

LE LIN DANS TOUS SES ÉTATS



Étudiants :

Louison ALIX

Julien CORMON

Hélène ERIPRET

Camille COFFIN

Aya ELHAJIBI

Sarah GRIFFON

Enseignant-responsable du projet :

Dominique LE LEVIER

Cette page est laissée intentionnellement vierge.

Date de remise du rapport : **11/06/2022**

Référence du projet : **STPI/P6/2022-021**

Intitulé du projet : **Le lin dans tous ses états**

Type de projet : **Bibliographique + expérimental**

Objectifs du projet :

Notre projet a pour but d'étudier la culture et la production du lin ainsi que ses différentes applications. Afin de mener à bien ce projet, nous avons réalisé deux expériences portant sur la vérification des propriétés des matériaux à base de lin.

Nous avons également souhaité mettre à disposition des supports interactifs comme un site internet ou encore une vidéo de présentation d'une entreprise dans le domaine du lin. Pour cela, nous avons effectué une visite au sein d'une usine de teillage en Normandie.

Mots-clefs du projet : **Lin, textile, oléagineux, expérimentations**

Remerciements :

Nous adressons nos plus sincères remerciements à Monsieur Dominique LE LEVIER, professeur encadrant du projet pour nous avoir permis de travailler sur le présent sujet. Nous le remercions également pour sa disponibilité et son engagement.

Nous tenons également à remercier Monsieur Alain GUILLET enseignant en département mécanique et chercheur en physique des matériaux pour nous avoir guidé lors des expériences sur le béton de lin et nous avoir mis à disposition le laboratoire de mécanique.

Nous remercions aussi l'entreprise TERRE DE LIN et plus particulièrement Monsieur Jean-Manuel CLABAUT, chargé du suivi adhérent pour nous avoir permis de visiter le site de teillage de Douvrend et pour avoir répondu à l'ensemble de nos demandes.

Enfin, nous souhaitons remercier Monsieur Michel LESAGE, liniculteur Seino-Marin implanté à proximité de Dieppe pour ses renseignements sur la culture du lin et les entreprise ECOTECHNILIN pour leurs informations sur les produits composites et SANOPAN, pour la fabrication de panneaux agglomérés à base de lin.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	6
2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL.....	7
3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS.....	8
3.1. Culture et teillage du lin.....	8
3.1.1. Culture du lin.....	8
3.1.2. Teillage.....	9
3.2. Application du lin.....	10
3.2.1. Textile.....	10
3.2.2. Lin oléagineux.....	10
3.2.3. Composites.....	12
3.2.4. Isolants.....	15
3.2.5. Chaufferies collectives.....	16
3.3. Le lin tourné vers l'avenir.....	17
3.3.1. La production mondiale de lin textile.....	17
3.3.2. Impact écologique de la production du lin.....	17
4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	19
5. BIBLIOGRAPHIE.....	20
6. ANNEXES.....	25
6.1. Utilisation du lin oléagineux dans l'alimentation humaines.....	25
6.1.1. Composition, bienfaits et inconvénients des graines de lin.....	25
6.1.2. Propriétés, avantages et inconvénients de l'huile de lin.....	25
6.2. Utilisation en cosmétique.....	27
6.3. Programme BtonLin.....	29
6.4. Comparaison théorique isolants.....	36
6.5. Éléments à tester, résistance au feu.....	38
6.6. Expérience isolant à base de laine de lin.....	39
6.7. Accès au site web du projet.....	42

NOTATIONS, ACRONYMES

Anas : Fragments de paille résultants du teillage.

BA13 : Plaque de plâtre couramment utilisée dans le bâtiment, de 13 mm d'épaisseur.

Biosourcé : Issus du vivant animal ou végétal.

Conductivité thermique (λ) : Capacité d'un matériau à conduire la chaleur, exprimé en $W.m^{-1}.K^{-1}$.

Étoupe : Sous-produit du lin, obtenu après l'opération du teillage.

Fibres longues : Produit résultant du teillage et destiné au textile, composites...

Filage : Opération visant à transformer une fibre en fil continu.

Laine de lin : Matériau isolant à base d'étoupes.

Lignanes : Composé provenant principalement des aliments à base de plante.

Matière grasse : Substance qui n'est pas soluble dans l'eau et qui regroupe graisse (solide) et huile (liquide).

Matériau composite : Matériau formé par l'assemblage de composants, offrant ainsi à l'ensemble des propriétés qu'aucun de ces matériaux ne possède individuellement.

Oïdium : Champignon stoppant la croissance d'une plante et entraînant sa décomposition.

Peignage : Opération mécanique visant à enlever les impuretés aux fibres avant l'opération de filage.

Phytostérol : Composé naturel présent dans les plantes, permettant la réduction de l'absorption du cholestérol dans le sang.

Résistance thermique (R) : Capacité d'un matériau à résister aux variations de température. Grandeur exprimée en $m^2.K/W$.

Teillage : Opération mécanique dont le but est de séparer la fibre et le bois de la plante.

Upcycling : Recyclage de textile en de nouvelles pièces dont la valeur est supérieure à celle de départ.

Vernalisation : Technique visant, par l'action du froid, à faire germer plus rapidement une graine.

Verse : Plante couchée au sol suite à l'action du vent, de la pluie ou de maladies.

1. INTRODUCTION

Traditionnellement employé dans le textile, le lin occupe aujourd'hui une place importante dans de nombreux domaines dont l'alimentation, l'isolation ou encore les matériaux. En effet, il en existe deux types : le lin textile et le lin oléagineux dont nous étudierons leurs applications respectives.

Comme illustré sur la frise chronologique ci-dessous, la culture du lin est un savoir-faire ancestral :

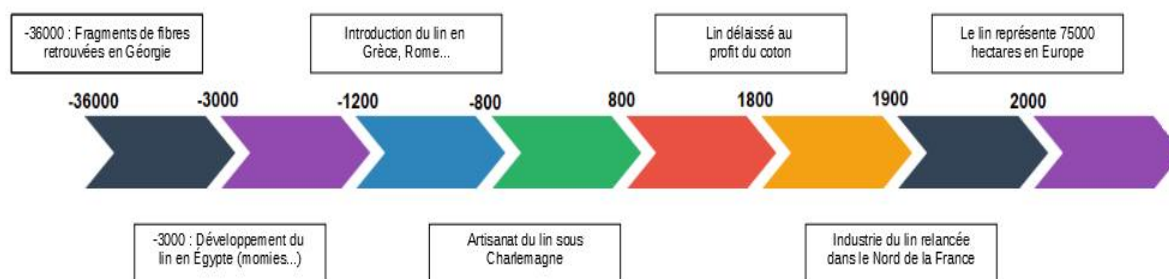


Figure 1: Frise chronologique de l'utilisation du lin

Aujourd'hui décrit comme porteur d'avenir, le lin participe au développement durable et à la transition écologique. Notre projet s'inscrit ainsi dans une démarche régionale, la Normandie étant l'un des leaders européens de la production de lin textile, avec 63% de la production française.

Notre étude a également un objectif pédagogique, permettant l'assimilation de nouvelles connaissances et leurs applications. Une bonne communication, de la rigueur et de l'organisation au sein du groupe sont essentielles afin de réaliser ce projet.

Ainsi, nous avons travaillé sur la réalisation du projet « Le lin dans tous ses états » ayant pour but l'étude des différentes applications du lin, mais aussi la vérification des propriétés des matériaux à base de lin.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Afin de mener à bien notre projet, nous avons mis en place des réunions hebdomadaires pour nous documenter, partager et discuter de nos idées. Ceci nous a permis de répartir les tâches entre les différents membres du groupe, tout en travaillant chacun de notre côté pour être efficace.

Après une période de recherche, il est apparu que le teillage était un processus essentiel pour l'utilisation de la fibre de lin. Nous avons donc souhaité visiter une usine de Teillage et nous nous sommes rendus sur le site de TERRE DE LIN, situé à Douvrend, le 10 mars 2022. Cette visite nous a notamment permis de comprendre le processus général du teillage du lin et son utilisation. Une vidéo de la visite est disponible sur le site web du projet (onglet Teillage.) (se référer à l'annexe 6.7).

Par ailleurs, nous nous sommes rendu compte que le lin était également employé dans le secteur du bâtiment. Nous avons donc effectué deux expériences afin de vérifier les propriétés de ces matériaux. L'une portait sur les isolants à base de laine de lin et l'autre sur les bétons fibrés.

Enfin, pour partager notre expérience et les connaissances acquises, nous avons créé un site internet résumant l'ensemble de notre travail et qui est accessible à tous (lien et QR Code en annexes 6.7).

Le diagramme ci-dessous présente la répartition des tâches dans le projet :

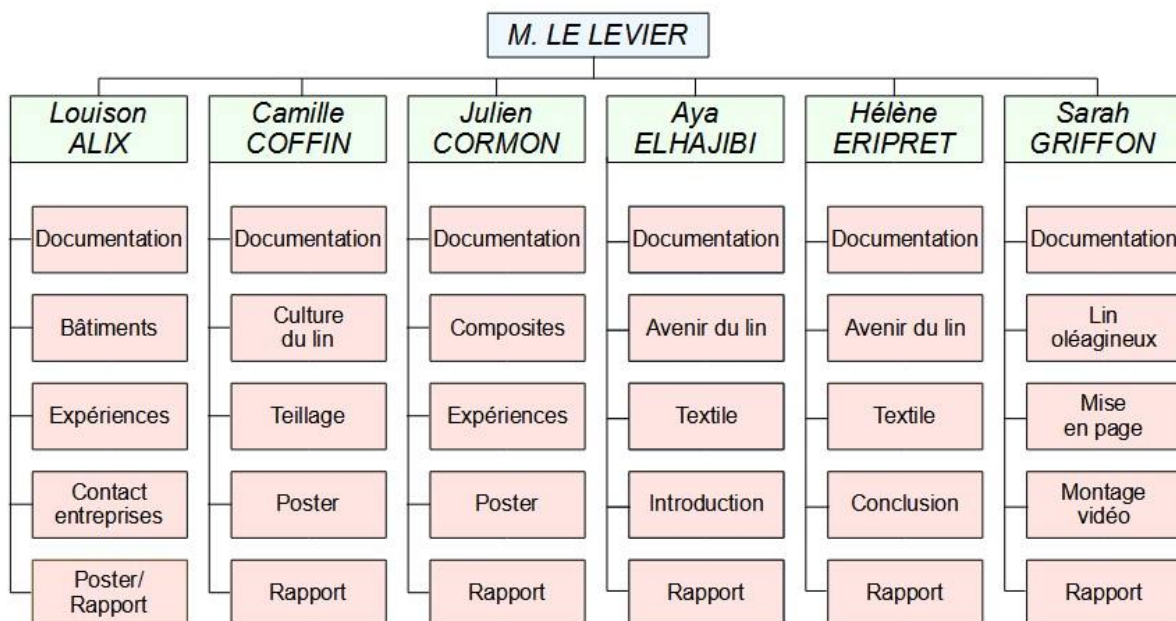


Figure 2: Répartition du travail

3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. Culture et teillage du lin

3.1.1. Culture du lin

La culture du lin se déroule en 6 étapes :



Figure 3: Semis

Du semis à la croissance : Le lin est semé entre mars et avril. Par mètre carré, on compte entre 1500 et 1600 pousses. Pour arriver à maturité, cette plante n'a besoin que de 100 jours, où elle atteindra 1 mètre.

