, et de présenter une étude de faisabilité de développement incluant des propositions d'actions pour les acteurs des différentes filières.

Les auteurs proposent d'abord une analyse des matières géo-sourcées présentes sur le territoire :

Sables, Roches dures, Latérites, et Argiles. Ici, l'argile est présentée comme une ressource abondante et facile à exploiter, avec donc un fort potentiel de développement. Concernant les matières biosourcées, issues de l'agriculture, on retrouve : la filière bois et l'ensemble de ces produits (bois et co-produits), noix de coco (bois et fibres), fibres de bananier, Bagasse (co-produit de l'industrie de la canne à sucre), fibres d'ananas, les plumes de canard et la laine de mouton. Pour les matières biosourcées issues des écosystèmes naturels, sont indiqués : La ouate de Kapok, les fibres d'Agave, les sargasses, le bambou et le miscanthus. Enfin sont présentés des matières issues du recyclage, que nous ne détaillerons pas ici.

Dans ce rapport, la terre crue est présentée avec un fort potentiel, notamment du fait de la présence de l'entreprise « la Brique de Guyane » et donc de connaissances importantes sur les BTC. Le bambou ne fait pas ici l'objet d'une étude approfondie sur ces potentiels.

1.2 Contexte et objectif

Les précédentes études menées sur les territoires de Martinique, Guadeloupe et Guyane ont permis de montrer les potentiels des filières terre crue et bambou, dans différentes mesures. Dans tous les cas, on observe que ces matériaux peuvent jouer un rôle dans la réduction de la dépendance de ces territoires à l'importation de matériaux et dans la réduction de l'empreinte carbone du secteur de la construction. La présente étude a pour but de poser les bases d'une réflexion en plusieurs phases sur le « développement des filières terre crue et bambou sur les territoires de Martinique, de Guadeloupe et de Guyane ».

Pour rappel, ces phases sont :

- Etats des lieux des connaissances
- Stratégie de développement
- Matériaux versus impact environnemental
- Restitution

Pour développer l'utilisation de ces matériaux, une analyse fine des territoires et de leurs particularités doit être faite. Considérant que les trois territoires présentés ici sont particulièrement différents (superficie, population, reliefs, nature des sols, état des forêts, histoire, culture constructive, architecture, réglementation...) il n'est pas viable de réaliser cette étude de manière globale.

Ainsi, l'ensemble de l'étude sera basée sur une analyse fine du territoire martiniquais, mais il sera possible de considérer une extension des réflexions aux territoires guadeloupéen et guyanais.

Pour cette première phase, il est question d'atteindre les objectifs suivants :

- Réaliser une étude socio-historique et une étude bibliographique afin d'identifier les pratiques vernaculaires et l'état de l'art des modes constructifs terre crue et bambou.
- Capitaliser les connaissances techniques sur les caractéristiques techniques de ces matériaux.
- Capitaliser les études et retours d'expériences pour la construction en terre crue en milieu tropical humide.
- Identifier le potentiel de ressource locale en bambou et les freins organisationnels, techniques et environnementaux à son développement. Interroger les difficultés d'importation du bambou.
- Identifier des acteurs et initiatives existantes.
- Identifier les freins et limites au développement du recours à ces matériaux.

Le présent document commencera par présenter la méthodologie du travail de recensement des connaissances techniques et scientifiques. Ensuite, les résultats des recherches seront divisés en deux parties distinctes :

- Une Partie sur le bambou, qui détaillera la plante et les espèces à l'étude, puis les phases successives depuis la pousse d'une chaume jusqu'à l'utilisation dans le bâtiment. Les différentes méthodes d'utilisation du bambou en tant que matériau de construction seront présentées, ainsi que leurs caractéristiques techniques en lien, lorsque c'est possible, avec l'espèce de bambou utilisée.
- Une partie sur la terre, qui détaillera les différentes méthodes de mise en œuvre envisageables aux Antilles et en Guyane, ainsi que le lien de ces méthodes avec le contexte socio-historique des territoires. Puis, les caractéristiques techniques de ces solutions constructives sont croisées avec les paramètres propres à la terre crue utilisée en construction.

Dans ces deux parties, nous tenterons d'analyser l'ensemble de ces choix constructifs sous l'angle du cadre réglementaire et assurantiel, des contraintes de mise en œuvre et des coûts de construction.

Enfin, afin de permettre à l'ensemble des lecteurs d'avoir une vue d'ensemble sur des exemples, nous illustrerons notre propos par des projets références.

Méthodologie

Afin d'ancrer l'étude dans un contexte bien concret, une analyse du contexte constructif des Antilles a été menée. Il s'agit principalement de prises d'informations sur les sites officiels (DEAL, sites gouvernementaux, ...).

Par la suite, l'étude socio-historique ainsi que l'étude bibliographique ont principalement été réalisées selon des méthodes de recherches bibliographiques classiques (Figure 3) :

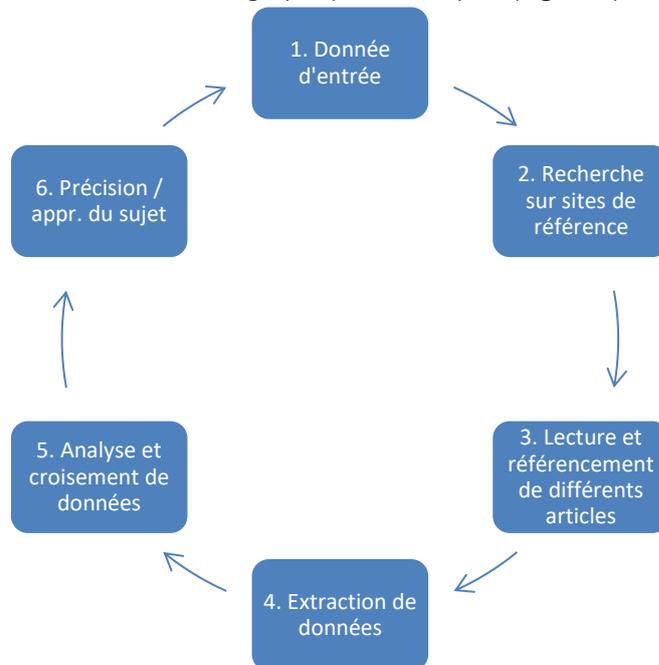


Figure 3: Méthodologie de recherches bibliographique

Nous précisons ci-dessous les différentes étapes :

1. Un sujet, une question à traiter. Par exemple « Quels sont les différents traitements pour améliorer la durabilité du Bambou, et quels sont leurs avantages et inconvénients ? »
2. Les principaux sites utilisés sont Google Scholar, Elsevier, ResearchGate, afin d'avoir des articles validés par des pairs.
3. Les articles sont référencés à l'aide d'un logiciel type Zotero
4. L'extraction de données se fait continuellement, au fur et à mesure de l'avancée des travaux
5. L'analyse se fait aussi continuellement, en lien direct avec les avancées des travaux et surtout les informations obtenues par les personnes rencontrées
6. Les sujets sont approfondis et font l'objet de nouvelles recherches. Par exemple « Quels sont les véritables risques du sel de bore ? »

Les éléments ainsi construits sont mis en perspective avec le contexte constructif local défini au départ.

La pertinence de l'ensemble de l'étude repose sur un ancrage fort au contexte du/des territoire(s). Ainsi, en partenariat avec l'association Kebati et l'Ademe, une liste des acteurs locaux a été dressée. Des entretiens à distance ont été réalisés, et afin de faire ressortir les informations nécessaires à l'étude, un questionnaire a été mis en place.

En mai 2022, Théo Vincelas a eu l'occasion de passer plus de semaines en Martinique. Ce déplacement a permis à la fois de rencontrer directement les personnes concernées par l'étude (demandeurs, partenaires et acteurs des filières en devenir). Ces rencontres ont permis de :

- Tisser un lien, une relation de confiance, important dans le cadre d'un développement de filière qui fait beaucoup appel au développement de relations humaines;
- Identifier les lieux dans lesquels les acteurs œuvrent déjà aujourd'hui, ou souhaitent développer une activité;
- Comprendre le contexte propre à chaque acteur;
- Appréhender les compétences de chacun;
- Entendre les volontés de chacun;
- Apprendre et comparer avec les informations obtenues par la bibliographie;
- Statuer sur les besoins de chacun pour avancer.

La première partie de ce document, dans le cadre de l'étude « Développement des filières terre et bambou sur les territoires de Martinique, de Guadeloupe et de Guyane », utilisera donc l'ensemble de ces informations pour construire un état des lieux des connaissances sur la terre crue et le bambou en tant que matériaux de construction.

Connaissances techniques sur le matériau terre crue

1.3 Conditions locales constructives et climatiques et critères de sélection des techniques

Les solutions constructives pour construire en terre crue sont aujourd'hui nombreuses [12]–[15]. Afin d'avoir un aperçu rapide de l'ensemble de ces techniques, nous plaçons ici (Figure 4) une illustration permettant d'avoir une vue d'ensemble.

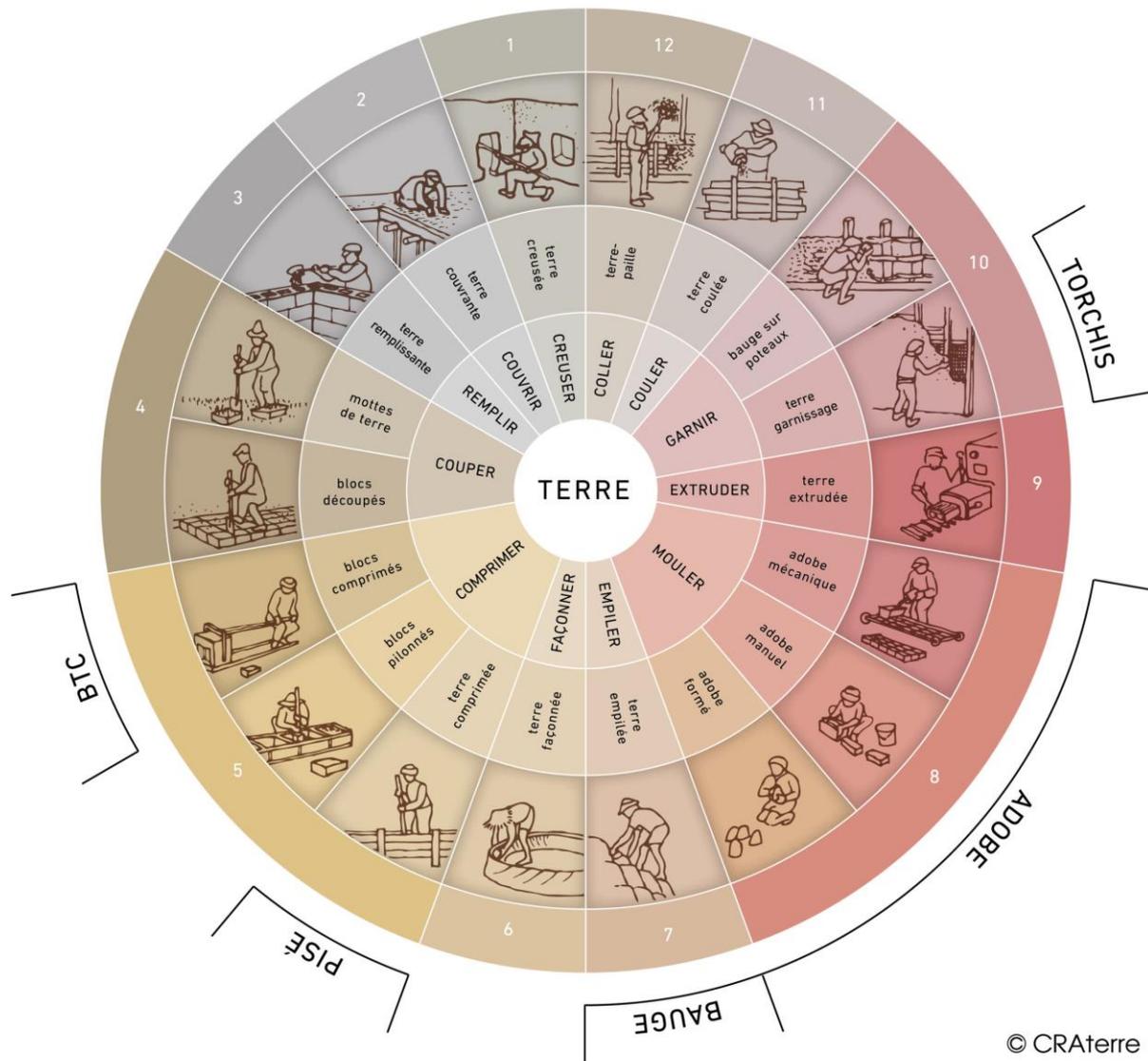
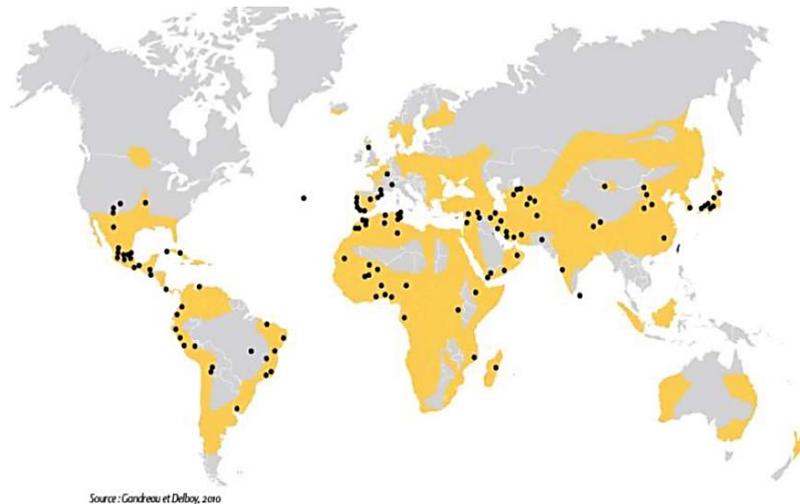


Figure 4: Classement des différentes techniques de construction terre crue selon leur méthode de mise en œuvre

Les procédés de constructions en terre sont très liés aux conditions climatiques et constructives du territoire sur lesquelles elles ont été historiquement développées. On retrouve des techniques constructives dites en voie sèche (teneur en eau faible, inférieure ou proche de l'optimum proctor¹) dans les zones climatiques où le sol n'est jamais saturé en eau ou n'atteint jamais une teneur en eau correspondant à un état plastique². Etant donné que cela correspond aux conditions dans lesquels s'est établi ce projet, nous attacherons premièrement de l'importance à ce type de méthode constructive traditionnelle. Il existe cependant une exception à cette hypothèse : les adobes – briques de terre crue pouvant être additionnée de fibres – sont retrouvées sur des sites de construction dans quasiment toutes les régions du monde [16].



Source : Gondreau et Delbois, 2010

Il paraît nécessaire de prendre en compte également les avancées technologiques des méthodes constructives. Ici, l'état hydrique du sol est moins important, puisque la technologie propose de s'en affranchir. Nous verrons donc aussi dans ce rapport des méthodes constructives récentes, applicables à des projets Antillais ou Guyanais.

Nous résumons les critères de sélections des techniques à étudier dans le tableau suivant :

	Critères climatiques et environnementaux	Critères constructifs
Techniques traditionnelles	<ul style="list-style-type: none"> - Technique par voie sèche, évitant l'utilisation d'une grande quantité d'eau - Technique adaptée aux conditions sismiques et cycloniques - Patrimoine présent en région tropicale, sujette aux séismes 	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en œuvre simple, - Méthode permettant le développement d'une pédagogie autour du matériau terre
Techniques récentes	<ul style="list-style-type: none"> - Technique avec un faible impact environnemental - Technique adaptée aux conditions sismiques et cycloniques - Permettre de maintenir le caractère réversible de la terre crue 	<ul style="list-style-type: none"> - Matériels déjà disponible ou facilement accessible et réparable

¹ L'optimum Proctor est défini en annexe n°xx

² L'état plastique décrit ici correspond à un état hydrique et rhéologique relatif au type de terre. Ces éléments sont détaillés dans l'annexe Limites d'Atterberg.

1.4 Présentation des différents procédés constructifs

De nombreux documents existants présentent les différentes méthodes de construction en terre crue [12]–[15], [17]–[21].

Nous tâcherons ici de présenter brièvement ces techniques. Nous nous attarderons sur leurs liens avec le projet.

1.4.1 Adobes

La technique de construction en adobes est probablement la plus vieille technique de construction en terre crue. On retrouve des constructions en adobes sur quasiment tous les continents, notamment en Afrique du Nord mais aussi subsaharienne, en Amérique du Sud dans des zones particulièrement sujettes aux séismes. Cette technique bénéficie donc d'un patrimoine important. Ce patrimoine est aujourd'hui un matériau d'étude réellement important, puisque les techniques de construction en adobes ont évolué avec l'humanité, et le patrimoine encore présent aujourd'hui témoigne de savoirs-faires permettant d'atteindre une résistance face aux aléas climatiques [22].

On considère les adobes comme ayant ou pouvant avoir, au sein d'un bâti, les fonctions suivantes :

- Capacité porteuse (fabrication de murs porteurs)
- Régulation hygrique (capacité à stocker et redistribuer l'humidité)
- Inertie thermique
- Isolation acoustique (paroi lourde évitant la transmission des bruits aériens)

Le processus de fabrication est relativement simple :

1. Mélange de la terre avec de l'eau et dans de nombreux cas des fibres. L'état hydrique permet une matière plastique facilement modelable.
2. Moulage ou façonnage des briques
3. Démoulage sans temps d'attente
4. Séchage. Cette étape se faisant traditionnellement au sol, au soleil.

Les adobes, une fois secs, sont maçonnés à l'aide d'un mortier composé de la même terre.

Aujourd'hui, cette technique simple permet à la fois une approche pédagogique du matériau terre, puisqu'elle nécessite très peu de matériel, et à la fois de (re)construire facilement des habitats dans des zones sensibles.



Nous considérons aussi comme Adobes les briques extrudées. Ainsi, à travers les briqueteries qui produisent déjà des briques de terre cuite, l'adobe bénéficie d'un renouveau puisqu'il suffit à ces entreprises de ne pas cuire la brique ainsi réalisée. Il s'agit d'ailleurs souvent de la ou des même(s) terre(s), de la même formulation, du même procédé de fabrication mais sans l'étape de cuisson. Ce qui donne à cette technique un avantage fort. L'extrusion est un type de compression qui permet d'atteindre des masses volumiques élevées [23].

A savoir que, ces briques extrudées ne sont pas fibrées. En effet les fibres rendent l'extrusion compliquée, et elles se placeraient toutes dans le même sens, ce qui n'est pas favorable à un comportement mécanique homogène.

1.4.2 BTC

La brique de terre comprimée est une technique relativement récente. Elle serait apparue vers 1950, au cours d'un programme de recherche en Colombie, avec la presse de l'ingénieur Raul Ramirez. Après une évolution internationale, elle serait ensuite arrivée à Mayotte vers 1980 : « *des équipements collectifs ainsi que 20000 logements en BTC, dont la fameuse "case SIM", ont été réalisés par la collaboration entre l'architecte Vincent Liétar, la SIM (Société Immobilière de Mayotte) ainsi que les artisans locaux encouragés et formés par CRAterre et les Compagnons.* » [24].



Figure 5: Sharanam Center for Rural Development - Phase II, Auroville Earth Institute, Inde

Ce procédé a par la suite connu un essor important puisque cette technique est aujourd'hui présente dans de nombreux pays d'Asie, d'Afrique, d'Europe, et d'Amérique du Sud. On retrouve une utilisation importante, et ce depuis bientôt trente ans, en Inde avec l'entreprise Auroville Earth Institute (Figure 5). En France, des acteurs tels que Amaco et Cycle Terre font avancer cette technique fortement et sont d'ailleurs à l'origine de plusieurs opérations récentes.

Cette technique de construction a donc bénéficié d'un développement lié à l'ingénierie et l'architecture moderne.

On considère les BTC comme ayant ou pouvant avoir, au sein d'un bâti, les fonctions suivantes :

- Capacité porteuse (fabrication de murs porteurs)
- Régulation hygrique (capacité à stocker et redistribuer l'humidité)
- Inertie thermique
- Isolation acoustique (paroi lourde évitant la transmission des bruits aériens)

Le processus est le suivant :

1. Préparation/formulation d'une terre avec de l'eau et du sable (si nécessaire). L'état hydrique permet d'obtenir une matière légèrement humide et poudreuse.
2. Mélange est versé dans le bac de compression de la machine prévue
3. Compression (simple ou double en fonction de la machine utilisée)
4. Extraction des briques de la machine
5. Séchage

Les BTC, une fois secs, sont maçonnées à l'aide d'un mortier ayant la même formulation que les briques.

Cette technique simple, permet une approche pédagogique et des constructions dans des zones sensibles.

Plusieurs types de machines existent :

- Manuelles;
- Mécaniques :
 - o Compression d'une ou de plusieurs briques à la fois
 - o Un plateau est en mouvement ou les deux, de manière à obtenir une compression homogène



La presse 'ALTECH GEO 50' (Manuelle)



Auram Press 4000 – Aureka – (Semi-automatique)



Brique Technic Concept (Automatique)

Figure 6: Exemple de presses à BTC. De manuelle à totalement automatique

1.4.3 Pisé

Cette technique fait partie de celles que l'on retrouve dans de nombreux lieux reconnus comme patrimoine historique. On peut citer en exemple : Une partie de la muraille de Chine, les Chuxi Tulou (Chine) - habitats fortifiés collectifs ronds, ou même plusieurs quartiers de la ville de Lyon (Figure 7) dont presque l'ensemble des bâtiments sont en pisé.



Figure 7: Lyon, Quartier Saint Just (à gauche) et Croix-Rousse (à droite), immeubles en pisé,

On considère le pisé comme ayant ou pouvant avoir, au sein d'un bâti, les fonctions suivantes :

- Capacité porteuse (fabrication de murs porteurs)
- Régulation hygrique (capacité à stocker et redistribuer l'humidité)
- Inertie thermique
- Isolation acoustique (paroi lourde évitant la transmission des bruits aériens)

Le pisé est une technique de mise en œuvre de terre crue définie par trois facteurs indissociables :

- Une terre humide, généralement sans éléments végétaux,
- La mise en place de cette terre par couches de hauteur régulière dans un coffrage rigide et stable,
- Un compactage dynamique régulier, ou damage, exercé à l'aide d'un outil manuel ou mécanique.

Traditionnellement, le compactage dynamique était réalisé manuellement, à l'aide d'une bêche auquel est fixé une planche ou un cube de bois taillé. Aujourd'hui, ce procédé fait partie des techniques de construction terre crue les plus utilisées, notamment parce qu'elle a pu être facilement mécanisée :

- Banchage optimisé pour un démontage/remontage rapide
- Fouloir pneumatique qui accélère et augmente la compaction (Figure 8)
- Mélange de la terre et de l'eau réalisable en malaxeur
- Possibilité de préfabriquer le pisé en atelier (Figure 8) ou sur chantier



Figure 8: à gauche, Fouloir pneumatique à pisé, à droite, pisé préfabriqué en atelier. Martin Rauch, Lehm Ton Erde, Autriche.

1.4.4 Béton de terre

Le béton de terre, ou terre coulée, correspond aux résultats d'essais de recherches scientifiques dont le but est de remplacer ou de diminuer l'utilisation de ciment et de granulats de carrière pour les remplacer par la terre crue. Il s'agit donc principalement d'utiliser les connaissances développées autour du béton de ciment et de les appliquer au matériau terre crue. Dans ce contexte, on retrouve donc une réflexion venant de l'ingénierie, avant de venir de l'artisanat, contrairement aux autres techniques de construction en terre crue. Par exemple, on utilise l'optimisation granulaire (Figure 9) pour atteindre une compacité maximale en ajoutant des granulats à la terre dont on dispose.

On considère le béton de terre comme ayant ou pouvant avoir, au sein d'un bâti, les fonctions suivantes :

- Capacité porteuse (fabrication de murs porteurs)
- Inertie thermique
- Isolation acoustique (paroi lourde évitant la transmission des bruits aériens)

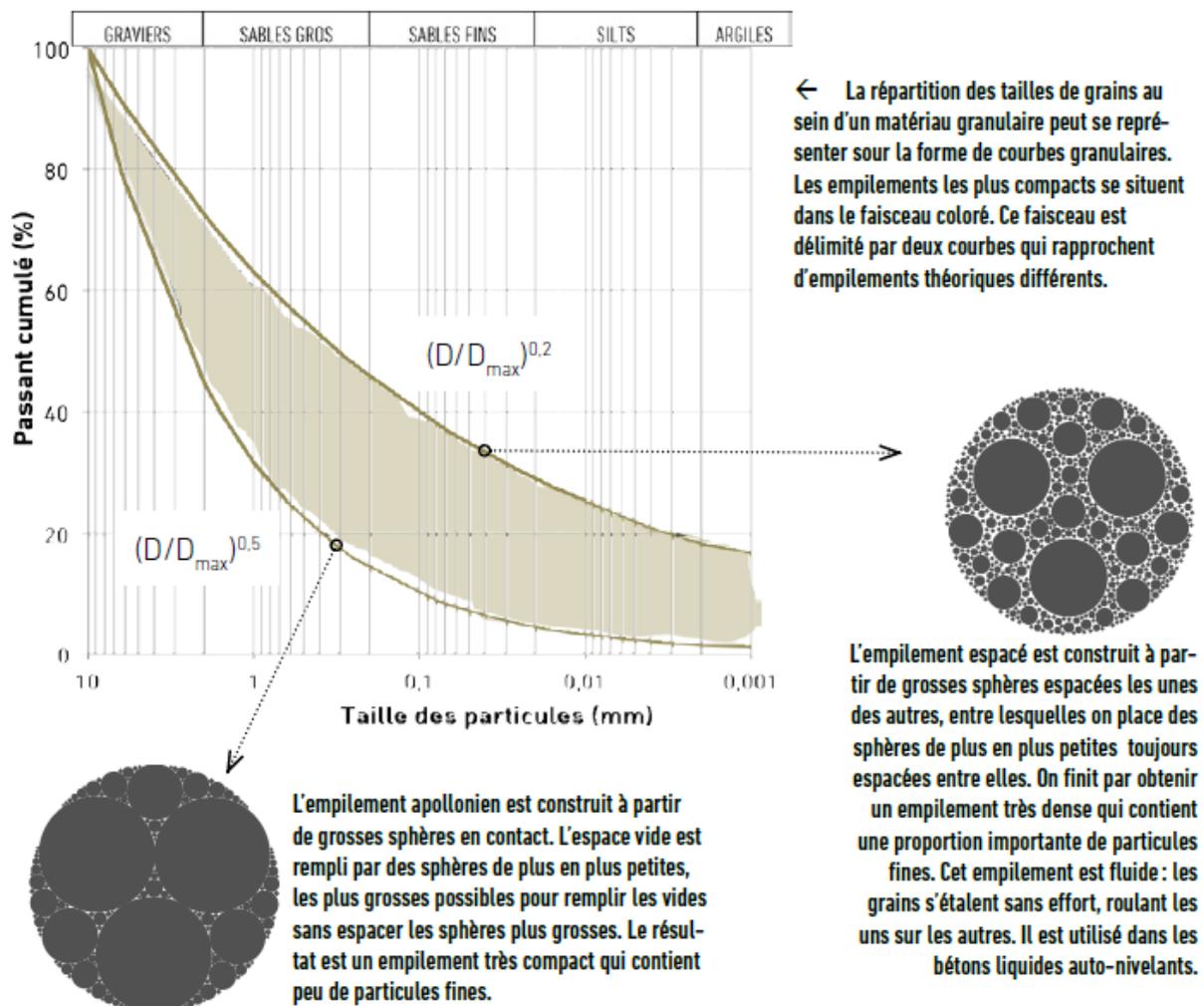


Figure 9: Description de l'optimisation granulaire. (Béton d'argile environnemental, Amaco)

Il y a aussi tout un ensemble de connaissances à utiliser autour de la formulation du béton de terre. En fonction des stabilisants (ciment, chaux, ou autres polymères biosourcés*), des caractéristiques de la terre utilisée, il faut veiller à ce que le mélange soit de rhéologie* adaptée à la mise en œuvre souhaitée. Pour ce faire, comme dans les techniques utilisées en béton de ciment, est utilisé un ou des additifs (type défloculant, comme l'hexamétophosphate de sodium (HMPS)). Enfin, il existe une troisième technique utilisée pour la fabrication des bétons de terre : la géopolymérisation. De la même manière que les polymère organique, que l'on connaît à travers le plastique, il s'agit ici d'utiliser les composés chimiques des minéraux et de les assembler en chaînes grâce à une réaction de géosynthèse (fabrication d'une matière minérale de façon artificielle) [25].

Dans l'ensemble, il convient donc de dire que le béton de terre est une technique à part entière, puisqu'il s'agit plutôt d'utiliser la terre comme un composant parmi d'autres. Aussi, cette technique est présentée comme avantageuse pour le développement de l'utilisation de la terre crue, puisqu'elle permet d'utiliser des méthodes de mise en œuvre déjà bien éprouvée pour le béton.

En revanche cette technique peut présenter des impacts environnementaux importants selon les liants ou adjuvants utilisés. De plus peut se poser la question en fin de vie du bâtiment, du réemploi de la terre .



Figure 10: Mise en œuvre de terre coulée et décoffrage (Construire en terre crue – Terre coulée)

1.4.5 Torchis

Le guide de bonnes pratiques de construction en terre crue propose une définition du torchis intéressante : « Les torchis forment des hourdis* qui remplissent ou garnissent les intervalles d'un pan de bois ou d'une structure. [...] L'objectif est de réaliser une paroi (verticale, horizontale ou oblique) dont le hourdis* est rendu solidaire à la structure porteuse : torchis sur murs, cloisons, planchers, voûtes, rampants, corniches. Ces ouvrages en torchis servent également de supports d'accroche à des enduits éventuels. ».

La Figure 11 (à gauche) présente un exemple de mise en œuvre sur structure porteuse en bois. On retrouve cette technique très ancienne sur de nombreux continents. En Europe, elle est présente au nord, notamment en Normandie où un patrimoine important est observable (Figure 11).

Cette technique, bien que représentant une part importante du patrimoine mondiale en terre crue, ne présente pas aujourd'hui un intérêt important de la part des acteurs de la filière. En effet, en composant de parois extérieures, elle n'est pas toujours adaptée aux exigences de confort actuelles. Ses performances thermiques sont notamment faibles vis-à-vis d'une utilisation en climat froid à tempéré, et l'on ne peut considérer le matériau comme isolant. En revanche, la technique a d'autres avantages (inertie, élasticité, régulation hygrothermique et acoustique) pertinents en climat cyclonique.

On considère donc le torchis comme ayant ou pouvant avoir, au sein d'un bâti, les fonctions suivantes :

- Remplissage de murs à ossature porteuse
- Régulation hygrique (capacité à stocker et redistribuer l'humidité)
- Inertie thermique
- Isolation acoustique (paroi lourde évitant la transmission des bruits aériens)



Figure 11: à gauche, exemple de mise en oeuvre d'un torchis sur ossature bois (<http://fermegessienne.canalblog.com>); à droite, la place du vieux marché à Rouen.

1.4.6 Terre allégée

La terre allégée, est un mélange de terre et d'eau (Figure 12) appelé barbotine, qui est ensuite mélangé à des fibres ou particules végétales. Ce peut être des chènevottes (partie interne de la tige de chanvre – comme présenté en Figure 12).



Figure 12 : à gauche, fabrication de barbotine; à droite, chènevotte (Thèse Théo VINCESLAS [26])

Cette technique peut être considérée comme l'évolution du torchis, puisqu'il s'agit d'une technique non porteuse et qui a pour but d'apporter une isolation thermique du bâtiment. Nous pouvons aussi indiquer qu'elle a évolué conjointement avec ce qui est appelé aujourd'hui béton de chanvre. Dans ce dernier, le

liant des particules n'est pas la terre mais la chaux. Ici, l'utilisation de la terre crue permet donc une réduction de l'impact environnemental [26], et permet l'utilisation de matériaux locaux.

On considère la terre allégée comme ayant ou pouvant avoir, au sein d'un bâti, les fonctions suivantes :

- Remplissage d'un mur à ossature porteuse ou doublage d'un mur existant
- Régulation hygrique (capacité à stocker et redistribuer l'humidité)
- Isolation thermique ou correction thermique
- Inertie thermique
- Traitement acoustique (paroi fortement poreuse évitant les phénomènes de réverbération)

Différentes méthodes de mise en œuvre du terre-chanvre existent aujourd'hui. La Figure 13 présente deux exemples de chantier de terre-chanvre avant finitions. Tout comme le chaux-chanvre, le terre-chanvre peut :

- Être mélangé au moyen d'une bétonnière puis placé et compacté manuellement entre deux parois ;
- Être préfabriqué sous forme de briques puis maçonné à l'aide d'un mortier de terre ;
- Être projeté mécaniquement à l'aide d'une projeteuse.



Figure 13: Exemple de chantier de terre chanvre. Gauche, banchage ; droite, projection. (Crédits A. Hellouin de menibus)

Si le chanvre ou la paille ne sont pas disponibles localement, il est possible d'imaginer le développement de terre allégée utilisant des ressources locales (bagasse, copeaux de bambou, autres...).



Figure 14: Exemple de mise en oeuvre de terre-chanvre projeté en isolation par l'extérieur. Normandie, Eco-Pertica

1.4.7 Enduits et panneau de finition

Il est possible d'utiliser la terre crue comme élément de finition d'une paroi. On peut considérer l'utilisation de la terre crue en enduit comme faisant partie des techniques les plus anciennes. Aussi, on constate une évolution de cette utilisation de la terre puisqu'aujourd'hui, de nombreuses techniques différentes permettent de mettre en œuvre la terre crue en enduit :

- Utilisation de plusieurs couches
 - Couche d'accroche
 - Corps d'enduit
 - Couche de finition
- Formulation avec différents granulats
 - Sable
 - Chanvre
 - Lin
 - Autres ressources disponibles localement
- Formulation avec des huiles
 - Huile de lin
 - Huile de chanvre
- Formulation avec d'autres composés biosourcés
 - Bouse de vache
 - Œuf
 - Lait
 - Macérats (foin, paille, ou autres végétaux)
 - Cendres
- Utilisation de la terre comme pigment.
 - Avec de la chaux comme liant principale
 - En mélange avec d'autres terres



Figure 15: exemple d'enduits en terre crue décoratif (Chantiers Enerterre)

On considère les enduits et les plaques de terre crue comme ayant ou pouvant avoir, au sein d'un bâti, les fonctions suivantes :

- Finition ou support de finition
- Régulation hygrique (capacité à stocker et redistribuer l'humidité)
- Inertie thermique

Les méthodes d'application de l'enduit et de ses différentes couches divergent en fonction des artisans. Il est possible de voir des enduits projetés, mais de manière générale, la couche de finition sera réalisée manuellement.

Nous mettons ici dans la même catégorie une innovation récente : les panneaux de terre crue. Il s'agit ici d'une alternative aux plaques de plâtre employées massivement de nos jours. Ces plaques peuvent être composées de différents éléments, à l'instar des enduits : terre crue, fibres, additifs. Elles peuvent aussi être fabriquées de différentes manières, mais sont la plupart du temps fabriquées par extrusion en usine.

Ces plaques sont ensuite mises en œuvre comme des plaques de finition classique, soit vissées sur des montants alu ou bois.



Figure 16: Exemple de panneau de terre crue extrudé (PANNEAU PLAK ARGILUS)

1.4.8 Points d'attentions

Certains points doivent être portés à l'attention de toute personne souhaitant utiliser ou développer l'utilisation de la terre crue en tant que matériau de construction. Nous indiquons dans ce paragraphe deux points, qui nous paraissent importants à discuter ici. D'autres points pourraient être abordés et la liste n'est pas considérée comme exhaustive.

1.4.8.1 Gestion de l'eau liquide

Il s'agit d'un des points d'attention le plus important lorsque l'on construit en terre crue. La terre seule ne peut être exposée à long terme à de l'eau liquide et chaque technique a une limite de teneur en eau à ne pas dépasser pour rester stable. La Figure 17 présente un exemple de mesure de résistance mécanique à la compression versus la teneur en eau du matériau testé (ici du pisé - [27]). On constate que cette résistance diminue fortement avec l'augmentation de la teneur en eau.

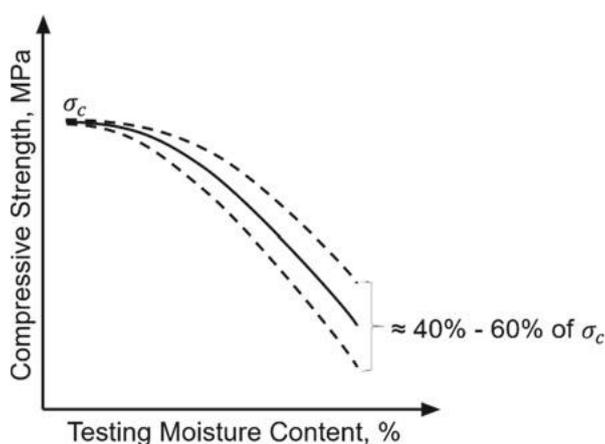
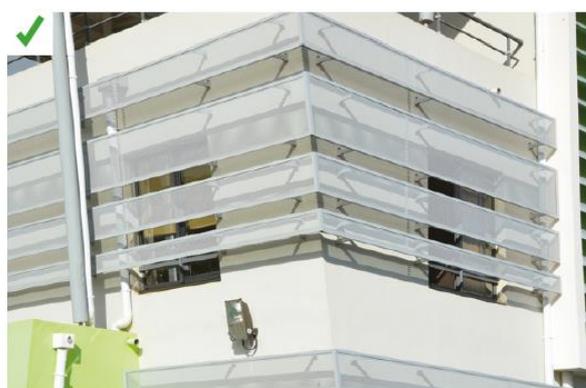


Figure 17: La variation de la résistance à la compression par rapport à la teneur en eau au moment de l'essai.

L'humidité relative de l'air, même élevée, ne suffit pas à atteindre des teneurs en eau élevées critiques au sein d'un matériau terre. En revanche il s'agit de mettre en place ce qui est couramment appelé « *des bonnes bottes et un beau chapeau* », c'est à dire un soubassement et un matériau évitant les remontées capillaires dans les murs et un débord de toiture permettant d'éviter que l'eau de pluie ne ruisselle sur l'ensemble du mur.

Dans un climat sujet aux tempêtes et aux fortes pluies, il s'agit simplement de mettre en place des enduits protecteurs (chaux), ou des éléments type bardage bois (en décalé du mur), permettant d'éviter une pluie battante directement sur le matériau terre.



REX Bâtiment performants antilles (AQC) [28]



Brise soleil extérieure (Marque DUCO)

Figure 18: exemple de bardage extérieur, brise soleil, pouvant aussi réduire les dégâts de pluies torrentielles

En cas de dégâts, après avoir traité la source du problème, la réversibilité de la terre crue (si elle n'est pas empêchée par un adjuvant ou un stabilisant), permet une réparabilité simple et infinie.

1.4.8.2 La stabilisation du matériau

De façon à augmenter la résistance mécanique, mais aussi la durabilité vis-à-vis de l'exposition à l'eau liquide, on constate une utilisation relativement récurrente de stabilisant. Celui-ci peut être de différentes origines, et est classé ici suivant sa récurrence dans les techniques constructives vues plus haut :

- Ciment
- Chaux
- Cendres (bois, volantes)
- Additifs de géopolymérisation
- Biopolymères
 - o Bouse de vache
 - o Œuf
 - o Lait
 - o Algues ou résidu d'algues (alginate)
 - o Tanin
 - o ...

La stabilisation est un sujet de débat au sein des communautés de la recherche scientifique et des acteurs de la filière terre crue. Nous posons ici les différents éléments liés à ce débat :

- **Impact environnemental** : L'ajout de stabilisant, dans le cas notamment du ciment et de la chaux, augmente considérablement l'impact environnemental du matériau ainsi formulé. Sachant que cet ajout doit participer à l'augmentation de la résistance mécanique du produit, on peut mettre en relation l'impact environnemental et la résistance mécanique de différent produit. C'est ce que l'on retrouve dans un article scientifique [29] dont est extrait la Figure 19 ci-après. Ainsi, vis-à-vis de la résistance mécanique, il est convenable de dire qu'elle est augmentée par l'ajout de ciment sans forte augmentation de l'impact environnemental. Cette notion est à relativiser en fonction du système constructif concerné.

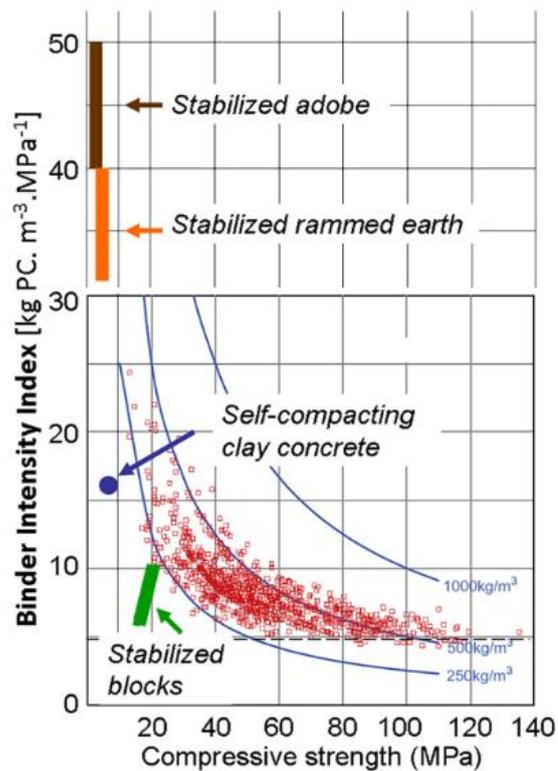


Figure 19: Indice d'intensité de liant des briques de terre (adobe), des blocs de terre comprimée et du pisé stabilisés avec 5 à 10 % de ciment, en comparaison avec les données des bétons de ciment. Est également inclus l'indice du béton d'argile autocompacté

La Figure 20 ci-dessous (source [30]) présente une réflexion similaire : on y retrouve différents systèmes constructifs en terre crue, placés en fonction de la teneur en liant chimique et en énergie grise cumulée sur l'ensemble du cycle de vie. On constate ici que d'une part, l'étude de l'impact dépend de l'échelle considérée (matériau, mur ou bâtiment), mais aussi de nombreux autres facteurs (type de système constructif, type de liant, transport...).

Dans l'ensemble, il faut noter que l'ajout de stabilisant doit être considéré comme fort impactant. Il ne peut être utilisé à haute dose sans conséquences ni pour l'environnement, ni pour le matériau lui-même (modification des performances, non recyclabilité,...)

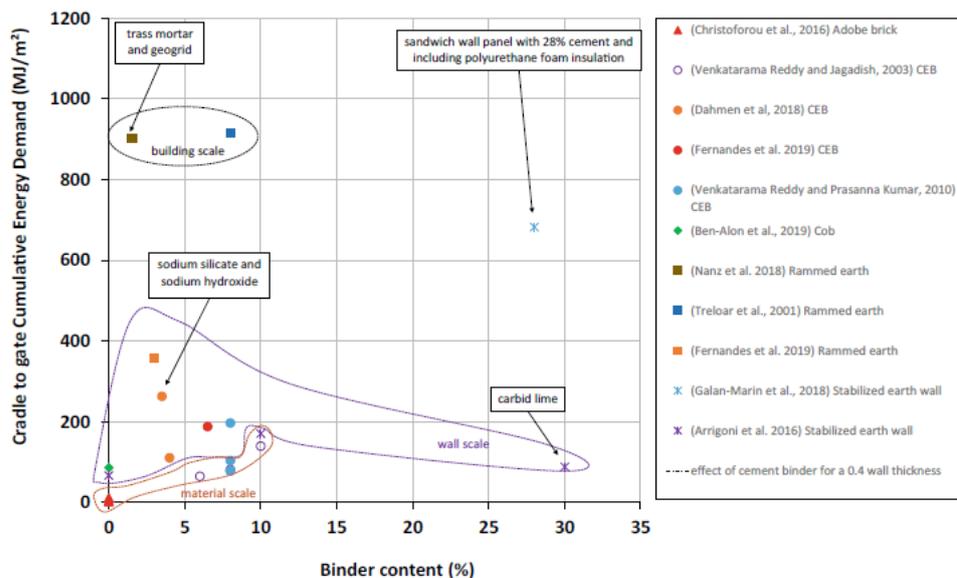


Figure 20: Influence de la teneur en liant sur la demande d'énergie cumulée du berceau à la tombe - la forme est liée à la technique de construction : Cercle = BTC, Carré = Pisé, Diamant = Bauge, * Mur de terre stabilisé, Triangle = Adobe - sauf indication contraire, les liants sont du ciment ou de la chaux.

- **Réversibilité** : L'ajout d'un stabilisant de type ciment ou chaux va, à partir d'un certain taux (souvent autour de 7% en masse) [31], détruire les argiles et leur capacité à se lier entre eux et avec l'eau. Ainsi, une fois ce processus réalisé, il n'est plus possible de réutiliser la terre crue en tant que telle, elle devient alors un granulat inerte.
- **Résistance à l'eau** : la stabilisation a aussi pour but de réduire la sensibilité à l'eau du matériau terre. Ici de nombreuses études scientifiques travaillent sur ce sujet [32], [33], notamment pour proposer des alternatives moins environnementalement impactantes que les ciments ou la chaux. Cependant, l'augmentation de la résistance à l'eau peut aussi réduire les propriétés hygriques de la terre crue [32], [33].
- **Savoir-faire et variabilité** : La terre étant une matière particulièrement variable, il n'est pas évident, de prime abord, de savoir la mettre en œuvre. Dans ce contexte, il paraît nécessaire de mentionner l'important savoir-faire développé par les artisans travaillant la terre crue. Ce savoir-faire va, dans de nombreux cas, permettre :
 - 1/Une mise en œuvre performante en réponse aux potentiels dégâts qui peuvent être causés au matériau ;
 - 2/Une formulation adaptée aux caractéristiques de la terre disponible.
 Ainsi utilisé, un stabilisant est une manière de s'affranchir d'une connaissance pointue de la matière, en l'utilisant seulement comme un granulat, à la manière d'un béton [34], [35]. Dans ce sens, certains acteurs poussent donc à la stabilisation.
- **Transport des matériaux** : Dans le cas de matériaux préfabriqués à transporter, il peut paraître intéressant d'utiliser la stabilisation pour augmenter la résistance des briques en surface. Cet argument est utilisé dans le cadre des BTC, qui, sans stabilisant, peuvent être fragiles au niveau des arrêtes.

- **Calculs et dimensionnement des constructions** : Aujourd'hui, il n'existe pas encore de réglementation complète et appropriée aux différentes techniques de construction terre. Les bureaux de contrôle vont donc souvent utiliser des coefficients de sécurité particulièrement élevés (béton = 1,5, acier = 1,15, terre = 5 [36] pour $R_c = \frac{R_m}{\gamma}$ avec R la résistance mécanique utilisée dans le calcul de dimensionnement, R_m la résistance mesurée et γ le coefficient de sécurité). Cette pratique pousse aussi à la stabilisation pour éviter de se retrouver avec des murs d'épaisseurs trop importante.

1.5 Caractéristiques techniques

1.5.1 Mécaniques

Le comportement mécanique des matériaux de construction en terre, et par extension des ouvrages en terre crue, dépend directement et premièrement du type de terre utilisé. Ensuite, il est important de rappeler que le principal, voir l'unique liant de ces matériaux est l'argile. Ou plutôt l'interaction à l'échelle nanoscopique entre l'air, l'eau et l'argile. Les particules fines de la terre se lient grâce au phénomène de capillarité³. Cette attraction entre les particules est mesurable en recherchant la succion⁴. Ainsi, on parle plutôt de comportement **hygromécanique**, puisque la réaction du matériau ou de la structure à des contraintes mécaniques sera aussi directement lié à l'eau présente au sein de la matière. Pour finir, tout matériau a une résistance mécanique grandement liée à sa masse volumique.

Ces trois principaux paramètres (type de terre, teneur en eau et masse volumique) permettent d'observer et d'interpréter le comportement hygromécanique d'un matériau de construction en terre crue. De ces paramètres en découlent d'autres qui influenceront les premiers : technique de construction employée, process de transformation et/ou de mise en œuvre, formulations...

Les Figure 21 et Figure 22 décrivent dans l'ordre, les masses volumiques puis les résistances mécaniques en compression verticale des différentes techniques en construction terre. Ne sont pas comprises ici les BTC, dont on trouvera une masse volumique entre de 1700 à 2000 kg/m³ et une résistance à la compression verticale entre 1 et 3,5 MPa [37] dans une étude issue de travaux sénégalais. Cycle Terre, fabricant de matériaux terre à Sevrans, propose des BTC et BTCs (non stabilisées, ou stabilisées au ciment portland). Nous présentons les caractéristiques de leur BTCs directement issues de la fiche technique fabricant en figure 23.

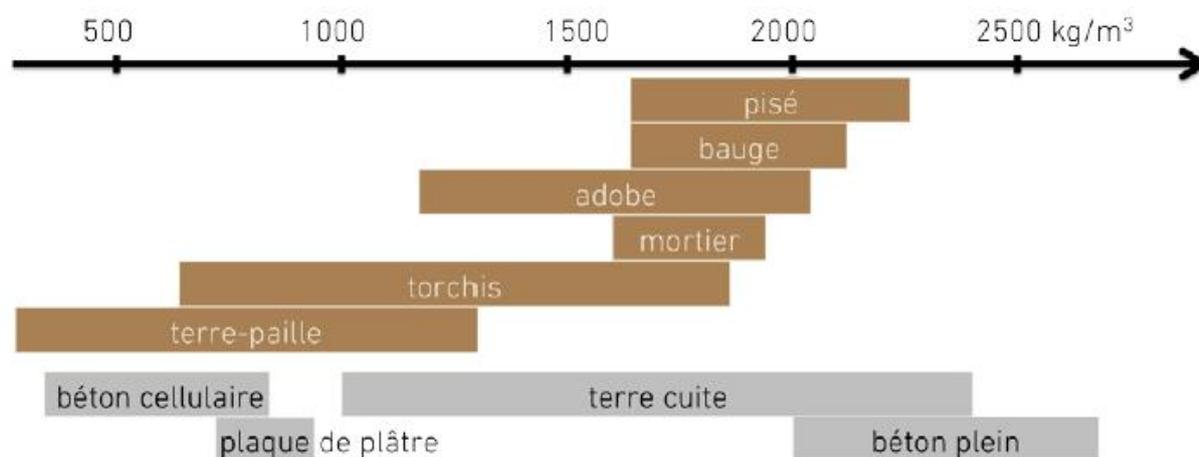


Figure 21: Représentation graphique d'une comparaison des masses volumiques de différentes techniques en construction terre crue (Source : Béton Argile Environnemental – Amaco)

³ La capillarité est phénomène connu, il est notamment observable dans un sucre en contact avec un liquide, ou pour un bâtiment ancien en bas des murs en contact direct avec le sol. Le phénomène est détaillé en annexe.

⁴ La succion représente la pression négative au sein d'un matériau, décrivant ainsi directement l'attraction entre les particules de ce matériau.

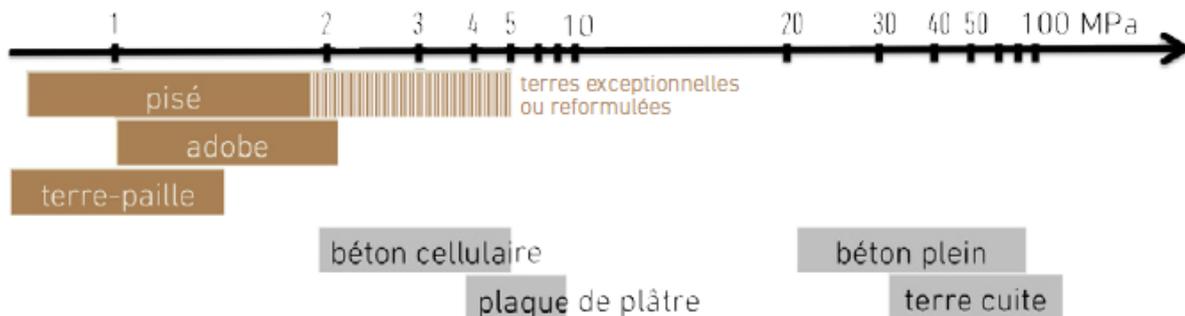


Figure 22: Représentation graphique d'une comparaison des résistances à la compression simple de différentes techniques en construction terre crue (Source : Béton Argile Environnemental – Amaco)

MÉCANIQUES		Symbole	BTC 20	BTC 40	BTC 60
Masse volumique		ρ	1900 kg/m ³ (de 1800 à 2100 kg/m ³)		
Résistance moyenne à la compression du bloc		f_b	2 MPa	4 MPa	6 MPa
Résistance moyenne à la traction du bloc		f_{btm}	0,2 MPa	0,4 MPa	0,6 MPa
Cisaillement (G = 0,4.E)		G	0,6 GPa	1 GPa	1,6 GPa
Module de Young		E	1,5 GPa	2,5 GPa	4 GPa *
Coefficient de Poisson		ν	0,2	0,25	0,3
Résistance au cisaillement de la maçonnerie à l'origine		f_{vko}	0,10 Mpa	0,10 Mpa	0,10 Mpa
Coefficient de fluage ultime		ϕ_c	2 à 3	2 à 3	2 à 3
Retrait/gonflement à l'humidité ou à long terme			-0,45 à +0,3 mm/m	-0,45 à +0,3 mm/m	-0,45 à +0,3 mm/m
Coefficient de dilatation thermique			$9 \cdot 10^{-5}/K$	$9 \cdot 10^{-5}/K$	$9 \cdot 10^{-5}/K$
HYDRIQUES					
Teneur en eau massique			1 % (pouvant usuellement varier entre 0,5 et 2%)		

Figure 23: Caractéristiques techniques des BTCs de Cycle Terre (Sevrans). Tableau directement issu de la fiche technique fabricant.

De manière générale, on parle en premier lieu de résistance à la compression verticale lorsque l'on parle du comportement mécanique des matériaux de construction. Mais il est important de rappeler l'ensemble des paramètres qu'il est nécessaire de mesurer pour avoir une vue d'ensemble complète sur le comportement mécanique d'un matériau. Notamment nécessaire de les avoir si l'on souhaite pouvoir calculer et modéliser le comportement d'une structure. On retrouve certains de ces éléments dans le tableau de cycle terre présenté ci-dessus.

Pour considérer le caractère sensible à l'eau de la résistance en compression, il est possible de prendre en compte un coefficient de sécurité fonction de l'exposition du matériau. Pour les adobes, un calcul est préconisé dans le Guide de Bonnes Pratiques [12].

« La résistance à la compression du mur en briques de terre crue R_{dcw} peut être obtenue à partir de :

- L'équation (1.1), pour la maçonnerie montée avec du mortier de joints d'épaisseur comprise entre 5 et 8mm ;
- L'équation (1.2), pour la maçonnerie montée avec du mortier de joints d'épaisseur comprise entre 8mm et 20mm

$$R_{dcw} = (R_{d_{cbs}}^{0,8} \times R_{d_{cm}}^{0,2}) / \gamma_{HR} \quad (1.1)$$

$$Rd_{cw} = (Rd_{cbs}^{0,8} \times 0,8 \times Rd_{cm}^{0,2}) / \gamma_{HR} \quad (1.2)$$

Où

- Rd_{cbs} = résistance à la compression des briques sèches
- Rd_{cm} = résistance à la compression du mortier
- γ_{HR} = coefficient d'évolution hygro-mécanique

Il est aussi à noter que la terre allégée est principalement utilisée pour ses qualités d'isolation, de perméabilité à la vapeur d'eau et son faible impact environnemental. Elle n'est pas destinée à jouer un rôle porteur et doit surtout supporter son propre poids. Dans ce cadre, il est possible d'estimer un ordre de grandeur de contrainte que le matériau subit : pour une terre allégée banchée de masse volumique comprise entre 250 kg.m⁻³ et 400 kg.m⁻³, et réalisée sur une hauteur de 4 m, la contrainte maximale en bas du mur varie seulement entre 10 et 16 kPa. A titre de comparaison, la **Figure 24** indique les différentes performances à atteindre pour les mélanges chaux-chanvre, en fonction des applications possibles, selon les règles professionnelles de Construire En Chanvre [38]. Pour une application murale, les recommandations indiquent une résistance mécanique à la compression minimum de 200 kPa [38]. Ce qui représente un facteur 10 entre la contrainte réellement présente et la résistance mécanique du matériau. Malgré la nécessité d'appliquer un coefficient de sécurité pour parer aux éventuels phénomènes dégradant la résistance mécanique du matériau (fluage, fatigue, vieillissement), cet écart est important et largement supérieur aux coefficients de sécurité présents dans les normes des matériaux conventionnels de construction.

MUR	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression* (MPa)
Valeur seuil (minimum) en condition standard	>15 MPa	>0,2 MPa
TOIT	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression* (MPa)
Valeur seuil (minimum) en condition standard	>3 MPa	>0,05 MPa
ENDUIT	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression* (MPa)
Valeur seuil (minimum) en condition standard	>20 MPa	>0,3 MPa

Figure 24 : Caractéristiques mécaniques seuils pour les mélanges chaux-chanvre selon les règles de Construire en chanvre.

1.5.2 Hygrothermiques

De la même façon que pour les caractéristiques liées au comportement mécanique d'un matériau de construction à base de terre crue, le comportement thermique et le comportement hygrique (lié à la vapeur d'eau) sont directement liés. On parle ainsi de comportement hygrothermique, du fait que les matériaux à base de terre permettent à la fois une certaine gestion de l'humidité et de la chaleur au sein d'un bâtiment.

Pour parler de ces phénomènes, nous présentons rapidement ici quelques notions élémentaires permettant d'aborder les apports du matériau terre crue pour le confort d'un bâtiment.

1.5.2.1 Conductivité thermique et teneur en eau

Premièrement, nous avons vu que l'eau est un élément participant à la liaison des particules de la terre. Il y a donc un phénomène d'augmentation potentielle de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau de la terre. Ce phénomène est étudié par différents scientifiques [39], et aussi appliqué au matériau Pisé [40]. Ce dernier article montre que la variabilité de l'humidité relative intérieure et extérieure d'un habitat n'engendre qu'une faible variation de la teneur en eau et donc de la conductivité thermique du mur de Pisé. Ces éléments sont reportés dans les courbes présentées en Figure 25.

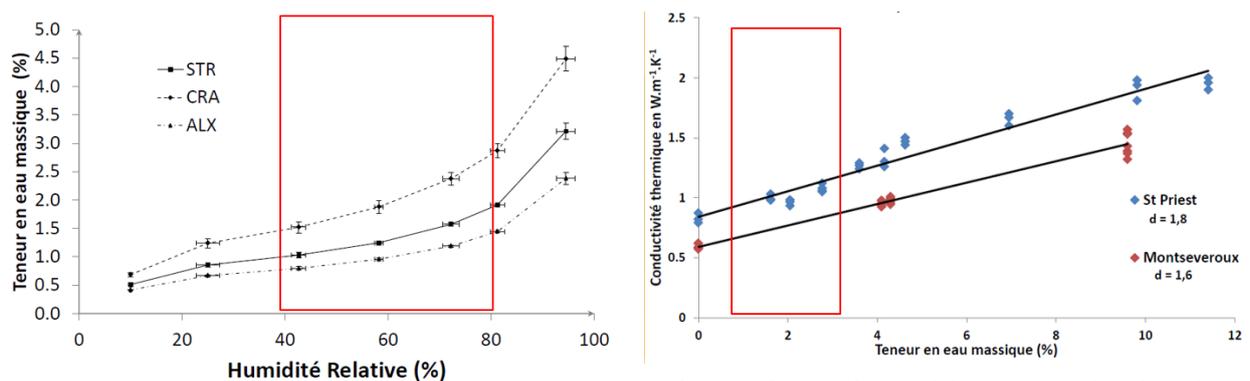


Figure 25: Teneur en eau en fonction de l'humidité relative d'un mur de pisé (gauche) et conductivité thermique en fonction de la teneur en eau d'un mur en pisé (droite)

1.5.2.2 Changement de phase

L'eau est un matériau à changement de phase, c'est-à-dire qu'elle passe de l'état liquide à gazeux en fonction des conditions de température et de pression. Or, les faibles quantités d'eau stockées au sein du matériau terre, et les conditions dans lesquelles évoluent cette eau, permettent d'observer assez clairement un phénomène de « climatisation naturelle » [41]. La Figure 26 présente rapidement ce phénomène : Lorsque de fortes températures sont observées en extérieur, l'énergie du flux de chaleur traversant le mur est au fur et à mesure consommée par l'évaporation de l'eau (le changement de la phase liquide à gazeuse). De cette manière, l'intérieur de l'habitat subit beaucoup moins d'augmentation de température. Dans le même temps se crée un gradient d'humidité relative au sein du mur : les fortes températures tendent à faire évaporer l'eau en surface du mur, la vapeur d'eau est ainsi « attirée » de l'intérieur vers l'extérieur à travers le mur de terre crue.

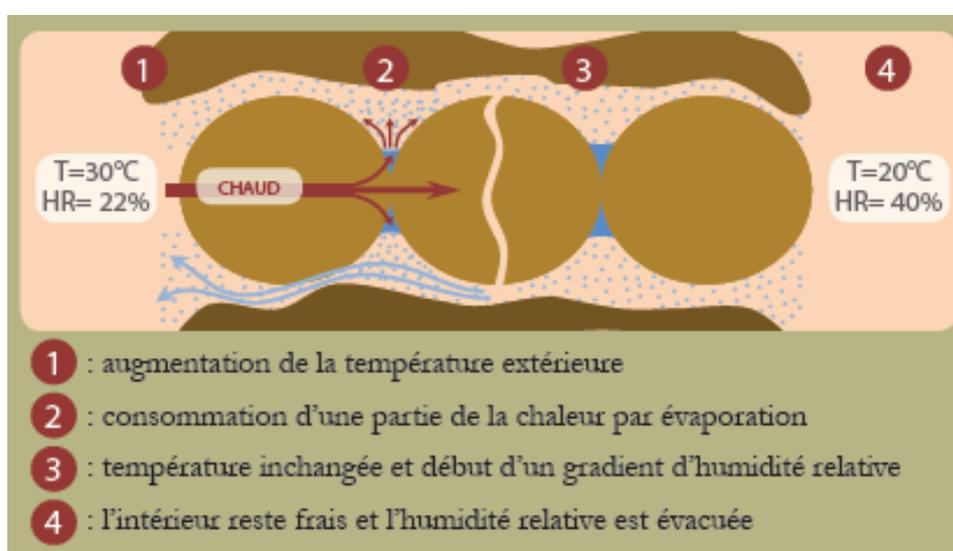


Figure 26: Détail du phénomène de "climatisation" offert par la présence d'eau dans le matériau terre crue

1.5.2.3 Récapitulatif

Le tableau ci-dessous présente de manière non exhaustive les différentes données que l'on peut trouver dans la littérature scientifique sur les caractéristiques hygrothermiques des matériaux terre crue à l'étude ici. Nous ne plaçons pas dans ce tableau les caractéristiques du béton de terre. En effet, pour ces questions hygrothermiques, nous pouvons considérer le béton de ciment et le béton de terre très proche, notamment du fait (souvent) de la forte présence de stabilisants (ciment et/ou chaux).

