

**Etude théorique des transferts internes et de
la mécanique du séchage d'une planche
soumise à des conditions oscillantes**

L'activation de la mécanosorption par les conduites oscillantes vise à relaxer les contraintes de séchage à l'intérieur des planches. Pourtant, l'ampleur de l'activation mécanosorptive est hétérogène dans l'épaisseur de la planche. Elle diminue de la surface vers le cœur en raison de l'effet d'amortissement dû à la diffusion. Pour mieux comprendre l'évolution de ce champ, il est essentiel de comprendre d'abord les variations de l'humidité dans l'épaisseur de la planche soumise aux conditions oscillantes.

Cette atténuation est influencée par les caractéristiques physiques du matériau, particulièrement les caractéristiques liées à la diffusion, et par les conditions aux limites. L'évolution du champ d'humidité dans l'épaisseur dépendra aussi de l'amplitude et de la fréquence des oscillations des conditions climatiques dans le séchoir, paramètres qui peuvent être choisis par l'opérateur, dans la limite des possibilités techniques.

Dans un premier temps, ce chapitre vise à analyser l'évolution des oscillations d'humidité dans l'épaisseur de la planche. Deux approches ont été explorées pour cette étude : d'abord une approche analytique simplifiée de la migration diffusive sous conduite oscillante et ensuite une approche numérique avec l'aide de l'outil *TransPore* dans sa version 1D, capable de considérer l'intégralité des transferts couplés de masse et de chaleur au cours du séchage. Dans un deuxième temps, ce chapitre présente une approche numérique du comportement mécanique en conduite oscillante. Pour cela, le module mécanique de la version 1D du code *TransPore* a été utilisé.

3.1. Approche analytique simplifiée des transferts de masse dans l'épaisseur de la planche

Cette partie est consacrée à l'étude des transferts d'humidité dans l'épaisseur de la planche par un modèle analytique. Sous des conditions oscillantes de température et ou d'humidité relative de l'air, l'humidité dans l'épaisseur de la planche alterne des phases d'adsorption et de désorption. En raison de la résistance aux transferts de masse et de chaleur entre l'air et le bois et aussi à l'intérieur de bois, l'amplitude des oscillations de la teneur en eau décroît progressivement de la surface d'échange vers le cœur de la planche. Ainsi, l'amplitude est-elle plus élevée à la périphérie de la planche que dans les couches plus profondes. Pour étudier l'évolution de l'amplitude des oscillations de la teneur en eau dans la section de la planche, nous avons utilisé une approche analytique simplifiée de la diffusion de l'humidité dans le matériau.

3.1.1. Modèle de migration diffusive sous conduite oscillante

Dans cette approche analytique, on considère uniquement les transferts dans le domaine hygroscopique selon une seule dimension afin de simplifier les calculs. Dans les séchoirs, les planches sont empilées côte à côte, les transferts sont ainsi prépondérants dans l'épaisseur des planches car leurs deux faces sont exposées au courant d'air. En conséquence, la dimension prise en compte par notre approche analytique est l'épaisseur de la planche. Aussi, le coefficient de diffusion massique

est-il supposé indépendant de la teneur en eau et de la température. Dans ces conditions, l'équation de conservation de la masse donne :

$$\frac{\partial U_{(x,t)}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 U_{(x,t)}}{\partial x^2} \quad (3.1)$$

$$U_{(x,t)} = X_{(x,t)} - \bar{X}_{eq} \quad (3.2)$$

où x est la distance à la surface (m), t est le temps (s), $X_{(x,t)}$ est la teneur en eau pour un x donné à un instant t , X_{eq} est la teneur en eau d'équilibre moyenne et D le coefficient de diffusion massique ($m^2.s^{-1}$). Pour obtenir une solution unique, l'équation 3.1 doit être assortie de conditions aux limites et de conditions initiales. Pour obtenir une solution analytique simple, les conditions aux limites choisies supposent que la résistance aux transferts dans la couche limite est négligeable. Les conditions oscillantes imposées à l'air sont donc directement appliquées à la surface du bois (conditions de Dirichlet). Par ailleurs, la teneur en eau initiale est égale à la teneur en eau à l'équilibre :

$$U_{(0,t)} = A \cos(\omega \cdot t) \quad (3.3)$$

$$U_{(x,0)} = 0 \quad (3.4)$$

Pour résoudre cette équation de manière analytique, on considère les hypothèses suivantes :

- La température est supposée homogène à l'intérieur du matériau et égale à la température ambiante.
- Le coefficient de diffusion est indépendant à la fois de la teneur en eau et de la température.
- La planche est supposée être un milieu semi – infini.
- La solution est obtenue au régime établi (la mise en régime transitoire n'est pas traitée)

Les variations sinusoïdales de la teneur en eau invitent à passer en notation complexe. En utilisant la technique classique de séparation des variables pour résoudre l'équation de conservation de la masse (Crank, 1975), on obtient :

$$U_{(x,t)} = \Delta X_{\max(x=0)} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{\tau D}} x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} t - \sqrt{\frac{\pi}{\tau D}} x\right) \quad (3.5)$$

où $\Delta X_{\max(x=0)}$ est l'amplitude de crête à crête de la variation de la teneur en eau à la surface, et τ est la période (s).

Cette solution n'est pas valide pour des temps courts car on suppose que le matériau suit un régime périodique stationnaire. Donc, dans notre cas, cette solution est applicable en fin de séchage quand la planche s'approche de la teneur en eau d'équilibre.

La diffusion massique doit être choisie en fonction de l'essence et du débit de la planche mais aussi en fonction de la température et de la teneur en eau d'équilibre en fin de séchage. Pour estimer la valeur du coefficient de diffusion, dans ces conditions, une loi d'Arrhenius est utilisée (Siau 1984) :

$$D(T_K, X) = \exp\left(a - \frac{b}{T_K} + c \cdot X\right) \quad (3.6)$$

où T_k est la température (K), X est la teneur en eau, a est une constante dépendant de la morphologie du bois, $b = 4300$, et $c = 9,8$.

La constante a dépend de l'essence et du débit. Selon les valeurs moyennes de coefficient de diffusion identifiées par Kouchadé (2004) pour le bois de hêtre a est égale à $-9,996$ pour la direction tangentielle et $-9,59$ pour la direction radiale.

A partir de ce modèle analytique, nous avons tracé des courbes représentant ΔX_{\max} en fonction du temps à la surface ($x = 0$) et pour une couche plus profonde ($x = 4 \text{ mm}$) (Figure 3.1). On constate clairement que ΔX chute fortement lorsque l'on s'éloigne de la surface d'échange. On remarque également un déphasage entre les courbes.