Le climat est déterminant pour le bon développement du lin. Le climat normand, tempéré et humide, convient parfaitement à la culture du lin.



Figure 4: Floraison

La floraison : La floraison du lin se déroule mi-juin sur une semaine. Les champs sont ainsi teintés de bleu tous les matins et les fleurs fanent l'après-midi.



Figure 5: Arrachage

L'arrachage : Mi juillet, le lin est arraché et non coupé. Un séchage du lin, au soleil, est nécessaire afin d'entamer le rouissage.



Figure 6: Ecapsulage

L'écapsulage : Les graines de lin sont récoltées, une semaine après l'arrachage pour être semées l'année suivante ou transformées en huile dans le cas d'un lin oléagineux.



Figure 7: Rouissage

Le rouissage : Une alternance de pluie, de soleil et de brise est nécessaire pour permettre le développement de champignons, séparant la paille de la fibre. Durant cette étape, le liniculteur retourne régulièrement les pailles afin d'obtenir les plus belles fibres possibles.

La récolte des pailles : Afin de vérifier la bonne avancée du rouissage, le liniculteur prélève un échantillon de paille et l'apporte au teillage. Cette étape permet ainsi au liniculteur de déterminer la qualité de la fibre de lin et de savoir s'il doit être enroulé ou s'il faut attendre une nouvelle averse pour affiner le rouissage.



Figure 8: Récolte pailles

Afin d'assurer la qualité du lin au fil des années, il est nécessaire d'effectuer une rotation des cultures tous les 6 ans. Cette rotation permet notamment d'éviter l'apparition de maladies.

3.1.2. Teillage

Les fibres de lin sont contenues dans l'enveloppe externe de la tige. Le teillage est donc une opération mécanique consistant à extraire la fibre de l'écorce et de la tige. Pour cela, le lin va être soumis à de nombreuses étapes : l'égrenage, l'étirage, le broyage et le battage.

Afin d'appréhender au mieux l'ensemble de ces étapes, nous avons eu l'opportunité de visiter une entreprise de teillage située à Douvrend. Durant cette visite, nous avons pu comprendre le fonctionnement des différentes lignes de production, l'utilisation des matières transformées... Une vidéo illustrant cette visite est par ailleurs disponible sur le site web du projet (onglet teillage).

Les différentes étapes aperçues lors de la visite sont les suivantes :



Figure 9: Déroutage

L'égrenage : L'égrenage consiste à séparer les graines de la tige de lin en les arrachant à l'aide d'un peigne dont l'espacement des dents est de plus en plus réduit vers les extrémités. Le passage d'un peigne parallélise les tiges et facilite ainsi leur division.

L'étirage : La nappe obtenue subit ensuite une accélération progressive en passant entre une série de disques dentés. Cette étape a pour objectif de réduire l'épaisseur de la nappe.

Le broyage : La nappe passe immédiatement après l'étirage entre des rouleaux broyeurs constitués de cylindres cannelés à grosse denture. Le broyage consiste à libérer les fibres en brisant le centre de la tige en petites particules appelées anas.



Figure 10: Broyage

Les fibres ainsi obtenues se différencient en deux catégories : la **fibre longue** dite filasse et la **fibre courte** dite étoupe.

Le battage : Le battage consiste à extraire les fibres longues du lin utilisées pour la conception textile et les composites et à récupérer les anas et les fibres courtes, qui seront ensuite utilisés pour l'ameublement ou la ficellerie.

Après le teillage, la fibre de lin doit ensuite subir **un peignage**. Cette opération consiste à démêler la filasse et à retirer toutes les impuretés. Les fibres sont séparées petit à petit grâce à un passage dans des peignes de plus en plus fin. A la fin de cette étape les fibres sont soyeuses et parallélisées. Elles sont ensuite assemblées les unes aux autres pour former un long ruban : c'est la filature.



Figure 12:
Tissus de lin

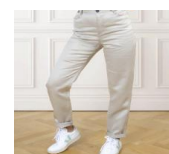


Figure 11: Jean
en lin

3.2. Application du lin

3.2.1. Textile

Le lin textile est cultivé depuis l'Égypte antique pour sa fibre légère, résistante, imperméable, solide et thermorégulatrice, destinée à l'habillement, les textiles de la maison et tissus d'ameublement.

En effet, cette fibre naturelle est hypoallergénique, résistante, écologique et thermorégulatrice. D'abord, comme énoncé, les tissus en lin sont hypoallergéniques, anti fongicides et antibactériens. Ces derniers possèdent des capacités à la fois absorbantes et respirantes, ils n'emmagasinent pas les allergènes, l'humidité, la transpiration et les micro-organismes. C'est ce qui fait du lin l'habillement recommandé pour les personnes souffrant d'infections cutanées.

De même, les fibres du tissu sont classées parmi les plus résistantes fibres végétales grâce à leur longueur d'une dizaine de centimètres (alors que le coton ne possède que des fibres d'une dizaine de millimètres).

De plus, le lin est biodégradable et écologique puisque sa culture ne demande que peu d'engrais et aucun arrosage. Sans oublier qu'un hectare de lin, soit la taille d'un grand terrain de football, produit environ 20 000 kilomètres de fil, l'équivalent de 2 200 chemises.



Figure 13: Équivalent hectare de lin

Sa filature se fait majoritairement en Asie où près de 80% de la production française est exportée. Cependant, on constate un retour progressif des filatures européennes avec plusieurs projets de réimplantation de filature en France, dans le Haut Rhin et dans les Hauts-de-France.

Néanmoins, le fil produit nationalement est peu compétitif, environ 22 euros le kilo face à 16 euros pour le fil chinois, même si l'on peut souligner la volonté de certains consommateurs français d'acheter responsable et local.

3.2.2. Lin oléagineux

Le lin oléagineux est une plante permettant l'extraction de matière grasse. Cultivée principalement au Canada (avec un rendement plus faible – seulement 2t/ha) et de façon similaire au lin textile, elle se récolte néanmoins de façon différente : d'une hauteur maximale de soixante centimètres, les tiges sont délestées de leurs capsules qui sont par la suite, éclatées pour pouvoir récupérer les graines de lin et qui sont, elles, nettoyées pour enlever les impuretés.

Graines de lin :

Les graines de lin sont cultivées depuis la Préhistoire, notamment pour leur richesse en protéines végétales et en micronutriments. On peut citer les oméga 3,6 et 9, les fibres solubles et insolubles, les lignanes ou encore le phytostérol qui apportent divers bienfaits aux êtres humains, comme un renouvellement cellulaire ou une baisse des risques cardiovasculaires.



Figure 14: Graines de lin

Il en existe deux types : les graines de lin dorées et brunes. Leurs différences ne sont pas significatives, seulement 2 fois plus de fibres pour les graines de lin dorées.

Huile de lin :

Pour une fabrication d'huile de lin artisanale, il existe deux possibilités, la presse à huile à chaud ou la presse à huile à froid. Dans les deux cas, la procédure d'utilisation est la même : d'abord, il faut remplir la cuve de graines de lin puis placer un récipient pour récupérer l'huile avant de commencer l'extraction, enfin, à l'aide d'un tamis, l'huile est filtrée plusieurs fois si nécessaire. Une fois l'huile embouteillée, elle a une durée de conservation limitée dans le temps (deux ans). Le choix de la méthode se fait suivant la durée d'extraction, le goût et le rendement.



Figure 15: Pressage à froid

Pour une fabrication industrielle, il existe une méthode couramment utilisée, il s'agit de l'extraction chimique. L'huile est extraite à partir de solvants tels que le benzène ou l'hexane. Ce procédé est réalisé en plusieurs étapes : les graines de lin sont broyées et chauffées à une température de 70°C puis l'huile est récupérée grâce au solvant choisi et finalement, ce mélange est chauffé à 100°C. L'huile obtenue est appauvrie en nutriments, c'est pourquoi elle est déconseillée pour un usage alimentaire et qu'elle est davantage utilisée pour l'industrie.

Application alimentaire : (compléments disponibles en annexes 6.1)

La part de la production du lin oléagineux destinée à l'alimentation des animaux est majoritaire puisqu'elle est estimée entre 75 % à 95 %. En France, 13 % des éleveurs utilisent les graines de lin, en complément de la nourriture traditionnelle (tourteau). Plusieurs études, dont celle de l'association Bleu Blanc Cœur ont été menées pour connaître l'intérêt des graines de lin. Ainsi, avec un apport de 5 % en graines de lin, les animaux (bovins, porcs, volailles...) produisent davantage et/ou de meilleure qualité avec moins de rejet en méthane. Ce pourcentage représente un équilibre entre coût supplémentaire et bénéfices apportés.

Les hommes peuvent également consommer le lin oléagineux, soit sous forme de graines moulues, d'huile de lin soit ou de « lait de lin ». Il faut souligner que l'huile de lin s'oxyde au contact de l'air très rapidement, c'est pourquoi elle a longtemps été interdite en France (jusqu'en 2010) et est aujourd'hui réservée à une consommation froide (en assaisonnement de salade par exemple).

