
MODELISATION DU COMPORTEMENT
THERMOHYDRIQUE DES MATERIAUX
CHANVRE/CHAUX AU COURS DE
SECHAGE

V. Modélisation du comportement thermohydrique des matériaux chanvre/chaux au cours du séchage

Les études du chapitre 3 ont montré que les cinétiques de séchage du liant et des mélanges chanvre/chaux sont fonction de différents paramètres : l'âge et l'épaisseur des éprouvettes et les conditions aérothermiques. On a également vu que la cinétique réactionnelle du liant utilisée induit un dégagement de chaleur et une consommation d'eau relativement faible.

Le modèle numérique et la méthode d'estimation par technique inverse développés dans le chapitre IV sont donc maintenant appliqués afin de prédire numériquement les cinétiques de séchage.

V.1 Etudes du liant

Les isothermes de désorption déterminées expérimentalement par la méthode des solutions salines et la méthode DVS sont similaires du moment où la teneur en eau est calculée à partir de la masse sèche de la fin de désorption.

De ce fait, nous proposons d'étudier la réponse du modèle à la courbe de désorption d'un matériau ré-humidifié (solutions salines) dans deux cas :

- Teneurs en eau calculées à partir de la masse sèche initiale (Figure V.1, courbe (1)).
- Teneur en eau calculées à partir de la masse sèche en fin de désorption (Figure V.1, courbe (2)).

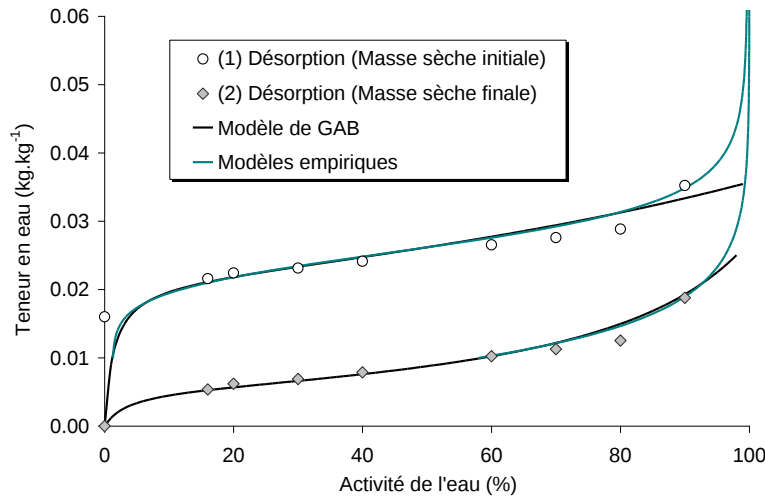


Figure V.1 : Courbes de désorption du liant Tradical® PF80.

Les courbes précédentes sont ajustées par des modèles empiriques dont les expressions sont données par les équations respectives (V.1) et (V.2).

$$a_w = 0,01270396 + \frac{0,98457246}{\left(1 + \frac{W}{0,02624409}\right)^{(-7,8000494)}} \quad (V.1)$$

$$a_w = 1 + \frac{1}{(b-a)} (a \exp(-b(W-c)) - b \exp(-a(W-c))) \quad (V.2)$$

$$a = 161,3816572$$

Les valeurs des paramètres a , b , c de l'équation (V.2) sont : $b = 587,4751419$

$$c = 0,0027058$$

Les autres propriétés physiques introduites dans le modèle sont rassemblées dans le Tableau V.1.

Tableau V.1 : Propriétés physiques du liant.

ε (-)	λ^* (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Cp _s (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Emissivité
0,48	0,25	925	0,90

Les expressions du coefficient de transfert en phase liquide D_l^w et du facteur de perméabilité à la vapeur μf retenues pour l'étude sont les suivantes :

$$D_L^w = \exp\left(p_1 + \frac{p_2}{W}\right) \quad (V.3)$$

$$\mu f = p_3(1 - W_{eq}^2) \quad (V.4)$$

Le Tableau V.2 donne le récapitulatif des essais exploités (voir Chapitre 3). La condition à l'interface produit / creuset est de type température imposée. Cette dernière est prise égale à la température mesurée lors des expérimentations.

Tableau V.2 : Conditions aérothermiques et initiales des simulations.

Essais		1	2	5	6	7
Conditions aérothermiques	T _{air} moyenne (°C)	29,3	29,4	29,2	29,5	29,5
	Hr moyenne (%)	16,4	13,9	34,9	33,9	12,8
	V _{air} (m.s ⁻¹)	2,6	2,6	2,0	1,1	2,6
Conditions initiales	T (°C)	14,3	18,8	20,01	21,5	15,9
	W (kg.kg ⁻¹)	0,373	0,335	0,322	0,335	0,329
ρ_s (kg.m ⁻³)		1236,5	1270,0	1273,2	1282,8	1270,0
e (m)		0,0253	0,0250	0,0252	0,0250	0,0250
Age des matériaux (h)		0	24	48	48	40

Les critères de précision sont de 10⁻⁴ kg.kg⁻¹ sur la teneur en eau et 10⁻³°C sur la température. Différentes simulations ont montré qu'une discrétisation spatiale supérieure à 50 volumes élémentaires et un pas de temps de 0,5 s permet d'assurer la stabilité des calculs.

V.1.1 Etude d'un matériau séché 48 h après la mise en œuvre

Une première estimation des trois paramètres p_1 , p_2 et p_3 est réalisée dans les conditions de l'essai 5. Il s'agit d'un séchage effectué 48 heures après la mise en œuvre du produit à une vitesse et une température d'air de 2 m.s⁻¹ et de 29,2°C. Deux études sont menées afin d'étudier l'influence du modèle représentatif de l'isotherme de désorption et de la durée des

expérimentations sur l'estimation des paramètres.

V.1.1.1 Exploitation du modèle (1) de l'isotherme de désorption

▪ Estimation sur la durée totale de l'expérimentation

Dans une première phase, les données sur la totalité de l'expérimentation (92 heures) sont exploitées. Les résultats obtenus sont reportés sur le *Tableau V.3*.

Tableau V.3 : Paramètres initiaux et estimés du liant.

Paramètres	Initiaux	$\alpha = 1$	$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,25$
p_1	-5	-9,232	-10,06	-10,646	-10,996
p_2	-2	-0,341	-0,237	-0,169	-0,136
p_3	0,8	0,136	0,096	0,059	0,048
S (T)	318,7	270,4	243,9	220,3	200,2
S (W)	5145,9	6,8	10,6	24,9	60,4
S moyenne	2732,3	138,6	127,3	122,6	130,3
Itérations		30	35	31	56

Les jeux de paramètres estimés sont variables suivant le poids qu'on donne à chacune des variables dans le calcul de la fonction objectif. La valeur optimale de cette grandeur est obtenue pour un coefficient de pondération de 0,5. Cependant les paramètres estimés pour les coefficients de pondération de 0,75 et 0,25 donnent également une minimisation satisfaisante de la fonction « objectif ».

Sur la Figure V.2 et la Figure V.3, sont reportées les évolutions des paramètres estimés et des fonctions « objectif » au cours des itérations pour un coefficient de pondération de 0,5. On montre à travers ces courbes la dominance de la teneur en eau moyenne dans la minimisation de la fonction « objectif » tout au long de processus itératif. Ceci contribue d'une manière considérable à l'ajustement des paramètres p_1 , p_2 et p_3 (Figure V.2). À partir de la 26^{ème} itération, les trois paramètres commencent à converger pour atteindre la solution finale au bout de la 31^{ème} itération.

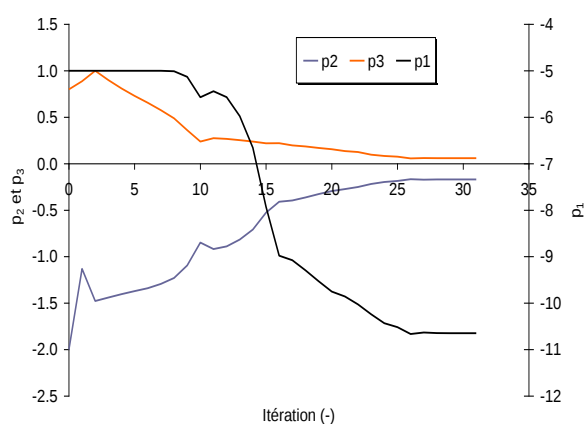


Figure V.2 : Evolution des paramètres pour un coefficient de pondération de 0,5.

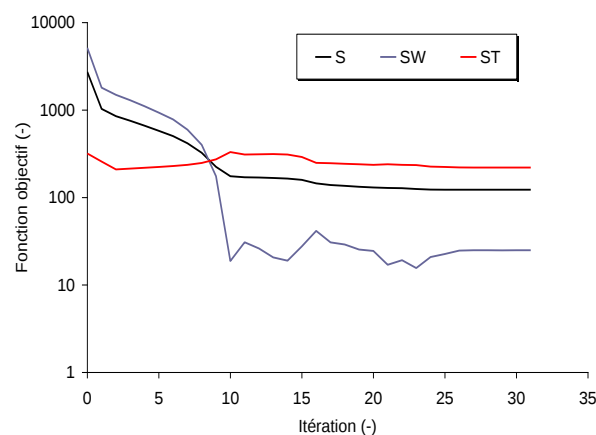


Figure V.3 : Evolution des fonctions « objectif » pour un coefficient de pondération de 0,5.

La Figure V.4 montre une bonne concordance entre les évolutions simulées et expérimentales de la teneur en eau. L'erreur maximale enregistrée durant la première phase de ralentissement n'excède pas $0,02 \text{ kg.kg}^{-1}$. En ce qui concerne la température de surface, les évolutions sont similaires avec un écart d'environ 1°C entre les valeurs mesurées et calculées durant la phase de séchage à vitesse constante et la première phase de ralentissement. L'écart est justifié par l'erreur de mesure du pyromètre aux températures ambiantes et également à une éventuelle évolution de l'émissivité de la surface avec la teneur en eau (voir chapitre 3).