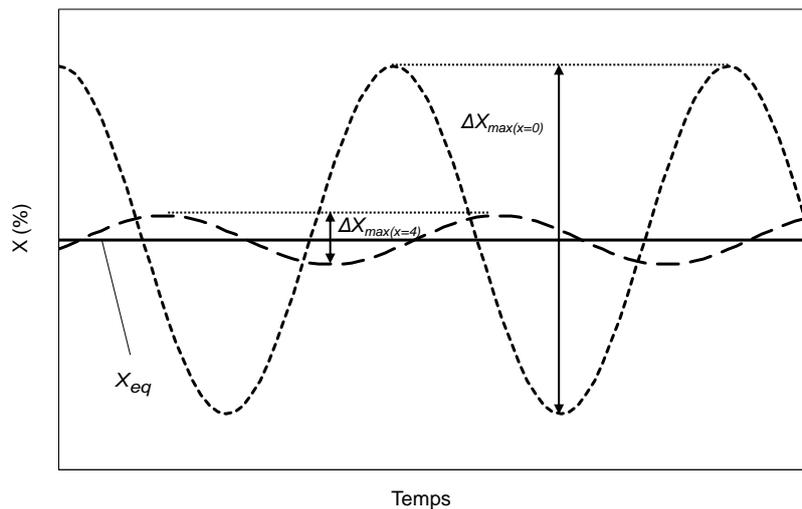


Figure 3.1. Schéma de l'évolution sinusoïdale de la teneur en eau pour $x = 0$ (surface) et $x = 4 \text{ mm}$.

3.1.2. Effet de la période et du coefficient de diffusion

Le modèle analytique a été utilisé pour étudier l'effet de la période des conditions climatiques sur les variations de teneur en eau. Ainsi, le calcul a-t-il été fait pour une planche de hêtre débitée sur dosse, séchée en conduite oscillante à 60°C de température sèche, pour 10% de teneur en eau d'équilibre et $\Delta X_{\max(x=0)}$ égal à 1%. Dans ces conditions, et d'après l'équation 3.6 on estime que le coefficient de diffusion D est égal à $4,52 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, la valeur considérée de a étant $-9,59$. Afin de mieux visualiser l'atténuation de l'intensité des oscillations dans l'épaisseur de la planche, nous avons calculé un ΔX adimensionnel, noté ΔX^* , ainsi :

$$\Delta X^* = \frac{\Delta X_{\max(x)}}{\Delta X_{\max(x=0)}} \tag{3.7}$$

Selon ce rapport, ΔX^* à la surface ($x = 0$) est toujours égal à 1. L'utilisation de ΔX^* permet aussi de supprimer l'effet de l'amplitude ($\Delta X_{\max(x=0)}$). Dans notre cas, il était question d'étudier l'effet de la période dans les conditions précisées dans le paragraphe précédent. La Figure 3.2 décrit ΔX^* en

fonction de la demi épaisseur de la planche pour différentes périodes. On observe que seule la partie périphérique de la planche est affectée par les oscillations avec une diminution exponentielle de l'intensité de ΔX^* (voir équation 3.5). Cette réduction de ΔX^* est très forte pour de courtes périodes. Notamment, une période de 1 heure n'affecte que les trois premiers millimètres de l'épaisseur de la planche, alors qu'une période de 12 heures affecte la planche jusqu'à une profondeur de presque 10 mm à partir de la surface. La Figure 3.2 montre en particulier l'atténuation des oscillations pour différentes périodes et épaisseurs. Ainsi, selon cette figure, plus la période est longue plus profondes seront les couches affectées par l'oscillation de teneur en eau. Cette information se révèle très utile puisque les oscillations de teneur en eau sont l'élément activant le fluage mécanosorptif du matériau sous contrainte.

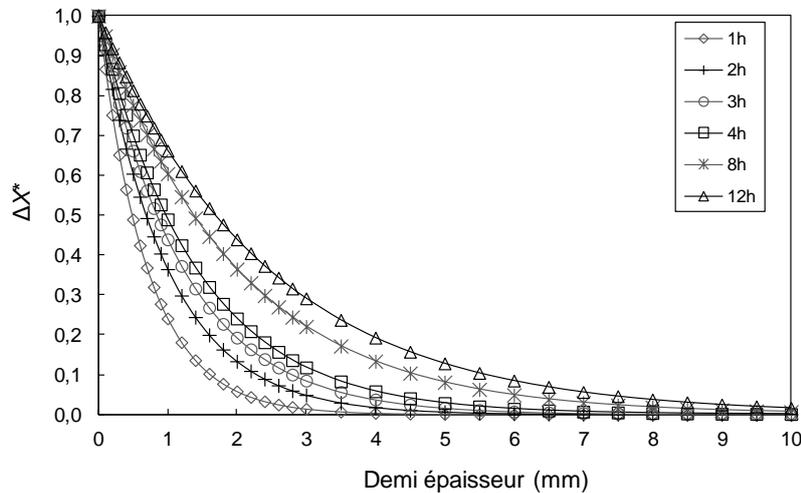


Figure 3.2. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi épaisseur de la planche pour une teneur en eau d'équilibre de 10% et plusieurs périodes. [60°C, ΔX_{eq} 1%, $D=4,52 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

L'atténuation des oscillations, obtenue à partir de l'équation 3.5, est également affectée par le coefficient de diffusion. La Figure 3.3 illustre la dépendance du coefficient de diffusion avec la température et la teneur en eau dans le domaine hygroscopique (équation 3.6). Le coefficient augmente de façon exponentielle avec la température et la teneur en eau. Le cumul de ces effets explique les fortes valeurs de la diffusivité avec des teneurs en eau élevées proches du PSF.

Pour étudier l'effet de l'activation de la diffusion sur les variations de teneur en eau, nous avons fait un second calcul dans les mêmes conditions que celles précisées dans le premier paragraphe de cette section à l'exception de la teneur en eau d'équilibre, désormais de 5% au lieu de 10%, situation pouvant être rencontrée dans les conduites de séchage en fin de cycle. Le coefficient de diffusion est plus faible, estimé à $2,77 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, la résistante au transfert interne est donc plus importante. Ce second calcul a été effectué pour deux périodes contrastées, soit 1 heure et 12 heures, dans le but d'analyser l'effet combiné de la période et du coefficient de diffusion. Tel qu'illustré dans la Figure 3.4 l'atténuation des oscillations est évidemment plus prononcée pour la teneur en eau d'équilibre plus faible, soit 5%. Nous remarquons également que l'effet de cette hydroactivation de la diffusion s'exprime davantage pour des périodes longues.

