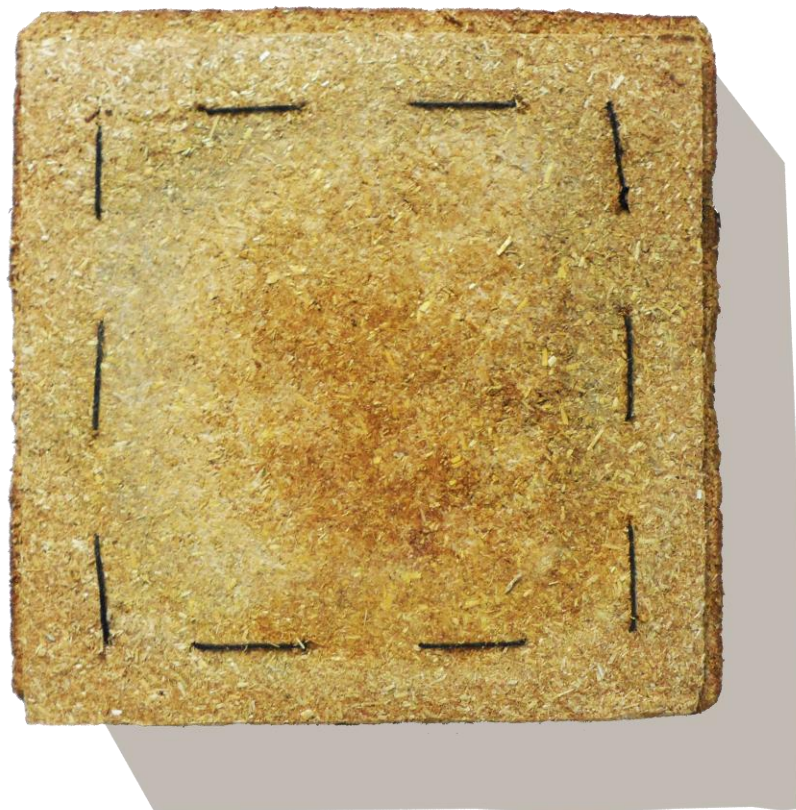




UN BIOCOMPOSITE EN POUDRE DE PAILLE

RECHERCHE POUR UNE APPLICATION ARCHITECTURALE
UNE UTILISATION DE LA MATIÈRE HORS CHAMPS EST-ELLE ENVISAGEABLE ?

Florence Schoeffter
florence.schoeffter@orange.fr



ABSTRACT

Des déchets agricoles résiduels à l'intérieur de nos maisons.

RÉSUMÉ

Réutilisation de la matière végétale résiduelle après moissons de cultures agricoles céréalières pour une application dans l'architecture.

Mots clés : *paille, biocomposite, caséine, panneau sandwich, isolant naturel*

SOMMAIRE

1. Intruction

1.a/Contexte de la matière paille3-5

1.b/Etat de l'art6-8

2. Preuve du concept

2.a/Paille10

2.b/Liant10

2.c/ Echantillons : caractérisation d'un mélange10-15

2.d/ Application à un élément architectural15

3. Montage d'un prototype16-17

4. Résultats et performances17-19

5. Conclusion19

1. INTRODUCTION

La paille, une ressource résiduelle à exploiter. Fabriquer un biocomposite est une pratique aujourd'hui relativement répandue. Cet élément parvient à intégrer des fibres naturelles dans le domaine de l'architecture telles que le bois ou la paille. Comment mettre en valeur la ressource naturelle et prouver son efficacité ?

Cet article fera l'objet d'une mise en valeur de la matière pour son utilisation dans des domaines extérieurs de l'agriculture. Il se propose dans un

premier temps d'énumérer les caractéristiques liées à la matière première dans le contexte actuel. Puis nous passerons en revue un certain nombre d'expérimentations et travaux liés à son utilisation dans un état de l'art.

Ensuite, nous tenterons de confectionner un biocomposite biodégradable capable d'utiliser cette matière première réduite en poudre mélangée à un liant naturel.

Enfin nous essaierons de trouver une application architecturale à un biocomposite en poudre de paille et d'en mesurer les compétences et performances.

1.a/Contexte de la matière paille

• QUANTITE

Dans le monde, la culture de céréales couvre 697,678,673 hectares (The World Bank Group, 2013), la graine représente 72% de la moisson agricole mondiale (United Nations Food and Agricultural Organization (FAO) 2007). En Ile-de-France, l'exploitation céréalière représente pratiquement 3/4 de la production agricole. "Les exploitations de l'Ile-de-France sont très majoritairement spécialisées en grandes cultures (4 011 exploitations sur près de 5 310)".¹

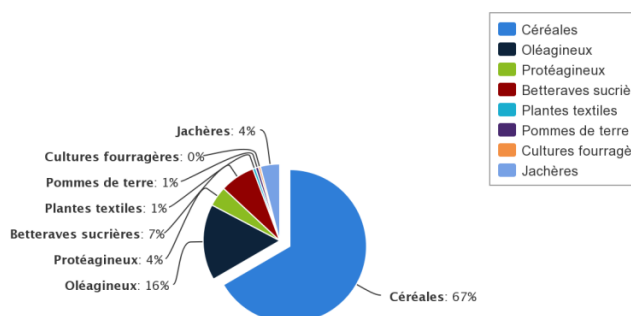


Figure 1: Répartition des grandes cultures ²

Une tonne de production mondiale de céréale délivre 1.5 tonnes de "pailles" et autres "sous-produits". Cette matière végétale peut aussi être appelée andain³. La coupe se fait évidemment annuellement pour récolter les graines, mais en aucun cas les tiges et autres résidus (andains). Cette quantité de ressource naturelle reste sur les champs, dans certains cas, c'est la paille secondaire. Seulement une faible part de ces fibres est réutilisée pour des applications conventionnelles et énergétiques. Une énorme quantité de fibres naturelles demeure dans les champs, notamment celle des résidus à forte C/N⁴, qui "peuvent prendre des mois voire plusieurs années à se décomposer notamment à la surface du sol"⁵. En terme de tige ou paille, il s'agit d'un énorme volume pour une très faible densité (très peu de matière), qui est un problème comparé à d'autre type de végétaux (de volume moins important) étant donné qu'elles ne peuvent servir à la fabrication de bagasse (fibre passée au moulin pour en extraire le suc).

• FREQUENCE

En Ile de France, la moisson se fait annuellement en fonction des conditions climatiques et se compose majoritairement de grains céréaliers. Les grandes cultures de la région constituent donc bel et bien un gisement estimable.



Figure 2: Calendrier des cultures⁶

• DISPONIBILITE

Si une partie de cette ressource est utilisée à des applications conventionnelles, il semblerait que les agriculteurs tiennent aussi à donner une autre utilité à ce volume de matière devant être stocké. Si la ressource est accessible en quantité, son prix est aussi très attractif. L'emploi d'un matériau n'ayant généralement pas d'utilité lui confère un coup peu onéreux. Les industries de réutilisation ou transformation de fibres naturelles sont à la recherche de fibres plus rapidement renouvelables, moins chères et plus disponibles que pourrait être le bois par exemple. Une augmentation de la demande en fibre de bois induit forcément une extraction plus importante de la matière première, c'est-à-dire, en d'autres termes, entretenir la demande à l'origine du phénomène de déforestation. Si la ressource s'amenuise ou répond à des normes de protection, la rareté du produit impliquera l'augmentation des prix liés au bois. Dans ce cas là, la paille peut être une alternative intéressante pour remplacer les produits composés de fibres de bois. Toutefois, il faut comprendre que la valorisation de la paille nécessite un processus de récolte, de transport, de stockage puis de transformation qui demande un coût important. Cet ensemble de processus de transformation de la matière première agricole reste cependant assez identique à celle du bois. Son

attractivité se démarque de celle du bois quant au fait qu'elle est le fruit d'un cycle de production annuel, un cycle forcément bien plus court que celui du bois.