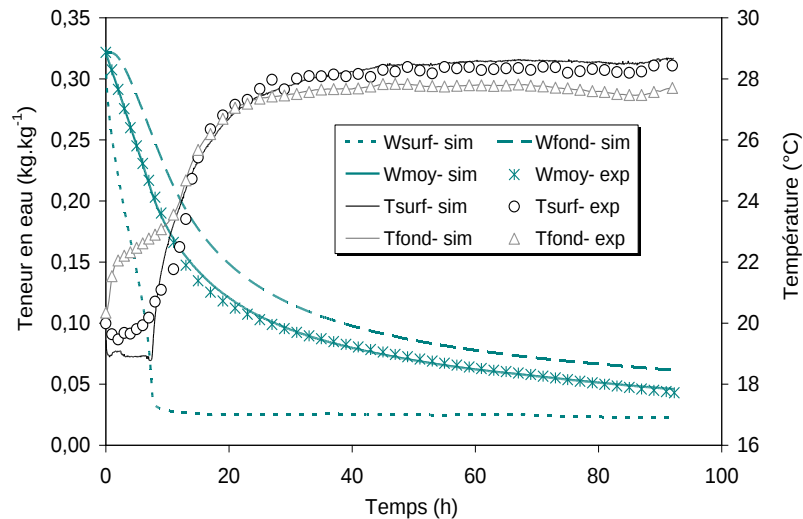


Figure V.4 : Confrontation des cinétiques de séchage simulée et expérimentale
(durée d'estimation : 93 heures, $\alpha=0,5$)

Le tracé des coefficients de transfert hydrique semble montrer que la phase liquide est dominante sur une plage de teneur en eau assez importante ($W > 0,0038 \text{ kg.kg}^{-1}$), ce n'est qu'en dessous de cette valeur que la diffusion de la vapeur prend place. (Figure V.5)

Le coefficient de thermo-migration de la vapeur reste faible comme le montre la Figure V.4 (valeur moyenne de $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et l'écart entre la température de surface et la température du fond n'excède pas les 4°C . Une étude de sensibilité va montrer par la suite la possibilité de négliger la thermo-migration de la phase vapeur dans ce cas de figure.

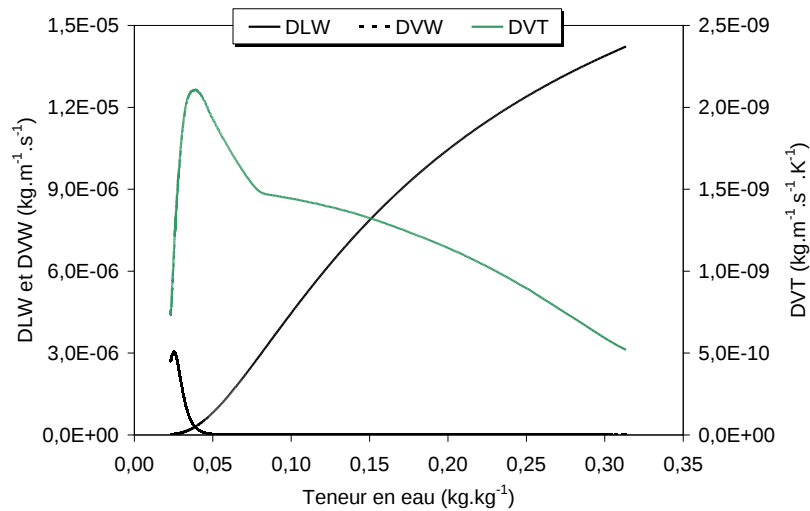


Figure V.5 : Evolution des coefficients de transfert hydrique (durée d'estimation 93 h, $\alpha=0,5$).

▪ Estimation sur des durées plus courtes

Différentes estimations sont réalisées en considérant différentes durées d'expérimentation sur lesquelles la minimisation de la fonction « objectif » est effectuée: 30, 40 et 55 heures.

Le Tableau V.4 présente les résultats obtenus pour un coefficient de pondération de 0,5.

Tableau V.4 : Paramètres initiaux et estimés du liant Tradical® PF80.

Paramètres	Initiaux	30 h	40 h	55 h	93 h
p_1	-5	-9,887	-10,290	-10,721	-10,646
p_2	-2	-0,359	-0,228	-0,153	-0,169
p_3	0,8	0,976	0,200	0,024	0,059
$S(T)$	318,7	180,9	214,1	222,6	220,3
$S(W)$	5145,9	2216,8	159,3	32,0	24,9
$S\text{ moyenne}$	2732,3	1198,9	186,7	127,3	122,6

Les tracés des cinétiques de séchage simulées (Figure V.6 et Figure V.7) montrent qu'il est nécessaire de disposer de données expérimentales sur une durée suffisamment longue pour obtenir un modèle représentatif du comportement thermo-hydrique du matériau. En effet, nous avons montré que ce n'est que sur une durée supérieure à 55 heures que les informations fournies par la cinétique de séchage expérimentale dans les conditions aérothermiques de l'essai 5 permet d'estimer correctement le coefficient de transfert en phase liquide tandis que la résistance au transfert en phase vapeur, continue à évoluer avec la durée sur laquelle se paramètre est estimé. Ce résultat se confirme en traçant l'évolution en fonction de la teneur en eau des coefficients de transfert hydrique estimés pour chaque durée d'expérimentation (Figure V.8)

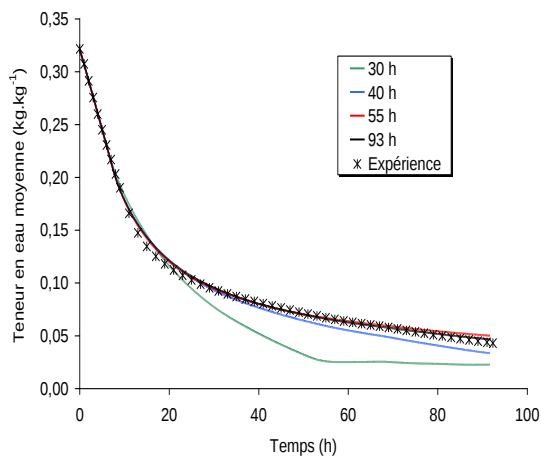


Figure V.6 : Comparaison des teneurs en eau moyennes simulées et expérimentale ($\alpha=0,5$).

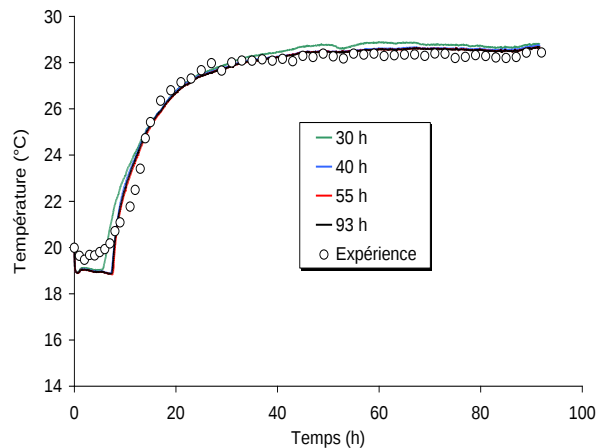


Figure V.7 : Comparaison des températures de surface simulées et expérimentale ($\alpha=0,5$).

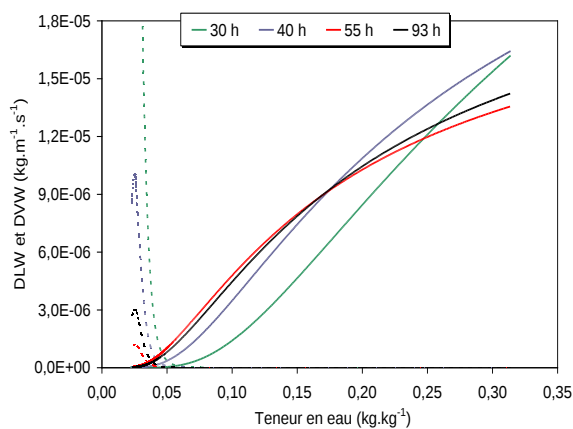
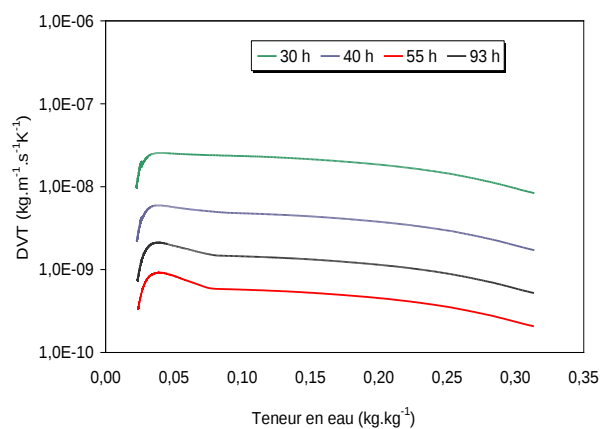


Figure V.8 : Evolution des coefficients de transfert hydrique estimés sur différentes durées de simulation ($\alpha=0,5$).



V.1.1.2 Exploitation du modèle (2) de l'isotherme de désorption

Un nouveau test a été réalisé avec l'expression empirique de la seconde courbe de désorption afin de détecter l'impact de celle-ci sur les paramètres estimés. Le Tableau V.5 donne les valeurs obtenues avec un coefficient de pondération de 0,5.

Tableau V.5 : Paramètres initiaux et estimés du liant (courbe d'activité (2)).

