
**MESURE ET ANALYSE DES
CINETIQUES DE SECHAGE
EXPERIMENTALES**

III. Mesure et analyse des cinétiques de séchage expérimentales

Afin de bien appréhender le comportement thermo-hydrigue des matériaux à l'issue de la mise en œuvre, des cinétiques de séchage sont mesurées sous différentes conditions. Des essais sont ainsi menés avec des conditions aérothermiques (température, humidité et vitesse d'air) et des conditions initiales (température et teneur en eau initiales du produit) différentes.

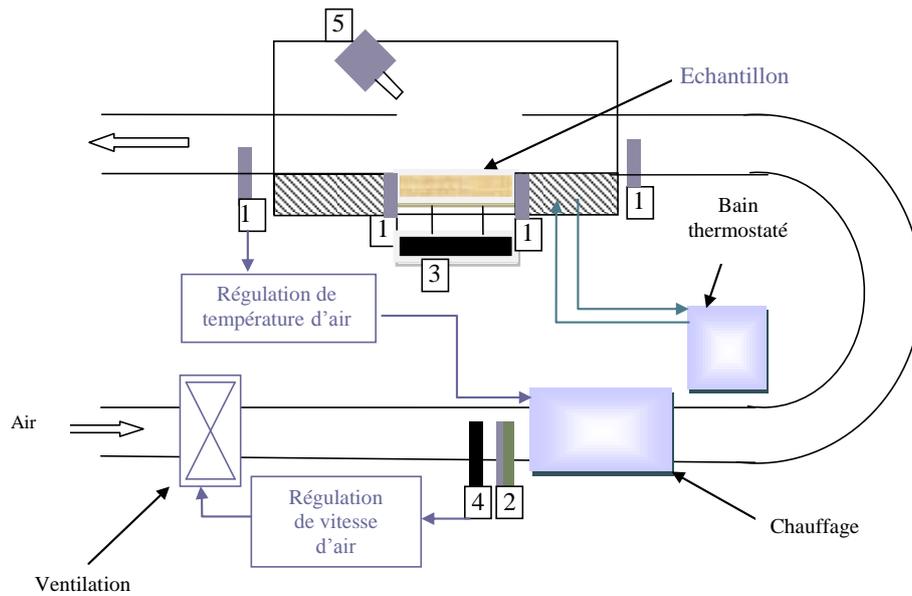
Dans un premier temps, nous décrivons le protocole expérimental et le pilote de séchage utilisés pour maîtriser au mieux ces divers paramètres au cours des expérimentations. La seconde partie du chapitre est consacrée à une présentation et une analyse de différents essais.

III.1 Banc de séchage

Pour mesurer expérimentalement les cinétiques de séchage, nous avons utilisé un séchoir pilote conçu au sein du laboratoire (Glouannec et al, 2002). Ce séchoir rend possible la détermination des cinétiques de séchage dans différentes conditions de température et de vitesse d'air. En effet, une métrologie importante a été définie et mise en place (capteurs de température, balance, anémomètre, capteurs d'humidité...) afin d'obtenir toutes les informations nécessaires.

Les produits à sécher sont disposés dans des creusets de surface intérieure de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ et de profondeur variable. Uniquement la face supérieure des éprouvettes est soumise à un flux d'air dont la vitesse et la température sont régulées par le biais de résistances chauffantes et d'un ventilateur à débit contrôlé. Un serpentin en inox disposé autour du creuset permet de se rapprocher de conditions adiabatiques au niveau des faces latérales et de la face inférieure du produit. Dans ce cas, on fait circuler dans le serpentin de l'eau à une température proche de la moyenne des températures mesurées dans le produit.

Avec ce dispositif, on peut considérer que les transferts thermiques et massiques au sein du matériau sont unidirectionnels.



1 : thermocouples ; 2 : hygromètre ; 3 : balance ; 4 : anémomètre ; 5 : pyromètre

Figure III.1 : Pilote de séchage.

III.1.1 Mesure des sollicitations extérieures

La vitesse d'air est mesurée à l'aide d'un anémomètre à fil chaud disposé avant la batterie de chauffage. L'instrument mesure des vitesses d'air entre 0 et 6 m.s⁻¹ avec une précision de 0,2 m.s⁻¹ et fournit une tension comprise entre 0 et 10 V proportionnelle à la mesure. Un étalonnage préalable permet d'établir la correspondance entre les vitesses d'air dans la section de mesure et l'enceinte. Le contrôle de la vitesse d'air est assuré par un régulateur qui reçoit la mesure de l'anémomètre et pilote le ventilateur.

La température d'air est relevée en entrée et en sortie de l'enceinte à l'aide de thermocouples de type K. Le thermocouple en sortie est relié à un régulateur qui pilote la batterie de chauffage.

L'humidité de l'air est déterminée à l'aide d'un transmetteur doté d'une sonde placée avant la batterie de chauffage. Un élément PT100 intégré parallèlement à la sonde d'humidité, permet de mesurer la température sèche. En connaissant l'humidité relative et la température sèche dans la section de mesure, on en déduit l'humidité relative dans l'enceinte.

III.1.2 Mesure des grandeurs d'état du produit

Afin de connaître la réponse thermo-hydrigue du produit un suivi continu de la masse et des températures est réalisé.

Les mesures de masse sont réalisées à l'aide d'une balance de précision de 0,01 g disposée sous l'enceinte de séchage. Le creuset qui contient le matériau est posé sur un support dont les pieds reposent sur cette balance. Les températures au sein du produit sont relevées par des thermocouples de type K implantés avant le remplissage du creuset (Figure III.2). Le thermocouple du fond plus fin est moins rigide (300 µm de diamètre) que celui du centre (500

µm de diamètre). Uniquement quelques essais ont été réalisés avec le thermocouple du centre car la rigidité de celui-ci engendre des perturbations pour la pesée.

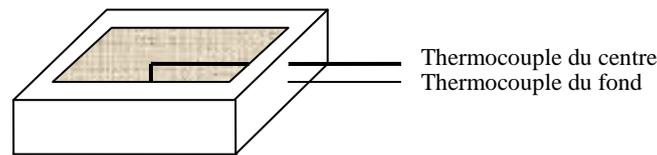


Figure III.2 : Positionnement des thermocouples.

Un pyromètre placé sur la face supérieure de l'enceinte permet d'accéder à la température de surface à condition de connaître l'émissivité des matériaux qui peut évoluer au cours du séchage. Des mesures ont également été réalisées en plaçant un thermocouple de 300 µm de diamètre en surface du produit.

Tableau III.1 : Récapitulatif des instruments de mesure.

Type de capteur	Mesure	Plage de mesure	Précision
Thermocouple K	Température d'air Température matériau	0 à 400°C	0,5°C
Hygromètre	Humidité relative	0 à 100%	5%
Pyromètre optique	Température de surface	0 à 100°C	1°C
Anémomètre	Vitesse d'air	0 à 6 m s ⁻¹	0,2 m s ⁻¹
Balance	Masse de l'échantillon	0 à 3,2 kg	0,01 g

III.1.3 Acquisition - Commande

L'ensemble des capteurs est relié à un boîtier de mesure de 20 canaux qui effectue la conversion analogique/numérique des signaux. Le pilotage de la batterie de chauffage s'effectue par le biais d'une carte à sorties analogiques. Le dialogue avec la balance s'opère via une liaison série RS232. L'ensemble du système acquisition – commande est piloté par un programme développé sous Visual Basic© (Figure III.3). Le pas d'acquisition est de 80 s pour l'ensemble des informations récupérées.

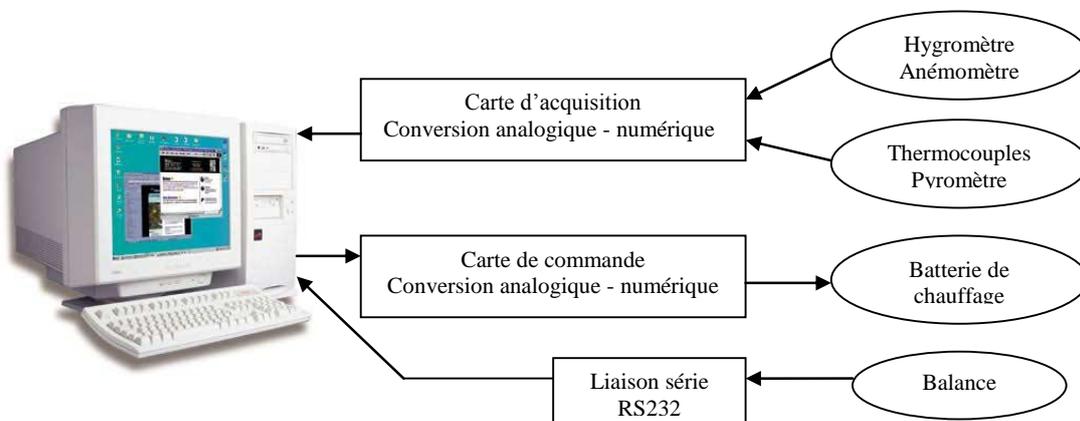


Figure III.3 : Système d'acquisition et de commande.

III.2 Etude du liant PF80 M

Différents essais ont été réalisés sur ce matériau. Ici, nous présentons les résultats obtenus pour une même épaisseur des éprouvettes (proche de 2,5cm) et une même consigne pour la température d'air.

Les éprouvettes sont séchées à différents âges après le remplissage des creusets et dans différentes conditions (vitesse de l'air) afin d'évaluer l'influence de ces deux paramètres sur les cinétiques. Lorsque le produit n'est pas immédiatement séché celui-ci est recouvert d'un film plastique afin de bloquer l'évaporation.

Le Tableau III.2 regroupe les conditions expérimentales appliquées au cours de chaque test. Les essais étant réalisés en tout air neuf, la température et l'hygrométrie de l'air peuvent évoluer au cours des expérimentations qui peuvent durer plusieurs jours. Dans le tableau sont donc reportées les valeurs moyennes et les variations mesurées.

Tableau III.2 : Récapitulatif des conditions de séchage des échantillons du liant Tradical® PF80 M.

N° Echantillon	Âge avant séchage	T _{air} (°C)	V _{air} (m.s ⁻¹)	Hr (%)	e (cm)	W _{ini} (kg.kg ⁻¹)	Eau liée (%)	ρ _s (kg.m ⁻³)
1	0h	29,3±0,1	2,6	16,4±1,2	2,53	0,373	4,8	1236,5
2	24h	29,4±0,2	2,6	13,9±0,6	2,50	0,335	10,4	1270,0
3	48h	29,4±0,1	2,6	28,5±1,9	2,59	0,338	10,8	1234,0
4	60h	29,3±0,2	2,6	15,2±2,4	2,53	0,333	11,1	1266,7
5	48h	29,2±0,1	2,0	34,9±5,0	2,52	0,322	10,2	1273,2
6	48h	29,5±0,3	1,1	33,9±2,8	2,50	0,335	10,4	1282,8
7	24h	29,5±0,9	2,6	12,8±0,5	2,50	0,329	10,3	1270,0

III.2.1 Descriptif d'un essai type

Dans un premier temps, nous détaillons l'essai et les résultats obtenus pour l'échantillon 1 qui a été placée dans l'enceinte de séchage immédiatement après la mise en œuvre. La Figure III.4 montre que durant cette expérimentation qui a duré 65 heures, la température d'air est maintenue constante aux environs de 29,3°C et l'humidité relative moyenne se situe au voisinage de 16%. Cet essai réalisé avec un thermocouple implanté sur la face inférieure de l'éprouvette (fond) montre qu'on aboutit à de faibles gradients de température au sein du matériau malgré une vitesse d'air de 2,6 m.s⁻¹.