- **PEU EMPLOYEEE**

A une échelle mondiale, en 2012, un constat semble serévérer : un manque de coordination gouvernementale, entre les fermiers et les industries susceptibles de pouvoir tirer une plus valeur de la récupération de ces végétaux résiduels (industrie du papier, énergie, bio-gaz, construction), bloque ou ralentit la redécouverte du potentiel de la fibre et de son offre. Cependant, de nos jours, en France et dans les "pays développés, le lien entre les fermiers et les industriels est largement établi. il existe un marché d'achat et de vente sous forme de balles qui permet l'échange de paille à grande échelle (plusieurs centaine de milliers de tonnes en France). Certains site de revente en ligne permettent la valorisation de ce co-produit agricole. Il en ressort donc qu'un réel marché est dors et déjà en place et qu'une utilisation des andains de pailles ne demande pas de créer une toute nouvelle filière industrielle.

- **ECOLOGIQUE**

Pour se débarrasser au plus vite de ce surplus de résidu non-attractif de part sa haute teneur en silicate qui attire bactéries et champignons⁷, beaucoup de fermiers, à l'échelle de la planète, brûlent les champs (de manière illégale) causant ainsi un problème environnemental majeur. Ce type de problème s'applique à des productions de masse et aux "grandes cultures" (grandes surfaces d'exploitations et grands moyens de traitements agricoles, souvent cultures céréalières). Il est vrai que la carbonisation des résidus sur champs peut permettre une fertilisation des sols. Cependant cette action sur de grandes superficies libèrent des polluants et du CO₂ en grande quantité dans l'environnement.⁸ Aux Etats-Unis, chaque million de tonnes de pailles brûlée libère 56000 tonnes de CO₂⁹ et après une étude révélant en 1991 que cette pollution annuelle produit à elle seule plus de CO₂ que l'ensemble des centrales électriques¹⁰, l'Etat de Californie encourage la réduction de cette pratique de purification des champs avec le "Straw Burning Reduction Act"¹¹. La Chine a elle, en 2011 interdit la combustion des résidus végétaux sur les champs. Exploiter cette ressource pourrait partiellement

éviter ce type de pratique néfaste pour l'environnement.

Si la combinaison architecture/nature à but écologique n'est pas une nouveauté, le biocomposite lui est relativement récent. Il est vrai que l'industrie se nourrit d'ores et déjà de ressources naturelles, mais nous ne pouvons négliger les conséquences de ce prélèvement de masse sur les gisements qui s'amenuisent. Ceci entraîne bien sur des conséquences économiques : la matière voit sa valeur augmenter en même temps que sa rareté se fait sentir. Utiliser des ressources naturelles, oui, mais à quel prix ? Sachant qu'aujourd'hui, les matériaux bio-composite ou biologiques sont en majorité composés de bois ou de fibres végétales délivrées par des hectares de surface d'exploitation agricole il pourrait être intéressant de trouver un matériau qui n'encourage en rien la déforestation. Pourrait-il être possible de trouver une alternative à ces gisements naturels ?

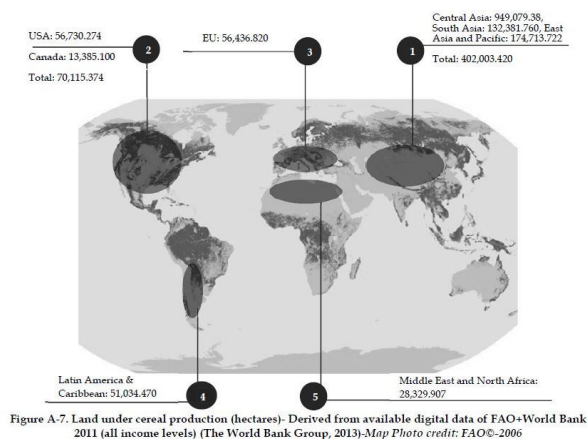


Figure 3 Producteurs céréalières dans le monde
Doktorarbeit, Hanaa Dahy, 17. Februar 2015, s.17

D'autre part, dans l'ensemble des continents, la production massive de céréales libère une source non négligeable de matière. Si celle-ci est brûlée car non réutilisable dans les circuits de recyclage, elle constitue une richesse qui part en fumée de manière néfaste. Mais si celle-ci disparaît de cette manière, c'est parce qu'aujourd'hui, aucune application rapide ou peu couteuse existe dans l'industrie.

- **BIODEGRADABLE**

Travailler avec un produit 100% naturel c'est l'assurance d'une éthique environnementale responsable. D'autre part, quelques chiffres, sur les 326 millions de tonnes de déchets produites par les

activité économiques en un an, 260 millions de tonnes sont produites par le secteur du BTP, soit 80%¹². Ceci fait du domaine du bâtiment un des plus grands pollueur du pays évaluant à 65% la part de déchets provenant de la démolition. Alors qu'aujourd'hui, la valorisation « matière » (recyclage) des déchets du bâtiment est estimée à moins de 50%¹³, nous comprenons ici l'importance de l'intégration de matériaux respectueux de l'environnement et recyclables dans la construction. Fabriquer des matériaux 100% biodégradables capables de remplacer les éléments pollués utilisés dans la construction pourrait réduire la quantité de déchets produite par le domaine du BTP.

Il semble que le monde de l'industrie peut s'ouvrir à cette découverte et récente évolution des matériaux biocomposites (*"matériaux composites utilisant des renforts et des résines d'origine animale ou végétale"* .wiki). Des exemples et prototypes de sont utilisations font déjà état de l'art et ceci à plusieurs échelles.

Un matériau primitif en devenir
Le réemploi de la paille connaît déjà de nombreuses applications. Nous pouvons d'ors et déjà établir des catégories de recyclage du matériau selon son état, qui correspond aussi aux nombres de modifications appliquées éloignant la paille de son état d'origine. Nous pouvons donc retrouver cette matière première sous forme de balles de paille, de granulés et pellets et encore sous forme de copeaux, paillettes ou farine.



Figure 4: Photographies vente en ligne balles de pailles, La Balle Ronde

Balles de paille, en vente sur Internet¹⁴, Particuliers/Agriculteurs de La Balle Ronde



Figure 5: Pellets de paille de blé

Granulés et Pellets, litière et combustible issu du compactage, Nordic Eco Group



Figure 6: Farine de paille de blé, Alda¹⁵

Copeaux, Paillettes et Farine de paille, asséchant végétal destiné à assécher les loges et logettes des animaux d'élevage, Alda

1.b/Etat de l'art

Qu'il s'agisse de la construction, l'isolation, l'ameublement, le panneau peut être fabriqué dans une démarche de low ou high-tech. La démarche low-tech conserve la matière première dans son intégralité alors que les technologies plus avancées viennent transformer celle-ci en tailles plus réduites suivant les applications des particules obtenues.

Enviro Board (E-BOARD), 2014, *Enviro Board Corporation*, Camden, USA.



Figure 7¹⁶ : Déroulage des balles de paille, pellicule recouvrant le panneau, panneaux de paille, installations des panneaux en paroi dans une structure métallique

Production d'environ 200 000 planches de construction par an pour 7000 tonnes de pailles. 46% de la production de déchets solides composé de déchets organiques proviendrait de la production agricole¹⁷. La proportion de paille de blé représente 500 millions de tonnes, une quantité de ressource considérable pour le secteur de la construction. Le processus de fabrication commence dans les champs où les pailles sont moissonnées, collectées en balles et transportées dans la fabrique. Ces balles sont alors déployées et introduites dans la ligne de production. Le matériau est alors pressé en panneau par une assistance numérique. Ce panneau est ensuite enrobé d'un papier durable et imperméable, appliqué grâce à une colle écologique. La dernière étape de fabrication consiste à placer ces panneaux dans des cadres en acier composant alors un élément de construction murale préfabriqué.

Stropoly, 2006, Allemagne, Suisse.



