

# Traitements des fibres de lin : influence sur l'hydratation d'un composite ciment-lin

**J. Page<sup>1</sup>, F. Khadraoui<sup>2</sup>, M. Boutouil<sup>3</sup>, M. Gomina<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>ESITC Caen, 14610 Epron, mail : jonathan.page@esitc-caen.fr

<sup>2</sup>ESITC Caen, 14610 Epron, mail : fouzia.khadraoui-mehir@esitc-caen.fr

<sup>3</sup>ESITC Caen, 14610 Epron, mail : mohamed.boutouil@esitc-caen.fr

<sup>4</sup>Laboratoire CRISMAT UMR6508, UNICAEN-ENSICAEN-CNRS, 14050 Caen, mail : moussa.gomina@ensicaen.fr

---

*RÉSUMÉ. Ce travail vise à étudier l'hydratation d'un composite ciment-lin. Plusieurs traitements sont étudiés dans le but de limiter les problèmes d'hydratation connus, tels qu'un enrobage minéral au liant hydraulique (ciment + laitier), un enrobage organique à l'huile de lin et un traitement physique de surface au plasma atmosphérique. Dans un premier temps, une caractérisation des fibres brutes et traitées a été réalisée en termes de densité, de perte au feu et d'absorption d'eau. Les résultats ont montré que les trois traitements ont permis de diminuer significativement l'absorption d'eau des fibres. Ensuite, un protocole expérimental a été mis au point dans le but de récupérer les extractibles des fibres. L'eau contenant ces extractibles a ensuite été introduite dans une pâte de ciment afin de mesurer le temps de prise selon l'essai Vicat. Pour finir, la chaleur d'hydratation de mortiers incorporant des fibres brutes ou traitées a ensuite été mesurée par calorimétrie semi-adiabatique. Les essais ont montré un retard de prise non négligeable des composites cimentaires en présence de fibres brutes. Les traitements d'enrobage ont permis de fortement diminuer l'influence des fibres de lin sur l'hydratation.*

*ABSTRACT. This work aims to study the hydration of a flax-cement composite. Several treatments are studied in order to limit the hydration known issues, such as a mineral coating with hydraulic binder (cement + slag), an organic coating using linseed oil and a physical surface treatment by atmospheric plasma. At first, a characterization of the raw and treated fibres was done in terms of density, loss on ignition and water absorption. Results showed that all three treatments have significantly reduce fibres water absorption. Then, an experimental protocol was developed in order to recover the fibres extractables. The water containing these extractables was then introduced into a cement paste to measure the setting time according to the Vicat test, with standardized workability. Finally, the hydration heat of mortars incorporating raw or treated fibres was then measured by semi-adiabatic calorimetry. Tests showed a significant setting delay of cementitious composites in the presence of raw flax fibres. The coating treatments have greatly reduced the influence of flax fibres on the hydration of the composites.*

*MOTS-CLÉS : fibre de lin, composite cimentaire, absorption d'eau, hydratation, temps de prise.*

*KEY WORDS: flax fibre, cementitious composite, water absorption, hydration, setting time.*

---

## 1. Introduction

Les fibres habituellement utilisées dans les matériaux cimentaires ont l'inconvénient d'être dérivées de ressources non renouvelables (fibres d'acier, de polypropylène, de verre, etc.). Les enjeux économiques liés à la hausse des coûts des ressources fossiles, leur raréfaction, et les impacts environnementaux inhérents à leur fabrication conduisent donc à explorer d'autres sources de matériaux et d'autres filières de production. De ce point de vue, les fibres végétales, du fait de leur caractère naturel et renouvelable, pourraient constituer une solution d'avenir pour l'industrie de la construction à base de ciment. Parmi les fibres végétales, le lin se démarque en raison de ses propriétés mécaniques élevées et sa faible densité. En outre, la région Normandie est le leader français de la production de lin, ce qui permet de valoriser une ressource locale.

Depuis plusieurs années, les laboratoires ESITC Caen et CRISMAT travaillent sur la formulation et la caractérisation de composites cimentaires renforcés de fibres de lin [CHA 14 ; LEH 15]. Il apparaît qu'à l'état frais, la nature, la morphologie et le caractère fortement hydrophile de ces fibres affectent de manière significative l'ouvrabilité du matériau. A l'état durci les performances mécaniques des composites sont plus faibles que celles des composites non fibrés. Une des causes de ces faibles propriétés mécaniques est la mauvaise hydratation du ciment due à la présence de particules végétales [GOV 06]. Les fibres végétales, composées principalement de cellulose, d'hémicelluloses, de pectines et de lignines [THU 11], vont subir une lixiviation une fois introduites dans l'eau. Du fait de leur composition chimique, des polysaccharides vont pouvoir passer en solution dans la solution interstitielle du mélange cimentaire [SED 07]. Les sucres sont bien connus pour leur pouvoir inhibiteur sur la prise du ciment, ce qui pourrait expliquer la mauvaise hydratation des composites cimentaires biofibrés [PES 06].

