

Mémoire de Master

Jordan CIESKI

ENSA PARIS-MALAQUAIS

**MATERIAUX BIOSOURCÉS, COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE
D'UNE PAROIS EN BÉTON DE CHANVRE.**



Séminaire d'AMC2

Robert LEROY, Professeur HDR

Leda DIMITRIADI, Maître assistante

Table des matières

1. Les matériaux biosourcés dans la construction.....	5
1.1 Histoire et contexte actuel.....	5
1.1.1 Histoire	
1.1.2 Contexte actuel	
1.1.3 Protagonistes de la filière	
1.2 Les matériaux biosourcés utilisés dans la construction.....	8
1.2.1 D'où viennent-ils ? En quelle quantités ?	
2. Le chanvre dans la construction.....	11
2.1 Histoire et contexte actuel.....	11
2.1.1 Histoire	
2.1.2 Production	
2.2 Caractéristiques du béton de chanvre.....	13
2.2.1 Composition du béton de chanvre	
2.2.2 Propriétés mécaniques du béton de chanvre	
2.2.3 Propriétés thermiques du béton de chanvre	
2.2.3.1 Conductivité thermique	
2.2.3.2 Etude expérimentale de la conductivité thermique	
2.2.4 Propriétés hygroscopique du béton de chanvre	
2.2.4.1 Adsorption et désorption de la vapeur d'eau	
2.2.4.1 Perméabilité à la vapeur d'eau	
3. Expérimentation d'une paroi en béton de chanvre.....	25
3.1 Protocole expérimental, expérience.....	25
3.2 Résultats, analyse.....	28
4. Application du chanvre aujourd'hui.....	31
5. Conclusion.....	32

1. Les matériaux biosourcés dans la construction

1.1.1 Histoire

Le végétal dans la construction ne date pas d'aujourd'hui, en effet, nous pouvons remonter jusqu'à la période paléolithique où dès lors que l'homme a eu besoin de se protéger des contraintes environnementales (climat, animaux...) l'utilisation du végétal est apparue comme une solution pragmatique.

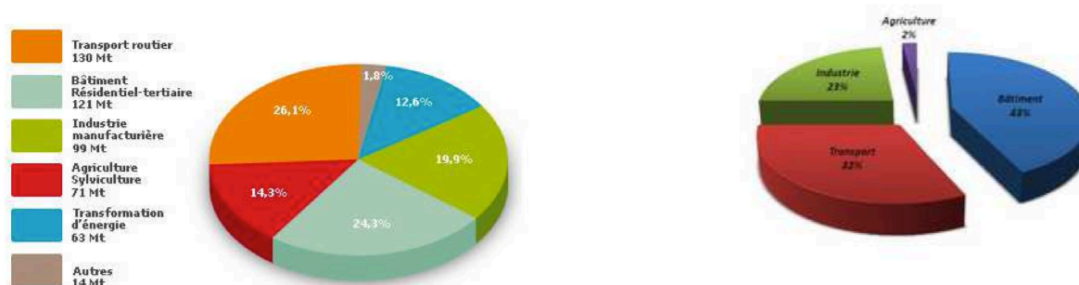
Pouvant ainsi le découper, l'assembler et autres, les hommes ont commencé à construire des huttes réalisées à partir de peaux de bêtes, de pailles, de branches. Ce n'est réellement qu'à l'époque néolithique que va apparaître les premières réalisations en torchis à base de terre, de fibres végétales et d'animaux.

Cependant, le végétal au fur et à mesure des siècles tend à se faire de plus en plus rare. En effet, la pierre, l'argile et le bois sont utilisés de plus en plus dans la construction à défaut du végétal qui lui ne permet pas de réaliser des édifices toujours plus grands.

D'un point de vue contemporain, le premier choc pétrolier de 1973 a permis de remettre en question l'utilisation des ressources fossiles par l'homme. À partir de ce moment, le retour du végétal dans la construction a fait l'objet de recherches pour le développement de future manière de construire.

1.1.2 Contexte actuel

De nos jours nous savons qu'un changement climatique s'opère. C'est un enjeu mondial, chaque pays est concerné par cette transformation. Les gaz à effet de serre notamment le CO₂ sont l'une des principales causes de ce réchauffement.



Les consommations énergétiques et les émissions de CO₂ pour différents secteurs économiques¹

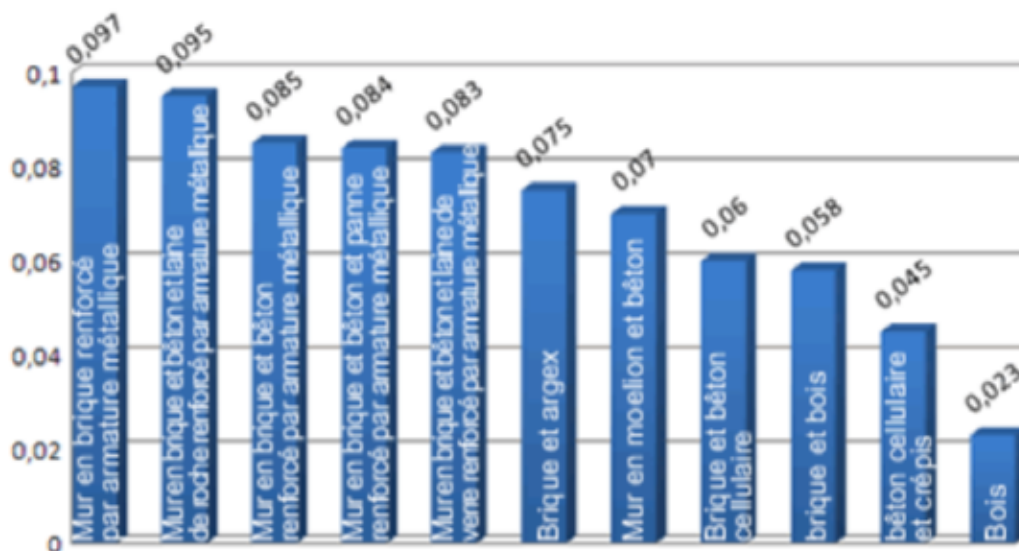
¹ Source ADEM

D'après ces figures, nous constatons que le secteur du bâtiment est responsable de 43% de l'énergie totale et de 24,3 % des émissions nationales de CO2.

Afin de réduire ses chiffres, le gouvernement français a instauré un nombre de formes à établir lors de la construction d'un bâtiment. La norme HQE qui propose une méthode pour toutes les étapes de la construction, la durée de vie, la démolition. Afin de réduire la consommation énergétique d'un bâtiment, un label a été créé, il s'agit du BBC (Bâtiment Basse Consommation) qui est définie selon un certain nombre de règles afin d'établir des constructions neuves avec une consommation de 50kWh/m²/an.

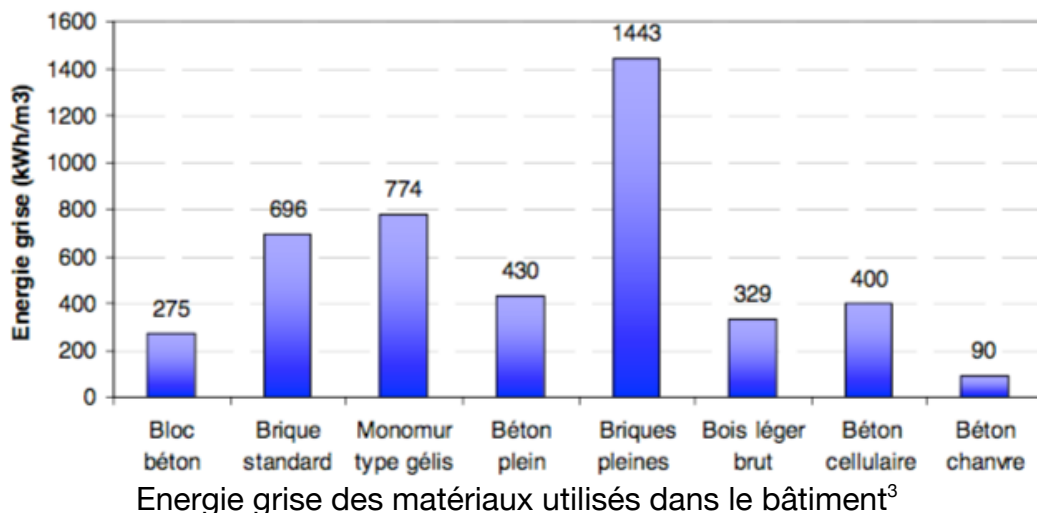
Face à ces problèmes environnementaux, il s'agit aujourd'hui de choisir des matériaux adéquats afin de limiter l'impact environnemental et d'avoir un certain confort. Ainsi, un choix s'opère, fondé sur l'économie, qu'elle soit financière ou énergétique, sur l'esthétique et sur l'impact environnemental. Cet ensemble de critères définit le cycle de vie d'un matériau. Les matériaux biosourcés présentent plusieurs avantages en réponse à ses préoccupations. Ils sont renouvelables, recyclables et durables. Ce sont des ressources abondantes, contrairement au pétrole, au gaz ou au charbon, les matériaux biosourcés sont des végétaux, par conséquent ils se renouvellent de saison en saison et sont donc inépuisables.

Emissions indirectes de gaz à effet de serre par unité de surface de mur extérieure



Emissions de gaz à effet de serre par unité de surface de mur extérieure²

² Réduction des émissions de gaz à effet de serre et flux de matière – analyse de système des logements, 1ere partie, Institut de Wallon, 2000.



La production est très faible, son énergie grise est de 90KWh/m³, cela peut s'expliquer du fait de son faible coup en transport en favorisant la production locale. La réduction des gaz à effet de serre est un autre avantage des biosourcés. En effet, les émissions engendrées par des matériaux végétaux sont nettement plus faibles, durant leur croissance, ils absorbent, le CO₂ présent dans l'atmosphère.

Or, si l'on constate un intérêt particulier pour cette méthode, le constat en terme de production en est tout autre. En effet, le début du 21^e siècle ne dresse pas un tableau très vaste des édifices construits à base de végétaux. Une poignée de population dans les zones les plus retirées construit encore avec les végétaux de façon très traditionnelle car ils sont protégés de la société économique qui nous entoure.