Application cosmétique :

Les graines et l'huile de lin sont très utilisés en cosmétique pour ce qui concerne les soins de peau et des cheveux. Ils sont à retrouver dans la composition d'après shampoing ou masques. Leurs bénéfices sont multiples : hydratation, protection des cheveux, raffermissement, régénération de la peau. Un exemple de fabrication de gel à partir de graines de lin est visible en annexes 6.2.

Application en peinture :

L'huile de lin est très efficace pour le traitement et l'entretien du bois. Existante en trois variétés, l'huile de lin crue naturelle, l'huile de lin cuite et l'huile de lin siccatrice, elle est souvent diluée avec de l'essence térébenthine.

L'huile de lin peut aussi être employée pour la réalisation de tableaux, c'est ce que l'on appelle la « peinture à l'huile ».

Comme précédemment mentionné, l'huile de lin s'oxyde rapidement. Là où cette caractéristique était un défaut pour l'alimentaire, ici, cela est considérée comme un atout. En effet, cela va permettre à la peinture de se solidifier, d'abord en tant que gel puis en tant que solide. Cela va permettre à cette peinture d'être résistante aux intempéries, tout en permettant un nettoyage facile et une bonne respirabilité du support .

Conclusion :

Le lin oléagineux a de nombreuses applications et ce, dans des domaines très variés. On peut imaginer, à court terme, que l'huile de lin va se développer en tant que huile végétale carburant (HVC). Aujourd'hui interdite en France, mélanger gazole et HVC est autorisé dans de nombreux pays européens et tend à se développer par respect pour l'environnement. A noter que les moteurs diesels étaient, à l'origine, conçus pour rouler à l'huile de lin ou d'arachide, ces derniers ayant été remplacés pour des raisons économiques.

3.2.3. Composites

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles (mais ayant une forte capacité de pénétration) dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué possède alors des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas. Les composites sont aujourd'hui une nouvelle manière d'exploiter le lin. C'est un marché émergent qui permet à la filière du lin de s'ouvrir à de nouvelles perspectives.

En effet, les fabricants effectuent un assemblage d'une trame de fibres et de résine. Ainsi, le lin remplace parfois les fibres de verre et de carbone dans certains composites. Ce matériau se veut éco-responsable, il est plus écologique que les autres fibres et présente de bonnes caractéristiques physiques.

De nombreux programmes de recherche ont ainsi pu voir le jour, comme le Programme Flower, dont le but est de développer les renforts à base de fibres de lin pour les composites.

On peut aussi citer le projet We Explore, qui consiste à construire un catamaran en utilisant les matériaux biosourcés. Ainsi, les fibres de lin présentes dans la coque substituent les fibres de verre habituelles.

Cette coque de bateau possède notamment des qualités physiques/ mécaniques importantes comparé à celles en fibre de verre ou carbone. On peut notamment citer une très bonne absorption des vibrations ainsi qu'une faible densité (1,5 contre 2,4 pour la fibre de verre).

Le pont du catamaran constitue aujourd'hui la plus grande pièce de lin jamais réalisée, de l'ordre d'un terrain de tennis. Ce projet a donc pour but de diminuer l'empreinte écologique des épreuves de voile tout en alliant les performances sportives.



Figure 16: Projet We Explore

L'utilisation du lin en composite se justifie par ses nombreux avantages comme :

- La rigidité spécifique plus élevée que celle des fibres de verre
- L'absorption des vibrations supérieure à celle des fibres de carbone et de verre
- L'isolation thermique supérieure à celle des fibres de carbone
- L'isolation acoustique supérieure à celle des fibres de carbone et de verre
- L'empreinte environnementale moins élevée que la fibre de verre puisque notamment biodégradable et nécessite peu d'énergie lors de la fabrication

Aujourd'hui, les matériaux composites sont utilisés dans tous les domaines d'application.

En effet, ils sont présents dans les moyens de transport tel que l'aéronautique, l'automobile, le maritime ou bien le ferroviaire. Mais aussi dans les équipements sportifs comme les skis, le skateboard, le vélo ou les raquettes de tennis.



Figure 17: Domaines d'application des composites en lin

Enfin, un autre aspect majeur d'un composite à base de lin est qu'il est recyclable. Deux méthodes sont aujourd'hui employées :

- Recyclage bio-composite : cette méthode consiste à broyer puis à tamiser le composite afin de récupérer les fibres de lin.
- Recyclage par remoulage : le principe consiste à faire fondre le composite afin de pouvoir le remodeler et lui donner une nouvelle forme.

Programme BtonLin :

De nombreux programmes de recherche autour du lin sont aujourd'hui très largement développés grâce aux financements de l'Union Européenne (programme Flower...).

L'un d'entre eux, le programme BTONLIN vise à développer de nouveaux matériaux de construction à base de fibre de lin. Ce projet se concentre essentiellement sur l'élaboration de bétons fibrés, à partir de ressources locales et naturelles, afin de développer l'éco-construction.



Figure 18: Programme BtonLin

Composite de référence dans le domaine du BTP, le béton armé reste aujourd'hui encore majoritairement employé dans les constructions. D'autres alternatives se sont largement développées depuis les années 1970 tel que le béton fibré, notamment employé pour les voiles et dallages.

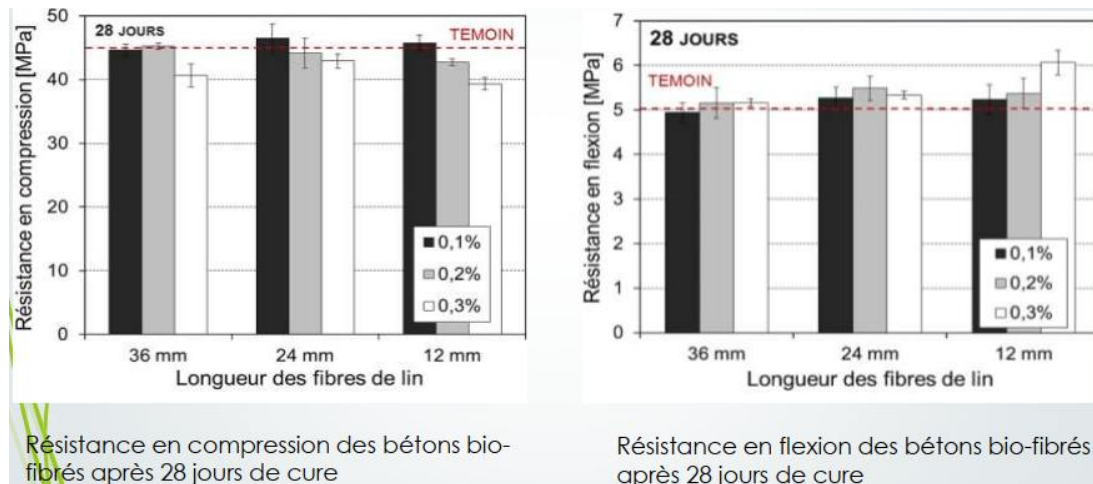
Le programme BtonLin permet un développement des bétons fibrés en utilisant des fibres naturelles, localement présentes : les fibres de lin.

Les principaux acteurs de ce projet vantent les bonnes performances mécaniques mais également thermiques du matériau.

Nous avons donc souhaité vérifier ses caractéristiques en menant des essais de compression et de flexion sur ce type de béton fibré.

Comparaison théorique :

Ci-dessous, les résultats obtenus dans le cadre du projet BtonLin :



Afin de réaliser une étude complète, les paramètres suivants ont pu être ajustés :

- La longueur des fibres de lin (12, 24, 36mm)
- La concentration en fibres du béton (0.1, 0.2, 0.3%)

Selon les résultats obtenus sur le béton fibré à 28 jours, on constate rapidement que le béton avec fibres de lin de 24mm, à 0.1% apporte une résistance en compression supérieure au béton standard (46 MPA contre 45 MPA pour le béton standard).

Les résultats obtenus pour la compression d'un béton fibré en lin, 12 mm, 0,3% sont quant à eux bien inférieurs aux valeurs d'un béton standard (39 MPA contre 45 MPA).

De manière générale, on constate que le béton lin a une meilleure résistance à la compression pour des fibres de 24 et 36mm, dosées à 0.1 et 0.2%.

Concernant la résistance à la flexion, il est rapidement remarqué que le béton fibré 12 mm, 0.3% permet une résistance en flexion bien supérieure au béton standard (6.1 MPA contre 5 MPA pour le béton standard).

De manière globale, on remarque que le béton de lin offre une meilleure résistance à la flexion pour des fibres plus longues (12 et 24 mm), dosées à un plus fort pourcentage (0.3%).

Finalement, on peut remarquer que le béton de lin permet d'apporter une résistance supplémentaire comparé au béton standard (témoin). Il faut néanmoins adapter la taille de la fibre de lin en fonction de l'utilisation et de la sollicitation de l'élément en béton.

Ainsi, il sera préférable d'utiliser un béton de lin 12 mm, 0.3% pour une poutre et un béton 24 mm, 0.1% pour un poteau, travaillant davantage en compression.

Comparaison expérimentale : Voir annexes 6.3

3.2.4. Isolants

Outre son utilisation en textile, le lin occupe une place de plus en plus importante dans l'habitat (feutre parquet, fibres dans le béton...) Nous traiterons dans cette section des isolants à base de laine de lin.

La prise en compte des nouvelles normes dans le secteur du bâtiment amène à employer davantage de matériaux issus de matières renouvelables dans de nouvelles constructions ou en rénovation. On parle alors de matériaux biosourcés.

On observe l'émergence d'une nouvelle gamme d'isolants naturels, notamment à base de laine de bois, de chanvre ou de lin...

Dans le cas des isolants à base de laine de lin, ceux-ci sont fabriqués à partir d'anas de lin et sont souvent associés au chanvre et au coton. Ils ont alors pour avantage de présenter de bonnes caractéristiques en termes d'isolation phonique et thermique.