Figure 8 : Echantillon d'un panneau de Stropoly¹⁸

A new generation of monolithic fiber construction material made from yearly renewable raw materials manufactured with energy-saving production technologies. "Les matériaux composites composés de paille, de colle écologique et d'eau [...] Les panneaux de particules sont proposés dans des épaisseurs allant de 12 à 125 mm et sont exempts d'émissions et de formaldéhyde, stables et hydrofuges, ignifugés et bien isolants, recyclables et environ un tiers plus légers que les panneaux classiques en fibres de bois."¹⁹

STROPOLY®TEC possède de très bonnes propriétés d'isolation acoustique, est respirant et perméable à la vapeur d'eau, est exempt d'émissions nocives, satisfait aux exigences de la classe d'émission E0 de formaldéhyde conformément à la norme européenne EN 120 (0 ppm de formaldéhyde). STROPOLY®TEC a une résistance modérée à la moisissure et aux attaques d'insectes peut être traité mécaniquement sans aucune difficulté, est relativement longue et durable peut être recyclé dans le respect de l'environnement.

Un avantage particulier réside dans le fait que les canaux d'alimentation en eau, en électricité, etc. peuvent être intégrés au mur dès la production. Cela concerne l'intégration de différents canaux d'alimentation et la possibilité d'intégrer des systèmes de refroidissement d'économie d'énergie et de refroidissement intérieur.

"La paille de blé nettoyée est comprimée à une pression de 200 bars et 180-200 ° C. Les lignines de cellulose de paille collent les tiges pour créer un lien fort. Ce processus écologique élimine le besoin de liants. Le contenu de la paille est dénaturé par le traitement de pression et de température, qui tue tous les germes et les spores et offre une protection contre les infestations de parasites. Immédiatement après le pressage, la plaque est recouverte de carton recyclé sur tous les côtés et sur toute la surface, créant ainsi une surface semblable à celle d'un placoplâtre."²⁰

Strohhaus, 2006, *Stropoly + Felix Jerusalem*, Allemagne, Suisse.



Figure 9²¹ : *Panneaux de paille, brique de panneaux de paille, "Maison de paille" en Suisse*

Des panneaux composés de pailles comprimées viennent constituer les murs préfabriqués intérieurs, extérieurs et la toiture d'une maison. Deux dalles de 40mm composées de pailles hautement comprimées enferment une dalle d'isolation légère en sandwich constituant ainsi un système de charge pour le bâtiment. Dans cet exemple la paille est utilisée d'une part de manière structurelle, mais aussi tel un isolant thermique. Les panneaux verticaux sont protégés de l'humidité par un système de fibre de verre ondulé et un film métallique sur les surfaces de la toiture. L'ensemble des revêtements de la maison est composé de matériaux issus de la transformation de la paille. Seule, une dalle de béton vient isoler le sol du reste de la structure.

Rice Straw Power Project, 2017, Hans Lothar Köhl, Leipzig, Allemagne.



Figure 10²² : *Panneaux en paille de riz destiné à la construction d'habitat et de meuble*

Development, production and sales of non-flammable product systems made of fibers from the renewable resource rice straw. Constructions boards for houses and furniture pieces.

Un projet ayant pour but de démocratiser l'emploi de la paille de riz dans la construction en prouvant sa crédibilité.

Strawjet, Quad, Hex, 2008, Strawjet Inc. , USA

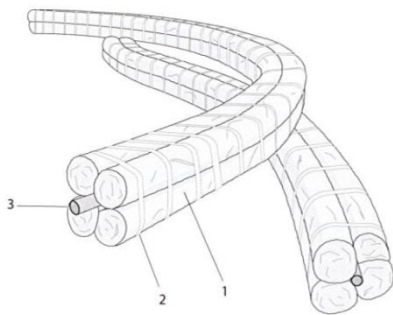


Figure 11²³ : *Quad, Mur de Quads*

Processus de densification mécanique. Tiges de production céréalière, blé et riz. USA 200 million de tonnes de pailles sont délivrées chaque année. Strawjet propose de créer des "câbles" de pailles hautement compactées et extrudées de 5 cm de diamètre. Les fibres peuvent être renforcées par du nylon, kevlar ou polyester lors de la fabrication de la corde qui peut enrouler 4 (Quad) ou 7 (Hex) câbles et n'utilisent aucune colle, résine ou autre composant chimique. Une fois assemblées les cordes de pailles peuvent être superposées pour créer des surfaces de murs ou encore des colonnes ou des poutres. En 2008, au Malawi, en Afrique Strawjet construit un abris de séchage de tabacco exclusivement avec cet élément de construction pour remplacer un abris en bois qui d'une part est composé d'une tonne de bois et d'autre part, étant assujetti aux termites, doit être remplacé tous les trois ans, encourageant ainsi une déforestation²⁴.

Hemp Chair, 2012, Werner Assingler + BASF, Allemagne



Figure 12²⁵ : *Hemp chair brute et teintées*

Une assise monobloc inspiré de la fabrication plastique. L'objet est composé à 70% de fibres naturelles de chanvre et de kénaf et 30% d'une résine acrylique (water-based) agissant comme liant. La géométrie de la chaise est le résultat d'un processus de fabrication industriel par moules à compression hydraulique.

Agricultural Waste Panel, *Berne University of Applied Sciences + University of Nigeria, Enugu Campus + Ahmadu Bello University, Suisse, Nigéria.*



Figure 13²⁶ : Différentes granulométries de fibres, Fiberboards

Coquilles de noix, cosses de blé, d'orge, de riz, écorces de maïs, épis de maïs, tiges de maïs, voici autant de résidus céréaliers, ressource annuelle de lignocellulose.

Une méthode standard de fabrication pour ces panneaux : un mélange de matière première avec un liant adhésif disposé dans un moule où celui-ci sera pressé à chaud en panneau. Ceux-ci peuvent trouver une application comme panneaux de construction murale, de panneau d'isolation. Le but initial étant de parer à l'acte de déforestation bel et bien encouragé par l'industrie de construction qui utilise le bois pour la fabrication de la plupart des édifices et des éléments de revêtement, isolation ou ameublement.

Brique de chanvre, 2007, *Construir'Éco*, France



Figure 14: Paille de chanvre, différentes épaisseurs de brique, montage du mur et esthétique final

Un mélange de chènevotte²⁷ et de chaux naturelle, un matériau sain, léger et facile à mettre en œuvre. "La brique de chanvre offre une bonne isolation thermique et acoustique, mais là où elle se démarque de tous les autres isolants c'est qu'elle offre en plus des propriétés fondamentales et souvent négligées de confort thermique ressenti: perspiration, perméabilité à la vapeur d'eau et régulation d'humidité, densité/inertie thermique, étanchéité à l'air, déphasage important."²⁸ Cette brique est aussi résistante au feu (M1), au gel et aux nuisibles. Elle trouve ses applications dans le remplissage d'ossature bois pour la construction de parois intérieures/extérieures, isolation extérieure/intérieure et cloison intérieure.

2. PREUVE DU CONCEPT

Objectifs de la conception

Fabrication d'un biocomposite de fibre de paille pour une application intérieure isolante.

Composite DEUX COMPOSANTS

"Un matériau composite peut être défini simplement par l'assemblage de 2 composants : une matrice et un renfort. Ses propriétés découleront à la fois des propriétés intrinsèques de ces 2 composants, mais aussi de l'interface entre eux. Les fibres apportent des hautes performances mécaniques, on parle ainsi de «renforts ». La matrice ou résine, terme plus usité, a pour rôle de protéger les fibres et de transférer les sollicitations mécaniques et les contraintes externes appliquées au matériau.

De là découle une « règle » simple :

- à chaque application visée : son composite,
- à chaque renfort : sa matrice pour répondre à un certain type d'application.