En ce qui concerne la France, le constat est pauvre, l'application du végétal dans la construction se limite à une quantité très faible de matériaux comme l'ouate de cellulose, laine de chanvre fibre du bois, laine de lin ou encore béton de chanvre, bottes de paille, béton de bois. Ces derniers représentent à eux seuls 25% du marché des bétons légers selon une étude réalisée par le cabinet Nomadeis en 2012 pour le compte du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Toujours selon cette étude, les produits biosourcés isolant représentent 6 à 8% soit 90 à 120 millions d'euros par an contre 47 à 49 % pour les laines minérales, 40% pour les panneaux en polystyrène.

1.1.3 Protagonistes de la filière

³ <http://www.citemaison.fr/scripts/bibliotheque-materiaux.php>

Si la construction biosourcée ne fleurit pas de partout, cependant des chercheurs, associations et autres entreprises de construction mènent en France depuis une vingtaine d'années des améliorations en terme de solution scientifique et technique notamment en 1998, l'association « Construire en chanvre » l'une des principales associations de développement du chanvre dans la construction. Voyant l'essor possible grâce à ses matériaux et en vue d'une amélioration de la qualité de vie de nos bâtiments, la France fin 2012 a créé son premier label « bâtiment biosourcé » afin de stimuler l'utilisation de matériaux biosourcés dans le bâtiment. Ainsi, ce label a permis en partie à des acteurs tel que le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment) de pouvoir mettre au moins des démarches de normalisation de ses produits grâce à un processus d'évaluation technique.

On note donc pour l'instant un grand acteur de la filière, celui de l'enseignement et de la recherche, mais il ne faut pas oublier également ceux qui sont à la base de tous les acteurs du monde agricole, les acteurs du bâtiment et de la construction et enfin les associations dont le C&B (Construction et bioressources) qui est l'une des associations les plus importantes du mouvement.

1.2 Les matériaux biosourcés utilisés dans la construction

1.2.1 D'où viennent-ils ? En quelle quantités ?

Tout d'abord, afin de tirer au maximum les bénéfices de ces matériaux biosourcés, il faut en extraire les fibres. Les fibres végétales sont des expansions cellulaires mortes composées dans leur majorité de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et de pectines.

En ce qui concerne l'Europe, les fibres sont issues pour la plupart de la tige des plantes. La tige est composée en 4 parties cf schéma 1

La récolte nécessite de l'énergie, mais à besoin d'un matériel industriel lourd car toute la plante que ce soit le lin ou le chanvre est valorisée. Dans la majeure partie des cas, pour le chanvre, il est récolté à la moissonneuse-batteuse, puis les pailles sont fauchées et conditionnées en balles et stockées chez les producteurs. Les procédés de défibrage sont totalement mécaniques, sans traitement chimique. C'est une technique propre, sans déchets, et peu gourmande en énergie mais qui demande un outillage performant pour obtenir une productivité suffisante.

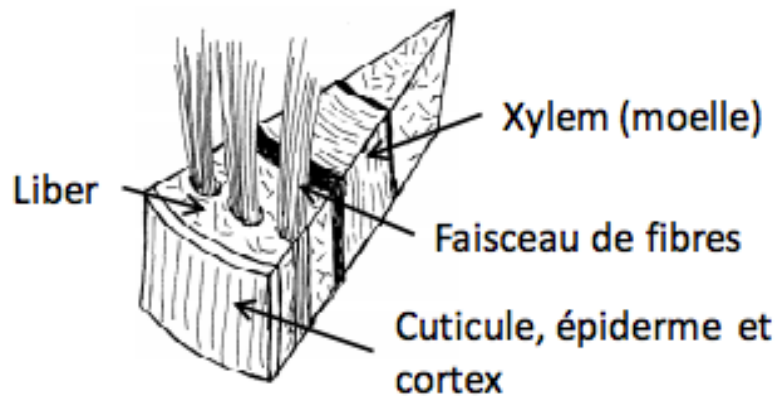
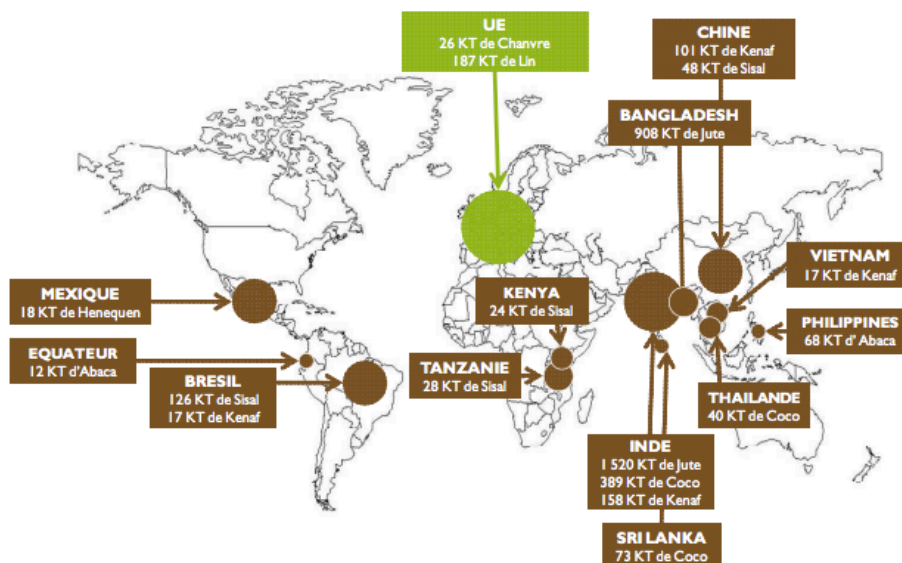


Schéma 1. Coupe schématique d'une tige de lin⁴

En résumé, les fibres végétales possèdent des propriétés intrinsèques qui donnent lieu à des performances très intéressantes d'un point de vue matériel, notamment au niveau mécanique, thermique et de densité. Nous étudierons ses propriétés plus spécifiquement pour le chanvre plus tard.

Afin de se rendre compte des quantités de fibre végétale produites, je me suis basé sur l'étude réalisée par FRD pour le compte de l'Ademe sur la disponibilité en fibres végétales. La production de ses fibres s'élève à environ 6 200 KT selon FRD hors coton et bois. Les fibres les plus produites sont issues de la culture du jute puis viennent le coco et le lin avec 16 et 13% de la production mondiale, le chanvre arrive en 8e position.

En ce qui concerne l'Europe, elle produit essentiellement la fibre de lin et de chanvre 114 00 hectares par an en moyenne (2001-2008)



Répartition de la production mondiale de fibres végétales⁵

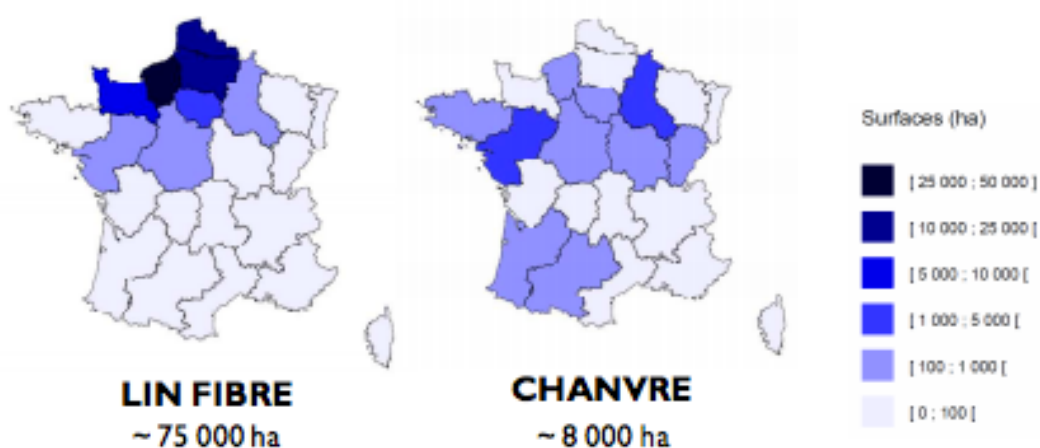
⁴ Source FRD

⁵ Source FRD

Et plus particulièrement la France qui elle est le premier producteur de lin en Europe avec près de 80% de la surface européenne et 56% pour le chanvre. En somme, la France apparaît comme le leader de la fibre végétale ces dernières années avec ses 169 000 tonnes de fibres.

Cependant, cela n'a pas toujours été le cas, en effet depuis le 19e siècle l'évolution de la surface implant est en chanvre et en lin est en déclin. Alors qu'en 1862 nous avons un totale de 205 000 ha, nous sommes passés en 1911 à 40 000 ha comme évoqué précédemment la chute pétrolière a créé un regain pour les matériaux biosource et on se rend compte qu'à partir des années 70 et jusqu'aux années 2000 nous sommes repassés au-dessus de la barre des 65 000 ha.

Toujours d'après l'étude du FRD, on se rend compte que la production principale de lin se fait dans le nord de la France sur la bordure côtière de la Normandie tandis que la production de chanvre est répandue sur l'ensemble du territoire. On compte d'ores et déjà plus de 1 000 producteurs de chanvre et 6 000 producteurs de lin.



Répartition sur le territoire des plantes a fibre

2. Le chanvre dans la construction

2.1 Histoire et contexte actuel

2.1.1 Histoire

« Le Chanvre est une très ancienne culture française, antérieure au Moyen Age. Chaque ferme possédait sa chènevière, située sur les meilleures terres qui bénéficiaient d'une partie des engrais organiques, pour les besoins personnels des exploitants. Tout était utilisé dans cette plante, cultivée dans toutes les régions : la graine (chènevis) pressée donnait de l'huile pour l'éclairage, la fabrication de glu, de savon et plus tard de peinture (son utilisation alimentaire a toujours été très localisée) ; le tourteau résiduel servait à l'alimentation animale ; la tige, défibrée, produisait de la filasse permettant la fabrication de ficelles et cordages ou, après filage et tissage, la confection de toiles plus ou moins fines ; la marine à voile et les armées furent les plus importantes consommatrices du chanvre (cordes, élingues, voiles, sacs, tentes, vêtements, colmatage des coques, filets de pêche, sellerie, etc...). La chènevotte, cellulose à pouvoir calorifique, située à l'intérieur de la tige, servait à aviver le feu de l'âtre des domiciles ou des ateliers ; elle permit la fabrication d'allumettes soufrées. »⁶

Cet extrait permet de mettre en exergue toutes les capacités du chanvre dans la production et nous permet de nous rendre compte que la production de chanvre ne date pas d'aujourd'hui. En effet, cette culture date depuis le 19e siècle et avait quasiment disparu en Europe en 1960. En effet, la disparition de la marine à voile et la concurrence des fibres synthétique a contribué à la disparition du chanvre dans la production manufacturée. Aux États-Unis, la culture en est même interdite, suivi par la majorité des pays occidentaux excepter la France. Ainsi, la culture ne disparaît pas complètement mais elle est règlementée suivant une qualification de variété cultivable. Avec près e 10 000 ha ensemencés chaque année, La CCPSC (Coopérative Centrale des producteurs de Semences de chanvre), membre de CenC (Construire en chanvre), est pratiquement le seul producteur de semences européen, le taux de THC ne devant pas dépasser 0,2%. Le THC était l'agent psychotrope du cannabis. Le nom botanique du chanvre est Cannabis, connu pour son usage dévastateur et inapproprié a la construction.