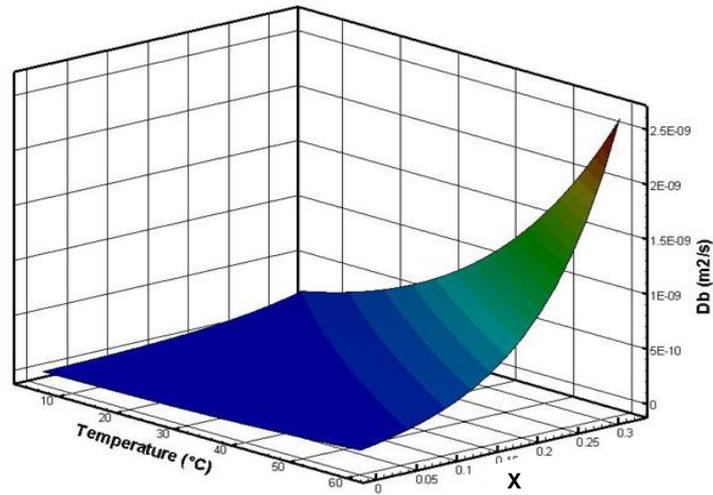


Figure 3.3. Variation du coefficient de diffusion d'eau liée dans le bois selon la température et la teneur en eau.

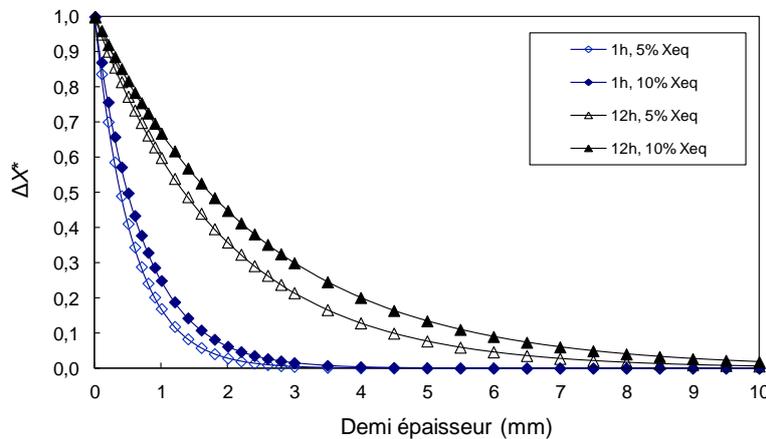


Figure 3.4. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi épaisseur de la planche pour un coefficient de diffusion estimé à une teneur en eau d'équilibre de 5% et 10% et pour deux périodes. [60°C, ΔX_{eq} 1%]

3.1.3. Proposition d'un outil d'aide pour le choix des conduites oscillantes

A partir des informations recueillies grâce au modèle, il semblait pertinent de proposer un outil d'aide pour l'élaboration de tables de séchage. Dans ce but, il était nécessaire d'intégrer les informations fournies par le modèle dans une seule courbe, indépendamment de la valeur de diffusivité de masse, de la période et de l'épaisseur de la planche. Pour cela, nous avons calculé une demi épaisseur adimensionnelle, nommée e^* :

$$e^* = \frac{e\sqrt{1/\tau}}{\sqrt{4D}} \quad (3.8)$$

où e est la demi épaisseur de la planche. Ainsi, la variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi épaisseur adimensionnelle (e^*) donne une courbe unique, que l'on peut considérer comme un abaque.

A partir de cette courbe unique (Figure 3.5), on peut déterminer l'intensité des oscillations de la teneur en eau de la surface au cœur de la planche, indépendamment de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} , des périodes et même de la température sèche. Cet abaque, en combinaison avec l'équation 3.8 permet de visualiser la proportion de l'épaisseur perturbée par les oscillations de la teneur en eau. Dans la Figure 3.5 quelques points ont été insérés afin d'expliquer son utilisation. Chaque point représente le cœur de la planche, obtenu à partir de l'équation 3.8. Plus ce point se situe à des abscisses élevées, moindre sera la proportion de la demi-épaisseur affectée par les oscillations. La position du point est dépendante de la période, de X_{eq} et de la température sèche. Parmi les exemples illustrés dans l'abaque, celui permettant l'activation des oscillations dans la plus grande proportion de la demi-épaisseur est celui avec l'abscisse e^* le plus faible. Il correspond à un séchage avec des oscillations de 12 heures, pour X_{eq} de 13% et une température sèche de 80°C. Hélas, cet exemple sort des hypothèses du modèle analytique puisque le cœur de la planche étant perturbé par les changements de teneur en eau, l'hypothèse de milieu semi-infini n'est pas valide. Rappelons que l'estimation quantitative de la variation de teneur en eau en régime oscillant établi est valide uniquement pour les planches d'épaisseur supposée semi infinie. Ainsi, les cinq points illustrés aux faibles valeurs de e^* sont à prendre uniquement à titre d'exemple.

Tout en tenant compte des restrictions du domaine de validité, le modèle analytique ici développé est un bon outil pour étudier l'effet des périodes et de l'atténuation des changements de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche. Sa simplicité le rend utilisable par le scientifique, l'ingénieur et particulièrement par les utilisateurs de séchoirs n'ayant pas accès à un outil numérique sophistiqué.

Cela dit, il est nécessaire d'étudier les transferts d'humidité dans l'épaisseur de la planche par une approche plus réaliste prenant en compte :

- La migration de l'humidité concernant autant l'eau libre, l'eau liée que la vapeur d'eau
- Les résistances aux transferts convectifs externes de masse et de chaleur
- Le couplage des transferts de chaleur et de masse au sein du matériau
- La planche en tant qu'un milieu fini.

Une telle approche nécessite un outil plus complexe qu'un modèle analytique. Ainsi, dans la section suivante, une approche numérique des transferts couplés de masse et de chaleur se produisant pendant le séchage d'un milieu poreux tel que le bois a été réalisée.