Ce travail propose une étude de l'influence de différents traitements appliqués aux fibres de lin sur l'hydratation de composites cimentaires. L'absorption d'eau liquide par les fibres brutes ou traitées a d'abord été mesurée dans le but de déterminer quel traitement est le plus efficace pour réduire cette absorption. Ensuite, un protocole expérimental a été mis au point dans le but de récupérer les extractibles des fibres. L'eau contenant ces extractibles a ensuite été introduite dans une pâte de ciment afin de mesurer le temps de prise selon l'essai Vicat. Pour finir, la chaleur d'hydratation de mortiers incorporant des fibres brutes ou traitées a ensuite été mesurée par calorimétrie semi-adiabatique.

## 2. Matériaux

### 2.1.1. Matériaux utilisés

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland CEM I 52,5 N blanc, conforme à la norme NF EN 196-1. Le sable utilisé est alluvionnaire de type pliocène de classe granulaire 0/4 mm avec une masse volumique de 2660 kg.m<sup>-3</sup> et un coefficient d'absorption de 0,30 %. Ce sable est conforme à la norme NF P 18-545. Les fibres de lin utilisées ont été récoltées en Normandie en 2014, coupées et fournies par le Groupe Depestele. La longueur des fibres de lin est égale à 12 mm. Les fibres de lin brutes seront par la suite abrégées FB.

### 2.1.2. Traitements des fibres de lin

Le premier traitement est un enrobage minéral à base de ciment Portland CEM I 52.5N et de laitiers de hauts fourneaux (LHF). Le liant hydraulique final utilisé pour le traitement est ainsi composé de 50 % en volume de LHF et de 50 % de ciment CEM I. Pour ce traitement, les fibres sont enrobées par un coulis de ce liant préparé avec un rapport eau/liant massique égal à 1 et un rapport fibres/liant égal à 2/3. Ces ratios correspondent à ceux utilisés dans une précédente étude [CHA 14]. Les fibres ainsi obtenues sont abrégées FCL : Fibres Ciment/Laitier.

Le deuxième traitement est un enrobage à l'huile de lin avec un ratio massique huile/fibres égal à 0,25. Cette substance est très siccatrice et forme un film solide en séchant au contact de l'oxygène [ABR 96]. Une période minimale de séchage (50 ± 1 °C and < 10 %RH) de 5 jours a été appliquée afin d'assurer la bonne polymérisation de l'huile. Les fibres ainsi obtenues sont abrégées FHL : Fibres Huile de Lin.

Le troisième traitement réalisé est un traitement physique de surface en couche mince au plasma atmosphérique. Ce traitement a été réalisé par le laboratoire CREPIM, basé à Bruay-la-Buissière (62). Le précurseur utilisé fût l'hexaméthylidisiloxane sous gaz azote. L'objectif du dépôt de HMDSO est de faire diminuer la tension de surface des fibres afin de diminuer le caractère hydrophile des fibres de lin [GAQ 13]. Les fibres ainsi obtenues sont abrégées FPA : Fibres Plasma Atmosphérique.

### 3. Méthodes expérimentales

#### 3.1.1. Caractérisation des fibres de lin

La densité réelle des fibres de lin brutes et traitées a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre à gaz (hélium) selon la norme NF EN ISO 8130-2. La teneur en matières organiques a été déterminée par calcination (essai de perte au feu) de quatre échantillons de fibres à 550°C jusqu'à masse constante.

La cinétique d'absorption d'eau des fibres de lin a également été déterminé. Pour cela, les fibres ont été séchées à  $50 \pm 0,1$  °C dans une étuve ventilée jusqu'à masse constante. Ensuite, 3,00 grammes de fibres ont été placées dans des sachets microperforés. Ces sachets ont ensuite été immergés dans l'eau pendant plusieurs durées (de 1 minute à 24 heures). L'essai a été répété six fois pour chaque durée. Après immersion, les sachets ont été placés dans une centrifugeuse pendant 30 secondes à une vitesse de 500 tours par minute afin de retirer l'eau en excès à la surface des fibres. L'absorption d'eau a donc pu être déterminée à partir des pesées successives des sachets avec et sans fibres, avant et après immersion.