⁶ Extrait de : « Le Chanvre en France » – Auteur : Henri Alain Ségalen – Editions du Rouergue

2.1.2 Production

Selon le Conseil national de recherche du Canada, un champ de chanvre industriel absorbe « *cinq fois plus de dioxyde de carbone qu'un boisé de même superficie et cette culture pourrait jouer un rôle important dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre.* »

En effet, la culture du chanvre ne nécessite aucun pesticide, et n'a pas besoin de traitement phytosanitaire, ni d'irrigation. L'un des principaux avantages de cette culture est son système racinaire qui permet d'améliorer la structuration des sols et aura un ensemble bénéfique sur la rotation. Ainsi, cela permet de diversifier les assolements et d'allonger les rotations, mais aussi de diminuer la pression parasitaire et mieux valoriser la condition agronomique locale. Cette plante n'a pas besoin de condition climatique particulière, elle peut s'adapter à tout type de territoire.

En matière de chiffre, capable de produire dix tonnes de matières sèches par hectare en quelques mois, le chanvre permet également de fixer durablement 15 tonnes de CO₂ dans les fibres végétales et de lutter contre l'augmentation de l'effet de serre. En somme, un mètre carré de mur en mortier de chanvre permet de stocker 35 kg équivalent CO₂

Le rendement de la paille est de 7 tonnes /ha. Le cycle court de 100 jours est très intéressant pour les agriculteurs car il est court et la plante est entièrement valorisée. Le point noir de cette culture serait la récolte, en effet, entièrement mécanisée, avec un matériel non adapté ou ancien, les fibres peuvent casser lors du passage de la moissonneuse-batteuse. Fort heureusement, à ce jour, les machines sont de plus en plus performantes et utilisent peu d'énergie et permettent de produire une quantité suffisamment importante.

Après cette première récolte, on peut distinguer différentes parties de la récolte. La première était les fibres de chanvre, puis la chènevotte et enfin la poudre (cf. Figure 1)

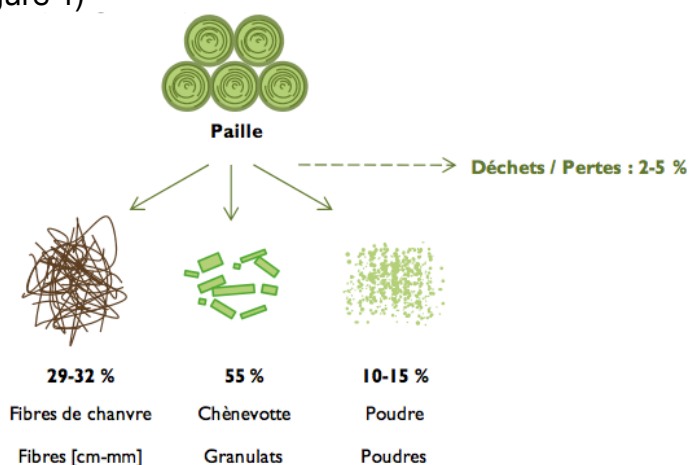


Figure 1 - Produit et rendements obtenus après transformations⁷

⁷ Source FRD

L'énergie grise, est l'énergie nécessaire produite à la fabrication d'un bien, depuis la récolte pour le chanvre ou l'extraction pour les matériaux synthétiques, en passant par la phase de transformation puis la commercialisation et enfin son élimination.

Ainsi, il apparaît nécessaire de vérifier si l'énergie consommée à la fabrication à base de chanvre est réellement plus faible que celle consommée pour fabriquer des matériaux traditionnels équivalent.

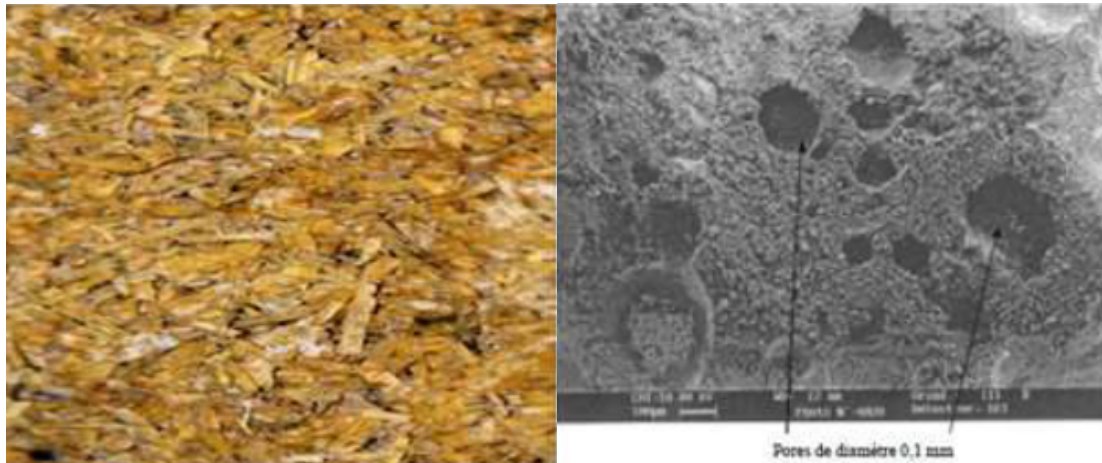
Comparons deux matériaux, la laine de chanvre et la laine de verre qui ont à peu près les mêmes caractéristiques isolantes. 0,032 à 0,044 pour la laine de verre et 0,038 à 0,045 pour la laine de chanvre. Ainsi, l'énergie produite pour faire fondre le verre est beaucoup plus importante que celle produite pour la transformation des pailles pour le chanvre. En effet, l'énergie grise de la laine de chanvre s'élève à 35 kwh /m³ alors que celle de la laine de verre s'élève à 250 kwh /m³. On remarque donc que la laine de verre a besoin de 6 fois plus d'énergie pour être produite que la laine de chanvre. Soit pour un coefficient de 100 kwh = 0,086 TEP (tonne équivalent pétrole) la consommation d'un mètre cube de laine de chanvre nécessite 3,01 kg équivalent pétrole contre 21,5 kg équivalent pétrole.

On remarque donc par cet exemple que les matériaux biosourcé nécessitent beaucoup moins d'énergie grise pour leur transformation que des matériaux synthétiques. L'apport de matériaux performant sur le marché est un fait qu'il soit biosourcée ou non, mais si le cout de production de ses matériaux revient à augmenter pour être plus efficace, le développement durable ne sert à rien. Cela revient à créer des problèmes pour en compenser d'autre. Le cas des matériaux biosources résout en partie ce problème en étant performant la ou les matériaux synthétiques ne le sont pas c'est-à-dire à la transformation.

2.2 Caractéristiques du béton de chanvre

2.2.1 Composition du béton de chanvre

Le béton de chanvre est un matériau qui possède une forte porosité. Il est obtenu de grâce au mélange de chaux de chènevotte et d'eau. Ce mélange compte donc plusieurs tailles de pores. On retrouve, les macropores d'environ 1 centimètre de diamètre qui sont dus à l'agencement des particules de chanvre. Les mésopores de 0,1 à 1 mm qui se trouve au sein du liant et enfin les micropores qui elles sont inférieures à 0,01 µm se trouvant dans la matrice du liant...



Porosité macroscopique

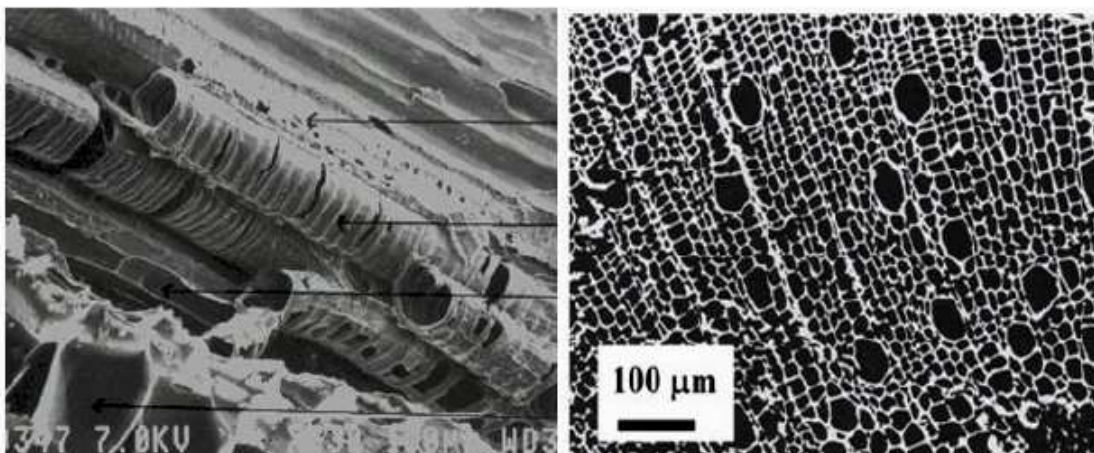
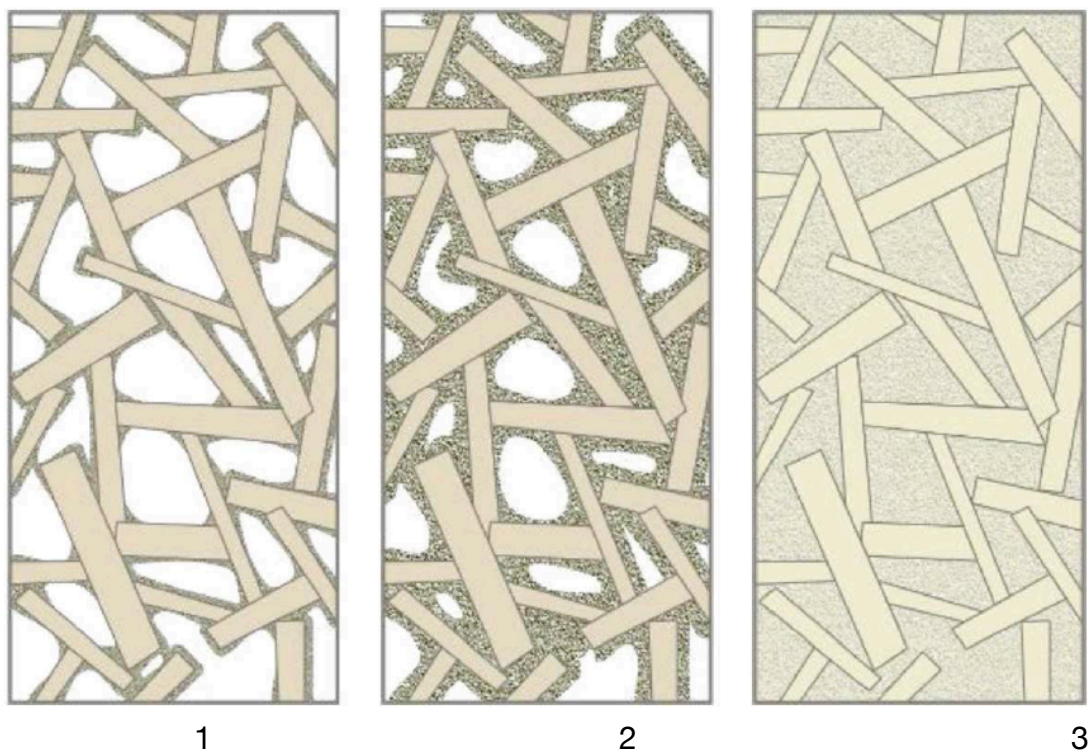