Paramètres	p_1	p_2	p_3	S (T)	S (W)	S moyenne	Nb. d'itérations
Initiaux	-5	-2	0,8	286,2	4208,6	2247,4	-
Estimés	-10,595	-0,176	0,044	222,9	22,4	122,7	28

La confrontation des cinétiques de séchage simulée et expérimentale sur la figure V.9 est comparable aux résultats obtenus précédemment (Figure V.4). Une très bonne concordance est enregistrée entre les teneurs en eau moyennes simulée et expérimentale et un écart d'environ 1°C entre les températures de surface simulée et expérimentale durant la phase de séchage à vitesse constante et la première phase de ralentissement. Cependant, l'effet de l'isotherme de désorption est constaté au niveau des teneurs en eau à l'équilibre, en effet on remarque que la teneur en eau de surface se stabilise à une valeur plus basse que celle de la

précédente simulation, soit $0,008 \text{ kg.kg}^{-1}$. Etant donné que l'équilibre n'est pas atteint lors de l'expérimentation, la validation d'un scénario ou de l'autre n'est pas possible.

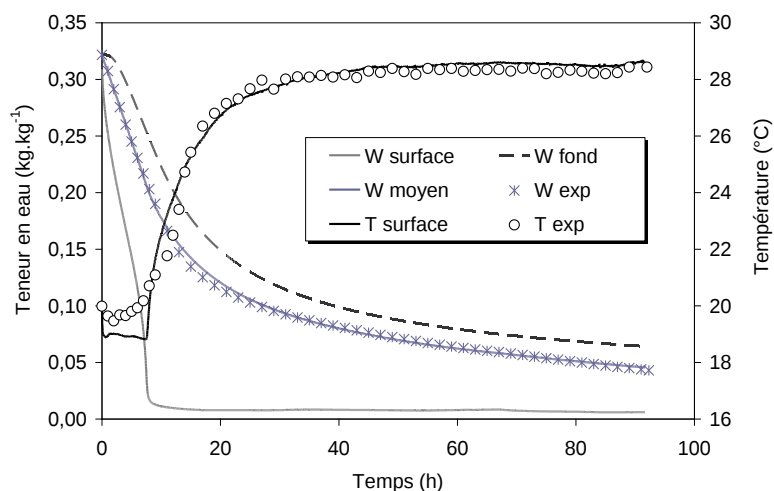


Figure V.9 : Confrontation des cinétiques de séchage expérimentale et simulée (Activité MSF, temps d'estimation de 93 h)

La comparaison des coefficients de transfert hydrique obtenus avec les deux modèles d'activité pour un même coefficient de pondération montre que les coefficients D_l^w sont pratiquement superposés tandis que l'intersection entre les coefficients D_l^w et D_v^w s'est déplacée à une teneur en eau inférieure ($0,025 \text{ kg.kg}^{-1}$), ce qui signifie que le transfert en phase vapeur est encore plus faible quand la seconde courbe de désorption est utilisée.

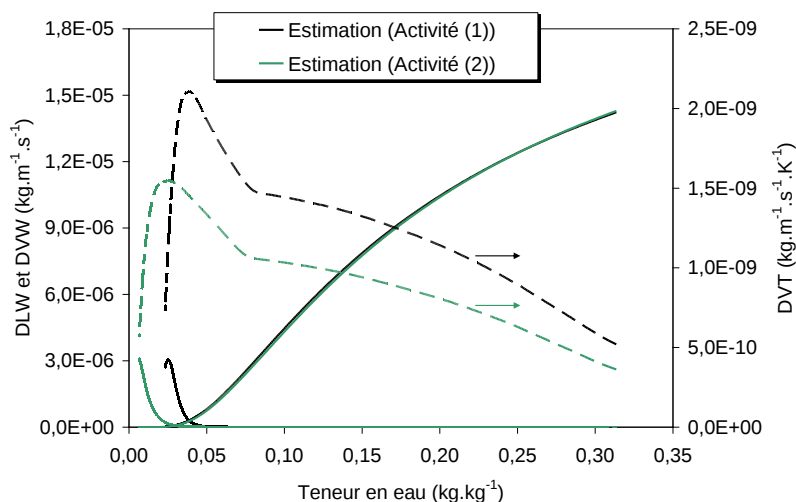


Figure V.10 : Comparaison des coefficients de transfert hydrique estimés avec les deux modèles d'activité.

V.1.1.3 Validation des paramètres estimés

Afin d'évaluer la pertinence des paramètres estimés, des simulations sont réalisées pour des conditions de séchage différentes.

▪ Matériaux séchés après 48 h

Les deux jeux de paramètres précédemment estimés sont utilisés dans les conditions expérimentales de l'essai 6 (Tableau V.3 et Tableau V.5 : $\alpha=0,5$). La Figure V.11 montre que les deux simulations sont identiques. On constate également une bonne reproduction numérique des courbes expérimentales avec uniquement un écart de l'ordre de 2°C entre les températures de surface mesurée et calculée durant la phase isenthalpe. On admet que les deux courbes de désorption et les coefficients de diffusions qui leur correspondent sont adaptés pour prédire correctement les cinétiques du séchage du liant après 48 heures de sa mise en œuvre pour différentes vitesses de séchage.

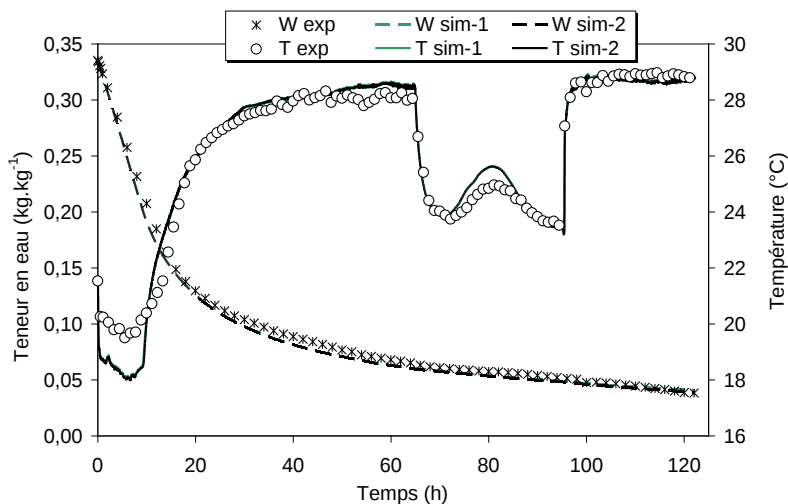


Figure V.11 : Comparaison des cinétiques de séchage simulée et expérimentale (essai 6 : $V_{air} = 1 \text{ m.s}^{-1}$).

Dans la suite de ce travail, seules les simulations effectuées avec la première courbe de désorption sont présentées car, comme nous avons pu le constater, les deux isothermes de désorption donnent des évolutions similaires de la température de surface et de la teneur en eau moyenne.

▪ Matériaux de moins de 48 h

Il s'agit de l'essai 1 pour lequel le séchage a été réalisé juste après la mise en œuvre à une température et une vitesse d'air de $29,3^{\circ}\text{C}$ et $2,6 \text{ m.s}^{-1}$. La confrontation de la simulation à l'expérience sur la Figure V.12 montre une divergence des courbes de teneur en eau au bout des 6 premières heures de séchage. Ce qui correspond au début de la première phase de ralentissement qui est en partie dépendante de l'acheminement de l'eau à travers le réseau poreux. L'écart maximum atteint entre les deux évolutions au cours de cette phase est d'environ $0,07 \text{ kg.kg}^{-1}$. On observe par contre une évolution de la température de surface calculée proche de l'expérience.

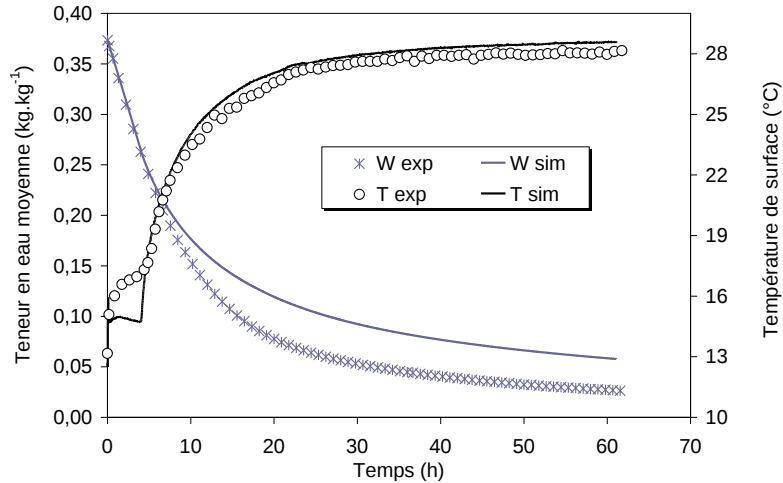


Figure V.12 : Comparaison des cinétiques de séchage simulée et expérimentale (essai 1 : 0 h, $2,6 \text{ m.s}^{-1}$).

Le modèle est maintenant appliqué aux essais 2 et 7, effectués dans des conditions aérothermiques similaires ($2,6 \text{ m.s}^{-1}$ et 30°C) et à l'issue desquels une découpe des éprouvettes avait été réalisée (Chapitre 3). La comparaison présentée sur la Figure V.13 montre également que les coefficients de transfert hydrique précédemment estimés ne sont pas satisfaisants. La confrontation des champs de teneur mesurés et calculés au bout de 6h et 16h de séchage montre qu'on retrouve des profils similaires mais avec des niveaux calculés plus élevés (Figure V.14). Les paramètres du modèle sont donc ré-estimés.