#### 3.1.2. Calorimétrie semi-adiabatique

La chaleur d'hydratation des mortiers au cours des toutes premières heures a été mesurée par calorimétrie semi-adiabatique (NF P15-436). Cet essai permet de déterminer, à partir de l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée par le ciment lors de son hydratation. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers l'extérieur. La température du mortier testé est comparée à celle d'un échantillon inerte dans le calorimètre de référence.

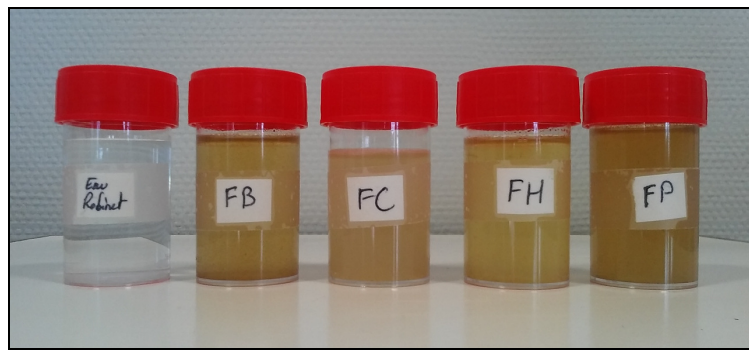
Les compositions finales théoriques des différents mortiers fabriqués sont données dans le Tableau 1. Les fibres de lin ayant des densités et des absorptions différentes suivant les traitements, nous avons choisi de conserver un ratio eau efficace / ciment ( $E_{eff}/C$ ) constant, égal à 0,51. Une quantité additionnelle a été ajoutée dans les différents mortiers pour prendre en compte l'absorption des granulats et des fibres. Le dosage en fibres de lin (brutes ou traitées) a été fixé à 1 % en volume absolu par rapport au volume total de la gâchée. Afin de ne pas modifier le volume théorique de la gâchée, lors de l'ajout de fibres, un volume de sable saturé égal au volume de fibres saturées a été retiré de la formulation.

**Tableau 1.** Composition des mortiers pour le calorimètre [ $kg.m^{-3}$ ].

Mortier	Référence	FB	FCL	FHL	FPA
Ciment	509	509	509	509	509
Sable	1526	1447	1452	1468	1462
Eau	266	286	284	278	280
Fibres de lin	0	15	18	14	15
$E_{eff}/C$	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
$E_{tot}/C$	0,52	0,56	0,56	0,54	0,55

#### 3.1.3. Extraction des éluats des fibres

L'extraction des substances solubles des fibres de lin dans les mêmes conditions que dans le béton (pH, présence d'autres électrolytes, etc.) n'est pas aisée. Ainsi, afin de préparer les solutions contenant les substances organiques solubles (éluats), un échantillon de fibres de lin (brutes ou traitées) a été mélangé avec de l'eau courante afin de récupérer les constituants hydrosolubles (Figure 1). Le rapport eau efficace / fibres utilisé pour la préparation de l'extraction est le même que celui indiqué dans les formulations de mortiers (Tableau 1). A cette eau efficace a été ajoutée l'eau absorbée par les fibres de lin puisque cette eau ne pourra pas être récupérée après l'extraction. Les fibres et l'eau ont été conservées dans une bouteille en verre fermée de 1 litre conservée à  $20 \pm 1$  °C et  $50 \pm 5$  %HR pendant 48h. En effet, Sedan a montré que la concentration d'oses neutres et d'acides uroniques se stabilisait après 24h [SED 07]. Pour la récupération des solutions, une filtration a été réalisée (Figure 1).



**Figure 1.** Macération des fibres de lin (gauche) et solutions contenant les éluats des fibres (droite).

### 3.1.4. Mesure de la consistance normalisée et du temps de prise des pâtes de ciment

Le temps de prise a été déterminé sur des pâtes de ciment de consistance normalisée avec les éluats des fibres obtenus comme vu précédemment. Cet essai a été effectué sur un ciment blanc CEM I 52.5N conformément à la norme NF EN 193-3. La préparation des pâtes de ciment a été réalisée avec un malaxeur normalisé NF EN 196-1 à une vitesse de 140 tr.min<sup>-1</sup>. La consistance des pâtes est repérée par la pénétration verticale d'une sonde de 10 mm de diamètre, avec un appareil de Vicat selon la norme NF EN 196-3. La consistance est mesurée avec des pâtes ayant des teneurs en eau différentes afin de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un arrêt d'enfoncement égal à  $6 \pm 1$  mm entre la sonde et la plaque inférieure (hauteur du moule égale à 40 mm). La consistance de cette pâte est qualifiée de normale.