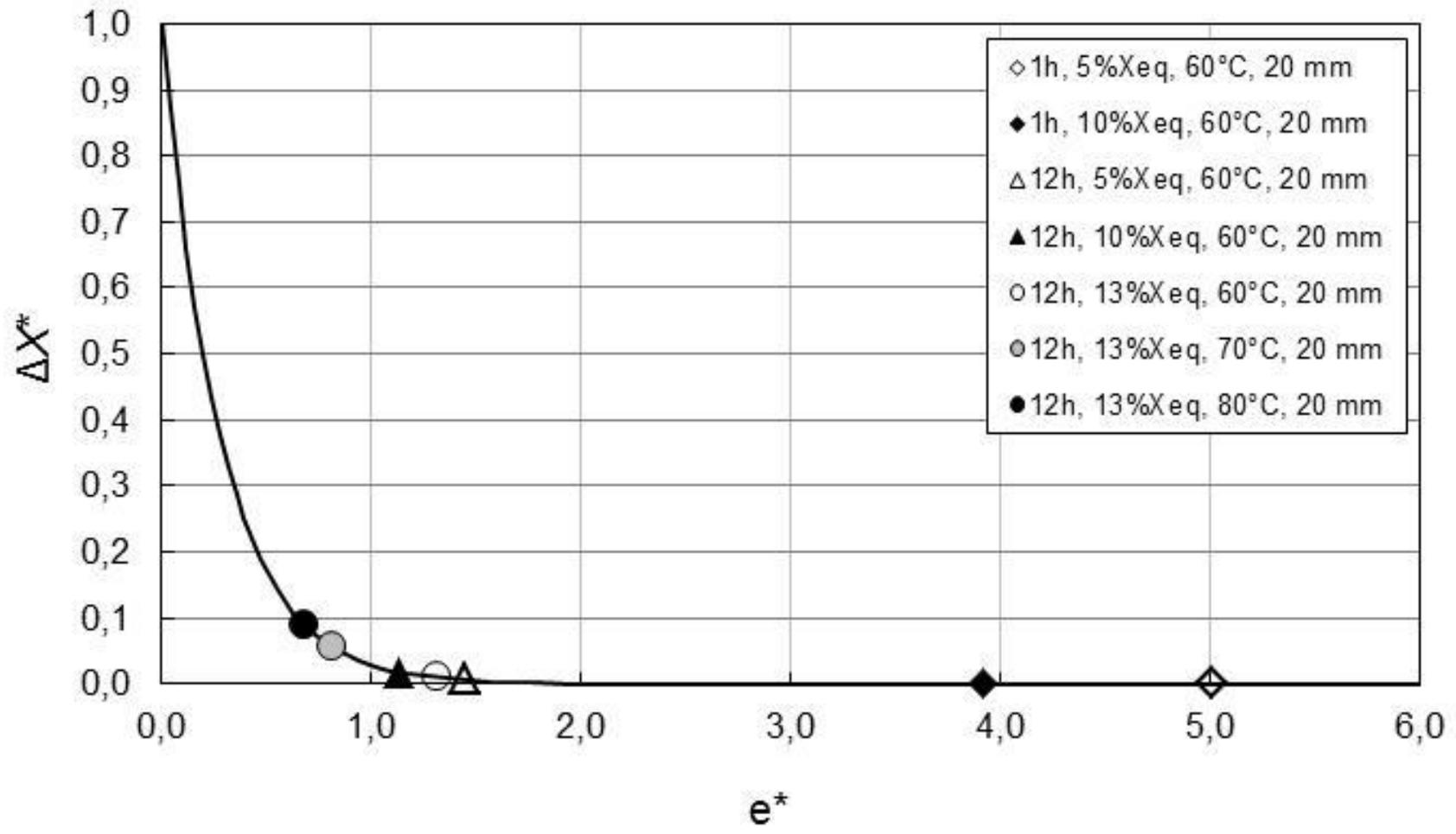


Figure 3.5. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi épaisseur adimensionnelle de la planche (e^*).

3.2. Approche numérique des transferts couplés de masse et de chaleur

Afin d'étudier l'atténuation des oscillations avec des conditions plus réalistes que celles du modèle analytique, nous avons utilisé le code numérique *TransPore* développé par P. Perré. Cet outil de simulation numérique permet de simuler les transferts couplés de masse et de chaleur se produisant pendant le séchage au sein du milieu poreux tel que le bois. La discrétisation des équations de conservation est effectuée par la méthode des volumes de contrôle. Ses prédictions ont été validées pour un large éventail de conditions de séchage, lui donnant un potentiel prédictif fondé pour les transferts de chaleur et de masse dans le bois. La formulation physique des transferts masse/chaleur intégrée dans le code *TransPore* permet une estimation beaucoup plus réaliste de l'évolution du champ de teneur en eau lors du séchage que le modèle analytique. Une description détaillée de la formulation physique du modèle et de sa résolution numérique pourra être trouvée dans les publications des travaux de Perré et Degiovanni (1990), Perré et Turner (1996, 1999).

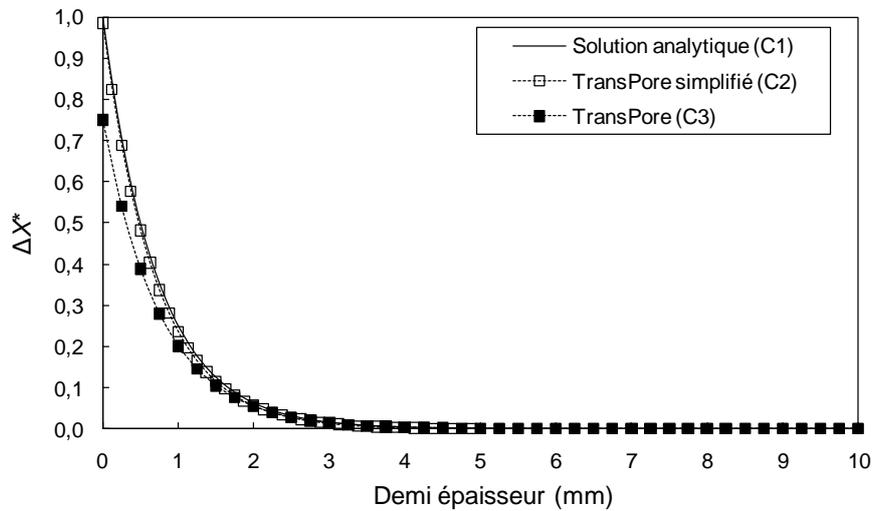
Pour cette étude, nous avons utilisé la version monodimensionnelle (1-D) de *TransPore* pour simuler le séchage oscillant en régime périodique stationnaire, configuration du modèle analytique, mais aussi en régime périodique non établi. Le temps de calcul du séchage d'une planche est d'environ 0,1 seconde sur un ordinateur de bureau standard.