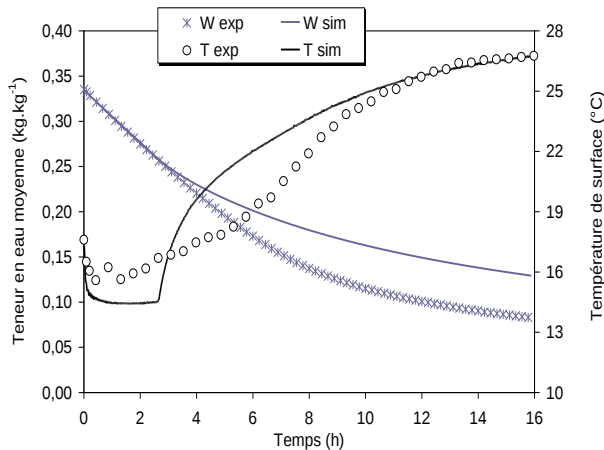


Figure V.13 : Comparaison des températures de surface simulées et expérimentale (essai 2 : 24 h, $2,6 \text{ m.s}^{-1}$).

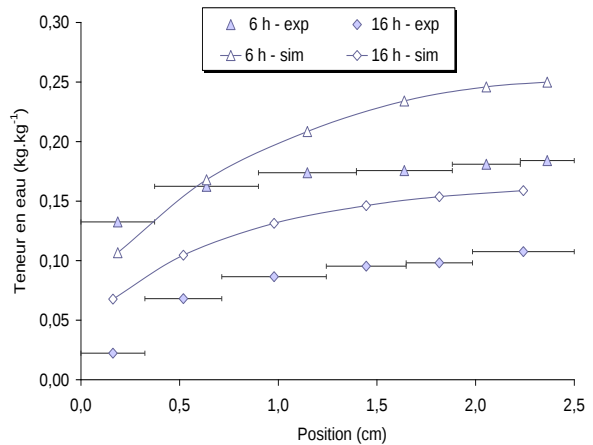


Figure V.14 : Profils des teneurs en eau simulées et expérimentales au bout de 6 et 16 heures de séchage (essai 2 et 7: 24h, $2,6 \text{ m.s}^{-1}$)

V.1.1.4 Estimation des paramètres pour un matériau de moins de 48 h

Le résultat de l'estimation des trois paramètres dans les conditions aérothermiques de l'essai 1 est présenté dans le tableau suivant :

Tableau V.6 : Paramètres initiaux et estimés du liant Tradical®PF80 (essai 1)

Paramètres	$p1$	$p2$	$p3$	S (T)	S (W)	S moyenne	Nb. d'itérations
Initiaux	-5,000	-2,000	0,800	8262,3	592,1	4427,2	-
Estimés	-10,552	-0,146	0,260	169,5	135,6	153,1	30

La confrontation des cinétiques de séchage sur la Figure V.15 montre la concordance des teneurs en eau moyenne et des températures de surface simulées avec l'expérience. En effet les deux teneurs en eau ont des évolutions similaires durant la phase de séchage à vitesse constante, une partie de la phase de ralentissement puis les deux courbes se séparent durant environ 40 heures avec un écart maximum de $0,025 \text{ kg.kg}^{-1}$. Par ailleurs les courbes de teneurs en eau se superposent à nouveau durant la phase de mise en équilibre.

Sur la Figure V.16 sont comparés les coefficients de transfert hydrique estimés à ceux identifiés précédemment avec la même courbe de désorption (1) et le même coefficient de pondération. On peut ainsi considérer que les coefficients de transfert hydrique des liants sont compris entre les deux courbes suivant l'âge et l'état d'hydratation des matériaux.

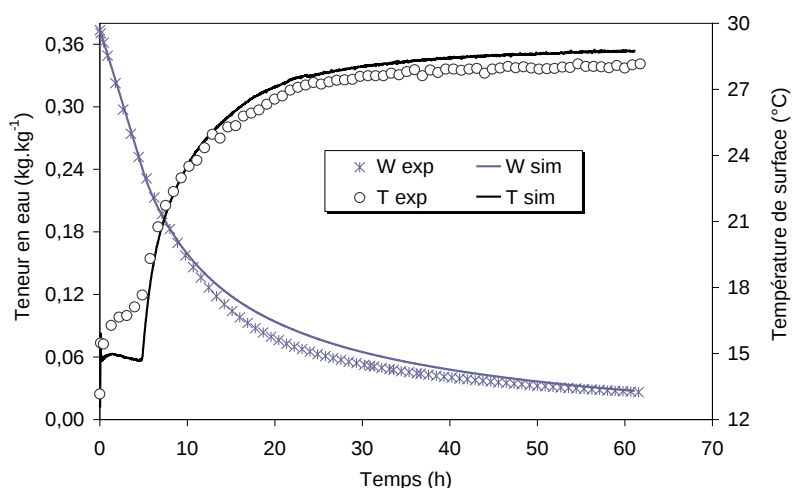


Figure V.15 : confrontation des cinétiques de séchage simulées et expérimentale (essai 1)

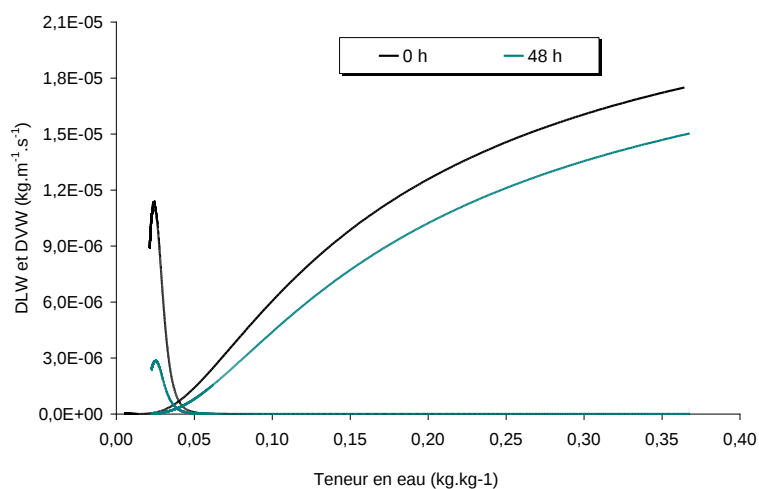


Figure V.16 : comparaison des coefficients de transfert hydrique estimés – matériaux séchés après la mise en œuvre et après 48h.

■ Matériaux de moins de 48 h

En utilisant le nouveau jeu de paramètres, des simulations sont réalisées dans les conditions aérothermiques de l'essai 2 et 7. Dans ce cas, les cinétiques obtenues sont plus proches de l'expérience, Figure V.17. L'examen des profils simulés des teneurs en eau au bout de 6 heures et de 25 h de séchage (Figure V.18) montre qu'on aboutit à des résultats satisfaisants compte tenu des incertitudes expérimentales liées à la découpe et la pesée des échantillons. A cœur du matériau les teneurs en eau calculées sont au dessus de l'expérience cette tendance s'inverse pour la surface.

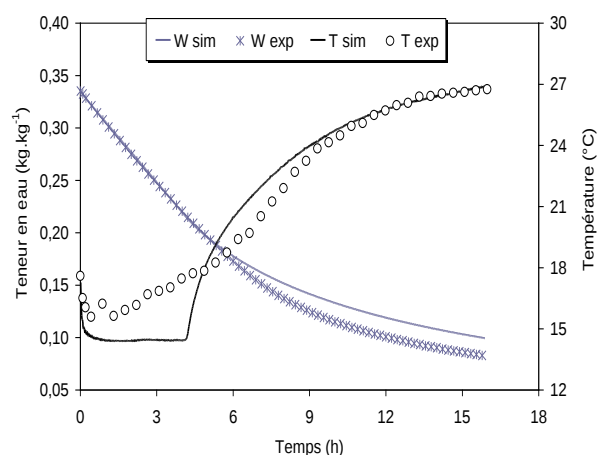


Figure V.17 : confrontation des cinétiques de séchage simulées et expérimentale (essai 2 : 24h, $2,6 \text{ m.s}^{-1}$)

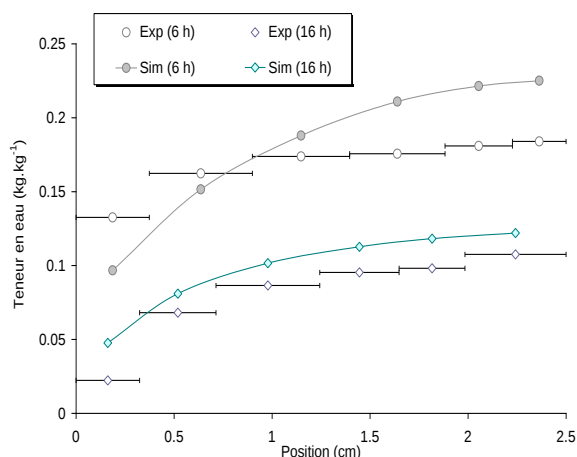


Figure V.18 : profil des teneurs en eau simulées et expérimentale au bout de 6 et 16 heures de séchage (essai 2 et 7)

V.2 Etude des mélanges chanvre / liant

La méthode d'estimation est maintenant appliquée au mélange chanvre / liant. Le Tableau V.7 rassemble les conditions initiales et aérothermiques des essais expérimentaux exploités pour l'estimation des paramètres et l'étude de sensibilité.

Tableau V.7 : Conditions aérothermiques et initiales des simulations (mélange chanvre/liant)

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
	Hr moyenne (%)	29,0	35,6	32,9	25,4	25,4	26,1	24,7
	V _{air} (m.s ⁻¹)	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	2,0	2,6
Conditions initiales	T (°C)	24,4	19	19,0	20,8	20,7	21,9	22,1
	W (kg.kg ⁻¹)	0,692	0,688	0,664	0,679	0,675	0,693	0,679
ρ _s (kg.m ⁻³)		715,2	701,4	723,4	746,8	688,6	730,0	608,0
e (m)		0,0250	0,0263	0,0255	0,0249	0,0405	0,0250	0,0380
Age (h)		0	0	120	120	48	0	0
Matériau		C.T/C	C.C/C	C.T/C	C.C/C	C.C/C	C.C/C	C.C/C

Les propriétés physiques identifiées dans le chapitre II et qui servent comme paramètres d'entrée du modèle sont rassemblées dans le Tableau V.8.