Initialement, la surface de l'éprouvette est de 9,9×9,9 cm² et son épaisseur de 2,5 cm. En fin de séchage, un retrait très faible est enregistré, il est d'environ 2,7% selon l'épaisseur et de 2% pour les deux autres dimensions. En considérant un rapport massique eau/Tradical® PF80M de 0,4, la quantité d'eau chimiquement et physiquement liée à 60°C représentent environ 4,8% de la masse d'eau initiale.

Sur la Figure III.4 est également reportée l'évolution de la teneur en eau moyenne en base sèche de l'éprouvette. Cette grandeur est calculée selon l'équation III.1 à partir des pesées continues et de la détermination de la masse sèche après un séchage en étuve à 60°C.

$$W(i) = \frac{m(i) - m_s}{m_s} \quad (\text{III.1})$$

La Figure III.5 présente l'évolution du flux masse d'eau évaporée F_m en fonction de la teneur en eau moyenne. Cette évolution est obtenue en faisant une moyenne glissante sur la dérivée de la masse afin de s'affranchir des bruits de mesure.

L'examen des deux courbes, permet de distinguer quatre périodes :

- La période de mise en régime : d'environ une demi-heure, durant laquelle une partie de la chaleur apportée contribue à élever la température de surface et l'autre partie sert à évaporer une certaine quantité d'eau en surface.
- La période de séchage à vitesse constante d'une durée de 4 heures. Elle est caractérisée par la stabilisation de la température de surface aux alentours de 16,5°C (valeur supérieure à la température de bulbe humide à cause de l'effet du rayonnement de grande longueur d'onde qui se superpose au transfert par convection et également les erreurs de mesure de pyromètre). Sur la Figure III.5, il apparaît qu'au cours de cette période, le flux masse d'eau évaporée reste également constant à une valeur moyenne de $2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour des teneurs en eau supérieures à $0,25 \text{ kg.kg}^{-1}$. Cette valeur correspond à la limite supérieure du domaine hygroscopique.
- La période de ralentissement : elle commence lorsque le matériau passe sous la limite supérieure du domaine hygroscopique (teneur en eau inférieure à $0,25 \text{ kg.kg}^{-1}$) et est caractérisée par la chute du flux masse d'eau évaporée et l'augmentation de la température de surface jusqu'à atteindre l'équilibre hygroscopique. Ce dernier qui dépend de la température et de l'humidité de l'air environnant, n'est pas atteint au cours de cet essai. Si l'on se réfère à la Figure III.4, on constate que la teneur en eau au bout de 65 h est au dessus de la teneur en eau donnée par l'isotherme de désorption.

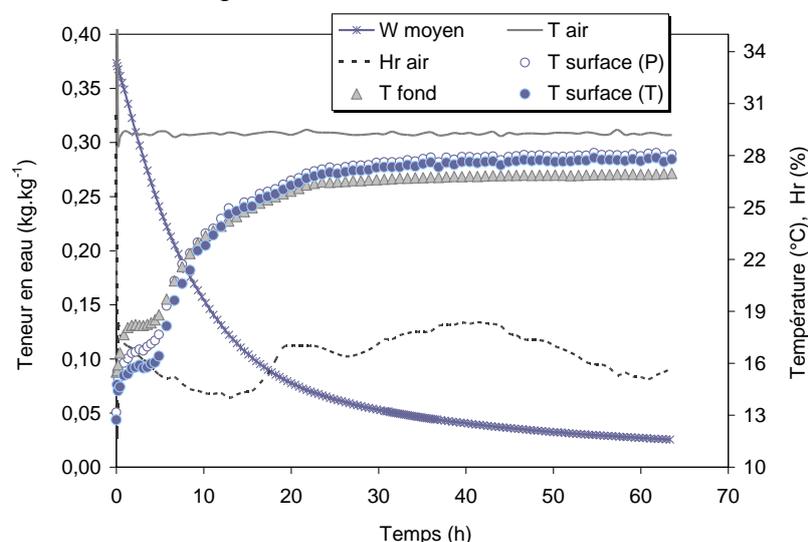


Figure III.4 : Cinétique de séchage du liant Tradical® PF80 M (essai 1).

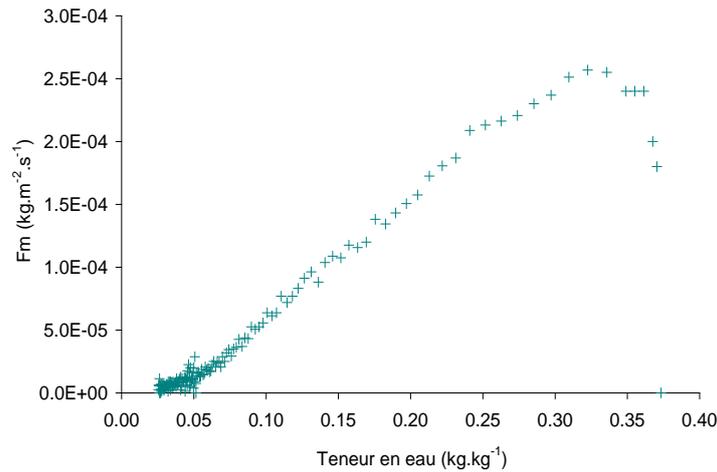


Figure III.5 : Flux masse d'eau évaporée du liant Tradical® PF80 M (essai 1).

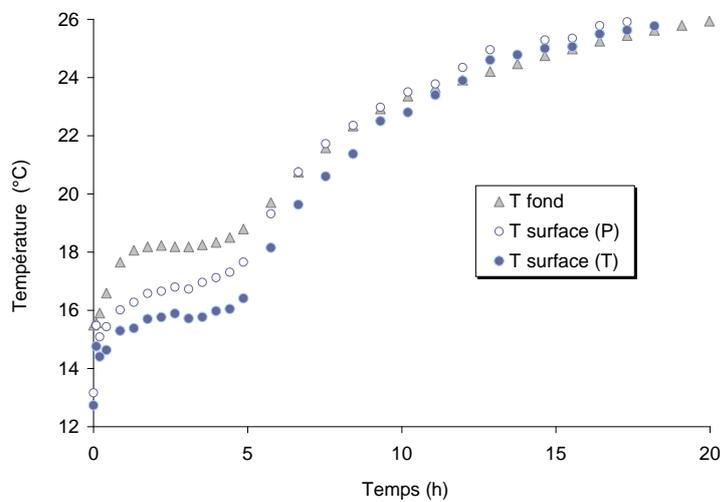


Figure III.6 : Températures de surface mesurées par le pyromètre (P) et par le thermocouple (T).

Sur cet essai, la température de surface mesurée à l'aide du pyromètre est comparée à la température donnée par thermocouple implanté dans la couche superficielle de l'échantillon (Figure III.6). On remarque que les valeurs obtenues par le thermocouple sont en dessous de celles données par le pyromètre au cours de la phase isenthalpe et lors de la phase de montée en température. L'écart maximum atteint est de $1,2^{\circ}\text{C}$. Les deux températures se rejoignent durant la période de la mise en équilibre. L'incertitude sur la mesure de la température de surface par pyromètre a été évaluée. Elle est de l'ordre de 2°C pour des températures inférieures à 20°C .

III.2.2 Influence de l'âge des matériaux

Les échantillons 2, 3 et 4 ont été séchés dans des conditions similaires à l'échantillon 1 (température et vitesse de l'air) mais après les avoir confinés respectivement pendant 24, 48 et 60 heures après la fabrication. Le but est d'étudier l'impact de l'âge des matériaux sur les cinétiques de séchage.

L'humidité relative de l'air étant un paramètre non contrôlé, la Figure III.7 donne les évolutions mesurées de cette variable lors de ces 4 essais. On observe que pour le matériau 3,

l'humidité relative moyenne se situe au dessus de celles des autres éprouvettes, autour de 28%.

La Figure III.8 présente une comparaison des évolutions des températures du fond des produits au cours du temps. On remarque que les essais 1, 2 et 4 présentent des températures pratiquement superposées tout au long de suivi des cinétiques de séchages. La température du fond de l'essai 3 est au-dessus des températures des autres tests.

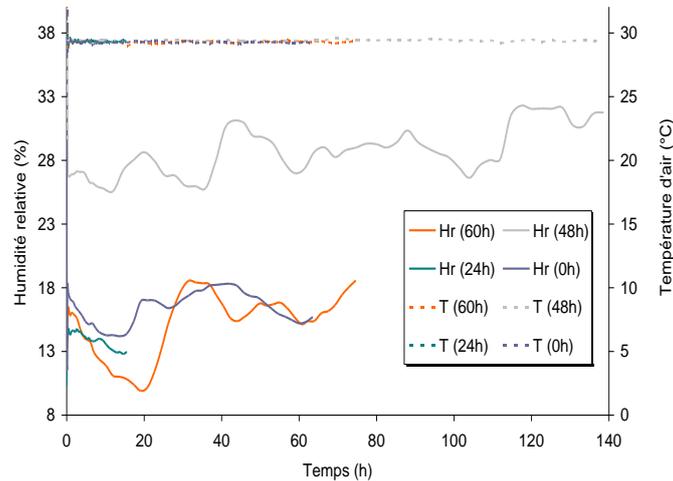


Figure III.7 : Evolution des températures d'air et des humidités relatives (essais 1, 2, 3 et 4).

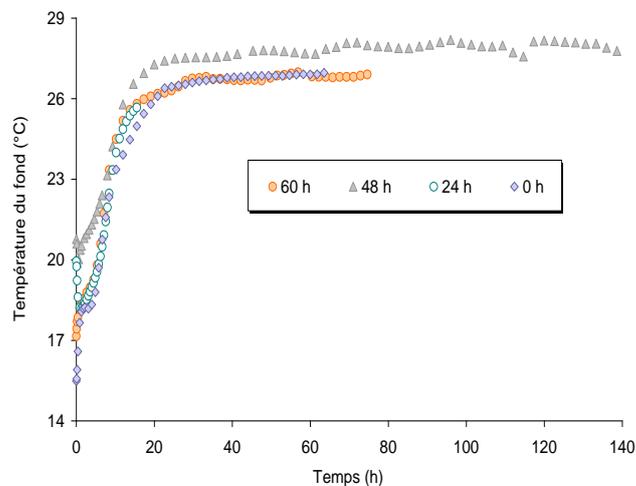


Figure III.8 : Evolution des températures du fond (essais 1, 2, 3 et 4).