Propriété		Conductivité thermique	Chaleur spécifique ou capacité thermique massique	Capacité thermique volumique	Diffusivité	Effusivité	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau	Coefficient d'absorption d'eau	
Symbole		Λ	c	Pc	D	E	μ	w	
Unité		W.m-1.K-1	J.kg-1.K-1	Wh.m-3.K-1	$\times 10(6)m^2.s-1$	Wh(0.5).m-2.K-1	Sans unité	kg.m-1.h(0.5)	
Pisé	Valeurs courantes	Min	0,46	1000	500	0,25	15	4	6
		Max	0,81	1500	900	0,27	27	10	13
	Source bibliographique		ACSCNI, Analyse et caractérisation des systèmes constructifs non industrialisés, rapport		Oliva la construction écologique		Oliva la construction écologique	Rölhen construire en terre crue	
Adobes	Valeurs courantes	Min	0,4	1000	400	0,22	12	5	6
		Max	0,6	1500	750	0,28	21	10	13
	Source bibliographique		1	12	GDBP	GDBP	GDBP	12	12
BTC	Valeurs courantes	Min	0,8	800				15	≤ 0.7
		Max							
	Source bibliographique		[42]	[42]				[42]	[42]
BTCs	Valeurs courantes	Min	0.69	988				7	≤ 0.7
		Max	0.85	1170				15	
	Source bibliographique		[37]	[37]				[37], [42]	[42]
Terre allégée	Valeurs courantes	Min	0.055	900				2,9	0.031
		Max	0.18	1666				7,1	0.135
	Source bibliographique		[26]	[26]				[26]	[26]

1.5.3 Acoustiques

Nous retrouvons dans les propriétés acoustiques des matériaux principalement deux fonctions :

- Isoler acoustiquement, entre deux pièces ou entre un intérieur et l'extérieur. Cette fonction est traduite par l'indice d'affaiblissement acoustique
- Amortir acoustiquement, au sein d'une pièce, pour éviter le phénomène de réverbération

Un troisième phénomène peut être observée lors de projet de construction : les sons transmis par les parois (souvent appelé bruits solidiens). Il s'agira donc de la capacité d'un matériau à retransmettre directement les bruits de contacts. Ce phénomène est majoritairement contré dans la phase de conception d'un bâtiment et est grandement lié aux systèmes constructifs employés. Nous n'évoquerons donc pas cette propriété ici.

Premièrement, sur la propriété d'isolation acoustique, nous pouvons évoquer deux choses :

- 1) Le complexe mural (composition du mur) joue le premier rôle. Si sa décomposition correspond au concept appelé masse-ressort-masse (d'un côté à l'autre de la parois, il faut un matériau lourd et dense, puis un matériau léger et « acoustiquement élastique », puis de nouveau un matériau lourd et dense). Dans ce cadre, la plupart des matériaux terre crue peuvent jouer le rôle de masse.
- 2) Plus un matériau est lourd – dense – plus il atténuera la transmission d'onde acoustique. Ainsi, les parois type béton, pierres ou briques sont reconnues pour cette propriété. Avec la terre crue, on retrouve aussi cette propriété. D. Gallipoli présente dans un article scientifique [43] une relation directe entre la masse volumique d'une paroi mono-matériau, son épaisseur et l'indice d'affaiblissement acoustique qui en découle. Nous le citons directement dans l'extrait suivant :

« Les murs en terre présentent d'excellentes propriétés acoustiques en raison de leur densité sèche et de leur épaisseur élevées, généralement supérieures à 2000 kg/m³ et 0,25 m, respectivement. D'après la norme britannique 8233 [8], l'indice d'affaiblissement acoustique R (dB) d'un mur de maçonnerie ordinaire dépend de sa densité sèche, ρ (kg/m³) et de son épaisseur, t (m) comme suit :

$$R = 21,65 \log(\rho t) - 2,3$$

L'équation prédit qu'un mur en terre d'une épaisseur de 0,30 m et d'une densité sèche de 2100 kg/m³ a un indice d'affaiblissement acoustique relativement élevé de 58,3 dB. A titre de comparaison, les règles de construction britanniques [6] spécifient que l'indice d'affaiblissement acoustique des murs intérieurs et des sols dans les pièces à usage d'habitation doit être d'au moins 40 dB. »

Deuxièmement, les propriétés d'amortissement acoustique sont majoritairement liées à la porosité de surface du matériau composant la finition [44]. Ainsi, peu importe le matériau composant cette finition, c'est la taille et la répartition des porosités en surface qui donnera le comportement acoustique d'amortissement.

La plupart des systèmes constructifs terre crue, s'ils ne sont pas recouvert d'enduit, ont une rugosité de surface plus ou moins importante occasionnant des amortissements intéressants [45].

Les meilleurs propriétés d'amortissement de matériaux terre sont obtenues avec la terre allégée, non recouverte ou seulement recouverte d'une couche de barbotine (mélange terre + eau) [44] : α compris entre 0,6 et 1 pour un mélange de masse volumique inférieure à 375 kg/m³.

1.5.4 Sécurité incendie

Les éléments de cette partie, lorsque placés entre guillemets, sont majoritairement issus du guide de bonnes pratiques de la construction en terre crue [12].

« D'un point de vue réglementaire, selon les normes européennes en vigueur, le comportement au feu de la terre comprend sa caractérisation en réaction au feu et en résistance au feu. La réaction au feu concerne essentiellement la combustibilité du matériau employé : terre fibrée ou non, stabilisée ou non. La résistance au feu porte sur la capacité des ouvrages à maintenir leur fonction porteuse et séparatrice entre locaux quand ils sont exposés à un feu conventionnel pendant un temps donné. Cela dépendra de la qualité des matériaux de l'ouvrage, de son épaisseur, de son élancement et des conditions des bords. »

1.5.4.1 Réaction au feu

« De par son caractère minéral, la terre est incombustible, classée conventionnellement A1 (M0), sans nécessité d'essai préalable, dans la même catégorie que la pierre, les produits céramiques, etc. Pour les masses volumiques inférieures à 1400 kg.m⁻³, c'est-à-dire pour les matériaux contenant plus de 3% de fibres, des essais en laboratoire à l'échelle matériau montrent que la terre ainsi fibrée reste incombustible. »

1.5.4.2 Résistance au feu

1.5.4.2.1 Stabilité au feu (Critère R)

Sur l'ensemble des chantiers ayant pris feu, aucune pathologie grave n'a été constatée, a fortiori aucune ruine. Ainsi, nous avons observé que les propriétés porteuses de la terre se conservent pendant 2h minimum. Des rapports d'experts attestent ces observations et sont disponibles sur demande à l'adresse gbp@conf-terrecrue.org.

1.5.4.2.2 Etanchéité aux flammes et aux fumées (Critère E)

Pour les éléments porteurs, l'étanchéité aux flammes et aux fumées est assurée en partie par le caractère incombustible du matériau. De plus, il a été constaté par des experts et des chercheurs qu'une croûte protectrice se forme liée à la cuisson de la couche superficielle. Contrairement aux matériaux cimentaires, le phénomène d'écaillage (effritement de la surface par éclatement lié à des surpressions de vapeur d'eau) n'est pas constaté.

1.5.4.2.3 Isolation thermique (Critère I)

Au-delà de 350 °C, la porosité augmente pour les terres fibrées, et de façon moins marquée pour les terres non fibrées, celles-ci contenant déjà naturellement une partie de matériaux organiques. Dans les deux cas, ces matériaux se décomposent. Un réseau poreux se développe et contribue à favoriser l'isolation thermique. Ce phénomène explique aussi en partie les bonnes propriétés thermomécaniques liées à la stabilité au feu.

1.5.5 Sismiques

Dû à de nombreux facteurs techniques et historiques (manque de connaissances techniques, image désuète, cultures constructives, ...), les méthodes constructives en terre crue ont été délaissées par peur d'une possible faiblesse en résistance au cisaillement (solicitation que l'on retrouve lors de séisme).

Dans ce contexte, plusieurs axes peuvent être évoqués :

1.5.5.1 Observation du patrimoine terre

Ici, l'idée est de croiser les données entre territoires soumis à de forts séismes et territoires dans lesquels on peut trouver, encore aujourd'hui, du patrimoine bâti en terre. La thèse d'architecture intitulée « *Cultures constructives vernaculaires et résilience : entre savoir, pratique et technique : appréhender le vernaculaire en tant que génie du lieu et génie parasinistre* » d'Annalisa Caimi, portent notamment sur ce sujet. On y retrouve notamment la carte présentée ci-dessous [46]:



Figure 27: croisement des séismes et cyclones avec différentes techniques constructives en terre crue.

On constate ici rapidement qu'un important patrimoine en terre crue est présent sur de nombreux territoires fortement sinistrés (cyclone et séismes), et ce patrimoine est encore présent aujourd'hui, malgré ces fortes sollicitations.

Dans cette même thèse, l'auteur présente des illustrations de ville avec différentes typologies de bâtiments ayant subi des séismes.



Effets des séismes : a) Turquie 1999, construction vernaculaire faiblement endommagée à côté d'un bâtiment en béton armé effondré (source: DOĞANGÜN, TULUK, LİVAOĞLU, et al.) ; b) El Salvador 2001, détachement des enduits (crédits: A. Douline); c) Pakistan 2005, chute d'une portion de remplissage (crédits: T. Schacher)

1.5.5.2 Littérature scientifique

De nombreux articles traitent du comportement au séismes d'architectures en terre [47]–[50]. On retrouve par exemple des articles analysant le patrimoine et son comportement avec des essais de terrain et de la modélisation [50]. Dans cet article, il s'agit d'étudier d'un bâtiment religieux du 17^{ème} siècle, dans la région de Cusco, au Pérou. En résumé, ce bâtiment a subi plusieurs séismes. L'étude montre les points faibles structurels par observation directe et simulation numérique et il en ressort des voies d'amélioration possible, correspondant à des techniques constructives inexistante de l'époque (ex: Chaînage). De cette manière, l'auteur montre qu'il suffit d'adapter les techniques anciennes aux nouvelles (ajout d'un chaînage) pour répondre aux contraintes mécaniques locale. De ce fait, il paraît possible de dimensionner les murs pour qu'ils résistent aux séismes.

1.5.5.3 Réponse architecturale

De manière générale, la réponse comportementale d'un bâtiment à un séisme dépend en premier lieu de sa forme architecturale. Le ou les matériaux composants ce bâtiment viennent ensuite. L'explication claire de ce concept est retrouvée dans de nombreux documents, notamment un document de la DREAL intitulé « Guide de construction parasismique pour les maisons individuelles en Martinique » [51].



Fig. 1 Kuño Tambo church: (a) aerial view; (b) 3D CAD model.

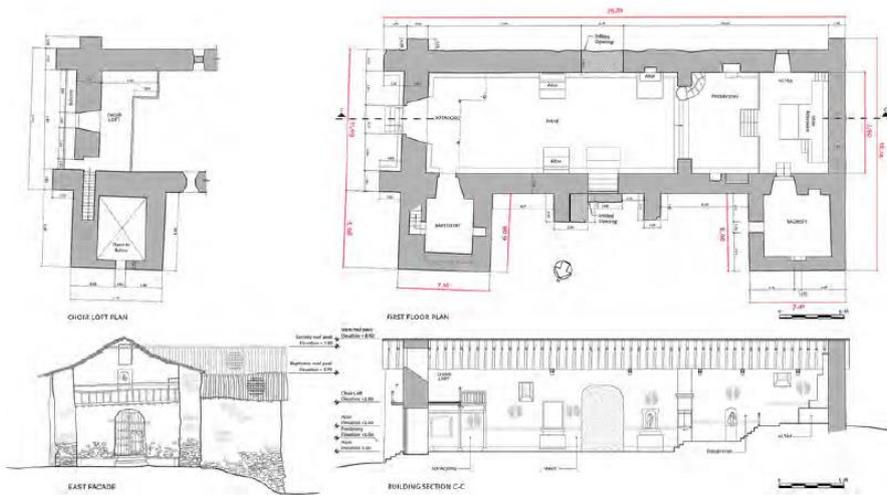


Figure 28: éléments issu de l'article scientifique cité [50]

1.6 Cadre normatif et assurantiel

Pour évoquer le cadre réglementaire propre à la construction terre, nous souhaitons d'abord clarifier la définition du cadre réglementaire de la construction de manière générale.

Les assureurs travaillant pour le secteur de la construction opèrent une distinction entre les « **travaux de technique courante** », normalement garantis par les contrats et les « **travaux de technique non courante** » qui nécessitent une déclaration préalable.

Il s'agit d'une notion contractuelle qui ne recouvre pas obligatoirement la distinction domaine traditionnel / domaine non traditionnel (voir tableau ci-dessous).

Technique courante	Technique non courante
Travaux traditionnels auxquels il est fait référence dans les DTU et les normes	Procédés relevant d'une ETN
Travaux réalisés conformément à des règles professionnelles acceptées par la C2P	Travaux réalisés selon des règles professionnelles non acceptées par la C2P
Procédés régis par les ATec et ATEEx en cours de validité et non mis en observation par la C2P	Procédés sous ATec mis en observation ou sous ATEEx réservé ou défavorable

(Acronymes : DTU = Documents Techniques Unifiés ; ETN = Enquête Technique Nouvelle ; C2P = Commission Prévention Produit ; ATec = Avis Technique ; ATEEx = Avis Technique d'Expérimentation)

L'agence Qualité Construction (AQC) résume ce cadre réglementaire et assurantiel dans la Figure 29.

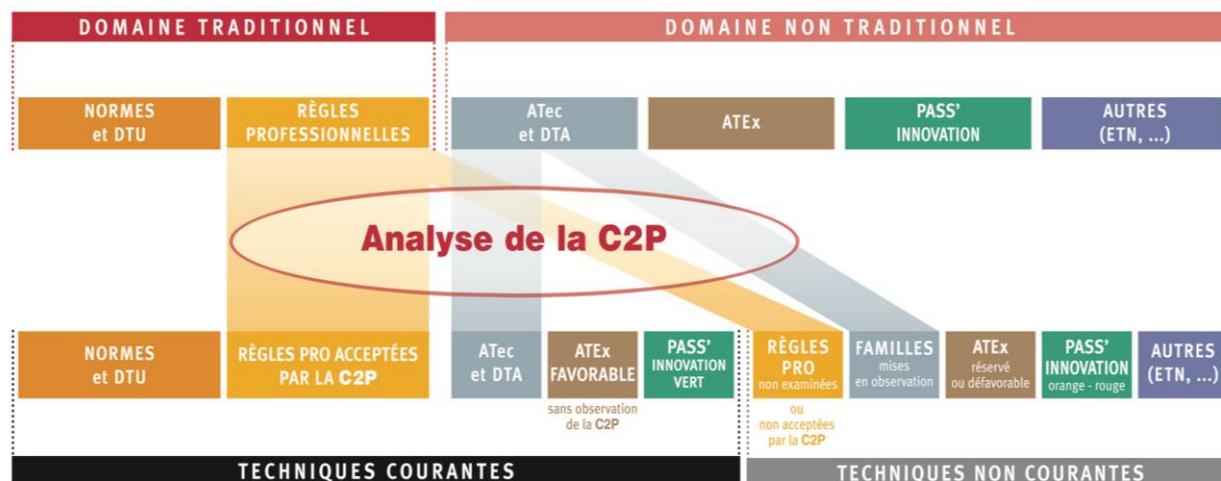


Figure 29: Distinction des techniques et de leurs possibilités d'assurance, par l'AQC

L'ensemble des techniques constructives en terre crue appartiennent aujourd'hui au domaine des techniques non courantes. On constate aujourd'hui différentes démarches pour faire avancer ce matériau sur le marché de la construction. Nous en citons ici quelques-unes :

- Les guides de bonnes pratiques [12], établies par un collectif d'artisans, d'ingénieurs, de chercheurs, etc... Ce document n'est pas considéré par l'AQC mais constitue un premier élément pour que les artisans puissent présenter leurs techniques, montrer leur savoir-faire, et ainsi négocier avec leur assureurs. C'est par exemple le cas de l'entreprise "Le Pisé"(France 42), qui a réalisé de nombreux chantiers de différentes ampleurs.

- Le projet National de recherches sur la Terre (PN Terre) [52] vise à réaliser des recherches pour lever les verrous scientifiques et passer des guides de bonnes pratiques à des règles professionnelles. C'est le chemin qui a notamment été emprunté par la filière paille en métropole.
- Différents fabricants obtiennent, par leur propre démarche, des Atex sur leurs matériaux. C'est notamment le cas de Cycle Terre [42], [53] ; ou de brique technique concept (BTC).

Les Atex sont des documents officiels, édité par le CSTB, résultats de différents essais de laboratoire réalisés en fonction de l'application visée. Ces documents, ainsi que la démarche de l'Atex en elle-même, sont consultables à l'adresse suivante : <https://evaluation.cstb.fr/fr/rechercher/>

1.7 Coûts de mise en œuvre et de construction

Il n'est pas évident de présenter des coûts pour les techniques de construction en terre crue, car de nombreux paramètres influent sur ce prix. Nous proposons donc ici de présenter différents paramètres influents (liste non exhaustive) :

- Etat de la matière ou du matériau : En fonction des techniques, il y a différents temps de préparation du matériau sur site. Les BTC peuvent arriver prêtes à l'emploi, ou être fabriquées sur place, comme le serait un pisé.
- Caractéristiques de la matière : Si le matériau est préparé sur place, le coût peut varier en fonction de la formulation. Par exemple, les enduits nécessitent une formulation donnant lieu à une rhéologie particulière. En fonction des terres, il est ainsi possible d'ajouter du sable ou des fibres courtes.
- Savoir-faire : toutes les techniques évoquées dans cette étude nécessitent un savoir-faire de la part des artisans. Ainsi, en fonction de leur expériences, ceux-ci vont plus ou moins vite et anticipent plus ou moins les problématiques.

Nous avons ici cité quelques paramètres propres au matériau terre. Mais il faut y ajouter les paramètres que l'on retrouve sur tout type de chantier comme :

- L'accessibilité
- La provenance des matériaux ou des matières
- L'échelle du projet
- La difficulté, la complexité des éléments à réaliser
- Le fait qu'il s'agisse ou non d'une rénovation

2 Contexte socio-historique et économique des constructions terre crue et/ou bambou aux Antilles et en Guyane

Cette partie a pour but de lier les enjeux du développement de la terre crue aux Antilles et en Guyane avec leurs histoires et avec leurs contextes sociaux d'aujourd'hui.

Il est à rappeler que ces trois territoires possèdent chacun leur histoire propre, notamment en ce qui concerne l'habitat, l'architecture et l'utilisation de différents matériaux de construction. Néanmoins, la documentation concernant ces régions et départements d'outre-mer paraît peu fournie, notamment dans les cadres de recherches et de méthodologie décrits en au chapitre *Méthodologie*.

De ce fait, nous rassemblerons dans cette partie les informations recensées, et distinguerons les territoires seulement lorsque des éléments clairement distinctifs seront abordés.

Aussi, parler du contexte socio-historique correspond à évoquer des politiques (et de leurs histoires) de gestion de l'habitat. L'analyse ici réalisée tend à être objective, mais cette objectivité dépend des informations rapportées et de leur source.

2.1.1 Histoire et patrimoine

En métropole, et dans de nombreuses régions du monde, nous retrouvons très facilement du patrimoine historique contenant de la terre crue. Or, ce n'est pas vraiment le cas des Antilles ou de la Guyane. Plusieurs éléments tendent à expliquer ce fait :

- L'histoire documentée de la Martinique commence avec la présence des Indiens Caraïbes, et l'arrivée des colons. Cette histoire est donc uniquement écrite du point de vue de ces derniers. Ce qui nous amène à considérer le récit comme non exhaustif. Le rapport au matériaux locaux, terre crue et autres biosourcés, peut avoir entamé un déclin à partir de l'arrivée des colons pour l'ensemble des habitants des territoires colonisés.
- Depuis les documents disponibles, et du récit des descendants d'esclaves (*La Savanne aux Esclaves*), la terre crue et autres matériaux biosourcés ont été principalement utilisés de manière très simple pour la construction de cases. Par exemple, leur structure est évoquée comme telle : « On trouvait des pieux fichés en terre, reliés par des rameaux de bambous. » [54] . Dans ce type d'habitat, la terre était utilisée pour deux éléments distincts :
 - o Au sol, où la terre était damée pour obtenir un sol relativement plat et plus facile d'entretien.
 - o Au murs, où il s'agissait souvent d'un mélange de type torchis (base terre crue et fibres locales [54] appliqué sur une structure en bois local type bois ty-baume. Plusieurs cas de figure existent ici.
 - o En Martinique, *La Savanne aux Esclaves* et notamment son fondateur Gilbert Larose, a reconstitué différents types d'habitats : Ensemble de cases et abris à l'époque des Kalinagos ; Cases à l'époque de l'esclavage. Dans ces dernières, on retrouve un exemple de case dont les murs sont recouverts de bouse de vache, puis enduits ou non avec un lait de chaux en crépi dans les cases (la savane aux esclaves, [54]).
 - On retrouve dans la bibliographie des éléments racontant les événements collectifs liés à l'acte de construire. L'architecture aujourd'hui appelée

vernaculaire, était donc à l'époque un vecteur de rassemblements et de traditions sociales : « Le plus bel exemple réside dans le tambour « bel air ». Une personne jouait du tambour pendant que tout le monde dansait pieds nus dans la pâte à pétrir (terre + herbes et racines). Le mélange ainsi obtenu était généreusement projeté à la main sur les tressages végétaux, et donnait des murs épais qui permettaient de conserver la chaleur ou la fraîcheur .» [54].



Figure 30: De gauche à droite et de bas en haut : Case à gauvette; Tressage en bambou sur une parois de case; Torchis de bouse de vache sur bois ti-baume; enduit lait de chaux sur torchis. (L'ensemble des photos ont été réalisées par T.Vinceslas à la Savanne des Esclaves

- Les conditions climatiques, avec des épisodes de catastrophes de plus en plus récurrents (cyclones, tremblements de terre, glissements de terrains, éruptions volcaniques ...), a rendu difficile le fait de maintenir dans le temps une bonne partie du patrimoine bâti. Néanmoins, selon Gilbert Larose, les habitats type cases étaient potentiellement plus résistants que les habitations conventionnelles contemporaines, notamment grâce à la souplesse des matériaux choisis, mais surtout du fait des connaissances des liens entre topographie et risque climatique des anciens habitants. Ces connaissances leurs permettaient ainsi de mieux implanter les bâtiments, de sorte à ce qu'ils subissent beaucoup moins les différents événements climatiques.

Dans l'ensemble, il est difficile de juger de l'importance de l'utilisation de la terre crue dans les Antilles au cours de l'histoire. Cependant, il est assez rapide de lier l'histoire de l'utilisation de ce matériau avec son image désuète d'aujourd'hui. Que ce soit pour la terre ou pour d'autres matériaux locaux (bois local, bambou...), que ce soit pour les DROMS ou la métropole, le constat est le même : les matériaux traditionnels peu transformés ne bénéficient pas d'une bonne image. Par bonne image

entendus les caractères suivants : durable, résistant mécaniquement, performants sur l'aspect thermique, hygrique ou acoustique... Cependant dans les DROMS, les éléments cités plus haut (sur les raisons d'un manque de patrimoine terre) viennent s'ajouter aux éléments dégradants l'image de ces matériaux et particulièrement en Martinique (selon les entretiens réalisés dans l'étude) on retrouve un contexte socio-historique encore très lié à l'histoire de l'esclavage.

Le patrimoine aujourd'hui visible en Martinique, et probablement en Guadeloupe, évolue de constructions pierres maçonnées à la terre ou à la chaux (c'est le cas de différentes Habitations – Habitat des colons propriétaires d'exploitations des terres), vers des structures métalliques avec remplissage en briques de terres cuites. En parallèle, les cases ont aussi évolué vers une structure en bois avec bardage bois.

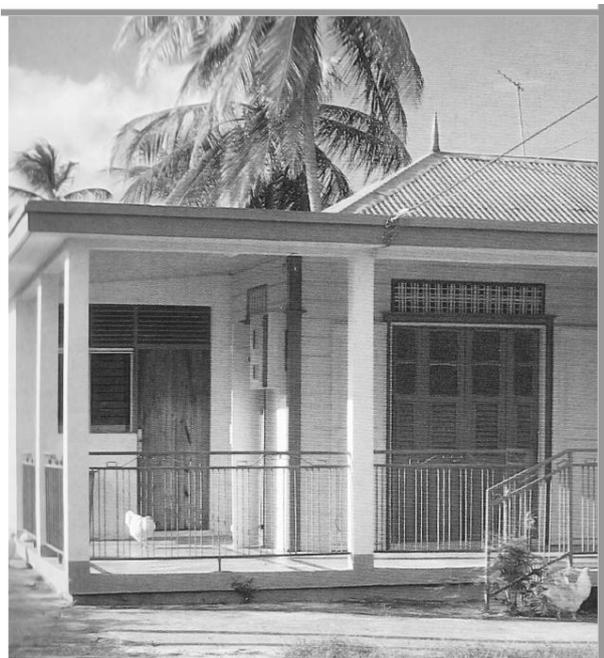


Figure 31: De haut en bas : Habitation zévallos, 1877, Guadeloupe ; Case aménagée en Guadeloupe (Photos issue du RAPPORT D'ÉTUDE DE FIN DE LICENCE de LUDGI DRACON)



Figure 32: Intérieur habitation Mont-Carmel, 1762, Saint Claude, Guadeloupe. (Photos issue du RAPPORT D'ÉTUDE DE FIN DE LICENCE de LUDGI DRACON)

D'un côté, dans ces différentes évolutions, nous notons l'importance qu'avait pris durant une longue période l'utilisation de la pierre et de la chaux. D'un autre côté, les matériaux sur lesquels se penchent cette étude sont aussi des matériaux bruts, présents en abondance, peu transformés. Ils nécessitent ainsi un savoir-faire fort, une culture constructive ancrée, pour être largement utilisés. La question ici posée est la suivante : **Dans le contexte Antillais, que peut-on apprendre de la construction puis de la perte d'un savoir-faire à travers le temps? Comment assurer la mise en place de nouvelles filières, nécessitant de nouvelles cultures constructives ?** La réponse à ces questions mérite à elle seule une étude profonde, mais nous pouvons apporter ici trois éléments de réponse :

L'histoire de l'utilisation de la chaux à la Martinique et encore présente [55]. Ce liant était auparavant fabriqué sur l'île dans des fours artisanaux, en brûlant longuement des coquillages ramassés sur l'île ou issu de la pêche. La chaux était d'abord utilisée en crépi pour couvrir les murs des cases, puis en liant de mortier pour la maçonnerie de pierres. Il est intéressant de se pencher sur ce matériau puisque son utilisation est maintenant très liée à l'utilisation de terre crue dans le bâtiment. La chaux va servir de stabilisant, d'enduit de finition intérieur ou extérieur, de mortier de renforcement local pour le pisé. Aujourd'hui, c'est le ciment qui est grandement présent aux Antilles, et il est en grande partie importé ou fabriqué à partir de produits importés [56]. Le savoir-faire lié à la fabrication et à l'utilisation de la chaux est majoritairement perdu. Ici, les hypothèses expliquant cette perte sont les suivantes :

- Four trop artisanaux, nécessitant beaucoup de bois pour la cuisson de la matière ;

- Ressource éparse et collecte difficile. On peut se demander ici si l'industrie alimentaire des îles permettraient d'obtenir suffisamment de matière première pour redémarrer la fabrication de chaux.
- Arrivée du ciment, compétitif du point de vue économique et permettant des performances probablement plus élevées que la chaux locale de l'époque.

Nous pouvons également évoquer l'histoire de la terre cuite avec la Poterie des Trois-îlets. Celle-ci existe depuis 1873 et fait aujourd'hui clairement partie de l'histoire du bâtiment Martiniquais. Cette usine a fabriqué des briques pleines, des tuiles et autres éléments de toiture, puis des briques alvéolées et bien d'autres composants encore. Le rythme de production a grandement évolué dans le temps, conjointement avec les évolutions technologiques possibles (mécanisation de la fabrication avec différent type d'extrudeuses, mécanisation de l'acheminement et du mélange des matières, cuisson en four à gaz et gasoil, contrôle précis de la température, mécanisation du palettage...). Il y a encore 30 ans, la poterie transformait 45000 tonnes de terre par an. Aujourd'hui, avec la concurrence du béton et de la tôle, la poterie est largement en dessous de ses capacités de production avec une quantité de terre transformée de dépassant pas 15000 tonnes. Ici, bien qu'il s'agît d'un matériau très transformé et ayant un impact environnemental fort du fait de la cuisson, un savoir-faire important s'est construit et partagé autour de la transformation de la terre. Ce savoir-faire peut être valorisé, et ré-utilisé à travers le développement d'une filière terre-crue.

Enfin, nous constatons que le point commun entre ces différents éléments est l'arrivée du ciment, et à fortiori du béton de ciment. Celui-ci est arrivée aux Antilles en 1933 avec l'architecte Louis Callat [36] puis Bauhaus à travers Edouard Glissant et Patrick Chamoiseau [36]. Ce matériau était vu, et est vu encore aujourd'hui, comme permettant une diversité de formes et d'aspects importants, laissant libre court à l'imagination des architectes. Il a été largement utilisé, aussi du fait qu'il correspondait aux besoins économiques et performanciers (résistance mécanique du béton armé). Sa forte présence a mené à la mise en place d'une culture constructive que l'on appellera conventionnelle. En effet, on retrouve dans cette culture une vision du ciment, du béton armé et des matériaux conventionnels de manière général, comme unique manière de répondre aux fortes contraintes locales (séismes et ouragans).

Cependant, cette forte présence du béton et l'absence d'alternative concurrente, peut aussi être expliqué sous l'angle politique. Les entreprises produisant et vendant ces matières représentent aujourd'hui un lobby particulièrement puissant, permettant au matériau d'être largement utilisé. Sur cette question, nous pouvons apporter les éléments suivants :

- A partir de 1980 [57], Vinci rachète de nombreuses entreprises dans les DROM, faisant ainsi de l'entreprise le principale cimentier de ces territoires.
- Au sein de la Fédération des entreprises d'outre-mer (Fedom) a été mis en place une commission BTP, dans laquelle siège majoritairement les cimentiers. « Cette commission a abordé dès sa première réunion le problème de la « baisse » de la production du logement social (on note effectivement une légère diminution du nombre de constructions neuves depuis 2014 [58], encourageant l'État à reprendre sa politique de construction massive [59].
- L'Etat Français a mis en place un dispositif de financement à travers une ligne budgétaire unique pour les logements sociaux en Outre-mer ainsi que des déductions fiscales spécifiques

pour les constructions neuves. Ces dernières sont majoritairement utilisées par les promoteurs privés et n'affectent donc que peu le logement social [58].

2.1.2 Durabilité et écologie

Nous proposons dans cette partie de considérer le caractère durable et les impacts écologiques des matériaux massivement utilisés dans les DROM, comme faisant partis des éléments de contexte socio-historique et économique des territoires.

Pour ce faire, nous partons de l'analyse réalisée par Clémence Léobal dans son article « Les politiques de logement dans les départements et régions d'Outre-mer » [57].

« À cela [...] s'ajoutent les coûts écologiques et les désagréments liés à l'emploi de ce matériau, dont le vieillissement accéléré des murs, la chaleur étouffante dans les appartements ou encore la faiblesse de l'isolation sonore. » L'utilisation massive de terre cuite, puis de béton particulièrement, a mené les territoires concernés à une utilisation en constante augmentation de ciment [60] (155000 tonnes en un an [61]), dont l'impact environnemental est reconnu. Mais la présence trop forte, sans gestion des points faibles, de ce matériau occasionne différentes problématiques :

- Lorsque le béton est non isolé, directement exposé au soleil, et le logement mal ventilé, cela mène à des surchauffes importantes du fait de l'accumulation de chaleur (phénomène d'inertie). Bien qu'une isolation de la toiture soit l'élément le plus efficace pour réduire les surchauffes sur des habitats individuels [62], lorsque les murs constituent une surface exposée équivalente ou plus grande que la toiture (cas des logements collectifs) l'accumulation de chaleur y est alors particulièrement importante. Ces faits mènent à l'utilisation grandissante de climatiseur, aggravant à la fois l'impact environnemental, la dépendance énergétique et la précarité énergétique des ménages.
- Les règles de construction sont parfois non ou mal respectées. Or, en milieu tropical et en bord de mer, des dispositions sont à prendre pour assurer la durée de vie du béton. Un travail est en cours sur ce sujet ainsi que sur d'autres pathologies du bâti martiniquais avec le CERC Martinique et le projet BatiSolid [63].

« Les matériaux locaux sont peu utilisés du fait de « l'absence ou [de] très longs délais de normalisation par les organisations professionnelles » ». Ici, le projet BatiSolid évoqué plus haut travaille justement à la révision des normes françaises pour qu'elles soient adaptées aux milieux tropicaux humides. C'est effectivement un travail de longue haleine, qui consiste à parcourir et décortiquer l'ensemble des normes bâtiments existantes.

Enfin, des normes thermiques et acoustiques spécifiques sont en place depuis 2009 (RTAA DOM) [64], avec des spécificités en fonction des territoires (RTG pour la Guadeloupe (2011) - RTM pour la Martinique (2013)). Ces réglementations sont non suffisantes, et beaucoup moins élaborées que la dernière réglementation de l'hexagone (RE2020). Dans ce cadre, le Plan logement outre-mer 2019-2022 préconise d'ailleurs une réécriture de la RTM [57].

Pour l'ensemble de ces faits, il paraît essentiel d'apprendre des erreurs passées, pour développer des filières répondant au contexte actuel de la construction. En somme :

- Travailler avec des matériaux locaux, peu transformés, évitant ainsi la dépendance à la métropole, la dépendance énergétique.
- Réaliser, approfondir, des études pour élaborer des matériaux correspondant aux critères de confort d'aujourd'hui (thermique, acoustique)
- Mettre en place une culture constructive autour de ces matériaux assurant leur mise en œuvre dans un cadre sécurisé vis-à-vis des contraintes climatiques et sismiques locales.

2.1.3 Contexte économique

Dans ce paragraphe, nous cherchons à lier le contexte économique de la construction aux Antilles, et notamment en Martinique, avec la possibilité de création de nouvelles filières. Pour ce faire, nous travaillons sur 3 axes :

- l'origine des matériaux de construction et le poids financier associé,
- le coût des terrains,
- les caractéristiques principales des entreprises du secteur.

Attention cependant, ces trois axes ne constituent pas en soi l'essentiel d'une analyse économique complète du secteur de la construction. Pour ce faire, il faudrait ajouter – par exemple – l'âge vieillissant de la population Martiniquaise pouvant mener à un ralentissement des besoins en construction, opposé à un changement de composition de ménages (le nombre de personnes par habitat diminuant) qui augmente potentiellement le besoin de logement de petite taille [65].

2.1.3.1 Importations et coûts des matériaux

Dans le paragraphe précédent, nous évoquions la dépendance du secteur vis-à-vis du béton, et donc particulièrement du ciment. Pour préciser, la Martinique dispose d'une usine de fabrication de ciment et est donc autonome vis-à-vis de ce produit. En revanche, la production de ciment nécessite différents produits, et notamment une quantité considérable de pouzzolane. En 2017, Mr Stéphane Abramovici - représentant du Syndicat Martiniquais des producteurs de granulats - déclarait au sénat : « *Pour les matières premières liées à la fabrication du ciment, nous recourons à un approvisionnement régional, au sens large, depuis la Grande Caraïbe élargie à l'Amérique centrale. Il incluait historiquement le Venezuela qui s'est retiré du marché, ce qui nous a amené à nous tourner vers la Colombie et le Mexique. Cela répond déjà à une logique de coût, mais nos difficultés d'approvisionnement se situent plus au niveau logistique. Les tirants d'eau dans les infrastructures portuaires ne permettent pas d'utiliser les plus gros bateaux existants qui sont souvent obligés de décharger une partie de leur cargaison en Guadeloupe avant de venir en Martinique, ou inversement, pour pouvoir entrer dans les ports. Par conséquent, les coûts de la matière première pour la production de ciment ne sont pas optimisés, mais l'approvisionnement se fait déjà depuis l'environnement régional élargi et coûte beaucoup moins cher que depuis la métropole.* » [56] Plus tôt, cette même personne indiquait que l'île est autosuffisante en sable, grâce à la carrière de Saint-Pierre.

Le béton étant parmi les matériaux les plus employés, on peut se demander ce qu'il en est des autres matériaux de construction. Dans cette même discussion au sénat, M. Alain Philias, directeur technique de la Société Martiniquaise d'HLM indiquait : « *S'agissant des matériaux de construction utilisés pour l'habitat, la part des importations est de l'ordre de 60 %, essentiellement depuis l'Europe. La totalité des produits pour les corps d'état secondaires est importée, avec des surcoûts non négligeables.* »

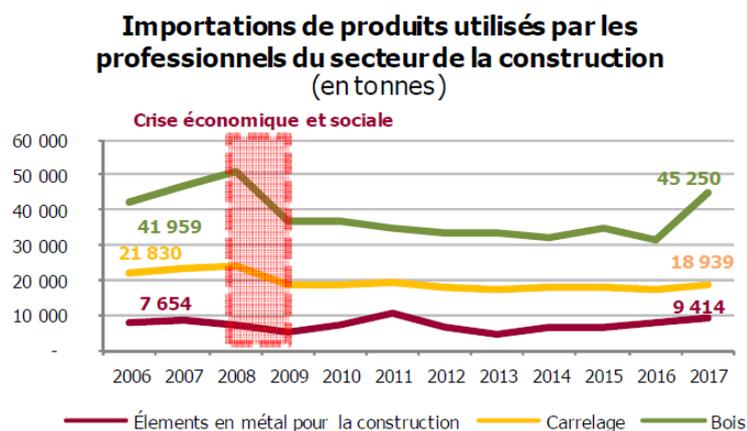


Figure 33: Importations de métal, bois et carrelage pour la construction en Martinique

La Figure 33 ci-dessus - provenant d'une étude de la Fedom en 2018 – détaille l'évolution de l'importation de 3 produits phare en Martinique : Le bois, le carrelage, et l'acier. Les données provenant des douanes, le bois et l'acier ici considérés regroupent probablement « tous les matériaux composés de ». On retrouvera donc l'acier en grande partie dans le béton armé, dans les tôles ainsi qu'en tant que matériau de structure (charpente notamment). Pour le bois, il s'agira probablement en premier lieu de bois utilisé en charpente et en bardage, puis en planche pour divers usages.

Aujourd'hui, ces éléments tendent à expliquer, en partie, la plus forte augmentation des coûts des matériaux dans ces territoires. On constate actuellement 30 à 50% d'augmentation sur la plupart des produits dû aux différentes crises internationales en cours (suite COVID, sécheresse, coût de l'énergie en nette augmentation, guerre en Ukraine...). Le secteur du BTP réagit, sans remettre en question réellement le modèle économique de la construction aux Antilles [66].

Pour ce premier axe, le développement d'une ou plusieurs filières locales de matériaux peu transformés (avec une énergie grise faible) permettrait une diminution de la dépendance, et une plus grande maîtrise des coûts de la construction.

2.1.3.2 Coût élevé des terrains

Différents facteurs influent fortement sur le coût des terrains, nous tentons ici d'en prendre en compte certains dans notre analyse :

Tout d'abord, le contexte insulaire mène naturellement le secteur du bâtiment à connaître des contraintes et des tensions fortes. Il faut ici prendre en compte les particularités physiques et la géographie des DROM, qui sont pour la plupart des îles exiguës, recouvertes de mangrove ou de marais. On observe aussi un retrait de côte à la Martinique et la Guadeloupe.

Ensuite, le statut juridique des terres joue un rôle important. En fonction des territoires des DROM concernés, de plus ou moins nombreux terrains appartiennent à l'État (situations juridiques héritées de la colonisation) et seraient donc souvent inaccessibles en raison de mesures de protection environnementale ou militaire, ou encore réservées à l'Office national des forêts pour l'exploitation forestière [57]. Il est question ici surtout de lier ce fait à la pression financière exercée sur les terrains à bâtir.

Enfin, il nous faut évoquer absolument les grandes problématiques administratives résultant des déficiences du cadastre et des titres fonciers ainsi que de la multiplication des indivisions dont les héritiers vivent en France hexagonale. Ces problématiques « paralysent » le marché foncier (notamment du fait de politiques migratoires qui ont favorisé l'émigration massive pendant les Trente Glorieuses). » [57] Cette

problématique est réelle sur de nombreux territoires ultramarins, et donne lieu à une importance grandissante de logements vacants (Figure 34), tombant en désuétude. En 2014, on considère ainsi presque 20% du parc de logements en Martinique comme vacant. En 2019, l'INSEE indique les chiffres [67] suivants :

- Résidences principales : 166 994
- Résidences secondaires : 13 947
- Logements vacants : 33 847

Depuis cette date, soit presque 10 ans, la part de logement neuf ne cesse de diminuer.

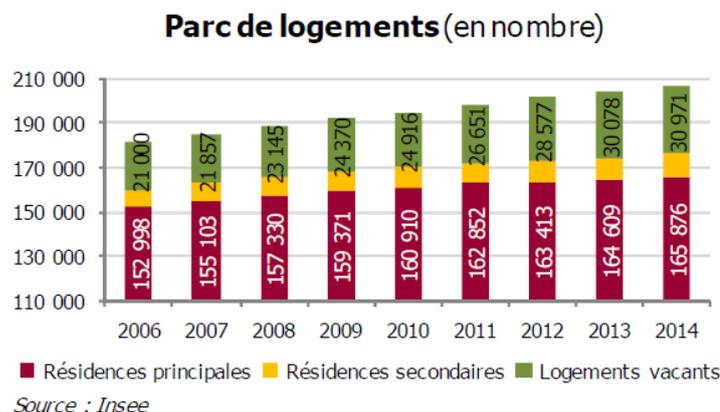


Figure 34: Parc de logements en Martinique (Fedom, note expresse août 2018)

2.1.3.3 Caractéristiques principales des entreprises

Afin de développer de nouvelles filières de matériaux locaux pour la construction sur un territoire, il est souhaitable de recenser quelques indicateurs qualifiants les entreprises potentiellement concernées. En effet, comme ces entreprises devront être sensibilisées, formées puis dans la mesure du possible organisées selon une stratégie de développement, il nous faut regarder de quoi sont composées ces entreprises pour comprendre comment ces développements seront possibles.

Nous regardons en premier lieu la taille des entreprises. La Figure 35 illustre la répartition des entreprises du BTP par taille en Martinique. L'Insee recensait en 2018 une part non négligeable d'entreprises sans emplois salariés. Ce qui indique que la majorité des chantiers de construction sont réalisés les entrepreneurs eux-même. (Entreprise individuelle, auto-entrepreneurs). Par ailleurs l'importance des travaux réalisés en auto-construction est assez répandue et difficilement quantifiable.

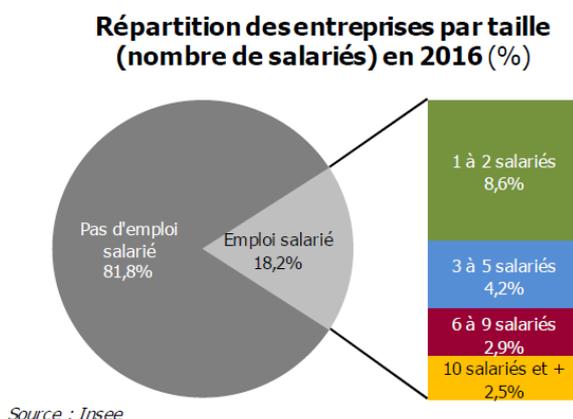


Figure 35: Taille des entreprises en Martinique (Fedom, août 2018)

La forte présence de très petites entreprises sur le territoire rend difficile la visibilité des acteurs de la construction, et donc le potentiel de sensibilisation sur le sujet des matériaux locaux. Ces éléments rendent difficile la visibilité et l'accès aux entreprises ainsi que la disponibilité de ces derniers à s'inscrire dans de telles études.

2.1.4 Mode d'habiter

Le rapport à l'habitat change de façon assez évidente entre les territoires. La question est ici d'observer des faits sur le mode d'habitat (au sein des territoires à l'étude) que l'on considère directement en lien avec le potentiel de développement de filière locale de matériaux.

Premièrement, il est constaté que, lors d'un projet de construction d'un habitat individuel, la majorité des Martiniquais fait appel à leur proches pour construire (voir sujet sur l'auto-construction dans l'entretien avec la DEAL Martinique). Ceci rend difficile l'accès à ces personnes et donc leur sensibilisation à des manières de construire alternatives.

Ensuite, les idéaux d'habitats ne correspondent pas forcément à ce qui est actuellement le plus construit, ou à ce qui est souhaitable. En Guyane par exemple, une part importante de la population refuse d'aller vivre en habitat social [57]. Ici, l'auteur indique notamment que « La construction de logements collectifs en béton armé va de pair avec la destruction de modes d'habiter bien davantage ancrés dans leur environnement et leur contexte culturel. » Il y a un souhait de retrouver/garder un mode d'habiter proche des cultures traditionnelles (Mouïnas, hameaux, possibilité de jardins créoles...). En Martinique, le recours à des matériaux locaux tels que le bois, la terre ou le bambou peut renvoyer à une idée de logement pauvre ou de basse qualité.

Enfin, et cela va de pair avec la question de l'auto-construction, un nombre réellement important d'habitat individuel est/a été construit dans l'illégalité. On retrouve sur ce sujet différents quartiers connus sur les différents territoires à l'étude :

- Guyane avec Saint-Laurent-du-Maroni
- Martinique, certains quartiers au nord-ouest de Fort-De-France.

Contacts

Karibati

Théo Vincelas – Chargé de mission – t.vincelas@karibati.com

Marion Chirat – Associée fondateur – m.chirat@karibati.com

Crédits photos couverture : Shane McLendon, Kazuend et Bernard Hermant via Unsplash ; Karibati

Bibliographie

- [1] « Interchanvre - La culture ». https://www.interchanvre.org/la_culture#les_chiffres_cles (consulté le 3 août 2022).
- [2] « La terre crue a enfin son “projet national” », sept. 2021, Consulté le: 3 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lemoniteur.fr/article/la-terre-crue-a-enfin-son-projet-national.2162027>
- [3] « Accueil », *SCIC ielo*. <https://ielo.coop/> (consulté le 3 août 2022).
- [4] « Cycle Terre », *Cycle Terre*. <https://www.cycle-terre.eu/> (consulté le 3 août 2022).
- [5] « BTC - La brique - Briques de Terre Compressée ». <https://www.briquestechnicconcept.fr/> (consulté le 3 août 2022).
- [6] « Du terre-chanvre projeté radiophonique », *Ecopertica*, 27 février 2017. <https://www.ecopertica.com/terre-chanvre-projete-radiophonique/> (consulté le 3 août 2022).
- [7] « Chanvre Nouvelle-aquitaine », *Chanvre Nouvelle-aquitaine*. <https://www.chanvre-na.fr> (consulté le 3 août 2022).
- [8] Caraïbes Environnement et Transénergie, « ETAT DES LIEUX DES MATERIAUX ET ECOMATERIAUX, ISSUS DES MATIERES PREMIERES LOCALES, EXPLOITABLES EN MARTINIQUE (Phase n°1) », Martinique, D1BC-R1103/12/JV/AR, août 2012. Consulté le: 16 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://martinique.ademe.fr/sites/default/files/rapport-etude-eco-materiaux-phase-1.pdf>
- [9] Caraïbes Environnement et Transénergie, « ETAT DES LIEUX DES MATERIAUX ET ECOMATERIAUX, ISSUS DES MATIERES PREMIERES LOCALES, EXPLOITABLES EN MARTINIQUE (Phase n°2) », Martinique, D1BC-R186/13/LO, oct. 2013. Consulté le: 16 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://martinique.ademe.fr/sites/default/files/rapport-etude-eco-materiaux-phase-2.pdf>
- [10] Karibati, « Potentiel de développement de produits biosourcés pour le bâtiment en Guadeloupe », Guadeloupe, 2016.
- [11] AQUAA, « LES ECO-MATERIAUX ET LES FILIERES DE L'ECOCONSTRUCTION EN GUYANE : SYNTHESE DES CONNAISSANCES, POTENTIELS DE DEVELOPPEMENT ET DE STRUCTURATION », Guyane, 2019.
- [12] ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, et ATOUTERRE, *Guide de bonnes pratiques de la construction en terre crue*. France, 2018.
- [13] J.-E. Aubert, « Panorama sur la construction en terre crue », p. 34.
- [14] S. Delahousse, « L'ARCHITECTURE DE TERRE CRUE EN MOUVEMENT EN FRANCE ET AU MALI », p. 71.
- [15] U. Röhlen et C. Ziegert, *Construire en terre crue - Construction - Rénovation - Finition*. Paris: Le Moniteur, 2013.
- [16] M. Serlet, « Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture », *CRATERRE*. <https://craterre.hypotheses.org/451> (consulté le 3 août 2022).
- [17] A. Klein, « Echanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue 1 - Table ronde de Montpellier », in *La construction en terre crue par couches continues, en Midi-Pyrénées. XVI - XXè siècle. Contribution à l'identification des techniques*, Montpellier, 2003, p. 417-437.
- [18] F. Streiff et F. Lahure, « Le patrimoine en bauge de Haute et Basse Normandie. Caractéristiques et développement actuel des savoir-faire en Normandie », in *Echanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue 1*, Montpellier, 2003, p. 315.
- [19] L. Wolfskill, W. Dunlap, et B. Gallaway, *Handbook for building homes of earth*. Texas Transportation Institute, 1970. [En ligne]. Disponible sur: http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNAAE689.pdf
- [20] « Minke - 2009 - Building with Earth Design and Technology of a Su.pdf ».
- [21] « Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems », ASTM, 2010.
- [22] C. Beckford, « Climate change resiliency in Caribbean SIDS: building greater synergies between science and local and traditional knowledge », *J. Environ. Stud. Sci.*, vol. 8, n° 1, p. 42-50, mars 2018, doi: 10.1007/s13412-017-0440-y.
- [23] S. Guihéneuf, D. Rangeard, et A. Perrot, « Cast, compaction, vibro-compaction or extrusion: processing methods for optimizing the mechanical strength of raw earth-based materials », *Acad. J. Civ. Eng.*, vol. 37, n° 2, Art. n° 2, juin 2019, doi: 10.26168/icbbm2019.22.
- [24] « La Brique de Terre Compressée », *Art Terre Mayotte*. <https://www.art-terre-mayotte.org/projets-remarquables> (consulté le 3 août 2022).
- [25] D. J. Davidovits, « 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. », p. 16.

- [26] T. Vincelas, « Caractérisation d'éco-matériaux terre-chanvre en prenant en compte la variabilité des ressources disponibles localement », phdthesis, Université de Bretagne Sud, 2019. Consulté le: 8 octobre 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02569445>
- [27] A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, Q.-B. Bui, D. Gallipoli, et B. V. V. Reddy, Éd., *Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials and Elements: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 274-TCE*, vol. 35. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-83297-1.
- [28] « r-rex-batiments-performants-antilles.pdf ».
- [29] H. Van Damme et H. Houben, « Earth concrete. Stabilization revisited », *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, p. 90-102, déc. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.02.035.
- [30] A. Ventura *et al.*, « Environmental Potential of Earth-Based Building Materials: Key Facts and Issues from a Life Cycle Assessment Perspective », in *Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials and Elements*, vol. 35, A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, Q.-B. Bui, D. Gallipoli, et B. V. V. Reddy, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2022, p. 261-296. doi: 10.1007/978-3-030-83297-1_8.
- [31] K. A. J. Ouedraogo, « Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux », TOULOUSE.
- [32] S. Guiheneuf, « Formulation et renforts de blocs en matériau terre pour une utilisation structurelle », phdthesis, INSA de Rennes, 2020. Consulté le: 9 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03194559>
- [33] A. W. Bruno, B. Scott, Y. D'Offay-Mancienne, et C. Perlot, « Recyclability, durability and water vapour adsorption of unstabilised and stabilised compressed earth bricks », *Mater. Struct.*, vol. 53, n° 6, p. 149, déc. 2020, doi: 10.1617/s11527-020-01585-7.
- [34] « bd terre », Léa Rinino. <https://www.learinino.art/bd-terre> (consulté le 9 août 2022).
- [35] E. Leylavergne, « La filière terre crue en France », p. 154.
- [36] « [livre] Construire en pisé par CRATerre | Build Green ». <https://www.build-green.fr/livre-construire-en-pise-par-craterre/> (consulté le 9 août 2022).
- [37] P. M. Touré, V. Sambou, M. Faye, A. Thiam, M. Adj, et D. Azilinson, « Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB) », *J. Build. Eng.*, vol. 13, p. 266-271, sept. 2017, doi: 10.1016/j.job.2017.08.012.
- [38] Construire en chanvre, « Protocoles d'essais pour la mesure des performances seuils des bétons de chanvre ». 2010.
- [39] M. Hall et D. Allinson, « Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, n° 4, p. 740-747, mars 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.051.
- [40] P.-A. Chabriac, A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-P. Laurent, et J. Blanc-Gonnet, « A Procedure to Measure the in-Situ Hygrothermal Behavior of Earth Walls », *Materials*, vol. 7, n° 4, p. 3002-3020, avr. 2014, doi: 10.3390/ma7043002.
- [41] F. Champiré, A. Fabbri, J.-C. Morel, H. Wong, et F. McGregor, « Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material », *Constr. Build. Mater.*, vol. 110, p. 70-78, mai 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.027.
- [42] Cycle Terre, « Fiche Technique BTC - Cycle Terre ».
- [43] D. Gallipoli, A. W. Bruno, C. Perlot, et J. Mendes, « A geotechnical perspective of raw earth building », *Acta Geotech.*, vol. 12, n° 3, p. 463-478, juin 2017, doi: 10.1007/s11440-016-0521-1.
- [44] M. Degrave-Lemeurs, P. Glé, et A. Hellouin de Menibus, « Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation: Application to clay and lime binders », *Constr. Build. Mater.*, vol. 160, p. 462-474, janv. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.064.
- [45] A. N. Daza, E. Zambrano, et J. A. Ruiz, « Acoustic performance in raw earth construction techniques used in Colombia », p. 10.
- [46] A. Caimi, « Cultures constructives vernaculaires et résilience : entre savoir, pratique et technique : appréhender le vernaculaire en tant que génie du lieu et génie parasinistre », These de doctorat, Grenoble, 2014. Consulté le: 10 mars 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2014GRENH011>

- [47] D. Omar, F. Ridolfi, et L. R. & U. Tonietti, « Diagonal tests on adobe panels reinforced by traditional and innovative anti-seismic retrofits », in *Vernacular Architecture: Towards a Sustainable Future*, CRC Press, 2014.
- [48] « Experimental and Numerical Assessment on Seismic - ProQuest ». <https://www.proquest.com/docview/2547167076?fromopenview=true&pq-origsite=gscholar> (consulté le 5 octobre 2022).
- [49] K. V. Balen et E. Verstryngne, *Structural Analysis of Historical Constructions: Anamnesis, Diagnosis, Therapy, Controls: Proceedings of the 10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC, Leuven, Belgium, 13-15 September 2016)*. CRC Press, 2016.
- [50] G. Karanikoloudis et P. B. Lourenço, « Structural Performance and Seismic Vulnerability of Adobe Historical Constructions. The Kuño Tambo Case Study. », p. 11.
- [51] « Guide de construction parasismique pour les maisons individuelles - DEAL de la Martinique ». <http://www.martinique.developpement-durable.gouv.fr/guide-de-construction-parasismique-pour-les-r434.html> (consulté le 7 février 2022).
- [52] « Projet National Terre ». <https://projet-national-terre.univ-gustave-eiffel.fr/> (consulté le 5 octobre 2022).
- [53] Cycle Terre, « Fiche-technique-Bloc-stabilisé-BTCs-Cycle-Terre-191210.pdf ».
- [54] N. Nollet, « La créolisation architecturale en Martinique: de l'architecture coloniale à l'architecture libre », p. 66.
- [55] M. Guillaume et N. Vidal, « Les complexes chauxonniers et la fabrication de la chaux à la Martinique », *ADLFI Archéologie Fr. - Inf. Une Rev. Gall.*, sept. 2019, Consulté le: 5 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://journals.openedition.org/adlfi/30734>
- [56] « Délégation sénatoriale à l'outre-mer : compte rendu de la semaine du 9 janvier 2017 ». <http://www.senat.fr/compte-rendu-commissions/20170109/outremer.html> (consulté le 22 septembre 2022).
- [57] C. Léobal, *DU BÉTON SOUS LES TROPIQUES Les politiques de logement dans les départements et régions d'Outre-mer*. 2021.
- [58] « Le logement dans les départements et les régions d'outre-mer | Cour des comptes ». <https://www.ccomptes.fr/fr/publications/le-logement-dans-les-departements-et-les-regions-doutre-mer> (consulté le 10 août 2022).
- [59] V. GALLY, « BTP-LOGEMENT – Fedom ». <https://fedom.org/btp-logement/> (consulté le 10 août 2022).
- [60] M. Uwasu, K. Hara, et H. Yabar, « World cement production and environmental implications », *Environ. Dev.*, vol. 10, p. 36-47, avr. 2014, doi: 10.1016/j.envdev.2014.02.005.
- [61] CERC, « CONJONCTURE DE LA FILIÈRE CONSTRUCTION MARTINIQUE ». juillet 2022.
- [62] Watt smart, « Rapport sur l'analyse des travaux clés - projet Réban », 2021.
- [63] « Archives des Batisolid - Page 6 sur 7 », *CERC Martinique*. <https://www.cerc-martinique.fr/batisolid/> (consulté le 22 septembre 2022).
- [64] « Réglementation thermique, acoustique et aération des logements neufs outre-mer », *Ministères Écologie Énergie Territoires*. <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-thermique-acoustique-et-aeration-des-logements-neufs-outre-mer> (consulté le 22 septembre 2022).
- [65] Fedom, « Le secteur du BTP en Martinique - Une activité en mutation », n° Note Expresse N°521, août 2018.
- [66] SEBTPAM, « FLAMBÉE DES PRIX DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION LES PROPOSITIONS DU SEBTPAM », août 2022.
- [67] « Dossier complet – Département de la Martinique (972) | Insee ». <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=DEP-972#chiffre-cle-3> (consulté le 3 janvier 2023).
- [68] G. Giada, R. Caponetto, et F. Nocera, « Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review », *Sustainability*, vol. 11, n° 19, Art. n° 19, janv. 2019, doi: 10.3390/su11195342.

Annexe :

2.2 Documents supplémentaires

2.2.1 Tableaux de caractéristiques techniques des techniques de construction en terre (issu de [68])

Constructive Technique	Authors	Ref.	Measured Hygrothermal Properties						
			Dry Density ρ [kg m ⁻³]	EMC Range [%]	Water Vapour Resistance Factor μ [-]	Specific Heat Capacity c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal Conductivity λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal Effusivity e [J m ⁻² K ⁻¹ s ^{-1/2}]	Thermal Diffusivity a [m ² s ⁻¹]
Adobe/Cob/Wattle and Daub	Medjelekh et al. (2017)	23	1761.9–1797.6	2–5.3 Climate Chamber and Gravimetric method	–	817.6 (40 °C)–877.6 (100 °C) Calorimeter	0.77–0.95 Hot disk Apparatus	–	–
	Cagnon et al. (2014)	20	1940–2070 oven-dried samples at 50 °C	4–6 Saturated salt solutions and DVS methods	3–7 (wet), 7–9 (dry) Cup Method	900–960 Calorimeter 950–1030 Desprotherm	0.47–0.59 GHP 0.40 to 0.69 Desprotherm	900–1100 Desprotherm	–
Constructive Technique	Authors	Ref.	Measured Hygrothermal Properties						
			Dry Density ρ [kg m ⁻³]	EMC Range [%]	Water Vapour Resistance Factor μ [-]	Specific Heat Capacity c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal Conductivity λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal Effusivity e [J m ⁻² K ⁻¹ s ^{-1/2}]	Thermal Diffusivity a [m ² s ⁻¹]
Adobe/Cob/Wattle and Daub	Laborel-Préneron et al. (2015)	28	1075–1995 oven-dried samples at 40 °C for 24 h	–	–	–	0.14–0.57 GHP	–	–
	El Fgaier et al. (2016)	19	1788–2268	–	–	545–712 HFM	0.89–0.91 HFM	936.49–1176.95 Calculated	5.72 10 ⁻⁷ –9.23 10 ⁻⁷ Calculated
	Gomaa et al. (2019)–3d printed cob	29	1283.7–1780.3	–	–	–	0.32–0.48 HFM	–	–
	CobBauge Project 2018	29	1038.7–1832.3	–	–	–	0.25–0.84 HFM	–	–
	Ashour, Korjenic et al. (2015)	15–30	1088.5–1575.6 oven-dried samples at 70 °C	1.74–7.2 Saturated salt solutions	–	–	0.31–0.96 Hot wire method	–	–
	Millogo et al. (2014)	31	–	–	–	–	1.30–1.67 Hot wire method	–	–
	Ouedraogo et al. (2019)	38	–	–	–	–	0.37–1.05 Hot wire method	–	–

Constructive Technique	Authors	Ref.	Measured Hygrothermal Properties						
			Dry Density ρ [kg m ⁻³]	EMC Range [%]	Water Vapour Resistance Factor μ [-]	Specific Heat Capacity c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal Conductivity λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal Effusivity e [J m ⁻² K ⁻¹ s ^{-1/2}]	Thermal Diffusivity a [m ² s ⁻¹]
	Allam et al. (2018)	40	1980	3-7	-	750 (dry)-1200 (wet)	0.38-0.43 (dry), 0.55-0.62 (wet)	-	-
	Giroudon, Laborel-Préneron, et al. (2019)	42	1195-1988 oven-dried samples at 40 °C for 24 h	-	-	-	0.155-0.471 GHP	-	-
	Indekeu et al. (2017)	24	1940 oven-dried samples at 105 °C	9 Climatic chamber	-	939 Conductivity meter	1.1 Conductivity meter	-	-
Rammed Earth/Compressed Earth Block	Hall & Allison (2009)	16, 21	1980-2120 oven-dried samples at 105 °C	-	-	-	0.833-1.010 (λ^* at Sr = 0) 1.369-1.820 (λ^* at Sr = 1) HFM	-	-
	Allison & Hall (2010)	25	1900	-	14.34 Wet cup method	868 Calculated	0.643 HFM	-	-
	Zhang Lei et al. (2018)	32	1500-2100 oven-dried samples at 105 °C	1.3-4.6 Saturated salts solution method	-	-	0.5228-0.9308 Hot disk Apparatus	-	-
Constructive Technique	Authors	Ref.	Measured Hygrothermal Properties						
			Dry Density ρ [kg m ⁻³]	EMC Range [%]	Water Vapour Resistance Factor μ [-]	Specific Heat Capacity c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal Conductivity λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal Effusivity e [J m ⁻² K ⁻¹ s ^{-1/2}]	Thermal Diffusivity a [m ² s ⁻¹]
Rammed Earth/Compressed Earth Block	Suárez-Domínguez et al. (2018)	26	1780-1910	-	-	-	0.786-0.846 Hot wire method	-	-
	Barbata Solà & Massó Ros (2015)	33, 34	1340-2080	-	-	-	0.19-1.35 HFM	-	-
	Soudani et al. (2017)	35	1730	-	-	648	0.6 (dry)-2.4 (wet)	820 (dry)-1158 (10% wet)	5.4 10 ⁻⁷ -6.4 10 ⁻⁷
	Porter et al. (2018)	27	2064-2138	-	-	1321-1832 Hot plate method	-	-	-
	Stone & Katunsky (2015)	37	-	-	-	-	529.2-833.9 Calculated	4.6 10 ⁻⁷ -7.3 10 ⁻⁷ Calculated	
Light earth	Cobrerros et al. (2018)	36	-	-	-	-	0.09-0.35 GHP	-	-
	Wieser et al. (2018)	22	616-1089	-	-	-	0.121-0.19 HFM	-	-
	Minke (2006)	4	300-700	-	-	1000	0.07-0.20	-	-
	Volhard (2016)	12	300-1200	-	2-5	1000-1300	0.1-0.47	200-1083	-
Constructive Technique	Authors	Ref.	Measured Hygrothermal Properties						
			Dry Density ρ [kg m ⁻³]	EMC Range [%]	Water Vapour Resistance Factor μ [-]	Specific Heat Capacity c [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal Conductivity λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Thermal Effusivity e [J m ⁻² K ⁻¹ s ^{-1/2}]	Thermal Diffusivity a [m ² s ⁻¹]
Light earth	Labat, Magniont et al. (2016)	39	241-531	1.8-12 Climate chamber and Saturated Salt Solutions method	2.9 (wet)-4.8 (dry) Cup Method	-	0.071-0.120 GHP	-	-
	Niang, Maalouf, Moussa et al. (2018)	41	323-586	1.5-12.9 Climate Chamber and Saturated Salt Solutions method	1.279-2.499 (wet), 3.748-7.057 (dry) Cup Method	-	0.065-0.112 HFM, 0.131-0.164 Hot wire	140.6-247.3 HFM, 184-300.1 Hot wire	2.1 10 ⁻⁷ -2.3 10 ⁻⁷ HFM, 3.0 10 ⁻⁷ -4.3 10 ⁻⁷ Hot wire

N.B. Thermal conductivity in the table is measured on oven-dried samples, except where specified. Oven-drying temperature is reported in the column of dry density. The symbol λ^* corresponds to a thermal conductivity which depends on water saturation of the samples.