3.2.1. Apports du code numérique dans la compréhension des phénomènes de transfert en régime périodique stationnaire

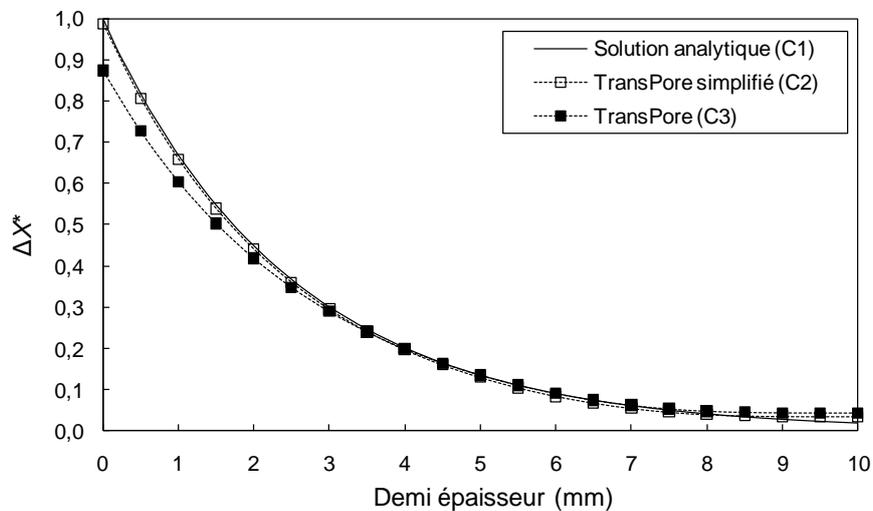
3.2.1.1 Effet de la période

L'étude des transferts réalisée avec le modèle analytique était restreinte à la troisième phase du séchage, lorsqu'un régime périodique stationnaire est établi, et cela pour des hypothèses assez restrictives pour résoudre analytiquement l'équation de transfert massique. L'utilisation de l'outil numérique *TransPore* permet une estimation beaucoup plus réaliste des transferts au sein du milieu poreux soumis à des conditions climatiques fluctuantes. Nous avons simulé le séchage oscillant d'une planche de hêtre débitée sur dosse, séchée à 60°C de température sèche, pour X_{eq} final de 10%, $\Delta X_{\max(x=0)}$ égale à 1% et deux périodes contrastées, soit 1 et 12 heures. La Figure 3.6 décrit la variation adimensionnelle de teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi-épaisseur d'une planche épaisse obtenue par la simulation numérique et le modèle analytique (courbes C1). Dans un premier temps, *TransPore* a été simplifié pour obtenir les mêmes hypothèses que celles du modèle analytique : coefficient de diffusion constant, résistances des transferts convectifs externes négligés et pas de couplage entre transfert de masse et transfert de chaleur au sein du milieu poreux. Avec ces restrictions, la courbe de simulation C2 est identique à la courbe analytique C1. La deuxième courbe de simulation (C3) prend en compte la dépendance du coefficient de diffusion avec l'humidité et avec la température, la résistance aux transferts externes et le couplage entre les transferts de masse et de chaleur. Il n'est pas surprenant de constater que le modèle analytique échoue à proximité de la surface d'échange, particulièrement pour la période de 1 heure. Cela est

principalement dû au couplage chaleur/masse et à la résistance aux transferts dans la couche limite. Dans ce cas, l'amplitude de la variation de teneur en eau à la surface de la planche n'atteint que 75 % de la valeur donnée par l'équilibre avec l'air ambiant.



a. 1 heure



b. 12 heures

Figure 3.6. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi épaisseur de la planche pour une teneur en eau d'équilibre de 10%: solution analytique et simulation numérique. [60°C, ΔX_{eq} 1%, dosse]

Aussi, il était pertinent d'observer l'influence des paramètres pris en compte par *TransPore* dans l'allure des courbes. L'ajout progressif de ces paramètres devrait éloigner progressivement la courbe simulée de celle obtenue à partir du modèle analytique. Pour cela, quelques simulations ont été faites en rajoutant un à un les paramètres que le modèle analytique néglige. En ajoutant des résistances aux transferts externes de masse et de chaleur on observe un léger décalage à la surface. La simulation suivante prend en compte la dépendance de la diffusion à la température et à la teneur en eau. Pourtant, la courbe obtenue est pratiquement identique à la précédente. En effet, en régime oscillant établie, l'amplitude de la variation de teneur en eau est trop faible dans le matériau pour

modifier le champ de cette grandeur via l'hydroactivation de la diffusion. Pour la dernière simulation, on rajoute le couplage entre les transferts de masse et de chaleur. Le décalage de la courbe au niveau de la surface d'échange est net. L'allure de la courbe est ainsi clairement modifiée et montre l'importance de la prise en compte du couplage masse/chaleur dans cette estimation des changements de teneur en eau. On note également que cette courbe rejoint celle du modèle analytique pour des valeurs de e^* supérieures à 1.

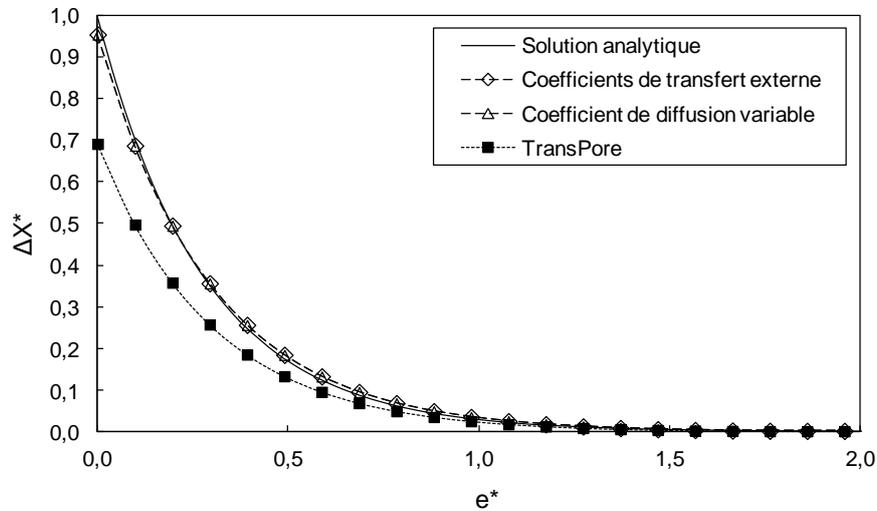
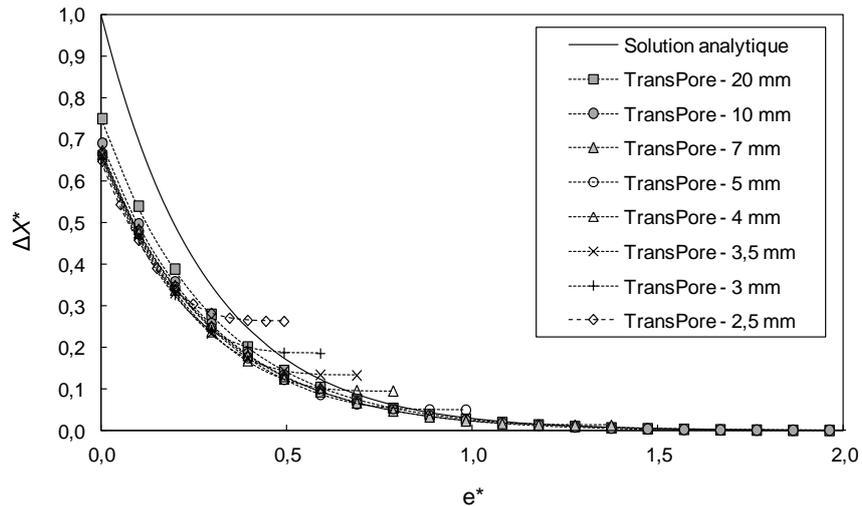