Tableau V.8 : Propriétés physiques du mélange chanvre/liant Tradical® PF80

Matériau	Porosité (-)	Conductivité thermique équivalente ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Chaleur spécifique sèche ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Emissivité (-)
C.C/C	0,65	0,15	1035	0,90
C.C/T	0,65	0,18	1067	0,90

Comme nous avons pu le voir sur la Figure II.12 du chapitre 2, les isothermes de désorption des mélanges C.C/C et C.T/C ont la même allure et sont du même ordre de grandeur quand la teneur en eau est calculée à partir de la masse sèche finale. Nous proposons de tester trois isothermes de désorption lors des simulations. Les deux premières sont obtenues pour un matériau stabilisé de type C.C/C, l'une est calculée à partir de la masse sèche initiale et l'autre à partir de la masse sèche de fin de désorption. La troisième est extraite des travaux de Collet (2004) sur le même type de matériau. (Figure V.19)

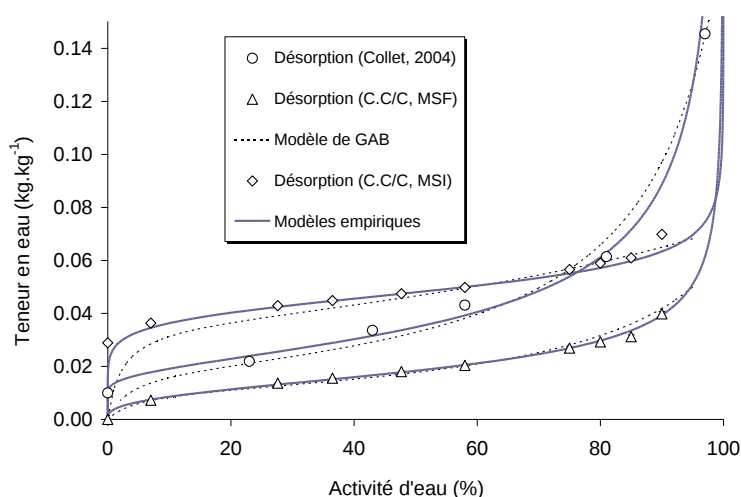


Figure V.19 : Courbes de désorption du mélange chanvre / liant introduites dans le modèle.

Les équations empiriques représentatives des trois isothermes et les valeurs des teneurs en eau hygroscopiques fournies par le modèle de GAB appliqué à chaque courbe sont reportées sur le tableau V.9.

Tableau V.9 : Expressions des isothermes de désorption du mélange chanvre/chaux.

Isotherme de désorption	Modèle empirique	W_{hyg}
(1) : C.C/C MSI	$a_w = \frac{1}{1 + \left(\frac{W}{0,04794} \right)^{(-7,8910)}}$	0,0360
(2) : C.C/C MSF	$a_w = \frac{1}{1 + \left(\frac{W}{0,01834} \right)^{(-2,8764)}}$	0,0110
(3) : C.C/C (Collet, 2004)	$a_w = \exp \left(1,505 \cdot 10^{-3} - \frac{8,402 \cdot 10^{-4}}{W^2} \right)$	0,0188

V.2.1 Etude d'un matériau C.C/C séché 48h après sa mise en œuvre

L'estimation des paramètres est réalisée avec la première courbe de désorption dans les conditions expérimentales de l'essai 5, soit un matériau C.C/C de 4,05 cm d'épaisseur séché 48 h après la mise en œuvre dans les conditions suivantes pour la vitesse et la température de l'air : $1,1 \text{ m.s}^{-1}$ et $29,6^\circ\text{C}$ (Tableau V.7). La température du fond du produit est considérée égale à la température mesurée expérimentalement.

Les résultats des estimations pour un coefficient de pondération de 0,5 sont reportés sur le Tableau V.10.

Tableau V.10 : Paramètres initiaux et estimés du mélange chanvre/liant ($\alpha=0,5$).

Paramètres	$p1$	$p2$	$p3$	S (T)	S (W)	S moyenne	Nb. d'itérations
Initiaux	-5	-2	0,8	819,9	2871,4	1845,7	-
Estimés	-10,652	-0,702	0,415	142,2	28,5	85,2	30

La Figure V.20 présente l'évolution des fonctions « objectif » au cours du processus itératif. Une égalité des contributions de la teneur en eau moyenne et de la température dans la minimisation de la fonction « objectif » est constatée au cours des deux premières itérations. Ce qui permet de réduire considérablement sa valeur moyenne (passant de 1845 à 400). A partir de la 3^{ème} itération, on enregistre une dominance de la contribution de la teneur en eau moyenne accompagnée d'une importante variation des paramètres p_1 , p_2 (Figure V.21). Au delà de la 25^{ème} itération, les trois paramètres commencent à converger vers la solution.

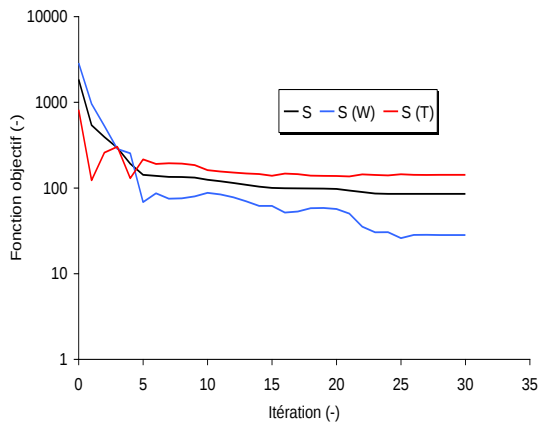


Figure V.20 : Evolution de la fonction « objectif » au cours des itérations ($\alpha=0,5$).

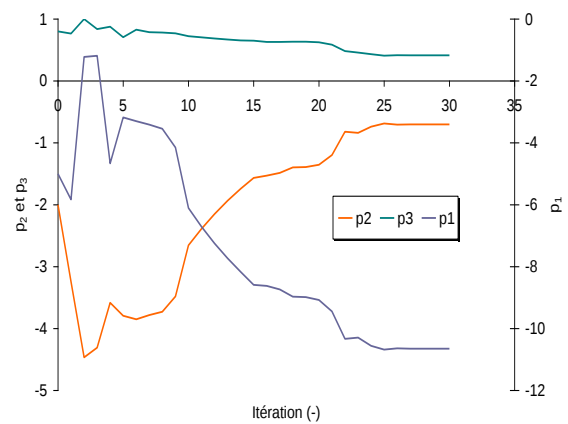


Figure V.21 : Evolution des paramètres estimés au cours des itérations ($\alpha=0,5$).

La Figure V.22 présente une confrontation des réponses expérimentales et simulées. La teneur en eau moyenne est bien reproduite numériquement, l'erreur entre l'expérience et la simulation ne dépasse pas les $0,005 \text{ kg.kg}^{-1}$. On observe également une bonne concordance entre les températures de surface mesurée et simulée au cours de la montée en température et de la mise en équilibre.

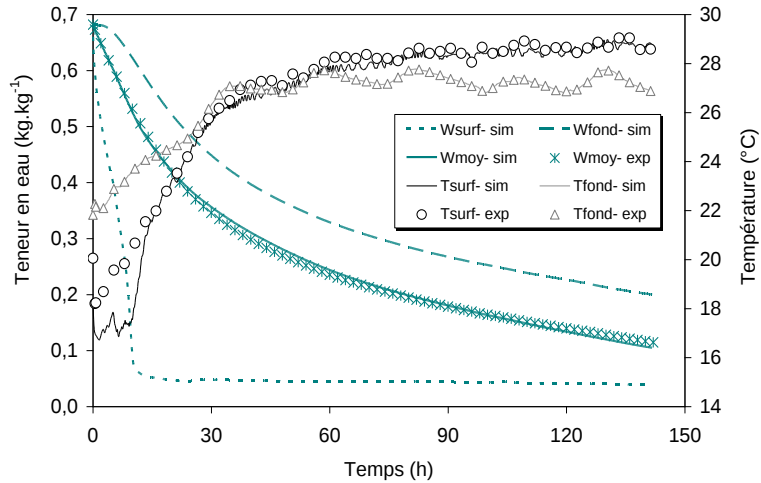


Figure V.22 : Confrontation des cinétiques de séchage expérimentale et simulée (mélange C.C/C).

Le tracé des coefficients de transfert hydrique (Figure V.23) montre l'importance du transfert en phase liquide pour des teneurs en eau supérieures à $0,1 \text{ kg.kg}^{-1}$, ce n'est qu'en dessous de cette valeur que la diffusion en phase vapeur devient prépondérante. Le coefficient de transfert hydrique dû au gradient de température est faible, il est compris entre $1,1 \cdot 10^{-8}$ et $4 \cdot 10^{-9} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

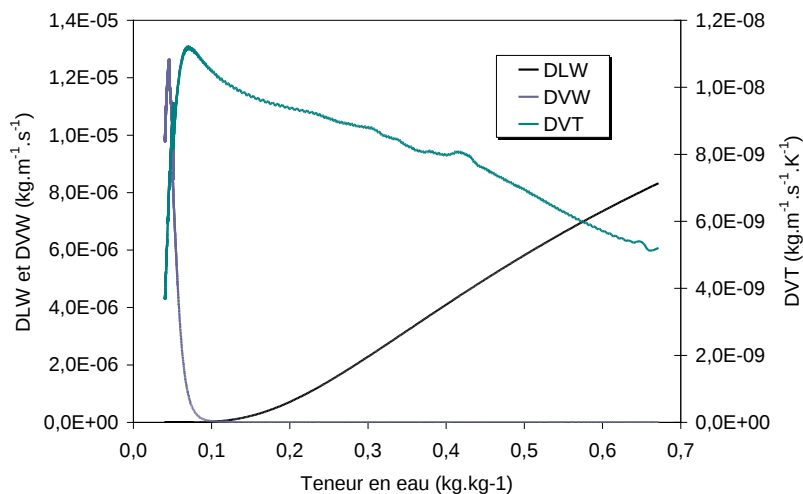


Figure V.23 : Coefficients du transfert hydrique estimés du mélange C.C/C (essai 5).