Les évolutions des masses au cours du temps sont reportées sur la Figure III.9. On remarque que les échantillons les plus jeunes (1 et 2) présentent des évolutions pour la perte de masse différentes des échantillons 3 et 4 séchés respectivement après 48 et 60 heures de fabrication.

La comparaison des évolutions des teneurs en eau donnée sur la Figure III.10 montre que ce constat doit être modulé en tenant compte des valeurs initiales de la masse des éprouvettes qui augmente avec l'âge du matériau (augmentation de la quantité d'eau chimiquement liée lors du confinement).

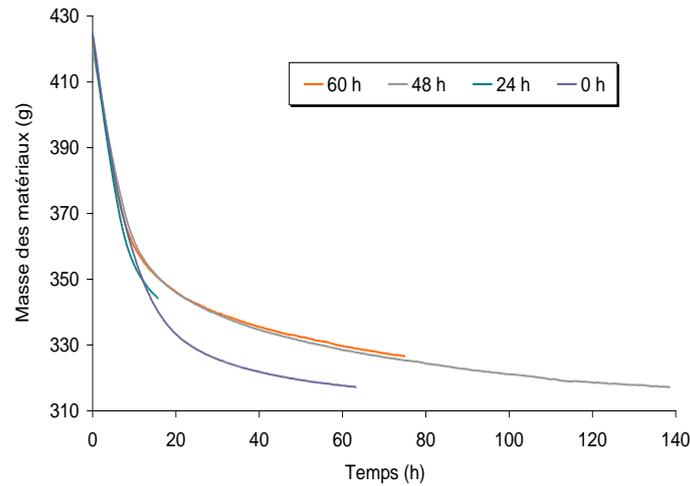


Figure III.9 : Comparaison des évolutions des masses (essais 1, 2, 3 et 4).

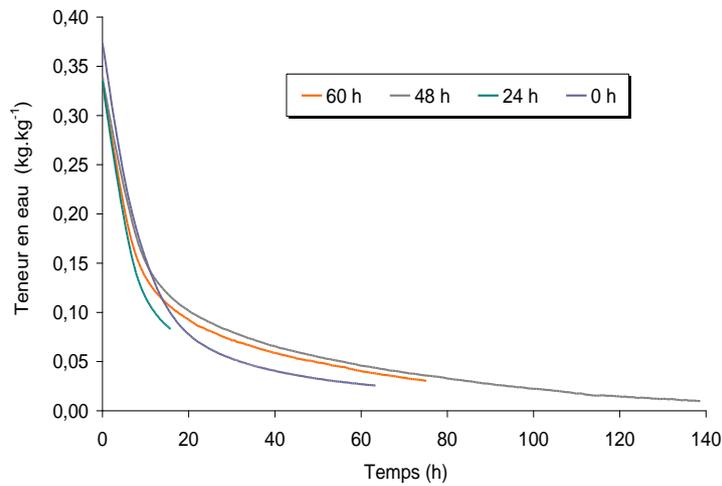


Figure III.10 : Comparaison des teneurs en eau (essais 1, 2, 3 et 4).

On constate qu'au cours de la phase de séchage à vitesse constante, le rôle joué par l'humidité de l'air apparaît plus notable que celui de l'âge des matériaux, notamment si on compare l'essai 3 à l'essai 4 et l'essai 1 au 2. La température de la phase isenthalpe la plus élevée est enregistrée avec l'essai 3 réalisé à l'humidité de l'air la plus importante alors que l'essai où son humidité est la plus faible au cours de cette période est marqué par la température de surface la plus basse (Figure III.11). Contrairement à la température de surface, le flux masse d'eau évaporée est inversement proportionnel à l'humidité de l'air (Figure III.12).

Quant à la première et la deuxième période de ralentissement, principalement gouvernées par les transferts internes de l'eau, on constate une domination de l'effet de l'âge des matériaux sur les cinétiques de séchage. On voit clairement que durant la première période, la vitesse d'évaporation de l'eau est plus importante pour l'essai 1 suivi de l'essai 2 dont l'acquisition de celui-ci est stoppée au bout de 16 heures de séchage afin de déterminer la distribution de la teneur en eau. Les essais 3 et 4 présentent des teneurs en eau très voisines avec des évolutions des flux masse d'eau évaporée pratiquement similaires. Les températures de surface des échantillons 2, 3 et 4 se superposent et la température de surface de l'échantillon 1 reste la plus faible, notamment durant la première période de ralentissement.

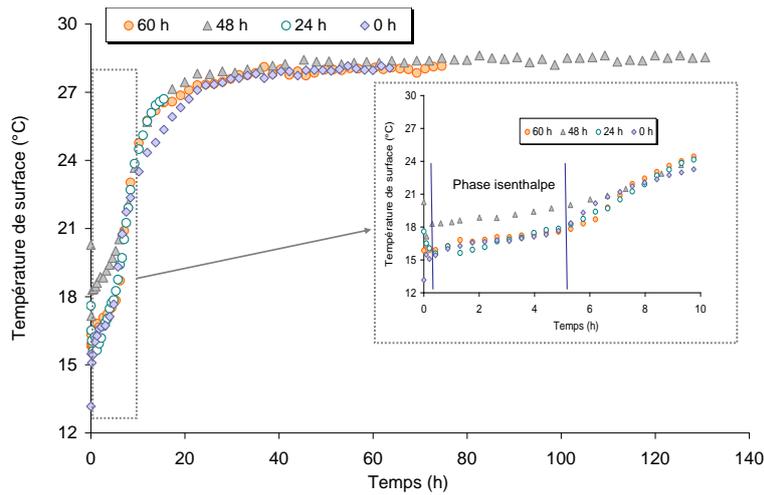


Figure III.11 : Comparaison des températures de surface (essais 1, 2, 3 et 4).

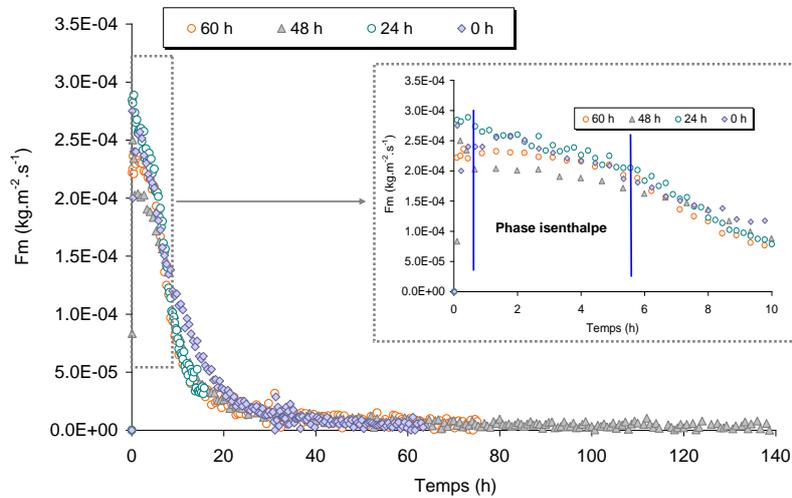


Figure III.12 : Comparaison des flux masses d'eau évaporée (essais 1, 2, 3 et 4).

III.2.3 Influence de la vitesse d'air

Une comparaison des cinétiques de séchage des échantillons 3, 5 et 6 est étudiée. Les trois matériaux sont confinés pendant 48 heures puis séchés à la même température et à trois vitesses d'air différentes ($1,1 \text{ m.s}^{-1}$, $2,1 \text{ m.s}^{-1}$ et $2,6 \text{ m.s}^{-1}$). L'humidité n'est pas régulée au cours des essais.

La Figure III.13 et la Figure III.14 présentent les évolutions au cours du temps des températures et des humidités de l'air ainsi que les températures du fond des échantillons.

Les courbes représentatives des évolutions des températures de surface et des flux masse d'eau évaporée (Figure III.15 et Figure III.16) montrent que la vitesse d'air a un rôle significatif, particulièrement au cours de la période de séchage à vitesse constante et une partie des périodes de ralentissement. Au cours de la première période, le flux masse d'eau évaporée est plus important pour les vitesses d'air les plus élevées. Quant à la température de la phase isenthalpe, elle est plutôt contrôlée par l'humidité relative. En revanche, on constate que la durée de la phase de séchage à vitesse constante est plus courte pour les vitesses d'air

les plus importantes ce qui entraîne une rapide montée en température au cours des phases de ralentissement (Figure III.16).

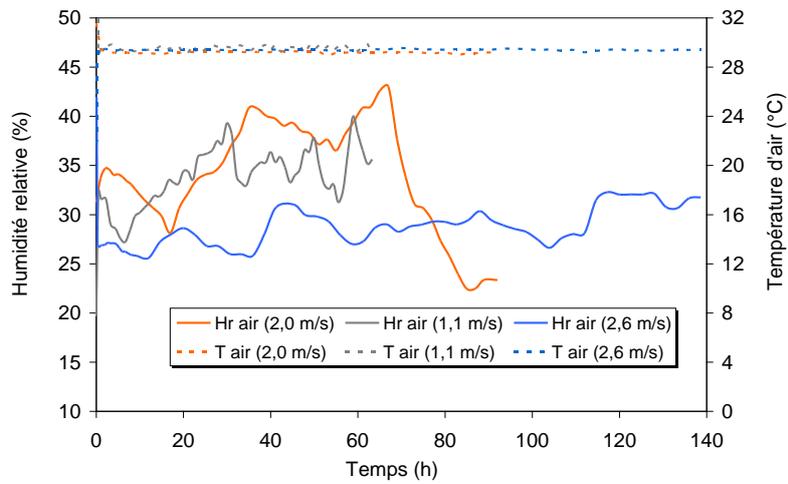


Figure III.13 : Evolution des températures d'air et des humidités relatives (essais 3, 5 et 6).

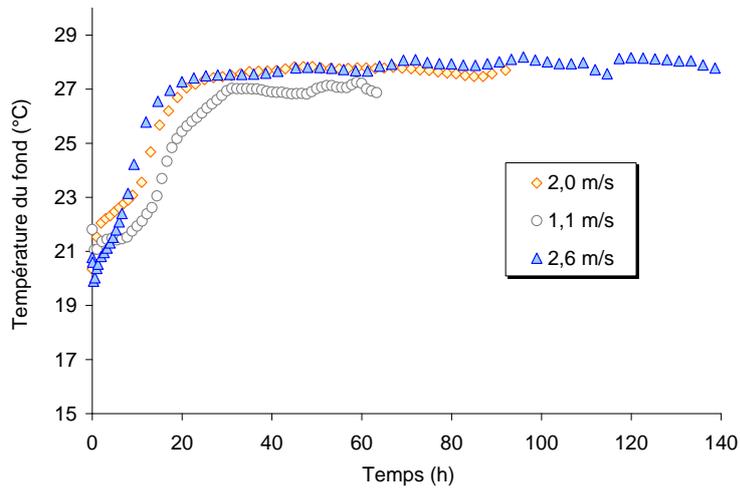


Figure III.14 : Evolution des températures du fond (essais 3, 5 et 6).