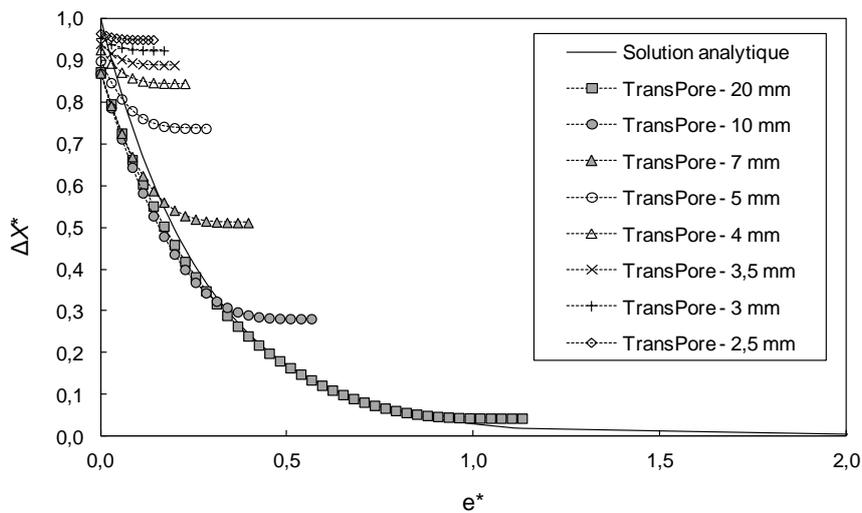
Figure 3.7. Ajout progressif de coefficients de transferts externes de masse et de chaleur, coefficient de diffusion dépendant de T et H, couplage de transferts de masse et de chaleur [60°C, teneur en eau d'équilibre 10%, ΔX_{eq} 1%, 1h, avec résistance à la diffusion.]

3.2.1.2 Effet de l'épaisseur

Puisque pour *TransPore* la planche est un milieu fini, nous avons étudié l'effet de l'épaisseur de la planche dans l'atténuation des oscillations de teneur en eau. Différentes épaisseurs ont été testées pour deux périodes, soit 1 et 12 heures (Figure 3.8). Avec la période longue et de faibles épaisseurs, on se rapproche du comportement de petits corps (courbe presque plate). En effet la résistance aux transferts internes est réduite. Il reste seulement la résistance aux transferts externes et donc ΔX^* en surface se rapproche d'une valeur légèrement inférieure à 1. Dans ce cas, le cœur de la planche est presque autant perturbé par les oscillations que la surface d'échange (Figure 3.9). Lorsque l'épaisseur augmente, la résistance aux transferts internes gagne en importance et ΔX^* tend vers une valeur plus faible et dépendante de la période. Le modèle analytique, qui suppose le cœur non perturbé, ne peut donc être valide que pour des épaisseurs supérieures à 20 mm, sans oublier qu'à la surface d'échange il échoue. Un facteur correctif à la surface permettrait d'améliorer le modèle analytique pour des planches ayant une épaisseur supérieure à 20 mm. Ceci est traité dans la partie suivante.



a. 1 heure



b. 12 heures

Figure 3.8. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi-épaisseur adimensionnelle de la planche pour une teneur en eau d'équilibre de 10% et deux périodes (1 et 12 heures) : solution analytique et simulation numérique pour différentes épaisseurs. [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 1%.]

Nous pouvons noter un comportement contrasté lorsque l'on regarde l'effet de l'épaisseur de la planche sur ΔX^* en surface pour les deux périodes proposées : lorsque la fréquence des oscillations est élevée, l'épaisseur de la planche a peu d'effet sur l'atténuation des oscillations au niveau de la surface d'échange. En effet, la couche périphérique affectée par les oscillations est faible et les planches ont un comportement éloigné du petit corps. Le ratio entre la constante de temps liée à la diffusion et la période est tel dans cet exemple que les oscillations de la teneur en eau en surface et de la teneur en eau d'équilibre (liée aux conditions extérieures) sont en opposition de phase (Figure 3.9.a). La résistance au transfert interne d'humidité conduit la teneur en eau du cœur des planches à avoir un déphasage par rapport à la surface d'autant plus important que l'épaisseur est grande. Dans le cas présenté, les oscillations au cœur des planches plus épaisses tendent à être en phase avec les oscillations des conditions climatiques (Figure 3.9.b). Ceci amène ΔX^* en surface à diminuer

légèrement lorsque l'épaisseur de la planche diminue. En revanche, lorsque la fréquence des oscillations est basse (période de 12 heures), la valeur de ΔX^* en surface augmente et se rapproche de 1 au fur et à mesure que l'épaisseur diminue. Cela s'explique par le fait qu'avec une fréquence basse la teneur en eau de la surface a le temps d'atteindre la teneur en eau d'équilibre. Les oscillations de l'humidité en surface et l'humidité d'équilibre sont en phase (Figure 3.9.c). En raison de la résistance au transfert interne d'humidité et le déphasage entre la surface et le cœur qui en résulte, lorsque la surface devrait être la plus humide, l'humidité du cœur est plus faible (Figure 3.9.d). Ce déphasage tire vers le bas l'humidité en surface pour les planches plus épaisses. Toutefois, la valeur de e^* à partir de laquelle la courbe numérique quitte la courbe analytique ne semble pas pouvoir être exprimée simplement pour corriger le modèle analytique.