V.2.2 Influence de l'isotherme de désorption

D'autres estimations sont réalisées dans les conditions expérimentales de l'essai 5 en remplaçant la courbe de désorption (1) par les courbes (2) et (3).

Les résultats avec une pondération de 0,5 sont reportés sur le *Tableau V.11*. On aboutit à des jeux de paramètres très proches et qui diffèrent peu de l'estimation précédente.

Tableau V.11 : Paramètres initiaux et estimés du mélange chanvre / liant (courbe d'activité (2) et (3)).

Paramètres	$p1$	$p2$	$p3$	S (T)	S (W)	S moyenne	Nb. d'itérations
Dés. (2)	-10,710	-0,651	0,407	149,5	29,8	89,6	26
Dés. (3)	-10,700	-0,666	0,402	150,2	25,3	87,7	33

La Figure V.24 montre que les coefficients en phase liquide sont pratiquement invariables d'une estimation à l'autre, contrairement aux coefficients de transfert en phase vapeur dont l'allure change avec l'allure de la dérivée de l'activité par rapport à la teneur en eau. Cette différence des coefficients de transfert en phase vapeur a peu d'influence sur les cinétiques. Des différences pourraient également apparaître au niveau des teneurs en eau d'équilibre, information fournie par la courbe d'activité.

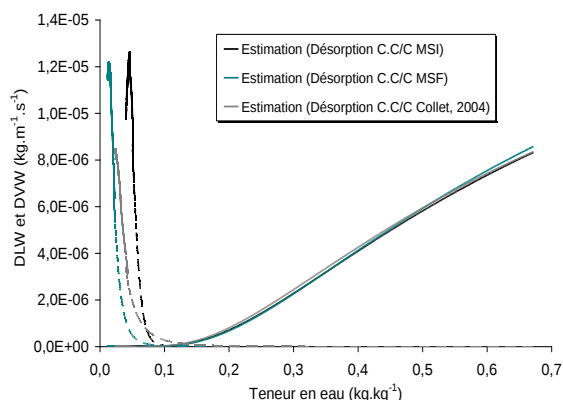


Figure V.24 : Evolution de la fonction objectif au cours des itérations ($\alpha=0,5$.)

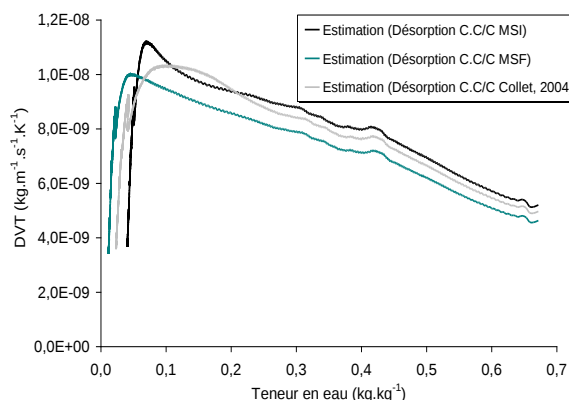


Figure V.25 : Evolution des paramètres estimés au cours des itérations ($\alpha=0,5$).

V.2.3 Application des paramètres estimés à des essais dans des conditions expérimentales différentes

Les confrontations des cinétiques de séchage simulées et expérimentales des matériaux C.C/C (Figure V.26, Figure V.27, Figure V.28 et Figure V.29) montrent que les coefficients de transfert hydrique estimés permettent de décrire correctement l'évolution de la teneur en eau et de la température de surface des matériaux dans les conditions des expériences.

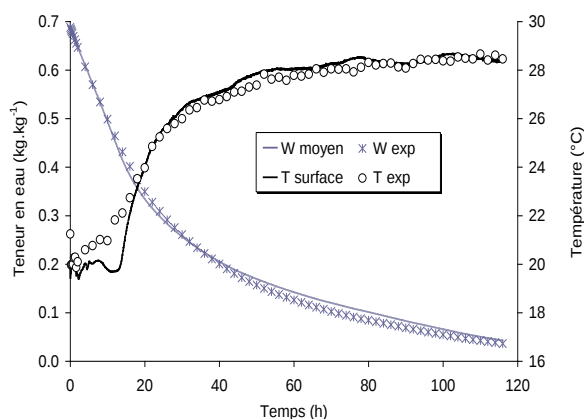


Figure V.26 : Comparaison des cinétiques de séchage simulée et expérimentale (essai 2 : C.C/C, 0 h, 2,6 cm, 1,2 m.s^{-1}).

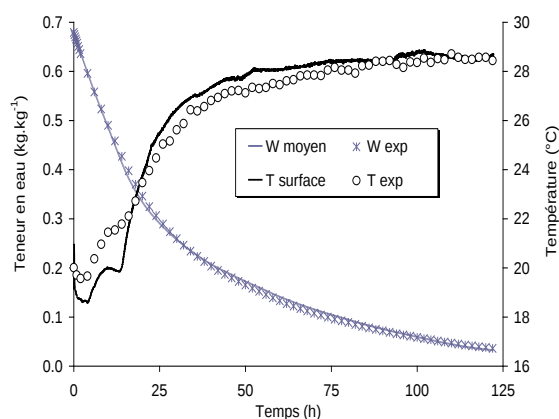


Figure V.27 : Comparaison des cinétiques de séchage simulée et expérimentale (essai 4 : C.C/C, 120 h, 2,5 cm, 1,1 m.s^{-1}).

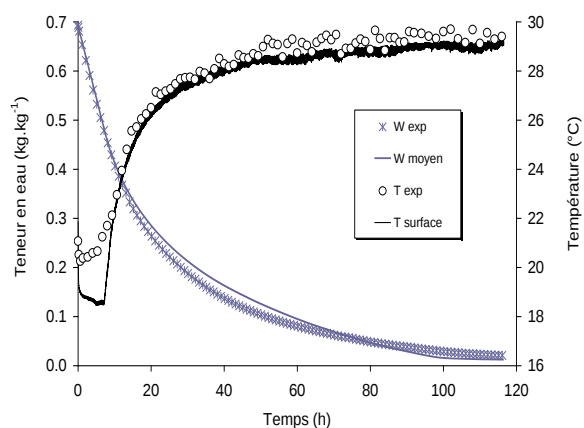


Figure V.28 : Comparaison des cinétiques de séchage simulée et expérimentale (essai 6 : C.C/C, 0 h, 2,5 cm, 2 m.s⁻¹).

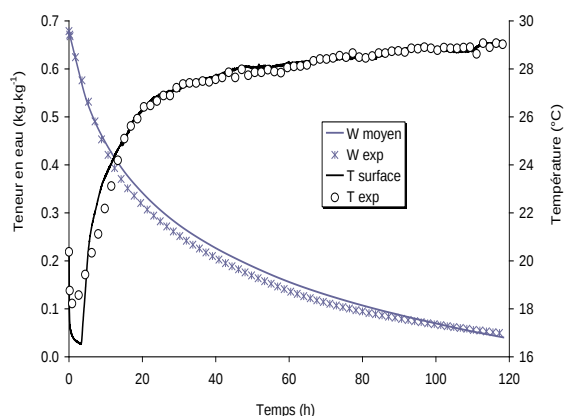


Figure V.29 : Comparaison des cinétiques de séchage simulée et expérimentale (essai 7 : C.C/C, 0 h, 3,8 cm, 2,6 m.s⁻¹).

Les profils des teneurs en eau calculés et mesurés au bout de 14 h et 26 h de séchage sont confrontés (Figure V.32 et Figure V.33). Le premier essai est réalisé sur un échantillon de C.C/C d'une épaisseur de 3,8 cm séché immédiatement après sa mise en œuvre avec une vitesse d'air de 1 m.s⁻¹ (Figure V.30). Le second essai correspond au séchage à une vitesse d'air de 2 m.s⁻¹ d'un matériau de 3,93 cm d'épaisseur 24 heures après la mise en œuvre (Figure V.31). Globalement, et dans les deux cas, on observe que le gradient de teneur en eau est plus important dans le cas de la simulation que lors des mesures. Ce résultat est fortement conditionné par les incertitudes liées à la détermination expérimentale des teneurs en eau dans le produit.

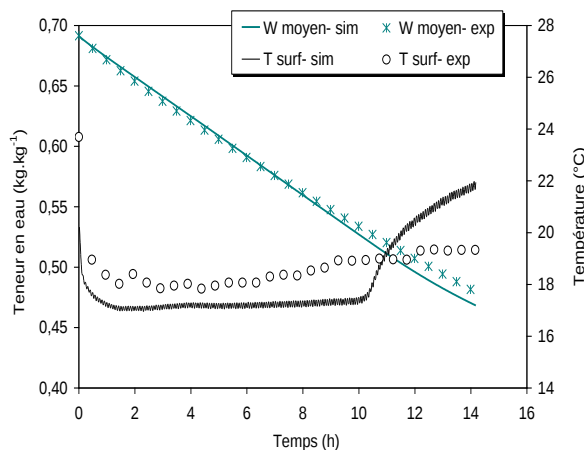


Figure V.30 : Confrontation expérience et simulation (essai 8: C.C/C 0h, 1 m.s⁻¹, 29,4°C).