Dans le cas des composites renforcés avec des fibres végétales (longues ou courtes en fonction des types d'application), les matrices utilisées sont principalement des matrices polymères."²⁹

L'idée est donc de parvenir à fabriquer un biocomposite à partir de l'association paille / liant (résine ou colle) et ainsi de crédibiliser l'intégration de ce matériau intéressant dans une démarche d'écoconception, de part, son accessibilité (présence de cultures céréalières sur l'ensemble du territoire, disponibilité des andains de paille laissés après moissons sur les champs, peu onéreux), son renouvellement (moisson fréquente), son respect de l'environnement (produit naturel biodégradable qui ne participe pas à la déforestation)

2.a/ Paille

Il existe déjà des cellules faisant le lien entre le cultivateur et le particulier et donc dans le cadre de ce mémoire, de la matière première à une ressource exploitable en architecture. En effet, la société **Alda** (Asséchants Logettes Direct Aube) récupère la paille des cultures environnantes, les modifie et les redistribue aux particuliers, qui sont généralement des éleveurs, dans un circuit court. La modification que la société opère destine la paille à servir d'absorbant pour les logettes des animaux en la réduisant en poudre, paillettes, farine ou copeaux. Il semble donc intéressant de solliciter de tels acteurs qui produisent un matériaux de granulométries variées pour la fabrication architecturale, un domaine assez éloigné de leur pratique initiale.

2.b/ Liant

S'il existe une panoplie assez large de résines, le but de l'expérience est de trouver un liant capable de retourner à l'état organique. Sa biodégradabilité doit donc être sa caractéristique essentielle. Il existe déjà différents types de bio-résines qui sont composées d'éléments naturels telles que *Bioresin 2 MD 616*³⁰, une résine de coulée utilisée comme liant avec de la sciure et qui, chargée avec agent durcisseur, devient très résistante à la chaleur. Elle se compose de sucres, soja, colza, léo-polyoles et d'additifs. Nous pouvons aussi évoquer *Roquette*³¹, qui développe dans le domaine de la Chimie et de la Bio-industrie des Elastomères Thermoplastique (TPE) à partir de ressources naturelles végétales.

2.c/ Echantillons : caractérisation du mélange

Le but de cette étape est de déterminer quel type de pailles et de matrices sont avantageuses et dans quelle proportions les mélanges sont les plus performants. La matière que nous cherchons à obtenir doit nous permettre de fabriquer une brique et doit donc répondre à plusieurs critères :

- Utilisation de pailles résiduelles ou andains dans une démarche d'éco-conception
- Mélange totalement naturel et compostable, y compris l'élément qui servira de liant.

- Possibilité de compresser le mélange dans un moule
- Solidité et homogénéité du matériau même après séchage
- Possibilité d'usinage (perçement, découpe, ...)
- Visuel intéressant
- Existence de potentielles performance mécaniques, thermiques ou acoustiques
- Possibilités de modification formelle des éléments après séchage (par thermoformage par exemple)

La réalisation des échantillons qui suit tente donc de respecter au maximum l'ensemble de ces critères.

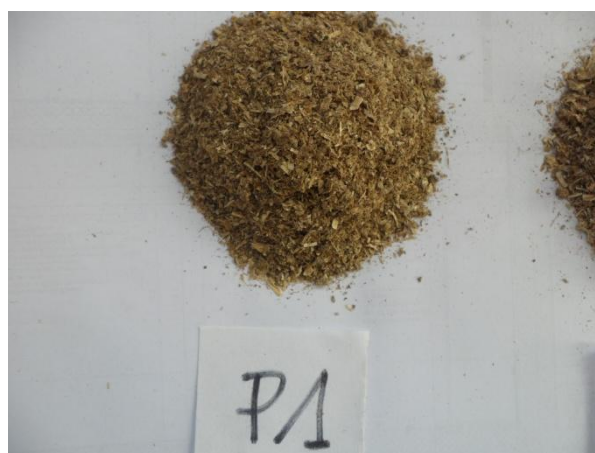
Confection des échantillons grâce à la participation de différents acteurs professionnels du monde de l'agriculture ou de la bio-industrie.

Etude de la paille

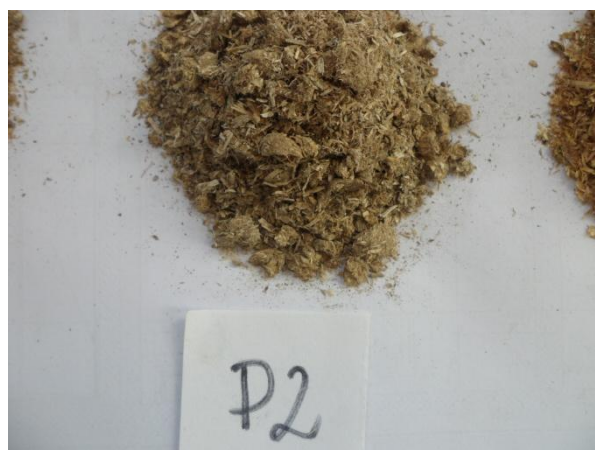
L'entreprise Alda, confectionne des farines de paille à partir des andains et tiges céréalières résiduelles. Suite à leur récupération après moisson dans la région de la Marne, ces pailles sont broyées en différents calibres dont trois m'ont été fait parvenir (figure 15). Elles constituent alors une poudre végétale réutilisant ce matériau résiduel à destination de l'élevage (litière pour les animaux).



Figure 15: Produits 1, 2 et 3: différentes granulométries de flocons de paille.

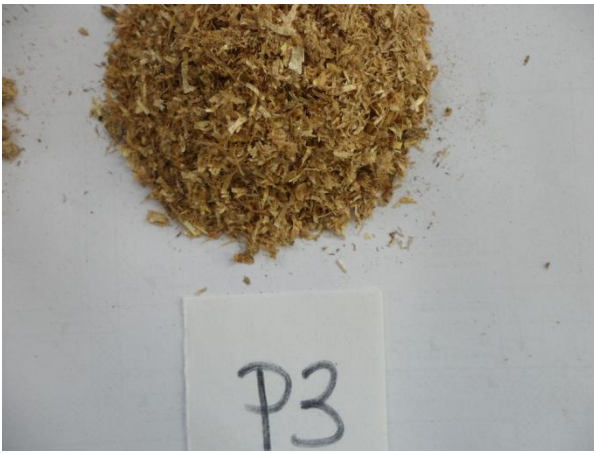


- Farine de Paille (granulométrie fine et dense) qui sera nommé Produit 1 ou P1



- Farine de Paille Buvard (granulométrie grossière, densité élevée) qui sera nommé Produit 2 ou P2

Etude des liants



- Copeaux de Paille (granulométrie plus grossière, densité plus faible) qui sera nommé Produit 3 ou P3

Selon l'entreprise, "Les résultats des essais réalisés selon la Norme NF T 90-361 donnent un taux moyen d'absorption de 630 %. La farine de paille buvard Alda est capable de retenir 6,3 fois sa masse en eau."³²



Figure 16: Différence de densité : $d(P1)=0.46g/cm^3$, $d(P2)=0.54g/cm^3$, $d(P3)=0.23g/cm^3$.

Données :

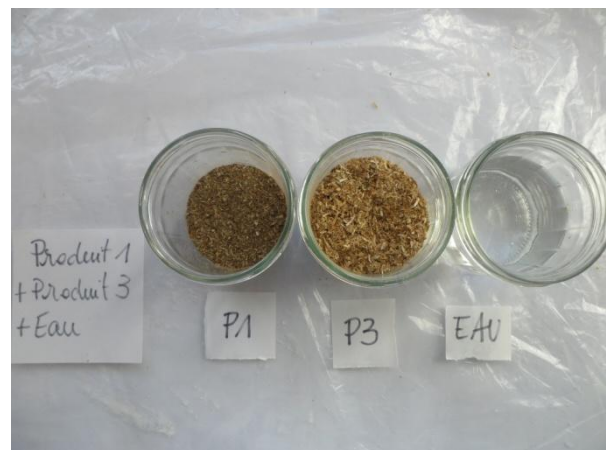
Masses volumiques

$$\rho_{P1}=8g.cL^{-1}$$

Dans cette étape nous nous appliquerons à déterminer des liants pour lesquels les mélanges présentent des caractéristiques pertinentes. La matière obtenue doit être biodégradable, répondre à une certaine cohésion, homogénéité, intégrité et praticité. Les mesures de ces qualités nécessaires pourront se faire au touché par des test de détérioration ou visuellement par des constatations de friabilité.