L'essai de mesure du temps de début de prise consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée. L'appareil Vicat est alors équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Le début de prise est atteint lorsque, sous l'effet d'une charge de 300 g, l'aiguille s'arrête à une distance  $d$  du fond du moule, tel que  $d = 4 \pm 1$  mm.

## 4. Résultats

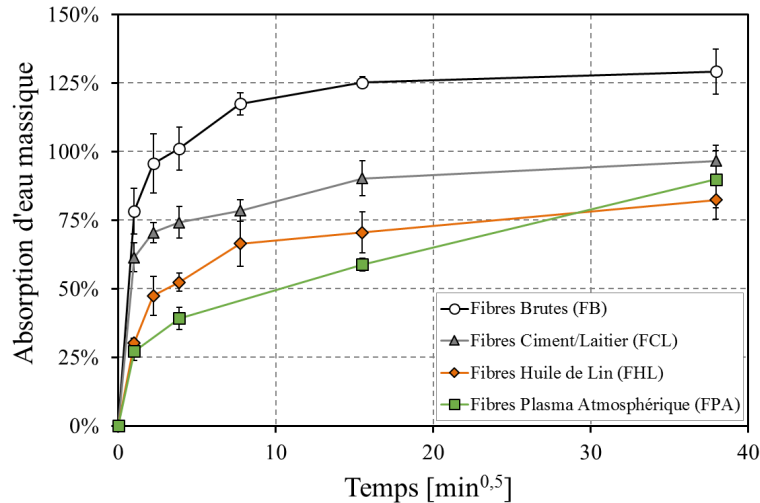
### 4.1. Caractérisation des fibres de lin

Les principales caractéristiques mesurées sont données dans le Tableau 2. Les fibres de lin utilisées ont une densité égale à 1,52 et sont composées à 99,3 % de matières organiques (FB). Le traitement d'enrobage au ciment/laitier (FCL) induit une augmentation importante de la densité du matériau. Celle-ci est égale à environ 1,82 soit une augmentation d'environ 20 %. Cela est dû à l'enrobage composé d'eau, de ciment, de laitier de hauts fourneaux ; ces deux derniers éléments ayant une densité supérieure à 3. La présence de cet enrobage minéral est confirmée par le résultat de perte au feu puisqu'une teneur égale à 36 % de matière minérale a été mesurée (contre 0,7 % pour les fibres brutes). Le traitement d'enrobage à l'huile de lin entraîne quant à lui une diminution de la densité. Pour ces fibres (FHL), la densité est égale à 1,40, soit une diminution d'environ 8 %. Cette diminution est due à l'huile de lin qui a une plus faible masse volumique (0,93 g.cm<sup>-3</sup>). Toutefois, l'huile de lin étant elle aussi organique, la perte au feu à 550°C des fibres FHL est égale à 99,0 %, soit une valeur très proche des fibres FB. Le dépôt de HMDSO par plasma atmosphérique entraîne une légère augmentation de la densité des fibres : 1,54, soit un accroissement de 1,3 %. De même, l'essai de perte au feu montre une teneur en matière minérale égale à 97,3 %. Cet accroissement en matières minérales est dû au dépôt de HMDSO à base de silicium.

**Tableau 2.** Caractéristiques des fibres de lin.

Désignation	Fibres brutes	Fibres traitées		
		Ciment/Laitier	Huile de lin	Plasma Atmos.
Abréviation	<b>FB</b>	<b>FCL</b>	<b>FHL</b>	<b>FPA</b>
Densité	1,52 ± 0,00	1,82 ± 0,04	1,40 ± 0,02	1,54 ± 0,02
Perte au feu (550°C)	99,3 ± 0,1 %	64,0 ± 12,9 %	99,0 ± 0,0 %	97,3 ± 0,4 %
Absorption WA <sub>24</sub>	129,2 ± 8,3 %	96,6 ± 5,6 %	82,4 ± 7,1 %	89,8 ± 10,4 %