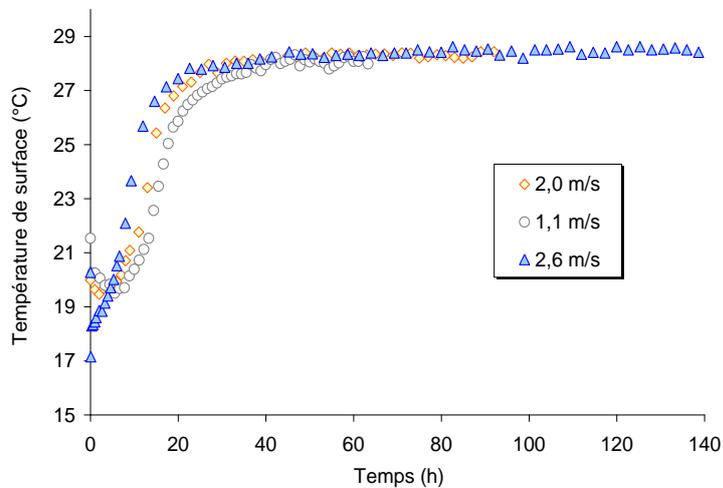


Figure III.15 : Comparaison des températures de surface (essais 3, 5 et 6).

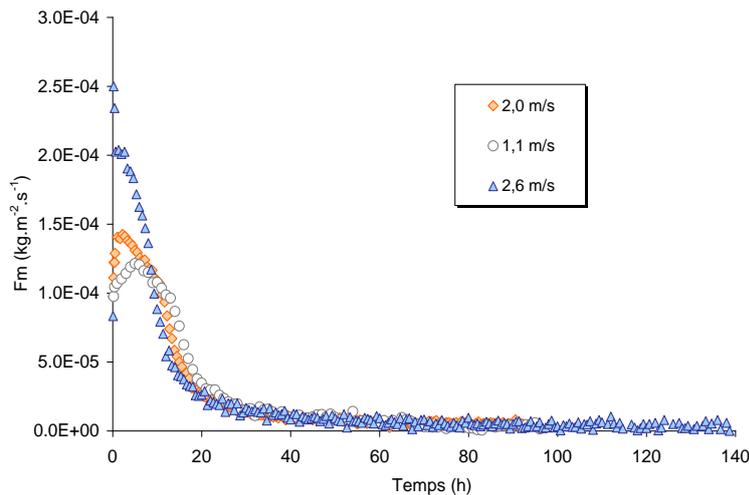


Figure III.16 : Comparaison des flux masses d'eau évaporée (essais 3, 5 et 6).

III.2.4 Distribution de la teneur en eau

Afin de connaître le champ de teneur en eau initial au sein des éprouvettes et durant le séchage des découpes ont été réalisées (Figure III.17). Les différents couches ont alors été pesés et séchés en étuve à 60°C afin d'en déduire la teneur en eau.

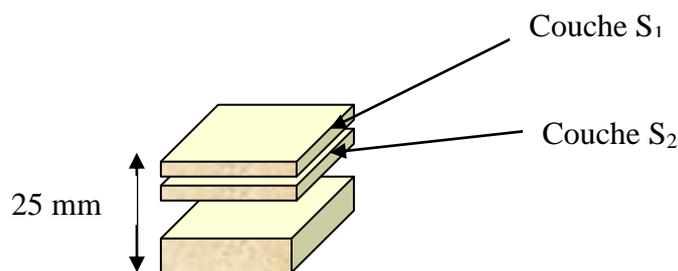


Figure III.17 : Découpage de l'échantillon.

▪ Mesures des teneurs en eau initiales

Les résultats obtenus sur une éprouvette confinée pendant 48 heures après sa fabrication sont présentés. Le matériau de 2,5 cm d'épaisseur a été découpé en trois couches d'épaisseur différentes : environ 2 mm à proximité de la surface exposée à l'air, 3 mm au milieu et enfin 20 mm pour la partie inférieure de l'éprouvette.

Le Tableau III.3 montre que l'on peut supposer le matériau initialement à une teneur en eau homogène, dans ce cas de l'ordre de 0,333 kg.kg⁻¹.

Tableau III.3 : Distribution de la teneur en eau initiale du liant Tradical® PF80 M.

	Couche S ₁	Couche S ₂	Couche S ₃
W _{ini} (kg.kg ⁻¹)	0,338	0,331	0,333

▪ Mesures des teneurs en eau au cours du séchage

Des découpes sont réalisées sur deux échantillons de 2,5 cm confinés respectivement pendant 24 h puis séchés durant 16 et 6 heures. Les conditions de séchage des deux essais sont similaires et correspondent à celles des essais 2 et 7, quant aux évolutions des températures de surface et des teneurs en eau au cours du séchage, elles sont reportées sur la Figure III.18.

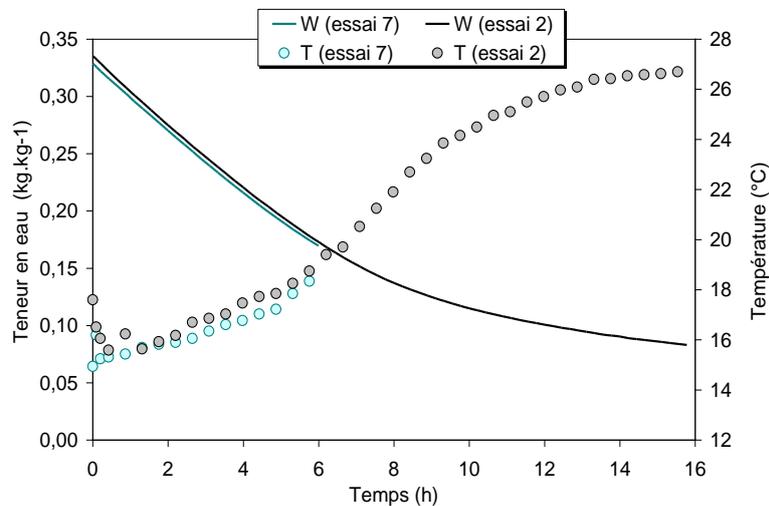


Figure III.18 : Evolutions des températures de surface et des teneurs en eau au cours de séchage (essais 2 et 7).

Après séchage, les éprouvettes ont été découpées en 6 couches d'épaisseurs variables. Les découpes réalisées au bout de 6 heures donnent une teneur en eau moyenne de l'ordre de 0,169 kg.kg⁻¹ avec de faibles gradients (Figure III.19). Après 16 heures la teneur en eau moyenne atteinte est de 0,083 kg.kg⁻¹ et les gradients sont plus conséquents.

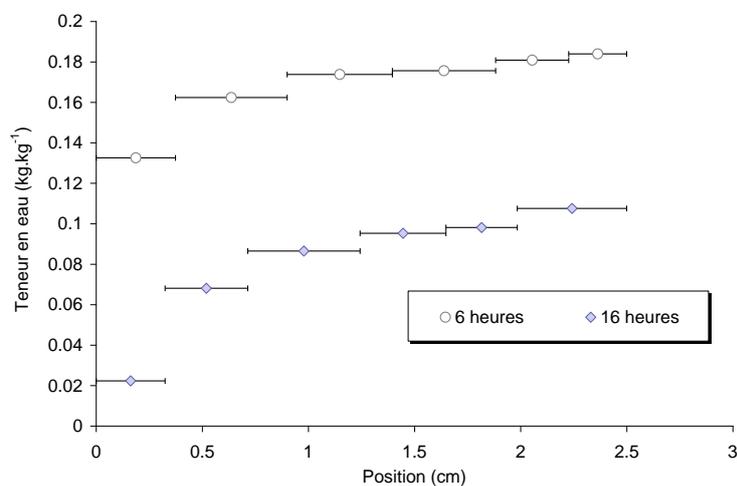


Figure III.19 : Distribution des teneurs en eau du liant Tradical® PF80 M selon l'épaisseur.

III.3 Etude du séchage de mélanges chanvre/Tradical® PF80 M

Afin d'étudier l'influence de l'épaisseur des matériaux et du type de granulats sur les cinétiques de séchage, différents essais ont été réalisés (Tableau III.4). Tous les mélanges sont préparés avec des fractions massiques (chanvre-liant-eau) identiques.

Tableau III.4 : Récapitulatif des conditions de séchage des mélanges chanvre/Tradical® PF80 M.

N° d'essai	Type de granulats*	Âge du produit	T _{air} (°C)	V _{air} (m.s ⁻¹)	H _r air (%)	Epaisseur (cm)	W _{ini}	Masse volumique sèche (kg.m ⁻³)
1	C.T	0h	29,3±0,4	1,2	29,0±7,2	2,50	0,692	715,2
2	C.C	0h	29,4±0,3	1,2	35,6±4,1	2,63	0,688	701,4
3	C.T	120h	29,4±0,4	1,2	32,9±6,2	2,55	0,664	723,4
4	C.C	120h	29,4±0,4	1,0	29,7±4,6	2,49	0,679	746,8
5	C.C	48h	29,6±0,5	1,1	25,4±5,4	4,05	0,675	691,6
6	C.C	0h	29,4±0,6	2,0	26,1±3,0	2,50	0,693	730,0
7	C.C	0h	29,3±0,2	2,6	25,1±2,0	3,80	0,679	608,0
8	C.C	0h	29,3±0,7	1,0	22,5±0,9	3,80	0,679	744,2
9	C.C	24h	29,4±0,4	2,0	28,0±2,4	3,93	0,685	712,6

*C.C : Correspond au granulats de Chanvribat et C.T au granulats de Terrachanvre. Dans la suite de ce travail, les mélanges chanvre Chanvribat/liant PF80 M et chanvre Terrachanvre/liant PF80 M sont respectivement désignés par C.T/C et C.C/C.

III.3.1 Description d'un essai type

La Figure III.20 et la Figure III.21 montrent les évolutions obtenues lors du séchage d'une éprouvette correspondant à un mélange de chanvre « Terrachanvre » et liant PF80 M. Cet essai a été réalisé avec un matériau de 2,5 cm d'épaisseur placé dans l'enceinte de séchage juste après sa mise en œuvre. Les consignes étaient fixées à 1,2 m.s⁻¹ pour la vitesse d'air et 29,3°C pour la température. L'humidité relative au cours de cet essai est en moyenne de 29±7% (Figure III.23).