Comparaison théorique :

Nous avons ici fait le choix de comparer un isolant à base de laine de lin (BioFib Trio) avec des isolants très largement utilisés dans le bâtiment : la laine de verre et le polystyrène. Un tableau récapitulatif est disponible en annexes 6.4.

En effet, si l'on s'intéresse à la résistance thermique de nos matériaux ($R = \frac{e}{\lambda}$ avec e , l'épaisseur du matériau et λ , la conductivité thermique), plus cette dernière est élevée, moins la déperdition de chaleur au travers du matériau sera importante.

Dans notre cas,

$$R_{thLainedeverre} = 1,2 m^2 \cdot K \cdot W^{-1} \simeq R_{thBiofibTrio} = 1,15 m^2 \cdot K \cdot W^{-1} \gg R_{thPolystyrène} = 1,05 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}.$$

Notre produit à base de laine de lin a donc une résistance thermique quasi identique à la laine de verre et très largement supérieure à celle du polystyrène.

On constate alors que la laine de lin permet d'éviter une trop grande déperdition de chaleur lorsqu'elle est utilisée pour l'isolation des habitations.

Si l'on prend maintenant en compte la conductivité thermique (λ) de nos isolants, on remarque de nouveau que $\lambda_{Lainedeverre} = \lambda_{BiofibTrio} \simeq 0,37 \ll \lambda_{Polystyrène} = 0,045 W/m \cdot K$.

La conductivité thermique de l'isolant BioFib Trio est bien inférieure à celle du polystyrène. Notre produit est donc un plus mauvais conducteur de chaleur que le polystyrène, il est donc meilleur isolant.

Du point de vue des performances des isolants, on remarque que notre produit BioFibTrio à base de laine de lin a des propriétés semblables à la laine de verre et est également un bien meilleur isolant que le polystyrène extrudé.

A côté de l'aspect naturel et écologique, le prix de l'isolant joue toujours un rôle très important auprès des consommateurs et des entreprises. La laine de lin est, en ce qui la concerne, jusqu'à deux fois plus chère que la laine de verre. C'est donc cette différence de prix qui explique que la laine de lin reste encore très peu utilisée dans nos habitations à l'heure actuelle.

Comparaison expérimentale :

Certains produits isolants à base de laine de lin vantent les mérites de cette plante naturellement ignifuge. Nous avons donc choisi de vérifier cette propriété et de comparer la résistance au feu de notre produit avec les deux isolants étudiés ci-dessus (l'ensemble de l'expérience est disponible en annexes 6.5 et 6.6).

3.2.5. Chaufferies collectives

Chaque année l'ensemble des teilleurs français produisent près de 127 000 tonnes de sous-produits, les anas. Comment sont-ils alors valorisés ?

Plusieurs entreprises de Normandie (De Sutter...) les utilisent pour la fabrication de panneaux de particules : les panneaux agglomérés. D'autres débouchés se sont également développés ces dernières années dont le paillage horticole et la litière pour chevaux.



Figure 20: Aggloméré

La tendance actuelle de développement durable a aussi permis de mettre au point plusieurs systèmes de chaufferies biomasse directement alimentés par les anas de lin.

Comme illustré ci-dessous, le principe de fonctionnement d'un tel dispositif est assez simple :

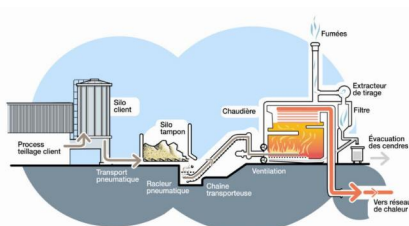


Figure 21: Fonctionnement d'une chaudière biomasse

Initialement stockés en silos, les anas de lin sont transportés dans un deuxième silo, le silo tampon. Ils sont ensuite acheminés vers la chaudière, où ils seront brûlés.

Certaines particules émises lors de la combustion sont ensuite captées par un filtre. La chaleur est quant à elle répartie entre les infrastructures raccordées au réseau de distribution de chaleur. Les cendres produites servent alors à la fertilisation des cultures agricoles.

Ce dispositif permet notamment d'encourager la réduction des émissions de CO₂. A titre d'exemple, une chaudière de 2,9 MW ne consomme que 2500 tonnes d'anas, contre un équivalent en énergies fossiles de 100 000 litres de fioul par an.

Ce type de projet s'inscrit donc parfaitement dans la transition énergétique et participe aux objectifs nationaux en termes d'énergies renouvelables, le but étant d'augmenter de 50% l'utilisation des énergies renouvelables d'ici 2023 et de réduire de 30% la consommation de combustibles fossiles à l'horizon 2030.

Le seul inconvénient de ce type de dispositif est qu'il produit davantage de cendres (environ 3.5% de cendre par quantité de masse sèche) en étant alimenté en anas de lin qu'en étant alimenté en paillettes de bois déchiquetées.

3.3. Le lin tourné vers l'avenir

3.3.1. La production mondiale de lin textile

Le lin représente 2,4% de la production mondiale des fibres naturelles, soit environ 150 000 000 kilos de lin par an, largement dominée par le coton(75%).

Les deux tiers de la production mondiale du lin est cultivée en Europe (soit 110 000 hectares), avec 80% en France qui produit des fibres haut de gamme et moyenne gamme.

De plus, la production en Normandie est favorisée par son climat tempéré, et le savoir-faire des linculteurs qui assurent 60% de la production française.

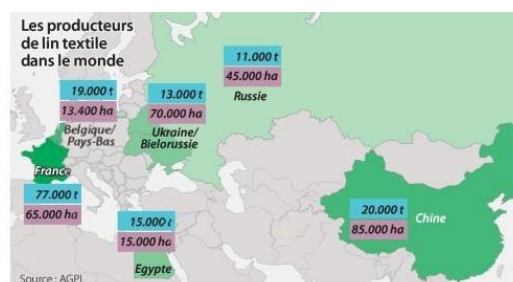


Figure 22: Pays producteurs de lin

Par ailleurs, la filière française du lin joue un rôle important dans le maintien du tissu économique et social, particulièrement dans les zones rurales. Ceci s'explique avec la mobilisation d'une main d'œuvre assez importante pour sa culture. En effet, il existe plus de 12 000 emplois dans les secteurs de culture et de teillage du lin.

3.3.2. Impact écologique de la production du lin

De la culture à la transformation, le lin est peu gourmand en énergie et en eau et nécessite cinq fois moins d'engrais que celui du coton. En effet, dans le lin, rien ne se perd puisqu'on utilise toute la plante : la fibre, les graines, la paille, le bois et la poussière.

De plus, la plante fixe le CO2 dans la terre grâce à ses racines, puisqu'un hectare de lin retient 3,7 tonnes de CO2 par an en moyenne.

La mode est l'une des industries les plus appauvrissantes en ressources avec une grande consommation en eau. Cela représente environ 4% de l'eau potable dans le monde (pour un ordre d'idée : 10 950 000 m³ d'eau sont nécessaires pour la teinture textile par jour). Cette industrie engendre 17 à 20 % de la pollution de l'eau mondiale et 3 à 10 % des émissions carbone dans le monde (1,2 milliard de tonnes de gaz à effets de serre). Cette pollution est en partie due à la production et à la transformation du coton, puisque celui-ci nécessite une irrigation importante (entre 7000 à 29000L d'eau pour 1kg), et une grande quantité de pesticides/ insecticides. De plus, lors du blanchissage du coton, le chlore est utilisé en quantité importante ce qui engendre une pollution des sols.

Par ailleurs, depuis la publication de certains rapports comme celui de Greenpeace qui affirme que 60% des vêtements contiennent aujourd'hui du polyester, la volonté des consommateurs est de connaître la provenance de leurs vêtements et l'impact de ceux-ci sur l'environnement.

Le lin apparaît ainsi comme une alternative écologique et un choix d'excellence pour l'environnement et la santé des consommateurs, la culture étant non irriguée et à 99,9% sans défoliant, biodégradable et recyclable.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Face à la crise environnementale, le lin se distingue par son caractère local et écologique. Celui-ci suscite un grand intérêt auprès des industriels et des consommateurs, et comme nous l'avons vu précédemment, chaque partie de cette plante est utilisée.

Pour approfondir nos connaissances sur les différentes applications de cette fibre, nous avons pu réaliser des expériences (béton, isolant) et effectuer une visite dans une usine de teillage.

Dans un but d'amélioration de ce projet, il aurait été intéressant d'axer davantage notre travail sur l'aspect expérimental sur le sujet de l'isolant à base de laine de lin, il aurait notamment été intéressant de réaliser une étude plus complète de ce matériau en étudiant l'aspect phonique ou thermique. Pour l'expérience du béton de lin il aurait aussi été intéressant de mener une étude plus détaillée, en adaptant le dosage du béton, en changeant la taille des fibres de lin et leur concentration et en réalisant l'expérience sur un nombre d'éprouvette plus important afin d'obtenir des résultats avec moins d'incertitude.

Grâce à ce projet, nous avons développé notre esprit de synthèse. C'est-à-dire, s'informer et récolter le maximum d'informations au sujet du lin pour ensuite le retranscrire de manière claire et concise dans notre rapport. De plus, ce projet nous a permis de renforcer notre esprit critique lors de notre étude bibliographique. En effet, nous avons comparé les différents écrits et croisé les connaissances obtenues pour avoir une vision plus globale des applications du lin.

Le travail de groupe nécessite la prise en compte de l'opinion de chacun afin de trouver des compromis. Cette manière de travailler en groupe nous a permis de développer notre autonomie et notre esprit d'initiative, qui sont des qualités indispensables en tant que futurs ingénieurs.

Finalement, notre projet de physique « Le lin dans tous ses états » a été une expérience enrichissante tant sur le plan personnel que professionnel.

5. BIBLIOGRAPHIE

Images présentes dans le rapport :

[3] <https://www.arvalis-infos.fr/lin-semis-viser-1800-plantes-levees/m--@/view-10375-arvarticle.html> (valide à la date du 20/05/2022).

[4] <https://agriculture.gouv.fr/jep2018-chanvre-et-lin-la-bioeconomie-sexpose-au-ministere-de-lagriculture> (valide à la date du 20/05/2022).