Nous testerons 3 liants : l'amidon de blé, l'eau et la caséine, mais ne discuterons pas du dernier qui a très vite présenté des faiblesses de praticité dû à un moisissement pratiquement inéluctable.

- Eau.



Les trois différentes pailles sont testées dans un mélange avec de l'eau. Ces échantillons permettent de mettre en valeur les interactions de chacune avec un liquide.



Figure 1717 : Echantillons P1(35)-Eau, P2(35)-Eau et P3(35)-Eau.

Chacun des ces pavés ont été réalisés à partir d'une pâte composée de 35g de paille et 65mL d'eau, ce qui correspond donc au rapport de masse, 35% de paille pour 65% d'eau. Nous pouvons remarquer, juste après leur confection, que la compacité des échantillons se dégrade fortement pour P3(35)-Eau et que P1(35)-Eau est beaucoup trop humide.

Après séchage, il semble que l'alliage eau et paille concassée de P1(35)-Eau soit palpable et demande à être étudié plus précisément : la masse de la matière après séchage correspond à la masse de poudre de paille incorporée dans le mélange, l'eau s'est totalement évaporé. La cohésion des particules de paille sous l'effet unique de l'humidification est significative d'une réaction de la lignine et pourrait faire l'objet d'une recherche plus poussée sur ces liaisons à une échelle microscopique.

Dans un autre temps, il nous semble intéressant d'étudier les capacités thermiques que délivrent un aggloméra de poudre de paille avec l'eau. En effet, le matériau généré par ce mélange est relativement poreux et enferme des cavités d'air qui pourraient s'avérer performantes dans le cas de la réalisation d'un élément isolant.

> Nous gardons l'échantillon P1(35)-Eau constitué dans des proportions de volume à 65% de paille et 35% d'eau.

- Colle de lait (caséine).

Dans un second temps, sous les conseils de Clarisse Merlet, étudiante dans le séminaire Transition ayant développé un projet de brique en tissu, j'ai ensuite décidé de composer avec un bio-liant.

Je décide donc de réaliser une colle à base de lait. Des recettes sont accessibles facilement sur Internet, notamment WikiHow³³ ou encore Espace des Sciences³⁴ et permettent de créer un liant grâce à la caséine³⁵ contenue dans le liquide.



Figure 18: Ingrédients : 25mL de vinaigre d'alcool, 400mL de lait chaud et 1cc de Bicarbonate de soude.



Figure 19: Séparation du lait en deux phases.

Verser une petite quantité de vinaigre d'alcool dans un lait préalablement chauffé. Le mélange se sépare instantanément en deux phases ; une phase liquide et une autre grumeleuse.



Figure 20: Filtration de la caséine.

Le but est donc de séparer ces deux éléments pour ne garder que la caséine contenue dans le lait. Une fois cette opération terminée et de l'ajout du bicarbonate de soude, la colle est prête à être utilisée.

La recette suivie, nous obtenons une sorte de pâte de lait (plutôt qu'une colle liquide) que nous appellerons "colle de lait" ou "Cdl". Cependant, il semble que cette texture fonctionne tout de même pour la suite de la création des échantillons. Suite à plusieurs tests, nous notons qu'il faut utiliser 1L de lait pour fabriquer 116g de caséine.

L'étape suivante consiste à mélanger la colle toujours chaude avec les paillettes de paille dans un rapport en volume dans un premier temps (et non en masse). Par exemple nous cherchons à fabriquer un échantillon formé, à 75% de son volume, de paille. Il s'agit donc de mélanger 2.5cL de Cdl avec 7.5cL de P1, de P2, puis de P3.

Pour "P1(75)-Cdl" nous obtenons le rapport suivant :

Cdl : 2.5cL \Leftrightarrow 50g

P1 : 7.5 cL \Leftrightarrow 50g

Nous nous rendons compte que ce rapport en masse équivaut à 50% et c'est pourquoi je décide de continuer l'ensemble des échantillons sous la règle de masse plutôt que celle du volume.



Figure 21: P1(75)-Cdl, P1(50)-Cdl et P1(25)-Cdl, proportions en fonction de la masse.

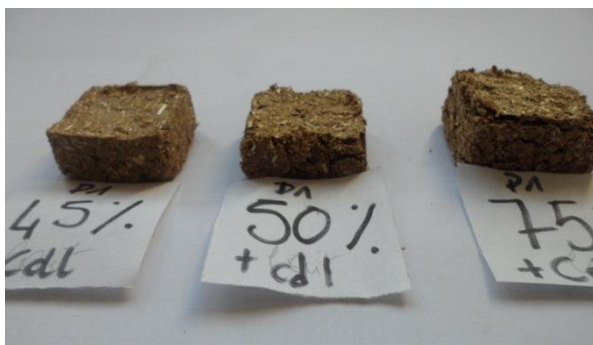


Figure 22: P1(75)-Cdl, P1(50)-Cdl et P1(25)-Cdl, après 48h de séchage.



Figure 23: Ensemble des échantillons ayant la colle de lait pour liant.

L'ensemble de ces échantillons permettront de définir quelle proportion de matière est la plus intéressante. Une fois que le séchage à température ambiante est terminé, il semble que P3 est la paille la moins facilement manipulable. Sa granulométrie large ne lui fournit pas une compacité optimale. Même sous compression, le mélange se délite toujours. De ce fait, son utilisation pour des prototypes futurs ne paraît pas envisageable.

Un échantillon semble être plus résistant et relativement compact. Il s'agit P1(45)+Cdl, que nous pouvons voir sur la figure. De plus, sa texture reste lisse et permet une qualité esthétique non-négligeable. Si le projet est avant tout de promouvoir l'emploi de la paille pour la fabrication de Bio-composite, il n'en reste pas moins important de faire attention à la présentation du matériau. C'est, d'une part intéressant pour la mise en forme future (compression dans des moules avec facettes texturisées par exemple) et d'autre part pour l'image du produit envers le public ou potentiel client.

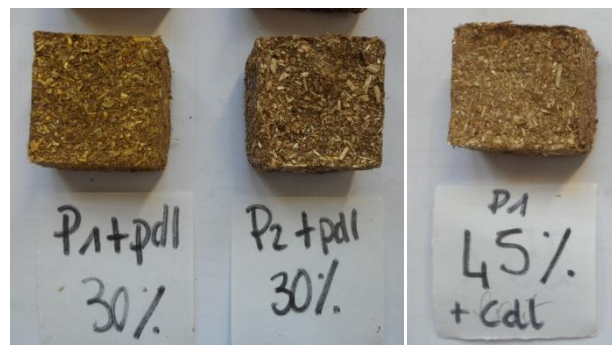


Figure 24: P1(30)-Cdl, P2(30)-Cdl, P1(45)-Cdl, trois mélange le plus envisageable.

En dehors de tout test de performance (qui viendront plus tard dans l'étude), ces deux échantillons répondent aux critères de base fixés pour la confection des briques : utilisation de la paille résiduelle ou andains, mélange totalement naturel et compostable, possibilité de compresser le mélange dans un moule, solidité du matériau après séchage, possibilité d'usinage, visuel intéressant, potentielles performances mécaniques, thermiques ou acoustiques.