Les cinétiques d'absorption d'eau des fibres de lin brutes et traitées sont présentées dans la Figure 2. Pour l'ensemble des fibres étudiées, il est possible de distinguer deux phases d'absorption. Tout d'abord, une augmentation rapide de la masse des échantillons peut être observée durant les premières minutes d'immersion. En moins de 5 minutes, les fibres de lin ont déjà absorbé plus de la moitié de leur capacité maximale de rétention d'eau. Ensuite, une seconde phase d'absorption, plus lente et continue, est visible après 60 minutes d'immersion. De nombreuses caractéristiques des fibres végétales, notamment les propriétés physiques et mécaniques, sont impactées par la teneur en eau [THU 14]. Cette caractéristique essentielle induit également une compétition sur la demande en eau entre les fibres de lin et le liant, qui débute dès le malaxage du composite. Ainsi, les fibres de lin peuvent absorber jusqu'à 130% de leur masse sèche après 24 heures d'immersion. La forte porosité et la structure interne des fibres de lin sont responsables de cette forte capacité d'absorption et de rétention d'eau [NOZ 12]. Ce caractère fortement hydrophile est aussi attribué à la présence d'hémicellulose [THU 14].



**Figure 2.** Cinétique d'absorption d'eau des fibres de lin brutes et traitées.

Comme on peut le voir dans la Figure 2, les trois traitements étudiés ont permis de réduire l'absorption d'eau des fibres de lin. Pour le traitement d'enrobage au ciment/laitier (FCL), l'absorption d'eau après 24 heures d'immersion ( $WA_{24}$ ) est de 97%, soit une diminution de 24 %. Une précédente étude avait également montré une diminution significative de l'absorption d'eau par enrobage minéral des fibres de lin (ciment Portland uniquement), égale à 35 % [CHA 15]. Toutefois la technique de mesure de l'absorption était différente par rapport à notre étude. Concernant le traitement d'enrobage à l'huile de lin (FHL),  $WA_{24}$  est égal à 88 %, soit une réduction de 36 % de l'absorption d'eau par rapport aux fibres brutes (FB). D'autres auteurs ont également observé une diminution importante du caractère hydrophile de biocomposites à base de fibres et anas de lin par enrobage à l'huile de lin [LAZ 12]. Pour finir, les fibres traitées au plasma atmosphérique (FPA) semblent avoir une cinétique d'absorption différente. En effet, dans les premières minutes d'immersion, le gain de masse des fibres FPA est plus faible qu'avec les autres fibres. Toutefois, l'absorption d'eau ne semble pas ralentir après 60 minutes, comme observé avec les autres fibres de lin. En effet, La figure 2 fait apparaître clairement un régime stable pour FB, FCL et FHL tandis que les fibres FPA semblent poursuivre leur absorption au-delà de 24h. Ainsi, après 24h d'immersion, l'absorption d'eau est égale à 89 %, soit une diminution de 31 %. Une étude précédente sur le traitement d'étoupes de lin par plasma atmosphérique a également montré une forte diminution de l'absorption d'eau via un test Cobb (NF EN 20535) [GAQ 13].

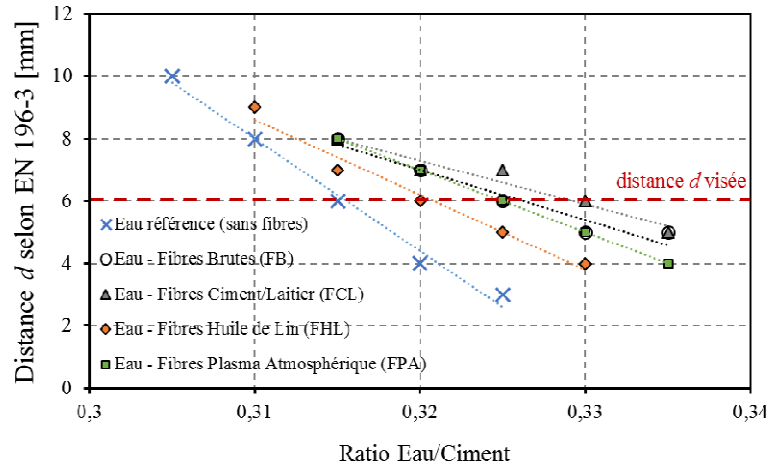
## 4.2. Consistance normalisée et temps de prise des pâtes de ciment

### 4.2.1. Consistances normalisées

Les consistances normalisées des différentes pâtes de ciment ont d'abord été déterminées afin de pouvoir procéder à la mesure du temps de prise. Ces différentes pâtes de ciment ont été confectionnées à partir, soit de l'eau du robinet, soit des eaux contenant les éluats. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 3.