[5] <https://www.semencesdefrance.com/actualite-semences-de-france/chantiers-de-recolte-planifier-larrachage-du-lin-fibre-de-printemps/> (valide à la date du 20/05/2022).

[6] <https://www.action-agricole-picarde.com/une-multiplicite-de-methodes-pour-une-recolte-de-semences-securisee> (valide à la date du 20/05/2022).

[7] <https://www.linenme.fr/blog/tout-ce-que-vous-devez-savoir-sur-le-rouissage-du-lin-a-la-rosee/> (valide à la date du 20/05/2022).

[8] <https://ferme-villedieu.com/lin-fibre/> (valide à la date du 20/05/2022).

[9] <https://www.embrin.fr/fr/page/de-la-fibre-a-la-collection> (valide à la date du 20/05/2022).

[10] <https://thesewcialists.com/2021/01/08/textiles-of-the-world-irish-linen/>
(valide à la date du 20/05/2022).

[11] <https://legauloisjeans.com/pages/jeans-lin-naturel-femme>
(valide à la date du 20/05/2022).

[12] <https://www.evedeco.com/fr/tissus-lin/11237-tissu-lin-ameublement-fauteuil-tapissier-polo-thevenon.html> (valide à la date du 20/05/2022).

[13] <https://france3-regions.francetvinfo.fr/normandie/normandie-leader-mondial-production-lin-on-vous-explique-1651200.html> (valide à la date du 20/05/2022).

[14] https://www.leinsamen.fr/fr/?page_id=1382 (valide à la date du 20/05/2022).

[15] <https://fr.dreamstime.com/fermez-vous-vers-haut-graine-lin-cuill%C3%A8re-en-bois-nourriture-superbe-taille-d-image124412225> (valide à la date du 20/05/2022).

[16] <https://www.midilibre.fr/2022/02/24/mediterranee-we-explore-le-catamaran-ecolo-en-fibre-de-lin-prend-forme-a-la-grande-motte-10131796.php> (valide à la date du 20/05/2022).

[17]

<https://www.lesechos.fr/2010/12/de-lusine-au-premier-vol-comment-sachete-un-boeing-1088383> (valide à la date du 20/05/2022).

<https://www.terredelin.com/internet/innovation-durable-amp-composites/lin-composite-amp-technique/lin-composite-amp-technique-1285.aspx> (valide à la date du 20/05/2022).

[18]

https://resources.taloe.fr/resources/documents/4224_190604_FichID_Les_materiaux_biosources_et_le_reemploi.pdf (valide à la date du 20/05/2022).

[19] <http://www.karibati.fr/wp-content/uploads/2016/02/160208-Projet-BTONLIN-Esitc-Caen-CMEG.pdf> (valide à la date du 20/05/2022).

[20] http://www.vegetal-e.com/fr/produits-de-construction-en-lin_102.html (valide à la date du 20/05/2022).

[21] https://www.plateformesolutionsclimat.org/wp-content/uploads/2015/04/Dossier-de-Presse_Gdf-suez-Fiche-Biomasse-LIN.pdf (valide à la date du 20/05/2022).

[22] <https://www.reussir.fr/ladepeche/une-filiere-en-progres-permanent>
(valide à la date du 20/05/2022).

Culture et teillage du lin : (valide à la date du 20/05/2022)

<https://www.terredelin.com/HP/HPInternet.aspx>

<http://linfrance.com/la-culture-du-lin-dans-les-champs-en-5-etapes/>

<https://www.embrin.fr/fr/page/de-la-fibre-a-la-collection>

http://www.vanhersecke.fr/le_teillage.php

<https://www.linpossible.fr/la-filature/#mouille>

<https://pol-rosa.com/la-transformation-du-lin/#:~:text=Le%20tissage%20du%20lin&text=Le%20tissage%20se%20r%C3%A9alise%20sur,obtenir%20des%20tissus%20m%C3%A9lang%C3%A9s%20uniques.>

<https://www.usrtl-ifl.fr/spip.php?article34>

Textile : (valide à la date du 20/05/2022)

<https://atelier-unes.com/article/le-lin-une-matiere-eco-responsable-sous-estimee>

<https://www.lesoptimistes.fr/lin-fibre-ecologique/#histoire-lin>

<https://www.consoglobe.com/lin-tissu-ecologique-cg>

https://www.lexpress.fr/actualites/1/societe/ouverture-en-normandie-d-une-des-seules-filatures-de-lin-en-france_2168590.html

<https://www.linverse.fr/magazine/lin-textile>

Le lin tourné vers l'avenir : (valide à la date du 20/05/2022)

<https://www.gaiaetdubos.com/blogs/blogue-de-gaia-dubos/pourquoi-le-lin-est-une-fibre-ecologique-en-soi>

<https://linenshed.fr/blogs/news/quel-est-limpact-environnemental-du-lin-et-du-coton>

<https://france3-regions.francetvinfo.fr/normandie/normandie-leader-mondial-production-lin-on-vous-explique-1651200.html>

<https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1311-production-mondiale-de-fibre-de-lin.html#:~:text=Le%20lin%20et%20le%20chanvre,de%2075%25%20par%20le%20coton.>

<https://www.usinenouvelle.com/article/leaders-mondiaux-les-producteurs-francais-de-lin-craignent-le-contrecoup-de-la-crise.N978606>

<https://www.lebetteravier.fr/2019/11/28/le-lin-une-culture-en-or-pour-l-environnement/#:~:text=Le%20lin%20est%20une%20plante,y%20a%20rien%20%C3%A0%20jeter.>

Composites : (valide à la date du 20/05/2022)

<https://www.terredelin.com/HP/HPInternet.aspx>

<http://fibredelin-composite-tpe.e-monsite.com/pages/introduction.html>

<http://www.saneco.com/le-lin/#applications>

<https://www.libeco.com/fr/produits/applications-technique-de-lin>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Lin_cultiv%C3%A9

<http://www.dehondtcomposites.com/>

<https://www.youtube.com/watch?v=wur2BJ-aRKc&list=PLulb74pO9-deT5AEFiVHV009lr1RI-ev&index=1>

<https://www.youtube.com/watch?v=D-c27Bx-spE&list=PLulb74pO9-deT5AEFiVHV009lr1RI-ev&index=18>

<https://www.youtube.com/watch?v=VJxWpEB-Zto&list=PLulb74pO9-deT5AEFiVHV009lr1RI-ev&index=20>

<https://www.youtube.com/watch?v=ps82HRRQKyo&list=PLulb74pO9-deT5AEFiVHV009lr1RI-ev&index=21>

https://www.youtube.com/watch?v=_63TIhcRhY4&list=PLulb74pO9-deT5AEFiVHV009lr1RI-ev&index=29

<https://www.youtube.com/watch?v=FfhtS23VKNY&list=PLulb74pO9-deT5AEFiVHV009lr1RI-ev&index=31>

<https://www.esitc-caen.fr/btonlin>

<http://www.karibati.fr/wp-content/uploads/2016/02/160208-Projet-BTONLIN-Esitc-Caen-CMEG.pdf>

http://mairiehardinvast.fr/IMG/pdf/Materiaux_bio-sources_produits_et_ou_utilises_en_Basse_Normandie_juin_2013.pdf

<https://www.lelin-cotenature.fr/FR/de-la-fibre-de-lin-dans-le-beton-169.html#:~:text=Le%20lin%2C%20un%20%C3%A9comat%C3%A9riau%20du%20futur&text=La%20densit%C3%A9%20des%20fibres%20de,limitant%20la%20fissuration%20du%20mat%C3%A9riau.>

<https://terres-et-territoires.com/bien-dans-ses-bottes/innovation-le-lin-cest-du-beton#:~:text=Il%20permet%20d'apporter%20une,aussi%20d'excellents%20isolants%20phoniques.>

<https://www.batirama.com/article/10545-un-beton-de-structure-a-base-de-fibre-de-lin.html#:~:text=Le%20projet%20Btonlin%20vise%20%C3%A0,plus%20utilis%C3%A9%20dans%20la%20construction.>

https://bybeton.fr/grand_format/lin-beton-biosource-structurel#:~:text=Les%20fibres%20de%20lin%20absorbant,b%C3%A9ton%20en%20ont%20%C3%A9t%C3%A9%20affect%C3%A9es.

Isolants : (valide à la date du 20/05/2022)

<https://slideplayer.fr/slide/1861889/>

<https://www.materiaux-naturels.fr/produit-liste/201-isolants-fibres-de-lin>

<https://ecolenationaleduchanvre.com/test-de-resistance-feu-beton-de-chanvre/>
<http://www.sanopan.com/sanopan-le-panneau-de-lin.php>
<https://www.lemoniteur.fr/article/j-utilise-de-la-fibre-de-lin.1465584>
<https://www.youtube.com/watch?v=Vgeh6FFwhsE&list=PLulb74pO9deT5AEFiVHV009Ir1RI-ev&index=3>
<https://www.youtube.com/watch?v=QyXY7I8-MQM&list=PLulb74pO9deT5AEFiVHV009Ir1RI-ev&index=4>
<https://www.youtube.com/watch?v=gFZz3DXniDw&list=PLulb74pO9deT5AEFiVHV009Ir1RI-ev&index=6>
<https://www.youtube.com/watch?v=LcJ83HkLW-s&list=PLulb74pO9deT5AEFiVHV009Ir1RI-ev&index=9>
<https://www.youtube.com/watch?v=Atn2D0u92kE&list=PLulb74pO9deT5AEFiVHV009Ir1RI-ev&index=10>
<https://www.youtube.com/watch?v=wmzDwPHsuoY&list=PLulb74pO9deT5AEFiVHV009Ir1RI-ev&index=13>
<https://www.youtube.com/watch?v=cYBM21R6azo&list=PLulb74pO9deT5AEFiVHV009Ir1RI-ev&index=12>
https://www.youtube.com/watch?v=oYr_iSfrxT0&list=PLulb74pO9deT5AEFiVHV009Ir1RI-ev&index=14
http://www.vegetal-e.com/fr/produits-de-construction-en-lin_102.html#:~:text=Laine%2C%20panneaux%20agglom%C3%A9r%C3%A9s%2C%20%C3%A9cran%20de,lin%20utilis%C3%A9s%20dans%20la%20construction.
https://www.preventionbtp.fr/ressources/solutions/isoler-les-planchers-plafonds-murs-cloisons-et-combles-par-la-laine-de-lin_2HoaBBCFBXfBX3vaCJvBCK