Image microscopique électronique d'une particule de chanvre⁸

La chaux utilisée en majorité est une chaux aérienne Ca(OH)_2 puis une chaux hydraulique. Ce matériau est utilisé dans la construction de béton de chanvre, car il a la capacité de récupérer le CO_2 lors de sa mise en oeuvre. Le liant T70 se compose par exemple de 30% de chaux hydraulique et de chaux aérien. On sait que les performances mécanique et hygrothermique sont liées au dosage en chaux. Plus le dosage en liant est grand, plus la conductivité thermique sera grande. En effet, les particules de béton de chanvre se retrouvent noyées dans la chaux ce qui impacte la capacité d'isolation thermique.

De ce fait de précédente recherche, on permet d'établir des formulations de béton de chanvre, « toit », « dalle », « mur », « enduit ». Chaque dosage, est établie en fonction de l'utilisation que l'on veut en faire.

⁸ (Garcia-Jaldon, 1995)



Représentation schématique des formulations « toit » (1), « mur » (2), « Enduit » (3)⁹

Pour 1 m ³	Chênevotte (kg)	Liant (kg)	Sable (kg)	Eau (kg)
« Toit »	130	110	-	225
« Mur »	130	220	-	350
« Sol »	130	275	-	500
« Enduit »	130	485	160	650

Exemple de dosage tiré des « règles professionnelles d'exécution en béton de chanvre »¹⁰

Lors de mon expérience, je me suis fondé sur les données fournies dans ce tableau afin d'avoir les proportions exactes pour la réalisation d'une formulation de type « mûr » en utilisant la chaux prédéfinie par les règles, la Tradical 70.

2.2.2 Propriétés mécaniques du béton de chanvre

On sait maintenant que l'utilisation du béton de chanvre se fait dans plusieurs cas, que ce soit pour les murs la toiture, etc, il est appliqué dans la construction neuve ou dans la rénovation, remplissage, élément préfabriquée brique, bloc de béton de chanvre... ainsi, nécessaire faut faire un point dans

⁹ Evrard, 2008

¹⁰ RP2C (2007)

ses propriétés mécaniques. En effet, elles sont définies par les charges appliquées aux matériaux. On note que des recherches précédentes (Arnaud et al, 2001 ; Cerezo, 2005) ont pu nous donner des réponses concernant ces contraintes.

Rappelons brièvement les principales formules qui permettent de calculer les propriétés mécaniques du béton. Tout d'abord, la contrainte en traction et compression en MPa:

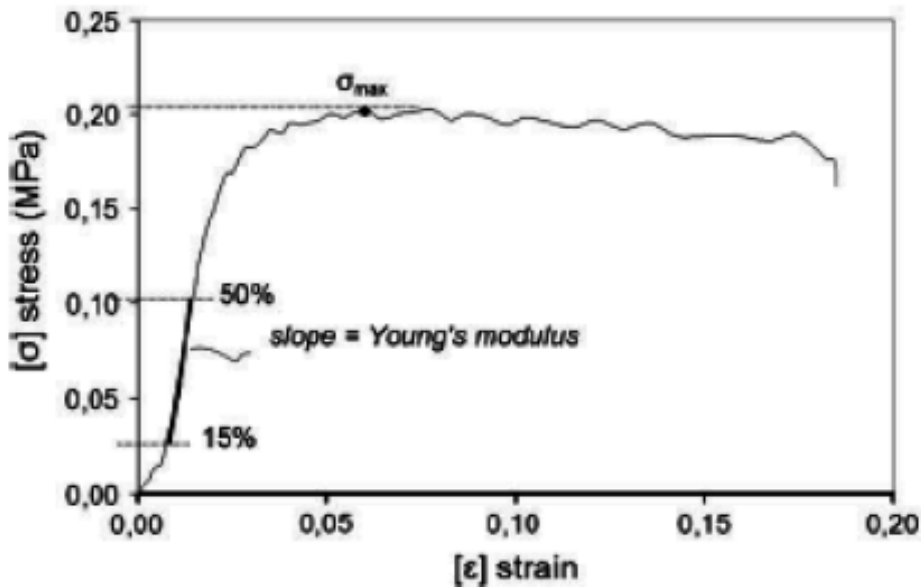
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

On retrouve F et A qui représente la force (N) et la section de l'échantillon (mm²)

Deuxièmement, le module de Young E calculé selon la déformation et la contrainte à partir de la loi d'Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Où ε est calculée en divisant l'allongement par la longueur initiale



Courbe contrainte déformation pour le spécimen A¹¹

Les recherches précédentes, ont permis de mettre en avant le fait que le béton de chanvre a un comportement élastoplastique non fragile et une forte déformabilité sous contrainte. Il a la capacité à reprendre les efforts même

¹¹ Bruijn et al, (2009)

après avoir atteint la résistance mécanique maximale comme on peut le voir sur la figure ci-dessus.

On remarque aussi que le liant a son impact sur les capacités mécaniques du béton de chanvre. En effet, les résultats obtenus par Cerezo (2005) montre que les propriétés dépendent de la concentration volumétrique en liant, et varie de 0,25-1,25 MPa pour la résistance en compression, et de 4 à 160 MPa pour le module de Young.

Dosage en liant	Concentration volumique liant	ρ (kg/m ³)	σ_{\max} de compression (MPa)	E (MPa)	$\epsilon_{\sigma\max}$	ν
Faible	10 %	250	0,25	4	0,15	0,05
Intermédiaire	19-29 %	350 - 500	0,35-0,8	32-95	0,05-0,06	0,08-0,16
Fort	40 %	600- 660	1,15	140-160	0,04	0,2

Caractéristiques mécaniques du béton de chanvre pour différents dosages en liant¹²

2.2.3 Propriété thermique du béton de chanvre

2.2.3.1 Conductivité thermique du béton de chanvre

La conductivité thermique λ (W.m⁻¹.K⁻¹) caractérise la capacité isolante thermique d'un matériau, plus précisément, la quantité de chaleur qui se propage par conduction thermique en son sein par unité de surface et de temps lorsqu'il est soumis à un gradient de température de 1 degré par mètre. Plus le coefficient λ est faible, plus le matériau est isolant.

Pour le béton de chanvre, la conductivité thermique dépend de plusieurs facteurs:

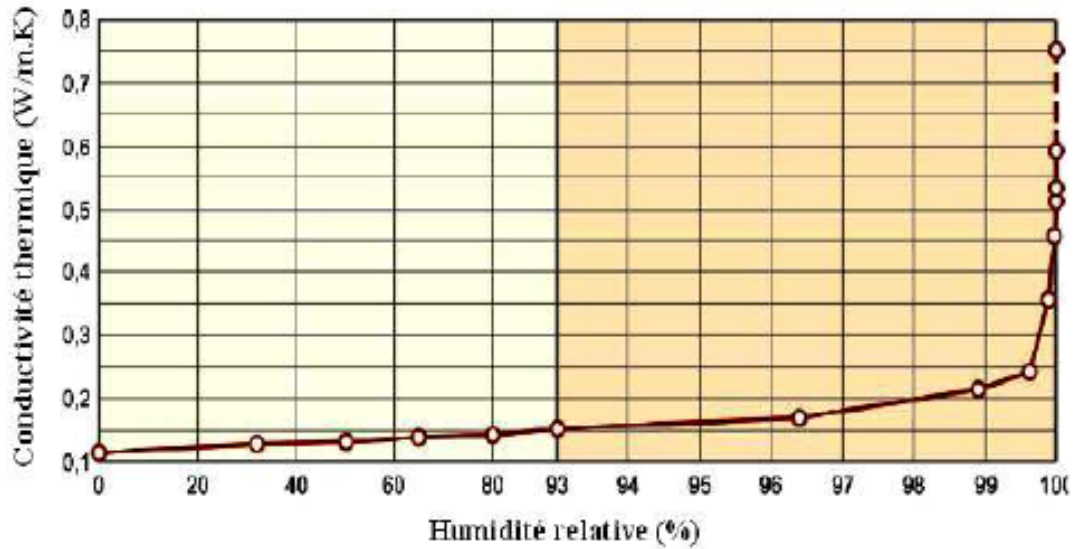
La nature et le dosage des matières premières

Le mode de fabrication de l'échantillon (force de compactage, distance de protection)

La teneur en eau du matériau.