Pour la pâte de ciment référence, utilisant uniquement de l'eau du robinet, la consistance normalisée ( $d = 6$  mm) est obtenue pour un rapport E/C égal à 0,315. Ceci traduit une augmentation de la viscosité de la pâte de ciment. Cette augmentation de la viscosité peut être due à la présence de polysaccharides dans la pâte. En effet, les fibres végétales contiennent différents polysaccharides [SED 07]. Les polysaccharides naturels ou leurs

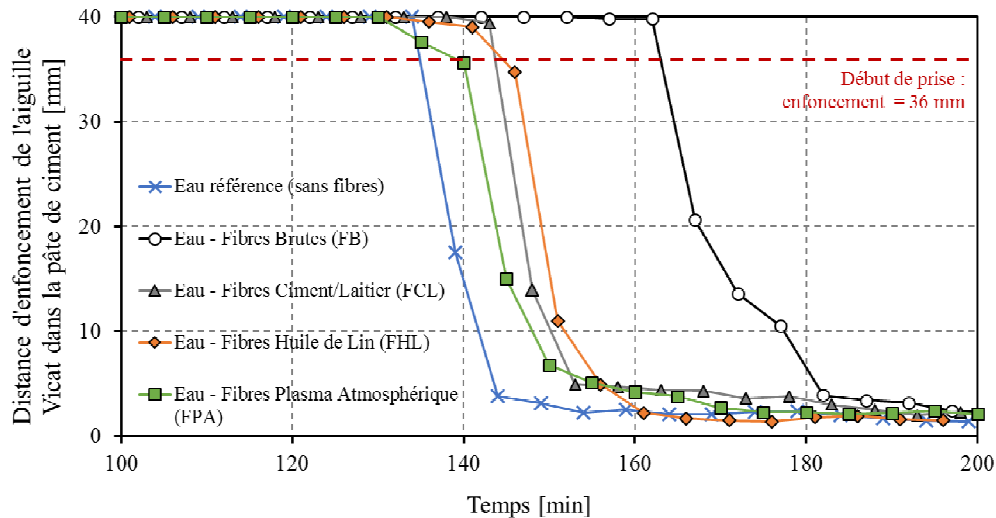
dérivés sont connus pour agir comme des agents viscosant en modifiant le comportement rhéologique des matériaux cimentaires [GHI 94]. Sedan a montré que des polysaccharides étaient présents en solution après lixiviation aqueuse des fibres de chanvre [SED 07]. La présence de ces sucres dans l'eau d'extraction des fibres pourrait donc expliquer l'augmentation de viscosité constatée pour pâtes de ciment FB. En effet, la pâte de ciment fabriquée à partir de l'eau d'extraction des fibres de lin brutes (FB) nécessite un rapport E/C plus élevé, égal à 0,325 pour atteindre la consistance normalisée. Les autres pâtes de ciment réalisées avec l'eau d'extraction des fibres traitées (FCL, FHL et FPA) nécessitent également un rapport E/C plus important, respectivement 0,33, 0,32 et 0,325. Le traitement à l'huile de lin semble, au vu de cet essai, être plus efficace pour limiter la migration des extractibles des fibres vers la solution puisque la pâte de ciment réalisée avec cette eau possède le rapport E/C le plus proche de la pâte de ciment référence.



**Figure 3.** Evolution de la consistance normalisée des pâtes de ciment en fonction du rapport E/C.

#### 4.2.2. Temps de début de prise

L'essai Vicat a été réalisé sur les cinq pâtes de ciment vues précédemment. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4.



**Figure 4.** Distance d'enfoncement de l'aiguille Vicat dans la pâte de ciment en fonction du temps.

Comme attendu, c'est la pâte de ciment référence, fabriquée avec l'eau du robinet, qui a le temps de début de prise le plus faible, égal à 135 min. A l'inverse, c'est la pâte fabriquée avec l'eau contenant les éluats des fibres brutes qui obtient le temps de prise le plus long, égal à 163 min. L'écart relatif entre ces deux valeurs est de 21 %. Les polysaccharides sont responsables de l'incompatibilité chimique des fibres végétales avec le ciment. En effet, ces sucres ont un pouvoir inhibiteur de prise et ont donc pour conséquence de retarder la prise du ciment et de diminuer la quantité des hydrates formés dans le composite durci [GOV 06]. La présence de polysaccharides

dans les eaux utilisés après lixiviation des fibres pourrait donc expliquer le retard de prise constaté sur la pâte FB.