Chaufferies collectives : (valide à la date du 20/05/2022)

https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/1424/rapport_materiaux_biosource_VOObout2012.pdf
<https://www.engie.fr/actualites/une-chaufferie-biomasse-fonctionnant-aux-anas-de-lin/>
https://www.plateformesolutionsclimat.org/wp-content/uploads/2015/04/Dossier-de-Presse_Gdf-suez-Fiche-Biomasse-LIN.pdf

Lin oléagineux : (valide à la date du 20/05/2022)

<https://www.youtube.com/watch?v=WXJSgXkb2q4&list=PLulb74pO9deT5AEFiVHV009Ir1RI-ev&index=26>
<https://www.web-agri.fr/alimentation-animale/article/132951/le-lin-ameliore-la-production-la-reproduction-et-la-marge-des-vaches-laitieres>
<https://www.santemagazine.fr/alimentation/aliments-et-sante/quels-sont-les-bienfaits-sante-et-beaute-des-graines-de-lin-896191>
<https://www.yocty.com/graines-lin-bienfaits>
<https://ileauxepices.com/blog/2020/01/23/dangers-effets-indesirables-graines-de-lin/wpid25716/>

<https://www.pleinchamp.com/actualite/le-lin-oleagineux-en-quete-de-producteurs>

https://comifer.asso.fr/images/pdf/Fiches_cultures/fiche-culture_lin.pdf

<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Lin-cultive-page-2.html>

<https://www.promessedefleurs.com/conseil-plantes-jardin/ficheconseil/la-vernalisation-quest-ce-que-cest>

https://abiodoc.docressources.fr/doc_num.php?explnum_id=1951

<http://veronicatroglianutritionniste.blogspot.com/2014/06/les-bienfaits-des-porcs-nourris-aux.html>

<https://epices-review.fr/recette-huile-lin/>

6. ANNEXES

6.1. Utilisation du lin oléagineux dans l'alimentation humaines

6.1.1. Composition, bienfaits et inconvénients des graines de lin

Les graines de lin sont composées de macronutriments :

Glucides : 28,88g | Protéines : 18,29g | Lipides : 42,16g et elles apportent 534kcal.

Elles contiennent également des micronutriments comme :

- L'oméga 3 (diminution des risques cardiovasculaires, aide au renouvellement cellulaire, à la synthèse des acides gras ou encore au bon fonctionnement du cœur et du système nerveux)
- Les fibres solubles (satiété) et insolubles (transit)
- Les lignanes (régulation des hormones et prévention du cancer du sein)
- Le phytostérol (baisse du mauvais cholestérol)

Pour une alimentation végétarienne, elles sont aussi bénéfiques car elles contiennent du fer et des protéines contenant presque tous les acides aminés.

6.1.2. Propriétés, avantages et inconvénients de l'huile de lin

L'huile de lin est exclusivement composée de lipides qui apportent 884kcal.



En détail, elle est composée de 17 à 19 % d'oméga 9 (acide gras insaturés) ; de 55 à 60 % d'oméga 3 (acide gras polyinsaturés) et de 15 à 16 % d'oméga 6 (acide linoléique). Le reste : acides gras saturés comme l'acide stéarique et l'acide palmitique.

Parmi les propriétés intéressantes qu'elle possède, deux ont retenu notre attention : un indice d'iode élevé (170 à 204) et un indice de saponification également élevé (188 à 196).

Exemple de recette : Pudding de graines de lin

- 20g de graines de lin
- 100ml de lait
- 125g de skyr
- 50g fruits rouges

1/ Mettre les graines de lin avec le lait au frais pendant 3h.

2/ Ajouter le skyr et mélanger

3/ Dans un récipient, superposer la crème aux graines de lin avec les fruits rouges, hacher grossièrement.

Ci-dessous, vous trouverez les étapes de préparation :



Étape 1 :20g de graines de lin



Étape 2 :100ml de lait



Étape 3 : 3h au frais



Étape 4 : 125g de skyr (ou fromage blanc)



Étape 5 : Superposer les couches skyr/fruits

DÉGUSTEZ !

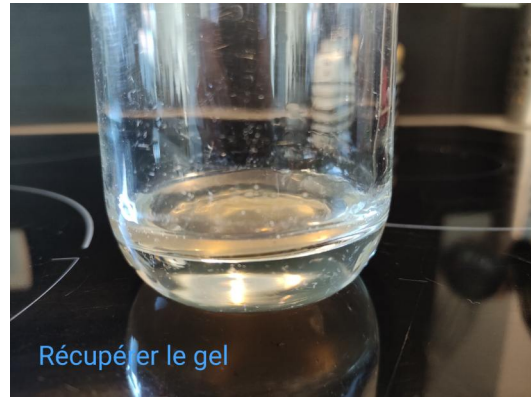
6.2. Utilisation en cosmétique

Il n'est pas possible de se servir des graines de lin directement, il faut en faire un gel. Pour cela, il existe deux méthodes d'extraction, à chaud ou à froid.

Extraction à chaud	Extraction à froid
1 portion de graines de lin pour 4 portions d'eau	1 portion de graines de lin pour 6 portions d'eau
- faire bouillir l'eau et les graines puis laisser cuire 5 minutes - filtrer l'eau et laisser refroidir	- mettre les graines de lin et l'eau dans un bocal fermé au réfrigérateur pendant 24 heures - filtrer le mélange et laisser au repos pendant 24 heures ; c'est prêt

Nous avons choisi de réaliser la première méthode car elle est plus rapide à réaliser.





Difficultés rencontrées : Lorsque nous avons fait la préparation, il était compliqué de savoir quand récupérer l'eau, c'est-à-dire de savoir à quel moment l'eau s'était gélifiée. Nous avons dû nous y reprendre à plusieurs fois. Par ailleurs, nous avons été surpris du rendement. Ici, nous avons mis 20g de graines de lin pour 80g d'eau et nous avons obtenu un volume de 4 cm³, ce qui est très peu.

Nous avons obtenu une texture visqueuse comme vous pouvez le voir sur la photo ci-contre.

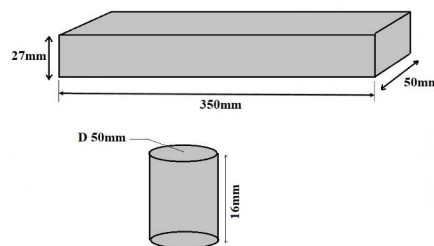
Utilisation : Masque pour les cheveux (avant ou après-shampooing) ou pour la peau

6.3. Programme BtonLin

Afin de vérifier les propriétés d'un béton fibré à base de lin en compression et en flexion, nous réalisons des éprouvettes cylindriques de diamètre 50 mm ainsi que des poutres en béton de lin de 35 cm de longueur.

Nous comparerons les résultats obtenus aux propriétés du béton standard ainsi qu'à celles d'un béton fibré classique.

Au vu des caractéristiques des machines d'essai mises à disposition, nous dimensionnons les éprouvettes suivantes :



Essai de compression : Des éprouvettes cylindriques sont réalisées à partir des dosages adoptés dans le programme BtonLin. Afin de réduire les erreurs de mesures et d'obtenir des résultats plus fiables, le nombre d'éprouvettes à tester est au minimum de par type de béton :

Type	Nombre d"éprouvettes
Béton standard	5
Béton fibré lin 12 mm, 0,1%	4
Béton fibré lin 12 mm, 0,3%	4
Béton fibré lin 24 mm, 0,1%	4
Béton fibré lin 24 mm, 0,3%	4

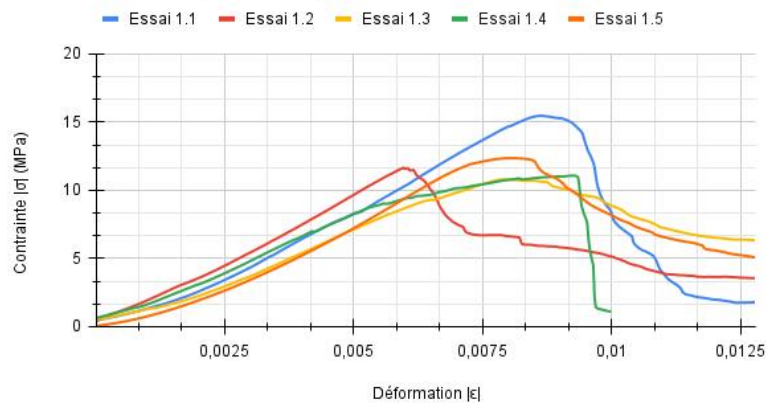
Principe expérimental : Chaque éprouvette est placée sur le banc d'essai. Une force progressive comprime l'éprouvette en compression. Les données relevées sont ensuite analysées et la contrainte maximale déterminée.