Développement des filières terre et bambou sur les territoires de Martinique, de Guadeloupe et de Guyane



TABLE DES MATIERES

PREAMBULE	5
1.1 <i>Présentation rapide</i>	5
1.2 <i>Ecriture.....</i>	5
1. CONNAISSANCES TECHNIQUES SUR LE MATERIAU BAMBOU	6
1.3 <i>Présentation de la plante et des espèces concernées par l'étude.....</i>	6
1.3.1 Anatomie d'un bambou	6
1.3.1.1 Le chaume.....	8
1.3.1.2 La fleur	9
1.3.1.3 Le fruit	10
1.3.1.4 Le rhizome	10
1.3.1.5 Les racines	12
1.3.1.6 Le turion.....	13
1.3.2 Bambusa vulgaris.....	14
1.3.2.1 Distribution.....	14
1.3.2.2 Caractéristiques :.....	14
1.3.2.3 Utilisations ethnobotaniques :	15
1.3.3 Dendrocalamus giganteus	16
1.3.3.1 Distribution.....	16
1.3.3.2 Caractéristiques :.....	16
1.3.3.3 Utilisations ethnobotaniques :	17
1.3.4 Guadua angustifolia.....	18
1.3.4.1 Distribution.....	18
1.3.4.2 Caractéristiques :.....	18
1.3.4.3 Utilisations ethnobotaniques :	19
1.4 <i>Culture et Récolte.....</i>	20
1.4.1 Le bouturage de chaume	21
1.4.2 Culture en pot.....	23
1.4.3 Culture en pleine terre	24
1.4.4 L'enherbement, les ravageurs et les auxiliaires	26
1.4.4.1 Les Pucerons :.....	26
1.4.4.2 L'acarien	27
1.4.4.3 Les coccinelles	28
1.4.4.4 Les syrphes	29

1.4.4.5	Les chrysopes.....	30
1.4.4.6	Les punaises prédatrices	30
1.4.5	Récolte.....	32
1.5	<i>Durabilité et traitements</i>	33
1.5.1	Origines des risques de dégradation	33
1.5.2	Protection contre la dégradation des chaumes	34
1.5.3	Traitements	36
1.6	<i>Séchage</i>	37
1.7	<i>Présentation des différents procédés constructifs</i>	38
1.7.1	Amarre perforée	38
1.7.2	Amarre - chevillée.....	39
1.7.3	Chaume chevillée.....	39
1.7.4	Chaume traversante chevillée	40
1.7.5	Joint avec clé.....	40
1.7.6	Amarre de support de bambou transversal :	40
1.7.7	Illustrations d'assemblages issus de la littérature.....	41
1.7.7.1	Connexions et des sections de colonnes du Pavillon ZERI, Simón Vélez (2000).....	41
1.7.7.2	Quelques-unes des techniques d'Oscar Hildalgo López.....	41
1.8	<i>Caractéristiques techniques en fonction des espèces</i>	48
1.8.1	Mécaniques	48
1.8.1.1	Principales propriétés sur les bambous.....	48
1.8.1.2	Propriétés mécaniques.....	49
1.8.2	Sismiques.....	52
1.8.2.1	Assemblage avec remplissage de la chaume en mortier de ciment	52
1.8.3	Durabilité	54
1.9	<i>Cadre normatif et assurantiel</i>	55
2.	CONTEXTE AUTOUR DU BAMBOU AUX ANTILLES ET EN GUYANE	57
2.1	<i>Présence du bambou en Martinique</i>	57
2.1.1	Bambusa vulgaris.....	57
2.1.2	Guadua angustifolia.....	58
2.1.3	Dendrocalamus giganteus	58
2.2	<i>Historique des démarches de développement du bambou en tant que matériaux de construction</i>	59
2.3	<i>Eco-système d'acteurs autour du bambou</i>	60
2.4	<i>Les différentes dynamiques autour du bambou en Martinique</i>	64
	CONTACTS	67
	BIBLIOGRAPHIE	68

Préambule

1.1 Présentation rapide

Le présent rapport constitue une partie du livrable 1 « Etat des lieux – Connaissances scientifiques et expression des conditions locales », il a pour but de présenter l'état des lieux concernant la partie bambou.

Les parties *Introduction – Historique et contexte de l'étude*, et *Méthodologie* restent inchangées et ne sont pas retransmises dans le présent document.

1.2 Ecriture

L'ensemble de la partie *1. Connaissances techniques sur le matériau bambou* (en dehors des paragraphes *1.5 Durabilité et traitement* et *1.9 Cadre normatif et assurantiel*) a été rédigée par Simon Crouzet gérant des pépinières de la Bamboueraie d'Anduze (Gard).

Les parties *1.5 Durabilité et traitement*, *1.9 Cadre normatif et assurantiel* et *2. Contexte autour du bambou aux Antilles et en Guyane* a été rédigée par Théo Vincelas au sein de Karibati.

1. Connaissances techniques sur le matériau bambou

1.3 Présentation de la plante et des espèces concernées par l'étude

Dans cette partie, nous présentons d'abord les éléments clés de l'anatomie d'un bambou, permettant notamment son identification. Ensuite, les différentes espèces concernées par l'étude, parce que présente en Martinique (à différentes échelles et dans différents lieux).

1.3.1 Anatomie d'un bambou

Sur le plan botanique, l'affiliation d'une plante à une famille se fait grâce à une classification que nous devons à Linné [1]. Cette classification est basée sur l'étude de la structure morphologique de la fleur. Pour la plupart des végétaux, la floraison est un événement (récurrent, cyclique) déterminé par différents facteurs connus et souvent contrôlables.

Pour le bambou, il semblerait qu'il n'y ait pas de règles immuables. Actuellement, personne n'est capable d'expliquer les phénomènes régissant la floraison dans sa totalité [2].

En l'absence de fleurs il n'est pas toujours facile de déterminer un bambou. Les taxonomistes ont parfois dû les classer sans avoir pu observer de fleurs ou, à moindre mal, en ne disposant que de fleurs mal conservées, c'est en faisant des rapprochements avec d'autres caractères morphologiques qu'ils ont pu avancer. Il ne faut donc pas s'étonner qu'au gré des floraisons leur nom puisse changer. À l'heure actuelle, on dénombre environ 75 à 110 genres pour au moins 1500 à 2200 espèces et variétés [3].

Dans la majorité des cas, l'aspect des bambous le rend facilement identifiable comme tel. Dans les paragraphes suivants, nous présentons les différentes parties composants le bambou et permettant notamment d'en identifier la variété.

La Figure 1 représente l'anatomie générale d'un bambou.

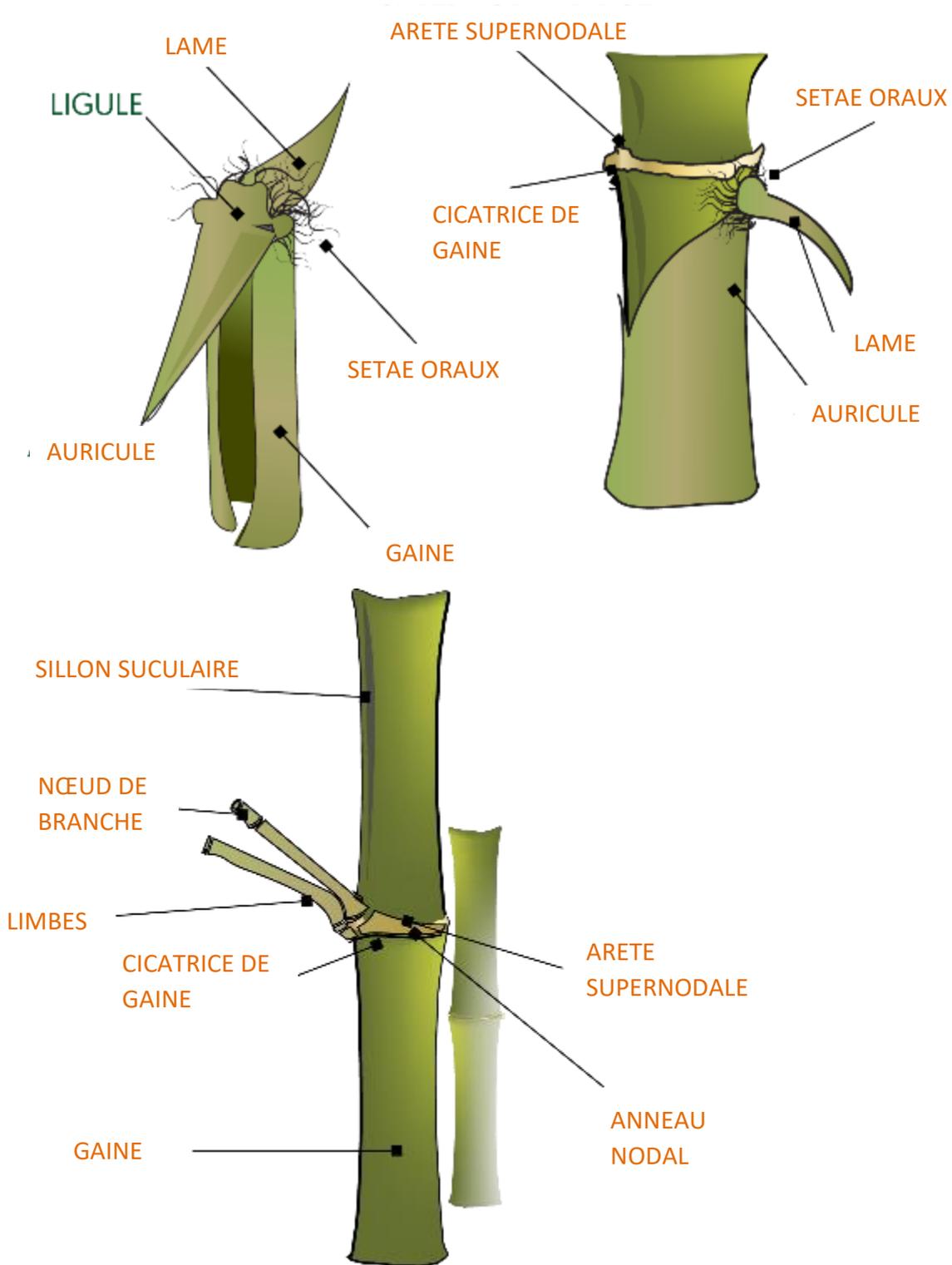


Figure 1: Représentation graphique de l'anatomie du bambou (issu de lewisbamboo.com)

1.3.1.1 Le chaume

Ainsi est appelée la tige creuse des graminées simplement cloisonnée au niveau des nœuds. Tous les bambous sont donc constitués par des chaumes, y compris ceux dont les tiges ne sont pas creuses. Il faut admettre ce paradoxe en considérant que les chaumes pleins sont en fait des chaumes creux dont les parois se sont tellement épaissies qu'elles ont absorbé tout le vide intérieur.

Le chaume provient du développement du turion (voir paragraphe 1.3.1.6) et de la pousse qui en fin de croissance émet des branches ramifiées qui porteront les feuilles. Le chaume, formé en quelques mois (2 chez les espèces tempérées, 4 chez les tropicales) ne grandit plus par la suite, ni en hauteur, ni en diamètre. Il a une durée de vie variable selon les espèces et les conditions locales, estimée en moyenne de 8 à 15 ans (chez *Phyllostachys pubescens* on a pu observer des chaumes toujours vivants après 30 ans. Gerald Bold, qui fut président de l'American Bamboo Society en citait un mort à 33 ans...)

Si les chaumes meurent de vieillesse, la souche reste vivante et produit chaque année de nouveaux chaumes de remplacement. Il n'est peut-être pas juste de dire que les chaumes meurent de vieillesse, au risque d'être accusé d'anthropomorphisme, on devrait dire qu'ils meurent d'athérosclérose, car c'est l'épaississement progressif des vaisseaux conducteurs de sève qui conduit jusqu'à l'obturation puis le dessèchement du chaume c'est-à-dire sa mort.

Ainsi une plantation de bambou sauvage (si elle n'est pas entretenue) comporte çà et là des chaumes morts parmi les vivants. C'est tout à fait normal, il ne faut pas en tirer de conclusion sur son état de santé comme on pourrait le faire d'un arbre dont une bonne partie des branches seraient mortes.

Une première approche nous porterait à dire que le chaume est au bambou ce qu'est le tronc à l'arbre. Ce terme spécifique aux graminées désigne l'axe principal aérien appelé aussi communément tige.

Généralement de section ronde plus ou moins parfaite et pourvu d'un diamètre de base plus important que celui de son sommet, la structure du chaume en elle-même est composée de cavités successivement entrecoupées de cloisons formant des nœuds. Ces cavités renfermant de l'air, sont de tailles variables suivant les variétés. Une coupe longitudinale permet de se rendre compte de ce phénomène. Certaines espèces ont des parois si épaissies que la cavité intermodale n'existe plus, le bambou est plein (*Dendrocalamus strictus* - Figure 2). On parle alors de bambou mâle, les autres, pourvus de cavités sont dits femelle. Rien à voir bien sûr avec la sexualité, d'autant plus qu'un bambou est porteur des deux sexes.



Figure 2: *Dendrocalamus strictus* - Chaumes pleins (S.Crouzet)



Figure 3 : *Phyllostachys* - Chaumes avec cavité entre chaque nœud

Ces nœuds, quant à eux, font office de membrane cloisonnant hermétiquement chacune de ces cavités (Figure 3). Ces membranes sont appelées diaphragme ou opercule. C'est à partir de ces nœuds sur la partie externe du chaume, que vont se développer les branches puis le feuillage.

Chaumes, branches et feuilles sont des indices incontournables dans la reconnaissance et l'appellation de certaines variétés. La palette impressionnante de couleurs de chaumes, la diversité d'aspect des nœuds permettent parfois, dès le premier coup d'œil, de reconnaître le genre, l'espèce et même la variété. Le nombre de branches partant du nœud est lui aussi une clé de tout premier ordre. Par exemple pour le genre *Phyllostachys* c'est imperturbablement deux branches que nous allons trouver. A condition cependant de faire abstraction des ramifications les plus basses où souvent une seule branche s'est développée.

La feuille, grâce à sa couleur, sa taille, sa forme et la manière dont elle est rattachée à la branche peut elle aussi être caractéristique et induire son état civil [4].

1.3.1.2 La fleur

Les bambous développent une inflorescence composée de plusieurs fleurs chacune pourvue de 3 à 6 étamines et d'un pistil. Ces fleurs ne dépassent pas 1,5 cm de long et ne présentent pas de couleur chatoyante d'où un effet décoratif très réduit. Il arrive souvent que la floraison soit si discrète qu'elle passe totalement inaperçue lorsqu'elle est sporadique (une quantité très faible de chaumes fleurissent). Les fleurs s'ouvrent de préférence le matin lorsque l'air est encore chargé d'humidité et la température pas trop élevée, ces conditions sont nécessaires pour une bonne pollinisation qui permettra la fructification.



Figure 4 : Fleurs de *Pleioblastus pumilus* (S.crouzet)



Figure 5: Graines en phase de germination (S.Crouzet)

1.3.1.3 Le fruit

Si la fleur est toujours de petite taille il n'en est pas de même du fruit qui peut chez *Melocana bacifera* par exemple atteindre la taille d'une orange. La plupart du temps cependant le fruit est un caryopse assez comparable au grain de blé, de riz ou d'avoine. Le bambou d'ailleurs peut être assimilé à une céréale puisque son caryopse peut être consommé par l'homme ou les animaux. Plusieurs centres de recherche agronomique axent leurs recherches sur ce point [5] : Trouver le ou les bambous ainsi que les conditions appropriées qui permettraient leur culture en vue d'en récolter les grains chaque année.



Figure 6 : Fruit du Bambou (S.Crouzet)

1.3.1.4 Le rhizome

Bien que poussant sous terre, il ne s'agit pas d'une racine, mais d'une tige. Il évolue entre la surface du sol où on le voit parfois émerger, et une trentaine de cm de profondeur. En règle générale plus le sol est léger ou perméable, plus le rhizome peut descendre, à contrario, plus le sol est lourd, plus il sera en surface. Ceci s'explique par le fait que le rhizome a besoin d'air pour respirer, il va donc se tenir dans des zones où l'air peut lui parvenir. Son aspect est comparable au chaume, pourvu d'une cavité bien plus étroite et de nœuds à intervalles plus rapprochés. C'est à partir de ces nœuds que se développent les racines, celles-ci ont l'épaisseur d'un spaghetti mais peuvent être beaucoup plus longues, jusqu'à plusieurs mètres parfois. Chaque nœud présente un bourgeon qui peut rester latent et ne jamais se développer, ou bien en se développant donner naissance soit à un turion qui produira un chaume soit un autre rhizome qui va étoffer le réseau souterrain. Pour *Phyllostachys edulis* (Moso) on a estimé que la densité de rhizome était de l'ordre de cent Km à l'hectare. L'extrémité du rhizome est pointue comme un turion, et comme lui recouverte de gaines protectrices. Pour les espèces de climat tempéré, la croissance des rhizomes se fait surtout en été. Il y a un ralentissement voire un arrêt en hiver, puis reprise l'année suivante. Pour les espèces de climat tropical, la croissance se fait en saison humide principalement. Sur le plan de la croissance le rhizome se distingue du chaume puisqu'elle est illimitée. Deux événements peuvent cependant venir la contrarier : L'un que l'on peut aisément imaginer, c'est la mutilation de la pointe due à un accident ou à un prédateur. L'autre plus inattendu, c'est la transformation du rhizome en turion puis en chaume. Cette modification intervient souvent quand le rhizome rencontre un obstacle au cours de sa croissance qui l'oblige à sortir de terre.

On observe parfois des "ponts" de rhizomes qui sortent de terre, ils prennent la forme d'anses. Les chaumes émanant des rhizomes ayant eu ce comportement sont peu différentes à l'œil nu. Cependant, une observation plus précise permet de les distinguer des autres, notamment sur le fait qu'ils sont moins bien « ancrés » en terre. Il est d'ailleurs fréquent de les voir basculer. Le professeur Francis Hallé de l'université de Montpellier a mis en évidence sur *Phyllostachys viridis* une progression du rhizome en reptation (ramper) ondulatoire dans un plan vertical qui explique les "ponts" ou "anses de sac à main" cités plus haut sans qu'il y ait eu d'obstacle en cause.



Figure 7 : Phyllostachys viridis - progression du rhizome en reptation (ramper) ondulatoire (S.Crouzet)
Ce mode de croissance et développement du rhizome est caractéristique des espèces dites traçantes ou leptomorphes. Ce sont généralement des bambous de climat tempéré.

D'autres espèces ont une croissance plus ramassée due au fait que le rhizome non seulement a souvent des entrenœuds très courts, mais en plus son extrémité ne tarde pas à se redresser pour sortir de terre et se transformer en pousse identique à celles sorties l'année précédente. Ces bambous poussant en touffe compacte sont dits cespiteux ou pachymorphes ils sont généralement tropicaux. Leur mode d'expansion racinaire, plutôt compact, indique qu'ils sont peu traçants. C'est ce type de bambou qui est historiquement apparu le premier sur la terre, le traçant n'est venu que plus tard.



Figure 8 : Pousse en touffe (S.Crouzet)

1.3.1.5 Les racines

On peut distinguer trois types de racines :

- Les racines de premier type ne sont pas vraiment des racines, elles sont à peine ébauchées (Figure 9). On peut les rencontrer chez certaines espèces, situées autour des nœuds à la base des chaumes. Ce sont les plus visibles puisque aériennes mais elles n'ont apparemment aucun rôle fonctionnel. Nous dirons que ce sont des vestiges ou des velléités de racines.
- Les racines de deuxième type sont partiellement visibles (Figure 10). Ce sont les racines qui s'insèrent à la base du chaume et permettent de l'ancrer solidement dans le sol. Elles jouent un rôle essentiellement mécanique de hauban. Si on fait l'expérience de les sectionner le chaume perd de sa stabilité et ne tardera pas à basculer sous l'effet du vent.
- Les racines de troisième type sont les plus importantes en nombre et en densité. Elles sont insérées en verticille au niveau de chaque nœud de rhizome et plongent plus ou moins profondément dans le sol où elles vont puiser l'eau et les éléments nutritifs. Elles n'excèdent pas quelques cm de diamètre mais peuvent avoir plusieurs mètres de longueur.



Figure 9: Vestiges de racines (S.Crouzet)



Figure 10 : Racines de 2nd type, aériennes (S.Crouzet)



Figure 11 : Racines souterraines (3ème type)

1.3.1.6 Le turion

C'est le nom donné à la jeune pousse qui sort tout juste de terre et qui peut être récoltée pour la consommation. Ainsi parle-t-on d'un turion de bambou comme on peut parler d'un turion d'asperge. Dès qu'il prend de la hauteur, il durcit et devient impropre à la consommation on ne parlera alors plus de turion mais de pousse. En fin de croissance, elle développera des branches qui, en se couvrant de feuille, constitueront le chaume feuillé. Le turion, dès son plus jeune âge, a la forme d'un cône. Lors de sa sortie de terre et au cours de son élongation, il est recouvert d'une gaine protectrice. Celle-ci de forme globalement triangulaire a des caractéristiques propres à chaque genre, espèce et même parfois variété. L'observation de ces gaines est très utile pour la détermination de l'espèce de bambou. C'est pourquoi elles sont indispensables dans les planches d'herbier. Elles sont en fait l'homologue des feuilles, il suffit pour s'en convaincre d'observer au sommet d'une pousse terminant sa croissance, l'évolution progressive des dernières gaines en premières feuilles.

Ces gaines, dures, fibreuses, de texture parcheminée ont une fonction protectrice essentielle. Elles recouvrent le cœur de la pousse, qui du fait de sa croissance rapide est constituée de cellules en constante et active multiplication. C'est donc un cœur tendre qui, sans les gaines, ne résisterait pas à l'assaut des prédateurs. Chaque gaine est insérée au niveau d'un nœud et accompagne l'entrenœud tout au long de sa croissance. Lorsque celle-ci est achevée, le bois est suffisamment dur pour assurer lui-même sa protection. La gaine peut alors se détacher et tomber au sol. Mais ce n'est pas toujours le cas, certains bambous les conservent sur leurs chaumes plusieurs années.

Pour se rendre compte du rôle de la gaine dans le développement de la pousse, il suffit de supprimer en la découpant à la base une gaine qui protège un entrenœud en cours de croissance. Immédiatement la croissance de cet entrenœud est arrêtée. Les autres continuent comme si de rien n'était. Cette particularité est utilisée au Japon par les créateurs de bonsaï. Ainsi pour réaliser un bambou en miniature il faut lors de la croissance des pousses supprimer chaque jour sur chacune une gaine à partir de la base. Chaque entrenœud sera donc réduit du cinquième ou du dixième de sa hauteur (selon le stade d'intervention) et globalement les chaumes seront aussi réduits d'autant dans leur taille. Au demeurant le diamètre n'aura pas été modifié.

A chaque bambou correspond une période de sortie des turions. En règle générale, en climat tropical, la période de sortie est liée aux saisons des pluies plus qu'à la température.

1.3.2 Bambusa vulgaris

1.3.2.1 Distribution

Natif :

Cambodge, Chine Centre-Sud, Laos, Myanmar, Thaïlande, Vietnam

Introductions :

Aldabra, Andaman Is., Ascension, Assam, Bangladesh, Benin, Archipel Bismarck, Brazil Northeast, Brazil South, Brazil Southeast, Brazil West-Central, Burkina, Cameroun, Caroline Is., Cayman Is., Archipel des Chagos, Colombie, Comores, Cook Is., Costa Rica, Cuba, République dominicaine, East Himalaya, Equateur, El Salvador, Floride, Ghana, Guadeloupe, Guatemala, Guinée, Golfe de Guinée Is., Guyane, Haïti, Hawaï, Honduras, Inde, Côte d'Ivoire, Jamaïque, Jawa, Leeward Is., Lesser Sunda Is., Libye, Madagascar, Malaisie, Maldives, Mali, Martinique, Moluques, Maurice, Mexique Central, Golfe du Mexique, Mexique Nord-Est, Mexique Sud-Est, Mexique Sud-Ouest, Nansei-shoto, Nigéria, Nouvelle-Guinée, Nicaragua, Nicobar Is., Nigéria, Ogasawara-shoto, Panamá, Pérou, Porto Rico, Rodrigues, Rwanda, Réunion, Seychelles, Sierra Leone, Caroline du Sud, Mer de Chine méridionale, Sri Lanka, Sulawesi, Togo, Tonga, Trinité-Tobago, Venezuela, Wallis-Futuna Is., Windward Is., Zaïre ...

1.3.2.2 Caractéristiques :

Ce grand bambou leptomorphe (cespiteux – non traçant) forme des touffes dressées atteignant 20 m de haut. Les feuilles sont en forme de lance avec une marge rugueuse (30 cm de long, 4 cm de large). Environ 8 à 9 feuilles sont disposées le long de chaque branche. Les jeunes feuilles sont jaune vif, virant au vert puis au brun.

Les tiges ligneuses et aériennes mesurent jusqu'à 4 à 10 cm de large.

Les fleurs, minuscules, appelées fleurons sont disposées en épillets oblongs et aplatis (1 à 2 cm de long). Chaque épillet contient 4 à 12 fleurons fertiles.

Les fruits font une graine quand il y a fécondation, une fois secs et indéhiscent sont appelés grains.



Figure 12 : De haut en bas et de gauche à droite : Vue d'ensemble, turion, chaume, feuille et fleurs de *Bambusa Vulgaris*

1.3.2.3 Utilisations ethnobotaniques :

Alimentation : Les pousses immatures sont consommées comme légume.

Médecine : A Trinité-et-Tobago, les feuilles sont utilisées pour traiter la diarrhée ou les parasites chez les chiens.

Bois et produits dérivés: Les tiges de bambou sont utilisées pour fabriquer des clôtures, des huttes, des bateaux, des meubles et du papier. Les tiges fendues sont utilisées pour fabriquer des balais, des paniers et des instruments de musique.

Industrie : Pour la fabrication de pâte à papier, de charbon pour l'énergie calorifique ou pour le traitement de l'eau.

Construction : Le chaume est utilisé de différentes manières. Il nécessite un savoir-faire adapté [6] (voir partie 1.8).

1.3.3 Dendrocalamus giganteus

1.3.3.1 Distribution

Natif :

Assam, Chine Centre-sud, Himalaya oriental, Inde, Laos, Myanmar

Introduction principale :

Bangladesh, Cambodge, Comores, Équateur, Java, Petites îles de la Sonde, Madagascar, Malaisie, Maurice, Népal, Porto Rico, Seychelles, Sri Lanka, Sumatra, Taïwan, Thaïlande, Trinité-Tobago, Vietnam

1.3.3.2 Caractéristiques :

Bambou géant leptomorphe (cespiteux- non traçant), atteignant en moyenne 30 mètres de haut, les grandes tiges peuvent être les plus grandes du monde (35 m de haut, pour 30 cm de diamètre). Les chaumes vert terne à vert bleuâtre foncé sont de 2 à 2,5 cm d'épaisseur et ont des entre-nœuds espacés de 35 à 45 cm. Les jeunes chaumes sont recouverts d'une couche cireuse blanche qui disparaît à mesure qu'ils mûrissent.

Ramifications latérales dendroïde, il y a une branche dominante, plus mince que la tige. Les gaines des chaumes sont caduques, coriace, violettes, pubescent, très poilues avec des poils brun foncé. Ligule de la gaine des chaumes de 6-12 mm de haut, cilié et denté. Limbe de la gaine des chaumes lancéolé. Il y a 5 à 15 feuilles par branche. La ligule a une membrane sans cil ; 3 millimètres de long ; érodé. Base du limbe avec une brève connexion en forme de pétiole sur la gaine. Les limbes lancéolés mesurent 15 à 45 cm de long et 30 à 60 mm de large. La nervation du limbe avec des nervures transversales est bien distinctes.

Pour les fleurs, cette espèce fleurit environ une fois tous les 40 ans.

Inflorescence bractéifère, regroupés aux nœuds, en grappes étoilées de 2 à 2,5 cm de long, elle est dense avec des bractées sous-jacentes en glume¹, des bourgeons axillaires² à la base de l'épillet et sans feuilles entre les grappes. Les épillets sont fertiles et sessiles.

L'épillets comprenant 4 à 8 fleurons fertiles, lancéolés et comprimés latéralement de 12 à 15 mm de long et 3 à 4 mm de large. Lors de la rupture à maturité ils se désarticulent sous chaque fleur fertile

A l'état sauvage, on le trouve sur les pentes ou les hauts plateaux tropicaux humides jusqu'à 1 200 m d'altitude.

¹ Enveloppe de l'épillet (épis secondaire, qui en groupe sur un axe central forme l'épis) des graminées.

² Qui est situé à l'aisselle d'une feuille



Figure 13: haut en bas et de gauche à droite : Vue d'ensemble, turion, chaume, feuille et fleurs de *Dendrocalamus giganteus*

1.3.3.3 Utilisations ethnobotaniques :

Horticulture : En chine, ce bambou est utilisé en culture en pot. Il est aussi cultivé en hydroponie dans de grand vase de verre [7].

Alimentation : Les pousses de ce bambou peuvent être consommées après rinçage, cuisson, séchage et préparation [8]. Il est dit que la taille importante des jeunes pousses leur donne la capacité de nourrir une famille durant 3 jours [6].

Construction : Il est particulièrement apprécié en construction pour ces dimensions importantes qui le rendent malgré tout difficile à manipuler, comparé aux autres espèces plus légères. En chine, il est utilisé pour les échafaudage, ou en poteaux et poutres pour la construction d'habitats ou de bâtiments publiques [8]. A la Réunion, on le retrouve pour le transport de l'eau, la fabrication de lattes [6].

1.3.4 *Guadua angustifolia*

1.3.4.1 Distribution

Natifs :

Colombie, Équateur, Pérou, Trinité-Tobago, Venezuela

Introduction principales :

Argentine Nord-Est, Argentine Nord-Ouest, Brésil Sud, Brésil Sud-Est, Galápagos, Guyana, Paraguay, Uruguay

1.3.4.2 Caractéristiques :

C'est un leptomorphe dont les rhizomes sont traçants, ce qui est un cas rare. Les chaumes dressés de 20 à 30 mètres de long font 10 à 13 cm de diamètre. Il a des épines sur les nœuds. Les entrenœuds des chaumes cylindriques font en moyenne 20 cm de long. Les ramifications sont de type latérales dendroïde avec un départ de trois branches trois dont une dominante ; plus mince que la tige. Les gaines des turions des chaumes sont pubescentes³ ; très poilu avec des poils brun foncé, sans oreillettes. Le limbe de la gaine des chaumes triangulaire est érigé et pubescent avec une absence de poils à la gorge de la gaine. La ligule a une membrane comportant des cils. Base du limbe avec une brève connexion en forme de pétiole à la gaine ; pétiole glabre. Le limbes lancéolés ou oblongs, de 10 à 20 cm de long et de 6 à 12 mm de large. Il y a une nervation du limbe sans nervures croisées.

Inflorescence bractéifère, maigre de 5 à 10 cm de long, relâché, avec des bractées sous-jacentes en glume ; avec des bourgeons axillaires à la base de l'épillet. Les épillets sont fertiles et sessiles.

Les épillets comprennent 6 à 12 fleurons fertiles, avec des fleurons diminués à l'apex. Épillets linéaires, droit ou courbé, comprimé latéralement mesurent 30 à 60 mm de long et 4 à 5 mm de large. Lors de la rupture à maturité, ils se désarticulent sous chaque fleur fertile.

³ Couvert de poils fins et courts, de duvet.



Figure 14 : haut en bas et de gauche à droite : Vue d'ensemble, turion, chaume, feuille et fleurs de *Guadua augustifolia*

1.3.4.3 Utilisations ethnobotaniques :

Construction : C'est l'un des bambou les plus utilisés pour la construction, notamment en Amérique du Sud et particulièrement en Colombie. Son diamètre régulier sur (en moyenne) 15m, ses propriétés physiques performantes en font un matériaux particulièrement adapté à la construction [9]. On le retrouve en poteau, poutre, structure autoportée, habillage en façade, structure et composition de parois intérieur et extérieur [10].

1.4 Culture et Récolte

Avant de les cultiver pour être exploités, les bambous doivent être multipliés soit directement en terre soit en pot.

Pour la multiplication des bambous cespiteux pachymorphes (non traçant), des genres *Bambusa*, *Dendrocalamus* et *Guadua*, le procédé le plus simple à mettre en œuvre, à maîtriser et le plus rentable est le bouturage de sections de chaumes. C'est celui que nous retenons car il a fait largement ses preuves.

Il est aussi possible de le faire par semis lorsque l'on a un stock de graine viable dont la provenance est connue. C'est un procédé plus aléatoire car le matériel génétique est variable et une sélection des jeunes plants doit être faite à la suite de 2 à 3 années de culture, d'autre part cela prend plus de temps pour constituer des jeunes plants vigoureux que le bouturage.

Enfin, la culture en laboratoire *in vitro* est une dernière possibilité reconnue pour être particulièrement coûteuse. Nous ne retenons pas ce procédé ici, qui à notre sens n'est pas adapté.

De manière générale, cette partie a pour but de détailler différentes techniques de culture et de récolte et n'a pas pour but de proposer une stratégie de développement d'une espèce sur les territoires concernés par l'étude. Néanmoins, il est possible de proposer quelques critères, en fonction de ce qui a été présenté plus haut, permettant de faire un choix entre les systèmes de culture, si elle est envisagée :

- Dimensions des chaumes et de leurs racines,
- Mode de croissance,
- Présence actuelle sur le territoire

1.4.1 Le bouturage de chaume

La bonne saison pour faire le bouturage est celle qui coïncide avec les sorties des nouvelles pousses (les turions) et celle du début de la saison des pluies, saison la plus humide de l'année. C'est donc à partir de mi-avril et du mois de juin qu'il faut faire les prélèvements des tiges pour extraire les sections à bouturer. Les chaumes âgés de 2 à 3 ans doivent être coupés en leurs bases à l'aide d'une machette, une scie adaptée ou d'une tronçonneuse. Chaque section de chaume, comportant un seul nœud et des branches, doit être issue du second tier de la tige. Dans cette section du second tier on peut extraire, selon la longueur de la tige, entre 5 et 15 boutures. Toutes les branches doivent être coupées à environ 20 à 30 cm du nœud. Par la suite il est primordial de faire une découpe de ces tronçons de boutures avec un outil adapté qui ne va pas fendre ni écharper le chaume, pour cela nous recommandons l'utilisation d'une machette, scie manuelle ou scie circulaire avec au minimum 90 dents en tungstène voire plus. Cette opération de récolte des tiges, de taille des branches et découpe en section, doit être réalisée rapidement pour être mise en terre le même jour. Selon l'exposition au plein soleil et le taux d'hygrométrie, s'il est bas, il est nécessaire de les protéger avec un voile humide afin de limiter l'évapotranspiration.

Pour la phase de mise en pleine terre il faut constituer une butte d'environ 25 à 30 cm de haut dans laquelle on plante chaque tronçon à la verticale ou à l'horizontale. La terre doit être drainante au pH légèrement acide, de type alluvionnaire limoneuse si possible et riche en composés nutritifs organiques. Nous ne conseillons pas l'utilisation d'hormones de croissances.





Figure 15 : Illustration de la méthode de bouturage (S.Crouzet)

Pour la culture en pot il faut un substrat léger bien drainant à base de tourbe blonde et de compost végétal auquel on ajoute de l'engrais organique de préférence. L'utilisation d'engrais chimiques incorporés et par la suite en application de surface permet d'obtenir plus rapidement des sujets de plus grandes tailles, plus de tiges et un système racinaire et rhizomateux plus conséquent. Est recommandé l'utilisation d'engrais

organique complet pour un meilleur respect de l'environnement avec ce type de formulation 8-5-6: <https://frayssinet.fr/fr/wpcproduct/solesia-f2/>

Lorsque les boutures sont enterrées à l'horizontale il faut que le coté du chaume qui comporte le départ des branches soit placé vers le haut à environ 5 cm sous terre. Lorsque qu'elles sont positionnées à la verticale le nœud doit lui aussi être enterré sous 5 cm de terre ou de substrat.

Il est important de bien tasser la terre ou le substrat et par la suite d'arroser abondamment. En fonction des précipitations il faut arroser régulièrement afin de garder la terre légèrement humide les 3 à 5 premiers mois, par la suite réguler les apports en eau en fonction des besoins. Lorsque les feuilles s'enroulent sur elles-mêmes c'est le signe d'un manque d'eau. Quand les pointes des feuilles noircissent et les le feuillage jaunissent ce sont les symptômes de trop d'eau et/ou d'un mauvais drainage.

Quelques jours ou tout au plus 2 à 3 semaines au maximum après la mise en terre, des turions vont apparaître, c'est le signe que les boutures sont entrainés de prendre. Des nouvelles feuilles vont apparaître sur les branches initiales taillées et des racines vont se former au niveau du nœud.

Pour la culture en terre la transplantation des boutures doit se faire si le développement des turions et du système racinaire est satisfaisant 10 à 11 mois plus tard ou alors au plus tard 22 à 23 mois. Si elle est faite en période de saison sèche, il est primordial de bien arroser avant et rabattre les tiges et le feuillage de moitié.

Pour la culture en pot, le repotage peut être fait quasiment à n'importe quelle période à partir du moment où le système végétatif (tiges, branches, feuillage et racine) est bien développé, ne pas attendre la saturation de racines et rhizomes dans le pot. Il est vivement conseillé de faire la culture en pot sous ombrage les deux premières années.

1.4.2 Culture en pot

La culture en pot nécessite des infrastructures fiables concernant l'approvisionnement en eau. La ressource en eau est un élément essentiel que nous devons respecter et préserver pour l'environnement. Par le passé et malheureusement encore de nos jours l'eau est gaspillée, utilisé à mauvais escient, avec des procédés de captage et de restitution qui vont à l'encontre du bon sens commun. Il est donc primordial avant de commencer la culture en pot de bien choisir le lieu de culture pour installer une pépinière. Les bambous ont besoin d'eau tout au long de l'année, qui plus est ils sont cultivés dans des contenants de faible volume par rapport à leur masse foliaire et des substrats légers à base de tourbe qui sont très drainants et qui se dessèchent rapidement.

Une fois que l'on s'est assuré que la ressource en eau est bien disponible et que le prélèvement n'aura pas de conséquences néfastes, il est nécessaire que les parcelles de culture hors-sol aient la capacité d'absorber l'eau à chaque arrosage voire de collecter l'eau dans un bassin de rétention pour être réutilisée.

Pour les boutures et les jeunes plants âgés jusqu'à 3 ans l'arrosage par aspersion est celui qui convient le mieux. Ce sont des pots qui au minimum font 2 à 3 litres et au maximum 10 à 15 litres.

Pour les pots au-delà de 10 à 15 litres concernant des bambous de 3 ans et plus l'arrosage goutte-à-goutte est à privilégier.

Concernant les dimensions des pots, pour les bambous cespiteux, il faut qu'ils soient de section ronde, d'un diamètre adapté et ne pas utiliser des pots pour les plants forestiers qui sont plus hauts que larges. Les bambous tropicaux, considérés dans cette étude, ont un développement concentrique et des rhizomes proche de la surface du sol, de ce fait il faut par exemple :

-un pot de 7 litres un diamètre de 24 cm pour une hauteur de 20 cm.

-un pot de 15 litres un diamètre de 30 cm pour une hauteur de 26 cm.

-un pot de 30 litres un diamètre de 40 cm pour une hauteur de 35 cm.

L'idéal pour le substrat de culture est un mélange de terre végétale, de compost organique le tout doté d'un complexe argilo-humique approprié avec un engrais organique complet. La quantité d'engrais est à adapter en fonction des conditions de culture liées au développement de chaque espèce de bambous. Selon les cas la variation d'engrais à apporter va du simple au double, de 10 à 20 Kg par mètre cube. Il est en de même pour les quantités à apporter en surfaçage lors du cursus de culture. Prévoir deux surfaçages par an. Les symptômes classiques d'un manque d'engrais sont le jaunissement, les carences du feuillage, peu ou pas de sortie de turions, avortement en cours de croissance des turions, faible développement des rhizomes et racines. Souvent un substrat à base de tourbe blonde est utilisé car plus facile à maîtriser concernant les apports d'engrais chimiques, de plus étant léger cela facilite la manutention. Nous ne recommandons pas cela. Cette culture s'est fortement développée pour obtenir des rendements satisfaisants qui puissent convenir aux exigences de perception de la qualité des plants de bambous des consommateurs. Un parallèle peut être fait avec les fruits et légumes et le monde de la consommation moderne qui a impliqué des dérives défavorables à l'environnement.

Pour un meilleur contrôle du développement végétatif et de l'arrosage il est préférable de faire des cultures hors sol abrité du vent. Pour les jeunes plants une structure d'ombrage avec un indice de 50 % des filets est vivement conseillé.

Concernant le cursus de rempotage il est nécessaire de repoter à une cadence adaptée en fonction du développement global (rhizomes, racines et quantité de tige). Une moyenne d'un rempotage dans un contenant du double du volume tous les 18 à 24 mois tout au plus est recommandé.

Pour la culture en pépinière ayant pour vocation la plantation en terre de sujets destinés à une exploitation agricole et/ou sylvicole il n'est pas nécessaire d'aller au-delà de la contenance 15 à 20 litres.

Pour celle destinée au marché de l'ornemental des jardins des collectivités ou privée il est possible d'aller jusqu'à des contenances de 1000 ou 1500 litres avec des sujets mesurant 10 à 12 mètres de haut. Pour cela il faut prévoir des supports de culture pour haubaner chaque pot car le centre de gravité est haut. Il faut aussi se munir d'engin motorisé de levage pour toutes les opérations de manutentions.

1.4.3 Culture en pleine terre

La culture en pleine terre à les mêmes exigences respectueuses de l'environnement que celle en pot. La ressource en eau doit être disponible tout au long de l'année, l'étude de la pluviométrie est essentielle.

Au niveau pédologique il faut privilégier les terres bien drainantes, riches en éléments minéraux et organiques. Bien souvent les bambous se développent bien dans leur espace naturel proche des cours d'eau et dans les régions montagneuses où les précipitations et le niveau hygrométrique sont importants.

Pour l'arrosage en période de sécheresse il est préférable d'utiliser un réseau d'irrigation par tuyau poreux ou goutte-à-goutte. Le système par aspersion peut aussi être adapté en fonction des autres cultures concomitantes. Le plan de fertilisation est directement lié aux conditions de culture et d'exploitation, en cas de carence prévoir de faire des analyses de terre et d'ajuster en fonction de cela avec un apport d'engrais organique.

Les différents labels ou certifications ont tous leurs avantages et inconvénients, c'est malheureusement parfois voire trop souvent des arguments de marketing et de management qui ne peuvent pas revendiquer une culture totalement respectueuse de type permaculture. Nous ne pouvons pas à ce jour être à même d'en privilégier un plus qu'un autre, voici une liste non exhaustive :

Agriculture Biologique, MPS, Ecocert, FSC, PEFC , HVE, ISO, Ecolabel avec l'Afnor.

Pour réaliser une culture adaptée à être exploitée il est primordial avant d'établir le plan d'implantation de déterminer la ou plutôt les différentes possibilités de valorisation, voici les principales :

- Alimentaire pour les humains récolte des turions
- Alimentaire pour les animaux récolte des branches et feuillage (fourrage frais ou sec)
 - o Cette voie de valorisation concerne peu les espèces vues plus haut, en dehors de leurs jeunes pousses et feuillages verts.
- Pharmaceutique, parapharmaceutique, compléments alimentaires, soins du corps (champoing, savon ...), récolte de l'ensemble selon les besoins
- Construction récolte des chaumes
- Artisanat récolte des chaumes et parfois des branches
- Pieds mères pour le prélèvement de bouture
- Industrie pour l'extraction de fibre récolte des chaumes
- Industrie pour la fabrication de plancher ou planches/panneaux en lamelle brute (massif) ou en copeaux (aggloméré) récolte des chaumes

Il convient également d'évaluer pour chaque espèce le risque invasif et les précautions à prendre pour limiter ce risque.

1.4.4 L'enherbement, les ravageurs et les auxiliaires

Il est important de prendre conscience qu'il est possible de cultiver les bambous sans faire aucun traitement phytosanitaire. Le respect de l'équilibre de la nature et de ses bienfaits nous incite à être humble, et surtout mieux l'observer telle qu'elle fonctionne et interagit. Dans cette optique, la gestion des ravageurs par l'introduction ou le maintien d'insectes auxiliaires et une technique en expansion. En effet, cette technique de régulation est un fait validé par de nombreux chercheurs à travers le monde, et notamment par les entomologistes [11]. Pour le cas précis des Antilles, on retrouve plusieurs éléments assez facilement dans la littérature scientifique [12], [13], et notamment appliqués à différentes cultures agricoles.

Concernant l'enherbement pour les cultures en pleine terre, il est préférable de laisser pousser les adventices pour favoriser la diversité naturelle (prévoir de les couper une à deux fois par an). Il en va de même pour les abords des parcelles de cultures en pot. Pour ce qui est des herbes qui vont se développer dans les pots de culture prévoir 2 à 3 désherbages manuel par an.

Les prochains éléments de cette partie d'étude des ravageurs et auxiliaires sont principalement issu d'une étude réalisée au sein des Pépinières de la Bamboueraie (30140 Anduze), réalisée notamment avec Edith Mühlberger, entomologiste de la société In'flor [11]. Parmi la liste fournie ici, certains insectes peuvent être présents dans les zones tropicales (les recherches sur le site de l'INPN⁴ ne permette pas de statuer sur cette question, néanmoins une bonne partie des insectes sont considérés comme importé vers la métropole, et notamment à cause du bambou).

Ainsi, pour les cultures en pot et pleine terre voici les principaux insectes qu'il est important de connaître et savoir identifier.

1.4.4.1 Les Pucerons :

Ces insectes disposent d'un appareil buccal de type piqueur suceur. A la recherche de l'azote présent dans les feuilles, ils utilisent leur stylet pour percer les tissus végétaux et aspirer les liquides internes. Ces liquides contiennent également du sucre qu'ils n'apprécient pas particulièrement et qu'ils vont rejeter sous forme de miellat. Sur ce miellat, les champignons saprophytes seront favorisés provoquant la fumagine. Elle entrave la respiration et réduit l'assimilation chlorophyllienne de la plante en bloquant son accès à la lumière.

Le développement des bambous sera plus impacté par la fumagine que par les piqûres elles-mêmes, mais cet impact est très limité. Ces arthropodes peuvent également être vecteurs de maladies virales mais, à ce jour, il n'existe pas de danger par rapport à ces bioagresseurs sur les bambous.

1.4.4.1.1 *Takecallis arundicolens* (Clarke, 1903) et *Takecallis arundinariae* (Essig, 1917)

Les pucerons *Takecallis arundicolens* et *Takecallis arundinariae* sont des ravageurs inféodés aux bambous.

Présentation :

Takecallis arundicolens Adulte jaune à gris pale uni avec une cauda noire. *Takecallis arundinariae* Adulte jaune à gris pale mais avec deux alignements de points noirs sur l'abdomen et le thorax et une cauda jaune.

Aire de répartition :

⁴ Inventaire National du Patrimoine Naturel.

Toutes les espèces du genre des Takecallis proviennent d'Asie du sud-est, Corée, Chine, Japon, Russie de l'est. Elles ont été introduites et sont maintenant présentes en Europe (France, Allemagne, Irlande, Italie, Portugal, Espagne, Suisse, Ukraine), aux Etats-Unis, en Australie, Nouvelle-Zélande et en Afrique du Sud.

1.4.4.1.2 *Melanaphis bambusae* (Fullaway, 1910)

Le puceron *Melanaphis bambusae* est un ravageur inféodé aux bambous mais au Japon (son pays d'origine), il peut réaliser une phase sexuée sur *Photinia villosa*.

Présentation :

L'adulte de ce puceron est brun à brun-gris. Son corps est recouvert de sécrétions cireuses.

Aire de distribution :

Il est originaire d'Asie et plus particulièrement du Japon. Il a été introduit en France.

1.4.4.2 L'acarien

1.4.4.2.1 *Schizotetranychus celarius* (Banks, 1917)

Présentation :

En France, on retrouve deux acariens inféodés aux bambous : *Schizotetranychus celarius* et *Schizotetranychus longus*. Visibles à l'œil nu, leur longueur étant légèrement inférieure à 0,5 mm, ils sont jaunâtres avec quelques ponctuations latérales sombres. Il y a un dimorphisme sexuel assez marqué avec des mâles plus petits.

Symptômes :

Les acariens du bambou sont identifiables par les toiles qu'ils fabriquent sur le revers des feuilles sous lesquelles ils s'abritent pour se développer. Protégés, ils percent les cellules des feuilles pour se nourrir du contenu de leur parenchyme. Les dommages peuvent se présenter sous la forme de mouchetures légères et de taches de décoloration sur la face supérieure des feuilles. Ils peuvent altérer la photosynthèse et réduire la vigueur des plantes. Les plantes endommagées peuvent perdre leurs feuilles. *Schizotetranychus celarius* superpose 5 à 6 couches de fils de soie pour s'abriter. Chaque colonie a des toilettes communes à l'extrémité de la toile et à l'opposé des œufs et larves. Il y a une très nette préférence pour les jeunes pousses.

Aire de distribution :

Schizotetranychus celarius Provient d'extrême orient (Chine, Corée, Japon) et a été introduit en Europe (France, Belgique, Pays bas, Grande bretagne). Il a également été importé aux Etats-Unis en 1917 et en Australie.

1.4.4.2.2 La cicadelle

Alebra sp. (Young 1957)

Présentation :

Cette petite cicadelle jaunâtre mesure environ 4 mm. Elle est reconnaissable à son vol : lorsqu'on agite la plante sur laquelle elle est posée, on peut la voir s'envoler très rapidement et aussitôt se reposer un peu plus loin. Par son caractère très mobile. Elle échappe plus facilement à ses prédateurs, les auxiliaires sont moins efficaces. Il n'existe pas de super prédateur de la cicadelle, mais il y a un panel d'auxiliaires qui

permet de la contrôler. Dans l'exploitation de Thoiras dans le Gard (Pépinières de la Bambouseraie) qui n'est plus traitée depuis 10 ans les cicadelles sont présentes mais beaucoup moins que par le passé ce qui signifie que des auxiliaires régulent la population

Symptômes :

Ces insectes disposent d'un appareil buccal de type piqueur-suceur. Grâce à leur rostre, ils percent les cellules végétales pour se nourrir de la sève qu'elles contiennent. Ces piqûres d'alimentation laissent ensuite des taches de décoloration sur les feuilles des bambous. Les dégâts sont donc seulement esthétiques et la présence de cicadelle ne gêne absolument pas le développement des plantations de bambou.

Aire de distribution :

Cette cicadelle est originaire d'Inde. Elle a été observée en Italie et en France métropolitaine, d'où elle a été importée de Chine. Ici, on peut considérer que si des variétés de bambous ont été importées aux Antilles dans des périodes proches, alors l'insecte y est aussi présent.

1.4.4.3 Les coccinelles

Chez les coccinelles, larves et adultes sont des prédateurs plus ou moins spécifiques d'un groupe de ravageurs. Certaines ne mangeront que des pucerons, d'autres des acariens, des cochenilles ou des œufs d'insectes, des champignons et même des plantes... Les adultes peuvent également manger du pollen, du miellat et de même que les larves peuvent également être cannibales.

Les Œufs :

Les œufs de coccinelles sont ovales et jaune-orange, ils sont pondus généralement groupés sur les feuilles, à proximité des colonies de pucerons.

Les Larves :

Les larves ont un corps et des pattes allongées mais elles peuvent présenter des couleurs variées. C'est le stade de leur développement où les coccinelles sont les plus voraces.

Nymphes :

Les nymphes sont immobiles et fixées sur ou sous les feuilles. Durant cette période les coccinelles ne se nourrissent pas.

Adultes :

Au stade adulte chaque espèce de coccinelles a une taille, un régime alimentaire et une coloration bien précise.

Coccinella septempunctata : coccinelles à 7 points

C'est l'espèce dominante en Europe et la première apparaît au printemps. Taille adulte entre 6 et 9 mm à l'état adulte, larve jusqu'à 12mm à son dernier stade. La larve consomme jusqu'à 60 pucerons par jours. Rouge avec 7 points repartis en 1-4-2. Une, plus rarement deux générations par an et une période de repos estivale (Août),

une génération tardive (septembre-octobre) en climat méditerranéen. Avril-septembre, elle reprend son activité adessusde12°C. De mai à juin, elle se trouve sur les strates herbacées (0-50 cm).

Propylea quatuordecimpunctata : coccinelle à damier (14 points)

Taille adulte 4 mm, elle consomme environ 30 pucerons par jour. Elle présente de deux à quatre générations par an avec des périodes de repos hivernale à l'état d'adulte. De mai à juin elle se trouve sur les strates arbustives, arborés ou herbacées.

Harmonia axyridis : coccinelle asiatique

Cette coccinelle a été introduite de Chine vers la France métropolitaine pour la lutte biologique à la fin des années 80 pour lutter contre les pucerons car elle est vorace mais surtout parce qu'elle se multiplie très vite et plusieurs fois par an. Cette caractéristique en fait dorénavant une espèce invasive qui tend à faire disparaître les espèces européennes de coccinelles. Taille adulte 6 à 9 mm, cette espèce à un polymorphisme important. On trouve donc des individus de différentes couleurs. Elle est reconnaissable par la « patte de chat » sur son pronotum. Elle consomme environ 70 pucerons par jour et présente plusieurs générations par an. La larve peut consommer jusqu'à 400 pucerons au cours de son développement.

Scymnus sp.

Taille adulte 3 mm, ces coccinelles sont souvent inféodées à un insecte particulier en fonction de leur espèce. Cette famille est donc susceptible de se nourrir d'un grand panel d'insectes (Pucerons, Cicadelles...). Elle présente une ou deux générations annuelles et une périodes de repos hivernal à l'état adulte. Les larves sont blanches et ressemblent à des cochenilles farineuses mais elles sont beaucoup plus mobiles que celles-ci.

Psyllobora vigintiduopunctata : coccinelle à 22 points

Taille adulte 4 mm, qualifiée de mycophage, elle se nourrit exclusivement de différentes espèces d'oïdiums, dont celui qui se développe sur les feuilles des érables du Japon par exemple. Seuls les points sur les élytres (11 sur chaque) sont pris en compte pour lui donner son nom.

A savoir que l'on dénombre aujourd'hui 18 espèces de coccinelles sur le territoire Martiniquais [12].

1.4.4.4 Les syrphes

Comme les coccinelles, les syrphes sont des prédateurs plus ou moins spécifiques d'un groupe de ravageurs. Certaines ne mangeront que des pucerons, d'autres des acarins, des cochenilles et même ne se nourriront que de pollen... Les larves sont prédatrices et les adultes se nourrissent de pollen et de nectar. Très proches morphologiquement des guêpes (rayures noires et blanches sur l'abdomen), les adultes sont identifiables à leur vol stationnaire à proximité des fleurs.

Les larves :

Les larves de syrphes s'apparentent à de petits asticots, elles n'ont pas de pattes. Certaines larves sont lisses, d'autres avec des épines, leurs couleurs peuvent varier de jaunes à vert voir brun. Les larves qui se nourrissent de cochenilles adoptent aussi un camouflage blanc pour passer inaperçues parmi leurs proies.

Les nymphes :

Les nymphes ont la forme d'une goutte, généralement de couleur brune et sont fixées sur les feuilles ou les tiges.

Les adultes :

Les syrphes ressemblent à des guêpes mais elles n'ont que qu'une paire d'ailes (contrairement aux guêpes qui en ont deux). Elles sont jaunes et noires à rayures, ou totalement noires. Les premiers adultes apparaissent très tôt au printemps et déposent leurs œufs près des colonies de pucerons. Une femelle peut pondre 500 à 1000 œufs. Les larves se développent en 10 à 20 jours avant de se nymphoser. Elles présentent jusqu'à 7 générations par an. Certaines espèces hivernent au stade adulte et d'autres aux stades nymphal ou larvaire. Certaines présentent une diapause larvaire en été. Leur activité est intense de mai à juin puis en septembre. La plupart des espèces sont floricoles au stade adulte. Durant leur développement larvaire, elles consomment entre 400 et 700 pucerons.

1.4.4.5 Les chrysopes

Les larves de chrysopes sont prédatrices de pucerons, de divers petits insectes et acariens. Deux genres ont été identifiés en pépinière : *Chrysopa* Sp et *Chrysoperla* Sp.

Les œufs :

Les œufs de chrysopes sont la plupart du temps ovales, verts clairs, et perchés sur un pédoncule d'environ 1 cm. Ils sont pondus directement sur les feuilles.

Les larves :

Les larves possèdent de longues mandibules qui forment une pince leur permettant d'aspirer leurs proies.

Les cocons :

La métamorphose a lieu dans un cocon de soie fixé à la feuille.

Les adultes :

Les chrysopes adultes sont de couleur verte, leurs ailes sont transparentes et brillantes. Suivant les espèces, les chrysopes ont de deux à cinq générations annuelles. Les femelles commencent à pondre très tôt dès la fin de l'hiver. Les œufs sont suspendus à des tiges pour se protéger des prédateurs et pour que les larves cannibales ne se mangent pas entre elles. Ils hivernent au stade adulte. Durant son développement une larve peut consommer jusqu'à 500 pucerons ou 1000 acariens. Au stade adulte les chrysopes se nourrissent de miellat, pollen et nectar.

1.4.4.6 Les punaises prédatrices

Elles appartiennent à l'ordre des hémiptères et du sous-ordre des hétéroptères.

Deraeocoris ruber* et *Deraeocoris punctum

Elles sont de la famille des Miridae. Les mirides présentent deux à trois générations annuelles. L'hivernation a lieu à l'état d'œuf pour ces espèces. Elles peuvent consommer jusqu'à 200 pucerons durant leur développement larvaire et d'autres proies (psylles, acariens, cochenilles, cicadelles...).

Anthocoris nemoralis

De la famille des Anthocoridae, elle présente également deux à trois générations annuelles. L'hivernation a lieu à l'état d'adulte. Une larve peut consommer durant son développement, entre 300 et 600 acariens et de 100 à 200 pucerons. Cette espèce peut également se nourrir de cicadelles et de psylles.

Les adultes sont donc polyphages mais à préférence zoophage, de cette manière les populations peuvent se maintenir dans l'environnement même sans arthropode.

1.4.5 Récolte

La récolte des tiges de bambous doit se faire lors de la période végétative la moins active.

Que ce soit pour l'artisanat ou la construction il faut récolter des chaumes âgés de 2 ans minimum à 5 ans maximum. Pour pouvoir les dater un marquage annuel avec un point de couleur de peinture permet un suivi de récolte simple et efficace. A chaque année une couleur est choisie.

Pour couper les chaumes la tronçonneuse est l'outil le plus rapide et efficace, sinon une hache, une scie ou une machette. Il faut les couper en leur base le plus proche du sol juste au-dessus d'un nœud.

Une fois le chaume au sol on peut couper les branches avec les mêmes outils. Cette opération doit être faite avec minutie et attention afin de faire des coupes au raz de chaque nœud sans endommager le chaume. Par la suite le découper en tronçon pour le transporter.

1.5 Durabilité et traitements

1.5.1 Origines des risques de dégradation

Cette partie est majoritairement issu de l'article scientifique « Structural use of bamboo. Part 2: Durability and preservation » Kaminski et al. [13].

Le bambou a une durabilité moins élevée que le bois de par son manque de toxines permettant d'éloigner les nuisibles, et de par la finesse de ses parois. Trois sources de risques sont présentées :

Attaque de coléoptères

Certains coléoptères sont attirés par l'amidon du bambou et pondent leurs œufs à l'intérieur du chaume. Après l'éclosion des œufs, les larves mangent le long du chaume et finissent par traverser les parois du chaume pour s'échapper, laissant de petits trous de sortie ronds ou ovales (d'environ 1 mm à 6 mm de diamètre). Les poudroies (qui laissent des trous de sortie de 1mm-2mm) sont les plus communes (Figure 16). Le taux d'attaque est plus rapide sur le bambou vert frais (qui est plus sensible), mais même le bambou sec peut être attaqué dans les climats chauds et humides où le taux d'humidité d'équilibre du bambou à l'extérieur (mais sous abri) est souvent plus élevé que dans les climats plus tempérés.



Figure 16: Attaque de coléoptère. Les trous de sortie sont visibles

L'attaque des termites

Les termites sont de petits insectes ressemblant à des fourmis qui vivent en colonies et se nourrissent de matières végétales. Ils sont également attirés par l'amidon du bambou mais, contrairement aux coléoptères, ils possèdent des enzymes qui leur permettent également de décomposer la cellulose. Comme ils vivent en grandes colonies, ils peuvent causer des dommages rapides (Figure 17). Il existe deux types génériques de termites : les termites souterrains et les termites du bois sec. Les premiers vivent dans le sol (de préférence humide) tandis que les seconds font leur nid dans le bois lui-même. Les termites souterrains sont translucides et construisent donc des tunnels ou trouvent des chemins cachés pour éviter la lumière du soleil.



Figure 17 : Attaque sévère de termites (gauche); section d'une chaume de bambou attaqué par les termites (droite).

Attaque fongique (pourriture)

La pourriture est causée par un champignon. Pour que le champignon survive, le bambou doit être relativement humide, avec une teneur en eau d'au moins 20 %, ce qui signifie essentiellement que le bambou doit être exposé à la pluie ou à l'humidité du sol (Figure 18).



Figure 18: Dommages fongiques, fissures et blanchiment du bambou traité au bore exposé au soleil et à la pluie après environ 10 ans

1.5.2 Protection contre la dégradation des chaumes

Les différents risques de dégradation cités plus hauts peuvent être évités, et ce de différents moyens. Le premier, et le plus important, est de réaliser une conception architecturale permettant de mettre à l'abri le plus possible les chaumes de bambou. Celles-ci doivent donc être le moins possible au contact direct des eaux de pluies, et **surtout** ne pas être en contact avec une eau stagnante (pied de colonne/fondation, recouvertes d'un enduit ciment, ou encastrées directement dans des fondations béton).

La Figure 19 présente des recommandations de conception prenant en compte ces éléments [14].