Ces trois échantillons pourraient tous convenir pour la confection d'un matériau, seulement, pour un premier essai, il semble plus intéressant d'utiliser un mélange dont la proportion de paille soit la plus importante. En effet, alors que de P1(30)-Cdl et P2(30)-Cdl contiennent 30% de paille (dans un rapport en masse de 30g de paille pour 70g de colle de lait et dans un rapport en volume de 4.5cL de paille pour 3.5cL de colle de lait), P1(45)-Cdl se compose de 15% de paille en plus (soit dans un rapport de masse, 45g de paille pour 55g de colle et de volume, 6.75cl de paille pour 2.75cL de colle). Il est donc plus judicieux d'adopter le mélange qui se compose d'une proportion de paille plus importante pour limiter au mieux l'emploi de la colle. De plus, nous remarquons que plus la proportion de paille est importante, plus la masse de l'échantillon est faible. Cette caractéristique importante pourra peut-être aussi aider à déterminer les caractéristiques de l'élément à construire, ou répondre à certaine contrainte de poids. La légèreté d'un matériau demeure une particularité positive pour ce qui est de la praticité lors de la manipulation d'un élément ou bien encore durant son installation statique. En effet, si nous imaginons un élément capable de monter des parois intérieures dans le cas d'une réhabilitation, la légèreté de l'élément posera moins de problème quant à son installation sur un plancher déjà existant.

> Nous conservons le mélange de l'échantillon P1(45)+Cdl

Conclusion

sur la fabrication des échantillons

Nous noterons qu'une étape de séchage des éléments composés de colle de lait reste indispensable. En effet, il se trouve que certains échantillons peuvent moisir au bout de quelques jours n'étant pas correctement stockés (atmosphère trop humide, non aérée). Suite à cela, l'emploi d'un radiateur électrique/souffleur d'air chaud a été

nécessaire combiné d'un retournement régulier des éléments. Si cette étape était indispensable pour les échantillons dont la recette contenait du lait, nous remarquons que les échantillons constitués exclusivement de paille et d'eau ne possédaient pas cette problématique.

Il est donc intéressant de considérer le mélange flocons de paille et eau. En effet, ne contenant pas d'adjuvant périssable, il comporte un avantage majeur quant à la tenue à long terme. L'eau et la compression suffisent à stabiliser la matière. De plus, l'élément, une fois séché est d'autant plus léger et détient une certaine porosité.

> Deux mélanges pertinents sont mis à jour et constituent une matière intéressante qui pourrait notamment fonctionner comme des isolants thermiques.

2.d/ Application à un élément architectural.

Cette étape vient constituer la mise en valeur de la matière à une nouvelle échelle. Si les mélanges ont été déterminés, nous allons, dans les étapes qui suivent, tenter de prouver leur compétence dans un certain domaine d'application. Celle-ci s'oriente vers un isolant thermique, au regard des caractéristiques évaluées pour chacun de ces deux mélanges.

Dans un premier temps nous proposerons le montage d'un panneau sandwich mêlant nos deux types de mélange, puis nous réaliserons des mesures de conductivité thermique de ces éléments séparés.

3. MONTAGE D'UN PROTOTYPE

La fabrication d'un panneau sandwich prouve la crédibilité matérielle d'une telle application. Nous montrerons dans les illustrations qui suivent les étapes de fabrication du composant interne du panneau réalisé avec le mélange P1(35)-Eau.



-Une première égalisation, à la main de la matière avec la hauteur du moule.



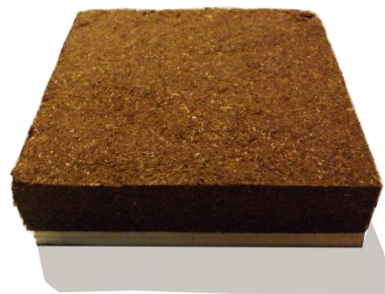
-Fermeture du moule par un cache supérieur qui nous permettra une compression plus optimale de la matière. Etant donné que nos précédents essais avaient prouvé l'effet néfaste d'une compression trop importante de la matière, nous nous en remettons cette fois-ci à la seule force humaine et au poids du corps.



-Positionnement de la matière dans un moule en bois pour confectionner un élément de 20cm*20cm*5cm.



-Matière dans le moule après compression : aspect lisse.



-Composant interne de P1(35)-Eau du panneau sandwich une fois démoulé.



-Composant externe de P1(45)-Cdl du panneau sandwich une fois démoulé.
Dimensions : 20cm * 20cm * 0.8cm.

Une fois l'ensemble des 3 composants fabriqués, il reste à les assembler. La méthode que nous choisissons est celle de coudre ces trois éléments. Nous procédons alors à un pré-perçage des panneaux.

Cette étape terminée, nous obtenons un panneau sandwich (figure 25) combinant le biocomposite poudre de paille+ eau (P1(35)-Eau) en partie interne et le biocomposite paille+caséine (P1(45)-Cdl) en partie externe.

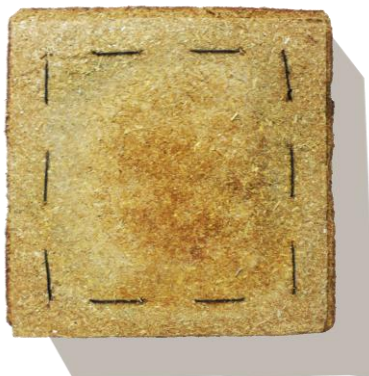


Figure 25: Panneau sandwich combinant 2 biocomposites.

4. MESURE DES CAPACITES THERMIQUES

Les composants de ce panneau sandwich ont fait l'objet de test de conductivité thermique. Pour ce, nous avons pu faire les mesure des deux matières, de manière indépendante grâce à un système de sonde thermique (figure 26) prêté par l'Ecole Nationale supérieure des Ponts et Chaussées. Les données obtenues ont été traitées par le logiciel Néotim.



Figure 26 : Sonde FP2C
Appareil de mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud.

Protocole de mesure de la conductivité thermique :

Le protocole de cette mesure de conductivité thermique visait à insérer la sonde entre deux éléments d'une même matière (figure 27)

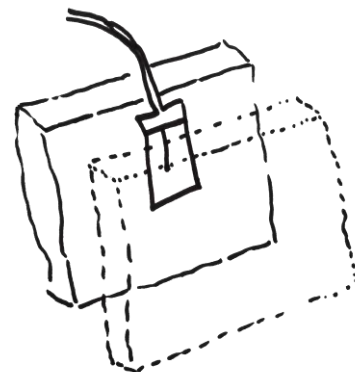


Figure 27 : Disposition de la sonde entre deux parties identiques d'un matériaux.

Nous attendons ensuite une stabilisation de la température du dispositif pour pouvoir retenir les

valeurs les plus conformes. Pour atteindre cet équilibre une fonction *stab* du logiciel nous permet de visualiser cette évolution par une courbe (figure 28). Une fois cette courbe stabilisée à une température, nous pouvons enclencher l'étape de test.



Figure 28 : Stabilisation de la température du dispositif pour l'échantillon P1(35)-Eau.

L'étape de test consiste à mesurer la température dans le système sur un période donnée (60secondes dans notre cas), alors qu'un fil chaud produit une décharge électrique (d'une intensité choisie) circulant dans la matière. Ce test doit être répétés plusieurs afin de pouvoir déterminer une moyenne de valeurs. Nous réaliserons 5 mesures de conductivité thermique pour chacun des deux matériaux. Ces mesures étaient séparées par une période de stabilisation de la température. L'ensemble des paramètres de la mesure sont déterminés en amont du test.

Paramètres de mesures pour nos test :

W : 0.14

Ohms : 10.7

t : 61 secondes

Une fois le test enclenché, nous observons une augmentation de la température dans le dispositif (figure 29), preuve que le matériaux emmagasine de la chaleur.

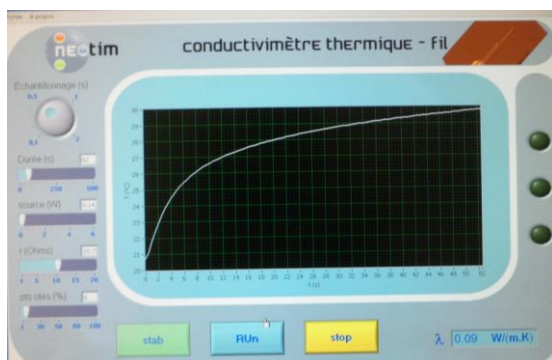


Figure 29 : Courbe d'évolution de la température du dispositif pour l'échantillon P1(35)-Eau.