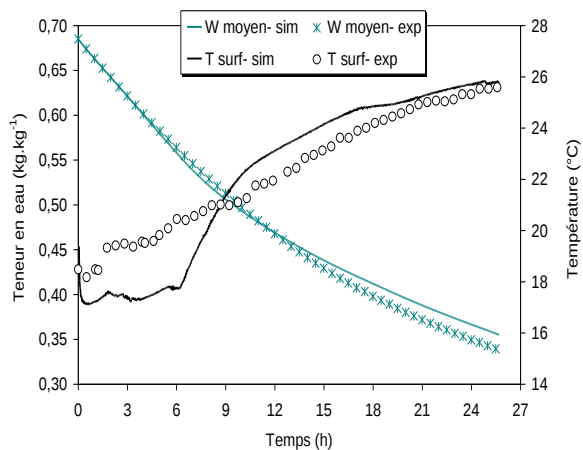


Figure V.31 : Confrontation expérience et simulation (essai 9: C.C/C 24h, 2 m.s⁻¹, 29,4°C).

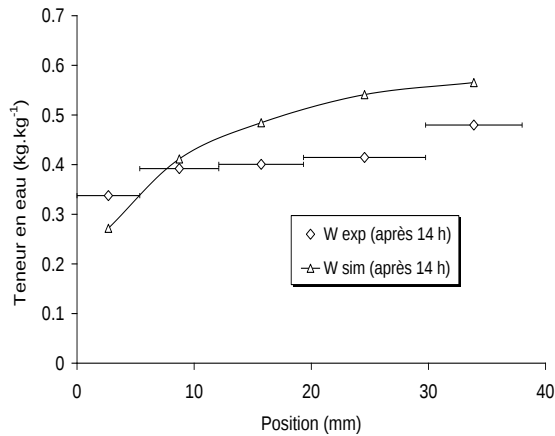


Figure V.32 : Profil des teneurs en eau simulées et expérimentales au bout de 14 h de séchage (essai 8: C.C/C 0h, 1 m.s⁻¹, 29,4°C).

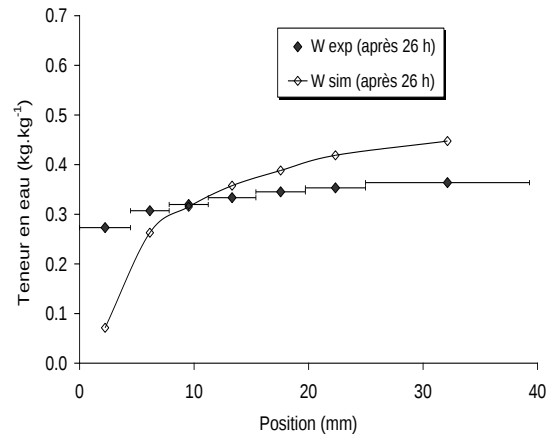


Figure V.33 : Profil des teneurs en eau simulées et expérimentales au bout de 26 h de séchage (essai 9: C.C/C 24h, 2 m.s⁻¹, 29,4°C).

Les Figure V.34 et Figure V.35 correspondent aux simulations des cinétiques de séchage des matériaux à base de granulat de Terrachanvre C.T/C séchés respectivement 0 h et 120 h après mise en œuvre dans les conditions expérimentales des essais 1 et 3. On remarque une bonne présentation de la teneur en eau durant la phase de séchage à vitesse constante et lors de la première phase de ralentissement. Les courbes de teneur en eau simulée et expérimentale ainsi que celles des températures de surface se séparent durant la seconde phase de ralentissement puis elles se rejoignent à nouveau durant la phase de mise en équilibre hygroscopique. Ceci est probablement dû à une sous-estimation du coefficient de transfert en phase liquide.

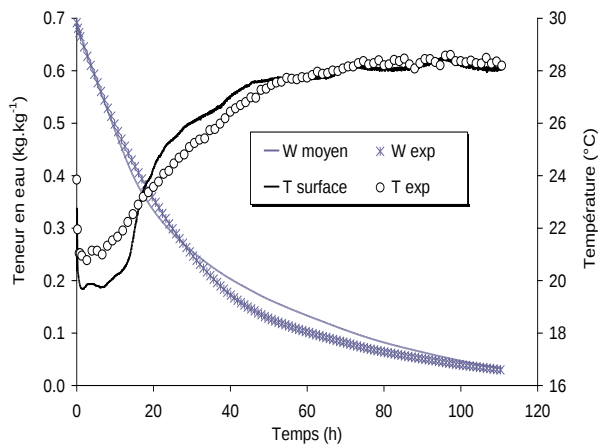


Figure V.34 : Comparaison des cinétiques de séchage simulée et expérimentale (essai 1 : C.T/C, 0 h, 2,5 cm, 1,2 m.s⁻¹).

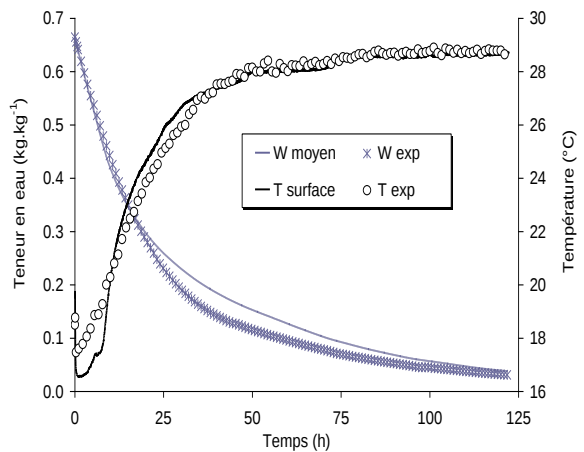


Figure V.35 : Comparaison des cinétiques de séchage simulée et expérimentale (essai 3 : C.T/C, 120 h, 2,5 cm, 1,2 m.s⁻¹).

V.3 Sensibilité du modèle aux paramètres d'entrée

L'étude de sensibilité du modèle aux paramètres d'entrée est réalisée sur un cas de séchage d'un matériau C.C/C. La simulation de référence présentée par la Figure V.36 correspond à un essai dans les conditions aérothermiques et initiales données dans le Tableau V.12 en appliquant une condition adiabatique à l'interface creuset / produit.

Tableau V.12 : Conditions aérothermiques et initiales des simulations numériques

Conditions aérothermiques	$T_{\text{air}} (^{\circ}\text{C})$	30
	Hr (%)	30
	$h_c (\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1})$	25
Conditions initiales	$T (^{\circ}\text{C})$	20
	$W (\text{kg.kg}^{-1})$	0,69
$\rho_s (\text{kg.m}^{-3})$		700
$e (\text{m})$		0,04

Dans un premier temps, nous proposons d'étudier la sensibilité de la température et de la teneur en eau du produit aux variations des coefficients de transfert hydrique estimés. Nous étudions également l'impact des conditions de séchage telles que la température, l'humidité et la vitesse d'air et les propriétés du matériau (conductivité thermique effective et masse volumique sèche) sur ces variables. L'étude est réalisée en appliquant une augmentation de 10% sur les coefficients de transfert hydrique, les conditions de séchage et les propriétés physiques à l'exception de la température et de l'humidité de l'air où les variations respectives sont 1°C et 5%.

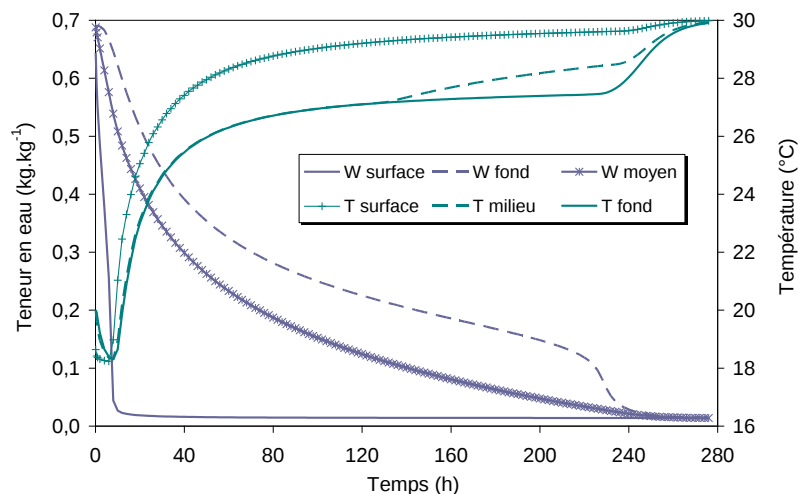


Figure V.36 : Cinétique de séchage de référence d'un matériau C.C/C.

V.3.1 Coefficients de transferts hydriques

La Figure V.37 présente l'évolution de l'écart entre la température de surface et la température de référence pour différentes variations des coefficients de transfert hydrique. On remarque que la sensibilité de la température de surface due à l'augmentation de 10% du coefficient D_l^W est importante au cours des deux phases de ralentissement avec un maximum absolu d'environ 0,8°C. L'effet du coefficient D_v^W est moins important, une augmentation de 10% de celui-ci implique une diminution d'environ 0,1°C de la température de surface. L'augmentation de 10% du coefficient D_v^T a très peu d'influence en la comparant aux autres coefficients ; cependant, en négligeant ce paramètre, la température de surface engendre une variation du même ordre de grandeur que celle provoquée par l'augmentation de 10% du

coefficient D_v^w . La négligence des deux coefficients au même temps engendre une augmentation importante de la température de surface, elle avoisine les 1°C au cours de la première phase de ralentissement et un ralentissement considérable du séchage du produit. La sensibilité de la teneur en eau aux coefficients D_l^w et D_v^w reste du même ordre de grandeur, l'effet du premier coefficient est plus important au cours des deux phases de ralentissement, quant au second coefficient, il est dominant dans le domaine hygroscopique (Figure V.38). L'augmentation de 10% du coefficient D_v^T est sans effet sur la teneur en eau.