Les autres pâtes de ciment réalisées à partir des solutions aqueuses de fibres traitées, à savoir FCL, FHL et FPA, obtiennent respectivement des temps de début de prise égaux à 144, 144 et 139 minutes. Ces valeurs sont relativement proches les unes des autres et se rapprochent de la pâte de ciment référence à 135 min. Il semblerait donc que les traitements permettent de diminuer la migration des extractibles dans les solutions, ce qui engendre un retard de prise plus faible.

#### 4.1. Calorimétrie semi-adiabatique

La Figure 5 contient les thermogrammes des différents mortiers testés. Ces graphes expriment le dégagement de chaleur cumulé au cours des premières 24 heures. On note pour toutes les courbes une augmentation plus importante de la chaleur d'hydratation aux alentours de 6 h. Cela correspond au pic exothermique dû à l'hydratation des  $C_3S$  et  $C_2S$ . On note tout d'abord que le mortier référence semble avoir ce pic exothermique avant les autres mortiers. Le pic exothermique du mortier contenant les fibres brutes (FB) apparaît quant à lui plus tard, aux environs de 7 h. Les retards d'hydratation observés avec l'incorporation de fibres de lin peuvent être provoqués par leur matière organique soluble. Là encore, des polysaccharides passés en solution dans le mortier suite à l'introduction de fibres de lin peuvent expliquer ce retard. Peschard et al. ont rapporté des retards d'hydratations par des substances tensioactives à base de polysaccharides provenant de particules végétales [PES 06]. Les traitements d'enrobage au ciment/laitier (FCL) et à l'huile de lin (FHL) semblent tous deux réduire le retard constaté avec les fibres brutes. On note également que le mortier incorporant les fibres traitées au plasma atmosphérique (FPA) a un retard quasi identique au mortier FB. On peut par ailleurs noter que la chaleur d'hydratation cumulée au bout de 24 heures est sensiblement la même pour toutes les formulations, avec des valeurs comprises entre 315 et 330  $J.g^{-1}$ . Le retard observé pour le pic exothermique ne semble donc pas avoir d'influence sur le dégagement de chaleur total pendant l'essai.

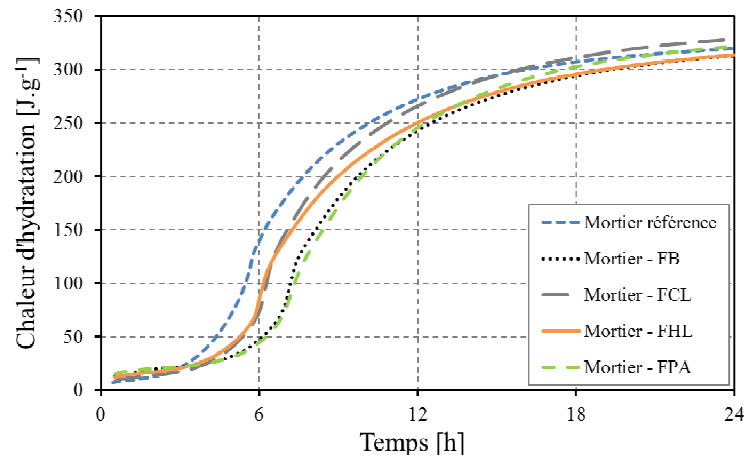


Figure 5. Chaleur d'hydratation cumulée du ciment des différents mortiers confectionnés.

#### 5. Conclusion

Les essais réalisés ont permis de mettre en évidence les éléments suivants :

- Les trois traitements étudiés permettent de diminuer significativement l'absorption d'eau des fibres de lin. L'huile de lin semble être le traitement le plus efficace pour limiter l'absorption d'eau.
- La mise en solution aqueuse des fibres de lin a pour effet de lixivier une partie de celles-ci. Les extractibles de fibres de lin ont pu être récupérés dans cette eau.
- Les extractibles contenus dans les fibres ont pour effet d'augmenter la viscosité des pâtes de ciment. Cela pourrait être dû à des polysaccharides présents dans la solution, provenant des extractibles.
- Ces éluats ont également pour effet de provoquer un retard de prise, visible à la fois sur l'essai de calorimétrie semi-adiabatique et sur l'essai Vicat. Là encore, ce retard pourrait provenir des sucres contenus dans les fibres qui seraient re-largués dans les solutions.
- Les traitements à l'huile de lin et au ciment/laitier semblent être les plus efficaces pour limiter le retard de prise. L'enrobage par ces deux traitements limite les échanges entre les fibres et la solution.