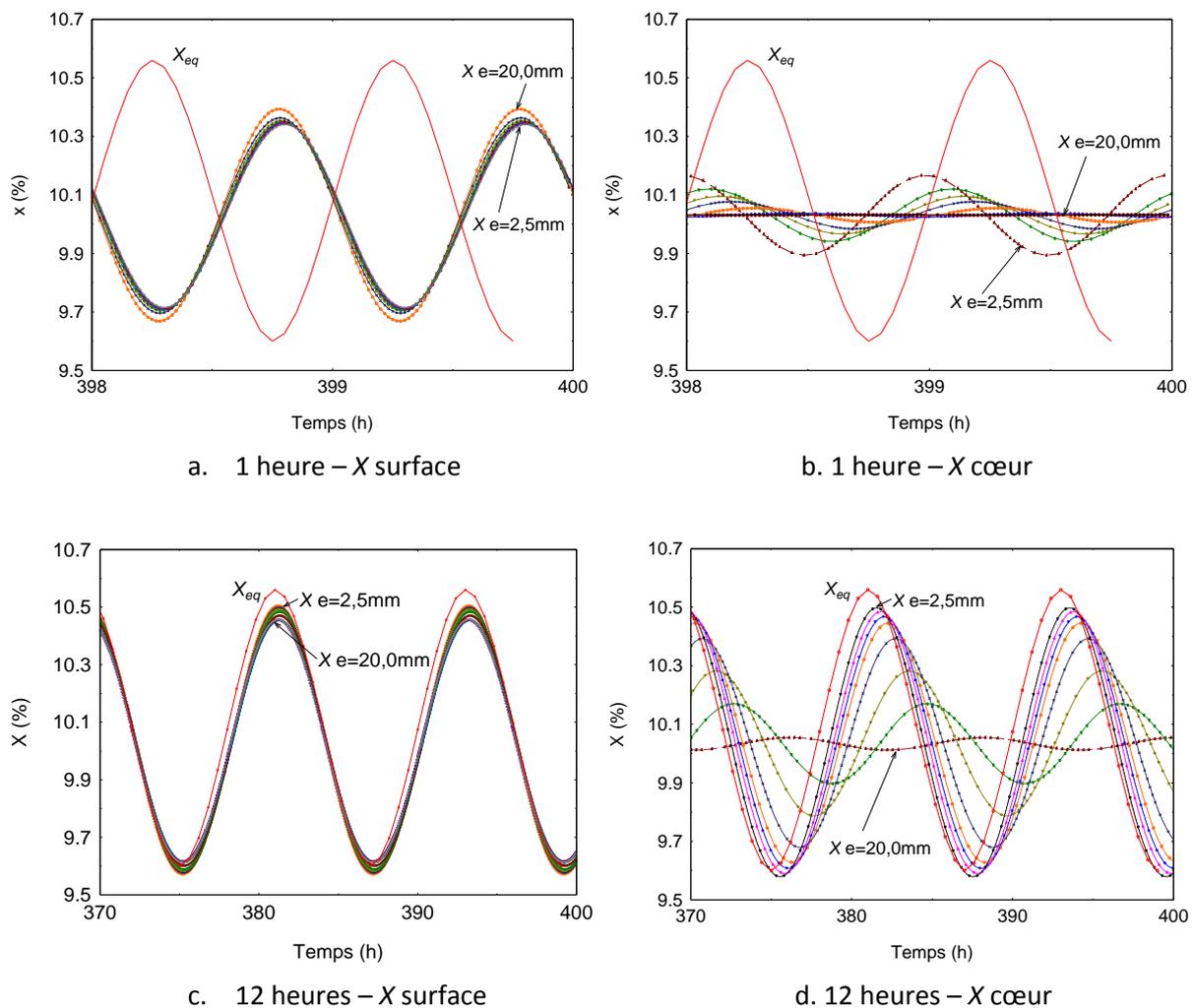


Figure 3.9. Variation de la teneur en eau (X) à la surface d'échange et au cœur en fonction du temps pour une teneur en eau d'équilibre de 10%, deux périodes (1 et 12 heures) et différentes épaisseurs. [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 1%.]

3.2.1.3 Extension du domaine de validité du modèle analytique

Nous avons vu que le modèle analytique échoue au niveau de la surface d'échange. Afin d'étendre son domaine de validité, nous proposons un **facteur correctif de surface**. Cela permettra de corriger

la valeur de ΔX^* en surface ($x = 0$) et le relier ensuite au point correspondant à une demi épaisseur adimensionnelle (e^*) égale à 1, valeur à partir de laquelle la courbe de *TransPore* rejoint la courbe du modèle analytique.

A partir d'une série des valeurs de ΔX^* en surface pour différentes périodes allant de 5 minutes à 24 heures obtenue avec l'outil numérique *TransPore*, nous avons identifié un facteur de correction α^* calculé ainsi:

$$\alpha^* = \frac{h_c \Delta T}{h_{vap}^o \rho \sqrt{\frac{1}{\tau}} \sqrt{D} \frac{\Delta X_{eq}}{2}} \quad (3.9)$$

où h_c est le coefficient de transfert de chaleur ($W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$), ΔT l'écart entre la température sèche et la température humide ($^{\circ}C$), h_{vap}^o la chaleur latente d'évaporation ($kJ.kg^{-1}$), ρ la masse volumique basale ($kg.m^{-3}$), τ la période (s), D le coefficient de diffusion ($m^2.s^{-1}$) et ΔX_{eq} la variation de la teneur en eau d'équilibre.

Ensuite, pour estimer la valeur corrigée de ΔX^* en surface, le facteur α adimensionnelle est inséré à une fonction de type puissance:

$$\Delta X_{(x=0) corrigé}^* = a(\alpha^*)^d + b - \frac{c}{\alpha^*} \quad (3.10)$$

Où a est égal à $3,1834.10^{-12}$, b égal à 0,8993, c égal à 85,4645 et d égal à 2,8414. Ces paramètres ont été identifiés pour minimiser une fonction objective définie comme la somme du carré des écarts entre les valeurs estimées par cette expression et les valeurs d'origine obtenues par simulation numérique.

Cette correction permet de reproduire correctement (en comparant la valeur obtenue par simulation numérique et celle obtenue avec l'expression 3.10) l'effet de la résistance aux transferts externes, l'effet de la période, l'effet de la résistance au transfert interne d'humidité, l'effet de l'écart psychométrique sur la valeur de ΔX^* en surface.

La Figure 3.10 illustre l'utilisation de ce facteur de correction. La valeur de ΔX^* en surface est corrigée en fonction des caractéristiques du séchage. En l'occurrence, un séchage oscillant d'une planche de 20 mm d'épaisseur avec une période de 1 heure, une amplitude ΔX de 1%, une teneur en eau d'équilibre moyenne de 10% et une température sèche de 60°C. En considérant que la solution analytique est correcte à partir de e^* égal à 1, la valeur de ΔX^* en surface peut être reliée à ce niveau. Ici, les deux points ont été liés par une courbe exponentielle qui ressemble à la courbe obtenue en simulation numérique (voir Figure 3.8). Cette correction de l'atténuation au niveau de la surface d'échange étend le domaine de validité du modèle analytique.