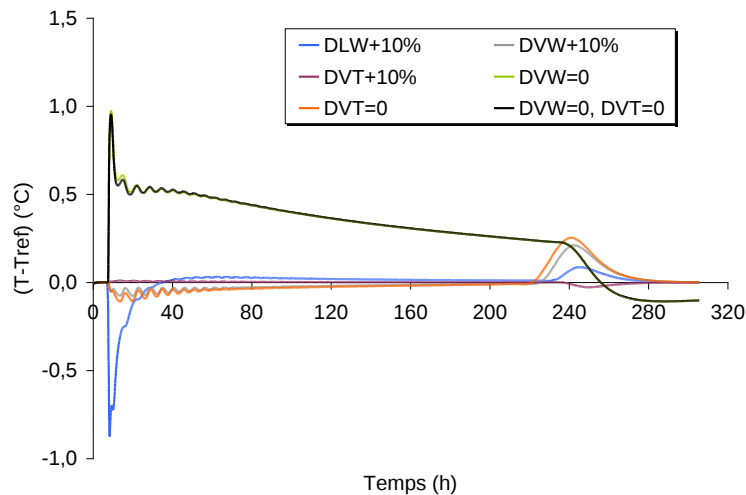


Figure V.37 : Sensibilité de la température de surface aux variations des coefficients de transfert hydrique.

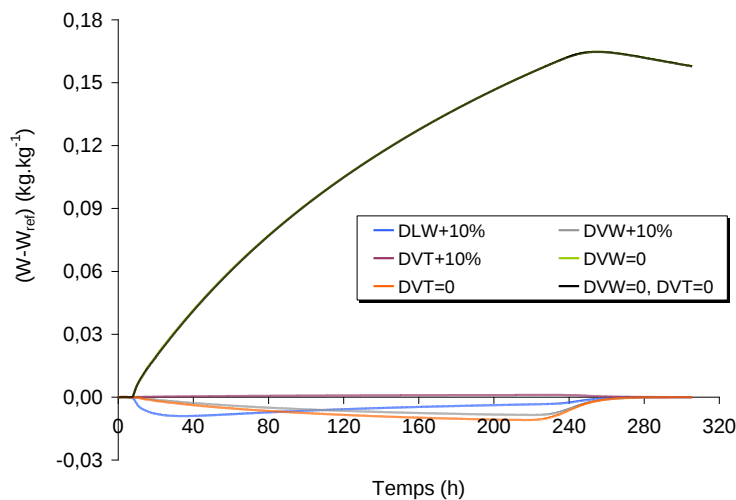


Figure V.38 : Sensibilité de la teneur en eau moyenne aux variations des coefficients de transfert hydrique.

V.3.2 Impact des conditions de séchage, de la masse volumique et de la conductivité thermique

La Figure V.39 présente l'évolution au cours du temps des écarts de température de surface engendrés par les variations des conditions aérothermiques et la masse volumique et la conductivité thermique du produit. On remarque qu'au cours de la première phase de séchage,

la température de surface est principalement influencée par les conditions de séchage. L'augmentation de 5% de l'humidité de l'air fait augmenter de 1°C la température de surface, alors qu'une erreur de 1°C sur la température d'air implique une augmentation de 0,7°C environ de la température de surface. L'impact du coefficient d'échange par convection durant cette période est faible, l'augmentation de 10% de ce dernier fait diminuer la température de la phase isenthalpe de 0,07°C. Un effet similaire mais dans le sens opposé est enregistré avec le coefficient de transfert par rayonnement, l'augmentation de 10% de ce dernier implique une augmentation de la température de surface de 0,07°C environ.

Durant la première phase de ralentissement, la température de surface enregistre une sensibilité importante à l'augmentation de 10% du coefficient h_c , elle se manifeste sous forme d'un pic d'une amplitude de 1,45°C environ. Le même comportement est enregistré avec le coefficient h_r avec une amplitude beaucoup moins importante. Quant à l'humidité de l'air et la masse volumique, un effet inverse est observé, en effet une augmentation de 5% de l'humidité de l'air engendre une diminution de la température de surface de 0,70°C maximum et l'augmentation de 10% de la masse volumique sèche implique une diminution plus importante de la température de surface (l'écart absolu maximal de 0,95°C). L'augmentation de la température de l'air de 1°C produit une augmentation de 1°C de la température de surface. Au cours de la deuxième phase de ralentissement et de la phase de mise en équilibre, l'effet des paramètres se réduit considérablement au cours du temps sauf pour la température d'air.

La teneur en eau moyenne réagit d'une manière différente aux variations des paramètres d'entrée (Figure V.40). La sensibilité la plus importante est enregistrée avec la masse volumique sèche, en effet, une augmentation de 10% de cette dernière engendre un écart important de la teneur en eau qui évolue au cours du séchage pour atteindre son maximum durant la deuxième phase de ralentissement (soit 0,015 kg.kg⁻¹) et se stabiliser aux alentours de cette valeur par la suite. L'augmentation de 5% de l'humidité de l'air implique un séchage moins rapide du matériau et donc un écart important entre les deux teneurs en eau tout au long des phases de séchage avec un maximum de 0,013 kg.kg⁻¹. La température de surface a un effet inverse sur la teneur en eau, en l'augmentant, le matériau sèche plus vite et la teneur en eau chute plus rapidement que la référence. L'effet du coefficient de transfert par convection est beaucoup plus marquant au cours des premières phases de séchage avec un maximum d'environ 0,011 kg.kg⁻¹ enregistré au cours de la phase de ralentissement. Les sensibilités enregistrées avec le coefficient de transfert par rayonnement et la conductivité thermique restent les moins importantes, elle n'excède pas 0,002 kg.kg⁻¹ pour les deux paramètres.

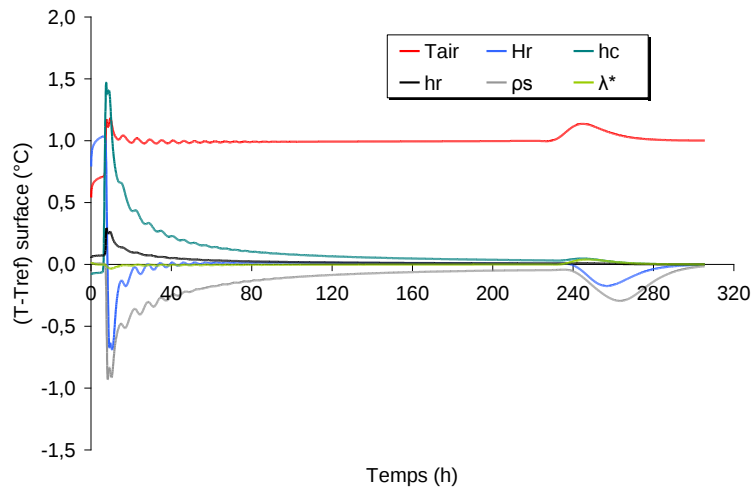


Figure V.39 : Sensibilité de la température de surface aux variations des conditions de séchage et des propriétés physiques du matériau.

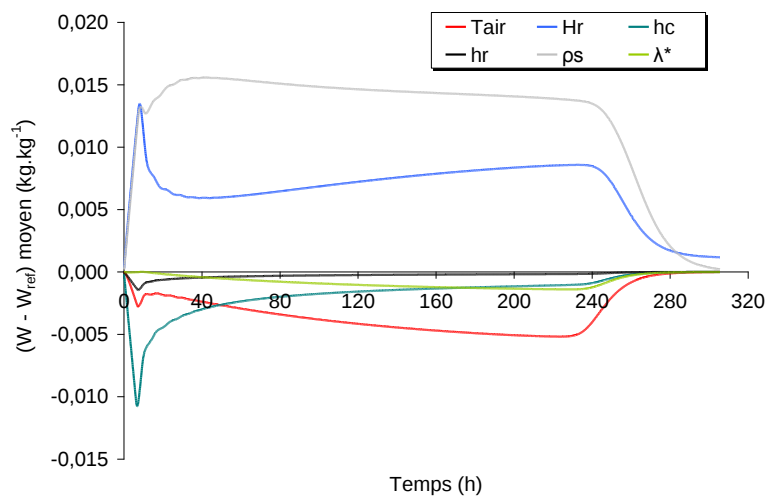


Figure V.40 : Sensibilité de la teneur en eau moyenne aux variations des conditions de séchage et des propriétés physiques du matériau.

V.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude numérique des cinétiques de séchage des matériaux chanvre/ chaux. Le modèle et la procédure d'estimation développés dans le chapitre IV ont été exploités pour estimer les coefficients de transfert hydrique du liant et des mélanges chanvre /chaux. Il ressort de ces résultats que l'exploitation de quelques expériences de séchage permet de déterminer les variations des coefficients de transfert hydrique du liant et des mélanges chanvre/liant en fonction de la teneur en eau et de la température. Nous avons montré, dans le cas du liant l'effet de l'âge des matériaux sur les coefficients de transfert hydrique estimés, phénomène probablement lié au développement de la microstructure des matériaux aux cours des premières heures de fabrication. La même procédure d'estimation a été appliquée avec succès aux mélanges chanvre /chaux. La confrontation des résultats expérimentaux avec les simulations a permis de valider le modèle pour différentes conditions

expérimentales, différents types de granulats de chanvre et également différents âges des matériaux.

L'analyse des sensibilités a mis en avant l'importance de bien évaluer le coefficient de transfert par convection, la masse volumique sèche et les conditions de séchage telles que la température et l'humidité l'air et également de bien estimer les coefficients D_l^w et D_v^w pour décrire correctement le comportement thermohydrique du produit.