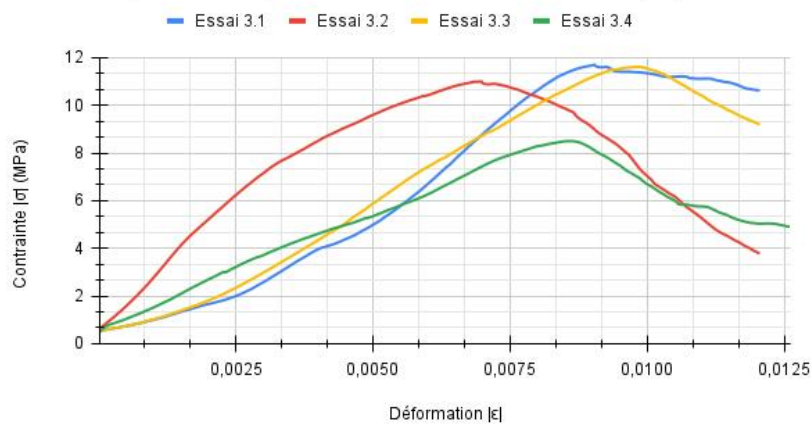
Résultats : A partir des mesures effectuées et des données relevées, nous calculons la contrainte et traçons les courbes suivantes :

$$\sigma_{max} = \frac{F}{S} \quad \text{avec } F \text{ en N et } S, \text{ la section en mm}^2.$$

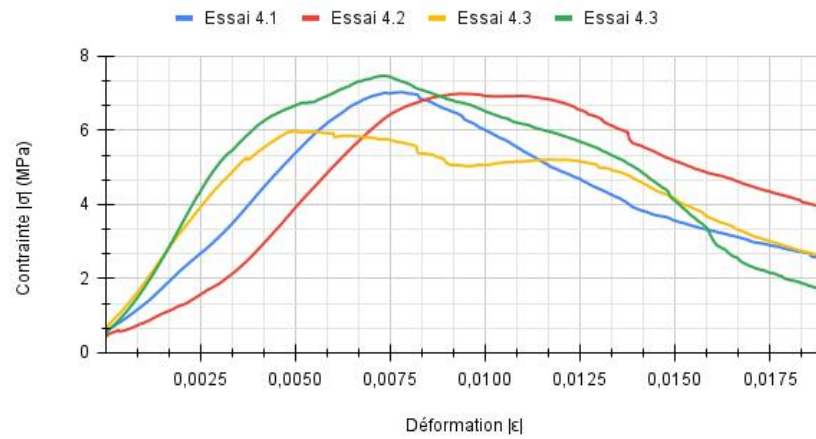
Compression éprouvettes béton standard



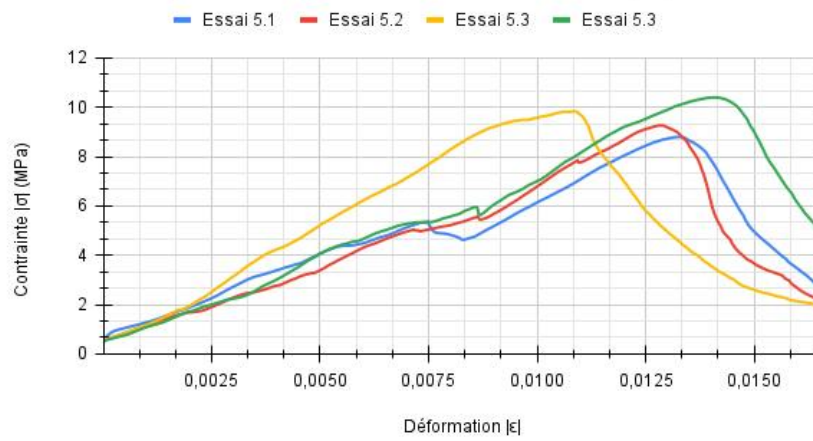
Compression éprouvettes béton fibré lin 12mm, 0,1%



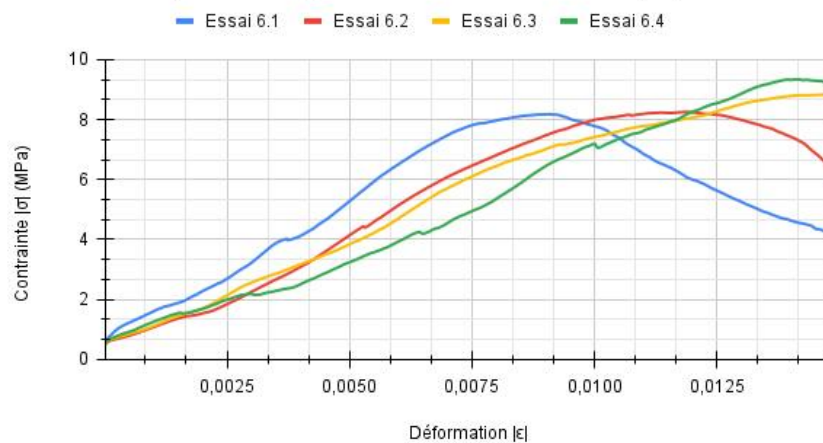
Compression éprouvettes béton lin 12mm, 0,3%



Compression éprouvettes béton lin 24mm, 0,1%

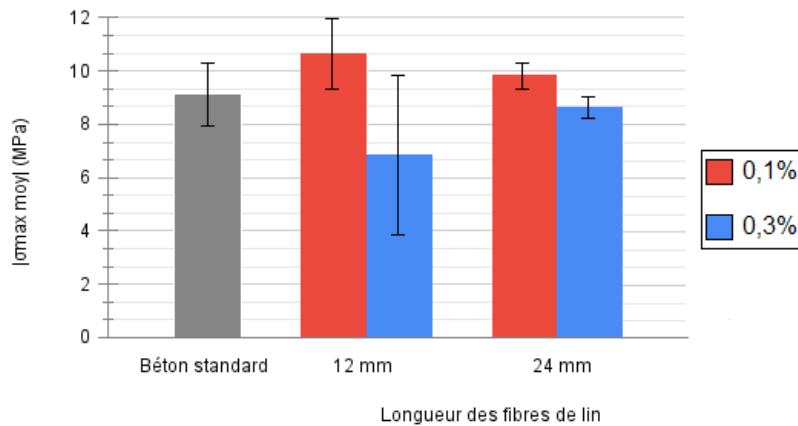


Compression éprouvettes béton lin 24mm, 0,3%



Synthèse : A partir des mesures effectuées et des données relevées, nous calculons la contrainte maximale moyenne en compression pour chaque type d'échantillon :

Résistance en compression des éprouvettes de béton après 28 jours de séchage



Analyse : Finalement, après traitement des données, il semble que le béton fibré 12 mm, dosé à 0,1 % apporte une résistance en compression légèrement supérieure à celle d'un béton standard (contrainte maximale moyenne de 10,5 MPa contre 9 MPa pour le béton standard). Néanmoins, une analyse statistique nous montre que les intervalles de confiance de nos mesures peuvent, dans certains cas, remettre en cause nos hypothèses ;

Afin d'obtenir une analyse plus détaillée, il aurait été nécessaire de multiplier le nombre d'éprouvettes à tester et de changer le dosage du béton et la longueur des fibres de lin.

Essai de flexion : Des éprouvettes prismatiques sont réalisées à partir des différents dosages utilisés dans le programme BtonLin. Le nombre d'éprouvettes est également multiplié afin de réduire les erreurs de mesure :

Type	Nombre d'éprouvettes
Béton standard	3
Béton fibré standard	3
Béton fibré lin 12 mm, 0,1%	2
Béton fibré lin 12 mm, 0,3%	3
Béton fibré lin 24 mm, 0,1%	2
Béton fibré lin 24 mm, 0,3%	4
Béton fibré lin entier, 0,1%	2
Béton fibré lin entier, 0,3%	4

Principe expérimental : Chaque éprouvette est placée sur le banc d'essai de flexion 2 points. Une force est appliquée sur le milieu de l'éprouvette. Les données relevées sont ensuite analysées et la contrainte maximale déterminée.



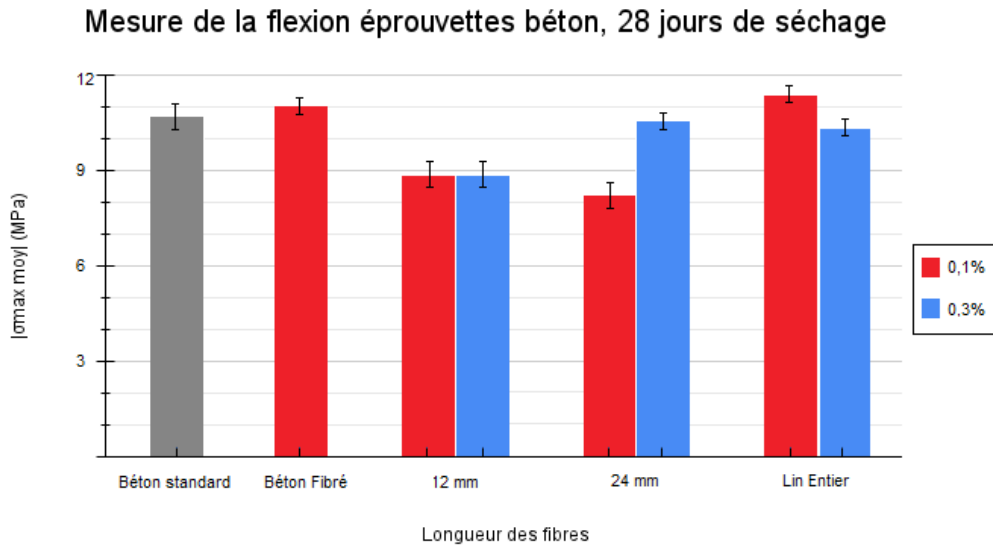
Ci-contre, une photographie du montage expérimental :

Résultats : A partir des mesures effectuées et des données relevées, nous calculons la contrainte maximale en flexion :

$$\sigma_{max} = \frac{M_f}{I_{gz}} * y = \frac{\frac{F * L}{4}}{\frac{b * h^3}{12}} * y = \frac{3 * F * L}{b * h^3} * y$$

où M_f est le moment fléchissant (N.mm), I_{gz} , le moment quadratique (mm⁴) et y , l'ordonnée de la fibre neutre.

On trace ensuite le diagramme de la contrainte maximale pour chaque type d'échantillon en fonction de la longueur des fibres de lin.



Il semble, d'après les résultats obtenus, que les bétons fibrés avec du lin n'ont qu'un très faible impact sur la résistance du matériau en flexion (de l'ordre de 0,2 MPa pour le béton fibré avec du lin entier, dosé à 0,1%). Dans certains cas, l'ajout de fibres de lin provoque même une chute brutale de la contrainte maximale admise par le béton.

Le test effectué n'est donc que partiellement concluant.

On pourra néanmoins constater que l'ensemble de nos valeurs de contraintes maximales en flexion sont toutes supérieures à celles obtenues dans le programme BtonLin décrit dans la section précédente (environ 5,5 MPa pour le projet BtonLin contre 9 MPa en moyenne pour nos valeurs expérimentales).