Nous observons par exemple une augmentation de la température de 20.5°C à 30°C en 61 secondes pour l'échantillon P1(35)-Eau.

Le logiciel Néotim calcul et renseigne la valeur du coefficient de conductivité thermique directement sur l'interface.

Ainsi nous obtenons des valeurs moyenne de λ :

Pour l'échantillon P1(45)-Cdl :

$$\lambda_{\text{moyen}} = 0.11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Pour l'échantillon P1(35)-Eau :

$$\lambda_{\text{moyen}} = 0.08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Si nous remarquons une différence entre les deux matériaux étudiés (figure30), les valeurs des λ restent tout de même relativement élevé. Nous pouvons tout de même considérer que la valeur du λ de P1(35)-Eau sont notables. La matière est plus isolantes de celle de P1(45)+Cdl, ce qui est sûrement dû à sa plus grande porosité capturant des cavités d'air.

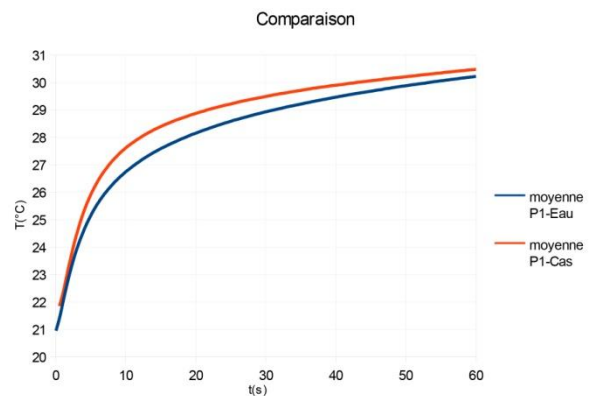


Figure 30: Comparaison de la courbe des valeurs moyennes de P1(35)-Eau et de celle de P1(45)+Cdl.

En considérant les conditions de mesure de l'élément ; il se peut que la matière P1(35)-Eau soit encore humide lors du test, ce qui viendrait totalement détériorer les valeurs de lambda obtenues.

Cependant, en règle générale, un matériaux est considéré tel un isolant si son λ est inférieur à $0.06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Valeur que nous n'atteignons pas d'après ces mesures.

Conclusion

sur les capacités thermiques

Il semble que ce biocomposite de poudre de paille ne soit pas encore effectif en terme d'isolant thermique. De nouvelles mesures pourraient être réalisées dans des conditions différentes. Des améliorations pourraient être imaginées, le biocomposite pourrait intégrer de la chaux qui lui insufflerait une caractéristique mécanique peut-être plus importante.

5. CONCLUSION

Si nous pouvons trouver plusieurs application possible à la poudre de paille, nous portons un intérêt tout particulier à un phénomène de base que celle-ci met en oeuvre de manière naturelle. En effet, il semblerait intéressant de discuter plus précisément du phénomène de cohésion naturelle que nous parvenons à observer lorsque la poudre de paille est mélangée à l'eau. Comprendre les connections qui agissent à une échelle plus microscopique pourrait nous apporter des réponses à notre échelle.

Dans ce présent article, nous avons tenter de faire la preuve de l'existence de performances thermique du matériau seul (P1(35)-Eau) et en biocomposite (P1(45)+Cdl).

Nous avons réussi à mettre en valeur ce matériau végétal résiduel en en démontrant une utilisation possible sous une forme particulière de paille broyée dans une très fine granulométrie. Cette poudre nous a permis d'imaginer des réalisation l'introduisant alors dans un domaine autre que celui de l'agriculture ou de l'élevage. En effet, la réalisation d'un biocomposite vient l'intégrer dans des domaines tel que celui de l'architecture. De plus, ce composite se veut 100% biodégradable puisque composé uniquement de produit naturel.

Si cette recherche a produit des échecs à plusieurs reprise, elle permet de mettre en avant les capacités comme les impossibilités que la poudre de paille peut engendrer. Les poursuites de recherche sur ce matériau particulier sont à imaginer et peuvent venir composer avec les applications envisagées dans cet article.

REMERCIEMENTS

Je souhaite vivement remercier l'entreprise Alda, de m'avoir fourni une quantité non négligeable de ses produits (pailles asséchantes pour logettes animales) et de vouloir continuer à poursuivre l'évolution de cette étude lui permettant de mettre en valeur son matériau d'une manière différente, mon entourage, pour avoir supporté l'odeur de la fraiche campagne pendant plusieurs mois.

Bien évidemment, je remercie l'équipe de professeurs du Séminaire de TRANSITION encadré par Robert LE ROY, Loïc COUTON, Thierry CIBLAC et Nadja GAUDILLIERE qui ont accepté de suivre ce projet.



ANNEXES

PROPORTIONS	Paille	Eau	Caséine	pourcentage paille (%)
Rapport de masses (g)	147	273		35,00
Rapport de volumes (cL)	18,375	27,3		40,23
Rapport de masses (g)	147		273	35
Rapport de volumes (cL)	18,375		26,00	41,41

RÉFÉRENCES

Agreste Primeur n°260, édition avril 2011 publié sur Alimagri : site du ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt en 2011
<http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/saa2016s dT2bspca.pdf>

Statistiques agricoles annuelles (SAA) française, *Donnée Tableaux Surfaces, productions, rendements de pailles de céréales, cultures non alimentaires, résultats 2014 définitifs et 2015 semi-définitifs*, publié en ligne en 2016
<http://agreste.agriculture.gouv.fr/donnees-de-synthese/statistique-agricole-annuelle-saa/>

Statistiques agricoles annuelles (SAA) française, *Tableaux de Surfaces, productions, rendements des céréales, oléagineux, protéagineux, résultats 2014 définitifs et 2015 semi-définitifs*, publié en ligne en 2016
<http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/saa2016s dT2bspca.pdf>

Guide Pratique ADEME, *Réduire, trier et valoriser les biodéchets des gros producteurs*, Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par IDE Environnement, Novembre 2013.
<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/reduire-trier-et-valoriser-biodechets-gros-producteurs-guide-pratique-2013.pdf>

Hanaa Dahy, *Agro-fibres Biocomposites, Applications and Design Potentials in Contemporary Architecture, Study of the Rice Straw Biocomposites*, 2015.
http://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/130/1/Doktorarbeit_H.Dahy_17.Februar_2015_Bibl.pdf

ADEME, Déchets 2014, *Chiffres Clés, 1.2 : La production de déchets en France*, p.13
<http://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-22241-chiffres-cles-dechets.pdf>

Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, *Déchets du bâtiment- Bâtiment et ville durables*, 24 novembre 2010 (mis à jour le 3 mai 2016)
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Dechets-du-batiment,19574.html>

Inventeurs Jan Knippers, Hanaa Dahy, Brevet EP 2965882 A1, Déposants Universität Stuttgart Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, *Flexible high-density fiberboard and method for manufacturing the same*, déposé le 8 juil. 2014 publié en ligne le 13 janvier 2016.
<https://www.google.com/patents/EP2965882A1?cl=en>

Hanaa Dahy, *Biocomposite for architectural applications based on a second generation of natural annual renewable resources*, International Conference on Sustainable Built Environment, p.138-147, Hamburg, 2016
https://pure.tugraz.at/portal/files/3050178/SBE16Hamburg_ConferenceProceedings.pdf

Hanaa Dahy, *Fiche technique Bio-flexi Panel High density recyclable and compostable fibreboard from renewable raw materials, that is suitable for free-form modelling*, ITKE University of Stuttgart, Germany
<http://www.itke.uni-stuttgart.de/download.php?id=885>

Henri Van Damme, *La terre, un béton d'argile*, Pour la sciences n°423, pages 51-57, Janvier 2013

Dirk E. Hebel, Marta H. Wisniewska, Felix Heisel, *Building from waste, Recovered Materials in architecture and construction*, Allemagne, 2014