Les deux périodes de mise en température et de séchage à vitesse constant sont relativement courtes par rapport à la durée totale du séchage. Le produit, initialement à une température moyenne de 24°C, met environ 3 heures pour atteindre une température légèrement au-dessus de la température de bulbe humide et ainsi entrer dans la période de séchage à vitesse constante. À partir d'une teneur en eau inférieure à 0,48 kg.kg⁻¹, le flux masse d'eau évaporée commence à décroître, c'est le début de la première phase de ralentissement qui dure environ 30 heures (Figure III.20). La deuxième période de ralentissement et la période de mise en équilibre sont les plus longues. On observe qu'au bout de 110 heures l'éprouvette n'a toujours pas atteint l'équilibre hydrique mais on peut constater que la teneur en eau tend vers une valeur 0,015 kg.kg⁻¹, ce qui est cohérent avec les données de l'isotherme de désorption. Par ailleurs, on peut noter que les gradients de température au sein du produit sont faibles, au maximum 2,2°C.

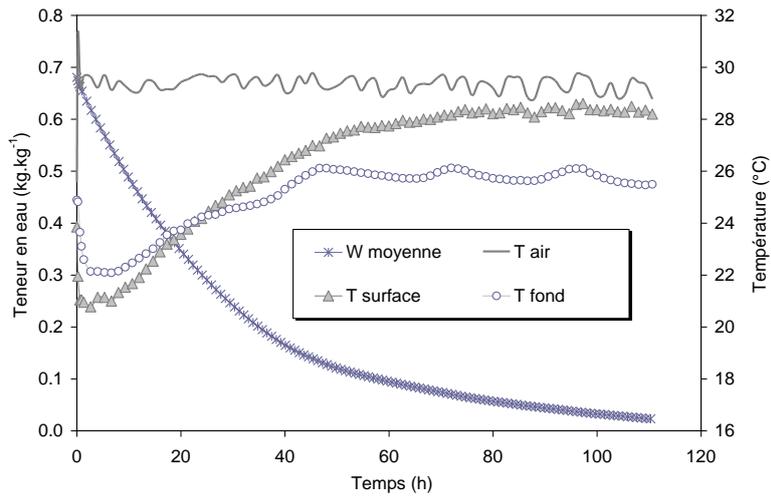


Figure III.20 : Cinétique de séchage d'un mélange chanvre/chaux - 0 heure après mise en œuvre - épaisseur de 2,5 cm (essai 1).

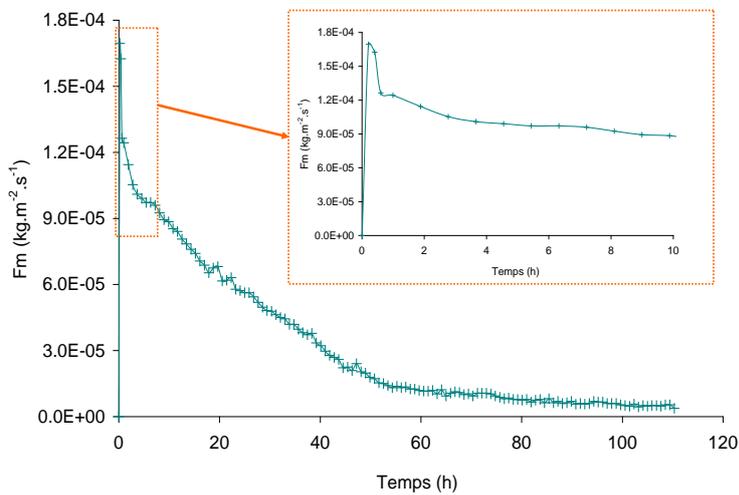


Figure III.21 : Flux masse évaporée du mélange chanvre/chaux, 0 heure après sa mise en œuvre - épaisseur de 2,5 cm (essai 1).

III.3.2 Influence du type de granulats et de l'âge des matériaux

Les différentes cinétiques sont comparées selon l'approche définie sur la Figure III.22.

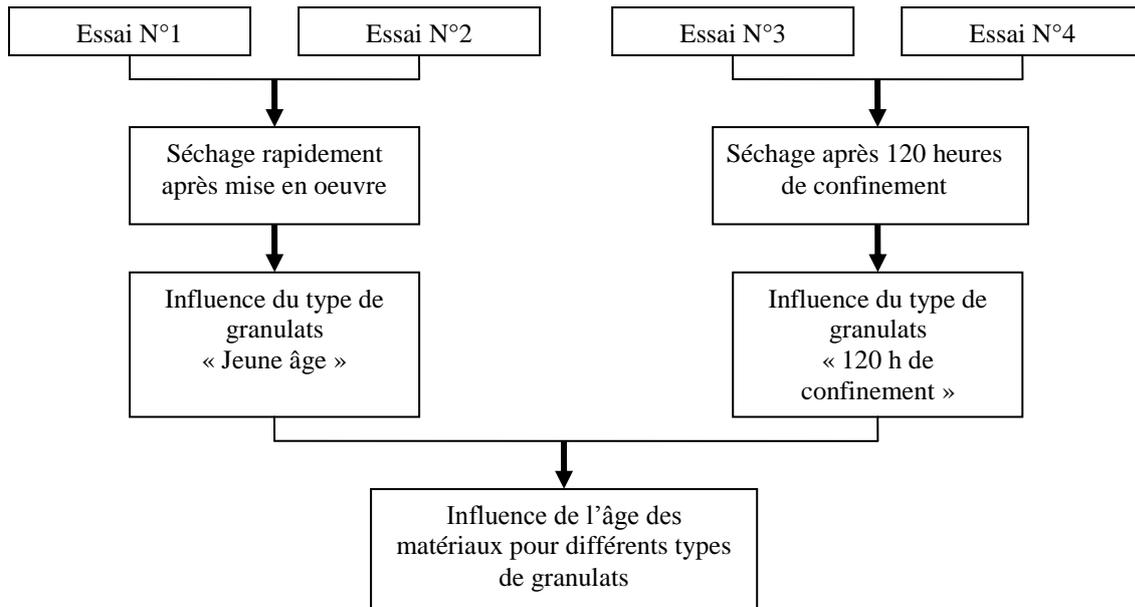


Figure III.22 : Organigramme des comparaisons des cinétiques de séchage obtenues pour différents granulats de chanvre et à différents âges.

On s'intéresse tout d'abord aux éprouvettes placées dans l'enceinte de séchage immédiatement après la mise en œuvre. Les évolutions mesurées sont comparées sur les Figure III.23 à Figure III.26.

Durant la période de mise en régime, le flux masse d'eau évaporée du mélange C.T/C apparaît plus important que celui du mélange C.C/C. Ceci est en effet dû à l'écart de 2°C entre les températures de surface initiales des deux produits. Les deux flux se rejoignent durant la période de séchage à vitesse constante et une partie de la première phase de ralentissement. Les deux courbes se séparent à nouveau et le flux masse d'eau évaporée du mélange C.C/C passe en dessous de celui du mélange C.T/C. Cet écart est dû à la différence entre les humidités relatives durant cette période. Au cours de la deuxième phase de ralentissement et de la mise en équilibre, les deux courbes se rejoignent à nouveau et l'écart entre les teneurs en eau diminue également.

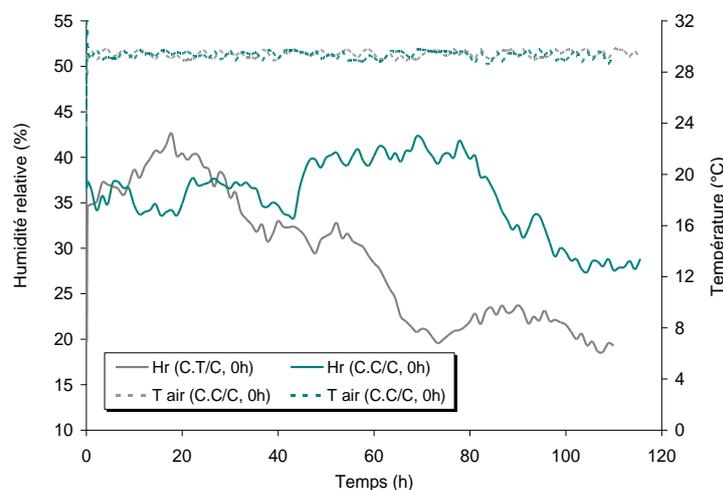


Figure III.23 : Evolution des températures d'air et des humidités relatives (essais 1 et 2).

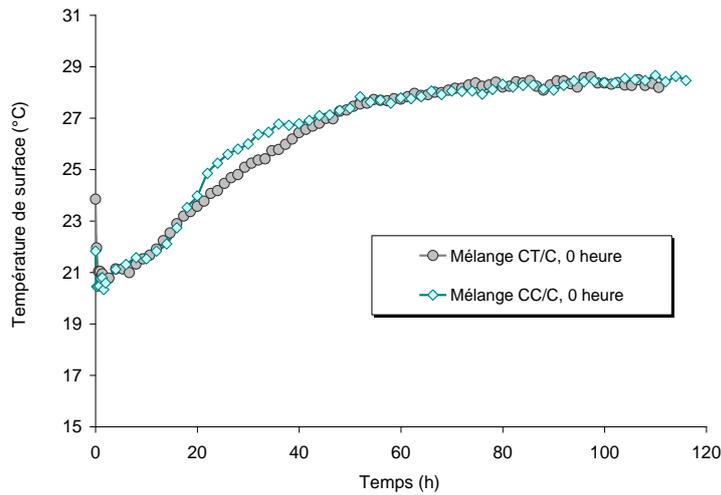


Figure III.24 : Comparaison des températures de surface (essais 1 et 2).

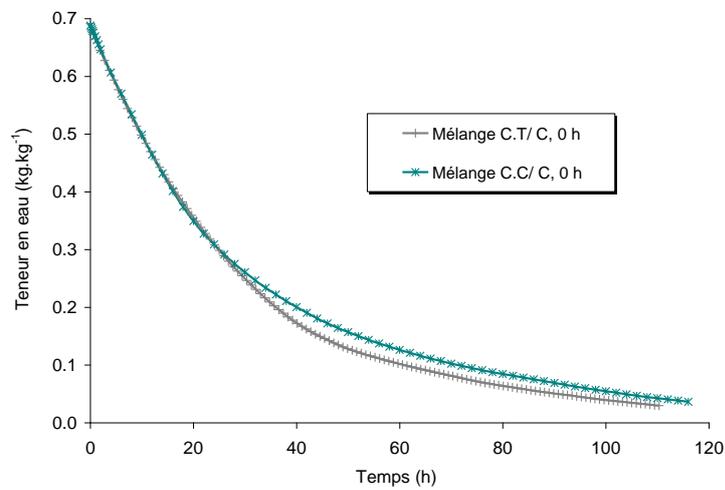


Figure III.25 : Comparaison des teneurs en eau (essais 1 et 2).