Remarques : Il aurait été nécessaire de poursuivre cette expérience en faisant varier plusieurs paramètres afin d'obtenir davantage de résultats :

- La composition du béton
- Le diamètre des graviers
- L'ajout de superplastifiants
- La longueur des fibres de lin

Conclusion générale :

Les résultats obtenus expérimentalement ne s'accordent que très peu avec les résultats obtenus dans le programme BtonLin. Le tableau suivant récapitule les configurations permettant d'obtenir les meilleures résistances du béton :

	Programme BtonLin	Expériences
Compression	Fibres lin 24 mm, 0,1 % Fibres lin 36 mm, 0,2 %	Fibre lin 12 mm, 0,1 %
Flexion	Fibre lin 12 mm, 0,3 %	Fibre lin entier, 0,1 %

6.4. Comparaison théorique isolants

Isolant	Biofib Trio	Ultracoustic	Panneau Polystyrène, XPS Soprema
Composition	Chanvre, Coton, Lin (92%)	Laine de verre	Polystyrène extrudé
Origine	Naturelle	Minérale	Synthèse
Épaisseur	45 mm	45 mm	45 mm
Masse volumique (kg/m³)	30 kg/m ³	30 kg/m ³	10 kg/m ³
Résistance thermique (R)	1,18 m ² .K/W	1,2 m ² .K/W	1,05 m ² .K/W
Capacité thermique (Cp)	1800 J/kg.K	1030 J/kg.K	1000 J/kg.K
Conductivité thermique (λ)	0,038 W/m.K	0,037 W/m.K	0,045 W/m.K
Points forts	<ul style="list-style-type: none"> - Léger - Non allergène - Non irritant (facilité pose) - Recyclable - Matière première locale - Tenue naturelle au feu 	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne isolation acoustique - Prix modéré - Bonne tenue au feu 	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne isolation thermique - Étanche à l'air - Faible prix - Léger
Points faibles	<ul style="list-style-type: none"> - Prix élevé - Disponibilité variable 	<ul style="list-style-type: none"> - Matière première non renouvelable - Irritant (à la pose) 	<ul style="list-style-type: none"> - Matière première non renouvelable - Aucune résistance

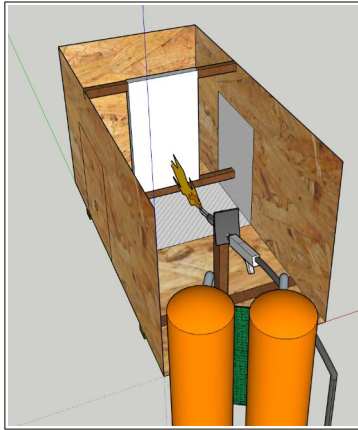
			incendies - Mauvaise isolation phonique
Conditionnement	Panneaux/ Rouleaux	Rouleaux	Plaques
Utilisation	- Combles - Plafonds - Planchers - Cloisons	- Combles - Cloisons - Studios musique - ERP	- Murs intérieurs - Murs extérieurs - Sols

6.5. Éléments à tester, résistance au feu

DÉSIGNATION	RÉFÉRENCE	MATÉRIAU	CARACTÉRISTIQUE
Plaque BA13	Prégyplac Std 600 BA13	Plâtre, carton	2400*600*13
Isolant 1	Panneau polystyrène XPS Soprema	Polystyrène extrudé	1200*60*45mm
Isolant 2	Biofib Trio	Chanvre, coton, lin	1200*600*45 mm
Isolant 3	Ultracoustic	Laine de verre	8000*60*45mm

6.6. Expérience isolant à base de laine de lin

Présentation : Afin de vérifier les propriétés ignifuges du lin nous mettons en place un banc d'essai, reproduisant un incendie dans un appartement.



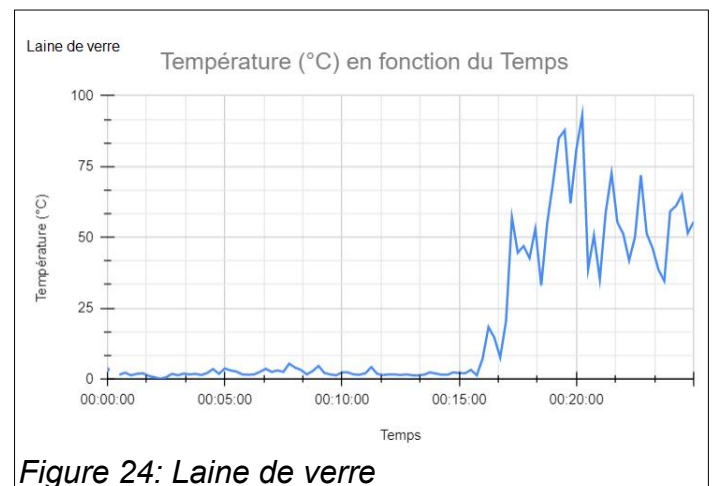
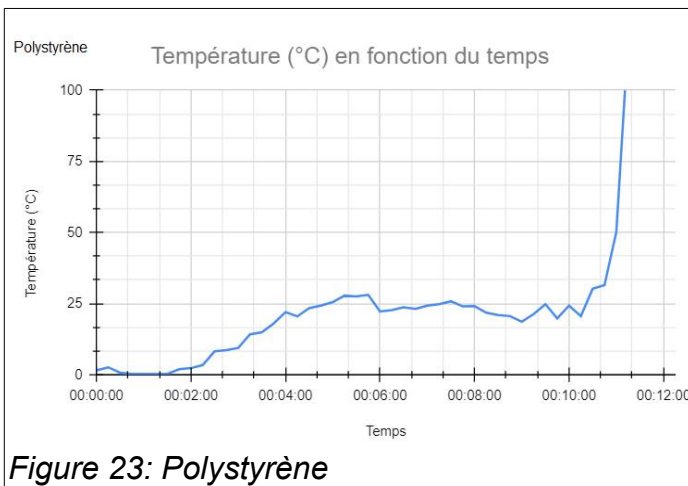
Notre ensemble cloison en BA13/ isolant est placé dans un caisson muni d'un chalumeau au gaz, avec une flamme directe d'une température constante aux alentours de 400°C.

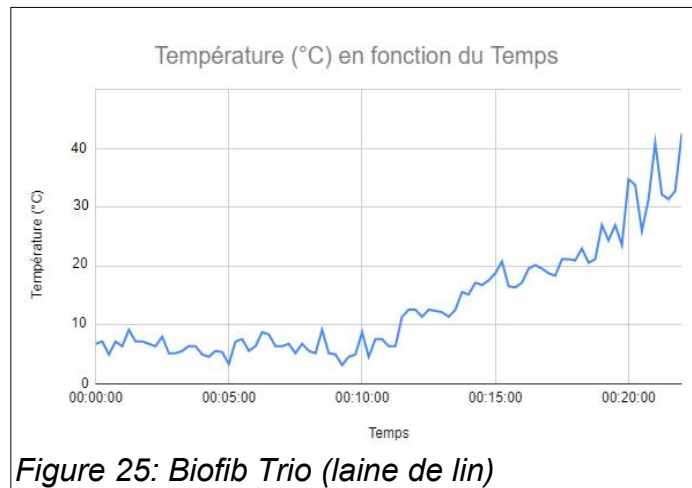
Une vidéo de présentation de l'essai est accessible sur le site web du projet.

Durant l'essai, la température est relevée toutes les 15 secondes afin d'obtenir des courbes de température.

L'expérience sera arrêtée lorsque la totalité de l'isolant sera traversée par la flamme, ce dernier ne répondant plus à sa fonction première d'isolant. La durée de l'expérience sera alors relevée et permettra une comparaison avec les autres isolants.

Résultats : Pour la laine de verre et l'isolant à base de laine de lin, les mesures ont été arrêtées au bout de 22 minutes, la structure plaque de BA13/ laine de verre ou lin étant toujours intacte.





D'après les premiers résultats expérimentaux, on constate que l'assemblage plaque BA13/ polystyrène n'assure que très peu de temps une barrière aux flammes (environ 12 minutes) avec une température en surface externe très élevée (aux alentours de 300°C en fin d'expérience).

Au bout de 22 minutes d'expérience, l'assemblage plaque de BA13/ laine de verre ou BA13/ laine de lin présente toujours une bonne résistance au feu.

Pour la laine de verre, la température relevée en surface externe augmente de manière significative aux alentours de la 16ème minute tandis que pour le lin, cette augmentation de température se fait de manière plus progressive, linéaire vers une température de surface externe moins élevée (avec un maximum de 40°C contre 90° pour la laine de verre).

Afin de compléter notre expérience précédente et de différencier les isolants à base de laine de verre et de laine de lin, nous avons choisi de réaliser un test d'inflammabilité direct des isolants suivants :

- Laine de verre
- Biofib Trio (laine de lin)

La flamme est cette fois-ci dirigée directement vers l'isolant, sans la plaque de plâtre.

On constate alors que l'isolant à base de laine de lin met près de 13 secondes pour s'enflammer. On remarque également la présence de fortes fumées et une inflammation du matériau quasi-instantanément (se référer à la vidéo disponible sur le site web).

La laine de verre met, quant à elle, quasiment deux fois plus de temps avant de brûler (aux alentours de 32 secondes), sans production de fumées.

Conclusion : Suite aux expériences menées, on en conclut que l'isolant à base de laine de lin se classe entre le polystyrène et la laine de verre suivant les critères de résistance au feu.

On constate également que celui-ci permet de bien contenir la chaleur lorsqu'il est associé à une plaque de BA13. En termes d'inflammabilité, l'isolant BioFib Trio ne résiste pas à une flamme directe.

Cette expérience nous a donc permis de vérifier les caractéristiques fournies par le fabricant en termes d'isolation thermique. Néanmoins, le critère de résistance au feu avancé par certains fournisseurs n'a pu être validé.

Concernant la précision de nos mesures (relevé de température), il est nécessaire d'adopter un regard critique sur celles-ci. La précision de notre matériel peut être remise en cause (thermomètre, chalumeau ne délivrant pas une flamme à température parfaitement constante...).

6.7. Accès au site web du projet

Ci dessous, un QR Code permettant d'accéder au site web du projet :



Lien permettant d'accéder au site :

<https://sites.google.com/view/le-lin-dans-tous-ses-etats/culture-du-lin>