Figure 1: Répartition des grandes cultures	3
Figure 2: Calendrier des cultures	3
Figure 3: Producteurs céréaliers dans le monde.....	4
Figure 4: Photographies vente en ligne balles de pailles, <i>La Balle Ronde</i>	5
Figure 5: Pellets de paille de blé	5
Figure 6: Farine de paille de blé, <i>Alda</i>	5
Figure 7 : Déroulage des balles de paille, pellicule recouvrant le panneau, panneaux de paille, installations des panneaux en paroi dans une structure métallique	6
Figure 8 : Echantillon d'un panneau de <i>Stropoly</i>	6
Figure 9 : Panneaux de paille, brique de panneaux de paille, " <i>Maison de paille</i> " en Suisse	7
Figure 10 : Panneaux en paille de riz destiné à la construction d'habitat et de meuble	8
Figure 11 : <i>Quad</i> , Mur de <i>Quads</i>	8
Figure 12 : <i>Hemp chair brute et teintées</i>	8
Figure 13 : Différentes granulométries de fibres, <i>Fiberboards</i>	9
Figure 14: Paille de chanvre, différentes épaisseurs de brique, montage du mur et esthétique final	9
Figure 15: Produits 1, 2 et 3: différentes granulométries de flocons de paille.	11
Figure 16: Différence de densité : $d(P1)=0.46g/cm^3$, $d(P2)=0.54g/cm^3$, $d(P3)=0.23g/cm^3$	12
Figure 17: Echantillons <i>P1(35)-Eau</i> , <i>P2(35)-Eau</i> et <i>P3(35)-Eau</i>	12
Figure 18: Ingrédients : 25mL de vinaigre d'alcool, 400mL de lait chaud et 1cc de Bicarbonate de soude... 13	13
Figure 19: Séparation du lait en deux phases.	13
Figure 20: Filtration de la caséine.	13
Figure 21: <i>P1(75)-Cdl</i> , <i>P1(50)-Cdl</i> et <i>P1(25)-Cdl</i> , proportions en fonction de la masse.	14
Figure 22: <i>P1(75)-Cdl</i> , <i>P1(50)-Cdl</i> et <i>P1(25)-Cdl</i> , après 48h de séchage.....	14
Figure 23: Ensemble des échantillons ayant la colle de lait pour liant.	14
Figure 24: <i>P1(30)-Cdl</i> , <i>P2(30)-Cdl</i> , <i>P1(45)-Cdl</i> , trois mélanges le plus envisageable.	14
Figure 25: Panneau sandwich combinant 2 biocomposites.	17
Figure 26 : Sonde <i>FP2C</i> Appareil de mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud.	17
Figure 27 : Disposition de la sonde entre deux parties identiques d'un matériaux.	17
Figure 28 : Stabilisation de la température du dispositif pour l'échantillon <i>P1(35)-Eau</i>	18
Figure 29 : Courbe d'évolution de la température du dispositif pour l'échantillon <i>P1(35)-Eau</i>	18
Figure 30: Comparaison de la courbe des valeurs moyennes de <i>P1(35)-Eau</i> et de celle de <i>P1(45)+Cdl</i>	18

¹ *Caractéristiques dominantes*, Chambres d'Agriculture Ile -de-France cf ²

² Chambres d'Agriculture Ile -de-France cf ²

³ "Alignement d'herbe, de foin ou de céréales que le faucheur ou la machine laisse au fur et à mesure qu'avance le travail. Bande de branchages et de rémanents constituée à l'occasion d'une coupe ou du dégagement d'un terrain à reboiser", Larousse.

⁴ Le rapport C/N ou rapport carbone sur azote est un indicateur qui permet de juger du degré d'évolution de la matière organique, c'est-à-dire de son aptitude à se décomposer plus ou moins rapidement dans le sol, Wikipédia.

⁵ agriculture-de-conservation.com, "Combien d'azote risque d'être mobilisé pour la décomposition des pailles ?", Frédéric Thomas article en ligne

⁶ Calendrier des cultures , *Filières agricoles ›Grandes Cultures*, Agricultures et Territoires, Chambres d'Agriculture Ile -de-France, *ile-de-france.chambagri.fr*, consulté le 10 Octobre 2016.

⁷ *Building from Waste*, Strohhaus, p.52, 2014.

⁸ *Building from Waste*, Enviro Board (E-board) p.50, 2014.

⁹ *California Agricultural Magazine*

¹⁰ *Building from Waste*, Stawjet, p.54, 2014

¹¹ arb.ca.gov, Reducing Air Pollution - ARB (Air Resources Board) Programs, consulté le 18.10.2017

¹² Données ADEME, Déchets 2014, Chiffres Clés, 1.2 : La production de déchets en France , p.13

¹³ Données Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, Déchets du bâtiment- Bâtiment et ville durables, 24 novembre 2010 (mis à jour le 3 mai 2016)

¹⁴ www.laballeronde.fr

¹⁵ Société charnière entre cultivateurs et éleveurs transformant la matière première en poudre.

¹⁶ *Building from Waste*, "Enviro Board", *Densified waste materials*, p.51

¹⁷ "About 46% of all solid waste-products worldwide (number of 2009 data) can be clasified as organic substances coming from agriculture production, *Building from Waste*, Enviro Board (E-board) p50, 2014

¹⁸ stropoly.com, consulté le 01 Novembre 2018

¹⁹ Güstrow: Plattenwerk Stropoly startet Betrieb, 23 Juin 2003, news.bio-based.eu, consulté le 01 Novembre 2018

²⁰ *Strohbauplatte Trockenbau mit Strohplatten*, article en ligne consulté le 15/11/2018, oekologisch-bauen.info/baustoffe/trockenbaustoffe/strohbauplatte

²¹ *Building from Waste*, "Strohhaus", *Densified waste materials*, p.53

²² *Rice Straw Power Project*, ricestrawpower.eu, Hans Lothar Köhl, 17.05.2017, dossier de présentation disponible sur Internet sous format PDF : https://start-green.net/media/filer_public/0e/b6/0eb6f0e9-a640-47ee-a7f3-349deab2fac9/rice_straw_power_concept.pdf

²³ *Building from Waste*, "Strawjet", *Densified waste materials*, p.54

²⁴ " *Building Sustainable Futures, the Strawjet System*", Mark Weir, PDF mis en ligne, consulté le 18/10/2017

²⁵ *Hemp Chair by Werner Aisslinger*, 07/2011, projet consulté sur le site internet Home Building Life, wgsn-hbl.blogspot.fr

²⁶ *Building from Waste*, "Agricultural waste panel", *Reconfigured waste materials*, p.80

²⁷ Partie ligneuse du chanvre, qui subsiste après qu'on a enlevé la filasse

²⁸ construireco.org/briques-de-chanvre/produits,

²⁹ Livret de présentation, Salon *JEC Europe : Composites show and conferences*, Pôle IAR, *Intégrez des produits biosourcés dans vos composites Focus sur les résines biosourcées et les fibres naturelles*, Paris, Mars 2014.

³⁰ Résine de coulée et de stratification, Bioresin

³¹ fournisseur de solutions et produits issus de bioraffinerie transformant les matières premières végétales : maïs, blé, pomme de terre, pois...

³² www.space.fr/InnovSpace/laureats.aspx, site InnovSpace 2017, catégorie lauréats Bovin au concours Innov'Space 2017." Le SPACE est un Salon professionnel de l'agriculture qui réunit tous les acteurs des filières bovine (lait et viande), avicole, porcine, cynicole, ovine et caprine."

³³ wikihow.com "Faire de la colle à partir du lait", consulté le 25 Octobre 2017

³⁴ espace-sciences.org/juniors/experiences/ "La colle faite maison", consulté le 2 Janvier 2018

³⁵ Produit obtenu par caillage du lait écrémé et déshydratation de la

caillebotte. (La caséine est utilisée dans l'industrie du papier et des colles, dans la fabrication d'apprêts pour textiles, de mouillants pour insecticides, d'aliments du bétail, etc.), définition Larousse.

F1(45)-CAS

F1(65)-EAU