D'après plusieurs études (Collet, 2004 ; Cerezo, 2005 ; Evrard, 2008), les résultats obtenus montrent que la conductivité thermique est impactée en fonction de l'hygrométrie du matériau.

¹² Cerezo, (2005)

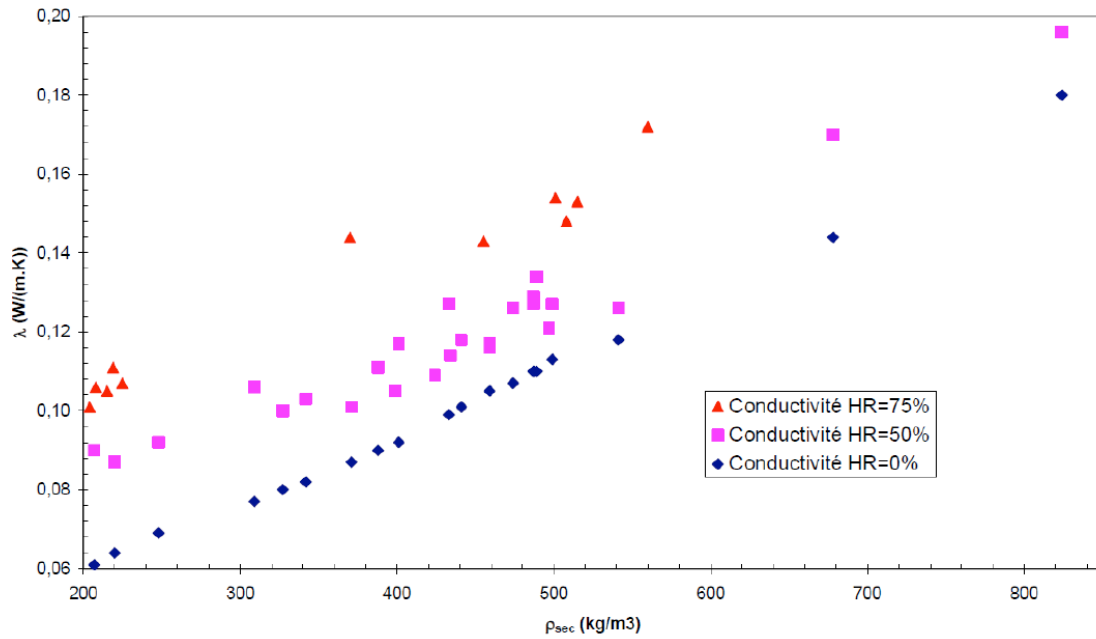


L'influence de l'humidité sur la conductivité thermique du béton de chanvre (LHMwall) soumis à HR=0 % et HR=100 %¹³

En principe, l'hygrométrie extérieure n'est pas prise en compte sur la conductivité thermique d'un matériau, cependant, comme le béton de chanvre a la capacité à échanger beaucoup d'humidité avec l'air, le phénomène de s'option physique peut modifier largement la conductivité thermique. L'air contenu dans les pores a un λ très faible ($0,0262 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) mais, est remplacé par de l'eau dont le λ est de $0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Ce phénomène est décrit dans la courbe ci-dessus. Les conductivités thermiques obtenues par Cerezo, pour une masse volumique sèche variée de 400 à 700 kg.m^{-3} , sont de $0,009$ à $0,16 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Selon Cerezo, pour les masses volumiques intermédiaires (ρ autour de 450 kg.m^{-3}), la conductivité augmente de 10% passant de $0,1$ à $0,11 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ entre HR=0 et HR=50 %. Elle atteint $0,13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour HR=75 %. Pour des faibles masses volumiques (ρ autour de 200 kg.m^{-3})

De ce fait de précédente recherche, on permet d'établir des formulations de béton de chanvre, « toit », « dalle », « mur », « enduit ». Chaque dosage, est établi en fonction de l'utilisation que l'on veut en faire.

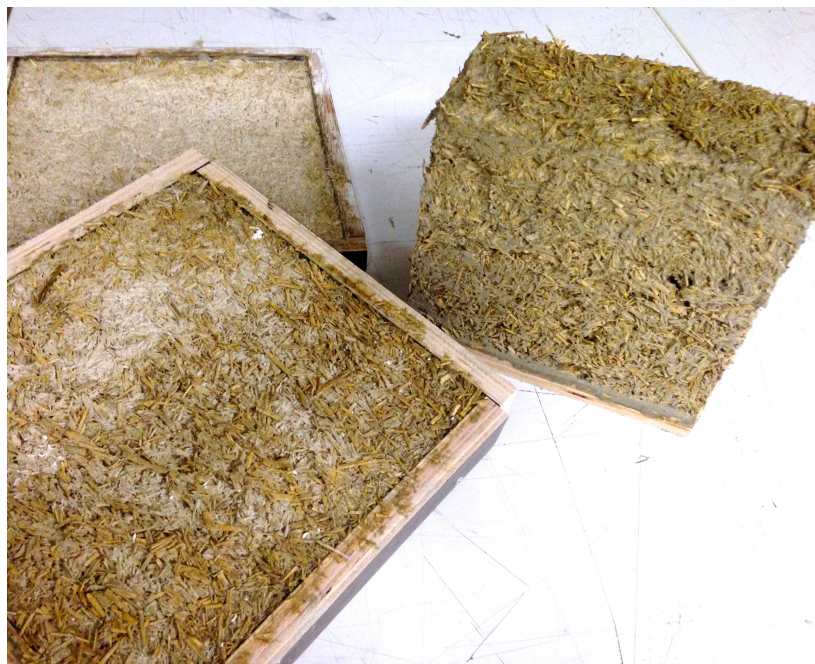
¹³ Evrard, (2008)



Impact de l'hygrométrie sur la conductivité thermique du béton de chanvre¹⁴

2.2.3.2 Étude expérimentale de la conductivité thermique

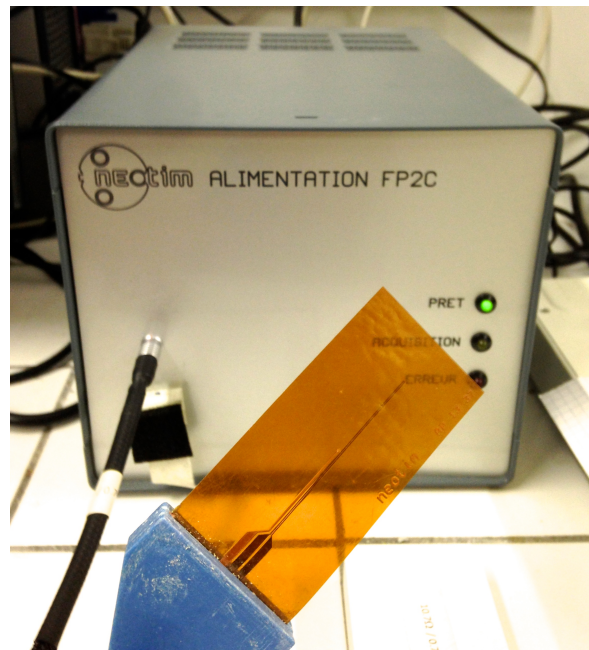
Après avoir réalisé des échantillons de béton de chanvre selon les dosages requis pour la formulation dite "mur", il s'agissait de calculer la conductivité thermique de mon matériau à l'École, des ponts sont grâce la méthode du fil chaud.



Photographie du béton de chanvre coulé J+5

¹⁴ Cérézo, (2005)

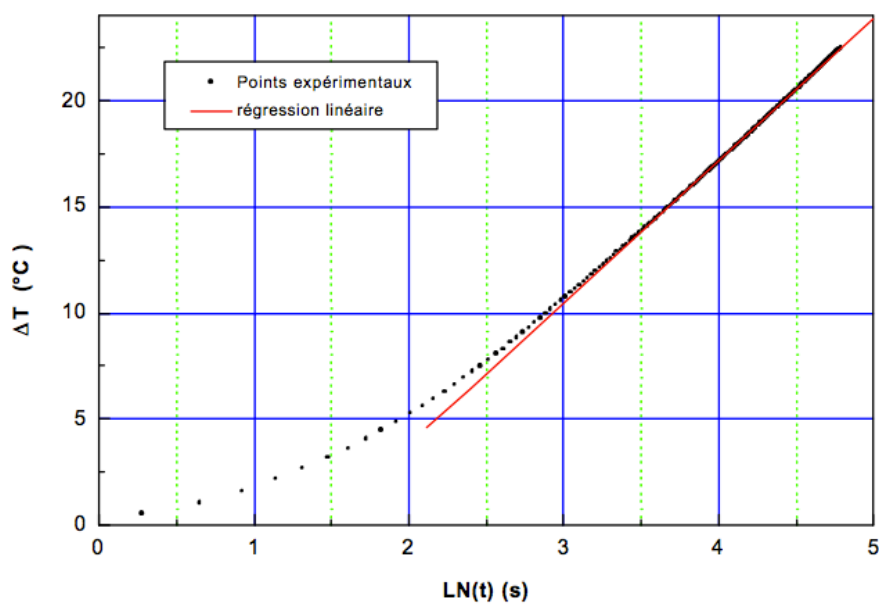
La méthode du fil chaud permet de déterminer la conductivité thermique du matériau. Le principe est de chauffer par effet joule un élément chauffant filiforme situé à l'intérieur du matériau que l'on désire caractériser et de mesurer l'élévation de la température au voisinage du fil par l'intermédiaire d'un capteur qui lui est associé (figure ci-dessous).