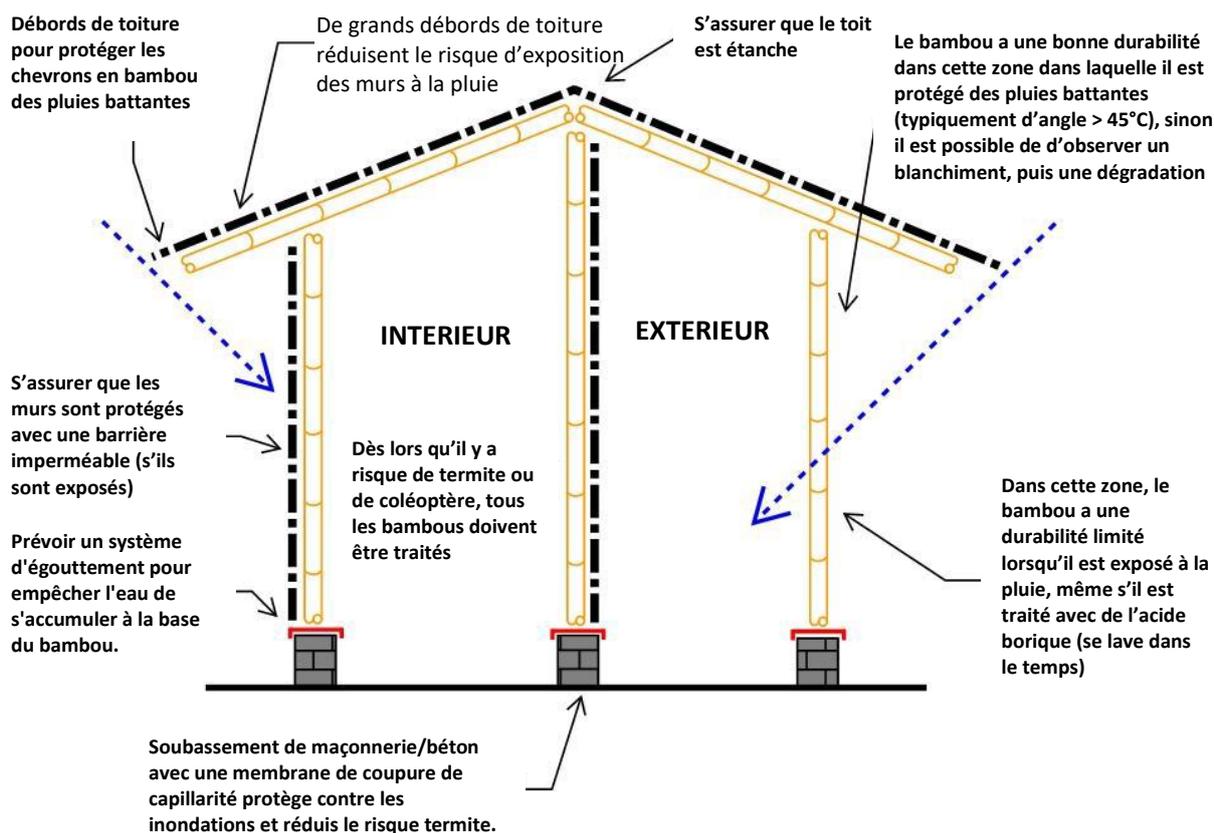


Figure 19: Recommandations pour le détail des structures en bambou afin de les protéger contre la pourriture et les insectes (basées sur les bonnes pratiques de construction bois en milieu tropical).

Le second moyen d'augmenter la durabilité des bambous et effectivement de les traiter contre les risques cités plus-haut. Kaminski et al. [13] résument cette augmentation de durabilité grâce au traitement et à la conception dans le tableau suivant :

Utilisation	Non traité	Traité au Borax	Traitement fixé **,**
Intérieure	2–6 ans	30+ ans	30+ ans
Extérieure au-dessus du sol	0.5–4 ans	2–15 ans	30+ ans
Extérieure en contact avec le sol	<0.5 an	< 1 an	15+ ans

*Remarque des auteurs Kaminski et al. : il s'agit d'une estimation, basée sur une combinaison d'essais limités réalisés jusqu'à présent avec des conservateurs fixes pour le bambou, et sur des preuves tirées d'essais sur des échantillons de bois d'œuvre. On ne sait pas encore si une forte exposition à la pluie augmente la probabilité de fissuration, ce qui affaiblirait le chaume et ses connexions, et permettrait une nouvelle infiltration d'eau.

** Remarques de l'auteur du rapport : les traitements présentés dans ce tableau sont à l'état de recherche. Ils sont mentionnés comme tel dans l'article cité, et ils correspondent à une formulation à base de cuivre et

d'autres biocides. Les auteurs mentionnent qu'ils sont plus adaptés pour se fixer à long terme sur le bambou, alors que l'acide borique finit par se « laver » avec le temps.

1.5.3 Traitements

Nous présentons ici les différentes solutions de traitement des chaumes de bambou. Ces solutions proviennent en majeure partie de la littérature scientifique, mais certaines sont issues de pratiques locales et/ou vernaculaires.

Sels de bore

L'une des méthodes les plus utilisées pour le traitement du bambou, à la fois pour améliorer sa résistance à l'eau et le protéger d'attaques d'insectes et de champignons, est le traitement à l'acide borique.

En effet, il s'agit d'une solution efficace et peu coûteuse. Il est également relativement facile de se procurer des sels de bore dans la plupart des pays. C'est le cas en France, puisque le produit est toujours utilisé par de nombreux industriels, et notamment des industriels du bâtiment. De plus, la solution peut être réutilisée pour plusieurs traitements.

Cependant, les sels de bore sont répertoriés dans le règlement européen REACH, qui recense les produits considérés comme dangereux ou susceptibles de l'être. Ainsi, un produit contenant du sel de bore à hauteur de 5.5% ou plus devra porter une étiquette avertissant sur les risques de toxicité de ce composant.

Dans tous les cas, le produit – y compris en traitement du bambou - doit être manipulé avec toutes les précautions décrites sur les étiquettes, ainsi que sur les Fiches de Sécurité des produits utilisés, tout en suivant la mise en œuvre recommandée.

A noter que le sel de bore est également soluble dans l'eau, les bambous traités avec ce produit doivent donc être impérativement protégés de la pluie pour une durabilité maximisée, et pour éviter la dispersion dans l'environnement d'un produit potentiellement nocif. Leur mise en œuvre en extérieur n'est donc pas forcément recommandée, à moins que le traitement ait été « fixé » par un autre moyen durable face à l'eau (application d'une finition type huile ou peinture).

Selon une étude menée par S. Kaminski, A. Lawrence, D. Trujillo and C. King en 2016 [13], la durée de vie de bambou traité et installé en intérieur est d'au moins 30 ans. Celle-ci descend à une fourchette entre 2 et 15 ans si utilisé en extérieur mais sans point de contact avec le sol. Une durée de vie de moins d'un an est constatée pour les bambous traités, posés en extérieur et en contact avec le sol.

Plusieurs méthodes de traitement aux sels de bore existent :

- Méthode de trempage du bambou dans un bain de solution aux sels de bore ;
- Méthode de diffusion verticale de la solution ;
- Méthode Boucherie : uniquement possible sur des bambous coupés il y a moins de 12 heures.

Autres traitements

D'autres traitements existent, de manière traditionnelle ou bien plus récente, pour protéger le bambou des attaques d'insectes & champignons et/ou pour améliorer sa résistance à l'eau.

- **Peinture** : L'utilisation de peinture pour protéger le bambou de la pluie montre des résultats limités car cette dernière finit par craqueler et ne permet alors plus d'assurer son rôle de couche protectrice. De plus, si de l'eau pénètre à l'intérieur du bambou au travers de fissures dans la peinture, cette dernière risque d'empêcher son évacuation vers l'extérieur : le bambou finit alors par pourrir de l'intérieur.
- **Séchage à l'air libre** : Pour réduire la teneur en amidon du bambou et ainsi améliorer sa résistance face aux insectes, le séchage à l'air libre a traditionnellement été utilisé. Malheureusement, peu d'informations sont disponibles dans la littérature sur cette méthode.

- **Traitement à l'eau de mer** : Le traitement à l'eau de mer est une méthode traditionnelle qui permet au bambou de se débarrasser d'une partie de son amidon, ce qui offre une certaine protection contre les attaques d'insectes et de champignons. Le temps de trempage est déterminant dans le taux d'efficacité de la méthode, bien qu'elle n'atteigne jamais un rendement de 100% d'efficacité (le bambou ne sera jamais entièrement exempt d'amidon, celui-ci restera présent. Aucun chiffre n'est donné dans la littérature). Ce n'est pas une méthode d'imperméabilisation du bambou [15].
- **Traitement à la fumée** : Il s'agit d'une méthode traditionnelle de traitement thermique superficiel, utilisée pour une protection extérieure contre certains insectes, qui n'est cependant pas efficace contre les champignons. Elle n'apporte pas non plus de protection à l'eau.
- **Thermo-cirage** : Cette technique n'est pas décrite dans la littérature scientifique. Néanmoins, elle est aujourd'hui utilisée en Martinique par un acteur (Hervé Damicot). Elle consiste en l'application d'une couche de cire en plongeant les chaumes dans un bain de cire chauffée (température inconnue). La nature de cette cire est aujourd'hui une cire recyclée provenant d'une exploitation d'apiculture. La même cire (restant dans le bain) est utilisée de nombreuses fois avant d'être jetée.
- **Traitement à l'eau de chaux** : Les bambous peuvent également être imperméabilisés à l'eau de chaux. La chaux est également présentée comme antifongique et possédant un pouvoir de repousse des insectes. Après la décantation du lait de chaux, les bambous sont placés dans une cuve et trempés dans l'eau de chaux résultante pendant une semaine. Les bambous doivent être fraîchement coupés pour que l'eau de chaux imprègne de manière efficace les tissus. Cette méthode est notamment mise au point par Chalet & Bamboo [16].
- **Agent conservateur à base de cuivre** [13]: Le traitement au cuivre des bambous est également possible, et présente l'avantage d'envisager la mise en oeuvre en extérieur des bambous. Contrairement aux sels de bore, les solutions de cuivre utilisées pour traiter le bambou ne sont généralement pas solubles dans l'eau. Elles offrent donc une protection durable contre la pluie. Il faut alors faire attention au fait que la solution utilisée est bien dénuée de bore. Ce traitement est néanmoins plus compliqué à mettre en place car il nécessite plus de précautions lors des manipulations, et coûte plus cher que celui au sel de bore. A noter que le nombre d'études et de tests sur ce type de traitement reste actuellement limité, bien que les résultats soient prometteurs.

Il existe également des traitements du bambou à l'arsenic, au chrome ou à l'huile de moteur (créosote). Ces derniers sont très largement devenus illégaux à l'heure actuelle, pour des raisons de santé publique notamment.

Au sein du Webinar « Structural Use of Bamboo culms », une présentation claire est faite de différentes méthodes de traitement en vue d'améliorer la durabilité du matériau [17] (Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=hk_484Hx060).

Dans l'ensemble, on peut résumer ce paragraphe en indiquant les éléments suivants :

- Le bambou (comme la plupart des bois) atteint une durée maximale de résistance (durabilité) lorsqu'il est utilisé dans des conditions favorables (à l'abri de la pluie directe et du sol).
- Plusieurs traitements permettent d'améliorer sa durabilité

1.6 Séchage

Une fois récolté, les chaumes doivent être nettoyées/frottées pour enlever les lichens et champignons de surfaces. Encore frais et gorgé d'eau (forte hygrométrie) les traitements sont réalisés ou non, en fonction de l'utilisation et la destination. Pour être travaillé les chaumes doivent être secs.

Le principe le plus courant, est d'entreposer les chaumes à l'air libre en plein soleil, à la verticale ou à l'horizontale, en veillant bien à ce qu'ils ne soient pas en contact direct avec le sol (la terre). Selon les conditions météorologiques, les variétés, les diamètres et longueurs cela prend 6 à 12 semaines pour obtenir une teneur

en eau avoisinant 15 à 20%. Les premiers jours il faut les tourner pour éviter les brûlures (séchage trop rapide, entraînant une fragilité dans la structure du matériau) qui interviennent très rapidement pour la grande majorité des chaumes qui ne sont pas exposées au soleil direct lors de leur croissance. Pour les faire sécher plus rapidement il est possible de faire comme pour le bois, à savoir de les faire sécher en étuve. Ce procédé est beaucoup moins développé car plus difficile à contrôler à cause de la variabilité des diamètres et des épaisseurs de bois qui vont être différentes entre les chaumes. Cela nécessite également un contrôle précis de la température et de l'humidité, durant toute l'opération, au sein de l'étuve.

1.7 Présentation des différents procédés constructifs

Il existe de nombreux types de joints utilisés pour connecter les bambous. Cette section a pour but d'en présenter certains.

1.7.1 Amarre perforée

Voici un des joints des plus simples qui se fait avec une cordelette et une perceuse :



Les bambous ne subissent pas d'importante perforation.



Jonction à l'entre-nœud.



Jonction au chaume.



Jonction avec deux tiges opposées



Jonction avec deux tiges perpendiculaires



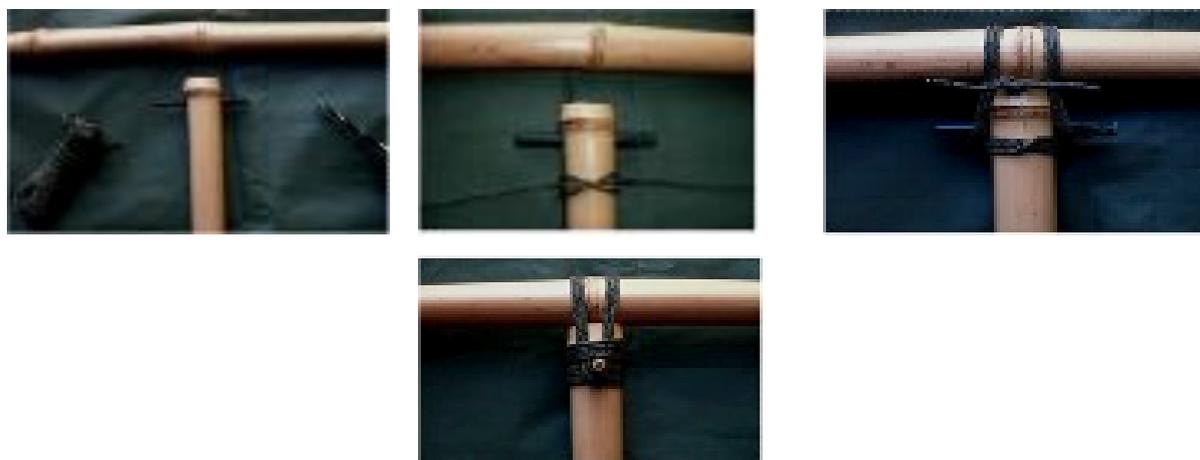
Jonction avec trois tiges.



Jonction avec quatre tiges.

1.7.2 Amarre - chevillée

Au lieu d'insérer une corde à l'intérieur du trou on y place une tige et la liaison est assurée par la cordelette.



On retrouve ainsi différents type d'assemblage :



1.7.3 Chaume chevillée

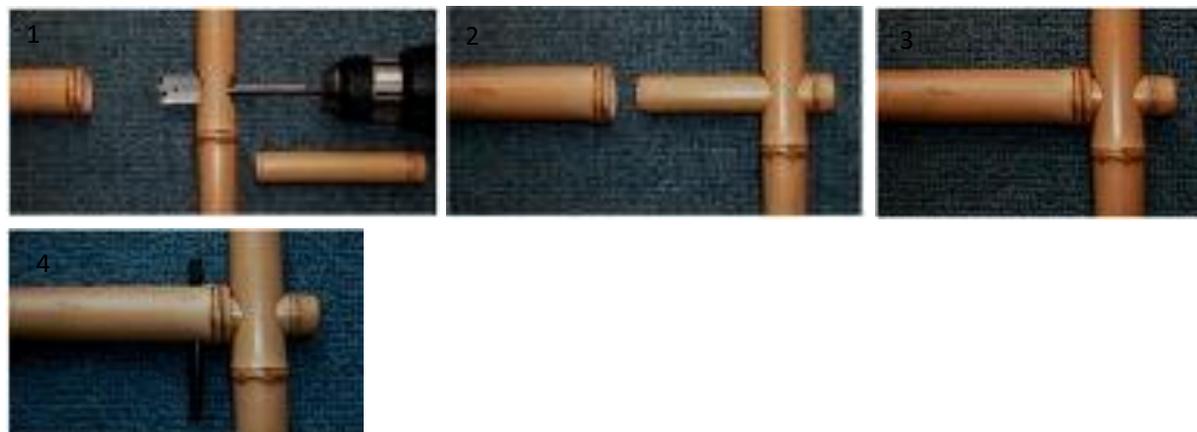
Même outils qu'avec la méthode précédente, mais la tige insérée est inclinée et traverse un nœud du bambou (photo 1, 2 ci-dessous). La tige assure la fonction de support d'un autre bambou (photo 3 ci-dessous).



Cette technique est l'une des plus utilisée de nos jours.

1.7.4 Chaume traversante chevillée

Ici, on perfore un grand trou sur le bambou principal pour y insérer un autre de plus petit diamètre (1). La liaison est fixée par une tige traversant (2) l'ensemble et une cordelette (3).



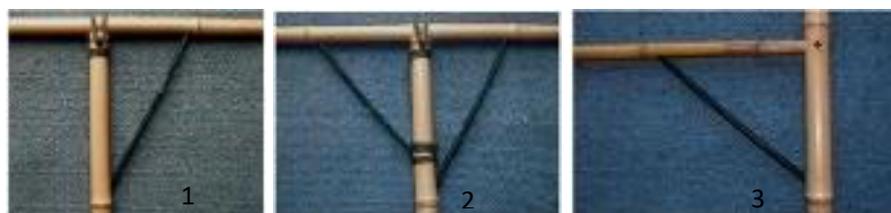
1.7.5 Joint avec clé

Le bambou est perforé de manière que l'on puisse insérer une "clé" (1). Un autre bambou vient prendre la clé par le bout (2). Une tige les fixera ensemble (3).



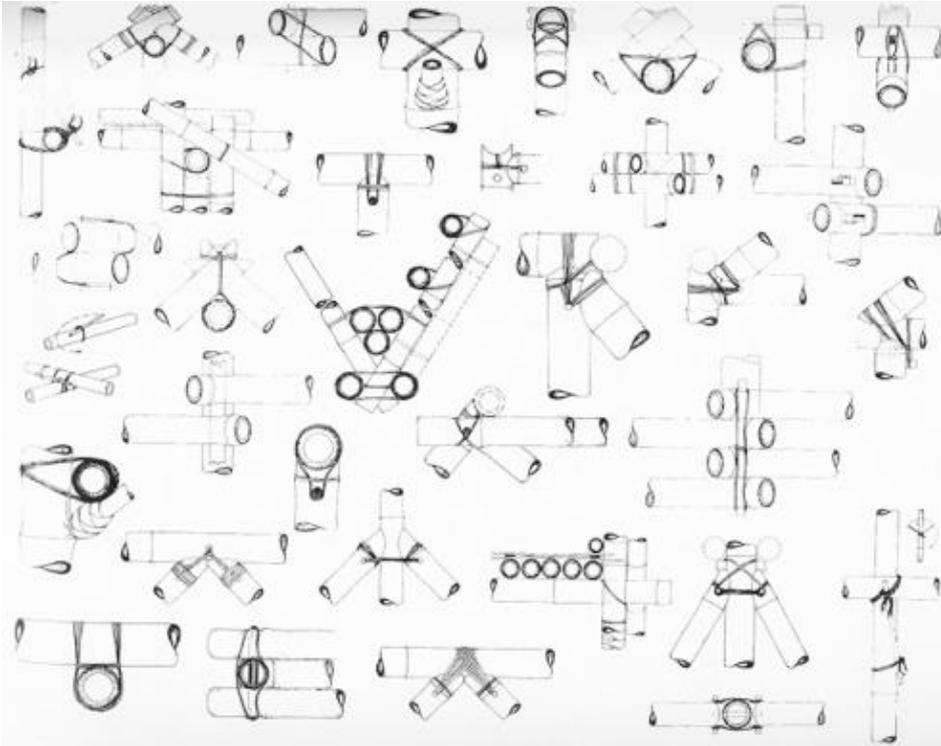
1.7.6 Amarre de support de bambou transversal :

Un petit bout de bambou est juxtaposé au chaume principal (1), il sert de support pour un autre bambou qui s'ajoutera au-dessus.

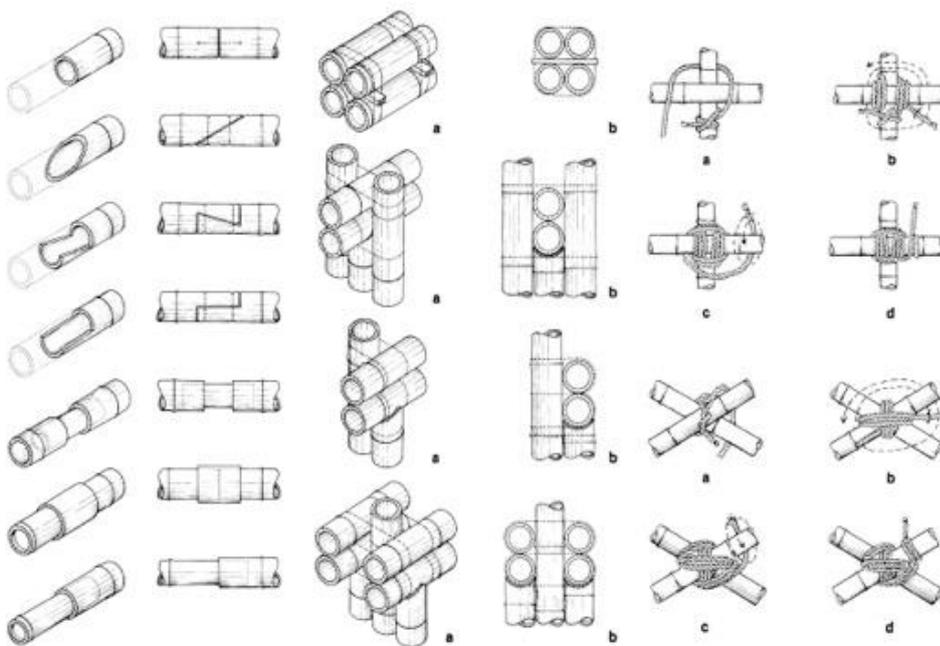


1.7.7 Illustrations d'assemblages issus de la littérature

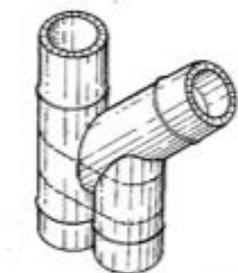
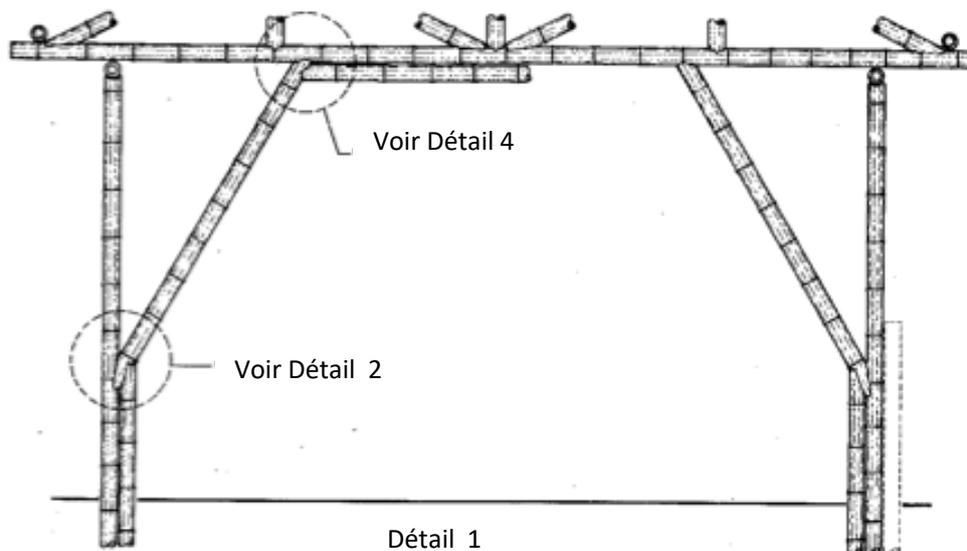
1.7.7.1 Connexions et des sections de colonnes du Pavillon ZERI, Simón Vélez (2000)



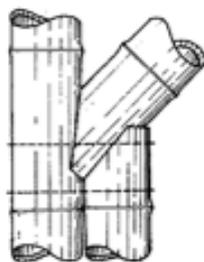
1.7.7.2 Quelques-unes des techniques d'Oscar Hidalgo López.



CONSTRUCTION DE PORTIQUE

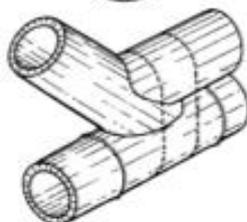


a

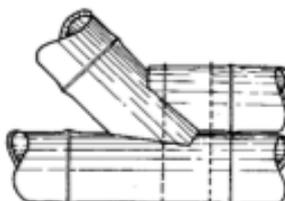


b

2) Connexion de l'entretoise diagonale à la colonne

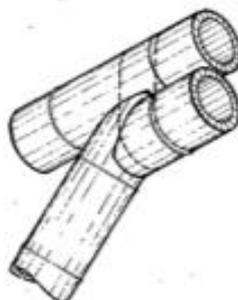


a

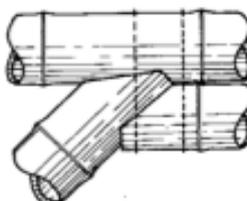


b

3) Union de la diagonale avec la partie supérieure de l'entretoise



a

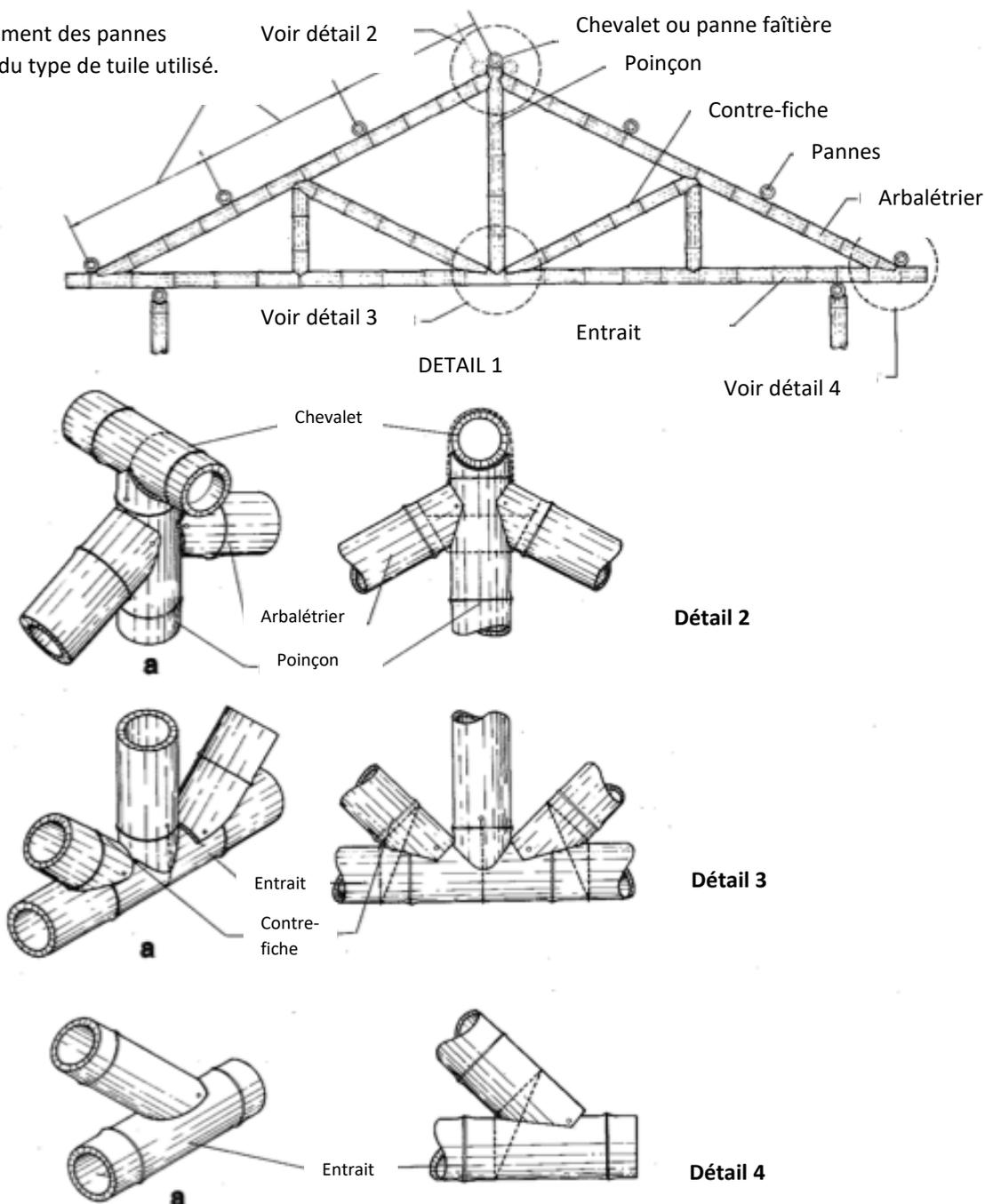


b

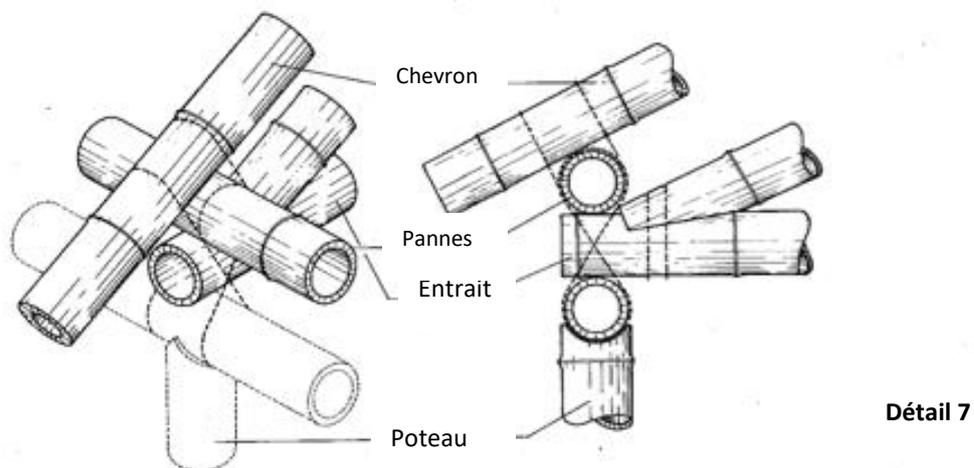
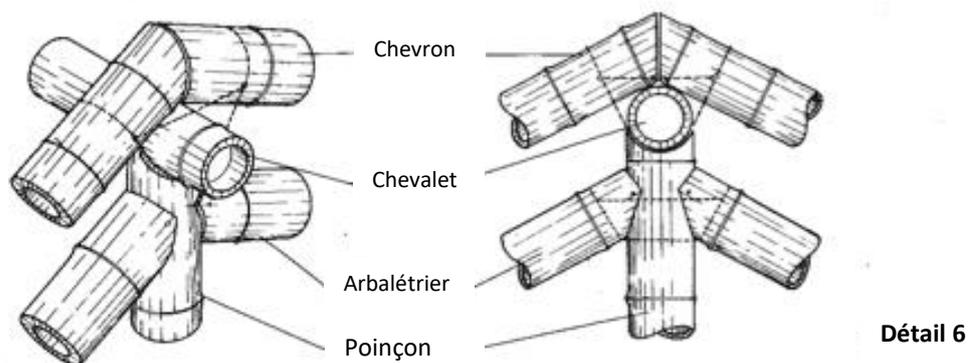
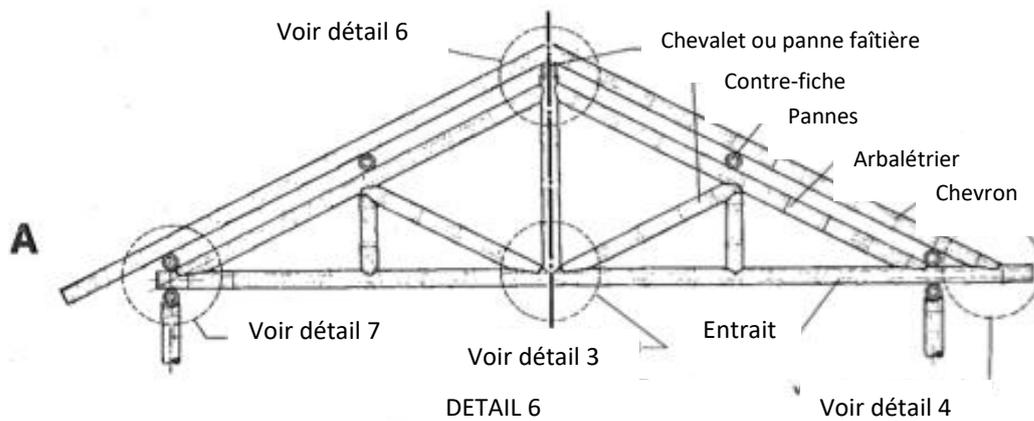
4) Union de la diagonale avec la partie inférieure de l'entretoise

TOITURES - DÉTAILS DE CONSTRUCTION DES FERMES SIMPLES

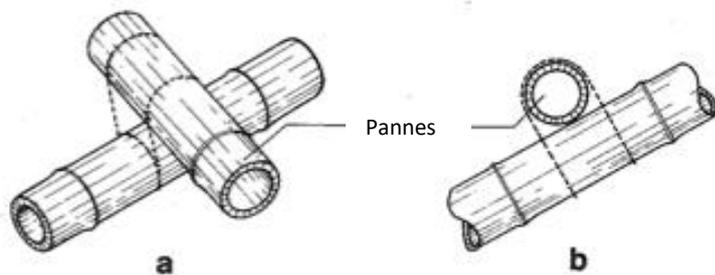
L'espacement des pannes dépend du type de tuile utilisé.



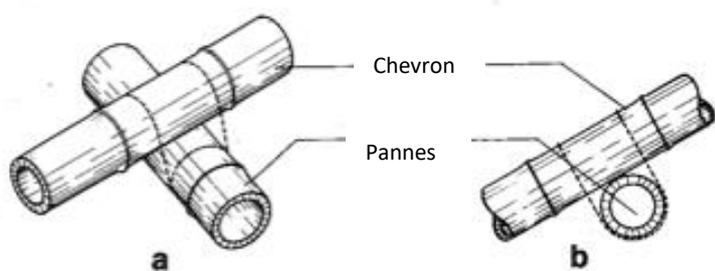
TOITURES - DÉTAILS DE LA CONSTRUCTION EN TREILLIS AVEC CHEVRONS



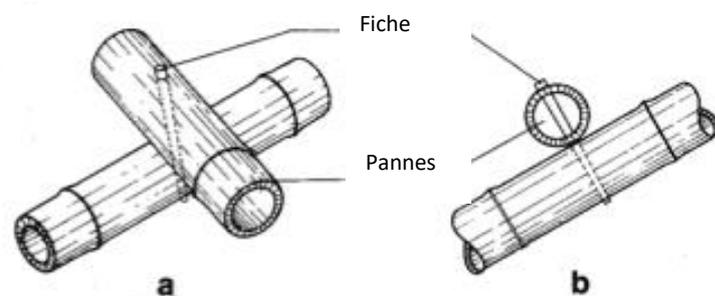
TOITURES – ASSEMBLAGE ET FIXATION DES PANNES/CHEVRONS



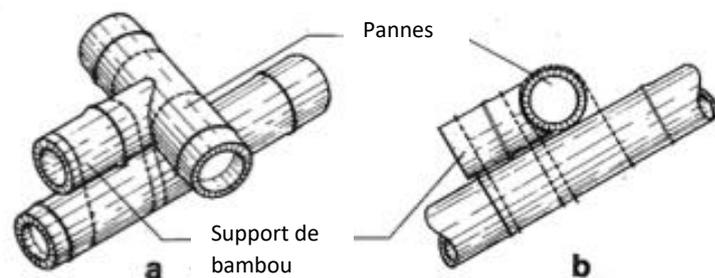
Détail 1



Détail 2

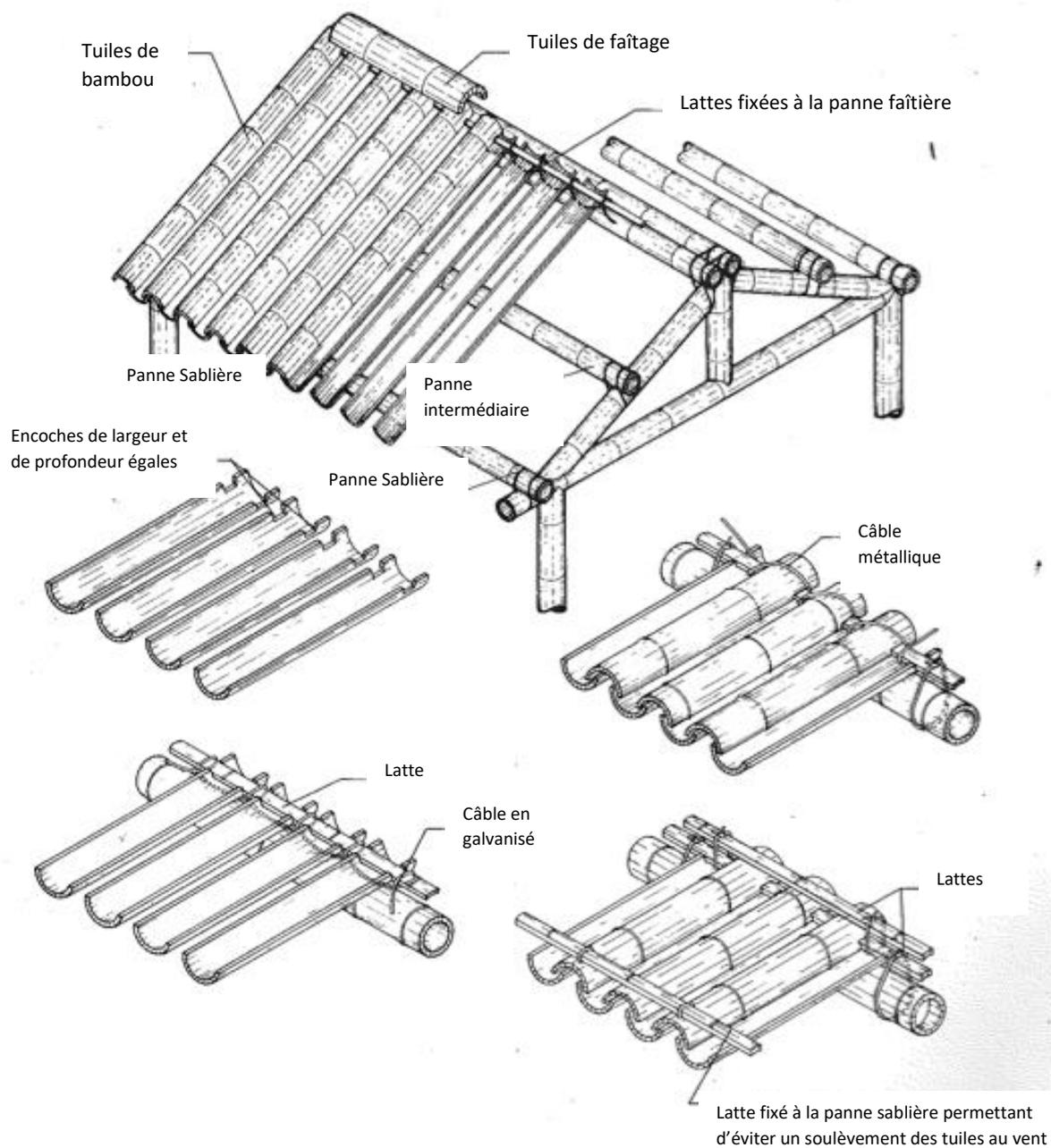


Détail 3



Détail 4

TOITURES – TUILES DE BAMBOU



Les différents croquis sélectionnés sont issus des recherches du colombien Oscar Hidalgo Lopez. Les nombreuses recherches qu'il a faites font l'unanimité parmi tous les architectes qui travaillent le bambou. Il est considéré comme étant celui qui a vulgarisé l'utilisation des bambous et réussi à éditer des plans compréhensibles par la majorité. Les structures qu'il a sélectionnées ont toutes fait leurs preuves et peuvent être reproduites.

L'avantage principal de ses structures est leur bas coût.

Leur seul inconvénient est une durée de vie d'une dizaine d'année, ensuite les chaumes sont moins résistants et doivent être remplacés.

Dernièrement un livre a repris l'ensemble de ces principes d'assemblages constructifs dans une édition française : « Manuel de construction en bambou » aux éditions Terran.

Les bâtiments modernes faits par les architectes Simon Vélez et Vo Trong Nghia, qui utilisent les chaumes pour les parties structurelles, ont quant à eux une durée de vie qualifiée de bonne. Notamment parce que ce sont des bâtiments qui répondent aux exigences des normes des pays dans lesquels ils sont fabriqués, en l'occurrence la Colombie et le Vietnam. Nous n'avons malheureusement pas accès à ces normes,

En parallèle une norme internationale ISO a vu le jour en 2020 :

<https://www.iso.org/fr/news/ref2547.html>

Voici des liens de qualité pour illustrer des réalisations de bâtiments :

<https://www.bamboo-earth-architecture-construction.com/>

<https://www.dezeen.com/2021/08/04/impressive-bamboo-building-roundup/>

<https://www.cladglobal.com/architecture-design-features?codeid=30649>

<https://kottke.org/22/04/an-elegant-bamboo-structure-in-vietnam>

1.8 Caractéristiques techniques en fonction des espèces

1.8.1 Mécaniques

Cette section correspond à un extrait du rapport de stage IMT Mines Alès pour les Pépinières de La Bamboueraie (Anduze) de Lucie Le Nouvel.

Le chaume de bambou est principalement constitué de fibres cellulosiques (environ 40 %) de vaisseaux pour transporter l'eau et les nutriments (environ 10 %) et de tissu de parenchyme (50 %). La concentration en fibre est plus importante vers l'extérieur du chaume que vers l'intérieur (Figure 20). De plus la forme des fibres change : plus on se place à l'extérieur du chaume, plus les fibres ont une section circulaire, et plus on se place vers l'intérieur du chaume, plus les fibres ont une section elliptique. Comme vers l'extérieur la densité de fibre est plus importante, on observe qu'il y a moins de matrice entre les fibres, c'est pourquoi la partie extérieure du chaume est plus solide que la partie intérieure. **Ainsi, les propriétés mécaniques du bambou sont étroitement liées à la distribution des fibres et de la matrice au sein du chaume.**

Chaque fibre est composée de fibrilles qui sont torsadées ensemble. Les fibres suivent le sens longitudinal du chaume, d'où les différentes propriétés mécaniques selon l'axe longitudinal, tangentiel ou radial de sollicitation ; le bambou est donc un matériau très orthotrope⁵.

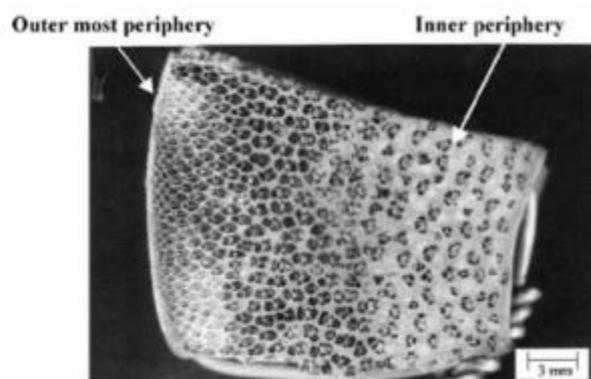


Figure 20 : Photographie de la répartition des fibres dans un chaume de bambou

1.8.1.1 Principales propriétés sur les bambous

- **Le pH, la mouillabilité et le "buffer capacity" (capacité tampon)** du bambou sont des paramètres déterminant pour évaluer la capacité de ce dernier à supporter les matières adhésives qui peuvent servir à attacher les chaumes ensemble pour la construction par exemple.
- **La densité** : poids sec séché au four d'un volume donné d'une substance divisé par le poids d'un volume égal d'eau. Cette propriété peut donner une indication sur la densité des fibres présentes dans le chaume, et donc des propriétés mécaniques de ce dernier.

⁵ Les propriétés physiques (mécaniques, thermiques, hydriques...) sont différentes en fonction des directions. En opposition à isotrope : les propriétés physiques sont les mêmes dans toutes les directions.

- **Le taux d'humidité à l'équilibre** (EMC : acronyme utilisé couramment, provenant de l'anglais Equilibrium Moisture Content) : teneur en humidité qui est en équilibre avec la température et l'humidité relative de l'air. Au-dessus de 15 % d'humidité dans le chaume, les bambous risquent d'être détériorés par des attaques de champignons, ce qui représente le principal danger à long terme pour l'utilisation de bambou pour la construction. L'EMC est un facteur important car le bambou est soumis à des variations à long et à court terme de l'humidité relative et des températures environnantes, principalement s'il est utilisé pour réaliser des constructions en extérieur.
- **La stabilité dimensionnelle** : elle concerne le rétrécissement et le gonflement des matériaux ligneux en réponse aux changements de la teneur en eau liée⁶. Le rétrécissement est approximativement proportionnel à la quantité d'eau perdue par la paroi cellulaire. Dans les études préalablement menées, les tests sont effectués à différentes localisations le long du bambou, aux nœuds et entre-nœuds. Ils sont effectués dans les 3 directions (longitudinale, radiale et tangentielle). [7]

Notre étude portant uniquement sur la caractérisation mécanique des bambous, les propriétés précédentes, hormis la densité (qui, nous l'avons vu peut dans une certaine mesure donner une indication sur la résistance des chaumes), ne seront pas évaluées. Elles sont ici citées à titre informatif et devront par la suite être étudiées pour prendre en compte tous les aspects impactant l'utilisation du bambou dans le domaine de la construction.

1.8.1.2 Propriétés mécaniques

Dans les études précédemment réalisées, des tests en compression, traction et flexion sont décrits. Ils sont principalement réalisés sur des éprouvettes taillées dans des chaumes de bambous.

- **Essais en compression** : les essais sont réalisés sur des petits tronçons de bambous où la longueur selon le sens longitudinal prédomine sur le diamètre. La grandeur mesurée est le MOR⁷.
- **Essais en traction** : Les essais se font sur des petits échantillons prélevés au cœur de l'épaisseur du chaume et sont taillés en éprouvettes standards. Aux 2 extrémités de l'échantillon on fixe, grâce à de la glue ou de la résine, des morceaux d'aluminium afin que les échantillons ne se cassent pas sous l'effet des grippes de la machine utilisée. On mesure principalement le MOR⁷ et le MOE⁸. Selon la bibliographie, on observe systématiquement une rupture fragile, la plage plastique étant réduite. L'épaisseur du bois influe sur les propriétés mécaniques.
- **Essais en flexion** : Ils peuvent être à 4 points ou 3 points. Les essais réalisés révèlent que le diamètre du chaume influence énormément son comportement en flexion. Une autre cause de variabilité, d'après les expériences menées, viendrait de la hauteur de prélèvement de l'échantillon dans le chaume. Ainsi, plus l'échantillon est pris haut, plus le module élastique, MOEF⁹, augmente. Pour bien faire et respecter les normes ISO, il faudrait que L (distance entre 2 points d'appui) soit supérieur à 30 fois le diamètre. De plus, il faut veiller à ce que les points de

⁶ Liée chimiquement au matériau

⁷ Module de Rupture ou résistance mécanique

⁸ Module d'élasticité ou Module d'Young

⁹ Module d'élasticité en flexion

chargement et d'appui offrent une surface d'appui et une flexibilité suffisamment grande pour limiter l'écrasement local des parois de chaume.

D'après les études préalablement menées, deux observations principales sont conclues concernant la résistance à la traction et la résistance à la flexion :

- **Résistance à la traction** : la contrainte limite est plus élevée quand l'échantillon est pris plus haut (proche du sommet) dans le chaume de bambou étudié.
- **Résistance à la flexion** : la contrainte limite est plus élevée quand l'échantillon est pris plus haut (proche du sommet) dans le chaume de bambou étudié.

Afin de synthétiser le travail réalisé et les propriétés mécaniques évaluées, les données obtenues lors de du stage sont consignées dans le tableau suivant :

Désignation	D(mm)	L(m)	ep(mm)	m(kg)	ρ (kg/m ³)	Esolid (Gpa)	Eana (Gpa)	Estat (Gpa)	σ_{max} (Mpa)
EDULIS D80 (1a)	78,7	1,0	7,8	1,58	912	14,9	14,0		
BARBATUS D60 (2)	84,0	3,0	11,3	4,71	609	16,5	16,3	9,90	62,42
DANDROCALAMUS ASPER D100 (3)	100,3	1,0	7,2	1,57	745	14,8	13,3		
DANDROCALAMUS ASPER D140 (4)	126,3	1,0	9,6	2,84	811	17,2	10,4		
EDULIS D100 (5a)	87,5	1,0	10,1	2,18	892	15,9	14,8		
DENDROCALAMUS STRICTUS D30 (6)	38,2	4,0	12,9	2,42	589	23,9	23,9		
DENDROCALAMUS STRICTUS D40 (7)	41,7	4,0	16,5	3,68	702	20,3	20,3		
BARBATUS D80 (8)	83,3	3,0	17,7	5,15	470	11,5	11,5		
BARBATUS D100 (9)	101,3	4,0	15,1	10,05	612	14,2	14,2		
EDULIS D100 (10)	103,1	2,0	13,5	5,85	771	12,7	12,4		
EDULIS D80 (11)	71,7	4,0	7,3	3,68	625	10,7	10,6		
STRICTUS D30 en 1m (6a)	39,6	1,9	12,7	1,38	666	20,5	20,4	18,89	244,26
STRICTUS D30 en 1m (6b)	35,3	2,0	7,9	0,97	715	22,3	22,2		
STRICTUS D40 en 1m (7a)	44,6	1,9	19,3	2,07	712	16,9	16,9	16,42	309,72
STRICTUS D40 en 1m (7b)	37,4	1,9	11,8	1,37	760	21,2	21,2		
STRICTUS D30 en 1m (6b1)	36,4	1,0	8,3	0,53	724	20,9	20,6		
STRICTUS D30 en 1m (6b2)	34,0	1,0	7,1	0,44	728	20,9	20,7		
STRICTUS D40 en 1m (7b1)	38,9	0,9	12,5	0,75	762	19,8	19,6		
STRICTUS D40 en 1m (7b2)	36,0	1,0	9,5	0,62	816	22,4	22,2		

Dans ce tableau on retrouve :

- D = le diamètre des chaumes
- L = la longueur des chaumes
- Ep = l'épaisseur des chaumes
- M = la masse des chaumes
- Esolid = le module d'Young en flexion, obtenu par simulation et essais acoustiques non-destructifs
- Eana = le module d'Young en flexion, obtenu par calcul analytique et essais acoustiques non-destructifs
- Estat = le module d'Young en flexion, obtenu par essai mécanique sur banc de flexion
- σ_{max} = la contrainte maximale sur la surface de matériau à rupture

On constate que les modules d'élasticité en flexion sont de l'ordre de la dizaine de GPa (Giga Pascal), et que les contraintes maximales à la rupture en flexion sont de l'ordre de la centaine de MPa (Méga Pascal), ce qui est semblable aux ordres de grandeur de ces mêmes paramètres pour les bois de construction. Ainsi, d'après ces données, nous pouvons conclure qu'il est envisageable d'utiliser ces variétés de bambou pour la construction, dans des systèmes constructifs proches de ceux utilisés pour le bois.

La littérature scientifique est consistante sur le sujet des propriétés mécaniques de différentes espèces de bambou. Le partie ci-dessus, résumant un stage récent, permet d'avoir une approche globale et pédagogique sur ces questions. Afin d'aller un peu plus loin, nous plaçons ici quelques données supplémentaires, premièrement issues directement du rapport de Louis COLLIN et Clément DESODT en 2020 :

Tableau 1 : Comparaison des performances mécaniques du bambou avec d'autres matériaux de construction [18]

Caractéristiques	Bambou	Chêne	Pin	Béton
Masse volumique [kg.m^{-3}]	580-700	700	530	2400
Contrainte ultime en traction axiale [MPa]	240	90	100	2
Contrainte ultime en compression axiale [MPa]	80	58	50	25
Module de Young en flexion [MPa]	14000	13000	12000	24000
Energie de production [MJ.m^{-3}]	30	80	80	240
Coefficient de Fail Safe ⁴	50	20	20	10

Enfin, pour rentrer dans le détail de type de bambou présent aux Antilles, on retrouve dans la littérature des travaux de Sébastien Hilaire (Enseignant-chercheur à l'Université de la Réunion). Ses travaux portent sur la caractérisation mécanique de Bambous présents sur son île, et notamment le *Bambusa Vulgaris*.

Tableau 2 : Résultats de caractérisation mécanique de bambous à la Réunion

	Contrainte max (MPa)		Module Young (MPa)	
	Moso	Vulgaris	Moso	Vulgaris
Traction parallèle	149,95	240	14000	11000
compression parallèle	48,32	64,2	2100	
Flexion parallèle	130	76,8	22000	14000

Ces essais ont été réalisés selon la norme ISO 22 15. Attention, ces résultats ne sont pas représentatifs puisqu'ils sont réalisés sur un faible nombre d'échantillon.



Figure : Évolution de la forme de l'éprouvette à mesure que la contrainte augmente.



Figure 21 : Différents essais de caractérisation mécanique menés à l'université de la Réunion.

1.8.2 Sismiques

Cette section présente des assemblages issus de la littérature et utilisés pour répondre à de fortes contraintes de cisaillement, comme lorsque la structure est soumise aux séismes. Néanmoins, le lien entre la réponse comportementale d'une structure et ses méthodes d'assemblage n'est pas clairement défini et ne saurait se présenter comme direct.

1.8.2.1 Assemblage avec remplissage de la chaume en mortier de ciment

L'assemblage est composé de mortier de ciment et de tiges filetées, qui sont placés dans les parties creuses du bambou aux jonctions de connections. Le système permet la tige de travailler aussi bien en traction qu'en compression. Les structures réalisées sont à la fois souples et solides, offrant une résistance sismique éprouvée lors du tremblement de terre qui a frappé la Colombie en 1999.

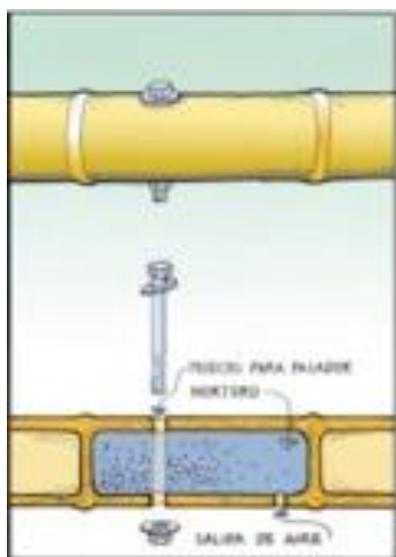


Figure 22: Connexions avec boulons et remplissage mortier de ciment [19]

Le forage doit se faire à grande vitesse pour introduire les boulons dans la tige de bambou, afin d'éviter les impacts. On doit ensuite remplir le bambou de mortier de ciment dans l'espace traversé par les boulons.

Le mortier doit être suffisamment fluide pour pénétrer complètement à l'intérieur. On prépare le mortier à la quantité suivante : 1 à 0,5 entre le ciment et l'eau sans excéder le rapport de 4 à 1 entre agrégat fin et ciment. On introduit le mortier par perforation à l'aide d'une perceuse et d'un entonnoir ou d'une bombe de petite taille.

Les boulons se composent de tiges filetées vendues dans le commerce.

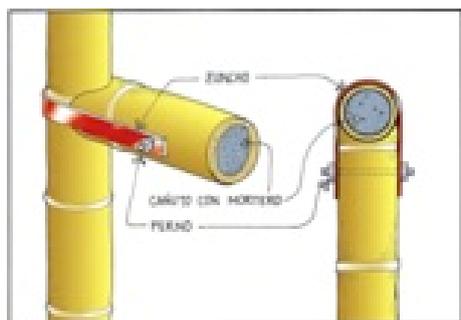


Figure 23: Connexions remplissage mortier de ciment et plaques métalliques [19]

Les connexions avec supports métalliques (Figure 23) peuvent être utilisées pour fabriquer les liaisons articulées. Pour les connexions qui doivent résister à la traction, la platine doit être conçue pour s'assurer que ce ne soit le point faible de la connexion. La connexion ne doit pas supporter plus de 10kN de force de traction.

Le paragraphe suivant est un extrait de la publication « Habitations végétales : ça tient le bambou » de Louis Collin et Clément Desodt du 27/01/2020 École normale supérieure Paris Saclay [20]:

« Le premier test « grandeur nature » pour des habitations en bambou s'est produit en avril 1991 quand un séisme de magnitude 7,5 a secoué le Costa Rica. Une vingtaine de maisons situées à l'épicentre du séisme ont résisté, sans traces visibles de fissure, tandis que les habitats en béton s'étaient effondrés. La légèreté du bambou est son principal atout puisque la force subie est multiple de la masse. Des membres de l'université de Kassel (Building Research Laboratory FEB) ont développé un système d'arches antisismiques. La structure de test a été construite avec des briques en forme de U, reposant sur une arche construite avec trois couches de bambou fendu. Pour conserver la forme de l'arc après déformation, les trois sections sont entourées d'un fil d'acier tous les 50 cm. La voûte est reliée au sol par des tiges d'acier et une membrane en polyester enduite de PVC assure l'étanchéité ainsi que la stabilité en cas de séisme. »

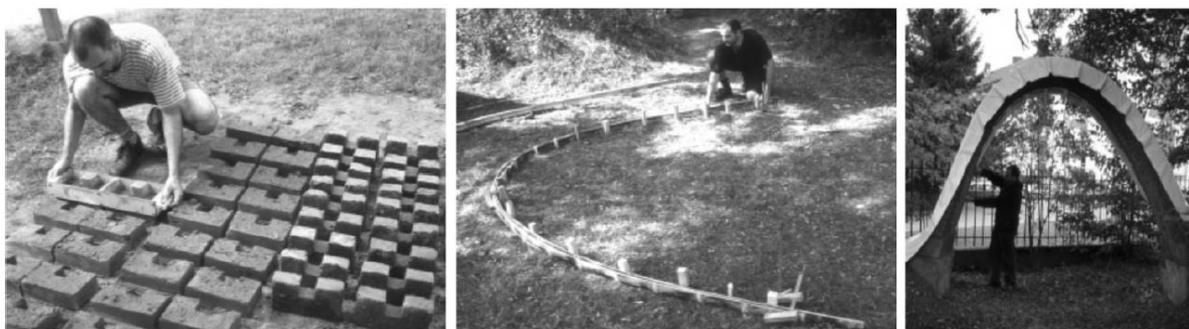


Figure 24: Réalisation de l'arche parasismique [21]

Lien vers le manuel de construction pour les zones sismiques fait par une association colombienne à disposition de tous [19] :

https://www.desenredando.org/public/libros/2001/csr/bbe/guadua_lared.pdf

1.8.3 Durabilité

Le paragraphe suivant correspond à un extrait de la publication de l'INBAR (International Bamboo and Rattan Organization) de 1994, dont l'auteur est Satish Kumar.

« Le bambou est composé d'hémicellulose 50-70, 30% de pentosanes, et 20-25% de lignine (Tamolang et al, 1980; Chenef al, 1985). Quatre-vingt-dix pour cent de l'hémicellulose est du xylane avec une structure intermédiaire entre les xylanes des feuillus et des résineux (Higuchi, 1980). La lignine présente dans les bambous est unique et subit des modifications lors de l'allongement du chaume (Itoh et Shimaji, 1981).

Le bambou est connu pour être riche en silice (0,5 à 4%), mais l'ensemble la silice se trouve dans les couches de l'épiderme, avec très peu de silice dans le reste du chaume. Les bambous contiennent également de petites quantités de résines, cires et tanins. Cependant, aucun de ceux-ci n'a une toxicité suffisante pour conférer une durabilité naturelle. D'autre part, la présence de grandes quantités d'amidon rend le bambou très sensible aux attaques de champignons et de coléoptères (Beeson, 1941 ; Gardener, 1945 ; Mathew et Nair, 1988 ; Gnanaharan et al, 1993). Des tests en laboratoire ont indiqué que le bambou est plus sujet à la pourriture molle et à la pourriture blanche que à la pourriture brune (Liese, 1959).

La durabilité naturelle du bambou est très faible et dépend des espèces, des conditions climatiques et du type d'utilisation. Premières observations sur la durabilité du bambou étaient basées sur la performance de structures pleines. Sous abri, le bambou non traité peut durer 4-7 ans. Dans des circonstances favorables, fermes et chevrons peut durer de 10 à 15 ans. Données systématiques sur la durabilité naturelle lorsqu'il y a contact avec le sol et les conditions exposées sont très limitées.

Des tests menés aux Philippines ont indiqué des variations entre espèces. *Dendrocalamus merillianus* a été trouvé périssable alors que les espèces de *Schizostachyum* se sont avérées assez résistantes. L'exposition aux attaques fongiques a montré que certaines espèces comme *Bambusa blumeana* et *Gigantochloa* ont montré une résistance modérée (Guzman, 1978).

Selon la classification de durabilité (Anon., 1982), les bambous entrent donc dans la classe III (catégorie non durable) avec peu de variation de durabilité entre les différentes espèces. Des variations de durabilité ont également été observées le long de la longueur du chaume et de son épaisseur.

La partie basse du chaume est considérée comme plus durable, tandis que l'intérieur se détériore plus rapidement que la partie externe plus dure. Ceci est probablement lié à la nature anatomique et chimique des cellules ligneuses. En raison de l'absence de tout constituant toxique, les bambous forment une source de nourriture prête pour une variété d'organismes. La présence des quantités considérables d'amidon dans le bambou vert ou sec le rend plus attrayant pour ces organismes, en particulier les champignons et coléoptères foreurs. Certains insectes suceurs de sève ont été signalés, ils attaquent également les plantations de bambous (Chatterjee et Sebastian, 1964, 1966 ; Singh, 1988). Les foreurs les plus sérieux des bambous abattus sont trois espèces de *Dinoderus* (*celluris*, *minutes*, *brevis*) et *Lyctus*, qui attaquent le bambou riche en amidon (Casin et Mosteiro, 1970 ; Sandhu, 1975). Ils causent d'immenses dégâts pendant le séchage, le stockage et l'utilisation ultérieure. Abeilles charpentières et termites attaquent aussi le bambou (Beeson, 1938 ; Sensarma et Mathur, 1957).

Les bambous sont également attaqués par les organismes marins (Anon, 1945). Les chaumes des bambous qui ont fleuri sont plus résistants aux coléoptères en raison de l'épuisement de l'amidon. Des efforts ont également été conçus pour corrélés la durabilité naturelle du bambou avec les phases de la lune (Kirkpatrick et Simmonds, 1958), mais cela semble être plus un mythe qu'un fait scientifique. »

1.9 Cadre normatif et assurantiel

Le cadre normatif ne diffère pas de ce qui a été présenté pour l'utilisation de terre crue en tant que matériau de construction. Il faut ici également parcourir le tableau de l'AQC (Agence Qualité Construction : cf p 39), faire évoluer les innovations ou les techniques très anciennes du domaine « non traditionnel » au domaine « traditionnel », de façon à pouvoir les utiliser sur des chantiers d'ampleur et se faire assurer.

Pour ce qui est du bambou en tant que matériau de construction, on ne constate pas du tout la même dynamique qu'avec la terre. Les recherches françaises étant plutôt débutante sur le sujet, il n'y a pas de mouvement national rassemblant chercheurs/ingénieurs/artisans souhaitant faire évoluer la réglementation.

Dans ce cadre, nous commençons par présenter les quelques initiatives françaises :

- Différentes entreprises **cherchent** à développer des activités autour du bambou. C'est le cas de :
 - Bambouscopic (<https://bambouscoopic.org/>) : Propose des structures (chapiteaux) éphémères dont la structure porteuse est réalisée uniquement en bambou. Pour que leur proposition respecte la norme ERP CTS (établissement recevant du public, Chapiteau, Tentes et Structures itinérantes), des essais mécaniques ont été réalisés en laboratoire pour caractériser la résistance en compression du matériau et de l'assemblage utilisé



Figure 25: Essais de laboratoire. Bambooscoopic.org



Figure 26: Proposition de prestation avec mâts structuraux en bambou. Bambooscoopic.org

- Le réseau français du Bambou (<https://reseaufrancaisdubambou.fr>) : Association à but non lucratif, cherchant à développer l'utilisation du bambou en organisant des événements, recherchant des financements pour des travaux de recherche et en représentant la filière auprès d'organismes de réglementation.
- Groupe de recherche sur les matériaux biosourcés (GDR MBS : <https://gdr-mbs.univ-gustave-eiffel.fr/evenements-du-gdr/2022/journee-du-gdr/>) : Groupe rassemblant différents chercheurs, se réunissant régulièrement pour partager des travaux autour des matériaux biosourcés. Dans ce sens, le dernier événement a mis à l'honneur le bambou et plusieurs professionnels du bambou sont intervenus (Simon Crouzet – Les pépinières de la bamboueraie, François Puech – Bambooscoopic, Pierre Boucher – Ingénieur Indépendant). Un collectif de chercheur travaillant sur le bambou s'est créé à cette occasion (Théo VINCESLAS-Karibati est inscrit).