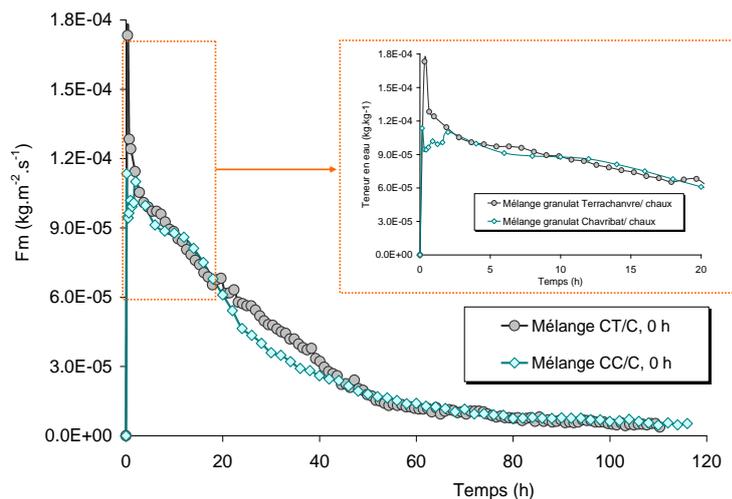


Figure III.26 : Comparaison des flux masses d'eau évaporée (essais 1 et 2).

Les éprouvettes 3 et 4 sont séchées après 120 heures de confinement dans les mêmes conditions de températures et de vitesse d'air que les précédentes. La comparaison des cinétiques de séchage des deux éprouvettes est reportée sur les Figure III.27 à Figure III.30.

Initialement, les échantillons présentent des teneurs en eau très proches et des températures différentes. On voit que la teneur en eau du mélange C.T/C décroît plus rapidement que celle du mélange C.C/C. L'écart important constaté entre les deux flux masse d'eau évaporée aux cours des périodes de mise en régime et de séchage à vitesse constante est probablement lié à l'évolution différente de l'humidité relative de chaque essai. Au bout de 100 heures de séchage, les courbes des teneurs en eau des deux matériaux se rejoignent et l'équilibre s'effectue à des teneurs en eau très voisines.

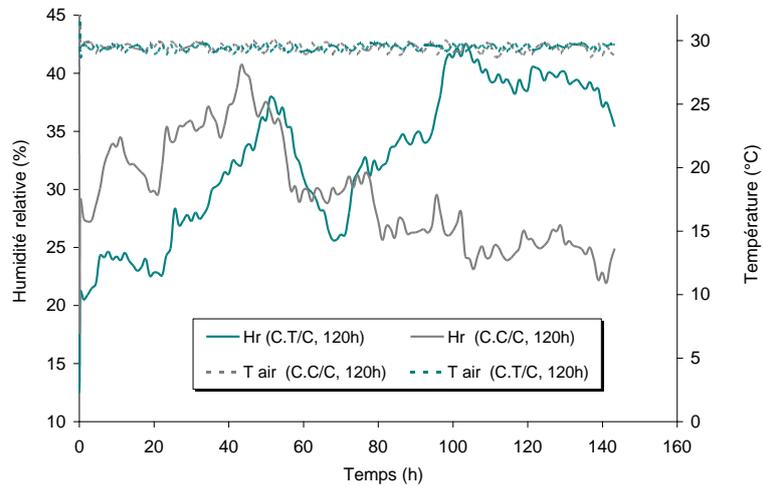


Figure III.27 : Evolution des températures d'air et des humidités relatives (essais 3 et 4).

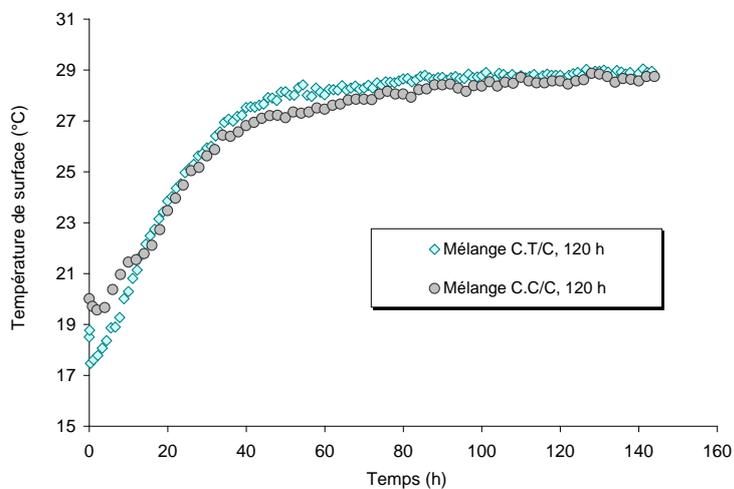


Figure III.28 : Comparaison des températures de surface (essais 3 et 4).

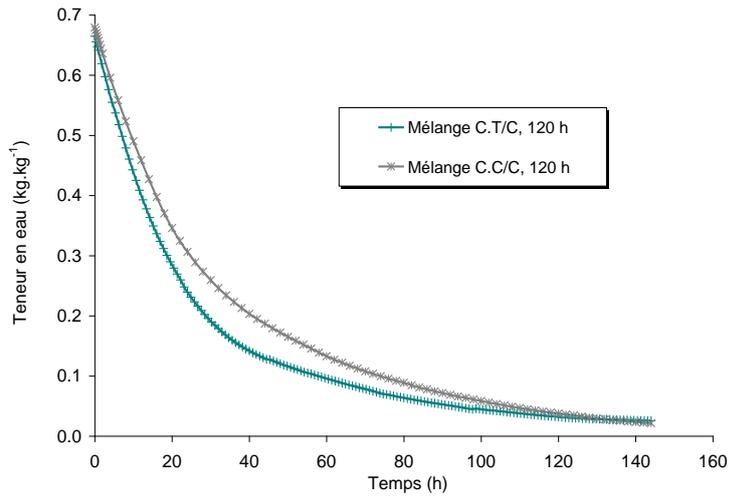


Figure III.29 : Comparaison des teneurs en eau (essais 3 et 4).

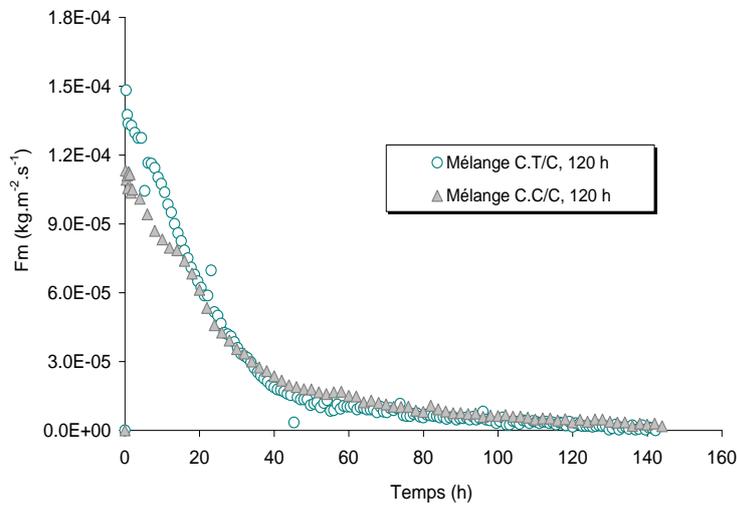


Figure III.30 : Comparaison des flux masses d'eau évaporée (essais 3 et 4).

Une confrontation des teneurs en eau des quatre essais est reportée sur la Figure III.31. On remarque qu'il est difficile de quantifier l'effet de l'âge des matériaux sur les cinétiques de séchage.

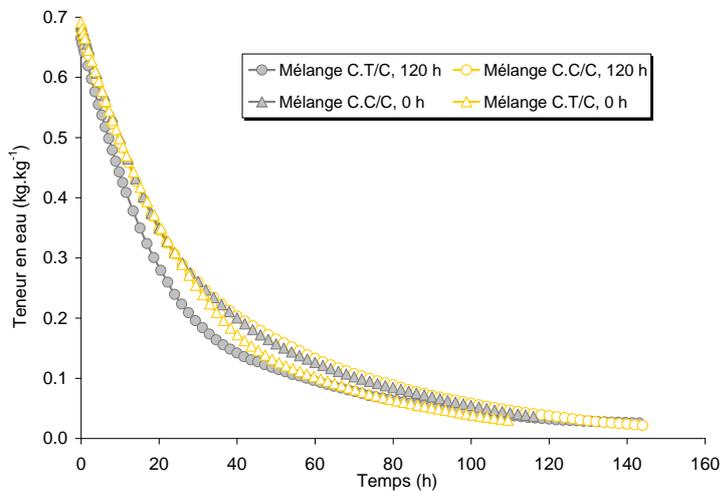


Figure III.31 : Comparaison de l'évolution des teneurs en eau des essais 1, 2, 3 et 4.

III.3.3 Influence de l'épaisseur des échantillons

La Figure III.32 et la Figure III.33 présentent une comparaison des cinétiques de séchage et des flux masse d'eau évaporée pour les essais 4 et 5 réalisés dans les mêmes conditions de température et de vitesse d'air. On observe que le matériau le plus épais présente une évolution de teneur en eau plus lente et un flux masse d'eau évaporée plus important. Quant aux températures de surface, les deux courbes sont pratiquement superposées sauf au cours de la phase isenthalpe. En effet, l'épaisseur de l'éprouvette a de l'influence sur les processus de transport de l'eau à travers la matrice poreuse.

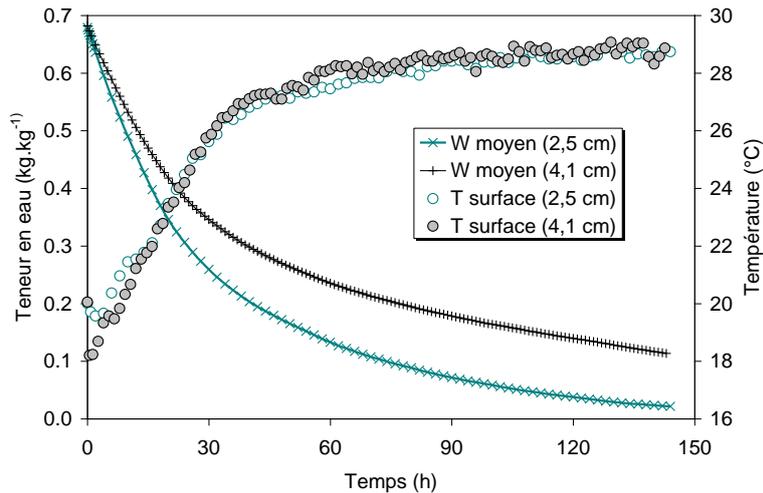


Figure III.32 : Comparaison des cinétiques de séchage des essais 4 et 5.

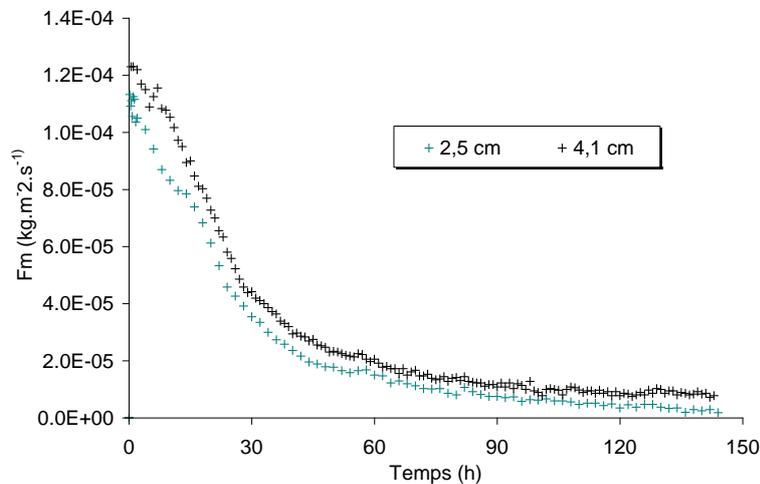


Figure III.33 : Comparaison des vitesses de séchage pour les essais 4 et 5.