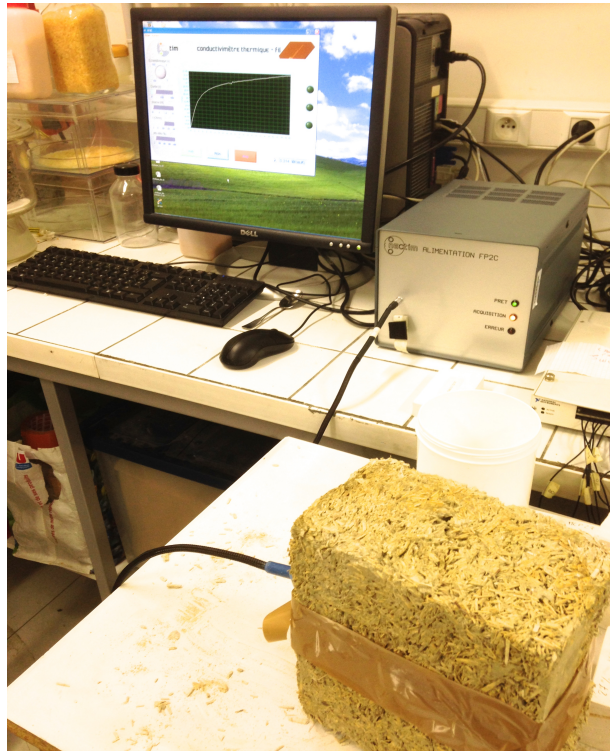


Sonde fil

La conductivité thermique est ensuite déterminée l'estimé à partir de la « pente » (α) du thermogramme aux temps longs

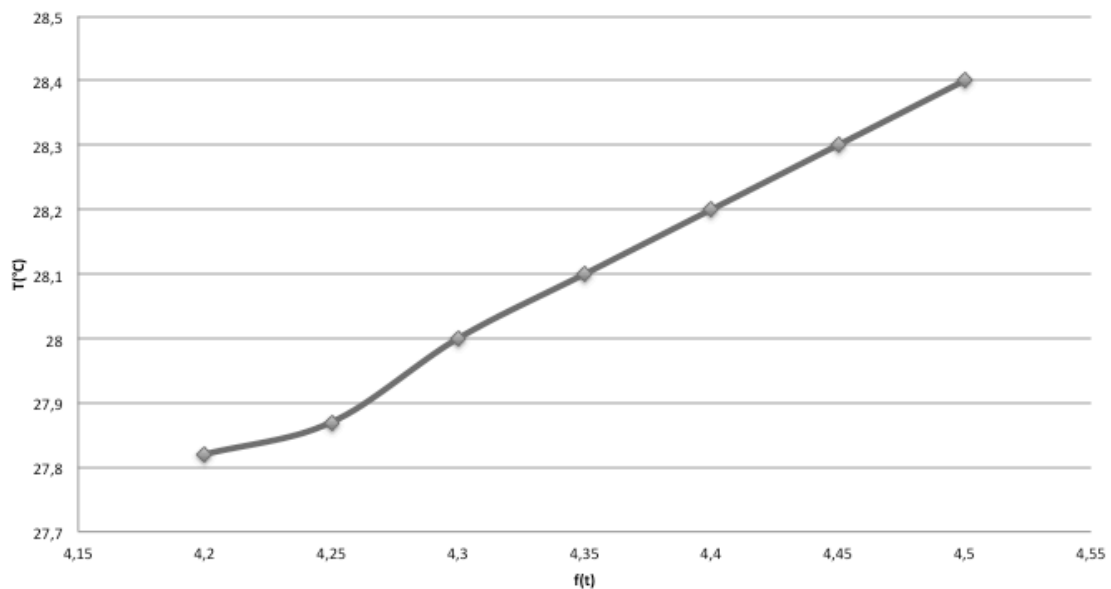
$$\Delta T(t) = \alpha \ln(t) + \beta \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{Q}{4\pi\alpha}$$





Bureau d'étude de la conductivité thermique

L'échantillon n'étant pas totalement dépourvu d'eau, la conductivité thermique est donc impacté.



Courbe de la température en fonction du temps

Sur une durée de 90 secondes avec une source à 0,25 W et un Radiant à 10,7 Ohms, la conductivité thermique obtenue est de $\lambda = 0,152 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

2.2.4 Propriétés hygroscopiques du béton de chanvre

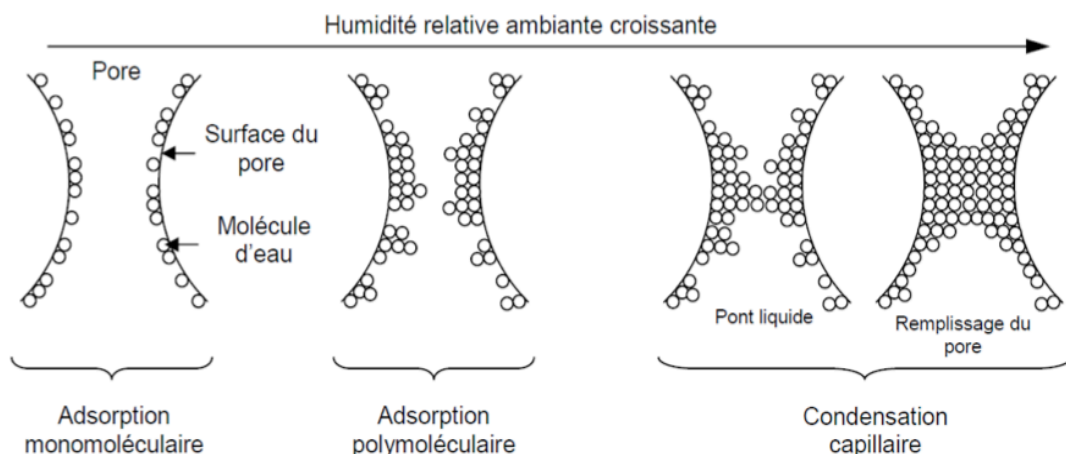
On parle d'hydrothermie pour caractériser la température et le taux d'humidité de l'air ambiant à l'intérieur d'un local. Cette humidité relative HR est définie comme le rapport de la pression p_{vap} exercée par la vapeur d'eau contenue dans l'air à une température T donnée sur la pression $p_{vap}(T)$ de la vapeur d'eau saturante. Elle caractérise la teneur en vapeur d'eau et la capacité de cette dernière à se condenser. En d'autres termes, le degré d'hygrométrie de l'air ambiant varie si la température ou la pression évolue bien que son humidité absolue reste constante.

$$HR = \frac{P_{vap}}{P_{sat}(T)}$$

En effet, on sait que la chènevotte est très sensible aux variations d'hygrométrie extérieure. Ce matériau possède la capacité à échanger une grande partie d'humidité avec l'air environnant, ce qui impacte comme on l'a vu sa conductivité thermique. Cependant, cette hygroscopicité élevée permet au béton de chanvre une perméabilité à la vapeur d'eau importante et fait de lui un excellent régulateur hydrique et thermique.

2.2.4.1 Adsorption et désorption de vapeur d'eau

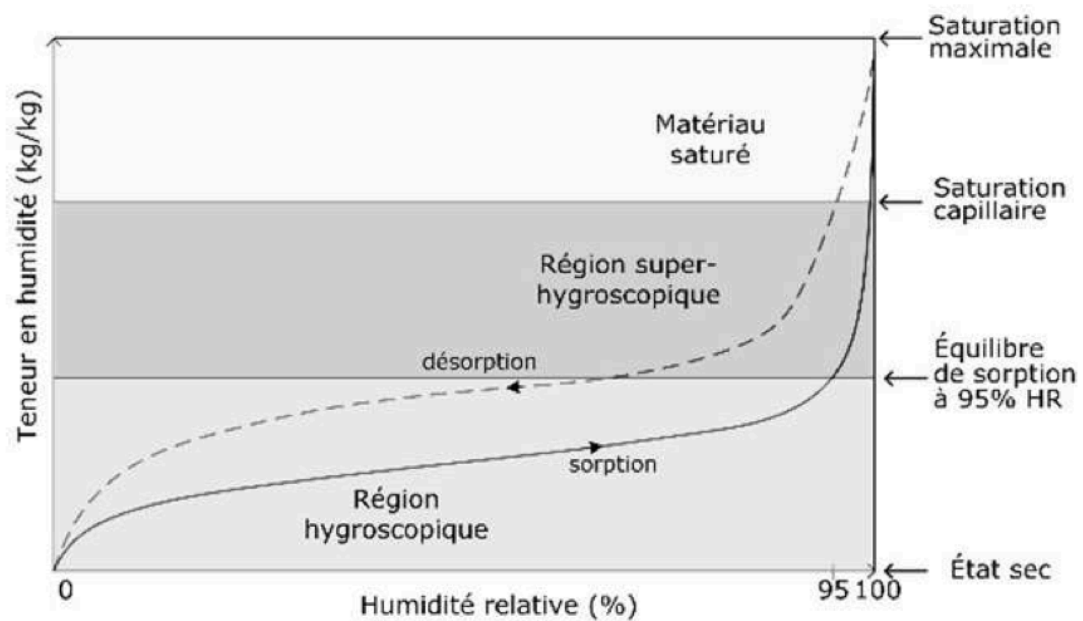
Les matériaux tels que le béton de chanvre ont une porosité dite « ouverte », ils ont la capacité à échanger de l'humidité avec l'air ambiant. En effet, une hausse de l'humidité relative de l'air à la surface du matériau engendre une augmentation de la masse de celui-ci. En effet, cette prise de masse est due au phénomène d'adsorption physique qui permet la fixation (réversible) des molécules d'eau à la surface des pores. Une diminution de l'humidité engendre une perte de la masse due au phénomène de désorption.



Dans un premier temps, les molécules d'eau recouvrent une couche de la surface des pores ou elles sont retenues par les forces de Van der Waals, on appelle cette première étape l'adsorption monomoléculaire.

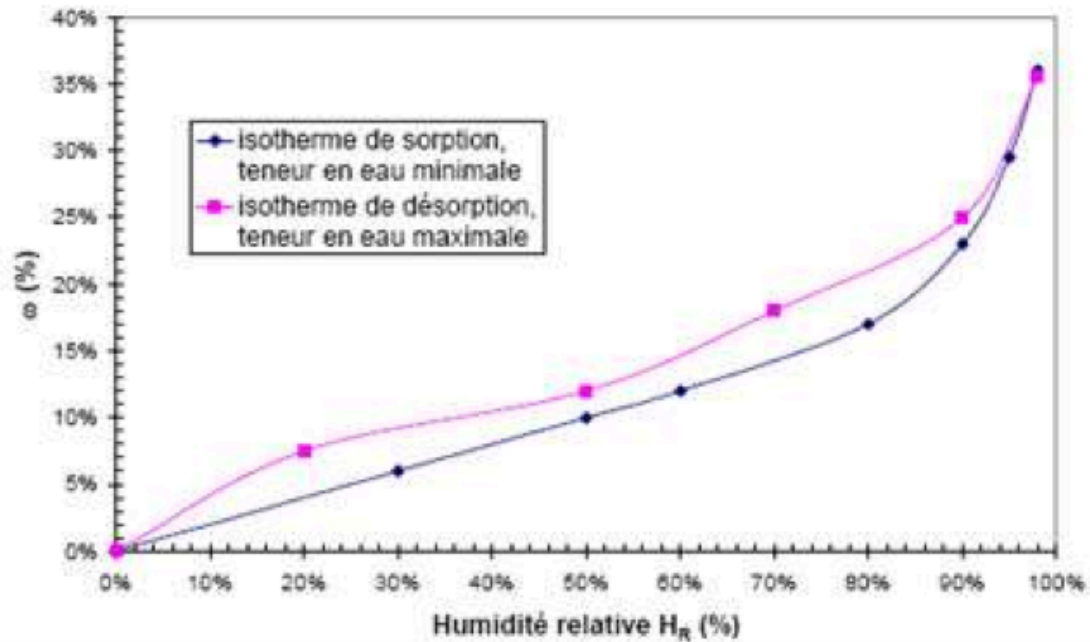
Dans un second temps, lorsque l'humidité relative augmente, d'autres couches d'eau s'ajoutent et se fixent à la première, il s'agit de l'adsorption polymoléculaire.