Ensuite, nous pouvons contextualiser en comparant ces informations sur le bambou en construction sur le territoire français avec les normes existantes dans le monde. Pour ce faire, nous proposons de citer directement des parties de l'article scientifique « Sustainable structures : bamboo standards and building codes » [22]. On retrouve dans cet article les citations de normes de 6 pays (Chine, Colombie, Equateur, Inde, Pérou et Etats-Unis) ainsi que des normes internationales.

L'article, datant de 2014, conclut notamment sur un intérêt grandissant de la communauté internationale pour l'utilisation du bambou en structure. Dans ce sens, une dynamique est observée notamment dans le développement de nouvelles normes ou réglementation.

En 2018, une norme internationale est publiée sur les principes de bases et les procédures permettant d'évaluer la qualité d'une chaume de bambou en tant que matériau de construction [23].

En 2020, nous voyons naître une nouvelle norme internationale sur le bambou en tant que matériaux : <https://www.iso.org/fr/news/ref2547.html> Cette norme est décrite comme un point de départ, et donne les termes et définitions reconnus au niveau international par la filière.

Légende de la carte

Miconia calvescens

- Bambous identifiés sur la trace 2021 CBNMq
- Bambous pointés 2019 DEAL
- Surface de Bambou identifié par l'OcSGE 2018 IGN
- Formations végétales 2017 IGN

Fond de carte

ROUTE BD TOPO IGN 2021

- Bretonne
- Liaison locale
- Liaison principale
- Liaison régionale
- Type autoroutier
- Martinique IGN 2018

0 1 2 3 4 5 km



→ Top 15 des superficies de couverture du sol :

Rang	Couverture	Superficie (Ha)	%	Cumul
1	CS2.1.1.1.25 - Forêt moyennement humide ou humide	28 913,7	26,1%	26,1%
2	CS2.1.1.1.30 - Formation arborée des zones agricoles ou d'habitation	11 803,8	10,6%	36,7%
3	CS2.1.1.1.24 - Forêt sèche haute	9 463,5	8,5%	45,2%
4	CS2.2.1.1 - Prairies	8 573,1	7,7%	53,0%
5	CS2.1.1.1.23 - Forêt sèche basse	8 199,3	7,4%	60,4%
6	CS2.2.2.2 - Bananiers	6 876,7	6,2%	66,6%
7	CS1.1.1.1 - Zones bâties	4 695,1	4,2%	70,8%
8	CS2.2.1.4.5.5 - Cannes à sucre	4 188,1	3,8%	74,6%
9	CS2.2.1.2 - Pelouses, herbe rase	4 061,0	3,7%	78,2%
10	CS2.2.1.4 - Autres terres arables	3 366,8	3,0%	81,3%
11	CS1.1.1.2 - Zones non bâties	2 825,5	2,5%	83,8%
12	CS2.2.2.1 - Bambous	2 820,5	2,5%	86,4%
13	CS2.1.1.1.27 - Peuplement de mahogany	2 686,6	2,4%	88,8%
14	CS2.1.2.5.1 - Friche avec fort couvert de ligneux bas	2 673,7	2,4%	91,2%
15	CS2.1.1.1.21 - Mangrove	2 229,9	2,0%	93,2%

Tableau du top 15 des surfaces végétalisées d'après l'analyse de l'image aérienne 2018 de l'IGN pour l'OcSGE

La Figure 27 présente les zones (en rose) où l'on peut retrouver du bambou de l'espèce *Bambusa Vulgaris*. De ce travail cartographique sont tirés des chiffres (sous-estimés selon Jeanne De Reviers - Chargée de mission Plantes Exotiques Envahissantes & Plantes Locales - CBNMq), notamment sur les surfaces végétalisées (y compris agriculture et friches) :

- Bambou - 2,5% des surfaces. Ce qui correspond à 2821 Hectares [24].
- Mahogany - 2,4% des surfaces
- Culture de canne à sucre - 3,8% des surfaces
- Culture de Banane - 6,2% des surfaces.

Cette forte présence du bambou en Martinique, et notamment d'une espèce fortement envahissante, mène à des volontés de contrôle, voire de suppression du *bambusa vulgaris* par différentes institutions locales (Conservatoire Botanique National de Martinique, Office National des Forêts, ...).

2.1.2 *Guadua angustifolia*

En Martinique, cette espèce est particulièrement présente au sein de la bamboueraie « les jardins de la bamboueraie à Sainte-Marie.

Aucun quantitatif de cette ressource n'a été réalisé. Il paraît juste d'estimer que la surface de *Guadua* au sein de la bamboueraie mentionnée est inférieure à 1 Hectare.

2.1.3 *Dendrocalamus giganteus*

Toujours en Martinique, on retrouve simplement quelques touffes de cette espèce au Jardin de Balata (Jardin botanique à Fort-de-France). Aucun quantitatif n'est disponible.

2.2 Historique des démarches de développement du bambou en tant que matériaux de construction

La filière Bambou en Martinique n'est pas naissante et connaît différents faits marquants historiques que nous rappelons ici :

- Fin des années 80 : une première dynamique apparaît autour du matériau bambou (sans attachement à une espèce particulière) pour la construction dans le souhait de disposer de matériaux locaux. L'origine de ce souhait n'est pas connue, ou l'information n'a pas été divulguée lors des différents entretiens. Dans ce cadre, deux actions sont mises en place :
 - La venue d'un conférencier-formateur Sud-américain, ayant l'expérience de la construction bambou
 - La mise en place d'une bamboueraie avec deux espèces de bambous (*bambusa vulgaris* et *guadua angustifolia*)
- Le matériau a ensuite vu localement se succéder plusieurs acteurs : artisans, pépiniéristes, formateurs, gestionnaires de bamboueraies...

Peu de documentation existe sur cet historique. Les faits cités plus-haut correspondent uniquement à un résumé des faits racontés et recueillis à travers les différents entretiens menés pour cette étude. On pourrait donc se poser la question suivante : Que s'est-il passé, depuis l'introduction des premiers bambou pour la construction en Martinique, pour qu'aujourd'hui il n'y ait toujours pas de filière fonctionnelle autour de ce matériau ?

Seuls quelques éléments de réponses ont été évoqués par certains acteurs, d'autres éléments sont ici des hypothèses :

- Faible intérêt des artisans locaux à une période où le béton armé est en plein essor, et est considéré simple à mettre en œuvre et économique (malgré l'importation de différentes matières, et le coût potentiellement engendré)
- Faible taux de formation, tout corps d'état confondu
- Force des lobbys des matériaux considérés aujourd'hui conventionnels (béton armé, brique de terre cuite)
- Les premières expérimentations utilisant des bambous locaux ont été réalisées sans respecter l'ensemble des bonnes pratiques permettant une durabilité de l'ouvrage. Ces expérimentations se sont révélées infructueuses et ont fait mauvaise presse au matériau (élément raconté par un acteur local)
- Pas de stratégie réellement mise en œuvre, notamment sur la transmission des savoirs.

La conjoncture actuelle (augmentation des coûts de l'énergie, augmentation des impacts de la dépendance à la métropole ou autres pays proche pour la construction, dynamique autour de l'éco-construction et notamment des matériaux biosourcés, dynamique de la recherche scientifique...) permet un renouveau, une nouvelle dynamique qui est à exploiter.

2.3 Eco-système d'acteurs autour du bambou

Dans cette partie, nous tentons de résumer l'environnement dynamique autour du sujet bambou en Martinique. Il s'agit de décrire brièvement les acteurs locaux et leur(s) rôle(s). Pour se faire, différents outils sont utilisés.

Premièrement, nous plaçons dans le tableau ci-dessous une liste des acteurs considérés comme directement ou indirectement concernés par le sujet. Nous avons placé dans ce premier tableau deux catégories : institutionnels et associatifs d'un côté, professionnels du (ou en lien avec le) BTP de l'autre. Cette catégorisation n'est pas exacte, puisque certains acteurs peuvent être considérés comme faisant partie des deux catégories. C'est notamment le cas de l'AFAF, qui est plutôt un acteur de terrain (activité ici considérée basée sur le prélèvement de bambou). Nous les plaçons ici de cette façon puisqu'ils n'agissent pas sur la thématique Construction. Ensuite, les acteurs indiqués en gris n'ont pas pu faire l'objet d'entretien. Néanmoins, on les sait directement impliqués.

	Structures		Noms
Institutionnels, associatif	DEAL	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement	Clémence Pharose et Aude Kubik (Guadeloupe), Karine Rolas, Carl Calmo, Michel Mieville (Martinique)
	DAAF	Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt	Chantal Coran
	ONF	Office National Des forêts	Iris Abu-baker
	CBNMq	Conservatoire Botanique National de Martinique	Jeanne Dereviers
	KEBATI	Centre de Ressource sur la qualité Environnementale du Bâtiment	Florence Talpe, Nicolas Fulpin, Nadim El-Gelaz, Eva Lambert, Martine Léoture
	AFAF	Association Française d'Agroforesterie	Claire Vaskou
	Université des Antilles	-	Laurence Romana
	CAUE	Conseil d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement	Thibaut Duval, Jérémie BRENA
	CROAM	Conseil Régional de l'Ordre des Architectes de Martinique	Jean-François Caclin,
	CTM	Collectivité Territoriale de Martinique	Julien RAZAT
	AQC	Agence Qualité Construction	Aurélien LOPEZ
Professionnels du (ou en lien avec le) BTP	Les jardins de la Bambouseraie	Pépinière – Bambouseraie – Ateliers et formations	Christophe Relouzat
	SARL Syntropique	Pépinière – Ateliers et formations - Agroforesterie	Hervé Damico
	Adequa	Organisme de Formation	Arjuna Sulty
	Eco-Logis	Construction avec matériaux issu du réemploi et matériaux locaux	Jean-Pierre Lafontaine
	MB Leoture	Architecte	Martine Leoture
	La Savanne des esclaves	Circuit touristique sur l'histoire de la Martinique	Gilbert Larose
	CCPYPM (Centre de Culture Populaire Ypiranga de Pastinha Martinique)	Formations - ateliers	Théo Angulerio

D'autres acteurs pourraient être cités, et la liste au-dessus n'est sûrement pas exhaustive. Nous pouvons aussi évoquer les acteurs extérieurs à la Martinique, et notamment les agences d'architectures qui développent des projets en Martinique. C'est le cas de l'agence Tangram (<https://app.bam.archi/architecte/tangram-architectes>) et de l'agence MEAT architecture (<https://www.meatarchitectures.com/>). Ces deux agences développent des projets dans le cadre du PUCA (Plan Urbanisme Construction Architecture) de la commune du Prêcheur.

En ce qui concerne l'Université des Antilles, plusieurs choses sont à considérer :

- Il existe un département d'ingénieur, situé en Guadeloupe (<http://departement-ingenieur.univ-antilles.fr/>)
 - o Dans ce département se trouve deux parcours « Génie de l'environnement spécialité matériaux » et « génie des systèmes énergétiques »
 - o Dans le premier se trouve une spécialité « Matériaux de construction écologiques et innovants ». Il serait particulièrement intéressant de se rapprocher des acteurs de cette formation (laurence.romana@univ-antilles.fr directrice du département d'ingénierie, sarra.gaspard@univ-antilles.fr Responsable du diplôme Ingénieur Génie de l'environnement spécialité Matériaux) afin de potentiellement intégrer des modules de formation sur les matériaux locaux.
- On retrouve deux laboratoires pouvant s'inscrire dans la démarche de développement de la valorisation du bambou.
 - o « Centre Commun de Caractérisation des Matériaux des Antilles et de la Guyane (C³MAG) » dans lequel se trouve des compétences et du matériel permettant de réaliser de la caractérisation de matériau à l'échelle microscopique ou inférieure. C'est notamment un travail utile dans la caractérisation des espèces de bambou locales, ou d'autant plus si des matériaux de construction innovant intégrant du bambou seraient envisagés (par exemple, caractériser l'interface entre le bambou et un autre matériau, ou entre deux surface de bambou dans le cas d'assemblages collés). Cela peut aussi être envisagé pour caractériser l'impact d'un traitement sur différentes surfaces ou volumes de bambou.
 - o « COVACHIM-M2E : Connaissance et Valorisation : Chimie des matériaux Environnement, Energie » dans lequel on retrouve des compétences sur la caractérisation mécanique et thermique des matériaux. Le matériel nécessaire à la caractérisation mécanique de matériaux de construction n'est pas présenté. L'activité de recherche du laboratoire COVACHIM-M2E EA 3592 se développe autour de 4 grands axes, les uns pouvant alimenter les autres :
 - Axe 1 : les matériaux poreux pour la dépollution
 - Axe 2 : les composites renforcés par des fibres végétales (à matrice cimentaire (CFVC) ou polymère)
 - Axe 3 : la connaissance et la valorisation des agro-ressources dans les domaines de l'agro-alimentaire et de la santé - Qualification des produits agro-transformés
 - Axe 4 : Eco-matériaux enrichis en principes actifs issus de la biodiversité pour la construction et la lutte anti-vectorielle.

Pour tenter de représenter l'écosystème d'acteurs, le diagramme en Figure 28 présente des domaines d'actions, et place les acteurs en fonction de leurs activités. La position de ces acteurs dans les différents (ou à l'intersection) domaines indique leur rapprochement avec les différentes thématiques d'actions.

Par exemple, les agences d'architectures sont proches des artisans locaux et producteurs de bambou, et sont aussi souvent proches des organismes de recherche lorsqu'il s'agit de systèmes constructifs innovants. Nous avons placé KEBATI plutôt au centre puisque l'association réalise un travail de mise en lien des différents acteurs et organise des événements de sensibilisation contribuant notamment à la création de réseau.

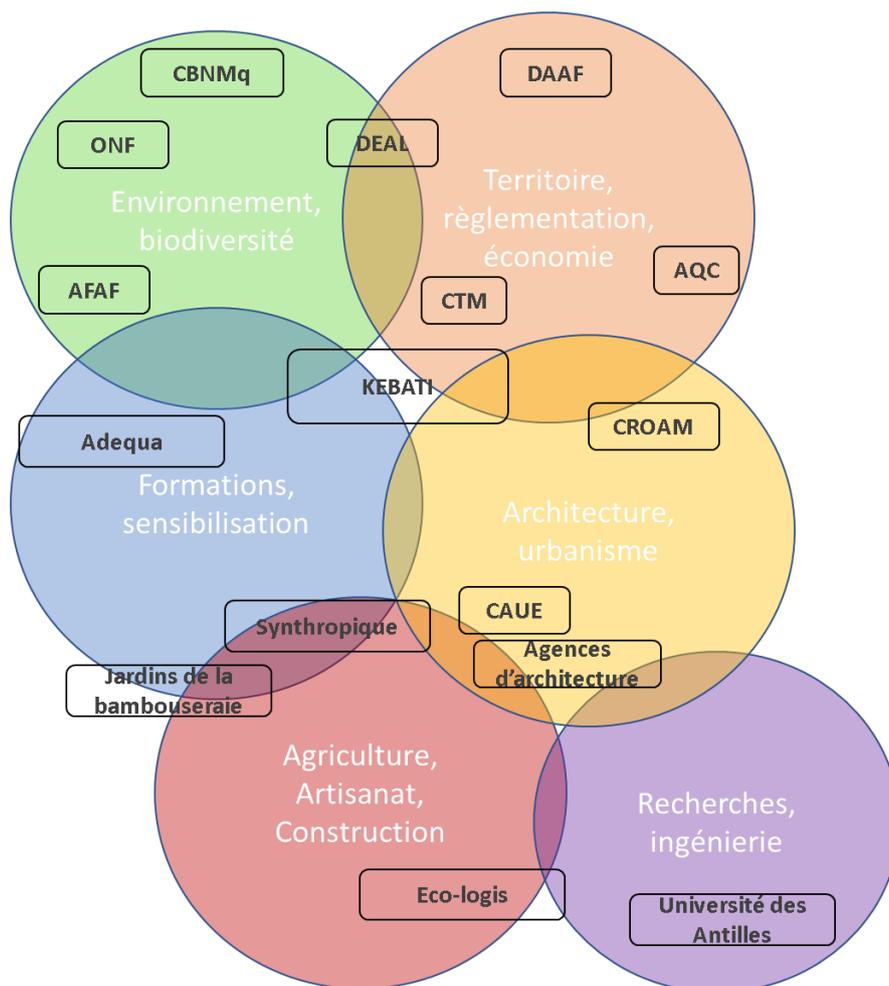


Figure 28: Représentation graphique de l'écosystème d'acteurs autour de la thématique Bambou

Cette représentation a ses limites, elle ne permet pas de visualiser le concept de filière. Pour ce faire, nous proposons la représentation suivante (Figure 29), dans laquelle nous plaçons d'un côté les « maillons » de la chaîne de valeurs de la filière Bambou pour le bâtiment, et de l'autre côté les acteurs (identifiés ou non) associés.

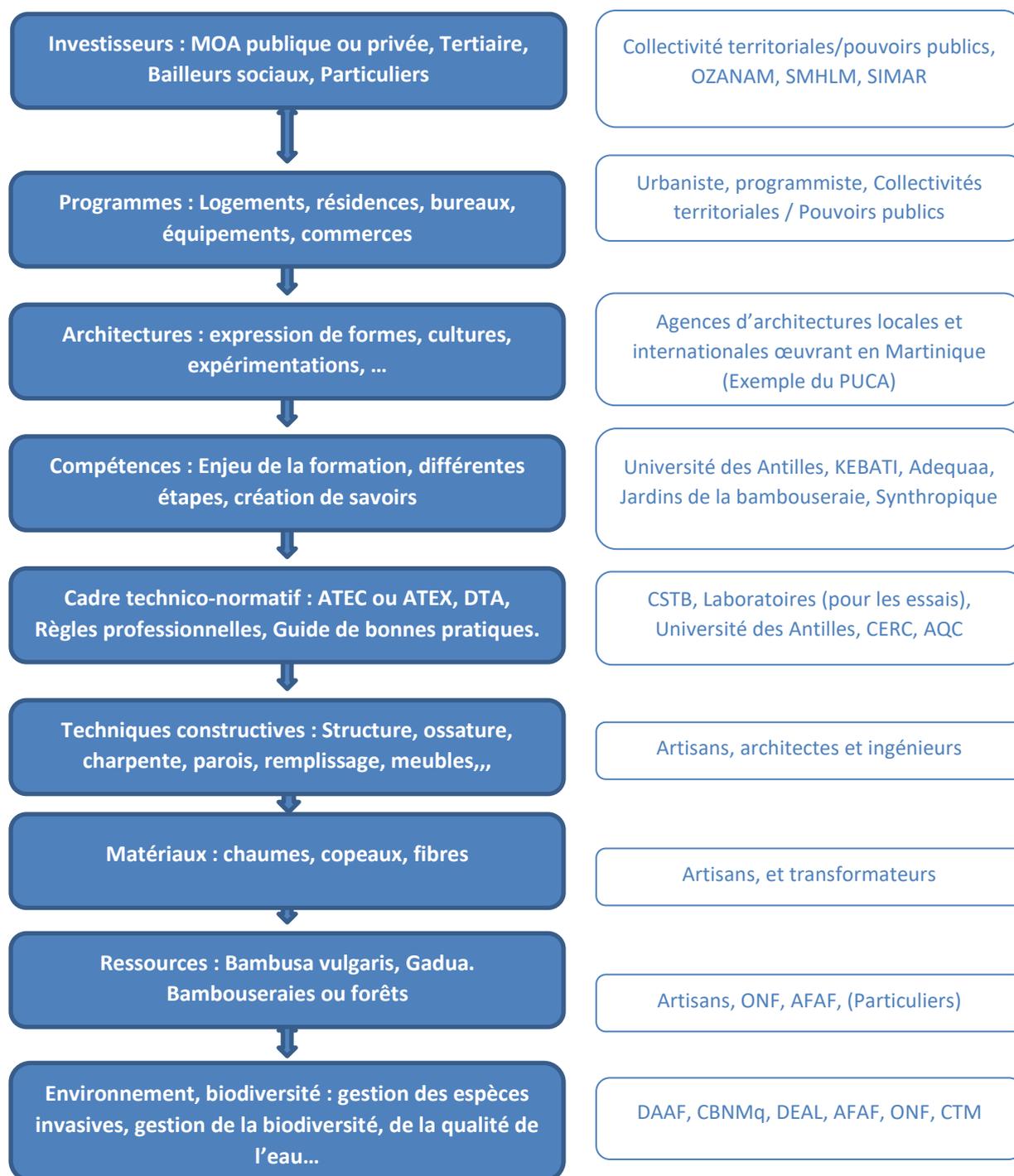


Figure 29: Représentation schématique simplifiée d'un concept de filière Bambou en Martinique

2.4 Les différentes dynamiques autour du bambou en Martinique

Aujourd'hui, les acteurs présents sur l'île témoignent d'un intérêt et s'engagent à différentes échelles en faveur d'une dynamique de développement d'activités de construction autour de ce matériau, néanmoins les avis divergent sur les stratégies à adopter. Nous tentons de les résumer ici. Il est conseillé de se référer aux entretiens réalisés (rapports d'entretiens) pour lier les discours avec les acteurs :

- Stratégie de contrôle de l'espèce *Bambusa vulgaris* par extraction/substitution.

Ici, un groupe d'acteurs souhaite développer la filière bambou en Martinique en mettant en place un ensemble d'actions. Ils imaginent un développement économique sur la base du matériau bambou via le contrôle de l'espèce invasive et de son remplacement par d'autres espèces locales :

- Extraire le bambou *vulgaris*, et planter à sa place des essences endémiques et nourricières, afin d'augmenter la possibilité pour les locaux de se nourrir facilement et localement.
- Développer un procédé de traitement limitant les impacts environnementaux (eau de mer, cire, etc.) est favorisé.
- Repartir, sur les divers endroits du territoire, des bassins de traitement des chaumes en mer de sorte à diminuer les efforts logistiques. Compléter le dispositif d'un centre de traitement par thermo-cirage.
- Construire un centre de formation dans lequel il serait possible de former, mais aussi d'expérimenter le bambou sous toutes ses formes et pour diverses applications (mobilier, éléments de structures, éléments de finitions ...)

- Stratégie d'accompagnement des agriculteurs au développement d'une activité d'exploitation du bambou

Ici, un autre groupe d'acteurs souhaiterait développer la filière bambou en mettant en place d'autres zones d'exploitation d'un bambou reconnu qualitatif pour le bâtiment (*Guadua angustifolia*), et ainsi faire profiter le plus grand nombre de ce développement.

- Mettre en place des bambouseraies de petite surface chez les agriculteurs encadrées par un protocole d'étude du site permettant de suivre l'exploitation et de contenir les risques de développement envahissant.
- La gestion et l'exploitation de ces petites surfaces permettraient de créer un complément de revenu pour les petits agriculteurs, aujourd'hui en difficulté financière [25], [26].
- Le bambou ainsi disponible est facile d'accès, de qualité, et permet de développer une activité de transformation (comprenant le traitement et une possible standardisation des chaumes pour qu'elles soient propres à la construction) puis de construction.

Plusieurs acteurs sont potentiellement intéressés par le développement d'une filière bambou en Martinique. Certains s'inscrivent dans une démarche, ou l'autre, ou les deux.

D'autres approches sont mises en avant. C'est le cas de l'entreprise Bambooforlife (<https://bambooforlife.fr/>). La société développe des solutions de station d'épuration utilisant les bambous pour permettre une phyto-épuration (ou épuration des eaux grises par les plantes) ou phytoremédiation. Le propos est notamment d'indiquer qu'en plus de l'épuration, il y a production de biomasse, captation de CO2 et création d'îlot de fraîcheur.

Les bambous produits pourraient être valorisés en matériau pour la construction. A noter que cette entreprise est au cœur de plusieurs projets de recherche, notamment un sur l'utilisation du bambou pour dépolluer les sols pollués au chlordécone. Cette société a exploré plusieurs pistes de valorisation du bambou, comme la transformation des chaumes en parquet brut, ou l'utilisation des copeaux de bambou pour la création de panneaux de bambou compressé.

Contacts

Karibati

Théo Vincelas – Chargé de mission – t.vincelas@karibati.com

Marion Chirat – Associée fondateur – m.chirat@karibati.com

Les pépinières de la bamboueraie

Simon Crouzet – Co-gérant – s.crouzet@bambous.pro

Bibliographie

- [1] « Classification classique », *Wikipédia*. 3 octobre 2022. Consulté le: 2 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Classification_classique&oldid=197447163
- [2] « Floraison des bambous », *Wikipédia*. 7 mai 2021. Consulté le: 2 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Floraison_des_bambous&oldid=182688189
- [3] « Liste d'espèces de bambous par pays », *Wikipédia*. 14 octobre 2022. Consulté le: 2 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Liste_d%27esp%C3%A8ces_de_bambous_par_pays&oldid=197766307
- [4] « Identifying Bamboo », *Lewis Bamboo*. <https://lewisbamboo.com/pages/identifying-bamboo> (consulté le 10 octobre 2022).
- [5] Z. Lv, F. Zhu, D. Jin, Y. Wu, et S. Wang, « Seed Germination and Seedling Growth of *Dendrocalamus brandisii* in vitro, and the Inhibitory Mechanism of Colchicine », *Front. Plant Sci.*, vol. 12, 2021, Consulté le: 10 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021.784581>
- [6] Bambooneem.Re, « Plan de filière BAMBOU 2020-2030, Île de La Réunion – BAMBOONEEM.RE ». <https://bambooneem.re/fr/plan-de-filiere-bambou-2020-2030-ile-de-la-reunion/> (consulté le 3 novembre 2022).
- [7] « 养殖课堂：水培龙竹如何养护？-农技学堂 - 惠农网 ». <https://www.cnhnb.com/xt/article-109997.html> (consulté le 3 novembre 2022).
- [8] « *Dendrocalamus giganteus* », *Wikipédia*. 24 octobre 2022. Consulté le: 3 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Dendrocalamus_giganteus&oldid=198061195#cite_note-7
- [9] K. Ghavami et A. B. Marinho, « Physical and mechanical properties of the whole culm of bamboo of the *Guadua angustifolia* species », *Rev. Bras. Eng. Agric. E Ambient.*, vol. 9, p. 107-114, mars 2005, doi: 10.1590/S1415-43662005000100016.
- [10] « Tout savoir sur le bambou *Guadua* ». <https://www.bigbamboo.world/blog-bigbamboo/post/Tout-savoir-sur-le-bambou-guadua.html> (consulté le 3 novembre 2022).
- [11] D. Hériaud, M. Kugler, et E. Mühlberger, « En quête d'insecte », Les pépinières de la bamboueraie, Technique.
- [12] P.-D. LUCAS, « Les coccinelles de la Martinique : une ressource biologique méconnue pour la protection durable des cultures », FREDON (Fédération Régionale de Défense contre les Organismes Nuisibles).
- [13] S. Kaminski, A. Lawrence, D. Trujillo, et C. King, « Structural use of bamboo. Part 2: Durability and preservation », *Struct. Eng.*, vol. 94, n° 10, p. 38-43, oct. 2016.
- [14] S. Kaminski, « Engineered bamboo houses for low-income communities in Latin America », *Struct. Eng.*, vol. 91, p. 14-23, oct. 2013.
- [15] B. Loktongbam et R. Borah, « Traditional Methods of Post Harvest Bamboo Treatment for Durability Enhancement », vol. 8, janv. 2017.
- [16] C. & B. C. Ldt, « Traitement du bambou à l'eau de chaux », *Chalet & Bambou*, 8 juin 2011. <http://chalet-bambou.blogspot.com/2011/06/traitement-du-bambou-leau-de-chaux.html> (consulté le 3 novembre 2022).
- [17] *Webinar | Structural use of bamboo culms (Part 1)*, (18 novembre 2020). Consulté le: 3 novembre 2022. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=hk_484Hx060
- [18] « BSI ». <https://www.bambooscience.fr/fr/Sciences.html> (consulté le 4 janvier 2023).
- [19] *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10: decreto número 926 de 2010*. Bogotá: Imprenta Nacional, 2010.
- [20] L. Collin et C. Desodt, « Habitations végétales : ça tient le bambou ? ».
- [21] G. Minke, *Construction manual for earthquake-resistant houses built of earth*. 2001.
- [22] A. Gatóo, B. Sharma, M. Bock, H. Mulligan, et M. H. Ramage, « Sustainable structures: bamboo standards and building codes », *Proc. Inst. Civ. Eng. - Eng. Sustain.*, mai 2015, doi: 10.1680/ensu.14.00009.
- [23] « Normes internationales ISO concernant la bambou », <https://www.bamboo-concept.com/>. <https://www.bamboo-concept.com/technique/iso/> (consulté le 25 octobre 2022).

- [24] « GéoMartinique - OCS GE ». https://www.geomartinique.fr/accueil/ressources/ocs_ge (consulté le 17 octobre 2022).
- [25] « Les coûts de production flambent pour les agriculteurs de Martinique », *Martinique la 1ère*. <https://la1ere.francetvinfo.fr/martinique/les-couts-de-production-flambent-pour-les-agriculteurs-de-martinique-1315844.html> (consulté le 4 janvier 2023).
- [26] I. Martinique, « Les premières données du recensement agricole 2020 », 6 janvier 2022. <https://daaf.martinique.agriculture.gouv.fr/les-premieres-donnees-du-recensement-agricole-2020-a704.html> (consulté le 4 janvier 2023).



Développement des filières terre et bambou sur les territoires de Martinique, de Guadeloupe et de Guyane



Table des matières

INTRODUCTION GENERALE : LIMITES DE L'ETUDE	4
1. FILIERE BAMBOU	5
1.1 <i>Introduction – éléments de contexte – sujets évoqués par les acteurs.....</i>	5
1.1.1 Extraction/substitution et valorisation de l'espèce <i>Bambusa vulgaris</i>	5
1.1.1.1 Cadre.....	5
1.1.1.2 Ressource.....	6
1.1.1.3 Valorisation.....	7
1.1.1.4 Point sur le contrôle direct de l'espèce	7
1.1.1.5 Risques liés à l'exploitation d'une espèce exotique envahissante (EEE)	8
1.1.2 Développement / Culture d'une espèce « qualitative »	9
1.1.2.1 Cadre.....	9
1.1.2.2 Ressource.....	10
1.2 <i>Méthodologie.....</i>	11
1.3 <i>Application 1 : Structure - Ossature - Charpente</i>	12
1.3.1 Commentaires :.....	12
1.3.2 Analyse de la matrice et proposition d'actions.....	12
1.3.3 Matrice SWOT (Application 1 : Structure - Ossature – Charpente)	13
1.4 <i>Application 2 : Bardage / Pare-soleil.....</i>	14
1.4.1 Analyse de la matrice et proposition d'actions.....	14
1.4.2 Matrice SWOT (Application 2 : Bardage / Pare-soleil)	15
1.5 <i>Application 3 : Isolation par les fibres</i>	16
1.5.1 Commentaires :.....	16
1.5.2 Analyse de la matrice et proposition d'actions.....	16
1.5.3 Matrice SWOT : Application 3 : Isolation par les fibres	17
1.6 <i>Application 4 : Terre allégée – broyat de bambou et terre crue</i>	18
1.6.1 Commentaires :.....	18
1.6.2 Analyse de la matrice et proposition d'actions.....	18
1.6.3 Matrice SWOT (Application 4 : Terre allégée – broyat de bambou et terre crue).....	19
2. FILIERE TERRE CRUE	20
2.1 <i>Introduction – éléments de contexte.....</i>	20
2.1.1 Cadre.....	20
2.1.2 Ressource.....	21

2.1.2.1	Construire local avec la terre crue	21
2.1.2.2	Mettre en place une unité de préfabrication	22
2.1.3	Éléments évoqués (ou inspirés) par les acteurs.....	22
2.1.3.1	Etude et développement de solutions pour l'acceptabilité sociale.....	22
2.1.3.2	La problématique de la formation	23
2.2	<i>Application 1 : Briques de Terre Compressées (BTC)</i>	24
2.2.1	Commentaires :	24
2.2.2	Matrice SWOT : Application 1 : Briques de Terre Compressées (BTC)	25
2.3	<i>Application 2 : Adobe</i>	26
2.3.1	Commentaires :	26
2.3.2	Analyse de la matrice et proposition d'actions.....	26
2.3.3	Matrice SWOT : Application 2 : Adobe	27
2.4	<i>Application 3 : Enduits</i>	28
2.4.1	Analyse de la matrice et proposition d'actions.....	28
2.4.2	Matrice SWOT : Application 3 : Enduits	29
2.5	<i>Application 4 : Pisé</i>	30
2.5.1	Commentaires :	30
2.5.2	Matrice SWOT	31
CONTACTS		42

Introduction générale : limites de l'étude

Le présent document a pour but de résumer l'état des lieux réalisé et décrit dans les livrables précédents puis, en fonction des principaux éléments retenus, de proposer des stratégies de développement des filières Bambou et Terre crue. L'état des lieux ayant été fait avec plus de précision sur le territoire de la Martinique, ces stratégies s'appliquent principalement à celui-ci. Lorsque des parallèles avec les territoires de la Guadeloupe ou de la Guyane sont possibles, cela sera précisé directement dans le texte.

L'histoire, l'économie, les caractéristiques géographiques, les dynamiques liées aux matériaux bambou et terre crue sont autant d'éléments marquant de grandes différences entre les différents territoires. Ce travail ne peut prétendre à être utilisé de façon général entre la Guadeloupe, la Martinique et la Guyane. En revanche, il peut servir de base, notamment sur la méthodologie, pour engager des travaux d'études et de réflexions sur la Guadeloupe et la Guyane.

La liste des stratégies proposées ne se veut pas exhaustive, d'autres stratégies pourraient être envisagées. Les travaux ici présentés sont des orientations stratégiques considérées comme « prioritaires » par le Comité de Pilotage de l'étude (Ademe, Kebati et Karibati).

Aussi, ces stratégies ne doivent pas être considérées comme définitivement fixées. Il s'agit de propositions, qui doivent impérativement être discutées et remaniées avec l'ensemble des acteurs concernés.

Enfin, ces propositions de stratégies doivent être considérées comme figées dans le temps : elles sont construites à un instant T (Novembre 2022) et ne sauraient être valable dans un temps long sans être reconsidérées. Nous pouvons ici placer quelques éléments sur lesquels une attention doit être portée dans l'année suivant l'étude et qui peuvent faire office de curseur d'adaptation des stratégies :

- Évolution des dynamiques
 - Apparition de nouveaux acteurs
 - Constructions / expérimentations utilisant la terre crue ou le bambou
- Évolution de la réglementation
 - Echelle nationale
 - Démarches d'autres acteurs sur les territoires français
- Évolution du contexte économique
 - Appels à projets, aides publiques
 - Évolution du coût de l'énergie et des matériaux

L'ensemble des éléments ci-avant représentent les limites de l'étude et des propositions de stratégies. Ces dernières doivent donc toujours être analysée en considérant cet ensemble.

1. Filière Bambou

1.1 Introduction – éléments de contexte – sujets évoqués par les acteurs

La filière Bambou en Martinique n'est pas naissante et connaît différents faits marquants historiques que nous rappelons ici :

- Fin des années 80 : une première dynamique apparaît autour du matériau bambou pour la construction dans le souhait de disposer de matériaux locaux. Dans ce cadre, deux actions sont mises en place :
 - La venue d'un conférencier-formateur Sud-américain, ayant l'expérience de la construction bambou
 - La mise en place d'une bamboueraie avec deux espèces de bambous (*bambusa vulgaris* et *guadua angustifolia*)
- Le matériau a ensuite vu localement se succéder plusieurs acteurs : artisans, pépiniéristes, formateurs, gestionnaires de bamboueraies...
- Aujourd'hui, les acteurs présents sur l'île souhaitent s'engager dans une dynamique de développement des activités de construction autour de ce matériau, mais ont des avis divergents sur les stratégies à adopter.

Avant de proposer dans ce document différentes stratégies, nous posons d'abord différentes voies proposées par les acteurs. Ces voies ont notamment été brièvement présentées lors d'une réunion dans les locaux de l'ADEME Martinique, le 9 juin 2022 :

1.1.1 Extraction/substitution et valorisation de l'espèce *Bambusa vulgaris*

1.1.1.1 Cadre

L'espèce *Bambusa vulgaris* est classée espèce exotique envahissante (EEE). Il est indiqué qu'elle étouffe les autres espèces (rien d'autre ne pousse au pied des bambous), et se développe facilement. Ce caractère envahissant donne lieu à des volontés de contrôle de la part d'entités locales (CBNMq¹, ONF², DAAF ...). Cependant la question de la gestion ou du contrôle de l'espèce est difficile :

1. En Guadeloupe, l'ONF a déjà mis en place une stratégie de contrôle du bambou vulgare. Les bambous étaient coupés régulièrement, les touffes ainsi coupées étaient bâchées pour éviter la repousse. Malheureusement, cette initiative n'a pas été accompagnée d'une stratégie de valorisation économique des bambous ainsi coupés. Fautes de moyens permettant d'entretenir le coût financier de cette action, les acteurs évoquent un échec.
2. Les touffes de bambou sont régulièrement présentes dans des zones escarpées, difficiles d'accès. Cela occasionne à la fois un découragement, des moyens techniques et financiers plus importants pour pouvoir extraire et supprimer dans ces zones.
3. Cela nécessite d'avoir en présence des personnels formés, équipés et assurés.

¹ Conservatoire Botanique National de Martinique

² Office National des Forêts

4. Les zones étant parfois sur le domaine public, d'autres fois sur des zones privées, la question d'une mise en place de marché avec consultations d'entreprises doit être posée en fonction des conditions évoquées ici.

1.1.1.2 Ressource

Sur la question de la ressource disponible, nous disposons de données envoyées par le CBNMq, et notamment présentées sur le site www.geomartinique.fr. Pour rappel, la carte présentée dans la partie 2.1 du livrable 1 de ce document fait apparaître une estimation de 2 821 Ha de bambou vulgaires .

Nous avons besoin de données concernant l'évaluation du nombre de chaumes par hectare de bambou. On retrouve dans la littérature scientifique, des études sur l'analyse de quelques caractéristiques physiques de différentes espèces de bambou par voie analyse d'images aériennes [1]. Les auteurs Barnabas Neba Nforokah et al. au Cameroun indiquent obtenir les résultats suivants (caractéristiques physiques et estimations de nombre de touffes ou chaumes)[2] :

Variété de bambou	Variables prédictives	Minimum	Maximum	Moyenne	Déviat ion standard
<i>B. vulgaris</i>	Diameter (cm)	4.33	10.66	7.62	1.21
	Height (m)	9.55	22.34	15.97	2.96
	Age (year)	1	≥ 3	-	-
	Girth _{clump} (m)	7.18	40.00	20.75	9.76
	Nculm clump ⁻¹	20	255	107	67

Statistiques descriptives	Bambusa vulgaris
Nchaume. ha-1	2296 ± 631
Nclumps. ha-1	20 ± 3
Average AGB _{culm} (kg)	29.80 ± 6.96
AGB _{clump} bamboo (t ha-1)	63.02 ± 4.10
AGB _{clump} bamboo (t C ha-1)	29.62 ± 1.93b
AGB _{clump} bamboo (t CO _{2eq} ha-1)	108.70 ± 7.07

On retiendra particulièrement que pour 1Ha, on peut trouver environ 2296 (± 631) chaumes de *bambusa vulgaris*. Ainsi, on peut réaliser une estimation, basée sur des hypothèses, pour obtenir un mètre linéaire de chaumes potentiellement utilisables pour la construction :

	Moyenne	Deviation standard	Unité	Commentaires
Surface de bambusa vulgaris	2820	?	Ha	Il serait utile de considérer une marge d'erreur
Nombre de chaume / Ha	2296	631	(-)	
Nombre de touffe / Ha	20	3	(-)	
Nombre total de chaume	6,47E+06	1,78E+06		
Nombre total de chaume à maturité (3-4 ans)	1,62E+06	4,45E+05		En considérant une répartition linéaire entre les chaumes de 1 à 8 ans (hypothèse spécifique à l'espèce <i>Bambusa vulgaris</i>)
Équivalence en mètre de bambou utilisable	1,94E+07	5,34E+06		12 mètres sur une chaume de 20

Cette estimation permet de montrer que l'on dispose potentiellement d'une ressource très importante en Martinique (pas loin de 20 millions de mètres linéaires). Néanmoins, ce chiffre est à prendre avec recul en considérant toutes les hypothèses qui ont été faites, et qu'il conviendra de modérer selon l'exploitabilité (l'accessibilité notamment) de ces touffes de bambou.

1.1.1.3 Valorisation

Actuellement, on constate sur le territoire plusieurs voies de valorisation :

1. L'AFAF (Association d'Agroforesterie Française) œuvre à la coupe du bambou sur plusieurs espaces identifiés. Ils disposent de moyens techniques d'extraction du bambou, expérimentent des moyens de contrôle (coupe puis plantation d'autres espèces endémiques), et revendent en partie les bambous extraits sous forme de granulat pour une valorisation en Biomasse Energie avec l'entreprise Albioma.
2. Des artisans expérimentent la construction avec ce bambou. C'est le cas de :
 - L'entreprise Eco-Logis avec l'utilisation de bambou traité en bardage ou non traité en cloison intérieure.
 - L'artisan Makia Esther avec l'utilisation de bambou pour tout type d'application (structure, charpente, bardage, cloison, sols, mobilier...)
 - La SARL Syntropique avec Hervé Damicot qui organise des chantiers expérimentaux. Il y a notamment eu un chantier de case dont la structure est en bambou et le remplissage en mélange terre-sargasse (type terre allégée) avec le soutien de Christophe RELOUZAT de la bamboueraie de Saint Marie.
3. Des architectes cherchent aussi à utiliser cette ressource local. Jérôme NOUEL, de l'agence D'Architecture à la Trinité (Martinique), a construit une maison individuelle et un carbet en utilisant le bambou (*Guadua angustifolia*).

On constate donc qu'il est possible d'utiliser ce bambou pour différentes applications même si cela reste marginal. Pour aller plus loin, il y a un besoin de caractérisation des performances et de la durabilité.

1.1.1.4 Point sur le contrôle direct de l'espèce

Différentes stratégies ont été évoquées concernant les moyens de contrôle de cette espèce, à mettre en parallèle avec l'extraction des chaumes. L'idée étant de contrôler, voire de diminuer au maximum la présence dans cette espèce sur le territoire :

1. Coupe offensive : Coupe régulière des turions jusqu'à épuisement de la plante
2. Bâchage : dépose d'une bâche sur le sol une fois les chaumes coupées à raz
3. Substitution : Plantation d'espèce locale compétitive comme le bois Canon

C'est cette dernière stratégie qui est expérimentée par différents acteurs (SARL Synthropique, AFAF³). Cependant c'est une technique moins intuitive et plus technique (Il faut connaître quelles espèces peuvent être compétitive).

³ Association Française d'AgroForesterie

1.1.1.5 Risques liés à l'exploitation d'une espèce exotique envahissante (EEE)

Une étude de l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature en France) [3] a été publiée en 2018, et présente « les enjeux et risques de la valorisation socio-économique des espèces exotiques envahissantes établies dans les milieux naturels. » Nous citons ci-dessous une partie de la conclusion :

« Les espèces exotiques envahissantes sont à l'origine d'impacts multiples à la fois écologiques, économiques et sanitaires. Ces espèces représentent des sources importantes de difficultés pour les acteurs des territoires qui y sont confrontés : rythme d'introduction croissant, régulation constante et complexe à mettre en œuvre, dépenses publiques associées importantes. Dans certaines situations où elles sont déjà largement établies en milieux naturels, et face aux difficultés de gestion, elles peuvent parfois être envisagées comme des ressources commercialement exploitables : pêche, production de bois, extraction de composés pour l'industrie pharmaceutique, etc.

Cette démarche de valorisation socio-économique n'est cependant pas sans risques pour les milieux naturels et soulève de nombreuses interrogations sur ses incidences possibles. Parmi ces questions figurent l'accroissement des risques de dispersion des espèces valorisées ou encore le maintien volontaire des populations de ces espèces dans les sites colonisés lorsqu'elles deviennent un enjeu économique. »

Cette conclusion indique une forte méfiance envers la possibilité de constituer une filière durable et vertueuse basée sur l'exploitation d'une EEE. Cependant, au cœur du rapport, on retrouve le tableau suivant, synthétisant des études réalisées sur l'exploitation de tout type d'EEE (animale ou végétale) :

Type d'intérêt	Mesures incitatives	Exploitation commerciale
INTÉRÊTS ÉCONOMIQUES, SOCIAUX ET TERRITORIAUX		
Compensation de pertes de revenus	Compensation partielle dans certains pays du Sud et dans certaines collectivités d'outre-mer	OUI
Création d'emplois et de revenus, dynamisation de l'économie locale	Indirectement – création d'emplois pour la coordination et l'animation des programmes	OUI
INTÉRÊTS ÉCOLOGIQUES		
Réduction des impacts sur le milieu naturel	Dans certains cas À démontrer pour d'autres	Dans de rares cas À démontrer pour d'autres
Détournement des pressions anthropiques sur certaines espèces indigènes	Possible - À démontrer	Possible - À démontrer
Sensibilisation à la problématique des EEE et détection des EEE	Oui	Dans certains cas, lorsqu'accompagnée d'actions de formation
Acquisition de connaissances sur la biologie et l'écologie de l'espèce	Dans certains cas, si accompagnées d'études scientifiques	Dans certains cas, si accompagnée d'études scientifiques

Figure 1: Récapitulatif des cas d'études d'exploitations d'EEE recensés en France et à l'étranger

Finalement, et dans d'autres paragraphes du rapport, on constate qu'il est surtout fait mention de différents manques autour du développement d'une exploitation d'EEE. Nous tentons de les résumer ici :

1. Sensibilisation des habitants à la détection, aux impacts de l'EEE et aux précautions à prendre pour son exploitation
2. Etudes scientifiques portant sur l'acquisition de connaissances biologiques et écologiques
3. Etudes scientifiques démontrant l'impact positif de l'exploitation sur le milieu naturel
 - Pour ce faire, il est indiqué qu'il faut caractériser les éléments suivants : structure des populations, les taux de survie et de reproduction, le sex-ratio, les taux de croissance et

différents processus densité-dépendants (composition et taille de la population, biomasse, taux de fécondité et de reproduction, compétition intra-spécifique, etc...

4. Directives claires de récoltes, accompagnées d'une stratégie de contrôle (substitution, coupe offensive ou bâchage)
5. Suivi rigoureux des stratégies de contrôle (évaluer si la stratégie n'est pas contre-productive et occasionne, par exemple, une densification ou un déplacement de l'espèce envahissante)

Aussi, le rapport propose un point de vigilance sur le lien entre pérennité de la ressource et exploitation commerciale : « Lorsqu'une EEE se transforme en une ressource économique, il devient complexe de conserver des objectifs de réduction des effectifs et qui plus est, d'éradication (Nuñez et al., 2012). La dépendance économique pouvant résulter de la valorisation d'une EEE va encourager le maintien de l'espèce dans les milieux, voire sa culture ou son élevage. On parle ainsi d'effets pervers. » Il y a ici la potentielle création d'une dépendance économique à l'EEE si rien n'est imaginé en parallèle de cette exploitation, et ce dès le début.

Autre point important considéré par l'étude : la mise en place d'un cadre réglementaire adapté. Ce cadre doit être défini au plus tôt, pour être travaillé au fur et à mesure de l'avancée du développement. Dans notre cas, il s'agit d'encadrer règlementairement le prélèvement ET l'utilisation du bambou comme matériau de construction.

Au final, ce rapport appuie sur le fait que rares sont les cas d'étude ayant connu un succès de contrôle d'une EEE par sa valorisation économique. Cet engagement nécessite des projets multi-partenariaux, nous citons : « L'implication des services de l'État et des chercheurs dans le cadrage et la définition des objectifs des initiatives projetées semble ainsi jouer un rôle primordial pour s'assurer de la meilleure réduction possible des impacts environnementaux des projets de valorisation socio-économique, mesures incitatives et exploitation commerciale confondues. »

Pour finir, le rapport propose des pistes de réflexion, nous plaçons en annexe une fiche proposée, permettant de cadrer et de poser les bonnes questions sur la possible mise en place d'une filière d'exploitation d'EEE.

1.1.2 Développement / Culture d'une espèce « qualitative »

1.1.2.1 Cadre

L'espèce *Bambusa vulgaris* n'est pas considérée par différents acteurs comme une espèce adaptée à la construction, ou non suffisamment qualitative notamment pour une utilisation directe en structure. De ce fait, il y a un souhait d'évoluer vers (et de développer) une espèce mieux reconnue pour ses performances mécaniques et ses caractéristiques dimensionnelles (chaume plus rectiligne, épaisseur de parois plus épaisse). Ces faits ne sont pas aujourd'hui vérifiés scientifiquement : Il n'y a pas eu, à ce jour, d'étude permettant de caractériser et de comparer les performances des différentes espèces présentes en Martinique (*Bambusa vulgaris*, *Guadua angustifolia*, *Dendrocalamus Gigenteus*). **Néanmoins, l'absence d'études ne doit pas automatiquement remettre en question l'expérience et le savoir-faire des artisans.**

Ainsi, la volonté de certains se porte sur le développement de l'espèce "*Guadua angustifolia*". L'idée serait de développer la bamboueraie existante et d'accompagner en parallèle des agriculteurs au développement d'une activité d'exploitation du bambou.

On comprend alors que cette volonté est en opposition avec celle d'autres acteurs souhaitant plutôt contrôler, voir éradiquer, l'espèce *Bambusa vulgaris*. Cette opposition se pose particulièrement sur la question de la gestion difficile d'une espèce envahissante. Les différents risques, exposés en partie au 1.1.1.5, amènent les acteurs à avoir le discours suivant : « pourquoi chercher à implanter une nouvelle espèce envahissante, et donc soumettre les écosystèmes à un danger supplémentaire alors qu'il y a déjà une espèce envahissante à contrôler ? »

1.1.2.2 Ressource

Aujourd'hui, la ressource disponible, en Martinique, en *Guadua angustifolia* est faible (probablement < 1 Ha). Cette donnée est une estimation issue des visites et entretiens menés lors de l'étude.

Si l'idée est de développer cette ressource, nous pouvons nous poser deux questions :

1. Est-il possible de créer une ou plusieurs exploitations ? Si oui, peut-on rapidement estimer quelle ressource sera disponible et en combien de temps ?
 2. Est-il possible d'en importer ? Si oui, cela a-t-il un sens (économique, écologique, politique) ?
1. Il n'y a aucun soucis à créer une ou plusieurs exploitations de bambou. Il existe en effet plusieurs exemples à travers le monde et ce depuis des dizaines d'années (exemple en Amérique du Sud particulièrement [4]). Il faut néanmoins garder en tête le propos des paragraphes précédents sur l'exploitation d'une espèce exotique envahissante et le risque associé. Malheureusement, le temps et les données acquises ne permettent pas de répondre à la question de l'estimation de la ressource disponible en fonction du système d'exploitation envisagé.
 2. La réponse à cette question n'a pas été trouvée de manière claire. Nous plaçons dans un document annexe les éléments récoltés durant l'étude. Sur la question du sens écologique, des éléments de réponse sont présentés en partie dans le livrable « impacts environnementaux ». Sur le volet impact sur la biodiversité locale, des retours d'expériences seraient nécessaires et complémentaire aux présents travaux afin de permettre aux politiques locales de mieux appréhender, voir d'accompagner cette stratégie.

Dans l'ensemble, nous manquons de plusieurs éléments sur la question du développement de l'espèce *Guadua Angustifolia*. Malgré le fait que cette piste est particulièrement intéressante, et poussée par différents acteurs interrogés durant l'étude, le choix a été fait de prioriser les propositions de stratégies sur la piste de la valorisation de l'espèce *Bambusa Vulgaris*. Ainsi, les prochains éléments de ce document concerneront donc cette dernière espèce.

1.2 Méthodologie

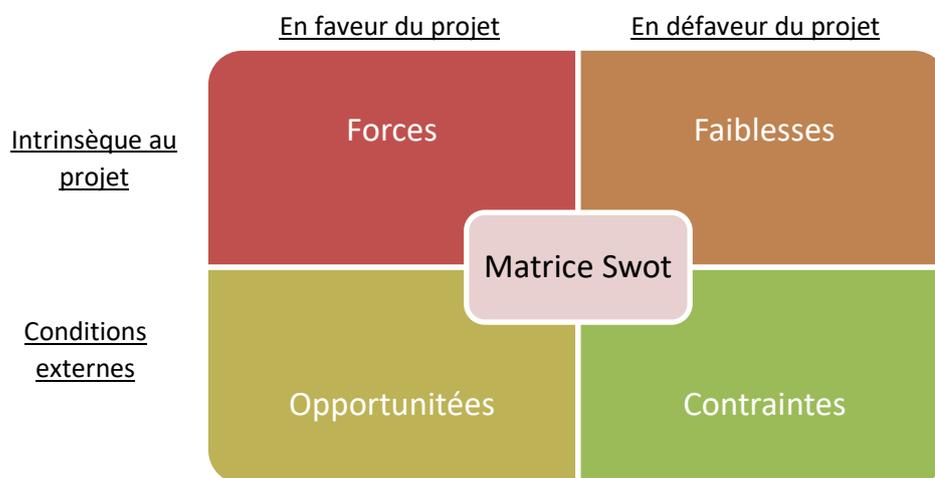
Ces éléments permettent premièrement de dresser les différents niveaux d'ambitions que l'on peut observer sur le territoire Martiniquais. On constate notamment que ces voies ne sont pas réellement contradictoires, mais plutôt parallèles et permettent toutes, en un sens, de développer l'utilisation du bambou de différentes manières. Il y a même des interconnexions, notamment sur les besoins en caractérisation de la matière première.

Néanmoins, nous proposons de revoir ces éléments en fonction de stratégies ciblées sur des systèmes constructifs.

L'idée est donc de présenter, pour chaque application visée, les éléments suivants (en estimations) :

- Potentiels risques liés à cette application
- Volumes utilisables et potentiels parts de marché
 - o Quels volumes extraits
 - o Quelles parts de marché
 - o Quels efforts d'exploitation vis-à-vis du volume potentiellement valorisable
- Verrous techniques
- Verrous scientifiques

Pour représenter graphiquement, et de manière synthétique, l'ensemble de ces éléments, nous utiliserons une matrice SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities and threats). Un exemple théorique est représenté ci-dessous.



L'analyse de cette matrice, notamment en croisant différentes cases, nous permettra de proposer différentes pistes d'actions à mener, à plus ou moins long terme.

1.3 Application 1 : Structure - Ossature - Charpente

Cette application est présentée de prime abord, notamment parce qu'elle est la plus revendiquée par les acteurs de terrain Martiniquais. Cependant, cela n'en fait pas automatiquement la solution la plus pertinente aux regards des autres critères évoqués dans cette étude. Le bambou étant connu pour ses propriétés mécaniques (communément appelé *l'acier végétal*), il est souvent préféré pour être utilisé en structure et en charpente.

Cette application est cependant l'une des plus exigeantes, et demandant particulièrement un développement complet sur les volets scientifique, réglementaire, techniques...

1.3.1 Commentaires :

L'utilisation de bambou en structure ou charpente, dans des projets de construction où des calculs de dimensionnement sont réalisés, nécessite une prise en compte rigoureuse des différentes propriétés mécaniques du matériau de façon à être modélisée correctement.

1.3.2 Analyse de la matrice et proposition d'actions

Les actions 1.1 et 1.2 permettront de répondre à la question de la nécessité d'une mise en place d'une bamboueraie en espace contrôlé. En effet, au vu des dynamiques en cours sur l'utilisation de bambou structurel (cf 1.1.1.3), si l'espèce *bambusa vulgaris* s'avère inutilisable dans ce cadre (que ce soit pour des raisons techniques ou économiques) alors il faudra considérer sérieusement le développement d'une activité de culture de bambou type *Guadua* (comme proposé par différents acteurs locaux, cf Rapport « Etat des lieux – Connaissances scientifiques et expression des conditions locales » partie Bambou).

Dans l'action 1.2 (et par la suite dans la 1.3) doit être considéré la possibilité de mettre en place une standardisation des chaumes de bambou (proposé par différents acteurs locaux). Cette standardisation facilitera le travail de conception, de formation, et de mise en œuvre des chaumes en tant que matériau structurel. Dans cette même dynamique, il est envisageable d'étudier la préfabrication d'éléments de structure ou de parois préfabriquée (ossature + remplissage terre/bambou ou terre/sargasse par exemple).

1.3.3 Matrice SWOT (Application 1 : Structure - Ossature – Charpente)

	Forces	Faiblesses
	<ul style="list-style-type: none"> • Matériau biosourcé local peu transformé • Matériau potentiellement léger et robuste • Flexibilité et caractère antisismique • Esthétique • Démonstration forte • Stockage de carbone • Faible pénibilité • Potentiellement compostable en fin de vie • Existence d'une norme ISO [5] 	<p>Verrous scientifiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caractérisation des espèces disponibles • Caractérisation des assemblages/systèmes constructifs • Caractérisation de la durabilité • Essais pour valorisation du <i>Bambusa Vulgaris</i> <p>Verrous techniques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Etapes de transformation artisanales <p>Verrous normatifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aucun cadre normatif français <p>Durabilité dépendante de la mise en œuvre et du traitement</p> <p>Acceptabilité / Image potentiellement négative</p>
<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Bambusa vulgaris disponible en grande quantité et à contrôler/valoriser</i> • <i>Guadua angustifolia disponible (faibles quantités)</i> • <i>Acteurs/Artisans moteurs</i> • <i>Formations existantes</i> • <i>Quelques exemples existants sur l'île</i> • <i>Possibilité de lier avec le développement d'autres matériaux sur place</i> <p>Contraintes</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Diminution de la ressource Bambusa vulgaris</i> • <i>Dépendance à une EEE</i> • <i>Coûts supérieurs à une solution conventionnelle au départ, pouvant évoluer vers un coût concurrentiel voir inférieur</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Action 1.1 : Mettre en place un programme de caractérisation des espèces de bambou présentes d'un point de vue mécanique et durabilité • Action 1.2 : Réaliser une étude visant à dimensionner la chaîne logistique (acteurs de la récolte, transformation des chaumes, stockage) • Action 1.3 : Rédiger des règles professionnelles et les faire valider par la C2P • Action 1.4 : Mettre en place un programme de formation des artisans 	

1.4 Application 2 : Bardage / Pare-soleil

L'utilisation de Bambou en bardage est une application simple, peu risquée et peu exigeante si ce n'est sur le volet de la durabilité. C'est par contre ce dernier point qui peut être présenté comme contradictoire vis-à-vis de la littérature scientifique (cf Rapport « Etat des lieux – Connaissances scientifiques et expression des conditions locales » partie Bambou) qui présente le bambou comme matériau peu durable lorsqu'il est exposé aux intempéries (d'autant plus en milieu tropical). Malgré tout, en considérant un traitement permettant d'améliorer ce point sans compromettre la fin de vie, c'est une application potentiellement prometteuse permettant de facilement passer du volume.

1.4.1 Analyse de la matrice et proposition d'actions

Les acteurs locaux sont déjà en train d'expérimenter, et le font depuis quelques années déjà, différentes solutions de traitement du bambou. Néanmoins, ces expérimentations ne sont pas ou peu partagées, les résultats ne peuvent pas être valorisés scientifiquement, et donc ne peuvent servir à l'établissement de règles ou de guides. L'action 2.1 vise donc à répondre à cette problématique. Néanmoins, pour ne pas déposséder les acteurs de leur engagement et de leur savoir-faire, ce programme doit se faire en recherche participative (intégration des acteurs de terrain dans le processus de recherche). Une solution relativement simple est que les systèmes de traitements soient mis en œuvre par les artisans, en conditions de laboratoire ET en conditions de chantier.

1.4.2 Matrice SWOT (Application 2 : Bardage / Pare-soleil)

	Forces	Faiblesses
	<ul style="list-style-type: none"> • Matériau biosourcé local peu transformé • Matériau potentiellement léger • Faible inertie et émissivité thermique • Esthétique • Stockage de carbone • Faible pénibilité • Potentiellement compostable en fin de vie • Mise en œuvre de ce type d'application sur plusieurs bâtiments en Métropole et en Martinique (cf Eco-Logis) 	<p>Verrous scientifiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caractérisation de la durabilité <p>Verrous techniques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Etapes de transformation artisanales <p>Verrous normatifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aucun cadre normatif français • Particularité pour la résistance au feu <p>Durabilité dépendante de la mise en œuvre et du traitement</p> <p>Acceptabilité / Image potentiellement négative</p>
<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Bambusa vulgaris</i> disponible en grande quantité et à contrôler/valoriser • <i>Guadua angustifolia</i> disponible • Formations existantes • Quelques exemples existants sur l'île <p>Contraintes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diminution de la ressource <i>Bambusa vulgaris</i> • Dépendance à une EEE • Coûts supérieurs à une solution conventionnelle au départ, pouvant évoluer vers un coût concurrentiel voir inférieur 	<ul style="list-style-type: none"> • Action 2.1 : Mettre en place un programme de développement « produit » afin de définir et caractériser une solution de bardage bambou : les points clés à traiter : pérennité en condition d'exposition aux intempéries, systèmes de fixation, identifier des traitements des chaumes... • Action 2.2 : Réaliser une étude visant à dimensionner la chaîne logistique (acteurs de la récolte, transformation des chaumes, stockage) • Action 2.3 : Rédiger et monter un dossier d'Atex 	

1.5 Application 3 : Isolation par les fibres

Il est possible de défibrer les chaumes de bambou (i.e extraire les fibres) pour en obtenir une laine, qui peut ensuite être utilisée en vrac (à l'instar de la fibre de chanvre) ou en panneau semi-rigide (comme de nombreux isolants biosourcés aujourd'hui : fibres de bois, de chanvre, coton recyclé...). Cette application est potentiellement peu exigeante sur la qualité de la chaume, et permettrait de passer un volume conséquent si un outil adapté de transformation est installé.

1.5.1 Commentaires :

Plusieurs articles de la littérature scientifique évoquent des caractéristiques performanciennes de matériaux isolants fabriqués à partir de fibre de bambou. Les auteurs Dang MaoNguyen et al. [6] décrivent ainsi plusieurs formulations utilisant des fibres de bambou et différentes colles biosourcées permettant de fabriquer des panneaux rigides avec des propriétés hygrothermiques très intéressantes ($\lambda \leq 0,06$ W/mK).

1.5.2 Analyse de la matrice et proposition d'actions

Dans l'action 3.1, la vérification du défibrage du bambou doit se faire au plus rapide, auprès d'acteurs existants. Cette action permettra de déclencher toute la suite de cette proposition.

1.5.3 Matrice SWOT : Application 3 : Isolation par les fibres

Forces

- Matériau biosourcé local peu à moyennement transformé
- Matériau léger
- Isolation thermique performante
- Stockage de carbone
- Faible pénibilité (matériau léger)
- Potentiellement compostable en fin de vie
- Gestion du confort hygrique de l'habitat
- Adapté à la rénovation du bâti ancien et récent
- Peu d'exigences sur la ressource

Faiblesses

Verrous scientifiques :

- Caractérisation des performances hygrothermiques en fonction des variabilités de la ressource
- Caractérisation de la durabilité

Verrous techniques :

- Besoin d'un outil de transformation industriel

Verrous normatifs :

- Développement possible en s'inspirant d'autres isolants biosourcés

Durabilité dépendante de la mise en œuvre et du traitement

Acceptabilité / Image potentiellement négative

Opportunités

- *Bambusa vulgaris* disponible en grande quantité et à contrôler/valoriser
- Développement d'Emerwall sur la bagasse en cours
- Existence de l'entreprise FibandCo valorisant les fibres de banane

Contraintes

- Diminution de la ressource *Bambusa vulgaris*
- Dépendance à une EEE
- Coûts supérieurs à une solution conventionnelle au départ, pouvant évoluer vers inférieur Investissement important pour les outils de production d'isolants semi-rigide
- Technique peu connue, et isolation thermique encore régulièrement questionnée (sauf en toiture)

- Action 3.1 : Mettre en place un programme de développement sur 2 produits : fibres en vrac pour l'isolation, et panneaux semi-rigides, afin de :
 - Vérifier qu'il est possible de défibrer les chaumes de bambou
 - Caractériser les fibres obtenues
 - Réaliser des prototypes de panneaux isolants semi-rigides et les caractériser
- Action 3.2 : Réaliser une étude visant à dimensionner la chaîne logistique (acteurs de la récolte, transformation des chaumes, stockage)
- Action 3.3 : Rédiger et monter les dossiers d'ATEX pour les différents produits et différentes applications

1.6 Application 4 : Terre allégée – broyat de bambou et terre crue

Les chaumes de bambou, et notamment de *bambusa vulgaris*, sont déjà broyés par différentes entreprises martiniquaises (AFAF, ...). Ce type de transformation est aussi déjà existant sur différents territoires ultra-marins (Guadeloupe notamment). Les broyats étant principalement valorisés en biomasse énergie ou en paillage, il est question ici de proposer une valorisation alternative appliquée au bâtiment.