III.3.4 Influence des conditions aérothermiques

Une deuxième série d'essais a été effectuée dans le but d'évaluer l'influence des conditions aérothermiques sur le processus de séchage. Les conditions appliquées sont reportées dans le Tableau III.5. L'étude est réalisée sur cinq éprouvettes fabriquées avec des granulats Terrachanvre. L'épaisseur des échantillons est d'environ 4 cm et le séchage est effectué rapidement après la mise en œuvre.

Tableau III.5 : Récapitulatif des conditions de séchage des mélanges chanvre/Tradical® PF80 M.

N° d'essai	T _{air} (°C)	V _{air} (m.s ⁻¹)	Hr _{air} (%)
10	35,14±0,13	2,6	24,1±1,2
11	30,25±0,20	2,6	23,1±1,1
12	21,82±0,68	2,6	34,7±4,0
13	35,80±0,79	2,0	20,7±2,3
14	34,42±0,65	1,0	26,1±2,0

III.3.4.1 Température d'air

La Figure III.34 présente l'évolution des teneurs en eau moyenne pour les trois essais menés à la même vitesse de l'air 2,6 m.s⁻¹. Comme on pouvait s'y attendre, au début du séchage la perte de masse est liée à la température et à l'humidité de l'air. L'écart le plus important entre les différents flux masse d'eau évaporée (Figure III.35) est enregistré durant les dix premières heures ; les conditions aérothermiques contrôlent le processus d'évaporation durant la période de séchage à vitesse constante et partiellement pendant la période de séchage à vitesse décroissante. Par la suite, c'est les paramètres relatifs aux transferts de masse dans le matériau qui deviennent les éléments « moteur ».

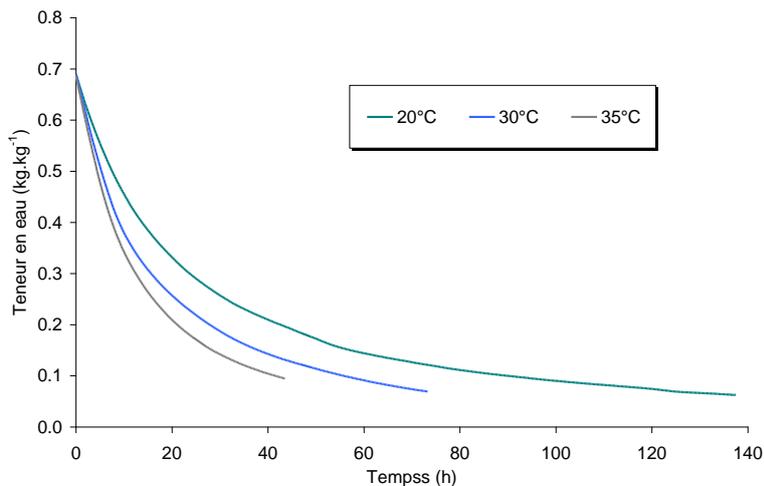


Figure III.34 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps pour différentes températures d'air (essais N° 10, 11 et 12).

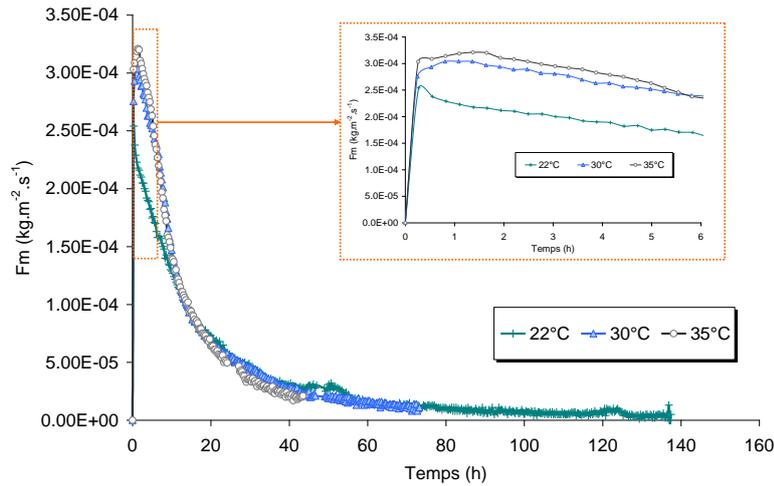


Figure III.35 : Evolution du flux masse évaporée en fonction du temps pour différentes températures d'air (essais N° 10, 11 et 12).

III.3.4.2 Vitesse d'air

La Figure III.36 et la Figure III.37 permettent de visualiser l'influence de la vitesse de l'air sur les cinétiques de séchage. On voit clairement que la vitesse d'air a un rôle significatif, particulièrement durant la phase de séchage à vitesse constante où un écart important est enregistré entre les flux masse d'eau évaporée. On remarque également que la durée de la phase isenthalpe est plus courte pour la vitesse d'air la plus grande et ainsi la première phase de ralentissement débute aussitôt pour la vitesse d'air la plus élevée.

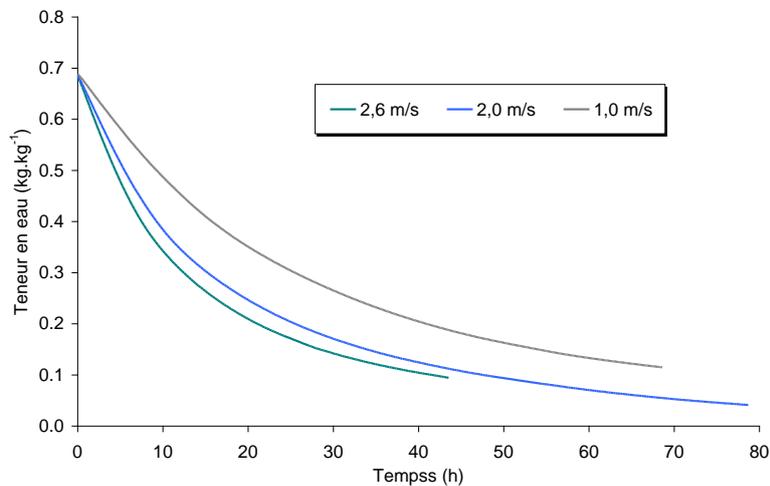


Figure III.36 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps pour différentes vitesses d'air (essais N° 10, 13 et 14).

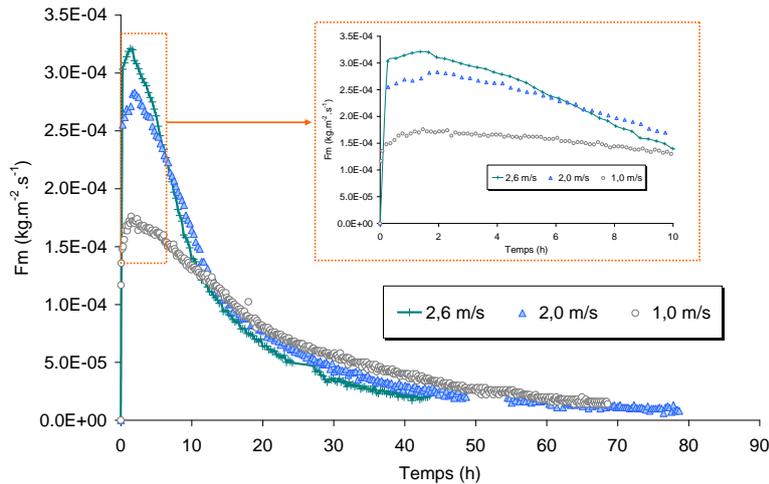


Figure III.37 : Evolution de flux masse évaporée en fonction du temps pour différentes vitesses d'air (essais N° 10, 13 et 14).

III.3.5 Distribution de la teneur en eau au sein du matériau

▪ Mesures des teneurs en eau initiales

Afin de déterminer la distribution de la teneur en eau initiale au bout de 48 heures de confinement, des découpes d'éprouvettes ont également été réalisées.

Les résultats obtenus pour un mélange Chanvribat/PF80 d'épaisseur de 3,7 cm découpé en cinq couches sont présentés. Les teneurs en eau obtenues sont données sur le Tableau III.6. On observe que la teneur en eau dans l'éprouvette après 48 heures peut être supposée homogène.

Tableau III.6 : Distribution de la teneur en eau dans le mélange chanvre/liant PF80.

	Couche S ₁	Couche S ₂	Couche S ₃	Couche S ₄	Couche S ₅
W initiale (kg.kg ⁻¹)	0,672	0,647	0,653	0,686	0,650

▪ Mesures des teneurs en eau au cours du séchage

Des mesures ont également été réalisées pour quantifier les gradients de teneur en eau durant le séchage. La Figure III.38 présente les cinétiques de séchage de deux éprouvettes « mélange chanvre Chanvribat/PF80 » séchés respectivement durant 14 et 26 heures à des vitesses d'air différentes (voir Tableau III.2: essai 8 et 9).

On remarque qu'au bout de 14 heures de séchage (essai 8) la teneur en eau moyenne atteinte est de 0,48 kg.kg⁻¹. Après découpe de l'échantillon, on enregistre une teneur en eau moyenne plus faible (soit 0,411 kg.kg⁻¹) et le gradient de teneur en eau dans le produit est relativement faible (Figure III.39). Il est toutefois important de noter que cette observation est à nuancer du fait de l'épaisseur de l'échantillon prélevé du côté exposé au flux d'air (environ 8 mm).

Au bout de 26 heures de séchage, on observe que la teneur en eau moyenne est de l'ordre de 0,34 kg.kg⁻¹ avec des gradients pour les couches les plus proches de la surface d'échange.

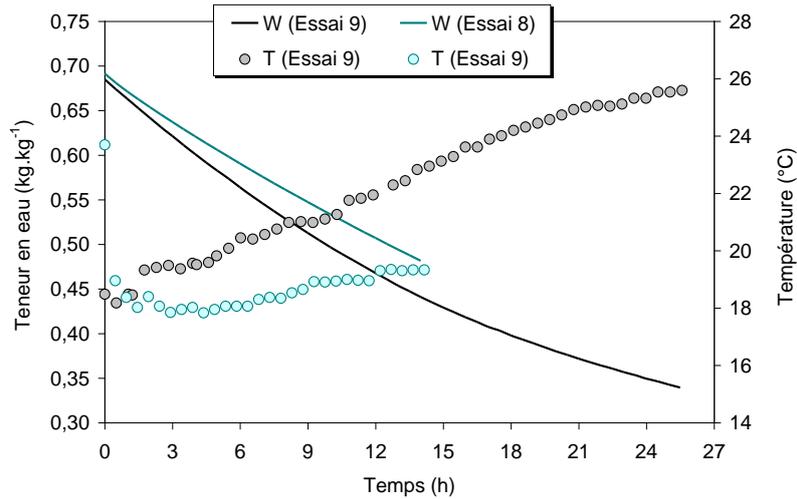


Figure III.38 : Evolutions des températures de surface et des teneurs en eau au cours de séchage (essais 8 et 9).