- Le traitement des fibres au plasma atmosphérique ne permet pas de diminuer l'absorption d'eau des fibres après une durée importante d'immersion. De plus, un retard est toujours observé pour l'hydratation du mortier incorporant ces fibres, comme avec les fibres brutes.

Par ailleurs, l'essai de lixiviation des fibres de lin, dans le but de réutiliser la solution pour confectionner des pâtes de ciment, semble être un essai efficace et simple pour mettre en évidence la modification de temps de prise de ciment contenant des particules organiques. En revanche, l'essai Vicat n'est pas utilisable avec des fibres brutes directement. En effet, les fibres de lin, de par leur morphologie, vont considérablement modifier la maniabilité de la pâte de ciment. La mesure du temps de prise n'étant valable que pour une pâte de consistance normalisée, il est impossible d'utiliser les fibres en l'état. De plus d'autres auteurs ont souligné, en plus de la modification de la maniabilité, des problèmes d'enfoncement de l'aiguille Vicat [SED 07].

## 6. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les cofinanceurs, le FEDER et la Région Basse Normandie, ainsi que les autres partenaires du projet BTONLIN pour leur soutien, à savoir : l'entreprise de construction CMEG, porteur du projet, basée à Bretteville l'Orgueilleuse (14740), le Groupe Depestele, et en particulier le Teillage Vandecandelaère pour ses conseils et la fourniture des fibres de lin, basé à Bourguébus (14540).

## 7. Bibliographie

- [CHA 14] CHAFEI S., Influence de différents traitements sur les comportements rhéologique et mécanique d'un composite cimentaire mortier-fibres de lin, Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 2014.
- [LEH 13] LE HOANG T., Etude de caractérisation du comportement de composites cimentaires incorporant des fibres courtes de lin, Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 2013.
- [GOV 06] GOVIN A., PESCHARD A., GUYONNET R., « Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood », *Cement and Concrete Composites*, vol. 8, n° 1, 2006, p. 12-20.
- [THU 11] THUAULT A., Approche multi-échelle de la structure et du comportement mécanique d'une fibre de lin, Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 2011.
- [SED 07] THUAULT A., Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment - Influence sur les propriétés mécaniques du composite, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2007.
- [PES 06] PESCHARD A., GOVIN A., POURCHEZ J., FREDON E., ET AL., « Effect of polysaccharides on the hydration of cement suspension », *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 26, n° 8, 2006, p. 1439-1445.
- [ABR 96] ABRAHAM C.J., « A solution to spontaneous combustion in linseed oil formulations », *Polymer Degradation and Stability*, vol. 54, n° 2-3, 1996, p. 157-166.
- [GAQ 13] GAQUERE L., LAZKO J., LANDERCY N., DAVID R., ET AL., « Amélioration des propriétés hydrophobes et ignifuges des isolants naturels à base de fibres de lin et de chanvre par traitement au plasma atmosphérique », *Actes du congrès Ecobat Sciences & Techniques 2013*, Paris, 20-21 mars 2013, 10 p.
- [THU 14] THUAULT A., EVE S., BLOND D., BREARD J., ET AL., « Effects of the hygrothermal environment on the mechanical properties of flax fibres », *Journal of Composite Materials*, vol. 48, n° 14, 2014, p. 1699-1707.
- [NOZ 12] NOZAHIC V., AMZIANE S., « Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder », *Compo. Part A: Applied Science and Manu.*, vol. 43, n° 11, 2012, p. 1837-1849.
- [CHA 15] CHAFEI S., KHADRAOUI F., BOUTOUIL M., GOMINA M., « Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite », *Construction and Building Materials*, vol. 79, 2015, p. 229-235.
- [LAZ 11] LAZKO J., DUPRE B., DHEILLY R.M., QUÉNEUDEC M., « Biocomposites based on flax short fibres and linseed oil », *Industrial Crops and Products*, vol. 33, n° 2, 2011, p. 317-324.
- [GHI 94] GHIO V.A., MONTEIRO P.J.M., DEMSETZ L.A., « The rheology of fresh cement paste containing polysaccharide gums », *Cement and Concrete Research*, vol. 24, n° 2, 1994, p. 243-249.