1.6.1 Commentaires :

Plusieurs articles de la littérature scientifique traitent de la fabrication de béton type chaux/granulats de bambou. Ce mélange s'il a vocation à simplement être isolant, peut être formulé pour intégrer un maximum de granulats biosourcés et un minimum de liant, et ce de façon à s'adapter au mieux aux conditions climatiques locales. D'ailleurs, le liant chaux peut être remplacé par un liant argileux fabriqué à partir de terre crue (à l'instar du terre-chanvre [7]). Les auteurs Lucas Rosse Caldas et al. [8] décrivent ainsi l'utilisation d'un béton contenant des granulats de bambou pour diminuer l'utilisation d'énergie servant à refroidir un bâtiment en climat chaud. Ils étudient notamment l'impact environnemental de cette solution en la comparant à des solutions conventionnelles. Le matériau considéré a des propriétés hygrothermiques intéressantes ($0,2 \leq \lambda \leq 0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Le bambou peut ici aussi servir de support pour la mise en œuvre d'une terre allégée ou d'un torchis. Il s'agirait de réaliser un coffrage perdu pour une terre allégée (type canisse – voir ...), ou une structure support quadrillée (voir ...) pour le torchis.

1.6.2 Analyse de la matrice et proposition d'actions



Figure 2: exemple d'expérimentation de béton de fibre de bambou réalisé en laboratoire au Brésil

1.6.3 Matrice SWOT (Application 4 : Terre allégée – broyat de bambou et terre crue)

	Forces	Faiblesses
	<ul style="list-style-type: none"> • Matériau biosourcé local peu à moyennement transformé • Matériau léger • Isolation thermique et déphasage potentiellement important • Stockage de carbone • Faible pénibilité • Potentiellement compostable en fin de vie • Gestion du confort hygrique de l'habitat • Adapté à la rénovation du bâti ancien • Peu d'exigences sur la ressource • Plusieurs systèmes constructifs intéressants (projection, briques ou murs préfabriqués) 	<p>Verrous scientifiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caractérisation des performances hygrothermiques en fonction des variabilités des ressources • Caractérisation de la durabilité <p>Verrous techniques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Besoins d'essais de projection avec une machine chaud/chaud <p>Verrous normatifs :</p> <p>Absence de cadre normatif</p> <p>Durabilité dépendante de la mise en oeuvre</p> <p>Technique peu connue, et isolation thermique encore régulièrement questionnée</p> <p>Acceptabilité / Image potentiellement négative</p>
<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Bambusa vulgaris disponible en grande quantité et à contrôler/valoriser</i> • <i>Développement de l'activité de Kemet Batisseur sur des produits à base de terre crue</i> <p>Contraintes</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Diminution de la ressource Bambusa vulgaris</i> • <i>Dépendance à une EEE</i> • <i>Coûts supérieurs à une solution conventionnelle au départ, pouvant évoluer vers un coût concurrentiel voir inférieur</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Action 4.1 : Mettre en place un programme de développement sur un béton terre-bambou, afin de : Définir des mélanges types Caractériser ces mélanges types d'un point de vue de la performance thermique, mécanique, perméabilité à la vapeur Définir des mises en oeuvre et systèmes constructifs types : projection machine, préfabrication • Action 4.2 : Réaliser une étude visant à dimensionner la chaîne logistique (acteurs de la récolte, transformation des chaumes, stockage) • Action 4.3 : Rédiger et monter les dossiers d'Atex pour les différents systèmes constructifs et différentes applications 	

2. Filière terre crue

2.1 Introduction – éléments de contexte

2.1.1 Cadre

Nous résumons ici quelques éléments en partie présentés dans le livrable 1 – partie Terre Crue, qui concernent directement le matériau :

- La dynamique autour de la construction terre aux Antilles est très récente, notamment en Martinique. Un faible nombre d'acteurs dispose de connaissances sur ce matériau. Ces connaissances sont partielles et il y a donc un besoin de montée en compétences. Néanmoins, il y a une dynamique forte sur des territoires très liés à la Martinique comme la Guyane, Mayotte ou la métropole. Cette dynamique doit être utilisée pour développer l'utilisation de la terre crue aux Antilles.
- Le peu d'exemples existants en Martinique ne permettent pas de diffuser une bonne image du matériau, mais renseignent malgré tout sur les applications historiques liées au territoire.
- De manière générale, le matériau terre n'est pas connu pour son comportement mécanique. Néanmoins, la littérature scientifique reconnaît l'existence de patrimoine et de techniques ayant vécu à travers le temps sur des territoires soumis aux séismes (cf. Rapport « Etat des lieux – Connaissances scientifiques et expression des conditions locales » partie terre crue)

Aux vus de ces éléments on pourrait s'attarder sur le contexte Antillais, peu favorable à un développement rapide de ce matériau.

Néanmoins, la dynamique nationale (acteurs métropolitains) sur le matériau doit permettre aux territoires à l'étude de développer leur utilisation du matériau terre crue. Sur ce sujet, on peut noter comme éléments clés, dans l'ordre de publication/mise en place :

- Les **Règles Professionnelles** pour la mise en œuvre des enduits sur supports composés de terre crue, dans lesquelles nous retrouvons des règles de mise en œuvre des enduits à base de terre crue.
- Le **Guide de Bonnes Pratiques de la Construction en Terre Crue**, compilant des informations déterminantes sur toutes les méthodes constructives, mais n'incluant pas de considération des conditions climatiques et environnementales des DOM-TOM.
- Le **Projet National Terre**, regroupant un nombre important d'acteurs, tout corps d'état confondu, permettant de créer une porte d'entrée vers la recherche. Il a pour but de mettre en place des projets de recherche qui permettront de lever les freins au développement des différentes techniques.

2.1.2 Ressource

Les techniques de construction en terre crue sont pour la plupart des techniques massives, utilisant une quantité importante de matériau brut. La question de la ressource se pose de deux manières différentes en fonction des moyens de développement envisagé :

1) *Dispose-t-on de terres adaptées à la construction sur l'ensemble du territoire ?*
Il est important de répondre, ou du moins de proposer une hypothèse, à cette question si l'on souhaite pouvoir utiliser les terres proches des chantiers de construction. Cette stratégie est explorée notamment pour réduire l'impact environnemental et le coût du transport. Ici, il est particulièrement pertinent de s'intéresser aux terres d'excavation, issues des chantiers d'aménagement ou de construction.

2) *Est-il possible de mettre en place une usine de préfabrication de matériaux terre crue ?*

Au niveau de la ressource, il s'agit ici de savoir s'il existe un gisement sur le territoire considéré capable de répondre à plusieurs années d'exploitation pour la fabrication de matériau terre, à l'instar d'une briqueterie, ou d'une carrière.

Nous détaillons la réponse à ces deux questions ci-dessous. Mais dans l'ensemble, on peut dire dès maintenant que le territoire Martiniquais (et c'est très sûrement le cas d'autres territoires ultra-marins) dispose d'une ressource quasi inépuisable pour la construction en terre crue.

2.1.2.1 Construire local avec la terre crue

La carte ci-dessous présente une estimation des textures de sol de surface sur le territoire martiniquais. On constate à la lecture de celle-ci que la majorité des sols de surface sont des sols argilo-limoneux, des limons voir des argiles lourdes. Ces données sont grossières et sont à modérer avec des analyses de sols plus précises.

De manière générale, l'ensemble des techniques terres présentées dans ce document nécessite une terre argileuse. En revanche, il se peut qu'elle soit trop argileuse, et nécessiterait alors d'être formulée (avec une autre terre, un sable ou encore avec des fibres biosourcées).

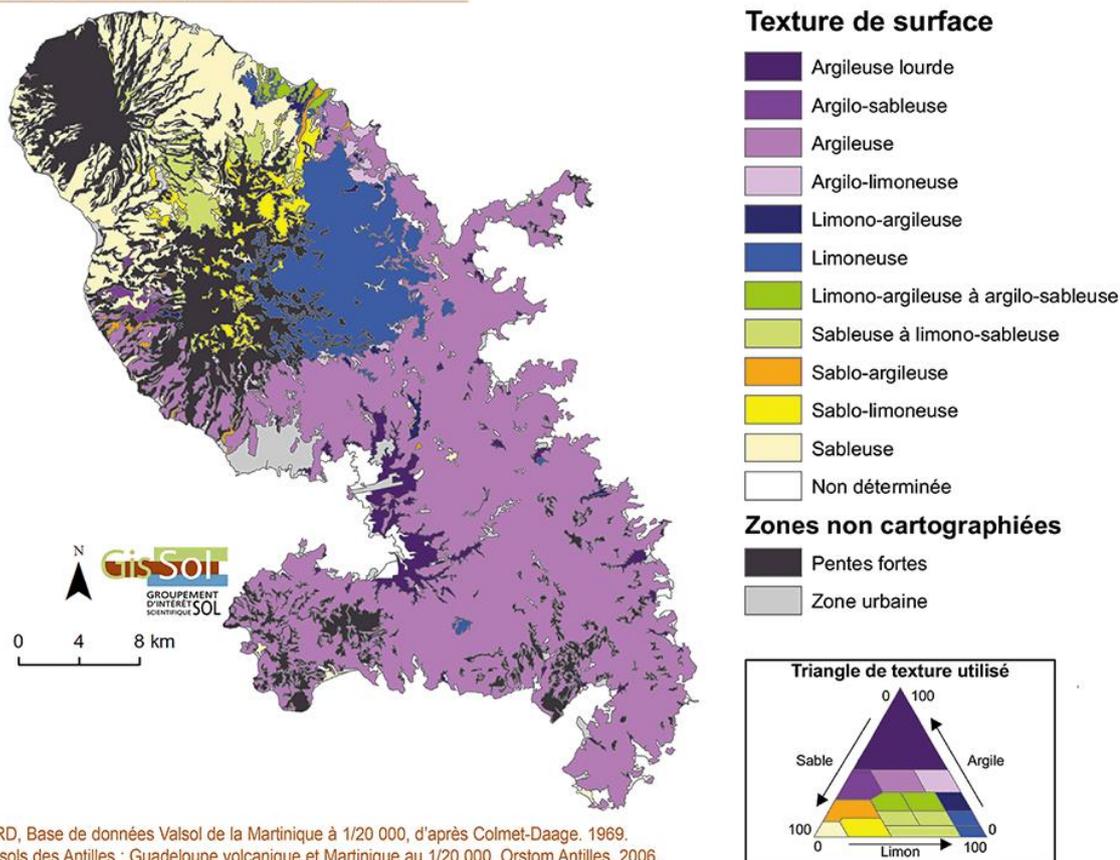
Il n'est pas réellement utile de déterminer un quantitatif de terres disponibles à l'échelle du territoire, sans associer cette recherche à une technique constructive particulière. En revanche, nous pouvons déjà regarder les chiffres concernant les terres d'excavation issues de travaux de BTP :

- Dans un rapport de janvier 2020 [9], le Cerema indique que pour la Martinique, les terres d'excavation représenteraient 1 130 385 tonnes en 2015 (et 1 173 345 tonnes en Guadeloupe).
- Dans une présentation de la CTM (Collectivité territoriale de la Martinique) sur le Plan de Prévention et de Gestion des Déchets de Martinique (PPDGM), il est indiqué seulement 66470 tonnes de déchets inertes (dont terres de déblais) identifiées en 2019.

Il y a donc ici premièrement une problématique de données. Sur cette problématique, la BRGM a indiqué (cf entretien BRGM) les éléments suivants : Batimat Recyclage est la seule déchèterie de l'île, elle arrive à saturation en termes de gestion de terres et de déblais de chantier ; Il y a un manque fort de traçabilité des terres, encore plus en Martinique que sur le territoire métropolitain ; L'exemple du lycée Schoelcher est clair : des centaines de m³ de terres ont été excavées, plusieurs personnes sont venues se servir, le tout sans aucune traçabilité, sans aucun cadre légal.

Dans l'ensemble, que le Cerema ait surestimé le chiffre, ou que la CTM l'ait sous-estimé, nous pouvons conclure la ressource pour la terre crue en Martinique est abondante.

Les textures des horizons supérieurs du sol à la Martinique



Source : IRD, Base de données Valsol de la Martinique à 1/20 000, d'après Colmet-Daage, 1969.
Carte des sols des Antilles : Guadeloupe volcanique et Martinique au 1/20 000. Orstom Antilles, 2006.

2.1.2.2 Mettre en place une unité de préfabrication

Ici, il faut considérer une zone dans laquelle il est soit possible de stocker des quantités importantes de terre (venant d'excavation), soit disposer d'une carrière d'argile.

C'est le cas de la Briqueterie des Trois Îlets, qui dispose de plusieurs gisements de terres dont une terre particulièrement argileuse, mais aussi de zones de stockage importantes pouvant éventuellement permettre de stocker puis valoriser des terres d'excavation.

2.1.3 Elements évoqués (ou inspirés) par les acteurs

2.1.3.1 Etude et développement de solutions pour l'acceptabilité sociale

Une problématique est revenue régulièrement au cours des différents entretiens avec les acteurs de la construction :

Aujourd'hui la majeure partie des constructions étant réalisées en béton et béton armé, les îles sont dépendantes de différents matériaux non présents localement (ingrédients pour le ciment, énergie, ferrailage). Il y a de nombreuses techniques de construction qui permettraient de construire durablement avec les matériaux locaux (terre crue, bambou, chaux), mais ces matériaux ont une image négative auprès des habitants locaux. Ces alternatives locales paraissent moins résistantes aux conditions climatiques et environnementales antillaises (ouragan, fortes pluies et séismes). Des études et des

exemples existent pour prouver le contraire, mais des recherches scientifiques supplémentaires sont possibles et nécessaires. Ces alternatives locales rappellent une forme architecturale et un habitat de type "cases" comme certains habitats des Kalinagos ou Caraïbes.

Il y a donc une intersection entre plusieurs freins aux développements des filières de matériaux de construction locaux, cette intersection se faisant sur la thématique du lien entre écologie et histoire coloniale et post-coloniale, et appliquée à un sujet technique et concret.

Pour répondre à ces problématiques, les pistes évoquées/inspirées sont les suivantes :

1. Questionnaire à diffuser dans l'ensemble des réseaux d'acteurs de la construction sur les territoires
2. Construire des expositions en concordance avec les réponses à 1), avec implication des collectivités locales + discours de personnalités locales
3. Cycles de conférences : Chercheurs, Architectes, ingénieurs, ayant un savoir reconnu sur la terre crue
4. Démonstrateurs, Ateliers « mains à la pâte », Formations
5. Projet de recherche en sociologie, socio-écologie, sociologie des pratiques techniques

2.1.3.2 La problématique de la formation

Le principale frein au développement de la terre crue en Martinique est la connaissance du matériau par les différents acteurs de la construction locale. De ce fait, il est impératif de débiter au plus tôt des actions de sensibilisation, voire de formation. La problématique évoqué ci-dessus, et sa réponse (pistes évoquées avec les acteurs) va dans ce sens.

Plusieurs formes d'actions de sensibilisation/formation peuvent être envisagées :

- Mise à disposition et développement d'un lieu unique de formation (avec à disposition du matériel pédagogique lié à la construction terre ET du matériel de production professionnel)
- Mise en place de chantiers participatifs, voire de chantiers école
- Mise en place d'interventions, puis de parcours dans les organismes de formations locaux (AMEP CFA BTP⁴ de DUCOS par exemple)

⁴ Association Martiniquaise d'Education Populaire Centre de Formation d'Apprentis Bâtiment et Travaux Publics

2.2 Application 1 : Briques de Terre Compressées (BTC)

Cette application est présentée de prime abord, notamment parce qu'elle est la plus revendiquée par les acteurs de terrain Martiniquais (en Guyane, il y a un retour d'expérience plus important grâce à la présence d'acteurs tel que La Brique de Guyane). Cependant, cela n'en fait pas automatiquement la solution la plus pertinente aux regards des autres critères évoqués dans cette étude.

Les BTC recueillent une attention particulière à l'échelle internationale pour plusieurs raisons :

- De nombreux acteurs en font la promotion, notamment Craterre⁵ et les différents acteurs que cette association a accompagnés.
- La fabrication d'une brique, à l'aide d'une presse manuelle, est simple et rapide.
- La formulation nécessite moins d'eau (donc moins de travail) que les adobes

Ensuite, il faut considérer pour cette application différentes variables :

- Seront-ils utilisés en remplissage de structure porteuse, en cloison ou mur porteur ?
- La formulation contiendra-t-elle juste de la terre et de l'eau ou y-aura-t-il des ajouts (autre terre, sable, liants...) ?

2.2.1 Commentaires :

La question de la stabilisation doit être abordée avec sérieux et rigueur, en considérant tous les tenants et aboutissants de façon exhaustive. Prenons par exemple :

- L'impact environnemental
- La construction d'une culture constructive grâce au développement d'un savoir-faire abouti
- La dépendance à l'importation ou aux énergies fossiles
- La fin de vie des matériaux de construction, particulièrement dans un cadre insulaire

Tous les enjeux cités ici vont en défaveur du choix de la stabilisation utilisant un liant à prise chimique (type ciment ou chaux). De ce fait, le développement et la pérennité d'une solution type BTC dépend fortement des choix fait aujourd'hui. Si la BTC doit être l'objet porteur de l'image de la terre crue, alors il faut que cette image soit irréprochable.

⁵ L'association Craterre est un des acteurs historiques de la construction terre, œuvrant pour sa reconnaissance à l'échelle international en tant que matériau de construction, à travers de la formation, de la diffusion de connaissances, et des actions de terrain.

2.2.2 Matrice SWOT : Application 1 : Briques de Terre Compressées (BTC)

Forces

- Matériau géosourcé local peu transformé
- Gestion hygrothermique de l'habitat
- Esthétique
- Démonstratif
- Facilité de mise en œuvre
- Facilement industrialisable
- Impacts environnementaux très faibles
- Fin de vie simple (réutilisation, remise en terre)

Faiblesses

Verrous scientifiques :

- Caractérisation des terres
- Formulation et caractérisation hygromécanique et hygrothermique

Verrous techniques :

- Développement débutant

Verrous normatifs:

- Inspiration possible d'Atex
- Verrous fonction de l'application précise

Durabilité dépendante de la mise en œuvre

Acceptabilité / Image potentiellement négative et aucun exemple sur l'île

Opportunités

- *De nombreuses terres potentiellement valorisables (terres d'excavation)*
- *Acteurs/Artisans moteurs*
- *Une entreprise naissante (KEMET)*
- *Un savoir-faire proche avec la Briqueterie des 3 îlets*

Contraintes

- *Concurrence aux autres matériaux conventionnels (béton, terre cuite) et au adobes*
- *Avenir dépendant fortement des premiers exemples, car peu connu*
- *Coûts potentiellement supérieurs à une solution conventionnelle (développement)*

- Action 1.1 : Réaliser une étude de faisabilité pour le montage d'une briqueterie (équipement, modèle économique, formulations, essais de laboratoire)
- Action 1.2 : Rédiger et monter les dossiers d'ATEX pour les différents produits et différentes applications
- Action 1.3 : Mettre en place un programme de formation des artisans et acteurs directement intéressés
- Action 1.4 : Organiser des événements de sensibilisation aux différentes techniques de construction terre
- Action 1.5 : Expérimenter à grande échelle avec l'instrumentation d'un bâtiment en terre crue

2.3 Application 2 : Adobe

Cette application est particulièrement proche de l'application BTC. Seuls la formulation et les processus de fabrication changent. Il faut donc considérer ces applications comme potentiellement concurrentes.

De même que pour les BTC, il faut considérer pour cette application différentes variables :

- Seront-ils utilisés en remplissage de structure porteuse, en cloison ou mur porteur ?
- La formulation contiendra-t-elle juste de la terre et de l'eau ou y-aura-t-il des ajouts (autre terre, sable, liants, fibres...) ?

2.3.1 Commentaires :

On notera ici l'existence d'un outil et d'un savoir-faire existant et prêt à l'emploi à la Briqueterie des Trois-Îlets. Des essais y ont déjà été réalisés, il manque simplement un accompagnement au développement d'un produit terre crue, par un organisme disposant de compétences en la matière. Ce développement et la mise sur la marché d'adobes extrudées peut se faire rapidement (échelle d'un an ou deux) grâce à la présence de cet acteur.

A noter que l'on retrouve cet exemple dans plusieurs briqueteries de France et du monde.

2.3.2 Analyse de la matrice et proposition d'actions

La briqueterie Trois-Îlets dispose actuellement de tout le matériel nécessaire pour proposer demain des adobes, voir des panneaux (type placoplâtre) en terre fibrée. Il leur manque simplement une personne les accompagnants sur ce sujet. Il y a un fort risque de compétition entre la briqueterie des Trois-Îlets existante et le développement d'une briqueterie (BTC – Kemet Bâisseurs) en parallèle. Notamment si la briqueterie existante s'aperçoit que la terre crue est porteuse de potentiel et souhaite alors aussi développer une solution crue.

Il est réellement important d'évaluer aujourd'hui cette problématique, afin que les dynamiques en cours puissent permettre une émulsion autour d'un développement de la terre crue, plutôt que créer dès maintenant des tensions et des conflits avant même que ces solutions ne voient le jour.

2.3.3 Matrice SWOT : Application 2 : Adobe

Forces

- Matériau géosourcé local peu transformé
- Gestion hygrothermique de l'habitat
- Esthétique
- Démonstratif
- Facilité de mise en œuvre
- Facilement industrialisable
- Impacts environnementaux très faibles
- Fin de vie simple (réutilisation, remise en terre)

Faiblesses

Verrous scientifiques :

- Caractérisation des terres
- Formulation et caractérisation hygromécanique et hygrothermique

Verrous normatifs :

- Verrous fonction de l'application précise

Durabilité dépendante de la mise en œuvre

Acceptabilité / Image potentiellement négative et aucun exemple sur l'île

Opportunités

- De nombreuses terres potentiellement valorisables (terres d'excavation)
- Une entreprise existante (Briqueterie 3 îlets) avec un savoir-faire sur la terre
- Projet expérimentaux du PUCA avec démonstrateurs

Contraintes

- Concurrence aux autres matériaux conventionnels (béton, terre cuite) et au BTC
- Avenir dépendant fortement des premiers exemples
- Coûts supérieurs à une solution conventionnelle au départ, pouvant évoluer vers un coût concurrentiel voir inférieur

- Action 2.1 : Réaliser une étude de développement d'un modèle économique (évaluation des produits concurrents)
- Action 2.2 : Rédiger et monter les dossiers d'ATEX pour les différents produits et différentes applications
- Action 2.3 : Mettre en place un programme de formation des artisans et acteurs directement intéressés
- Action 2.4 : Organiser des évènements de sensibilisation aux différentes techniques de construction terre
- Action 2.5 : Expérimenter à grande échelle avec l'instrumentation d'un bâtiment en terre crue

2.4 Application 3 : Enduits

Les enduits sont concrètement l'application la plus simple à mettre en place. Elle est souvent favorisée pour débiter l'utilisation de terre crue par un acteur du bâtiment (artisan, maître d'œuvre ou maître d'ouvrage, architectes...).

Pour rappel, ces enduits peuvent être préformulés et mis en sac par un acteur local (Kemet, Briqueterie ?), ou formulé directement sur chantier par un artisan disposant d'un savoir-faire.

2.4.1 Analyse de la matrice et proposition d'actions

On note ici que la première action à mettre en place est la formation. En effet, on constate peu de freins autres que celui de la disponibilité d'artisans formés à la mise en œuvre de tels enduits. Ainsi, l'ensemble de cette proposition d'action est assez simple et rapide à mettre en place. Néanmoins, sa réussite dépendra des formateurs et de leur capacité à adapter la formation à l'état du patrimoine bâti local.

Aussi, il n'est pas ici question de passer d'abord par une campagne d'essais en laboratoire, et ce pour différentes raisons (détaillées en partie dans le document du collectif terreux armoricains [10]) :

- Il n'y a pas d'enjeu fort sur la résistance mécanique.
- Les enduits rentrent dans les cas d'ouvrages non structurels, non soumis aux réglementations sismiques.
- Il existe déjà des règles professionnelles encadrant la mise en œuvre d'enduits en terre crue : « Les Règles Professionnelles pour la mise en œuvre des enduits sur supports composés de terre crue ».

Dans ces règles professionnelles sont présentés les essais de chantier permettant de valider une formulation. Ces essais sont applicables à d'autres supports que ceux composés de terre crue et peuvent donc être utilisés pour expérimenter une terre, ou comme outil pédagogique de formation. Il s'agit d'une approche dite « performantielle » : il n'y a pas d'obligation de moyens (exigences sur le matériau) mais une obligation de résultats (performances de l'ouvrage).

Ainsi, sachant que de nombreuses terres sont utilisables pour réaliser des enduits (cf Rapport rapport « Etat des lieux – Connaissances scientifiques et expression des conditions locales »), la formation sera le premier moteur de développement de cette voie d'utilisation de la terre crue, et permettra de construire puis diffuser un argumentaire sur les avantages de ce matériau.

Enfin, dans la matrice, les actions concernant la formation et la sensibilisation (3.1 et 3.2) sont à effectuer en parallèle.

2.4.2 Matrice SWOT : Application 3 : Enduits

	Forces	Faiblesses
	<ul style="list-style-type: none"> • Matériau géosourcé local peu transformé • Gestion hygrothermique de l'habitat • Esthétique • Démonstratif • En partie industrialisable • Impacts environnementaux très faibles • Fin de vie simple (réutilisation, remise en terre) 	<p>Verrous techniques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Besoin d'engagement et de formation d'artisans <p>Peu d'exemple sur l'île</p> <p>Acceptabilité / Image potentiellement négative et aucun exemple sur l'île</p>
<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>De nombreuses terres potentiellement valorisables (terres d'excavation)</i> • <i>Une (ou des) entreprises potentiellement capables de produire des enduits préfabriqués (Kemet Bâtitseur en projet, Poterie des Trois-Îlets)</i> • <i>Des expérimentations prévues dans le cadre du PUCA du Prêcheur</i> <p>Contraintes</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Avenir dépendant fortement des premiers exemples</i> • <i>Coûts supérieurs à une solution conventionnelle au départ, pouvant évoluer vers un coût concurrentiel voir inférieur</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Action 3.1 : Mettre en place un programme de formation des artisans et acteurs directement intéressés • Action 3.2 : Organiser des événements de sensibilisation aux différentes techniques de construction terre • Action 3.3 : Mettre en place une campagne d'essai de formulation avec différentes ressources locales (sable de pierre ponce, granulats de bambou, ...) • Action 3.4 : Expérimenter à grande échelle avec l'instrumentation d'un bâtiment en terre crue 	

2.5 Application 4 : Pisé

Cette application a peu été évoquée auprès des acteurs portés sur la terre crue. Néanmoins, il convient de l'envisager, car elle détient à priori un potentiel intéressant (cf Rapport « Etat des lieux – Connaissances scientifiques et expression des conditions locales »).

De la même façon qu'avec les techniques maçonnées, ce potentiel est dépendant de quelques variables :

- Sera-t-il utilisé en remplissage de structure porteuse, en cloison ou mur porteur ?
- La formulation contiendra-t-elle juste de la terre et de l'eau ou y-aura-t-il des ajouts (autre terre, sable, liants...) ?

2.5.1 Commentaires :

La plupart des entreprises de gros-œuvres, outillés pour réaliser des voiles béton, disposent de la quasi-totalité du matériel pour réaliser un mur en pisé (les banches notamment). Concernant les moyens techniques, il suffit de rajouter un fouloir pneumatique. Il faudra cependant former ces professionnels. Sans nous étendre ici sur les limites à cette proposition (résumées dans la matrice SWOT), il faut évidemment considérer les problématiques sismiques : de nombreuses régions du monde, soumises à de fortes contraintes sismiques, dispose encore aujourd'hui (et en bon état) de patrimoine bâti en pisé. Sur ce sujet, le principal frein dans les territoires français est donc plutôt réglementaire. Dans ce sens, il y aura un besoin important de travaux de recherche pour construire la réglementation et répondre à ses exigences.

Une fois ces actions engagées, les actions de formations et de sensibilisation sont à envisager parallèlement.

2.5.2 Matrice SWOT

Forces

- Matériau géosourcé local peu transformé
- Gestion hygrothermique de l'habitat
- Esthétique
- Démonstratif
- Facilité de mise en oeuvre
- Facilement industrialisable
- Impacts environnementaux très faibles
- Fin de vie simple (réutilisation, remise en terre)

Faiblesses

Verrous scientifiques :

- Caractérisation des terres
- Formulation et caractérisation hygromécanique et hygrothermique

Verrous techniques :

- Besoin de fouloirs

Verrous normatifs :

- Verrous fonction de l'application précise

Durabilité dépendante de la mise en oeuvre

Acceptabilité / Image potentiellement négative et aucun exemple sur l'île

Opportunités

- *De nombreuses terres potentiellement valorisables (terres d'excavation)*
- *Acteurs/Artisans moteurs*
- *Une entreprise naissante (Kemet)*
- *Un savoir-faire proche avec la Briqueterie des 3 îlets*

Contraintes

- *Concurrence aux autres matériaux conventionnels (béton, terre cuite)*
- *Avenir dépendant fortement des premiers exemples*
- *Coûts supérieurs à une solution conventionnelle au départ, pouvant évoluer vers un coût concurrentiel voir inférieur*

- Action 4.1 : Mettre en place un programme de R&D permettant de rendre compte de la pertinence du développement d'une solution locale en pisé :
 - Scientifique : Caractérisation mécanique de pisé utilisant les terres locales
 - Technique : Adaptation des outils locaux pour la mise en oeuvre
 - Economique : Potentiel concurrentiel avec le béton
- Action 4.2 : Mettre en place un programme de formation des artisans et acteurs directement intéressés
- Action 4.3 : Organiser des évènements de sensibilisation aux différentes techniques de construction terre
- Action 4.4 : Expérimenter à grande échelle avec l'instrumentation d'un bâtiment en terre crue

3 Annexe 1 : Proposition de cadre pour la mise en place d'une exploitation d'EEE par l'UICN

QUESTIONNEMENTS ET POINTS DE VIGILANCE

1 CONNAISSANCES RELATIVES À L'ESPÈCE CIBLÉE PAR LE PROJET

L'espèce est-elle exotique et envahissante ?

- Si l'espèce est déjà considérée comme exotique envahissante sur le territoire du projet, elle fait bien partie du processus d'analyse proposé. Si l'espèce n'est pas exotique, le projet doit être examiné dans un autre cadre.
- Si l'espèce n'est pas considérée comme exotique envahissante sur le territoire du projet mais qu'elle l'est sur un territoire limitrophe ou connecté (par exemple, sur un bassin versant voisin, dans un pays frontalier, voire dans une région biogéographique proche), elle est susceptible de le devenir sur le territoire cible. Dans ce cas, la stratégie de gestion la plus adaptée sur ce territoire consiste à analyser le risque, à intervenir précocement pour limiter l'expansion de l'espèce voire l'éradiquer.

Quelle est la répartition et l'abondance de l'espèce à l'échelle du territoire du projet ?

- La connaissance de l'aire de répartition de l'espèce visée sur le territoire concernant le projet constitue une base indispensable pour évaluer la pertinence du projet et pour son évaluation postérieure. La précision des informations fournies dans le projet sur cette répartition par rapport à l'ensemble des données disponibles pourra constituer un élément favorable de l'analyse. Si l'espèce est largement répandue ou localisée, en densité importante et facile à piéger ou collecter, l'exploitation économique peut constituer une méthode de régulation à examiner.
- En revanche, si l'espèce est largement répandue mais en faible densité, l'exploitation commerciale sera complexe à mettre en place et à rentabiliser. Si elle est présente de façon sporadique et en faible densité, l'exploitation commerciale, qui nécessite de collecter un nombre important d'individus pour obtenir des bénéfices financiers et une certaine rentabilité, n'atteindra pas ses objectifs et ne constituera pas une solution de régulation efficace. Dans ce cas, il est nécessaire de s'interroger sur la pertinence d'une exploitation économique.

L'espèce est-elle facilement identifiable ?

- Si l'espèce est difficile à identifier par les opérateurs de terrain (nécessitant par exemple des avis d'experts ou des analyses génétiques), il existe un risque important de confusion avec des espèces indigènes dont les populations pourraient être mises en danger par les actions d'exploitation économique.
- Si l'espèce est facilement reconnaissable, ne peut pas être confondue avec une espèce indigène, ces risques de confusion sont moindres et les contrôles de l'exploitation plus aisés.
- L'identification de l'espèce par les agents en charge de la police de l'environnement est indispensable pour toutes les actions de contrôle qui pourront être entreprises, sur le site d'exploitation, lors du transport, mais également sur les sites de vente (grandes surfaces, etc.). Si l'identification de l'espèce est complexe ou que les agents responsables des contrôles ne sont pas formés sur ce point, ou qu'il existe des possibilités de confusion avec une espèce indigène, les risques de non-respect des conditions de traçabilité et de détention confinée ainsi que d'exploitation illégale sont élevés (exploitation d'une espèce indigène par exemple). Dans ces cas, il peut être demandé à l'exploitant de se doter de clefs d'identification certifiées à présenter lors des contrôles, permettant aux agents de vérifier la conformité des lots.

L'espèce est-elle présente dans des sites difficiles d'accès ou sur des propriétés privées ?

- Si tel est le cas, le projet d'exploitation se heurtera à des difficultés d'accès à la ressource et/ou pourra provoquer un dérangement ou des impacts sur des espaces préservés. L'exploitation ne se fera que dans des zones accessibles pour la récolte et pour le transport du matériel collecté, ce qui ne permettra pas d'atteindre l'objectif annoncé de diminution des populations sur l'ensemble de l'aire de répartition. Dans le cas contraire, l'accessibilité sera un facteur positif pour la faisabilité de l'exploitation.
- Si l'espèce est présente sur le domaine privé, les autorisations d'exploitation risquent de ne pas être accordées et les prélèvements ne pourront pas être réalisés sur l'ensemble du territoire ciblé. L'inclusion dans le projet de modalités précises d'obtention de ces autorisations en domaine privé pourrait être considérée comme un critère favorable du projet. En leur absence, cette situation ne permettra pas d'atteindre les objectifs de diminution des populations et pourra engendrer des phénomènes de recolonisation à partir des zones non exploitées.

Quelles sont les capacités de dispersion de l'espèce ?

- La connaissance des capacités de dispersion de l'espèce est primordiale pour identifier le risque secondaire de dispersion que peuvent représenter les projets d'exploitation commerciale d'EEE. Si l'espèce dispose de fortes capacités de dispersion (directement corrélées à son mode et à ses capacités de reproduction), ce risque sera d'autant plus élevé et les mesures pour atténuer cette dispersion d'autant plus difficiles à mettre en œuvre. Ce risque est encore accru lorsque l'espèce cible est présente dans des biotopes présentant de nombreuses connections écologiques (par exemple, zones de couverture végétale permanente, zones humides, cours d'eau, etc.).
- Si les risques de dispersion sont élevés, il convient que chaque étape de l'exploitation (capture, transport, transformation, stockage, acheminement vers un point de vente, entrepôt et transport vers le lieu d'utilisation finale) n'augmente pas le risque de dispersion et que des mesures de confinement soient adaptées et mises en œuvre à chaque étape.

La dynamique des populations ciblées par le projet a-t-elle fait l'objet d'études préalables ?

- Connaître la dynamique des populations (fécondité, âge de la maturité sexuelle, taux de mortalité, stratégie démographique, etc.) de l'espèce est indispensable pour définir une stratégie de prélèvement permettant d'atteindre les objectifs écologiques fixés. Une pression de prélèvement insuffisante exercée sur une fraction des populations (par exemple, sur les plus gros individus ou sur un seul stade de reproduction) ou de l'individu (partie de plante) peut n'avoir aucun effet sur la dynamique de la population voire la stimuler (phénomène de surcompensation écologique). Les opérations d'exploitation commerciale peuvent ainsi être contreproductives ou ne pas avoir d'effet sur les populations de l'EEE cible.

L'EEE cible est-elle porteuse de parasites et/ou de pathogènes ?

- Si l'espèce peut véhiculer des parasites et/ou des pathogènes, son exploitation peut augmenter la dispersion de ceux-ci et impacter négativement les écosystèmes. Des mesures prophylactiques, en cas de risque avéré, doivent être prises dans l'ensemble de la chaîne de valorisation et au cours des différentes étapes de l'exploitation. En leur absence, l'exploitation augmentera très probablement la prévalence des parasites ou pathogènes.
- Une analyse des risques sanitaires de l'espèce cible est un prérequis avant toute exploitation commerciale.

QUESTIONNEMENTS ET POINTS DE VIGILANCE

2 OBJECTIFS DU PROJET ET INTÉGRATION DANS UNE STRATÉGIE GLOBALE DE GESTION

Le projet repose-t-il sur une étude de marché ?

- Une étude de marché identifie la rentabilité et la viabilité du projet et les facteurs qui pourront l'influencer. Dans le cas des projets d'exploitation commerciale des EEE, cette étude doit également fournir des éléments argumentés sur le modèle économique retenu (produits, méthodes de transformation, type de circuit de distribution, etc.) qui permettra de minimiser les risques écologiques du projet. En l'absence d'étude, l'action mise en œuvre ne garantit aucune viabilité économique du projet, ce qui risque d'empêcher l'atteinte des objectifs écologiques du projet, et de ne pas réguler l'espèce, voire de favoriser sa dispersion.

Une stratégie de « sortie » est-elle proposée dans le projet ?

- L'objectif principal devant retenir la réduction des populations de l'EEE ciblée par le projet, celui-ci doit identifier et anticiper les conséquences de la diminution de l'EEE cible dans le milieu. Le terme de l'exploitation doit être anticipé et une stratégie de sortie est nécessaire pour remédier à la diminution de la rentabilité du projet qui interviendra obligatoirement lorsque les objectifs écologiques seront atteints. L'identification d'autres activités rémunératrices à développer pour remédier à la diminution de la ressource ciblée doit être réalisée avant toute mise en œuvre des projets. En leur absence, les risques de dépendance économique, de maintien des populations de l'EEE cible ou de leur dispersion sont très élevés. Les éléments constituant cette stratégie de « sortie » peuvent être à exiger auprès des porteurs de projet.

Les coûts de la mise en œuvre du projet sont-ils évalués ?

- Il est nécessaire de comparer les coûts et les bénéfices du projet d'exploitation commerciale à ceux des méthodes classiques de régulation. L'inclusion dans le projet d'une analyse coûts-bénéfices, qui consiste à évaluer l'écart entre le coût du projet et les bénéfices qu'il est susceptible de générer, peut être un élément très utile d'évaluation générale, éventuellement à exiger auprès des porteurs de projet. Si une analyse coûts-bénéfices est disponible, elle devra intégrer les gains et les pertes pour les milieux naturels, qui sont rarement pris en compte dans l'évaluation des biens et services marchands et plus difficiles à estimer. La réalisation correcte de cette analyse implique d'avoir identifié préalablement les risques environnementaux, sanitaires, économiques et sociaux du projet.
- Si les coûts du projet sont supérieurs à ceux des méthodes de régulation classiques, et/ou si l'analyse coûts-bénéfices est négative, il convient de s'interroger sur la pertinence d'une exploitation commerciale.

Les objectifs du projet sont-ils clairement exposés ?

- Il est primordial que les objectifs écologiques du projet (diminution des populations de l'EEE cible, amélioration de la diversité biologique du milieu par exemple) apparaissent comme prioritaires, réalistes et sincères.
- Si les objectifs du projet d'exploitation commerciale sont concentrés sur les intérêts économiques qu'ils peuvent générer, ou si des objectifs écologiques sont mentionnés mais n'apparaissent pas suffisamment précisés et étayés, ils n'auront pas ou très peu d'intérêt environnemental et ne constitueront pas une méthode de régulation des populations de l'EEE ciblée.

Le projet de valorisation économique est-il intégré dans une stratégie de gestion globale ?

- Une stratégie globale de gestion est nécessaire pour atteindre les objectifs de diminution des populations de l'EEE ciblée. Un projet d'exploitation commerciale ne peut pas être suffisant en lui-même pour atteindre ces objectifs. Intégrer le projet dans une stratégie plus vaste, élaborée en collaboration avec différents partenaires et comprenant des actions de prévention, de surveillance, de régulation et de sensibilisation, est nécessaire pour améliorer l'efficacité écologique et diminuer les risques sur l'environnement de l'exploitation commerciale.
- En l'absence d'une réelle stratégie globale de gestion, le projet s'inscrit uniquement dans un objectif individuel et opportuniste d'exploitation économique.

Le projet propose-t-il des actions de sensibilisation et de formation ?

- La formation du personnel et la sensibilisation à la problématique des EEE sont des moyens importants pour prévenir les risques des invasions biologiques : introductions et dispersions volontaires ou involontaires, transmission de pathogènes, etc. Pour le personnel opérant, elles permettent de mettre en œuvre des mesures spécifiques de biosécurité lors des opérations (décontamination et nettoyage du matériel, confinement des spécimens, identification des lots, etc.) et de diminuer les risques associés. En leur absence, les risques éventuels sur l'environnement seront plus élevés.

Le projet est-il accompagné d'une charte des bonnes conduites ?

- Une charte des bonnes conduites, établie avec l'ensemble des parties prenantes (entreprise privée, services de l'État, gestionnaires d'espaces naturels, collectivités, etc.), formalise des règles à respecter pour s'assurer d'un déroulement correct des opérations et de la bonne atteinte des objectifs écologiques du projet tout en réduisant les risques. Elle engage les porteurs de projet ainsi que les autres acteurs de la filière commerciale (transporteurs, transformateurs, vendeurs, etc.) et son respect peut conditionner les autorisations d'exploitation.

QUESTIONNEMENTS ET POINTS DE VIGILANCE

3 IDENTIFICATION, ANTICIPATION DES RISQUES ET ÉVALUATION ÉCOLOGIQUE DU PROJET

Les conséquences négatives potentielles du projet sont-elles identifiées et des moyens sont-ils proposés pour les anticiper ?

- Les conséquences négatives écologiques, économiques et sanitaires du projet d'exploitation commerciale doivent être clairement identifiées. Cette identification doit porter sur les impacts potentiels et avérés, temporaires ou permanents, sur la globalité du projet (sur tous les volets, tous les secteurs géographiques, du prélèvement dans le milieu naturel à la vente en passant par le transport et la transformation) et doit faire partie des éléments présentés avant le lancement du projet.
- Des moyens doivent être proposés pour anticiper et minimiser les risques identifiés afin de s'assurer de l'innocuité environnementale du projet et de retombées écologiques positives. Si des conséquences négatives écologiques déjà connues ne sont pas signalées, ou ne sont pas suffisamment précisées, et qu'aucun moyen n'est proposé pour les anticiper, la sincérité des objectifs environnementaux du projet est à remettre en cause et les risques écologiques sont d'autant plus élevés.

Existe-t-il des risques de dispersion de l'EEE dans des zones en dehors du projet ?

- S'il est connu que l'espèce peut être volontairement dispersée par l'homme (pêche, chasse, etc.), les risques de dispersion sont déjà importants et le seront d'autant plus si l'espèce représente une valeur marchande. De plus, si l'espèce est transportée vivante vers un site de transformation ou commercialisée vivante, ou que sa remise à l'eau est autorisée, les risques de dispersion ou d'introduction volontaires et involontaires sont élevés. Pour les végétaux il convient tout particulièrement d'être vigilant à la dispersion de propagules (graines ou fragments de végétaux pouvant se développer).
- Ce risque écologique est d'autant plus important que des zones adjacentes au projet ne sont pas encore colonisées par l'espèce. Il le sera encore plus si ces zones abritent des espèces indigènes menacées.
- Ces risques de dispersion sont à prendre en compte pour les pathogènes et les parasites dont l'EEE cible pourrait être porteuse.

Les lieux de prélèvement de l'espèce cible sont-ils identifiés précisément dans le projet ?

- La définition des sites de prélèvement, incluant une liste des parcelles (références cadastrales) avec une localisation géographique précise est indispensable pour délimiter le territoire concerné par le projet et évaluer l'efficacité des actions menées.
- L'inscription de ces références cadastrales dans un acte réglementaire (arrêté préfectoral par exemple) permet de contrôler que les actions sont bien menées sur les sites désignés et inclus sur le territoire du projet, de vérifier qu'il n'existe pas d'exploitation illégale et que l'ensemble des sites fait bien l'objet de prélèvements, conformément au plan de prélèvement fixé dans le projet.
- Afin d'éliminer tout risque de dispersion de l'espèce, l'aire de réalisation de l'exploitation commerciale devrait être limitée à l'aire de répartition de l'espèce.

Le mode d'exploitation remet-il en question l'état de conservation des espèces indigènes et/ou des milieux naturels ?

- Il convient de s'assurer du moindre impact environnemental des opérations. Ainsi des campagnes de piégeage intense, par la présence humaine sur le terrain ou les déplacements de véhicules pourraient engendrer un dérangement de la faune (en période de reproduction, de nidification, de repos, etc.), modifier le milieu (tassement des sols, augmentation de la turbidité des milieux aquatiques, etc.), et impacter négativement les populations d'espèces indigènes présentes.
- Pour les actions de piégeage, de capture ou tout autre mode de collecte, si les engins utilisés ne sont pas sélectifs (induisant un risque de capture d'espèces non ciblées et parfois menacées), le projet risque d'avoir des impacts négatifs sur la biodiversité. Si des techniques alternatives sont proposées pour limiter ce risque, elles ne pourront être acceptées que si elles ont fait l'objet d'une évaluation scientifique démontrant une réduction significative de ces impacts. Cette évaluation doit être impartiale. Les protocoles, travaux, analyses et conclusions doivent être validés, ou au moins appréciés, par un comité d'experts indépendants.
- Dans tous les cas, il convient de s'assurer que les engins et les périodes de pêche soient conformes à la réglementation.

Le projet propose-t-il des mesures de confinement, de prévention de la dispersion et de traçabilité des populations de l'EEE cible ?

- Ces mesures sont nécessaires pour prévenir les risques de dispersion des populations inhérents aux projets d'exploitation économique d'EEE. Leur absence peut conduire à un manque d'anticipation et à une augmentation accrue de ces risques, entraînant un échec dans l'atteinte des objectifs écologiques du projet. Des mesures rigoureuses, mises en place sur le terrain mais également sur les sites de transformation, de stockage et lors du transport, sont à appliquer dès le démarrage de l'exploitation. Leur présentation dans le projet pourra conditionner l'obtention de l'autorisation d'exploitation.
- Si l'espèce est transportée vivante, et que les sites de stockage, de transformation ou de conditionnement sont éloignés du site de prélèvement, les risques de dispersion et d'introduction volontaires et involontaires seront d'autant plus élevés. Il est souhaitable que l'ensemble de ces sites soit identifié dans des actes réglementaires (arrêtés préfectoraux) avant toute commercialisation et/ou transport.
- En l'absence de normes précisées dans le projet pour s'assurer des conditions de confinement de l'espèce dans les sites de conditionnement, de transformation et de stockage, il existe un risque de dispersion non négligeable et les actions de contrôle seront plus difficiles à mettre en œuvre.
- Les mesures d'identification et/ou de traçabilité des individus ou des lots permettent d'exercer des contrôles efficaces de l'exploitation commerciale. Ces normes peuvent être précisées dans des actes réglementaires (coordonnées de l'exploitant, itinéraire emprunté, numéro de lot, date et lieu de prélèvement, quantité, nombre d'emballages, etc.).

QUESTIONNEMENTS ET POINTS DE VIGILANCE

Des dispositifs de désinfection et de nettoyage du matériel pour éviter la dispersion de l'espèce et de maladies sont-ils prévus dans le cadre du projet ?

- Exiger la mise en application de protocoles de désinfection du matériel permet de diminuer le risque de dispersion involontaire de l'espèce, d'autres organismes ainsi que de pathogènes. Si aucun protocole de désinfection ou de nettoyage n'est proposé, ce risque est mal identifié par les porteurs du projet et des impacts négatifs et irréversibles sur l'environnement peuvent se produire.

Les prélèvements exercés sur l'espèce cible dans le cadre du projet concernent-ils l'ensemble de la population (ensemble des individus) ?

- Des études sur le type et le taux de prélèvement à mettre en œuvre pour faire diminuer la population de l'EEE cible sont nécessaires pour définir une stratégie de prélèvement qui permette d'atteindre les objectifs de régulation des populations concernées fixés dans le projet. Si les prélèvements se concentrent sur une seule classe d'âge ou de taille d'individus, sur un seul sexe ou sur un stade spécifique de développement ou de reproduction, il existe un risque d'inefficacité des actions de prélèvement, voire de surcompensation écologique.
- Ce risque de surcompensation écologique est d'autant plus élevé qu'il a été démontré par des études antérieures sur l'espèce cible ou des espèces taxonomiquement proches.
- Pour la flore, si les prélèvements ne concernent pas la totalité de l'organisme, les populations pourront se reconstituer à partir de propagules abandonnées sur le terrain et les objectifs de régulation des populations risquent de ne pas être atteints.
- L'existence d'une stratégie de prélèvement clairement définie doit conditionner la délivrance des autorisations d'exploitation.

Les conséquences écologiques potentielles font-elles l'objet d'une évaluation scientifique durant le programme ?

- L'évaluation scientifique et la diffusion régulière de données au cours de l'action (bilan des prélèvements, suivi de la répartition de l'espèce ciblée, évolution de la dynamique d'espèces non cibles et notamment de celles impactées par l'EEE, etc.) permettent de s'assurer du bon avancement du projet vers l'atteinte des objectifs écologiques et conditionnent le renouvellement de l'autorisation d'exploitation.
- Cette évaluation scientifique doit reposer sur des méthodes de suivi et des protocoles rigoureux. Leur établissement et leur mise en œuvre par des structures compétentes et indépendantes du porteur de projet permettent de s'assurer de leur fiabilité.
- Si les conséquences écologiques ne sont pas identifiées et qu'aucune évaluation n'est proposée, il est impossible de vérifier l'atteinte des objectifs écologiques (ni l'absence d'impacts négatifs) et le projet ne présente alors qu'un intérêt économique (à condition que celui-ci soit correctement démontré).

4 IMPLICATION MULTI-ACTEURS ET PARTENAIRES

Le projet implique-t-il plusieurs partenaires ?

- L'implication de l'ensemble des parties prenantes de la gestion des EEE dans le projet, dont les services de l'État, des établissements publics, des gestionnaires d'espaces naturels, des chercheurs, des collectivités, etc., permet d'exercer une vigilance sur les intérêts, les risques et l'atteinte des objectifs écologiques du projet d'exploitation économique. Si le projet n'est porté que par un seul acteur ou par des partenaires poursuivant uniquement des objectifs économiques, les objectifs écologiques risquent de ne pas être prioritaires ni même réellement pris en compte.

Le projet associe-t-il des établissements de recherche scientifique pouvant apporter leurs compétences en biologie et en écologie ou dans des disciplines faisant appel aux approches socio-économiques ?

- Les partenaires scientifiques (chercheurs universitaires par exemple), associés en toute indépendance au projet peuvent utilement contribuer à :
 - réaliser les études préalables au projet sur la biologie et la dynamique des populations de l'espèce ciblée ;
 - définir des protocoles de prélèvement et de suivi qui permettront d'évaluer correctement l'efficacité écologique du projet ;
 - évaluer les effets positifs et négatifs de l'exploitation commerciale sur des cortèges d'espèces non ciblées ;
 - participer aux évaluations socio-économiques du projet.
- L'absence de partenaires scientifiques dans le projet aura pour conséquence d'augmenter le risque de mauvaise définition des objectifs écologiques, de stratégie de prélèvement inadaptée et d'évaluation écologique insuffisante ou absente.

Les services de l'État ont-ils été contactés et sont-ils sollicités ?

- La sollicitation des services de l'État compétents en termes de biodiversité et de réglementation (DDT, AFB, ONCFS, etc.) est indispensable pour la réalisation de tels projets. Ils permettent notamment de vérifier que le projet s'insère bien dans un cadre réglementaire et qu'il n'est pas en contradiction avec les politiques environnementales et les stratégies territoriales, nationales et internationales.

Contacts

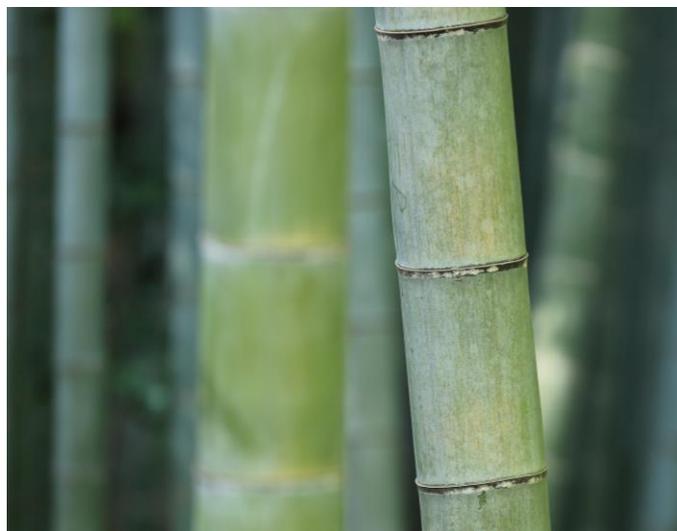
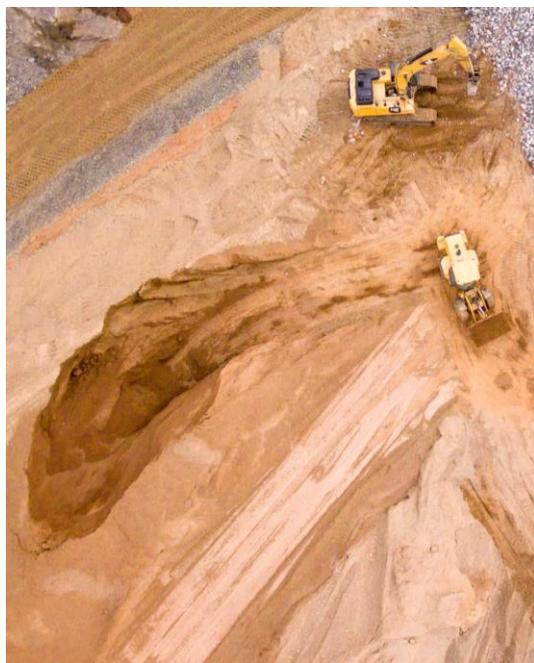
Karibati

Marion Chirat – Associée-fondatrice, Experte Bâtiment et Environnement m.chirat@karibati.com

Théo Vincelas – Chargé de mission - Immobilier & Territoire – Expert terre crue, chanvre – t.vincelas@karibati.com

Nathalie Da Ponte – Associée-fondatrice, responsable administrative et financière – n.daponte@karibati.com

Yves Hustache – Associé-fondateur, Expert R&D et Innovation– y.hustache@karibati.com



Développement des filières terre et bambou sur les territoires de Martinique, de Guadeloupe et de Guyane



Février 2023

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	3
METHODOLOGIE.....	3
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	7
1.1 Solutions à base de terre crue.....	7
1.2 Solutions à base de bambou.....	19
IMPACTS SOCIAUX-ECONOMIQUES	32
1.3 Solutions à base de terre crue.....	32
1.4 Solutions à base de bambou.....	33
CONTACTS	37
BIBLIOGRAPHIE.....	38

Introduction

Le développement de nouvelles filières productrices de matériaux de construction entraîne la création de nouvelles chaînes de valeurs à l'échelle territoriale :

- Valorisation de productions locales ou de matières considérées comme des déchets
 - Organisation logistique pour une collecte ou une récupération de cette matière première
 - Transformation de la matière première en un produit de construction
 - Mise en œuvre de ce produit dans un bâtiment
- Etc.

Toutes ces étapes sont autant de nouveaux maillons qui vont venir se succéder et pour lesquels de nouvelles compétences, voire de nouveaux métiers vont se créer.

Ainsi si certains bénéfices du développement de ces filières semblent évidents :

- Utilisation de matières premières locales ;
- Réduction d'acheminement de produits de construction donc moins de transport ;
- Développement économique local;

D'autres aspects plus nuancés sont à analyser :

- Les nouveaux emplois créés sont-ils moins pénibles que ceux qu'ils remplacent ?
- Est-ce plutôt facile de récupérer la matière première ou plutôt coûteux ?
- Le produit mis en œuvre dans le bâtiment a-t-il moins d'impact que son équivalent conventionnel ?
- etc...

Pour cette partie de l'étude, il s'agissait donc de pouvoir appréhender différents aspects liés à l'impact environnemental mais aussi socio-économique de développement de solutions à base de terre ou de bambou.

Méthodologie

Pour la partie « évaluation de l'impact environnemental » :

Nous avons procédé en trois principales étapes :

- Bibliographie des études déjà réalisées sur ce sujet et notamment recherche d'analyse de cycle de vie (ACV) déjà existantes ou de déclaration environnementale de produit (FDES en France) ;
- Pour compléter cette étude bibliographique, recherche dans les bases de données d'ACV si des données sont existantes et analyse de ses données à l'aide des méthodes de calculs présentes dans notre logiciel d'analyse de cycle de vie (Simapro);
- Adaptation des ACV ou données trouvées au contexte Martiniquais : à partir d'hypothèse sur l'exploitation de la ressource et son transport actualisation de donnée trouvée.

[ACV / Déclarations environnementales / FDES de quoi parle-t-on ?](#)

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode d'évaluation de l'impact environnemental d'un matériau, d'un produit, d'un service ou d'un procédé. Selon la norme ISO 14040 norme, « L'analyse du

cycle de vie prend en considération l'ensemble du cycle de vie d'un produit, de l'extraction et de l'acquisition de la matière première, à l'utilisation et aux traitements en fin de vie et l'élimination finale des déchets, en passant par la production d'énergie et de matière et la fabrication. A travers cette approche globale et systématique, le déplacement des charges entre les différentes étapes du cycle de vie ou entre des processus particuliers peut être identifié et évité. »

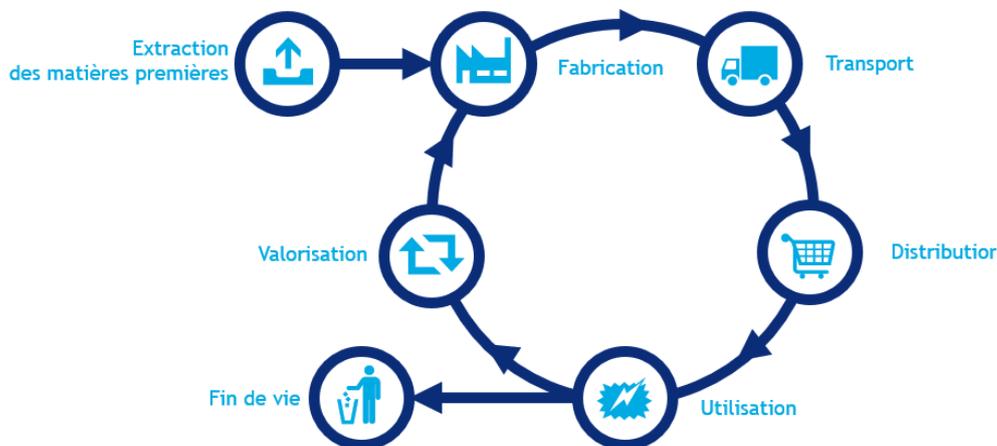


Figure 1 : Cycle de vie d'un produit

L'analyse de cycle de vie est avant tout un outil d'éco-conception, c'est-à-dire qu'elle permet de prendre en compte les impacts environnementaux lors de la phase de conception ou d'amélioration d'un produit (bien ou service), en considérant l'ensemble de son cycle de vie».

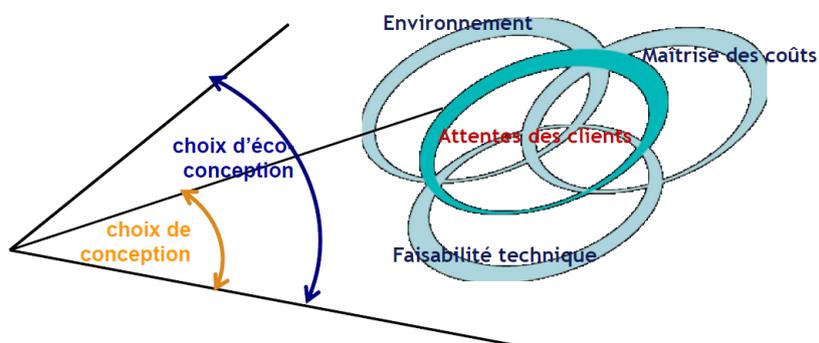


Figure 2: Eco-conception , intégrer l'environnement à l'étape de conception d'un produit

C'est une exigence de conception qui s'ajoute à toutes les autres. Lors de la conception, l'analyse de cycle de vie permet d'identifier les étapes les plus impactantes et les principaux contributeurs (procédés, matières utilisés, transports des matières , etc...) mais aussi d'éviter les déplacements de pollution.

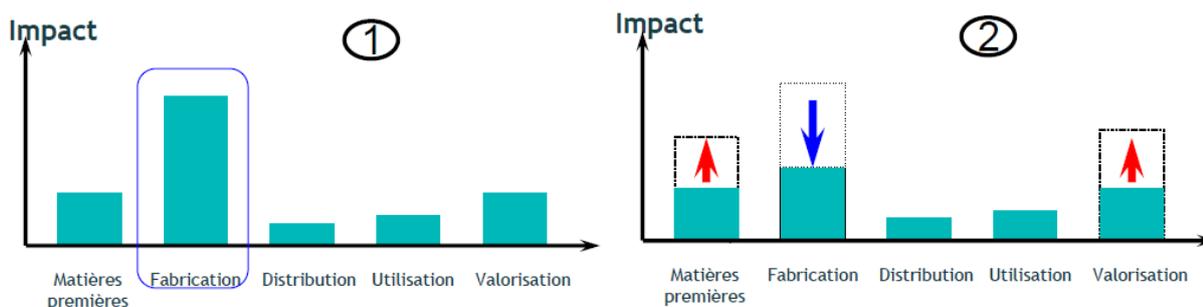


Figure 3 : Illustration de la notion de "déplacement de pollution"

Par exemple sur le schéma ci-dessus, pour l'ACV n°1, l'impact environnemental majeur et généré lors de la « Fabrication ». En changeant le procédé, l'impact environnemental de l'étape « Fabrication » a été réduite au détriment de deux autres étapes qui ont été aggravées.

Déclaration environnementale de produits et FDES :

Les déclarations environnementales de produits de construction, aussi appelées en France, Fiche de déclaration environnementale et Sanitaire (FDES), sont des déclarations comprenant l'analyse de cycle de vie pour un produit de construction et sont normées. Depuis le 1^{er} novembre 2022 cette norme de réalisation a évolué (l'EN 15804+A2 est maintenant la norme de référence).

Ainsi chaque fiche ou déclaration se présente toujours de la même manière :

- **Une unité fonctionnelle** décrit la performance quantifiée du produit étudié et est utilisée comme unité de référence pour la réalisation de l'analyse de cycle de vie.
- **Des descriptions du produit et de son utilisation** dans le bâtiment permettent d'affiner le champ de l'étude.
- **Une durée de vie** est également fixée pour le produit sur la base d'essai ou de retour d'expérience (par exemple 50 ans pour un isolant, 100 ans pour une structure).

Ensuite les principales hypothèses de modélisation sont récapitulées et les résultats de l'analyse de cycle de vie sont détaillées pour un jeu d'indicateurs d'impacts et de flux définis par la norme.