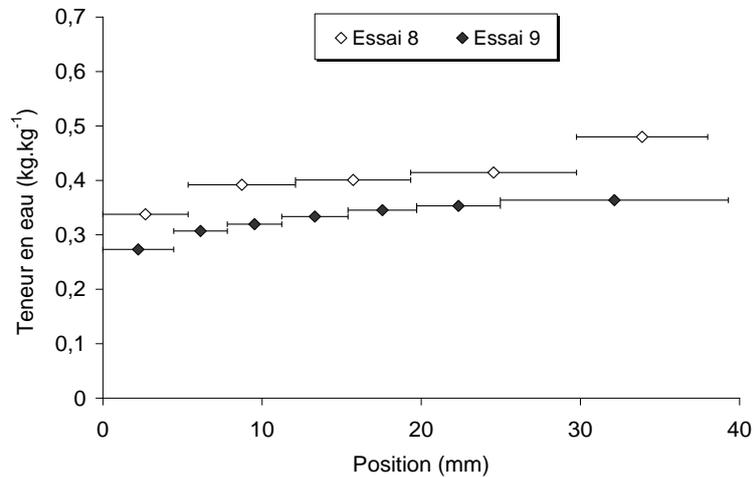


Figure III.39 : Distribution de la teneur en eau du mélange C.C /C selon l'épaisseur.

III.4 Détermination du coefficient d'échange par convection

Au cours du séchage, l'échange en surface du produit s'effectue par convection forcée et par rayonnement. Le coefficient de transfert par convection peut être identifié à partir d'un bilan massique en utilisant l'analogie entre les transferts de chaleur et de masse. En effet, d'après l'équation III.2, le flux de masse d'eau évaporée dépend de la température d'air et celle de surface du produit ainsi que l'activité de l'eau. A partir des cinétiques de séchage et durant la phase de séchage à vitesse constante (activité de l'eau égale à 1), on peut en évaluer le coefficient de transfert de masse k_m :

$$F_m = k_m \frac{P_{atm} M_v}{RT_f} \ln \left(\frac{P_{atm} - P_{v\infty}}{P_{atm} - a_w P_{vsat}} \right) \quad (III.2)$$

Si l'hypothèse de Lewis est vérifiée, l'analogie des transferts de chaleur et de masse (analogie de Colburn) permet de déduire h_c du coefficient de transfert de masse k_m selon l'expression suivante :

$$\frac{h_c}{k_m \rho C_p} = Le^{2/3} = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (III.3)$$

Sur les tableaux III.7 et III.8 sont rassemblées les valeurs des coefficients de transfert par convection estimés à partir de quelques essais de séchage du liant et des mélanges chanvre /chaux. Ces résultats sont exploités par la suite lors des essais d'estimation et de simulation numérique.

Tableau III.7 : Valeurs des coefficients de transfert par convection (liants PF80).

Essais		1	2	5	6	7
Conditions aérothermiques	T _{air} moyenne (°C)	29,3	29,4	29,2	29,5	29,5
	V _{air} (m.s ⁻¹)	2,6	2,6	2,0	1,1	2,6
	h _c (W.m ⁻² .K ⁻¹)	32,5	32,5	24	20	32,3

Tableau III.8 : Valeurs des coefficients de transfert par convection (mélange chanvre/liant PF80).

Essais		1	2	3	4	5	6	7
Conditions aérothermiques	T _{air} moyenne (°C)	29,3	29,4	29,4	29,6	29,6	29,4	29,3
	V _{air} (m.s ⁻¹)	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	2,0	2,6
	h _c (W.m ⁻² .K ⁻¹)	18	18	18	15	16	25	32

III.5 Identification du coefficient de diffusion à l'aide de solutions analytiques

A partir des courbes de teneur en eau en combinaison avec les solutions analytiques de la seconde loi de Fick, nous pouvons estimer un coefficient de diffusion hydrique global. En faisant l'hypothèse que la température et l'épaisseur du produit sont constantes au cours du séchage, l'équation suivante précédemment présentée (chapitre 1) est admise comme solution analytique de la seconde loi de Fick :

$$W^* = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)\pi} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 \frac{Dt}{4e^2} \right] \quad (III.4)$$

En considérant le coefficient de diffusion global constant sur des courts intervalles de temps, l'équation (III.4) est donc résolue par une méthode pas à pas à l'aide d'une procédure d'optimisation. Le critère de minimisation est le carré des écarts entre la courbe théorique de la teneur en eau et la courbe expérimentale :

$$\text{Critère} = \sum_{i=1}^n (W^*(i) - W_{\text{exp}}^*(i))^2 \quad (III.5)$$

La Figure III.40 donne l'évolution des coefficients de diffusion globaux des liants Tradical®PF80 M. Ils sont obtenus pour l'essai 1 (V_{air} = 2,6 m.s⁻¹ et durée de confinement de

0 h), l'essai 3 ($V_{\text{air}} = 2,6 \text{ m.s}^{-1}$ et durée de confinement de 48 h), l'essai 4 ($V_{\text{air}} = 2,6 \text{ m.s}^{-1}$ et durée de confinement de 48 h) et l'essai 6 ($V_{\text{air}} = 1,1 \text{ m.s}^{-1}$ et durée de confinement de 48 h). On remarque que l'évolution avec la teneur en eau du coefficient de diffusion pour les quatre essais est similaire. L'essai à $1,1 \text{ m.s}^{-1}$ présente un coefficient de diffusion légèrement inférieure à ceux des autres tests tout au long de la procédure de séchage.

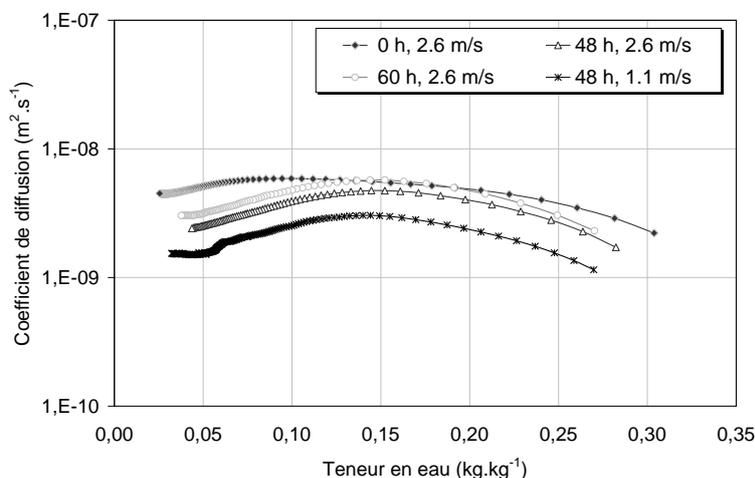


Figure III.40 : Evolution du coefficient de diffusion global lors des essais 1, 3, 4 et 6 du séchage du liant.

En faisant une moyenne sur les coefficients de diffusion obtenus (Tableau III.9), il apparaît que le matériau séché rapidement après sa mise en œuvre présente le coefficient de diffusion le plus élevé.

Tableau III.9 : Valeurs moyennes du coefficient de diffusion global du liant Tradical® PF80 M.

Essais / Liant	1	3	4	6
D (m ² .s ⁻¹)	4,9 10 ⁻⁹	2,7 10 ⁻⁹	3,9 10 ⁻⁹	1,9 10 ⁻⁹

Sur la Figure III.41 sont reportées les évolutions des coefficients de diffusion globaux des mélanges chanvre/liant avec la teneur en eau, estimés à partir des données expérimentales des essais 1, 2, 3 et 4. Les valeurs moyennes sont reportées dans le *Tableau III.10*. On remarque que les matériaux fabriqués à partir du granulat de Terrachanvre présente des coefficients de diffusion légèrement supérieurs à ceux à base de granulat de Chanvribat. Toutefois, les coefficients estimés sont du même ordre de grandeur que ceux du liant PF80.

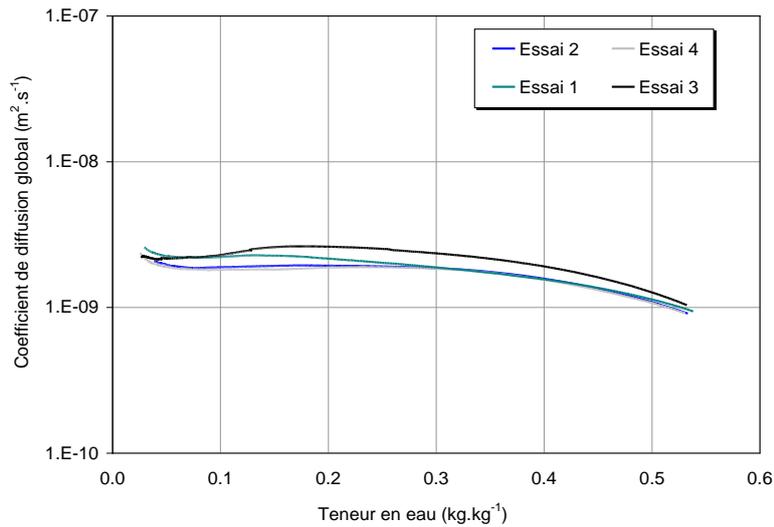


Figure III.41 : Evolution du coefficient de diffusion global lors des essais 1, 2, 3 et 4 du séchage des mélanges chanvre/liant.

Tableau III.10 : Valeurs moyennes du coefficient de diffusion global des mélanges chanvre/liant.

Essai	1	2	3	4
D (m ² .s ⁻¹)	2,1 10 ⁻⁹	1,9 10 ⁻⁹	2,3 10 ⁻⁹	1,8 10 ⁻⁹

III.6 Conclusion

Des mesures de cinétiques de séchage des liants et des mélanges chanvre/chaux ont été réalisées afin d'évaluer l'influence des conditions externes ainsi que l'effet de l'épaisseur et de la structure poreuse (échantillons avec et sans particules végétales) sur les différentes phases de séchage. Ces études ont montré que la quantité d'eau chimiquement liée est de l'ordre de 10% pour le liant.

L'exploitation des cinétiques de séchage, nous a permis d'estimer le coefficient de transfert par convection et un coefficient de diffusion global à l'aide de la solution analytique de la loi de Fick dans les conditions isothermes. Cette base de données expérimentales est utilisée au chapitre 5 pour estimer les paramètres relatifs au transfert hydrique.