Enfin, aux hygrométries les plus élevées, les couches polymoléculaires se rejoignent et forment un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque. On parle alors d'un phénomène de condensation capillaire.



Forme générale de la courbe de l'isotherme de sorption¹⁵

¹⁵ A. Piot. (2009)



Courbe de sorption-désorption d'un béton de chanvre à T=20°C¹⁶

2.2.4.2 Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau est définie par sa capacité à se laisser traverser par un fluide sous l'action d'une pression entre ces deux faces opposées. La perméabilité à la vapeur d'eau désigne donc le rapport de la quantité de vapeurs d'eau traversant un matériau par une unité d'épaisseur, de temps et par unité de différence de pression de vapeur.

Pour l'ambiance extérieure, plusieurs paramètres sont présents et impacts sur la porosité. L'humidité relative, les conditions pluviométriques, l'ensoleillement et le vent sont des facteurs qui influent sur le comportement hygrométrique.

Pour l'ambiance intérieure, l'humidité relative correspond à la quantité d'eau contenue dans l'air extérieur qui entre dans le local auquel est ajoutée la quantité d'eau produite à l'interne du local (cuisson, production humaine, etc)

La production de vapeur est définie par :

$$\Delta v = \frac{G}{nV} = v_i - v_e = W / n$$

¹⁶ Cézéro (2005)

Avec :

G : taux de production d'humidité intérieur en kg/h

N : taux de renouvellement d'air en nombre de changement d'air/h

V : volume intérieur du bâtiment en m³

W : humidité absolue en kg/m³

V(x) : excédent d'humidité (intérieur ou extérieur) en kg/m³

3. Expérimentation

L'expérience mise en œuvre au sein de ce mémoire cherche à montrer les capacités hygrothermiques du béton de chanvre. En effet, la recherche bibliographique a permis de mettre en avant le potentiel du béton de chanvre dans le rôle de régulateur thermique. L'expérience suivante cherche à montrer comment cela fonctionne et si cela fonctionne réellement à l'échelle d'un échantillon. Le béton de chanvre est-il un excellent régulateur thermique comme le prêtent ses recherches ?

3.1 Protocole expérimental

Le protocole expérimental défini pour cette expérience est le suivant :

Une boîte a été créée à partir de polystyrène extrudé afin de la rendre complètement hermétique. Celle-ci, se divise en trois compartiments, le premier faisant la moitié de la boîte représente l'ambiance extérieure, tandis que les deux autres parties qui divisent l'autre moitié représente l'ambiance intérieure.

La figure ci-dessus montre le fonctionnement de la boîte. Chacun des compartiments est équipé d'une sonde thermique mesurant la température à l'intérieur de celui-ci. La chambre faisant office d'ambiance extérieure est équipée d'un convecteur de 400W couplé à un thermostat et un variateur d'intensité afin que la température à l'intérieur reste constante.

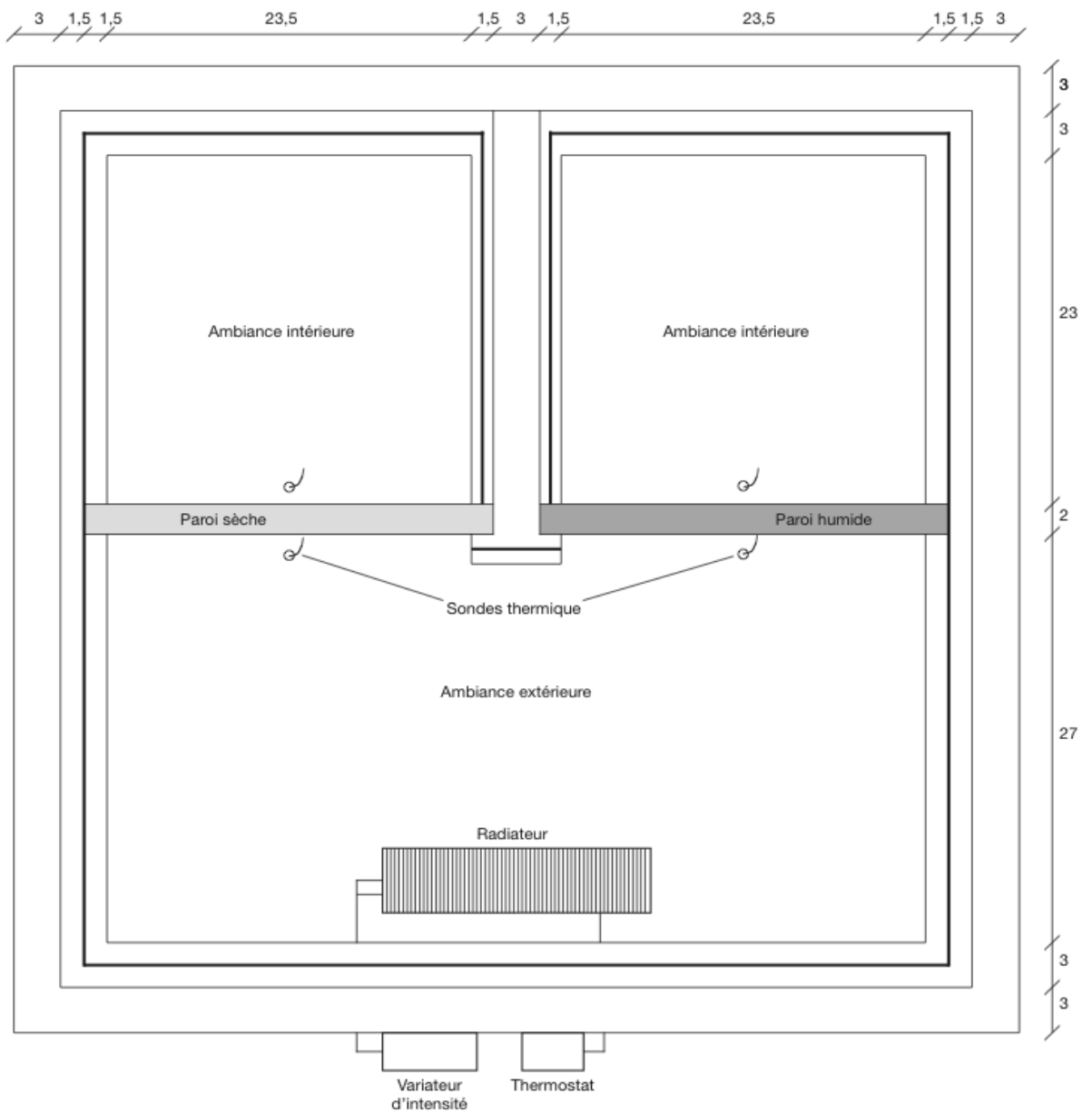


Schéma de l'expérience



Photos montrant le montage de la boîte hermétique et des sondes

Enfin en ce qui concerne la réalisation des échantillons en béton de chanvre. Ces dernières, on était fait suivant des dosages tirés « règles professionnelles d'exécution en béton de chanvre »¹⁷. En effet, on sait que pour 1m³ de béton de chanvre, nous avons besoin pour une formation de type « mur » de 130 kg de chènevotte, 220 kg de chaux aérienne et 350 kg d'eau.

Nos échantillons ont une dimension de 25x25x2 cm soit 0,00125 m³, les proportions sont donc les suivantes : pour la chènevotte, nous avons besoin de 0,16 kg, pour la chaux 0,275 kg et enfin 0,437 kg d'eau. Après un premier essai, je me suis rendu compte que la quantité calculée était trop faible, car le volume une fois mis en place se tassait et l'échantillon n'était pas aux bonnes dimensions. Ainsi, afin d'avoir un échantillon compact, les proportions calculées, on était multiplié par deux.

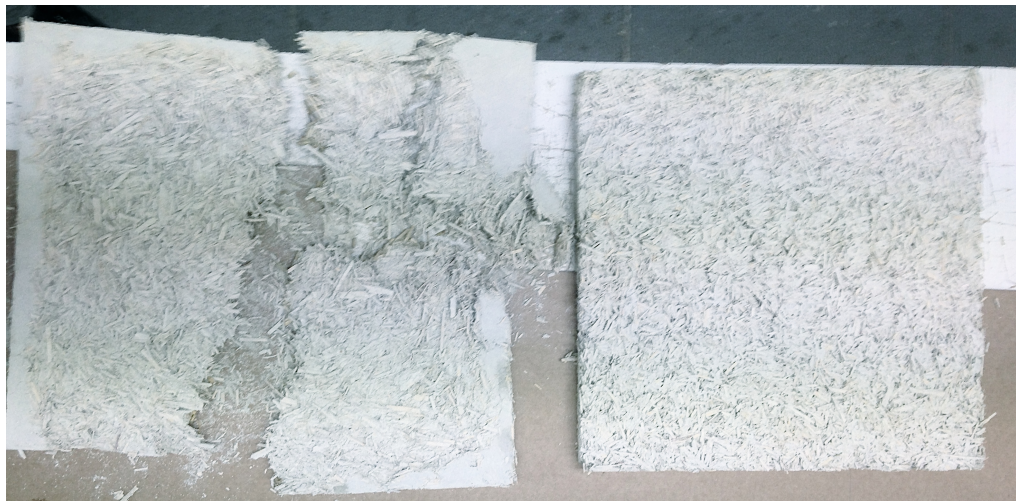


Photo montrant deux échantillons de béton de chanvre (à gauche échantillons ayant reçu plus d'eau, à droite un échantillon aux proportions données)

Ci-dessus un exemple à gauche du premier échantillon réalisé, les proportions, on était respecté au début de la mise en œuvre, puis un volume d'eau a été rajouté afin de comparer la résistance avec et sans surplus d'eau. On se rend compte que le béton de chanvre contenant plus d'eau à largement moins bien ne résister que l'autre échantillon avec les bonnes proportions.