Il existe 3628 FDES sur la base INIES¹ et ce chiffre continue d'augmenter en France car la nouvelle réglementation RE2020, portant sur la performance carbone des bâtiments neufs, rend indispensable l'obtention et la mise à disposition de ces données.

Pour la partie « évaluation de l'impact socio-économique » :

L'évaluation des retombées socio-économiques des solutions constructives peut être réalisée à travers une analyse approfondie de 2 indicateurs principaux que sont :

- **L'Impact économique :**
 - o Direct : incluant les coûts de production, de main-d'œuvre, d'exploitation et les revenus générés par la solution mise en œuvre.
 - o Indirect : Quel peut être le potentiel de développement économique local engendré par le changement de pratiques constructives ? Cela a-t-il une incidence sur l'industrie locale et le développement de nouvelles activités ? Si c'est le cas la création d'emplois locaux va également stimuler l'activité économique locale, etc.
- **L'Impact social :**
 - o Quelles sont les retombées sociales du développement de telle technique constructive ? Quel sera l'impact sur l'emploi local, l'augmentation des revenus, l'amélioration des conditions de travail (par exemple baisse de la pénibilité au travail amené par l'utilisation de cette technique, entreprise disposant de charte RSE, etc...) ?
 - o Mais aussi quel sera l'impact pour les habitants/occupants des bâtiments construits avec ces systèmes constructifs : amélioration de la qualité de vie ? sécurité et durabilité de l'habitat construit ?
 - o Peut se poser également la question de l'impact vis à vis des pratiques culturelles.

¹ La base INIES est la base de données pour les FDES en France, toutes les données disponibles sont consultables sur : [Inies, les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment et la RE2020 - Inies](#)

Une évaluation complète des retombées socio-économiques de systèmes constructifs nécessite de disposer de nombreuses données aussi bien sur les solutions développées que sur les produits concurrents. Cela n'étant pas faisable à ce stade de l'étude, nous avons travaillé principalement sur des études existantes par le biais d'une analyse bibliographique.

Impacts environnementaux

1.1 Solutions à base de terre crue

Pour la terre crue nous trouvons, dans la base INIES, 14 FDES disponibles couvrant différentes typologies de produits à base de terre crue .

Ci-dessous sont présentés , quelques informations des FDES trouvées :

- Dénomination de la FDES telle qu'elle apparait dans la base INIES ;
- Nom du déclarant
- Unité fonctionnelle = unité et performance pour laquelle est réalisée l'étude ACV ;

Ces données sont reprises tels que déclarées dans la base INIES.

Dénomination de la FDES	Déclarant	Unité fonctionnelle (UF)
Brique en terre crue Argitech	Argilus	Assurer la fonction d'1m ² de cloison en brique de terre crue pendant 50 ans
Terre-chanvre fabriqué à partir de chènevotte et de terre crue mis en œuvre par banchage ou projection avec ou sans ossature bois	Association des chanvriers en circuits courts	1 m ³ de terre-chanvre avec ou sans ossature bois et mis en œuvre par banchage ou projection
Enduit artisanal intérieur de terre-crue non stabilisé	ASTERRE	1m ² d'enduit d'épaisseur 1 mm déposé sur une paroi intérieure selon les règles de l'art pendant la durée de vie de référence (DVR) de 50 ans.
Enduit intérieur , prêt à l'emploi, de terre crue non stabilisée	ASTERRE	1m ² d'enduit d'épaisseur 1 mm déposé sur une paroi intérieure selon les règles de l'art pendant la durée de vie de référence (DVR) de 50 ans.
Enduit intérieur prêt à l'emploi de terre crue non stabilisée de 5 à 8 mm	Briques Technic concept	Assurer le revêtement d'1m ² carré de paroi intérieure d'un bâtiment sur environ 6 millimètres d'épaisseur, par un enduit prêt-à-l'emploi, pendant la durée de vie de référence de 50 ans.
Murs en adobes	Confédération de la construction en terre crue	Assurer la fonction de mur porteur sur 1 m ² de paroi, pour une épaisseur comprise entre 14,5 et 35 cm, une conductivité thermique comprise entre 0,4 et 0,6, et une durée de vie de référence (DVR) de 100 ans

Murs en bauge ² mis en œuvre de façon traditionnelle	Confédération de la construction en terre crue	Assurer la fonction de mur porteur sur 1 m ² de paroi, pour une épaisseur comprise entre 40 et 60 cm, une conductivité thermique comprise entre 0,4 et 0,6, et une durée de vie de référence (DVR) de 100 ans.
Remplissage d'un mur en terre paille de 30 cm d'épaisseur en moyenne	Confédération de la construction en terre crue	Assurer la fonction de mur non porteur sur 1 m ² de paroi, pour une épaisseur de 30 cm sur une durée de vie de référence (DVR) de 100 ans.
Brique de terre crue extrudée	CTMNC / Fédération Française des tuiles et briques	Assurer la fonction de mur porteur ou non porteur pour une pose en appareil régulier sur 1 m ² de paroi avec une durée de vie de référence de 100 ans.
Paroi en bloc de terre comprimée non porteuse d'environ 10 cm	CYCLE TERRE	Assurer la fonction de mur non porteur sur un mètre carré, par une paroi en bloc de terre comprimée et mortier d'une épaisseur d'environ 10 centimètres, pendant la durée de vie de référence de 100 ans.
Paroi en bloc de terre comprimée porteuse d'environ 30 cm	CYCLE TERRE	Assurer la fonction de mur porteur sur un mètre carré, par une paroi en bloc de terre comprimée et mortier d'une épaisseur d'environ 30 centimètres, pendant la durée de vie de référence de 100 ans.
Plaque de terre extrudée enduite (ossature non incluse)	CYCLE TERRE	Assurer une fonction de parement sur un mètre carré, par une plaque de terre extrudée de 2 cm, enduite sur une épaisseur de 5 à 10 mm, à fixer sur une ossature (non incluse), pendant la durée de vie de référence de 50 ans.
Brique de terre compressée , FILIATER au chantier du domaine de l'Argibois, Levens	FILIATER	Mur porteur en Brique de Terre Compressée, d'épaisseur 40 cm et de surface de 1 m ² , avec une capacité portante de 2 228 kN/m et une conductivité thermique de 0,63 W/(m ² .K), dans le respect des règles de l'art, et pour une durée de vie de référence de 100 ans.
Mur non porteur de 15 cm d'ép en briques de terre crue compressées stabilisées	Le Village	Assurer la fonction de mur non porteur de 15 centimètres d'épaisseur sur 1 m ² de paroi pendant une durée de vie de référence de 100 ans.

² Bauge = Mise en œuvre de couches successives de hauteur comprise entre 40cm et 1m (appelées levées), d'un mélange de terre et de fibres végétales. Le mélange contient de l'eau de façon à ce qu'il atteigne un état plastique. L'ensemble constitue un mur porteur.

Analyse des données trouvées :

Afin de pouvoir comparer les ordres de grandeurs pour les 14 données trouvées, nous les classons par fonction :

- Murs porteurs : 4 données disponibles ;
- Murs non porteurs / Isolation : 6 données disponibles ;
- Enduit : 3 données disponibles ;
- Parement/cloison: 1 donnée disponible ;

Nous procédons par la suite à des comparaisons sommaires des résultats d'ACV, des précautions doivent toutefois être prises sur l'analyse de ces comparaisons :

- Les FDES de produits de construction peuvent ne pas être comparables si elles ne sont pas conformes à la norme. La norme NF EN 15804+A1 définit au § 5.3 *Comparabilité des FDES*, les conditions dans lesquelles les produits de construction peuvent être comparés sur la base des informations fournies par le document : « Une comparaison de la performance environnementale des produits de construction utilisant les informations des FDES doit être basée sur l'usage des produits et leurs impacts sur le bâtiment, et doit prendre en compte la totalité du cycle de vie (tous les modules d'informations) ».
 - ➔ *C'est le cas ici car nous n'analysons que des FDES portant sur l'ensemble du cycle de vie et réalisée selon la norme EN15804+A1. De plus toutes les données sont vérifiées.*
- Malgré la norme, les différences d'impacts de résultats d'ACV peuvent varier significativement selon :
 - o La personne qui réalise l'ACV ;
 - o La personne qui vérifie la FDES ;
 - o La(les) base(s) de données qui sont utilisées ;
 - o La précision des données collectées ;
 - o Les hypothèses prises notamment pour les scénarios de fin de vie ;
 - o Etc...
- *Ainsi les comparaisons ci-après permettent de mettre en avant les facteurs qui influencent les résultats mais pas de « classer » à proprement dit les solutions entre elles.*

Pour l'analyse nous procédons en 2 étapes :

- **Analyse et comparaison des données trouvées**, par fonction dans le bâtiment (afin d'avoir une Unité fonctionnelle comparable) sur l'indicateur Réchauffement climatique. Cela permet de faire ressortir les contributeurs principaux aux résultats d'ACV pour les produits à base de terre
- **Analyse et comparaison avec des systèmes constructifs « courants »** sur 3 indicateurs témoins :
 - o Réchauffement climatique [kg éq CO₂]
 - o Utilisation totale des ressources d'énergie non renouvelable [MJ]
 - o Épuisement des ressources abiotiques éléments [kg Sb éq]

1) [Analyse pour les solutions de murs porteurs à base de terre crue :](#)

Ci-dessous les impacts sur l'indicateur « Réchauffement climatique ³ » des 4 solutions de murs porteur sont présentées.

N° de paroi	Description	Masse pour l'UF	Indicateur "Réchauffement climatique en kg éq CO2"				
			Total Cycle de vie	Etapas de Production	Etapas de mise en œuvre	Etapas d'utilisation	Etapas de fin de vie
1	Paroi en bloc de terre comprimée porteuse d'environ 30 cm	535,7 kg/m ²	36,1	27,8	4,85	-0,83	4,28
2	Brique de terre compressée , chantier du domaine de l'Argibois	642,9 kg/m ²	51,1	56,1	0	-9,01	4,02
3	Murs en adobes mis en œuvre de façon traditionnelle	789 kg/m ²	16,3	0,00982	5,49	0	10,8
4	Murs en bauge mis en œuvre de façon traditionnelle	1272 kg/m ²	9,62	-13,4	9,37	0	13,6

On observe de grosses variations de résultats entre ces 4 solutions entre un impact le plus faible à 9,62 kg CO2 éq (paroi n°4) et un impact le plus fort à 51,1 kg eq CO2 (paroi n°2) .

Pour les parois 1 et 2, l'impact sur le réchauffement climatique est assez important ceci s'explique car ces 2 systèmes de parois sont stabilisés avec de la chaux (paroi 1) ou du ciment (paroi 2).

En revanche les solutions 3 et 4, malgré plus de matières premières embarquées par m², présentent des impacts beaucoup moins importants. Ceci s'explique par le fait que ces solutions intègrent des matières premières biosourcées qui stockent du carbone.

³ L'indicateur « réchauffement climatique » exprimé en kg équivalent CO2 et par extension appelé « Impact carbone » est l'indicateur le plus souvent étudié dans les ACV. En anglais on le nomme « Global Warming potential – GWP ». Il représente le potentiel d'augmentation de l'effet de serre induit par les activités humaines, en ACV on le nomme parfois aussi « Effet de serre additionnel ».

Ainsi on observe à l'étape de production :

- **Pour la paroi n°4** : un impact négatif à l'étape de production, cela indique que la paroi stocke plus de CO₂ qu'elle n'en émet à cette étape.
- **Pour la paroi n°3** : l'impact n'est pas négatif mais est proche de 0 : les émissions liées à la production des matériaux sont compensés par le stockage de CO₂ des matières premières biosourcées.
- **Pour les parois n°1 et n°2** : l'étape de production est la plus impactante, avec la production du ciment ou de chaux qui génère beaucoup d'émissions de CO₂.

A l'étape de mise en œuvre :

- **La paroi n°2** ne présente pas d'impact. Cela est simplement dû à une hypothèse de modélisation différente prise entre les différentes FDES. En effet dans cette donnée l'ACV vise à considérer les impacts de la fabrication du mur sur chantier en même temps que les impacts de production. Ainsi les étapes de production comprennent la préparation des matériaux avant le montage du mur : La terre passe dans un premier temps dans un cribleur électrique pour obtenir un matériau uniforme puis le ciment CEM II et l'eau sont ajoutés dans cette même machine pour la préparation d'un mortier. Enfin le mélange arrive dans une machine à brique et la brique est ensuite placée en "cure".

A l'étape de vie en œuvre :

- **Pour les parois n°1 et n°2**, on observe un impact négatif à cette étape. Cela est dû au fait que ces données contiennent des liants (ciment, chaux) qui vont carbonater pendant le cycle de vie du produit mis en œuvre. Ce phénomène de carbonatation courant au sein des bétons conventionnels (béton de ciment) se modélise comme un captage de CO₂ et apparaît donc comme un impact négatif au même titre que le stockage de CO₂ au sein des matières premières biosourcées.

A l'étape de fin de vie :

- **Les parois n°3 et n°4** sont les plus impactantes car en fin de vie, la décomposition des matières premières biosourcées va entraîner une rémission partielle du CO₂.

Si l'on compare ces solutions avec celles de murs « courants » pour lesquelles nous choisissons 2 données types dans la base INIES :

- Un mur en béton armé banché à usage de refend/ voile intérieur en zone sismique
- Un mur en briques traditionnelles

Pour ces deux parois les résultats d'analyse du cycle de vie sont modélisés pour une épaisseur de 20 cm. Ainsi on observe une masse beaucoup moins importante par m² par rapport aux 4 parois terre porteuse décrites ci-avant.

Description	Masse pour l'UF	Indicateur "Réchauffement climatique en kg éq CO2"				
		Total Cycle de vie	Etapes de Production	Etapes de mise en œuvre	Etapes d'utilisation	Etapes de fin de vie
Refend / Voile intérieur / Mur intérieur en zone sismique en béton armé d'épaisseur 0,20m C25/30 XC1/XC2 CEM II/A (v.1.2)	481 kg/m ²	43,81	38	8,81	-4,06	1,06
1m ² de paroi en Briques traditionnelles	126,85 kg/m ²	36,9	29,4	6,15	0	1,29

Ainsi en comparaison brute, l'analyse sur les 3 indicateurs témoins confirme l'impact important de la paroi terre n°2 (voir graphe ci-après).

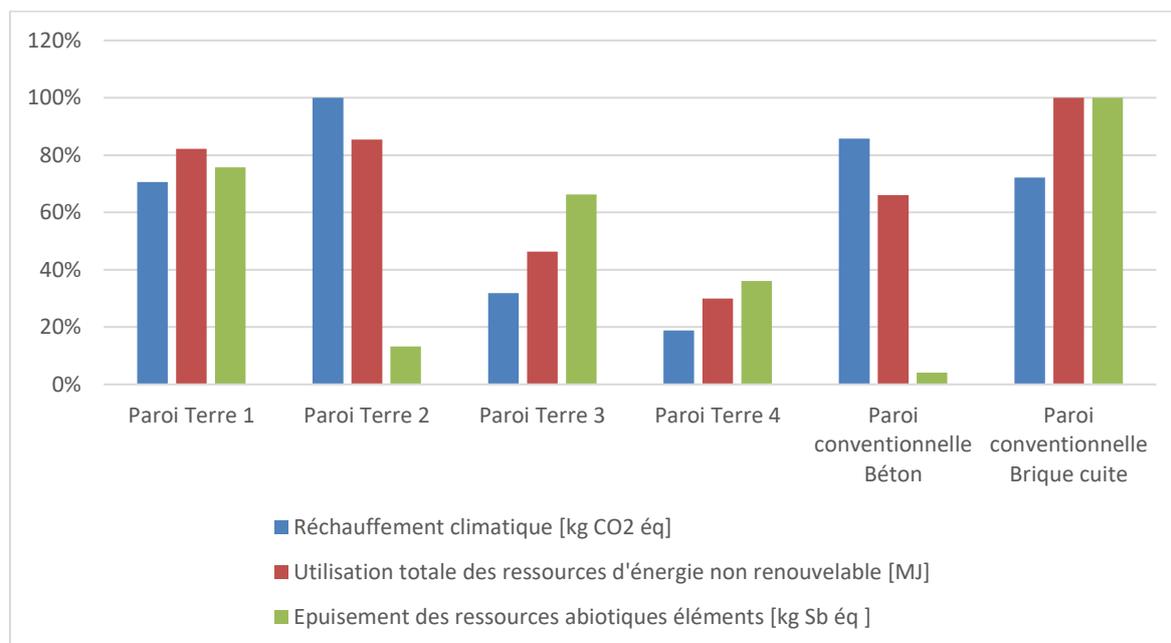


Figure 4: Comparaison des parois porteuses en Terre crue avec des parois porteuses "courantes" en béton ou briques : Analyse brute des données trouvées

Pour une meilleure lecture des résultats d'analyse de cycle de vie, les résultats sont pondérés pour chaque paroi par rapport à la valeur la plus haute pour l'indicateur.

Sur l'indicateur « Réchauffement climatique », on observe que la paroi n°1, paroi en bloc de terre comprimé, présente des impacts comparables à un mur en briques traditionnelles. En revanche à première vue la paroi n°2 présente un impact supérieur aux 2 parois traditionnelles sur l'indicateur réchauffement climatique.

Sur l'indicateur « Utilisation totale des ressources d'énergie non renouvelable [MJ] », qui correspond aux consommations énergétiques sur l'ensemble du cycle de vie, on observe que toutes les parois terre sont moins énergivores que la paroi conventionnelle en briques cuites. En revanche la paroi en béton banché

ressort moins impactante que les parois n°1 et n°2 en terre crue qui sont stabilisés à la chaux (paroi 1) ou au ciment CEM II B pour la paroi 2.

Sur ces 2 indicateurs l'impact des parois n°1 et n°2 s'explique notamment par une masse par m² beaucoup plus importante prise en compte dans l'unité fonctionnelle car les parois en terre crue en question sont plus épaisses que les parois « courantes » en béton et briques (épaisseur 20 cm contre 30 et 40 cm pour les parois n°1 et n°2).

L'indicateur « Épuisement des ressources abiotiques » en kg antimoine équivalent montre des grosses variabilités entre les données trouvées de l'ordre de $\times 10$ voir $\times 100$. Cet indicateur reflète l'utilisation de ressources rares⁴ lors du cycle de vie du produit. Nous avons choisi en premier approche cet indicateur pour mettre en avant une potentielle économie de ressource liée à l'utilisation de terre massivement disponible localement plutôt que l'utilisation de sable ou de gravier. En étudiant plus attentivement la méthode de calcul nous nous rendons compte que les facteurs de caractérisation sont les mêmes pour la terre, le sable, le gravier et plusieurs autres matières minérales et est très faible : $1,4 \cdot 10^{-11}$ kg Sb eq/ kg de matière. Ce n'est donc pas l'utilisation de ces matières qui expliquent les différences observées sur cet indicateur, mais l'utilisation d'autres ressources liées par exemple aux consommations énergétiques (l'uranium utilisé dans les centrales nucléaires en France a par exemple un facteur de caractérisation de $1,4 \cdot 10^{-3}$ il est donc pour cet indicateur 100 millions de fois plus impactant pour cet indicateur). **Ceci n'explique toutefois par les grosses différences observées sur les FDES, il est donc choisi de mettre de côté cet indicateur pour les autres analyses.**

Il conviendrait d'analyser plus finement les données proposées autant sur les performances des parois (mécanique, hygrothermique) que sur les hypothèses prises pour la modélisation afin d'identifier si les parois sont bien comparables.

Précédemment, au sein du livrable « Etat des lieux – Connaissances scientifiques et expression des conditions locales – partie terre crue », nous avons montré que l'utilisation d'un stabilisant type chaux ou ciment augmente considérablement l'impact carbone sans augmenter proportionnellement la résistance mécanique. Pour rappel, si l'on prend un indicateur résistance mécanique/émission de carbone équivalent, de nombreux bétons seraient meilleurs (indicateur élevé) qu'une brique de terre crue stabilisée (indicateur bas).

2) Analyse pour les solutions de murs non porteurs :

Ci-après les impacts sur l'indicateur « Réchauffement climatiques » des 5 solutions de murs non porteur sont présentées.

On peut observer sur ces 6 parois non porteuses que la paroi n°10 et la paroi n°6 sont très impactantes. Ceci s'explique par plusieurs aspects :

- Ce sont des parois stabilisées, on voit donc l'impact du liant utilisé (chaux pour la paroi n°6, non précisé pour la paroi n°10) sur l'étape de production ;
- L'étape de mise en œuvre est très impactante, par rapport aux autres parois : ceci s'explique notamment par un transport sur chantier de 200 km en moyenne pour les BTC étudiées et l'utilisation d'un mortier de ciment ou de chaux pour la mise en œuvre ;

⁴ Les ressources rares sont caractérisées par rapport à l'antimoine (Sb) selon deux critères : disponibilités de la ressource et possibilité/facilité d'extraction de la ressource.

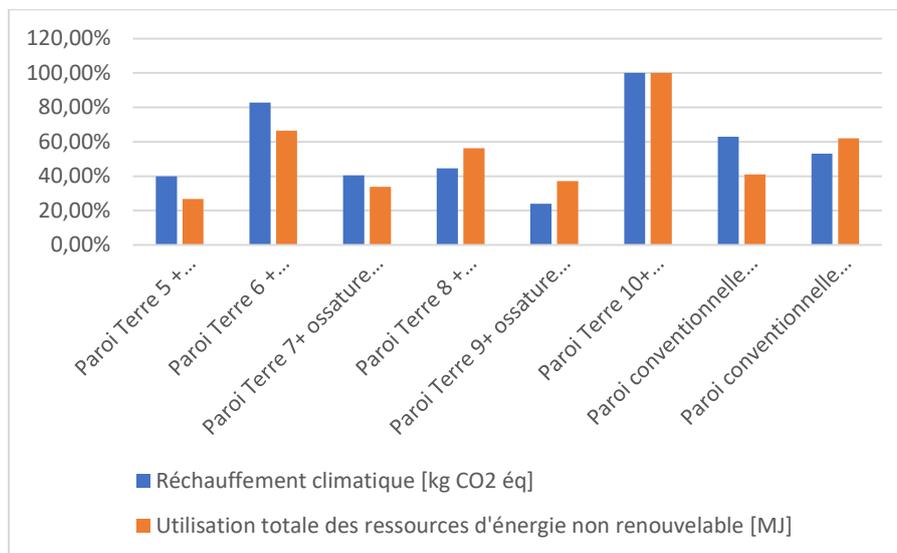
- Une épaisseur de 15 à 30 cm au lieu de 10 cm en comparaison des parois n°7 et n°8 et donc une ACV réalisée avec une masse de matières première /m² plus importante.

N° de paroi	Description	Masse pour l'UF	Indicateur "Réchauffement climatique en kg éq CO2"				
			Total Cycle de vie	Etapas de Production	Etapas de mise en œuvre	Etapas d'utilisation	Etapas de fin de vie
5	Remplissage d'un mur en terre paille de 30 cm d'épaisseur en moyenne	137 kg/m ²	6,52	-26,1	3,77	0	28,8
6	Mur non porteur de 15 cm d'ép en briques de terre crue compressées stabilisées	255 kg/m ²	36,4	10,1	21,9	0	4,3
7	Paroi en bloc de terre comprimée non porteuse d'environ 10 cm	160 kg/m ²	6,9	4,46	1,14	-0,0226	1,33
8	Brique de terre crue extrudée	164,2 kg/m ²	9,76	4,03	2,62	0	3,11
9	Terre-chanvre fabriqué à partir de chénevoite et de terre crue mis en œuvre par banchage ou projection (ramené à 30 cm d'épaisseur)	104,1 kg/m ²	-4,632	-52,8	2,568	0	45,6
10	Brique en terre crue Argitech (ép 22 à 30 cm)	234,5 kg/m ²	4,83E+01	1,43E+01	2,95E+01	0,00E+00	4,50E+00

Les parois n°5 et n°9 bien que beaucoup plus épaisses (30 cm) présentent les meilleurs résultats d'ACV sur cet indicateur. Ceci est principalement dû au fait que ces parois contiennent des matières premières biosourcées, donc qu'un stockage de CO2 est inclus dans l'étude. Ces 2 parois sont également intéressantes car en plus d'apporter de l'inertie au bâtiment, avec l'ajout de fibres végétales elles vont également apporter de l'isolation.

Ces parois non porteuses sont comparées aux 2 solutions de murs courants porteurs choisis précédemment. Pour que la comparaison soit juste en termes d'unité fonctionnelle, nous rajoutons aux résultats, les impacts environnementaux d'une ossature poteaux-poutres en béton. Ainsi les systèmes étudiés ont tous une fonction de mur porteur.

Le choix d'une ossature poteau-poutre en béton est défavorable par rapport à une ossature poteau poutres en bois. Ainsi les résultats sur les parois complètes (Remplissage+ ossature) présentés sur le graphe ci-avant pourraient être améliorés en travaillant sur le choix de structure.



Les parois terre 5,7, 8 et 9 proposées sont moins impactantes que les solutions conventionnelles sur l'indicateur Réchauffement climatique. Les parois 5 et 9 en terre allégée (terre paille ou terre chanvre) se démarquent car elles apportent également, comparativement aux murs conventionnels, une isolation .

Les parois 6 et 10 sont très impactantes sur les 2 indicateurs notamment car la terre est stabilisée (voir analyse détaillée ci-avant).

3) [Analyse pour les enduits :](#)

Ci-dessous les impacts sur l'indicateur « Réchauffement climatiques » des 3 solutions d'enduits sont présentées.

N° de paroi	Description	Masse pour l'UF	Indicateur "Réchauffement climatique en kg éq CO2"				
			Total Cycle de vie	Etapas de Production	Etapas de mise en œuvre	Etapas d'utilisation	Etapas de fin de vie
11	Enduit artisanal intérieur de terre-crue non stabilisé ép 5mm	6,95 kg/m ²	1,68E-01	-3,64E-01	3,42E-02	0,00E+00	4,98E-01
12	Enduit intérieur , prêt à l'emploi, de terre crue non stabilisée ép 5mm	6,98 kg/m ²	1,04E+00	2,18E-01	6,65E-01	0,00E+00	1,60E-01

13	Enduit intérieur prêt à l'emploi de terre crue non stabilisée de 5 à 8 mm	6,75 kg/m ²	2,42E-01	5,32E-02	3,38E-02	3,16E-03	1,52E-01
----	---	------------------------	----------	----------	----------	----------	----------

Les données présentes dans la base INIES présentent des ordres de grandeurs similaires pour les enduits à base de terre crue. Les petites variations observables sont dues notamment à la présence ou non de fibres végétales et aux hypothèses prises sur les scénarios de transports et de mise en œuvre (prêt à l'emploi VS fabrication chantier).

En revanche les données disponibles dans la base INIES montrent que les mortiers d'enduit minéral présentent des impact 3 à 25 fois supérieur à ceux des enduits à base de terre crue.

4) [Analyse pour la donnée de cloison en terre crue](#)

Ci-dessous les impacts sur l'indicateur « Réchauffement climatiques » de la solution de parement est présentée.

N° de paroi	Description	Masse pour l'UF	Indicateur "Réchauffement climatique en kg éq CO2"				
			Total Cycle de vie	Etapas de Production	Etapas de mise en œuvre	Etapas d'utilisation	Etapas de fin de vie
14	Plaque de terre extrudée enduite (ossature non incluse)	26 kg/m ²	1,58E+00	-2,01E+00	4,07E-01	3,16E-03	3,18E+00

Si l'on compare avec une solution de cloison « courante » pour laquelle nous choisissons 1 donnée type dans la base INIES :

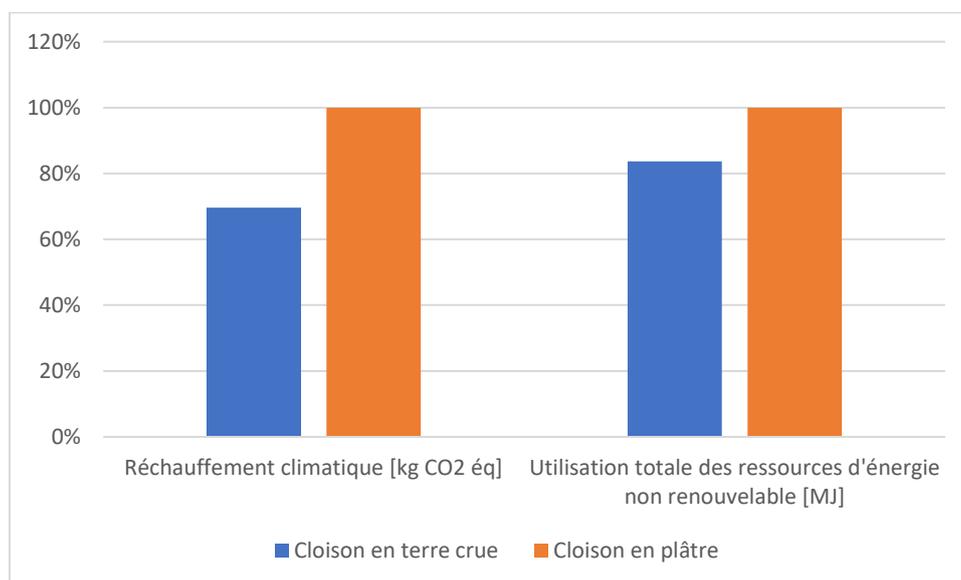
- Une plaque de plâtre Placoplatre BA13 ;

Nous trouvons les résultats suivants :

Description	Masse pour l'UF	Indicateur étudié	Total Cycle de vie	Etapas de Production	Etapas de mise en œuvre	Etapas d'utilisation	Etapas de fin de vie
Plaque de plâtre Placoplatre BA13 (hors ossatures)	9,296 kg/m ²	Réchauffement climatique en kg CO2 éq	2,27	1,78	0,35	0	0,141

		Utilisation totale des ressources d'énergie non renouvelable en MJ	42,41	34,6	5,7	0	2,11
--	--	--	-------	------	-----	---	------

Ainsi sur les 2 indicateurs étudiés, la paroi en terre crue bien que 2,8 fois plus lourde que la plaque de plâtre, se démarque en étant 30% moins impactante que la plaque de plâtre sur l'indicateur « Réchauffement climatique » et 16% moins impactante sur l'indicateur « Utilisation totale des ressources d'énergie non renouvelable [MJ] » (voir graphe ci-dessous).



Enseignements et particularités de l'analyse de cycle de vie pour la terre crue :

L'analyse de ces données fait ressortir les points suivants comme pouvant être des paramètres influents sur les résultats d'ACV

→ Où et comment est extraite la terre?

Les impacts vont varier au niveau de l'ACV selon si :

- la terre est extraite sur site,
- prise en décharge,
- recyclée, etc...

De plus le transport de la terre est un frein car il émet beaucoup de CO2 et a un coût important.

Ici, si l'on prend l'exemple d'une terre extraite à la Poterie des 3 îlets, pour une brique fabriquée sur ce même site, la distance potentielle la plus importante serait pour une livraison à Macouba (72km), soit une distance moyenne de livraison moyenne de 36 km. Contextualisé à la Martinique, l'impact d'une brique fabriqué localement serait extrêmement faible du point de vue du transport. Il pourrait être réduit à 0 avec une fabrication directement sur site avec une terre extraite sur place ou très proche.

→ Procédés de mise en œuvre :

- Les procédés traditionnels sont très bons⁵ d'un point de vue consommation d'énergies grises⁶
- Les procédés traditionnels mécanisés sont bons d'un point de vue consommation en énergies grises
- Les procédés innovants sont quant à eux mauvais en consommation d'énergies grises

→ Mélanges :

- La terre est-elle stabilisée ou non ? Dans ce cas-là, les liants utilisés ont un fort impact sur l'environnement (ciment, chaux)
- La terre est-elle renforcée avec des fibres végétales ? A l'inverse les fibres végétales vont stocker du carbone ce qui va améliorer les résultats sur les étapes initiales (bilan négatif sur l'indicateur réchauffement climatique) ou les détériorer sur les étapes de fin de vie.

On voit dans cette analyse un argument clairement opposé à la démarche « simple » de répondre aux contraintes climatiques des Antilles par une stabilisation de la terre crue. Le propos est donc plutôt de répondre à ces contraintes par la conception architecturale que par la technologie développée (stabilisants, etc...) et mise dans le matériau de construction.

Autres études disponibles :

Au sein du projet National terre⁷, un des axes de travail vise également le calcul des impacts environnementaux. L'objectif ici est de développer des outils de quantification des impacts environnementaux des ouvrages en terre crue, comme supports d'aide à la conception, à la prise de décision et de valorisation. Une thèse est ainsi en cours de réalisation par Paula Higuera dont l'objectif est le développement d'un modèle paramétrique d'évaluation des impacts environnementaux pour les différentes techniques constructives en terre crue (UGE / ETH Zurich). Sur la base de ces travaux il est possible de voir se développer un outil permettant de générer automatiquement des FDES pour différents systèmes constructifs non industrialisés à base de terre crue.

⁵ Ici, bon ou mauvais correspond à une comparaison entre les solutions étudiées, et non avec d'autres solutions conventionnelles.

⁶ L'énergie grise désigne toute l'énergie « cachée » nécessaire pour réaliser un produit ou un ouvrage puis pour l'éliminer, voire le recycler.

⁷ Le Projet national a pour objectif de permettre à nouveau le déploiement, à grande échelle, de la construction en terre crue. Ce développement passe aujourd'hui par la levée des multiples freins identifiés pour ce secteur, qu'ils soient culturels, socio-économiques, techniques, assurantiels ou réglementaires. [Objectifs \(univ-gustave-eiffel.fr\)](http://univ-gustave-eiffel.fr)

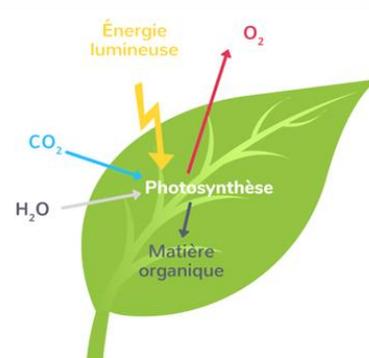
1.2 Solutions à base de bambou

Impacts environnementaux, généralités :

Du point de vue des impacts environnementaux, les principaux éléments que nous retrouvons à propos du bambou dans la littérature sont les suivants :

Aspects positifs :

- Pousse rapide : Le bambou est une plante avec une pousse extrêmement rapide, il peut ainsi être récolté au bout de 4 à 5 ans de culture (contre 40 à 100 ans pour les arbres). C'est donc un matériau avec un fort potentiel de renouvelabilité ;
- Absorption de CO₂: le bambou absorbe de grande quantité de CO₂. En effet la croissance rapide signifie que le bambou a un taux de photosynthèse élevé, qui est le processus par lequel les plantes absorbent le dioxyde de carbone (CO₂) de l'air et produisent de l'oxygène. De plus, le bambou possède une grande surface de feuilles par rapport à sa taille, ce qui lui permet de capter plus de CO₂ par unité de surface que les autres plantes. Comme les autres matériaux biosourcés tel que le bois, sa valorisation en produit de construction permettra de stocker ensuite ce CO₂ (sous forme de carbone biogénique) pendant toute la durée de vie du produit.



Une récente étude⁷ menée en Chine a comparé la teneur en carbone du bambou à celle du sapin de Chine. Les résultats montrent que le bambou a une capacité de séquestration supérieure au sapin sur une durée longue (entre 20 et 60 ans) .

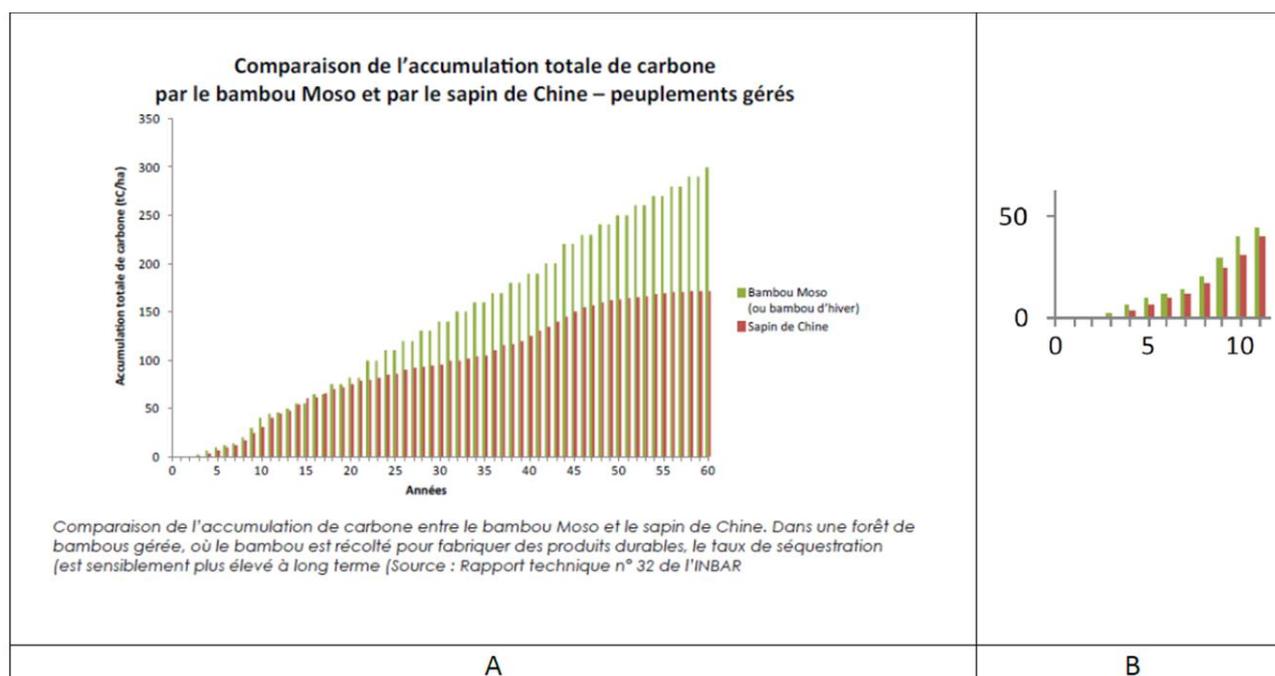


Figure 6. A. Comparaison de l'accumulation de carbone entre le bambou Moso et le sapin de Chine sur une durée de vie de 60 ans. B. Zoom de la figure A [INB14].

Sur des durées plus courtes, 4 à 5 ans, correspondantes à la durée de pousse avant coupe pour le bambou utilisé dans la construction, l'écart d'absorption est faible, on peut donc dire que le bambou a une capacité de stockage du CO₂ similaire à celle d'un sapin.

Pour 1ha de plantation voici quelques grandeurs de séquestration de CO₂ trouvées dans la littérature⁸ :

- Pour le *Guadua Angustifolia*⁹ : sur 7 ans 132,6 tonnes de carbone sont séquestrées (au sein du matériau et dans les sols) soit environ **17 tonnes de CO₂/ha /an**.
- Pour le *Guadua Angustifolia Kunth*¹⁰ sur une durée de 6 ans :
 - 26 tonnes de CO₂ / ha sont captés par le sol
 - 54 tonnes de CO₂/ ha sont captés par le bambou

Soit un total capté sur 6 ans de 80 tonnes de CO₂ / ha, soit **13,3 tonnes de CO₂ /ha/an**.

- Légèreté du matériau : le bambou est un matériau très léger et facile à transporter, ce qui peut réduire l'empreinte carbone associée à son transport

Aspects négatifs :

- Intrants utilisés lors de la transformation du bambou : la transformation du bambou en matériaux de construction peut nécessiter des processus énergivores ou l'utilisation de produits chimiques comme traitements pour améliorer sa durabilité.
- Remise en cause de la biodiversité : Le bambou s'adapte très bien à son environnement il pousse sur tout type de sol, dans les pentes raides, ne permettant pas la culture d'autres plantes. Sa culture doit donc être contrôlée. La monoculture de bambou, ou lorsque le bambou n'est pas contrôlé en zone naturel, entraîne potentiellement l'apparition de zone de biodiversité (faunistique et floristique) particulièrement réduite¹¹.

En Martinique, le sujet est sensible sur ce dernier point pour les raisons suivantes:

- Planté il y a quelques années en Martinique pour limiter l'érosion des berges, le bambou a fini par repousser la forêt ripisylve indigène et a participé à l'érosion des sols.

⁸ Extrait du PFE de Clémence Dumoulin pour l'entreprise Big Bamboo - 2022

⁹ Louise Hamot. (2017, décembre). *Le bambou comme matériau de construction en Europe : une lubie temporaire ou un système viable pertinent en devenir* : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01655791>

¹⁰ Nestor Riaño. (2002, janvier). *Plant growth and biomass distribution on Guadua angustifolia Kunth in relation to ageing in the Valle del Cauca - Colombia*.

¹¹ Cristina Peñasco, Laura Díaz Anadón, "Assessing the effectiveness of energy efficiency measures in the residential sector gas consumption through dynamic treatment effects: Evidence from England and Wales", Energy Economics, 2023

- Le territoire compte maintenant la présence forte de l'espèce envahissante *Bambusa vulgaris*. Ainsi la question se pose de savoir si la valorisation de cette espèce de bambou en matériaux de construction n'entraînerait pas une croissance ou un maintien de sa présence dans les forêt Martiniquaise (voir rapport Etat des lieux – Connaissances scientifiques et expression des conditions locales – Partie Bambou).
- Différents acteurs cherchent à développer l'utilisation d'une autre espèce de bambou (*Guadua Angustifolia*). Pour ce faire il est donc nécessaire de soit cultiver ce bambou sur place, soit l'importer. Dans les deux cas, il existe des risques vis-à-vis de la biodiversité locale (voir rapport Etat des lieux – Connaissances scientifiques et expression des conditions locales –Partie Bambou).

Données et études disponibles :

Données environnementales :

Pour le bambou, nous ne trouvons pas de FDES¹² disponibles dans la base INIES. En effet les solutions constructives à base de bambou sont assez peu développées en France.

Nous trouvons en revanche 4 données disponibles dans la base de données suisse Ecoinvent¹³ :

- Bamboo culm (chaume)
- Bamboo pole (poteau/ poutre)
- Flattened Bamboo (bambou aplati)
- Woven bamboo mat (tapis de bambou tressé)

Par la suite seules les données « bamboo culm » et « bambou pole » sont approfondies car elles correspondent :

- Pour la première : à l'amont agricole : à savoir la culture et la récupération du bambou
- Pour la deuxième : à la première et principale transformation du bambou, du chaume au matériau utilisable dans la construction.

Les deux autres données concernent les secondes transformations du bambou en fonction des applications finales souhaitées.

1) Bamboo culm (Chaume de bambou) :

La description de la donnée permet de lire les éléments suivants qui ont servi de base pour la constitution de la donnée :

Bien que le chaume de bambou ne soit pas lui-même considéré comme un matériau de construction, le chaume est utilisé pour la production de poteaux de bambou qui peuvent être utilisés directement pour la construction de colonnes, de poutres ou d'entretoises et d'autres matériaux de construction à base de bambou. Chaque espèce de bambou produit un nombre différent de chaumes par an. Ce nombre peut être influencé par l'utilisation d'engrais et les événements naturels (Liu et al., 2011). Les chaumes peuvent être extraits manuellement ou à l'aide d'une tronçonneuse, mais n'ont pas d'application directe en tant que matériau de construction en raison de leur forte teneur en eau (u = environ 80 %), et lorsqu'ils ne sont pas traités, leur durée de vie est d'environ trois ans (De Flander et Rovers, 2009 ; Riaño et al., 2002). La production a lieu dans une forêt de bambous ou dans une installation de transformation intermédiaire.

¹² En revanche nous trouvons à l'échelle Européenne une EPD (Environmental Product Declaration) pour un parquet à base de bambou du fabricant MOSO :

¹³ Base de données de référence en Europe pour la réalisation d'analyse de cycle de vie

La donnée¹⁴ représente la production d'1kg de chaume de bambou. Les chiffres proviennent principalement de calculs et de valeurs de la littérature.

Cet ensemble de données a été développé avec le soutien de l'Organisation Internationale pour le Bambou et le Rotin : INBAR.

La donnée "Chaume" de Bambou (bamboo culm en Anglais) est contextualisée pour 4 pays :

- Brésil {BR}
- Chine {CN}
- Colombie {CO}
- Philippines {PH}

La comparaison des 4 données selon la méthode de calcul de l'EN 15804+ A1, permet de se rendre compte du faible impact de la donnée colombienne par rapport aux 3 autres pays (voir graphe et tableau ci-après).

Les principales hypothèses prises pour la modélisation de ces données sont les suivantes :

- Le cycle de vie commence lors de la transformation de la terre en forêt de bambous et la réception des engrais. La fin du cycle pour cette donnée est la récupération du bambou dans la forêt.
- L'absorption de CO₂ de l'air et l'utilisation des terres pour la croissance du bambou sont incluses dans l'étude.
- Dans la plantation, aucun transport mécanique n'est considéré car les plantations sont plutôt petites et la forêt de bambou est très dense et donc difficilement accessible aux véhicules. Les chaumes sont donc taillés puis tirés/transportés manuellement vers un point de collecte, où ils pourront être ramassés mécaniquement.
- La donnée est considérée comme étant modélisée pour une forêt gérée durablement.

Les différences importantes d'impacts entre la donnée pour la Colombie et les autres pays s'explique principalement par les différences d'hypothèses prises sur la culture du bambou. En effet alors que pour la Chine, le Brésil et les Philippines des fertilisants sont considérés dans l'étude (apport en azote, phosphore, potassium). Il n'y en pas dans la donnée pour la Colombie.

¹⁴ La construction de cette donnée se base sur les publications suivantes :

De Flander, K. and R. Rovers, One laminated bamboo-frame house per hectare per year. *Construction and Building Materials*, 2009. 23(1): p. 210-218.

Liu, J., et al., Seasonal soil CO₂ efflux dynamics after land use change from a natural forest to Moso bamboo plantations in subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 2011. 262(6): p. 1131-1137.

Riaño, N.M., et al., Plant growth and biomass distribution on *Guadua angustifolia* Kunth in relation to ageing in the Valle del Cauca – Colombia. *Bamboo Science and Culture*, 2002. 16(1): p. 43-51.

Zea Escamilla, E. and Habert, G., Environmental impacts from the production of bamboo based construction materials representing the global production diversity. *Journal of Cleaner Production*, 2013

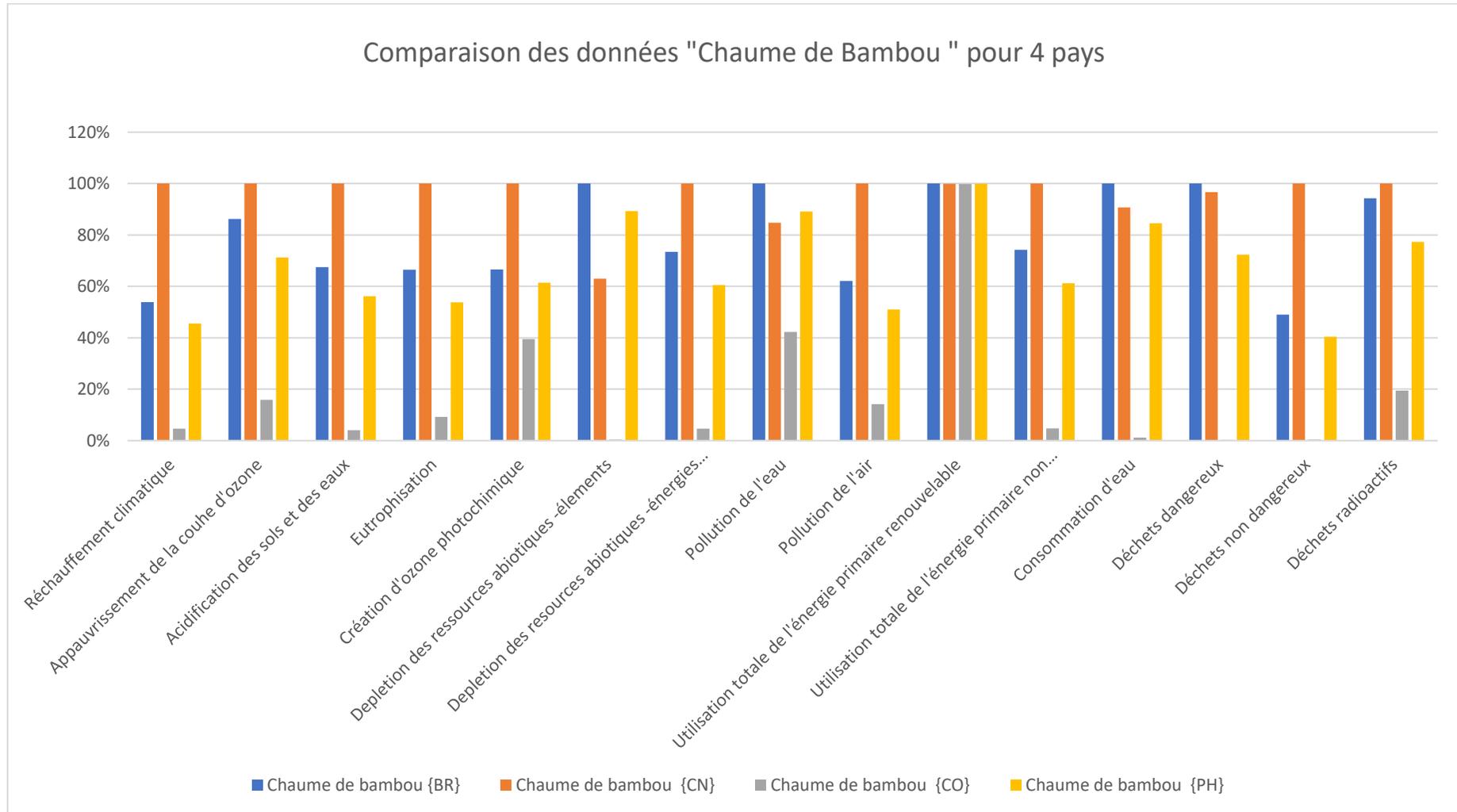


Figure 5 : Comparaison des données Ecoinvent "Bamboo culm" contextualisées pour 4 pays producteurs de Bambou

Indicateurs	Unité	Chaume de bambou {BR}	Chaume de bambou {CN}	Chaume de bambou {CO}	Chaume de bambou {PH}
Réchauffement climatique	kg CO2 eq	54%	100%	5%	46%
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	86%	100%	16%	71%
Acidification des sols et des eaux	kg SO2 eq	68%	100%	4%	56%
Eutrophisation	kg PO4--- eq	66%	100%	9%	54%
Création d'ozone photochimique	kg C2H4 eq	67%	100%	39%	61%
Depletion des ressources abiotiques -éléments	kg Sb eq	100%	63%	0%	89%
Depletion des ressources abiotiques -énergies fossiles	MJ, net CV	73%	100%	5%	61%
Pollution de l'eau	m3	100%	85%	42%	89%
Pollution de l'air	m3	62%	100%	14%	51%
Utilisation totale de l'énergie primaire renouvelable	MJ, net CV	100%	100%	100%	100%
Utilisation totale de l'énergie primaire non renouvelable	MJ, net CV	74%	100%	5%	61%
Consommation d'eau	m3	100%	91%	1%	85%
Déchets dangereux	kg	100%	97%	0%	72%
Déchets non dangereux	kg	49%	100%	0%	40%
Déchets radioactifs	kg	94%	100%	19%	77%

Figure 6 : Comparaison des données pour les 4 pays pour 1 kg de chaume de bambou¹⁵

Ci-après sont montrés les principaux contributeurs pour l'indicateur réchauffement climatique pour les données "Chaume" de Bambou pour la Colombie et pour la Chine : « Bamboo culm {CO} » et « Bamboo culm {CN} ».

¹⁵ Dans le tableau (figure 5) les unités sont indiquées à titre indicatif puisque les résultats sont pondérés et donc exprimés en % pour une comparaison facilitée.

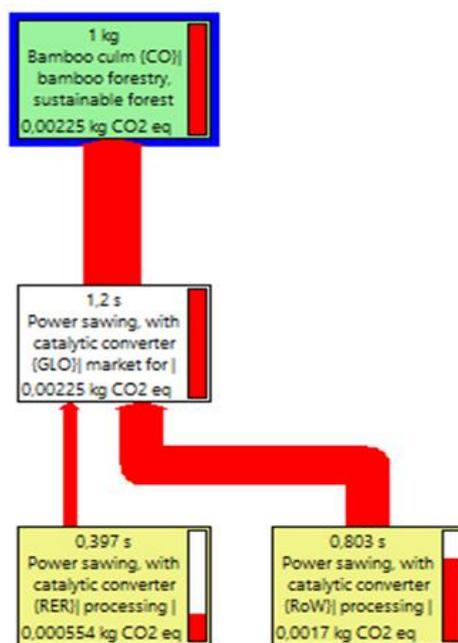


Figure 7 : Contributeurs principaux de la donnée " Bamboo Culm {CO}" pour l'indicateur "Réchauffement climatique"

On voit sur cette figure 7 l'impact de la donnée « Bamboo Culm » sur l'indicateur « réchauffement climatique » pour la Colombie présenté en Réseau. Ainsi le principal contributeur apparaît être le sciage du bambou (« power sawing »).

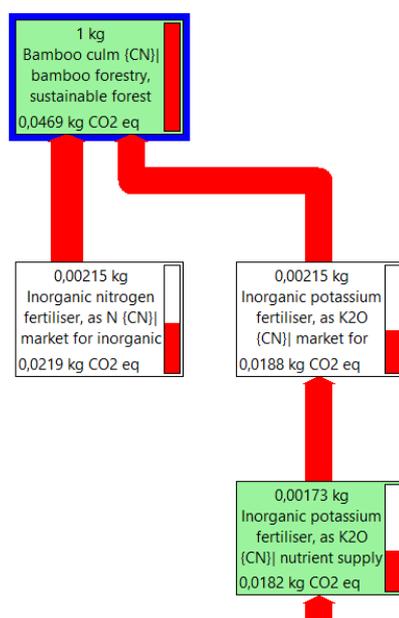


Figure 8: Contributeurs principaux de la donnée "Bamboo culm {CN} pour l'indicateur "réchauffement climatique "

Sur cette figure 8 c'est la donnée pour la Chine qui est analysée. Il en ressort que le principal contributeur est le fertilisant utilisé pour l'apport en potassium.

2) Bamboo pole¹⁶ :

La description de la donnée permet de lire les éléments suivants qui ont servi de base pour la constitution de la donnée :

La donnée représente la production de 1 kg de poteau en bambou. Le chaume de bambou (ayant une teneur en eau de 80 %) est utilisé pour la production de poteaux en bambou. La production a lieu dans une usine de transformation et comprend :

- le séchage naturel jusqu'à une teneur finale en eau de 20 % ;
- la taille des chaumes ;

Les chiffres proviennent principalement de calculs et de valeurs de la littérature.

Le poteau est issu directement du chaume de bambou et est généralement taillé entre 4 et 6 m et traité contre les champignons et les ravageurs à l'aide d'acide borique. Les poteaux en bambou peuvent être utilisés directement pour la construction de colonnes, de poutres ou d'entretoises et sont également les principaux intrants pour d'autres matériaux de construction à base de bambou (BBCM) (Vogtländer et al., 2010, Vogtländer et al., 2014).

Cet ensemble de données a été développé avec le soutien de l'Organisation Internationale pour le Bambou et le Rotin [INBAR].

La donnée « Bamboo pole » est contextualisée pour les 4 mêmes pays que la donnée « Bamboo culm » (voir graphique de comparaison pour les indicateurs de la EN15804 sur la figure 9 ci-dessous).

On observe que contrairement à la donnée « bambou culm », la donnée Bamboo pole contextualisée pour la Colombie se démarque moins nettement des 3 autres données sur plusieurs indicateurs même si elle reste globalement moins impactante sur l'indicateur « Réchauffement climatique ».

Les différences s'expliquent notamment par les différences entre les mix énergétique de chaque pays. En effet en Chine et dans une moindre mesure au Brésil et aux Philippines, l'électricité est produite à majorité à partir de charbon, c'est donc une énergie fortement carbonée. En Colombie la part de charbon dans le mix énergétique est plus faible et les impacts sont donc moindres.

¹⁶ La construction de cette donnée se base sur les publications suivantes :

Vogtländer, J., P. van der Lugt, and H. Brezet, The sustainability of bamboo products for local and Western European applications. LCAs and land-use. *Journal of Cleaner Production*, 2010. 18(13): p. 1260-1269.

Vogtländer, J.G., N.M. van der Velden, and P. van der Lugt, Carbon sequestration in LCA, a proposal for a new approach based on the global carbon cycle, cases on wood and on bamboo. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 2014. 19(1): p. 13-23.

Indicateurs	Unité	Poteau en bambou {BR}	Poteau en bambou {CN}	Poteau en bambou {CO}	Poteau en bambou {PH}
Réchauffement climatique	kg CO2 eq	40%	100%	33%	74%
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	100%	84%	84%	97%
Acidification des sols et des eaux	kg SO2 eq	56%	96%	48%	100%
Eutrophisation	kg PO4--- eq	61%	100%	40%	94%
Création d'ozone photochimique	kg C2H4 eq	87%	80%	80%	100%
Depletion des ressources abiotiques -éléments	kg Sb eq	100%	98%	94%	99%
Depletion des ressources abiotiques -énergies fossiles	MJ, net CV	42%	100%	35%	83%
Pollution de l'eau	m3	99%	95%	80%	100%
Pollution de l'air	m3	81%	99%	74%	100%
Utilisation totale de l'énergie primaire renouvelable	MJ, net CV	100%	96%	100%	96%
Utilisation totale de l'énergie primaire non renouvelable	MJ, net CV	44%	100%	35%	82%
Consommation d'eau	m3	74%	100%	78%	76%
Déchets dangereux	kg	78%	100%	29%	97%
Déchets non dangereux	kg	50%	100%	46%	65%
Déchets radioactifs	kg	100%	77%	44%	67%

Figure 9: Comparaison des données pour les 4 pays pour 1 kg de poteau en bambou¹⁷

¹⁷ Dans le tableau (figure 10) les unités sont indiquées à titre indicatif puisque les résultats sont pondérés et donc exprimés en % pour une comparaison facilitée.

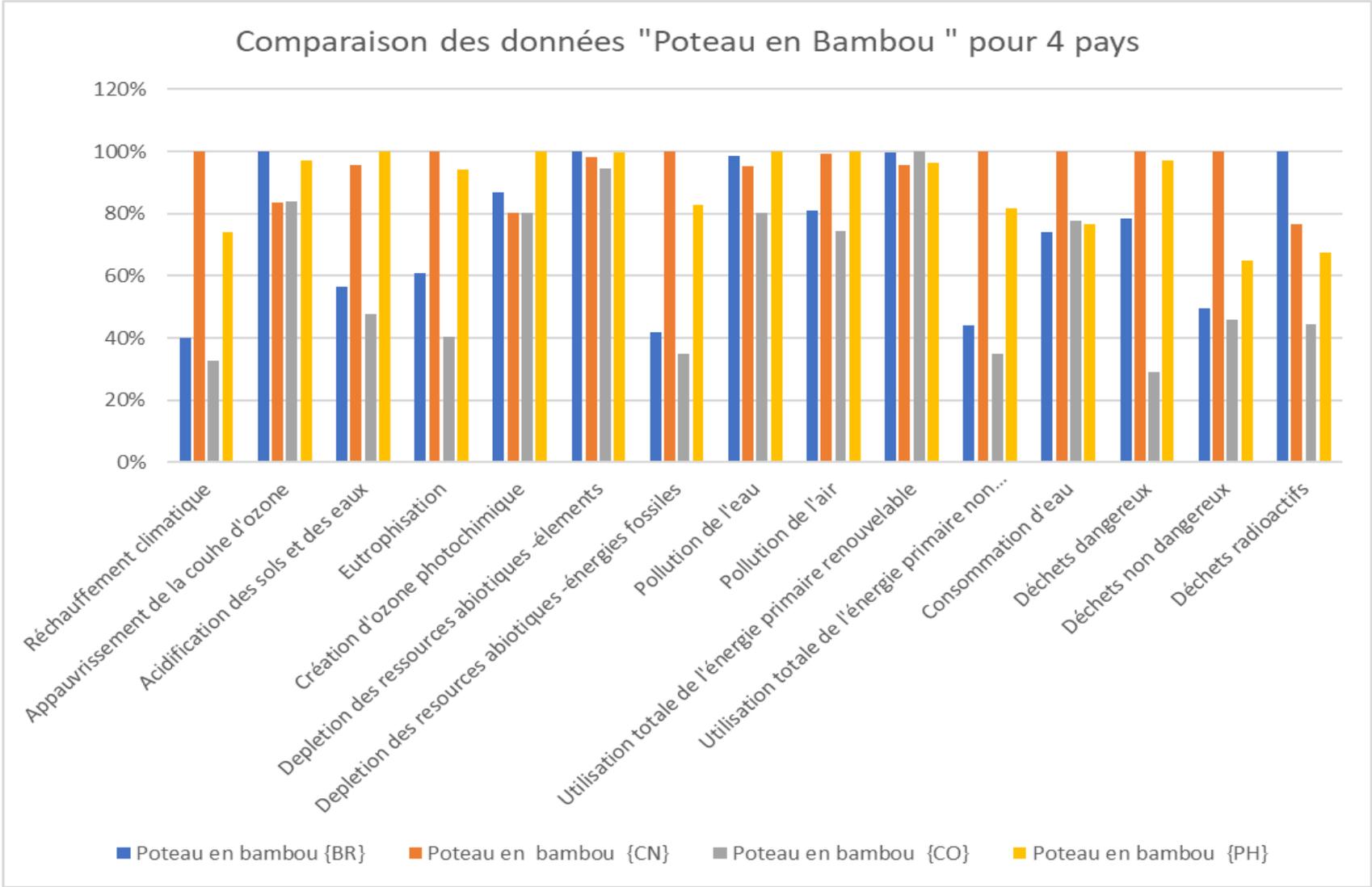


Figure 10 : Comparaison des données Ecoinvent "Bamboo pole" contextualisées pour 4 pays producteurs de Bambou

Autres études ACV disponibles :

Etude comparative d'une poutre en bambou et d'une poutre en bois¹⁸

En France, l'entreprise Big Bambou a réalisé en 2021-2022 une étude ACV comparative entre une poutre en bambou importé de Colombie et une poutre en bois de résineux importés de Suède. Cette étude a été menée par Clémence Dumoulin, étudiante à Polytech Montpellier, dans le cadre de son PFE.

L'étude est intéressante car en parallèle de l'analyse de cycle de vie comparant l'utilisation d'une poutre en bambou (Guadua de Colombie) et d'une poutre en pin Sylvestre (provenant de Suède), possédant les mêmes dimensions et sections transversales, C. Dumoulin a également réalisé des essais mécaniques afin de comparer les propriétés mécaniques du bambou par rapport à celui de la poutre en bois et plus largement à d'autres matériaux de construction.

L'analyse de cycle de vie a été réalisée sur Simapro (logiciel leader en France pour la réalisation de calcul ACV) à partir des bases de données disponibles dans l'outil. Des données ont été créées à partir de valeurs trouvées dans la littérature pour la modélisation du pin sylvestre et du bambou.

Les 2 espèces ont été comparées à partir de l'unité fonctionnelle suivante « Assurer la fonction de 2,5m de poutre de section 10 cm² permettant de supporter une flexion standard de 79MPa ».

Il apparaît que le bambou est significativement moins impactant que le pin (sur 5 catégories d'impact). Du point de vue des émissions de dioxyde de carbone, le bambou émet 2 kg eq CO₂ contre 3.2 kg eq CO₂ pour le pin avec une incertitude de 10%, pour une masse de 5.3kg pour le bambou et 13.5 kg pour le pin.