L'échantillon de gauche, c'est cassé dans mes mains directement. Les deux échantillons, on était séché pour cette expérience, l'un est resté sec l'autre a été placé sur un balcon afin qu'il absorbe l'humidité ambiante pendant 2 semaines.

Leur masse volumique est donc différente. Ses deux échantillons sont donc placés dans les parois prévues dans chaque chambre afin de pouvoir faire l'expérience. Quatre sondes sont disposées de par est d'autres des parois

¹⁷ RP2C (2007)

pour mesurer la température.

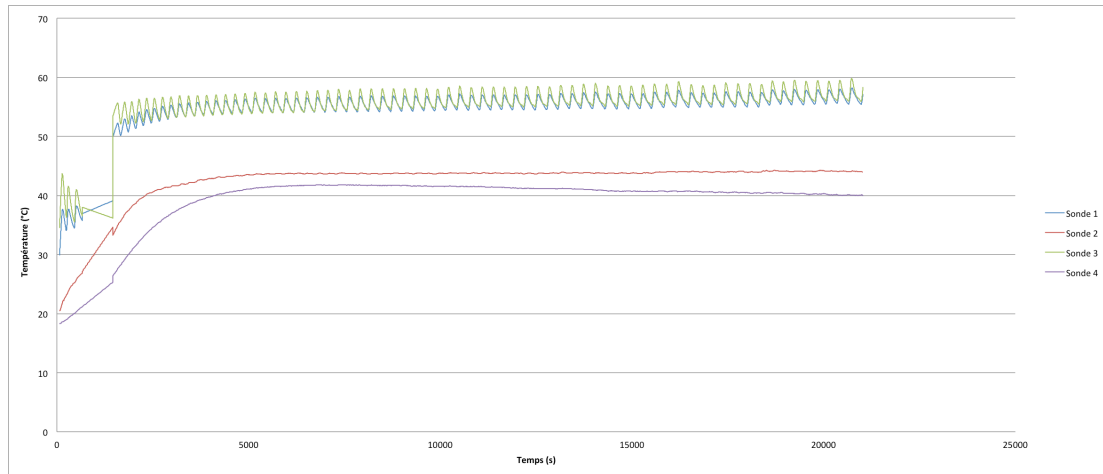


Photo des parois (sèche à gauche, humide à droite)

La boîte est ensuite refermée avec un couvercle prévu à cet effet. Le couvercle est vissé afin d'avoir les compartiments complètement hermétiques.

3.2 Résultat de l'expérience

L'expérience a duré 6h30 pendant ce temps-là, les sondes de température ont mesuré la température dans l'ambiance extérieure et dans chacune des chambres. Pour illustrer le phénomène, les parois ont été soumises à des conditions extérieures où la température est élevée.



Evolution de la température au sein des différents compartiments

La sonde 1 et 3 sont les sondes mesurant la température dans le compartiment dit « ambiance extérieure » la sonde 2 mesure la température présente dans la chambre avec la paroi sèche et la sonde 4 mesure la température présente derrière la paroi humide.

Les résultats obtenus, on permet de constater que le fonctionnement hygrothermique du béton de chanvre et un élément à prendre en compte dans le confort ambiant des habitations. En effet, lorsqu'une température appliquée sur la surface extérieur augmente brutalement, la température augmente également, mais de façon différente que l'on soit derrière l'échantillon sec ou humide.

Ce résultat s'explique par l'apparition d'un phénomène interne de changement de phase (vaporisation). Lorsque l'on applique une forte température extérieure, de l'eau liquide se vaporise à l'intérieur du matériau. Ce qui se traduit par une forte hausse de l'humidité relative et un amortissement de l'élévation de la température dans le béton de chanvre et dans le compartiment compte tenu du caractère endothermique¹⁸ des phénomènes de vaporisation.

Ainsi, en été, lorsque l'on passe de la nuit au jour, ce phénomène d'évaporation à l'intérieur du béton absorbe la chaleur qui se dégage et retarde donc le réchauffement ambiant, ce qui améliore le confort d'été. Cela se traduit dans le graphique ci-dessus par un écart allant de 2°C à 7°C entre la paroi comportant de l'eau et celle totalement sèche.

A contrario, pour le confort d'hiver, lorsque l'on passe du jour à la nuit, avec une baisse de température, il se produit un phénomène de condensation à

¹⁸ Une réaction endothermique est une réaction qui absorbe de l'énergie provenant de l'environnement ce qui, par conséquent, abaisse le degré énergétique du milieu.

l'intérieur de béton engendrant une action exothermique¹⁹ accompagnée d'une libération d'énergie qui va freiner l'évacuation de la chaleur interne vers l'externe et donc retarder le refroidissement améliorant ainsi le confort d'hiver.

Ces résultats nous permettent de justifier le fait que le béton de chanvre soit un excellent régulateur thermique. Ce qui découle de ce principe est une diminution de l'utilisation du chauffage en hiver et d'une climatisation en été, autrement dit une diminution de la consommation énergétique du bâtiment. La présence de moisissures également à l'intérieur de l'habitation n'est plus un problème, car l'humidité est absorbée directement par le mur, contrairement au maison isolée ou sans le principe de ventilation mécanique, la maison est une boîte complètement étanche.

¹⁹ Une réaction exothermique est une réaction qui dégage de l'énergie ce qui, par conséquent, augmente le degré énergétique du milieu environnant.

4. Application du béton de chanvre aujourd'hui

Depuis 2012, le MEDDE a mis en place une réglementation visant l'obtention d'un label « bâtiment bourcé, il concerne uniquement la construction neuve. Plusieurs bâtiments en France détiennent ce label et plus particulièrement l'ensemble de logements collectif BBC à Paris dans le 13^{ème} arrondissement. La contribution du chanvre dans le calcul est de $240\text{m}^3 \times 100/540\text{m}^2 = 44 \text{ kg/m}^3$. Cet immeuble compte huit logements certifiés « habita & environnement » sa structure porteuse est mixte. En effet, une première structure en béton armé est complétée par une seconde en bois. La première est en poteaux, poutre et dalle au rez-de-chaussée, complétée par des murs séparatifs et refends en étage. La deuxième est sur toutes les faces, a été réalisée en pin avec un montage en ossature bois. L'ensemble est contreventé par des plaques de gypse assurant la finition intérieure. La consommation moyenne du bâtiment est de $28 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$



Façade sur rue



Façade sur le jardin



Structure ossature bois et béton de chanvre



5. Conclusion

L'objectif de ce mémoire était l'étude du comportement hygrothermique du béton de chanvre.

Dans la première partie de ce mémoire, nous avons constaté que l'utilisation des matériaux bricoleurs peut être un avenir dans la construction. En effet, ils permettent de réduire les consommations énergétiques ainsi que l'impact du bâtiment sur l'environnement. Cette recherche bibliographique a permis de mettre en avant l'importance du confort hygrothermique du béton de chanvre dans la construction.

La seconde partie de ce mémoire à consister a créé une simulation pour étudier le comportement hygrothermique sous des conditions climatiques caniculaires. De cette expérience, les résultats ont montré que la régulation de la température entre l'environnement extérieur et intérieur se faisait dans le matériau grâce au phénomène de changement de phase (condensation et vaporisation).

Le béton de chanvre est donc un excellent régulateur thermique du fait de son comportement hygroscopique. Cependant, de nos jours malgré les nombreuses recherches effectuées sur le sujet, très peu de réalisation architecturale a vu le jour. Un seul immeuble dans paris a été réalisé avec le béton de chanvre. Ce « nouveau » principe de construction est encore mal connu des professionnels du bâtiment aujourd'hui est demandé une main d'œuvre plus complexe qu'un bâtiment traditionnel. On peut se demander comment sera l'avenir du béton de chanvre dans la construction de demain ? les matériaux biosourcés seront-ils démocratisés aux nouvelles réalisations urbaines ?

Références

Anh Dung TRAN LE, 2010. *Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment*. Thèse de doctorat. Université de Reims Champagne-Ardenne.

Arnaud L, Cerezo V, 2001. *Qualification physique des matériaux de construction à base de chanvre*. Report. Ecole Nationales des Travaux Publics de l'Etat, Département Génie Civil et Bâtiment, Vaulx-en-Velin.

Arnaud L, Hustache Y, Boyeux B, 2006. *Le chanvre industriel, production et utilisations*, chap. 11-7 : Construire en chanvre, Editions France Agricole, ISBN 2-85557- 130-8, 347-372 p.

Cerezo V, 2005. *Propriété mécanique thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : Approche expérimentale et modélisation théorique*. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Collet F, 2004. *Caractérisations hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Rennes.

Construction & Bioressources, 2012. *Etat des lieux des connaissances actuelles sur le fonctionnement hygrothermique des matériaux biosourcés*. Document technique.

DRIEA et l'association Construire en Chanvre, 2014. *Matériaux de construction à base de chanvre*. Direction regional et interdépartementale de l'Equipement et de l'Aménagement d'Iles-de-France.

Dupre B, 2014. *Le végétal en construction – Bâtir durable avec des ressources de proximité*. Dossier technique de l'ingénieur : l'expertise technique et scientifique de référence.

Etienne, G, 2013. *Propriétés hygroscopiques et comportement hygrothermique du béton de chanvre*. Rapport bibliographique, Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de l'Est Laboratoire Régional de Strasbourg.

Hustache, Y, 2008. *Synthèses des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre*, 104 p.

Nomadeis, 2012. *Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction (à l'exception du bois)*. Etude réalisée par Nomadeis pour le compte du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, DGALN / PUCA – Partie 1 : Etat des lieux économique du secteur et des filières.

RP2C, 2007. *Règles professionnelles d'exécution d'ouvrage en béton de chanvre*. Commission " Règles Professionnelles Construction Chanvre" RP2C, 60 p.

Samri, D, 2008. *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique*. Thèse de doctorat, Vaulx-en-Velin : MEGA Université de Lyon/ENTPE, 284 p.