Comparaison d'impacts liés à la production et au transport de poutres en pin et en bambou

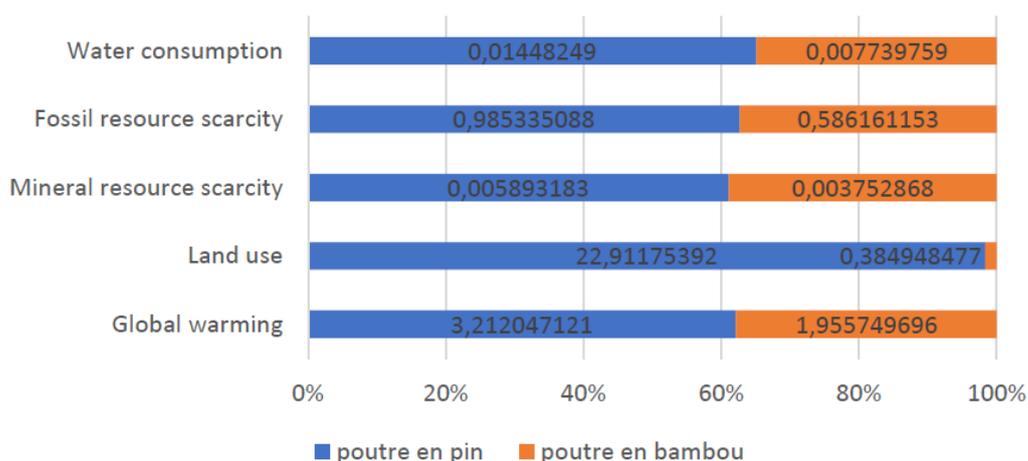


Figure 11: Résultats de l'analyse de cycle de vie comparée entre le bambou colombien et le pin suédois

¹⁸ Le bambou, matériau de construction durable ? – Projet de fin d'étude mené en collaboration avec l'entreprise Big Bambou – Clémence Dumoulin – Polytech Montpellier – 2021/22

Les différences d'impacts s'expliquent par le fait que le bambou est coupé au bout de 5 ans contre 60 ans pour le pin ce qui se traduit par une occupation des sols de 5 versus 60 ans (indicateur Land use). De plus, le pin est séché au four, préparé, coupé en planche, poncé contrairement au bambou qui conserve sa forme brute.

Les recherches bibliographiques et les essais mécaniques réalisés ont permis de montrer que le bambou et le pin étudié dans le cadre de l'étude avaient des sections considérées pour des propriétés mécaniques comparables.

Etude ACV à l'échelle bâtiment

En Colombie plusieurs publications rédigées par Zea Escamilla en 2014, 2015 et 2016 permettent d'appréhender les impacts environnementaux non plus à l'échelle « Produit » mais à l'échelle « Bâtiment » pour des constructions en Bambou.

Dans un article rédigé¹⁹ pour le 10^{ème} congrès mondial pour le bambou en 2015 en Corée, Zea Escamilla propose une analyse comparative de 5 différents systèmes constructifs (bambou, briques, parpaing en béton, panneaux en fer-ciment, brique de terre crue stabilisées) pour la construction d'un bâtiment type (abri simple de 18 m² en ne considérant que les éléments structuraux) en prenant en compte les distances de transport spécifiques à chaque pays entre les centres de production des matériaux et les villes cibles où se situent les chantiers.

Les résultats ont montré que dans le scénario où les contraintes externes sont fortes (dimensionnement en fonction des risques séisme et vent), la maison en bambou présente la meilleure performance environnementale, indépendamment de la distance de transport nécessaire pour l'acheminement du bambou jusqu'au chantier.

La méthodologie proposée dans l'article²⁰ peut permettre l'évaluation des conceptions de bâtiments dès les premières étapes du projet, où l'incertitude est encore grande sur les systèmes constructifs, en identifiant le potentiel d'amélioration à chaque étape de conception.

Enseignements et particularités de l'analyse de cycle de vie pour le bambou :

L'analyse de ces données fait ressortir les points suivants comme pouvant être des paramètres influents sur les résultats d'ACV pour un produit à base de bambou :

- Le stockage/ destockage du CO2 par le bambou:

Non pris en compte dans les données analysées ci-avant, le stockage CO2 par le bambou en fait pourtant un véritable puit carbone à condition de limiter les émissions de gaz à effet de serre liées aux différentes transformations nécessaires pour une utilisation dans le bâtiment. Le bambou va stocker plus ou moins de carbone en fonction de l'espèce et du temps de pousse. **Attention, cet avantage souvent mis en avant n'est pertinent que si le bambou est utilisé en tant que matériau pour une longue durée et si la fin de vie est réfléchi dès la conception du produit fini pour un recyclage ou réemploi potentiel.** En effet avec des scénarios classiques pour la fin de vie, incinération ou de mise en décharge, la décomposition du bambou va entraîner le déstockage du carbone biogénique²⁰ sous forme de CO2 et de méthane CH4 et impacter négativement l'indicateur

¹⁹ Regionalizing the Environmental Impact of Bamboo---Based Buildings by Integrating Life Cycle Assessment with Geographic Information Systems. A Comparative Case-Study in Colombia.

E.Zea Escamilla, G. Habert1Institute of Construction and Infrastructure Management, Chair of Sustainable Construction, Federal Institute of Technology (ETHZ), 8093 Zürich, witzerland

²⁰Carbone constitutif des végétaux provenant du processus de la photosynthèse à partir du CO2 présent dans l'air.

« réchauffement climatique » en fin de vie. Pour mémoire, la Réglementation Environnementale 2020 (RE 2020), actuellement appliquée dans l'hexagone, prend en compte le stockage de carbone dans un calcul d'ACV dynamique simplifié. Les systèmes constructifs biosourcés stockant du carbone sont donc « favorisés ».

- Le pays de culture et de transformation du bambou:

On l'a vu avec l'analyse des données de la base Ecoinvent, la provenance du bambou, et donc son pays de culture, influence les résultats d'ACV. Cela s'explique par plusieurs raisons : gestion différentes des forêts entre pays, apport d'engrais plus ou moins important selon les sols, temps de pousse, possibilité d'accès en transport ou non dans la forêt de bambou, sciage mécanique ou manuel des chaumes, etc.. sont autant de paramètres qui vont faire varier les impacts pour la récupération du bambou et entraîner des disparités entre pays.

Par ailleurs la transformation du chaume en poteau, process nécessitant des traitements et une transformation avec un procédé électrique, va également présenter des impacts très différents en fonction du pays de transformation. Cela est principalement dû aux différences des mix énergétiques existants dans chaque pays (utilisation du charbon VS utilisation de l'énergie nucléaire par exemple : dans le premier cas l'énergie va être fortement carbonée et avoir des impacts importants sur l'indicateur « réchauffement climatique » et sur « l'épuisement des ressources fossiles » dans l'autre cas l'énergie est peu carbonée mais va avoir un impact important sur « l'épuisement des ressources abiotiques » : extraction de l'uranium et sur les émissions de « déchets radioactifs »).

En revanche certains paramètres semblent avoir peu d'influence ou sont plus difficiles à analyser avec les données disponibles:

- Les transports et distances de transport :

Dans les données trouvées, une partie du bambou est souvent importée. Plusieurs études semblent montrer que même quand il est transporté sur de longues distances, le bambou reste une alternative très performante d'un point de vue environnemental par rapport à des systèmes constructifs traditionnels (y compris le bois massif).

- Les types de traitement sur le produit fini :

Toutes les données disponibles et analysées intègrent un traitement à l'acide borique pour le séchage et la préservation du bambou (traitement qui semble être le plus répandu dans le monde). Il ne nous a donc pas été possible d'identifier les différences d'impacts liés au traitement.

Impacts sociaux-économiques

1.3 Solutions à base de terre crue

L'utilisation de la terre crue dans la construction peut avoir un impact socio-économique local positif en raison de sa disponibilité, de son accessibilité et de son faible coût par rapport à d'autres matériaux de construction (coût matière première).

Dans la littérature sur le sujet, on retrouve régulièrement le terme d'« intensité sociale » quand on parle de l'impact social et écologique d'un projet de construction en terre crue.

On calcule l'intensité sociale, ou *Labor Intensity* de la manière suivante²¹ :

LI = Temps de main d'œuvre / Energie grise

L'intensité sociale est donc directement liée à la méthode constructive. Pour un chantier donné, plus on part d'un matériau local peu transformé, plus on aura besoin de main d'œuvre qualifiée (avec un savoir-faire lié directement à la matière locale) et moins la technique sera impactante pour l'environnement.

L'évaluer revient à donner un premier indicateur chiffré permettant de discuter des éléments bénéfiques suivants :

- **La création d'emplois locaux** : La construction en terre crue peut avoir un impact positif sur l'emploi local en offrant de nouvelles opportunités de travail. Ainsi une intensité sociale élevée rendra compte de nouveaux emplois développés. Par ailleurs on parle également d'intensité sociale élevée pour la construction de murs en terre crue car comparativement à un mur traditionnel construits en béton ou briques plus d'ouvriers peuvent être nécessaire à la construction d'un mur en terre crue (en fonction des techniques constructives).
- **La valorisation de l'humain** : Le développement d'une technique a forte intensité sociale permet de changer la répartition des revenus sur un chantier. Le coût de ce dernier sera beaucoup plus lié au besoin de main d'œuvre qu'à toute une filière industrielle (machine de production, énergie, transport, ingénierie, actionnariat, administration). Aussi, les artisans travaillant sur de tels chantiers perçoivent mieux leur travail, du fait que leur savoir-faire est nécessaire et mis en valeur.
- **L'utilisation de matériaux locaux** : la terre crue est souvent disponible localement, ce qui signifie qu'elle peut être extraite et utilisée sans nécessité de l'importer. Cela peut réduire les coûts de transport et stimuler l'économie locale par la création d'une filière complète depuis l'extraction de la matière première jusqu'à sa mise en œuvre dans le bâtiment en passant éventuellement par la fabrication d'un produit intermédiaire.
- **La résilience des territoires** : La diminution des besoins en matériaux importés, mais aussi en énergie, couplé à un développement d'une filière locale permet de travailler sur la résistance du secteur du bâtiment local aux différentes crises (énergie, climat, économie...).

Cependant, il est important de noter que l'utilisation de la terre crue dans la construction peut également présenter des défis socio-économiques. Par exemple, les compétences nécessaires pour construire avec

²¹ : Comment mesurer le caractère durable d'une construction ? L.Floissac, A.Marcom, J-C Morel (2009)

de la terre crue peuvent être limitées dans certaines régions, ce qui peut entraîner un manque de travailleurs qualifiés pour les chantiers. Il peut également se poser la question de l'impact culturel de développement de techniques constructives à base de terre crue : les traditions locales sont-elles respectées et valorisées dans le processus de construction ?

1.4 Solutions à base de bambou

Diverses variables peuvent être étudiées pour comprendre l'impact social du développement d'une filière. Nous proposons ici de lier un paramètre que l'on retrouve souvent dans diverses études – les retombées économiques – avec différentes stratégies de développement analysées par la bibliographie.

Plantation/Exploitation de bambous par les agriculteurs – le cas de Bambooneem à la Réunion.

L'entreprise Bambooneem, à la Réunion, a rédigé puis présenté un document auprès du CAUE intitulé Plan de Filière Bambou 2020-2030 [1]. Dans ce document figure différentes propositions de stratégies permettant de construire la filière bambou sur ce territoire. La principale stratégie proposée est la suivante : Permettre aux agriculteurs de diversifier (ou « métisser ») leur production en intégrant du bambou à exploiter sur leurs parcelles (voir Figure 10).

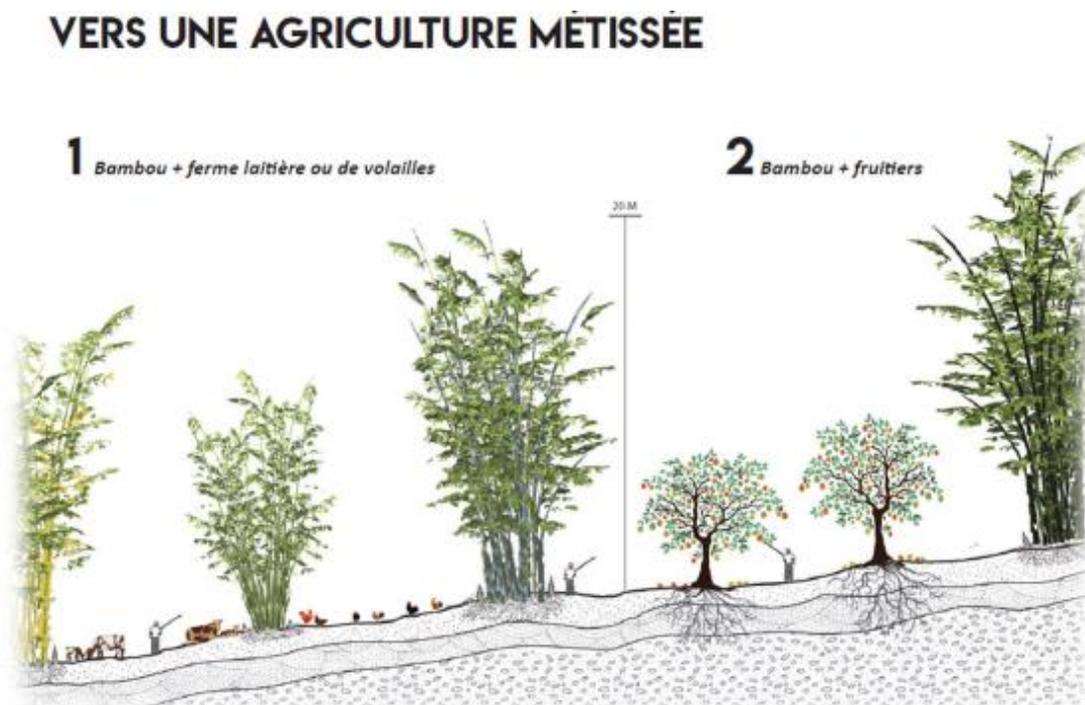


Figure 12: Proposition de diversification agricole. Extrait du plan filière bambou de Bambooneem.

Cette proposition permettrait aussi de ne pas réaliser de monoculture de bambou, et ainsi favoriser des espaces dans lesquels la biodiversité est enrichie, et non l'inverse. Malgré les nombreuses hypothèses à considérer pour faire une estimation des retombées économiques pour l'agriculteur, les auteurs du document proposent de comparer les rendements au m² entre la canne à sucre et le bambou (dont la Martinique comme la Réunion est dépendante) et le bambou (*Dendrocalamus Asper*) :

« Le rendement en chiffre d'affaires d'un m² de terrain planté en canne à sucre serait de l'ordre de 12 à 13 euros du m² avec des dépenses d'intrants de toutes sortes, et donc un bénéfice net extrêmement faible, sans parler des maigres atouts de la canne à sucre pour les rendements sociétaux, écologiques et de résilience, en comparaison de l'agroforesterie et de la sylviculture du bambou.

Le rendement en chiffre d'affaires d'un m² de terrain planté de Bambou Asper est évalué, aujourd'hui à La Réunion, entre 22 à 24€ du m², avec des intrants minima, voir sans aucun intrant, d'où une marge nette très élevée. Et avec une sylviculture raisonnée, vous reproduisez ce chiffre d'affaires pour les décennies qui viennent. Cette dimension de rendement du bambou, écologique, sociétale et financière n'est pas connue des agriculteurs ni des Réunionnais qui ont une image plutôt négative de cette ressource. »

Extraction de bambou « sauvage » - le cas du *bambusa vulgaris* en Côte d'Ivoire

Une étude menée par différents universitaires de la Côte d'Ivoire recense les différents types d'acteurs de la filière bambou sur un secteur donné, et étudie les liens entre eux [2]. La méthode employée est principalement le questionnaire, construit de sorte à permettre une analyse à la fois quantitative (statistique) et qualitative (profils types). La Figure 13 présente de façon schématique ces acteurs et leurs relations.

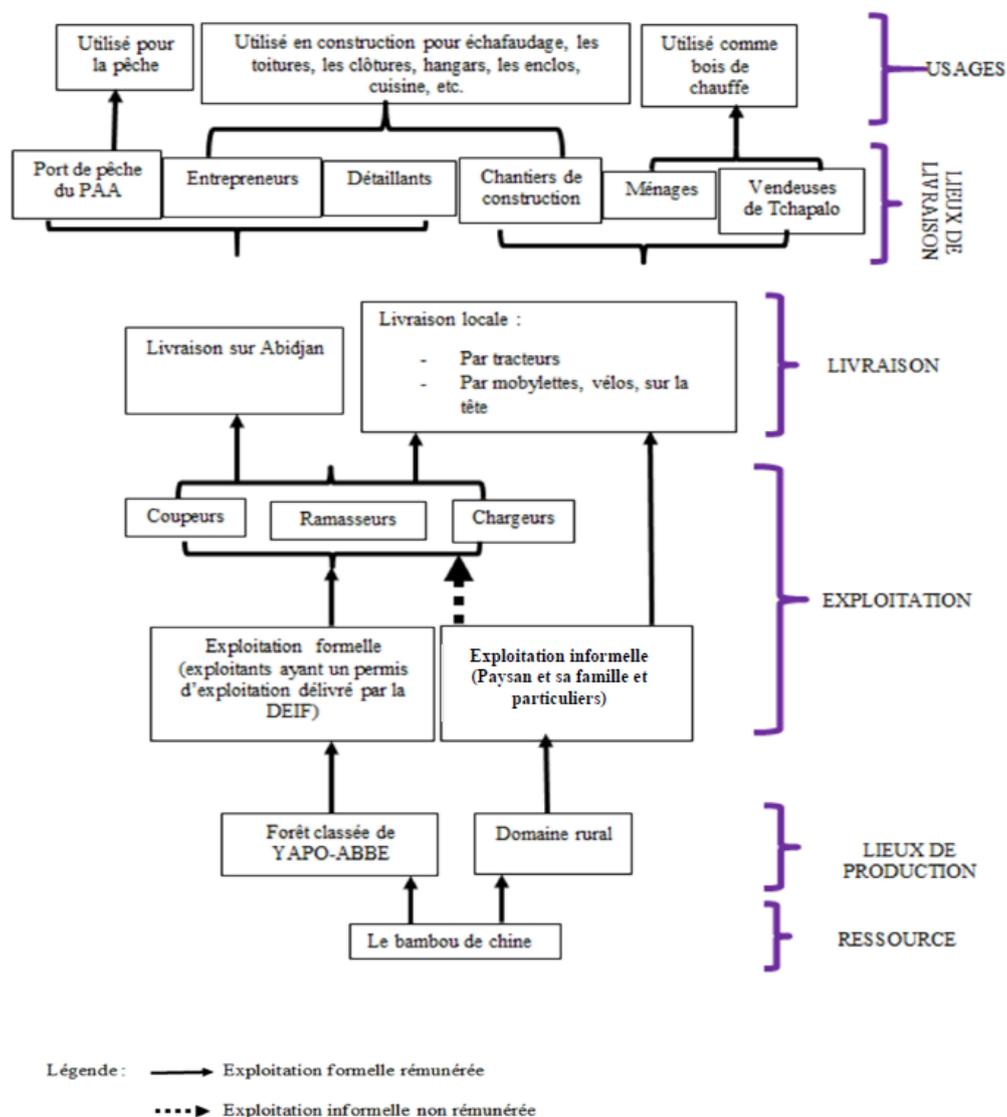


Figure 13 : Organigramme général de la filière d'exploitation du *Bambusa Vulgaris* à Azigué (les accolades indiquent les grandes phases de l'exploitation du bambou).

Premièrement, on constate ici la coexistence de plusieurs « types d'exploitations » : Une voie formelle exploitant le bambou présent dans les forêts classées, et une voie plus informelle exploitant le bambou

présent dans les domaines ruraux. Si l'on établit un premier parallèle avec les Antilles, on peut déjà proposer la réflexion suivante :

- L'exploitation par les particuliers existe déjà sur les territoires Martiniquais, Guadeloupéens ou Guyanais. Comme dans l'étude citée ici, cette exploitation n'est pas ou très peu encadrée et gagnerai à l'être afin de mettre en place des « bonnes pratiques » d'exploitation, des prix convenables pour l'ensemble des acteurs, une qualité indiquée en fonction du domaine de valorisation, ainsi qu'un contrôle de l'espèce envahissante sur les zones d'agriculture.
- L'exploitation formelle permet d'encadrer et de contrôler l'espèce envahissante dans des zones de biodiversité sensibles (forêts classées). Cette exploitation peut notamment permettre de « sortir » des volumes importants. De plus, le gouvernement, à travers le Ministère des Eaux et Forêts et plus spécifiquement à la Direction de l'Exploitation et des Industries Forestières (DEIF), délivre des permis d'exploitation avec lequel l'exploitation doit remplir un carnet de circulation indiquant le nombre de « chargements » de bambou effectués.

Dans l'ensemble, l'étude indique que la filière manque d'organisation, et notamment de la mise en place d'unité(s) de traitement(s) du bambou pour améliorer sa durabilité : *« En Côte d'Ivoire, la filière souffre d'un manque d'organisation. Dans le cas d'Azaguié, par exemple, il n'existe pas de structure ou de corporation s'occupant spécifiquement du traitement post-récolte des tiges. Aussi, les prix des tiges varient en fonction de la disponibilité de la ressource, de la saison et même du client (détaillant) à Abidjan. Le prix moyen qui est de 0,45 € peut être revu à la hausse s'il existe une affinité ou une collaboration de longue durée entre le grossiste et le détaillant. Dans le cas contraire, plus il y a d'intermédiaires, le prix peut chuter jusqu'à 0,30 € parfois. Les différents acteurs ne sont ni regroupés en coopérative ni en association. S'ils avaient une coopérative ou une association disent-ils, cela leur aurait permis de donner un prix unique d'achat et de vente du chaume, et ce serait à eux d'imposer leur prix aux détaillants à Abidjan. »*

Néanmoins, comme pour la stratégie de plantation de bambou exploitée par un agriculteur, cette pratique d'extraction permet de créer un complément de revenu aux différents producteurs. L'étude indique d'ailleurs que le « ramassage » est à la portée de tous, et permet ainsi de créer des compléments de revenus pour tout type de profil (femme au foyer, étudiant ou élève pendant les vacances scolaires...). Mais cette pratique non encadrée ne donne pas accès à tous les débouchés, notamment les grossistes, qui refusent l'achat « à la tige ».

Enfin, l'étude conclut sur les chiffres suivants (qui sont à relativiser avec le contexte socio-économique de la Côte d'Ivoire) : *« L'exploitation et l'utilisation du bambou de chine permettent à la population rurale de faire des économies en moyenne de 45,8 €. L'Etat de Côte d'Ivoire, à travers des taxes et des permis d'exploitation, gagne en moyenne 96,1 € par chargement. L'usage du bambou de chine dans la construction permet en moyenne de réaliser 381,6 € par année chez les particuliers. L'exploitation du bambou de chine occupe une place très importante au sein des activités socio-économiques de la sous-préfecture d'Azaguié en contribuant à l'économie locale. Elle ouvre de nouvelles perspectives laissant entrevoir la possibilité d'emplois à temps partiel ou à temps plein, aussi bien pour les hommes que pour les femmes dans les communautés rurales. Cependant, l'exploitation de cette ressource n'est pas suffisamment contrôlée à l'échelle locale (Azaguié) et sur le territoire national. Il est donc opportun que le bambou de chine (*Bambusa Vulgaris*) serve de modèle biologique de PFNL, basé sur le développement d'un programme de gestion durable, impliquant tous les acteurs. »*

Impacts globaux, points de vue en retrait :

Anne-Sophie Gouyen, actuelle rédactrice en cheffe du magazine Séquence Bois, a rédigé son mémoire de master sur la thématique suivante : Bambou, les enjeux pour un véritable impact [3].

On retrouve dans ce mémoire des propos pertinents, notamment sur l'analyse des impacts socio-économique :

- Concernant les objectifs socio-économiques du développement d'une telle filière, « Il s'agirait de développer des pratiques commerciales éthiques pour mieux répartir les bénéfices et les richesses, d'intégrer le coût social et environnemental dans le prix des produits, de chercher à développer le tissu économique local. »
- Concernant la création potentielle d'emploi stable : « Le bambou est un matériau qui fournit plusieurs opportunités de créations d'emplois parce que beaucoup de produits peuvent être fabriqués avec un faible capital d'investissement. La condition est une structure sociale, particulièrement dans les villages, qui encourage les coopératives, l'éducation et la formation au travail autour des produits en bambou ». L'auteure présente différents exemples de création d'emploi au sein de communautés, et ce à travers le monde (Indonésie, Colombie avec Simon Velez, ...)

Pour finir, Anne-Sophie Gouyen évoque le concept de Simon Velez « Grow your Own House » (Fait pousser ta propre maison). Elle conclue son mémoire par un exemple de grande ampleur illustrant bien ce concept : En 1986 au Costa Rica, le projet FunBambu envisageait la construction de 1000 habitations construites à partir de bambous cultivés sur place, sur l'équivalent de 60 hectares de terres. En comparaison, il faudrait plus de 500 hectares de bois pour construire de la même façon. Malheureusement, ce projet n'a pas vraiment abouti (accumulation de déficits, importations de bambous, construction en bois...). Il a cependant permis la plantation de l'espèce Guadua et l'utilisation de cette espèce aujourd'hui au Costa Rica. Cette anecdote permet de visualiser différentes choses :

- **Des initiatives d'ampleurs** doivent être prises, même si leur but ne sera potentiellement pas entièrement atteint, afin de permettre le développement de la filière.
- **Des conceptions pensées de façon globale** (intégrant les problématiques sociales, économiques et environnementales) permettent de créer des dynamiques fortes, notamment au démarrage d'une filière.

Contacts

Karibati

Théo Vincelas – Chargé de mission – t.vincelas@karibati.com

Marion Chirat – Associée fondatrice – m.chirat@karibati.com

Crédits photos couverture : Shane McLendon, Kazuend et Bernard Hermant via Unsplash ; Karibati

Bibliographie

- AFNOR, *Norme NF EN ISO 14040, Analyse du cycle de vie / Principes et cadre*, Octobre 2006 ;
- AFNOR, *Norme NF EN ISO 14044, Analyse du cycle de vie / Exigences et lignes directrices*, Octobre 2006 ;
- AFNOR, *Norme NF EN 15804 +A2, Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction*, Novembre 2019 ;
- AFNOR, *Norme NF EN 15804/CN, Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction - Complément national à la NF EN 15804+A2*, Octobre 2022 ;



KEBÂTI

Annexe:

Références construites



Développement des filières terre et bambou sur les territoires de Martinique, de Guadeloupe et de Guyane

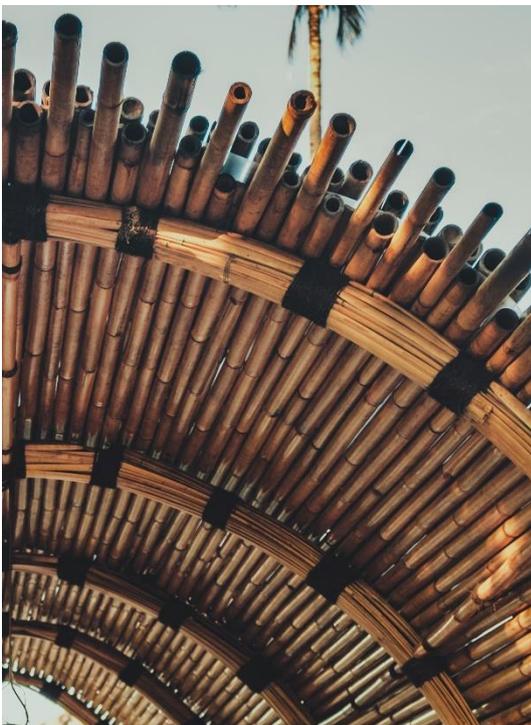


Table des matières

RÉFÉRENCES TERRE CRUE.....	3
Sharanam Center for Rural Development.....	3
Kaza Eco-Community Centre.....	5
Confluence.....	7
Eco-quartier Maison Neuve.....	9
Usine Ricola.....	11
Logements G.....	13
REFERENCES BAMBOU.....	21
Carré Sénart.....	21
Gare de Nîmes-Pont-du-Gard.....	22
Parking Hautepierre.....	27
Vedana Restaurant.....	29
Science Labs & Music Center at Panyaden International School.....	32
Abris, varangue et bamboodeck.....	36
Eglise Notre-Dame-de-la-Pauvreté.....	38
Casa de bambu.....	39
Lauréat Développement local – TerraFibra Award.....	41
Guesthouse Paraty.....	44

Références terre crue

Sharanam Center for Rural Development

Programme : Hébergements, salles de conférences, Bureaux

Date : 2018

Location : Inde, proche Auroville

Architecte : Satprem Maïni, Auroville Earth Institute

Entreprises : Auroville Earth Institute

Détails : BTC (stabilisées), Béton de terre, voûte en BTCs sur 9m de portée.

Source : https://www.earth-auroville.com/construction_projects_en.php#sharanam





Kaza Eco-Community Centre

Programme : Comprend une clinique dentaire et optique au rez-de-chaussée, une salle d'artisanat vernaculaire, une petite bibliothèque, une cuisine et un café. Le premier étage est consacré à l'hébergement des villageois qui se rendent à Kaza depuis les régions périphériques éloignées, un aspect important pour une organisation caritative qui pratique la médecine dans cette vallée isolée, où les femmes enceintes peuvent parcourir des kilomètres à pied pour voir un médecin.

Date : 2015

Location : Kaza, Spiti Valley, Himachal Pradesh, India.

Architecte : Satprem Maini, Auroville Earth Institute

Entreprises : Auroville Earth Institute

Détails : Le bâtiment, qui se compose d'une fondation en maçonnerie de pierre, d'éléments CSEB (Compressed Stabilized Earth Brick = Briques compressées stabilisées en terre crue) et de murs en pisé brut, a été conçu spécialement pour le climat hivernal rigoureux de Spiti. Des détails de murs spéciaux ont été incorporés pour une résistance sismique supplémentaire. Des murs trombes ont été incorporés pour le chauffage passif du bâtiment pendant l'hiver. Le bâtiment est un exemple de conception hybride entre les systèmes traditionnels tibétains et les systèmes modernes de construction en terre.

Source : http://www.earth-auroville.com/construction_projects_en.php





Confluence

Programme : Immeuble de bureaux

Date : 2020

Location : France Métropolitaine, Lyon

Architecte : Clément Vergely, DIENER & DIENER ARCHITEKTEN

Entreprises : Artisan : Nicolas Meunier, BET BATISERF - BET Structure pisé + Jean-Claude Morel (Université de Coventry) + Antonin Fabbri (ENTPE)

Détails : La façade de ce bâtiment de 1.000 m² sera entièrement réalisée en matériaux bio-géo-sourcés : pierre, ossature bois, pisé. Grâce à des murs pouvant aller de 40 à 80 cm d'épaisseur, le bâtiment sera juste ventilé, et n'aura pas besoin d'isolant ! Les propriétés thermophysiques de la terre régulent la température et l'hygrométrie. Respirant et thermiquement performant, il devrait satisfaire les usagers des bureaux qui disposeront de 6 plateaux de 145 m² environ.

Source : <https://www.batiactu.com/edito/un-batiment-terre-11-metres-haut-a-lyon-qui-eut-cru-56905.php> ;
<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.leprogres.fr%2Fenvironnement%2F2020%2F10%2F21%2Fa-lyon-un-immeuble-de-bureaux-en-pise-fait-des-emules&psig=AOvVaw0fi4vAmRvBGubW-Tt39Z1Q&ust=1676024532307000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjhxqFwoTCLjo3ZGciP0CFQAAAAAdAAAAABAD>





Eco-quartier Maison Neuve

Programme : Habitat individuel

Date : 2020

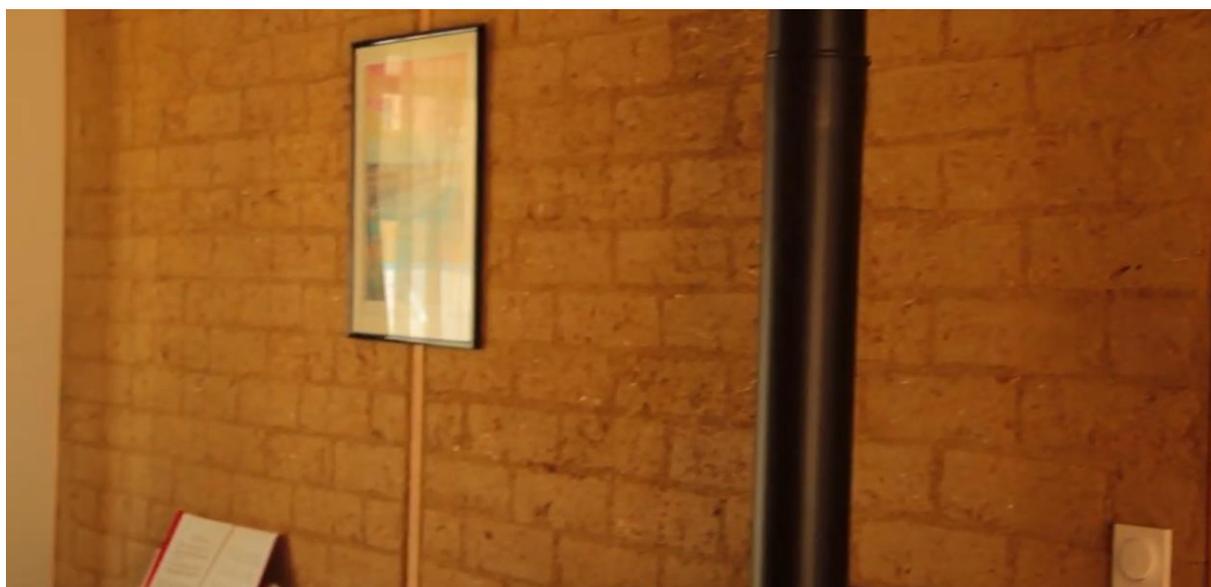
Location : France Métropolitaine, Guérande

Architecte : Atelier CAZ'eco, Framm Architecture

Entreprises : Scop L'aronde – Corentin Mouraud, EchoPaille, Bois Paille Ingénierie, Fibre Habitat, Woodshop, Alison Hilton.

Détails : Adobes pour murs de cloison. Enduits terre sur murs ossature bois remplissage paille.

Source : <https://fr.twiza.org/reference/1171/ekoloko-4-maisons-en-bois-terre-paille> ;
<https://www.bruded.fr/document-technique/maisons-ekoloko/>





Usine Ricola

Programme : Bâtiment Tertiaire, Usine

Date : 2014

Location : Laufen, Suisse

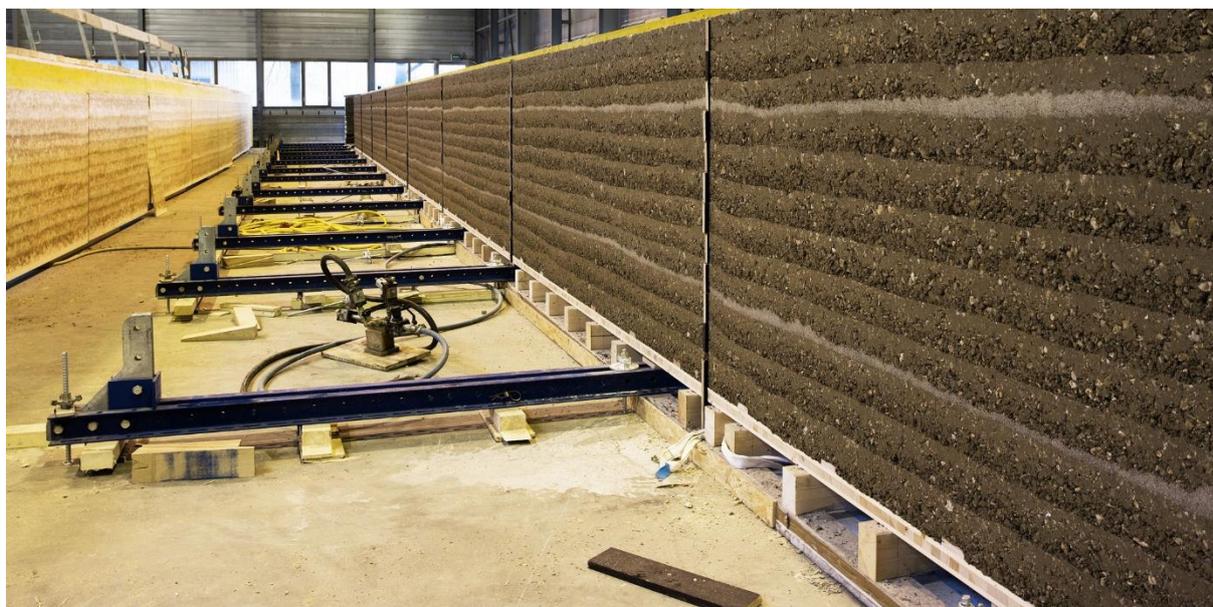
Architecte : Herzog & de Meuron

Entreprises : Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, Martin Rauch.

Détails : bâtiment finaliste du TERRA Award, prix spécial innovation technique pour Martin Rauch, Lehm Ton Erde. Pisé préfabriqué.

Source : <https://fr.twiza.org/reference/1171/ekoloko-4-maisons-en-bois-terre-paille> ;
<https://www.bruded.fr/document-technique/maisons-ekoloko/>

<https://amaco.org/le-plus-grand-batiment-deurope-en-pise-la-maison-des-plantes-de-ricola-dherzog-de-meuron/#>





Logements G.

Programme : Habitat collectif

Date : NC

Location : Guyane

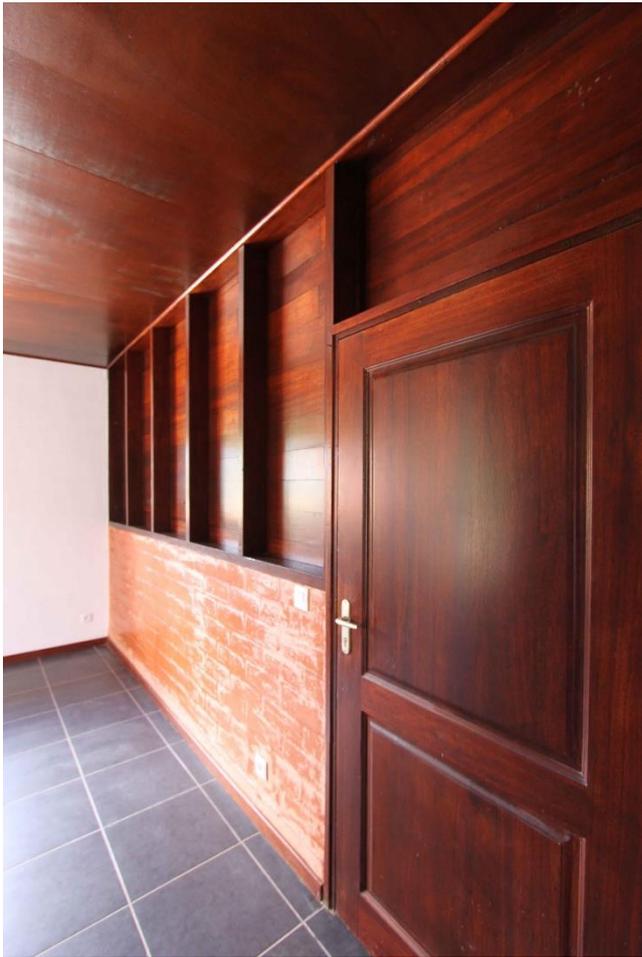
Architecte : Amarante Architecture

Entreprises : La Brique de Guyane

Détails : BTCs.

Source : <http://www.amarante-architecture.fr/projets-de-lagence/logements-collectifs/#>





Marché Central de Koudougou

Programme : Bâtiment d'activités, Marché

Date : NC

Location : Burkina Faso

Architecte : Laurent Séchaud, Pierre Jequier

Entreprises : Maîtres Maçons: **Kientega Zanna, Bado Mouboë, Bonkougou Kouka, Zagre T Michel, Kabore Sanata, Bonkougou Victorine**

Détails : Koudougou, troisième ville du Burkina Faso, est un centre industriel et commercial important sur la seule ligne de chemin de fer du pays. Dès 1999, la Direction du développement et de la coopération suisse a lancé un processus participatif impliquant la communauté dans le choix du site, la conception et la construction d'un marché. L'emploi de BTC a permis de réaliser les murs mais aussi les toitures avec une ressource locale. Les échoppes couvertes de voûtes nubiennes forment un réseau dense autour de la halle centrale, protégée par des coupoles. Le renouveau de ces techniques traditionnelles, longtemps dévalorisées, est favorisé par le rayonnement de cet équipement public.

Source : <http://terra-award.org/project/laureate-offices-shops-factories-koudougous-central-market/?lang=fr>







Gando Primary School

Programme : Bâtiment d'activités public, école

Date : 2001

Location : Gando, Burkina Faso

Architecte : Francis Kéré

Entreprises : Maîtres Maçons: **Kientega Zanna, Bado Mouboë, Bonkougou Kouka, Zagre T Michel, Kabore Sanata, Bonkougou Victorine**

Détails : L'école primaire de Gando a été construite pour étendre le réseau peu dense d'écoles de la province du Boulgou, dans l'est du Burkina Faso, et pour résoudre deux problèmes caractéristiques de nombreux bâtiments scolaires de la région : le manque d'éclairage et de ventilation.

Francis Kéré a conçu un projet qui résout directement ces problèmes, dans le respect des paramètres de coût, de climat, de disponibilité des ressources et de faisabilité de la construction. L'argile, disponible en abondance dans la région et traditionnellement utilisée dans la construction de maisons, a été utilisée pour créer des briques structurellement robustes à partir d'un hybride argile/ciment. Celles-ci sont non seulement faciles à produire, mais elles offrent également une protection thermique contre le climat chaud. Malgré leur durabilité, les murs doivent cependant être protégés des pluies dommageables par un toit en surplomb.

Au Burkina Faso, les toits en tôle ondulée sont une solution populaire, mais ils absorbent la lumière directe du soleil et surchauffent l'intérieur des bâtiments. Le projet de Kéré résout ce problème en éloignant le toit de l'école primaire de Gando de l'espace d'apprentissage intérieur. Un plafond en briques empilées à sec est introduit entre les deux, ce qui permet une ventilation maximale : l'air frais est aspiré par les fenêtres intérieures, tandis que l'air chaud est évacué par les perforations du toit en terre cuite. Cela permet également de réduire considérablement l'empreinte écologique de l'école en évitant d'avoir recours à la climatisation.

Pour ce projet, les techniques de construction traditionnelles et les méthodes d'ingénierie modernes ont été combinées pour produire la meilleure solution de construction tout en simplifiant la construction et l'entretien futur. La réussite du projet peut être attribuée à l'implication étroite de la population locale dans le processus de construction. Grâce au soutien de sa communauté et aux fonds collectés par l'intermédiaire de la Kéré Foundation e.V., Kéré a pu réaliser son tout premier bâtiment. Ce projet marque la naissance de Kéré Architecture et la collaboration continue de Kéré avec sa communauté à Gando par l'intermédiaire de la Kéré Foundation e.V..

Source :

<https://www.kearchitecture.com/work/building/gando-primary-school-3>

<https://www.pritzkerprize.com/laureates/diebedo-francis-kere#laureate-page-2431>





Références Bambou

Carré Sénart

Programme : Bureaux bâtiment basse consommation - Futur siège du Centre de gestion de la fonction publique territoriale de Seine-et-Marne

Date : 2012

Location : France Métropolitaine - Lieusaint

Architecte : Doux Architecte – Monica Donati et Alessandro Boldrini

Entreprises : NC

Détails : Construction de deux immeubles de bureaux, Façade avec double peau en Bambou

Source : <https://www.florentdoux.com/portfolio/bureaux-senart> - <http://www.idonati.com/projets/bureau/2012/carre-senart-france/bambou/7/detail/#fiche>



Gare de Nîmes-Pont-du-Gard

Programme : Construction d'une gare TGV de contournement de Nîmes

Date : 2015 -2019

Location : France Métropolitaine - Nîmes

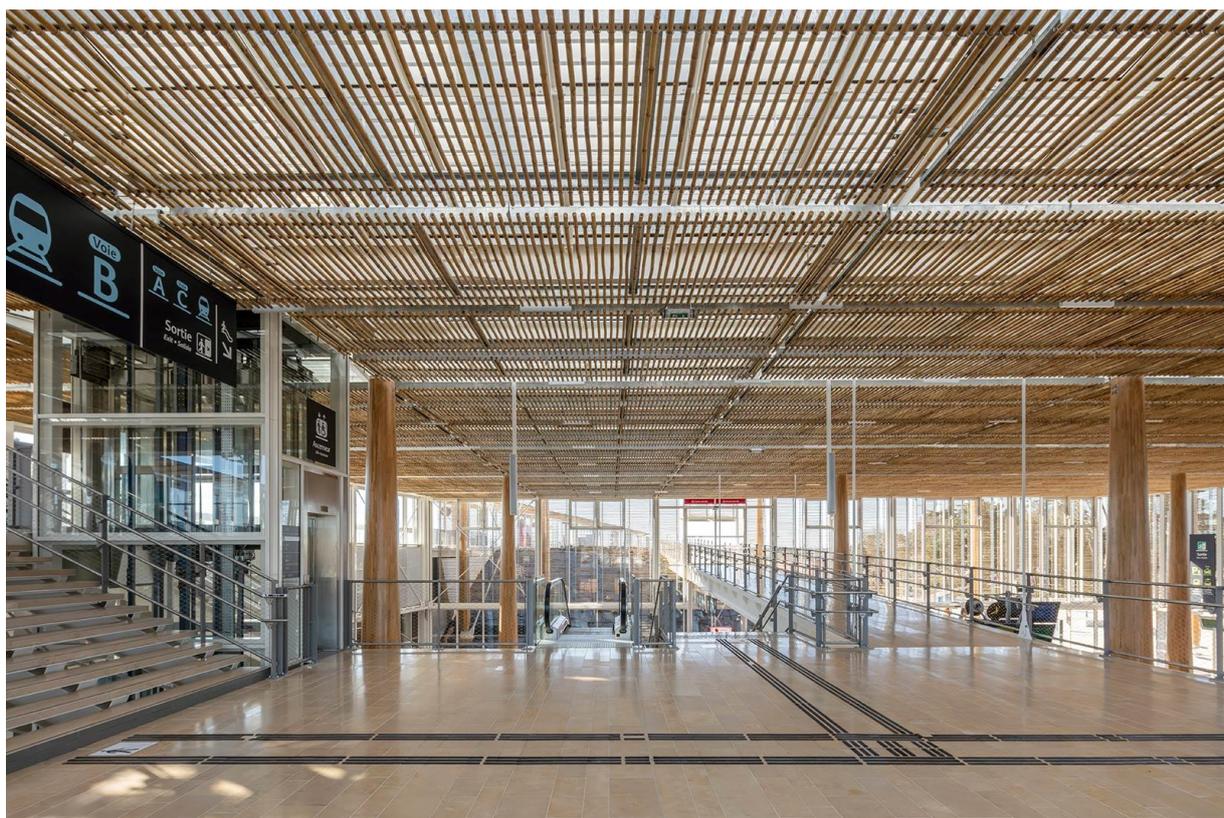
Architecte : AREP

Entreprises : TESS (Ingénierie), Les pépinières de la bambouserai

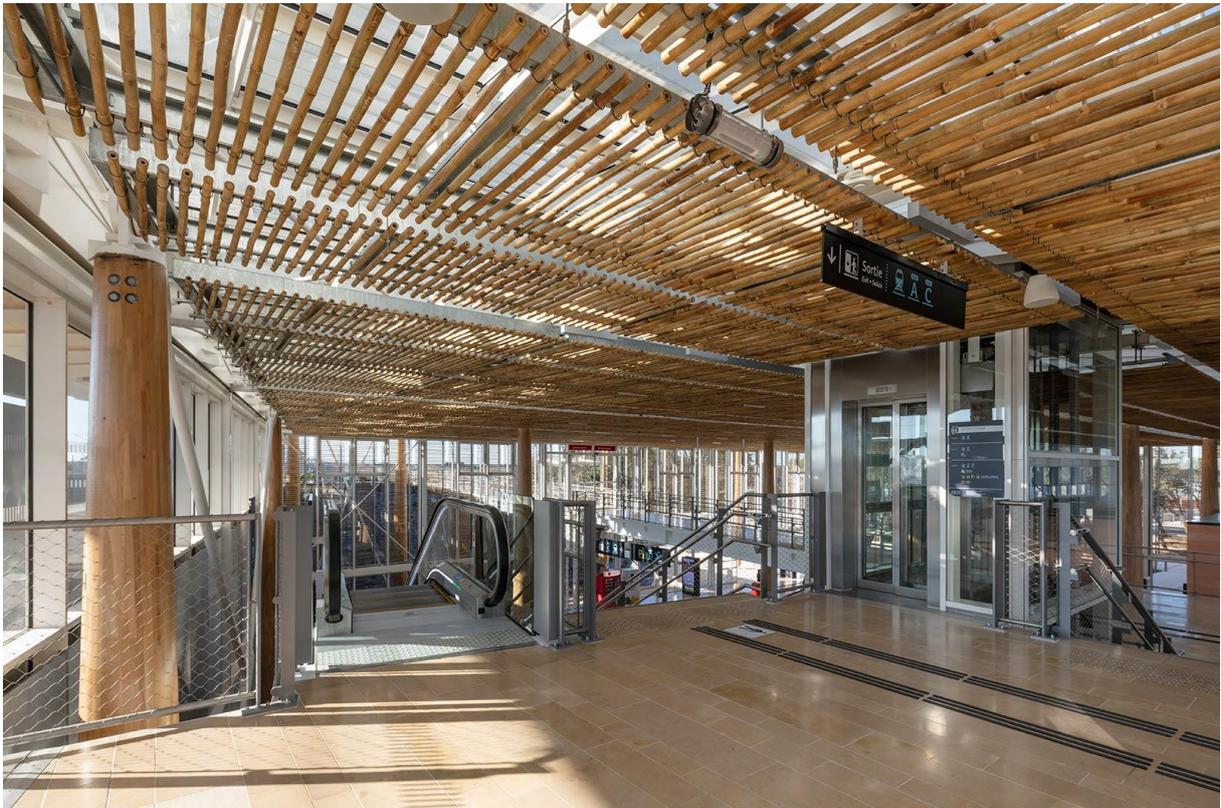
Détails : Dans une région où les épisodes de canicule et de mistral sont fréquents, assurer confort et performance énergétique tout au long de l'année est capital. Le bâtiment voyageur est conçu comme un grand volume abrité sous une ombrière filtrant la lumière. La toiture est couverte par des brise-soleil métalliques extérieurs, complétés par un plafond intérieur formé par un réseau de tiges de bambou de 4cm de diamètre. Les débords de toiture marqués permettent de protéger les façades. Lorsque l'exposition de ces façades le requiert, des panneaux de brise-soleil en bambou, identiques à ceux du plafond, sont mis en place à l'extérieur.

Source : <https://www.tess.fr/projet/gare-de-nimes-pont-du-gard>

<https://www.woodenha.com/realisations/gare-tgv-nimes/>











Native Bamboo par GKD

Parking Hautepierre

Programme : Parking de type Silo

Date : 2014

Location : France Métropolitaine - Strasbourg

Architecte : Nogha Consulting / OTE

Entreprises : Les pépinières de la bambouserai

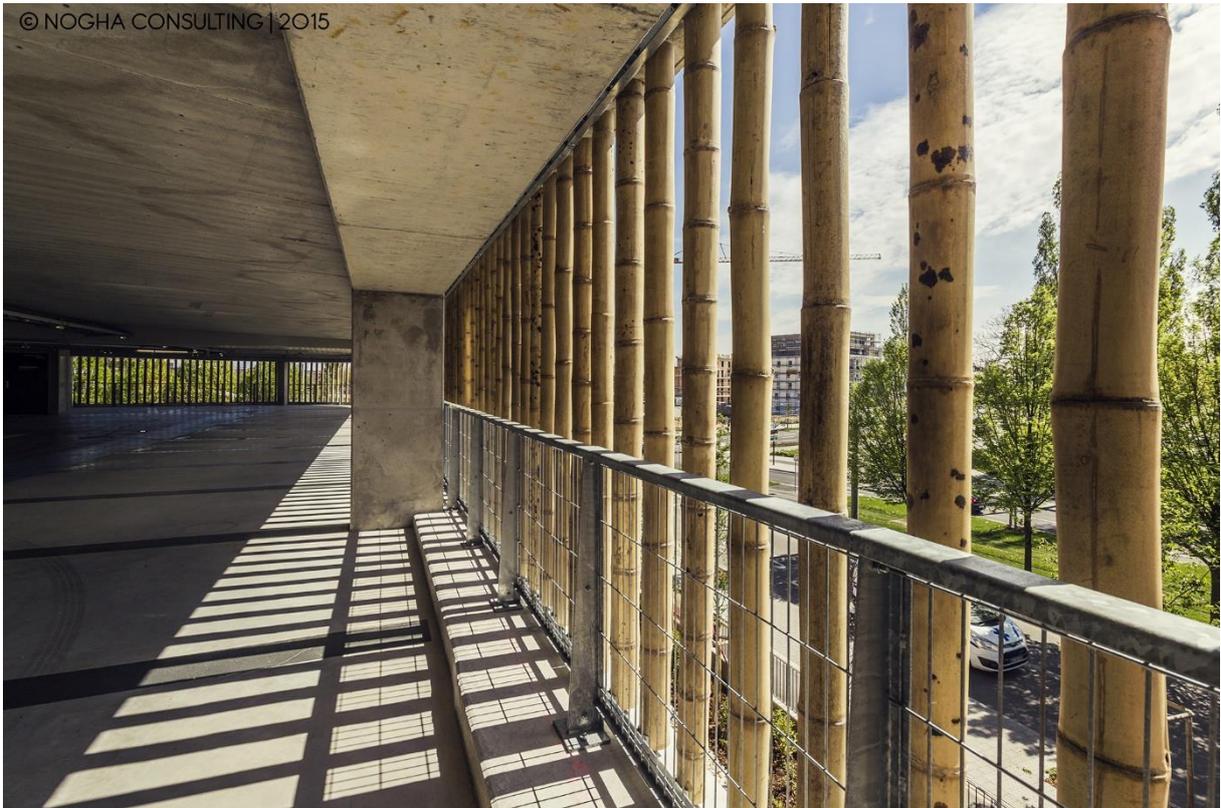
Détails : Dans un contexte d'agrandissement des services de l'hôpital de Hautepierre et du réaménagement complet du quartier, le parking silo de 800 places permet la régulation des besoins de stationnement. La partie inférieure du parking se situe dans la continuité du parking du personnel et lui est réservé, la partie supérieure est destinée aux visiteurs. Un noyau central accueille une rampe en double hélicoïde optimisant au maximum la surface de circulation. La volumétrie adoucie dans les angles transforme le carrefour quant à l'habillage en bambous, il permet plusieurs lectures de façade selon l'échelle depuis laquelle elle est vue : Uniformité douce et chaleureuse au loin et façade plus aléatoire avec des vibrations quand on se rapproche.

Source : <https://nogha-consulting.com/parking-hautepierre/>





© NOGHA CONSULTING | 2015



© NOGHA CONSULTING | 2015

Vedana Restaurant

Programme : Restaurant ouvert, au centre d'un resort de 135 villas, 5 hôtel et 8 bungalows.

Date : 2020

Location : Vietnam - cuc phuong commune, nho quan rural district, ninh binh province

Architecte : vo trong nghia architects (VTN architects)

Entreprises : NC

Détails : Lors de la conception de la structure de son restaurant vedana, VTN architects a composé un système de toit circulaire à trois pignons, renfermant plus de 1000 mètres carrés. La construction est assemblée à partir de deux disques en forme d'anneau empilés, coiffés d'un toit en forme de dôme. Chacun de ces composants est détaché individuellement par de fines et légères bandes de bambou. Le plus grand rayon mesure près de 18 mètres de large, tandis que le bâtiment s'élève à plus de 15 mètres de haut, ce qui en fait la plus haute structure en bambou de VTN architects à ce jour. Le toit en gradins, inspiré de l'architecture traditionnelle, est composé de 36 cadres modulaires qui suggèrent une structure à plusieurs niveaux, alors que le restaurant n'occupe qu'un étage.

Source : https://www.archdaily.com.br/br/953763/restaurante-vedana-vtn-architects/5fd3094163c0174070001ed-vedana-restaurant-vtn-architects-photo?next_project=no







Science Labs & Music Center at Panyaden International School

Programme : Ecole Internationale

Date : 2020

Location : Thaïlande

Architecte : Markus Roselieb, Tosapon Sittiwong

Entreprises : Chiangmai Airtec, Chiangmai Life Construction, Official Equipment Manufacturing

Détails : L'architecture devait refléter cette notion d'intégration de la nature avec un design contemporain et des connaissances techniques modernes. Conformément à ces principes directeurs, le CLA a utilisé des matériaux naturels tels que le bambou, le pisé et les briques d'adobe dans des formes organiques qui intègrent les bâtiments dans leur environnement naturel, sur la base de calculs structurels et de sécurité modernes, tout en réalisant une empreinte carbone minimale. Les laboratoires de sciences comprennent trois salles de laboratoire, chimie, physique et biologie, dotées d'équipements de pointe tels que des hottes, des systèmes d'air frais, des douches d'urgence, etc. Le bâtiment a la forme d'un L, qui, en raison de la façon dont le toit en bambou a été conçu, ressemble à un cœur vu d'en haut. Le compartiment central sert de salle d'approvisionnement, de stockage et de distribution centrale pour le gaz et tous les matériaux de laboratoire. Le bâtiment capte l'imagination de l'utilisateur par le contraste inhabituel mais en même temps inattendu du mariage harmonieux entre la structure en bambou exposée et les murs en terre avec la technologie de pointe exposée dans l'espace du laboratoire.

Source : <https://www.archdaily.com/957927/science-labs-and-music-center-at-panyaden-international-school-chiangmai-life-architects>









Abris, varangue et bamboodeck

Programme : NC

Date : 2020

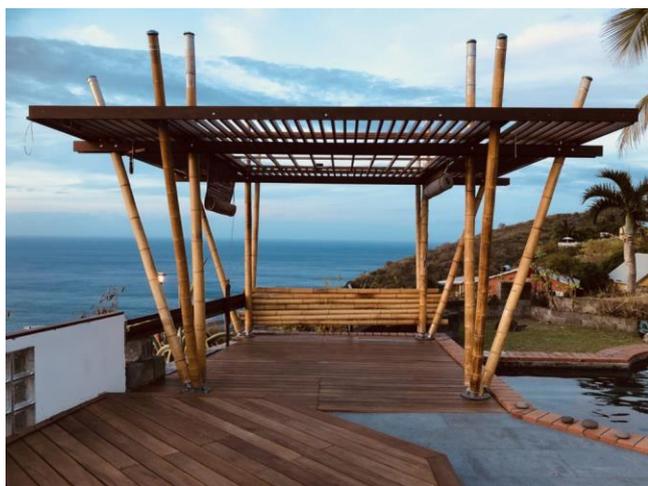
Location : Réunion

Architecte : NC

Entreprises : Bambooneem

Détails : NC

Source : <https://bambooneem.re/fr/hestia-front/bamboodeck-pergolas/nos-ouvrages/>





Eglise Notre-Dame-de-la-Pauvreté

Programme : Eglise

Date : 2009

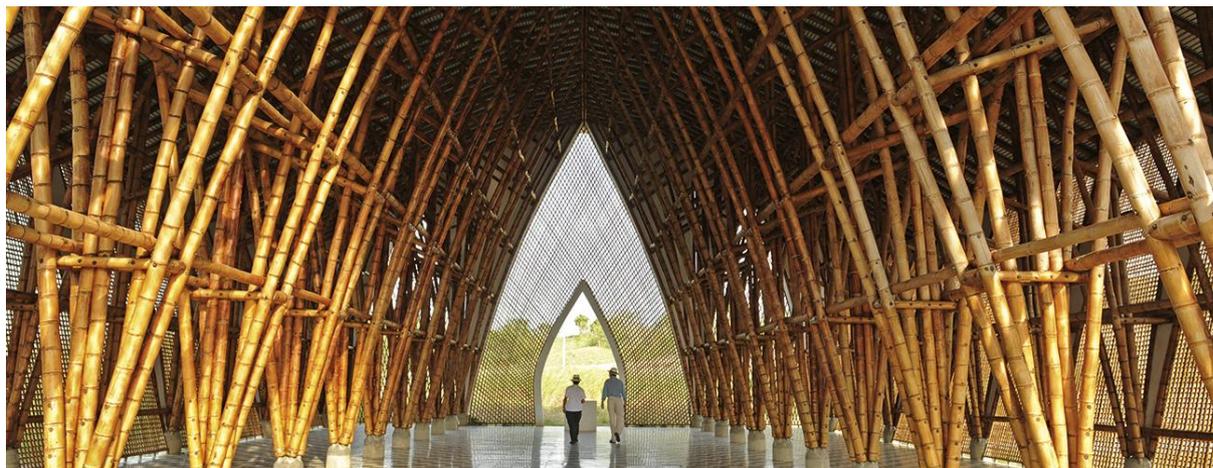
Location : Cartagena, Colombia

Architecte : Simon Vélez

Entreprises : NC

Détails : NC

Source : <https://www.infoimmo.ch/articles/simon-velez-bambou/>



Casa de bambu

Programme : Habitat individuel

Date : 2009

Location : Zhejiang, Chine

Architecte : Cardenas de Milan

Entreprises : NC

Détails : Un défi pour les architectes a été d'explorer de nouvelles formes de construction avec le bambou comme matériau de base. Selon eux, la durabilité n'est pas seulement l'utilisation de matériaux naturels comme le bambou, mais aussi la conception de solutions de construction appropriées. Pour cela, les architectes ont développé un système de construction modulaire en bambou, une géométrie précise et des raccords légers en aluminium pour faciliter l'expansion, le montage, le démontage et le transport. Les architectes ont appliqué les principes du Feng Shui dans la conception, qui se caractérise par des espaces de 9 m² à chaque étage. L'intérieur est généralement construit avec des cloisons de séparation minimales pour permettre à l'énergie positive (Qi) et à la ventilation naturelle de circuler librement. La maison est située sur un monticule de terre qui abrite des espaces au rez-de-chaussée.

Source : <https://www.build-green.fr/une-maison-en-bambou-inspiree-du-feng-shui-avec-geothermie/>





Lauréat Développement local – TerraFibra Award

Programme : Centre pour personnes handicapées et atelier de couture

Date : 2017

Location : Rudrapur, district de Dinajpur, Bangladesh

Architecte : Anna Heringer (architecture) ; Martin Rauch, Andreas Guetling et Emmanuel Heringer (consultants)

Entreprises : Montu Ram Shaw

Détails : Murs en bauge (terre non stabilisée et paille de riz). Charpente en bambou. Isolation de la toiture en paille de riz et fibre de coco. Couverture des vérandas en chaume

Sources : <https://www.archdaily.com/950681/anandaloy-center-studio-anna-heringer>

<https://www.anna-heringer.com/vision/>







Guesthouse Paraty

Programme : Habitat individuel

Date : 2017

Location : 'litoral norte' Sud-Est du Brésil

Architecte : Sven Mouton, CRU! Architects

Entreprises : NC

Détails : L'idée principale était d'utiliser le moins de matériaux de construction possible en réutilisant des matériaux et en appliquant des matériaux naturels extraits du site. Le mur en terre battue de 6,3 m de long, qui sert de mur antibruit, a été construit avec de la terre rouge extraite localement. Comme le terrain est en pente, il a fallu le niveler, ce qui a permis d'obtenir un matériau de base sans avoir besoin d'énergie supplémentaire. Le coffrage utilisé pour le pisé a ensuite été appliqué à la structure du toit. Les poutres qui maintenaient la charpente ensemble sont devenues le soubassement. Le toit vert a été fini avec de la terre noire et des plantes trouvées localement. Le grand rocher de granit qui était présent sur le côté gauche du terrain a été intégré dans la chambre, formant la moitié du mur. Au-delà, un palmier existant a été découpé dans le toit pour le maintenir. Des chaumes de bambou ont été utilisés pour former la structure du toit. Pour garantir l'intimité, de grandes fenêtres ont été placées à l'arrière et sur le côté droit du bâtiment, l'avant étant maintenu relativement fermé. De plus, le grand mur en pisé qui se prolonge sur 1,70 m à l'extérieur de la maison d'hôtes offre un petit patio privé et couvert. En raison de son inertie thermique, le toit vert marque une différence entre les zones de basse et de haute pression dans et autour de la construction, favorisant ainsi la ventilation. Les petites fenêtres en façade assurent une ventilation transversale.

Sources : <https://www.archdaily.com/906022/guesthouse-paraty-cru-architects>