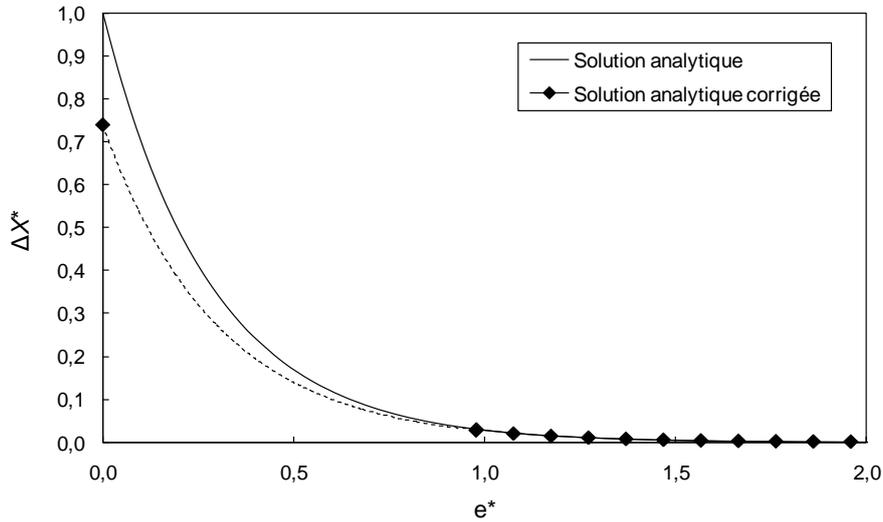


Figure 3.10. Solution analytique corrigée pour une planche de 20 mm d'épaisseur et période de 1 heure. [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 1%.]

Le modèle analytique est aussi restreint par les faibles épaisseurs adimensionnelles, puisqu'il échoue pour des petites épaisseurs de planches ou pour des oscillations avec de grandes périodes, cas dans lesquels le cœur est aussi perturbé par les oscillations de teneur en eau (Figure 3.8). Afin d'étendre son domaine de validité, nous proposons également un deuxième facteur de correction permettant de calculer la valeur de la demi épaisseur adimensionnelle (e^*) à partir de laquelle la courbe numérique quitte la courbe analytique. Cette valeur, nommée demi-épaisseur adimensionnelle critique (e^*_{cr}), a été identifiée graphiquement pour chacune des courbes présentées dans la Figure 3.8. La relation de e^*_{cr} avec la valeur de e^* du cœur de la planche (dernier point de la courbe), illustré dans la Figure 3.11, donne une courbe qui a été interpolée ici par une fonction linéaire :

$$e^*_{cr} = 0,9891(e^*) - 0,1639 \quad (3.11)$$

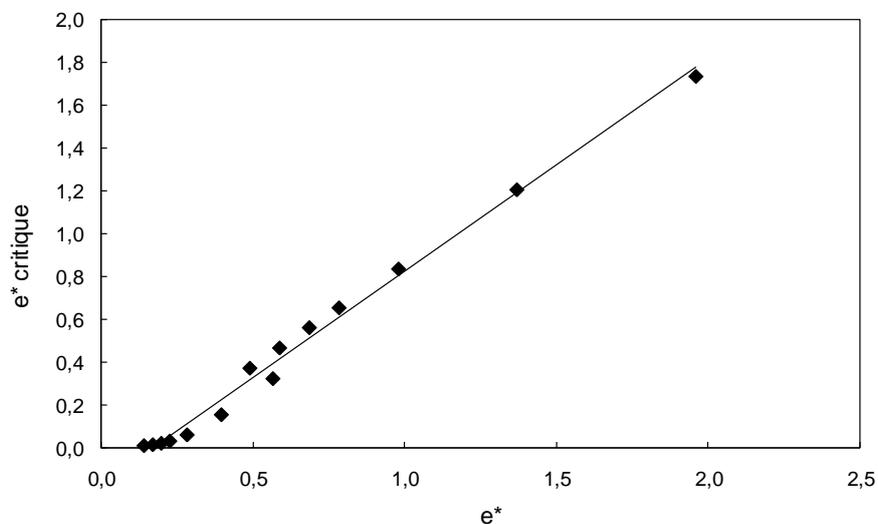


Figure 3.11. Relation entre la demi épaisseur adimensionnelle (e^*) et la demi épaisseur adimensionnelle critique (e^*_{cr}).

Ainsi, ce deuxième facteur de correction relatif à l'épaisseur de la planche peut être ajouté au facteur de correction au niveau de la surface d'échange (expressions 3.9 et 3.10). Pour illustrer cela nous allons reprendre l'exemple de la Figure 3.10 mais désormais pour une planche très fine, soit 2,5 mm d'épaisseur. A partir de la valeur de e^* obtenue avec l'expression 3.8 pour le cœur de la planche, il est possible de calculer la valeur de e^*_{cr} à partir de l'expression 3.11. Cette valeur calculée est placée dans la courbe analytique. Elle est reliée à la valeur de ΔX^* corrigée en surface par une courbe exponentielle et à la valeur de e^* du cœur par une droite à pente nulle. A continuation, nous résumons les équations permettant de retrouver la courbe complète présentée dans la Figure 3.12 :

$$\alpha^* = \frac{h_c \Delta T}{h_{vap}^o \rho \sqrt{\frac{1}{\tau}} \sqrt{D} \frac{\Delta X_{eq}}{2}}$$

$$\Delta X^*_{(x=0) corrigé} = a(\alpha^*)^d + b - \frac{c}{\alpha^*}$$

$$e^* = \frac{e\sqrt{1/\tau}}{\sqrt{4D}}$$

$$e^*_{cr} = 0,9891(e^*) - 0,1639$$

Avec cette deuxième correction le domaine de validité du modèle analytique peut être étendu aux faibles épaisseurs, cas où le centre de la planche est perturbé par les oscillations de teneur en eau.

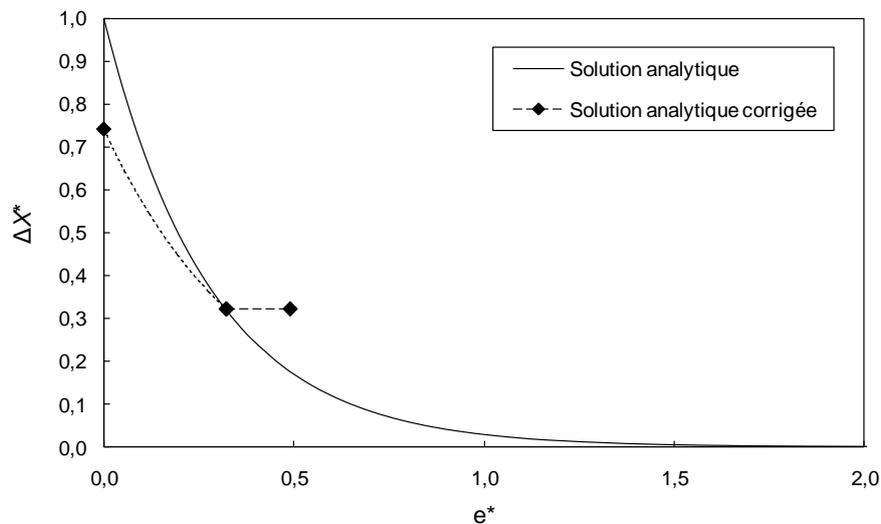
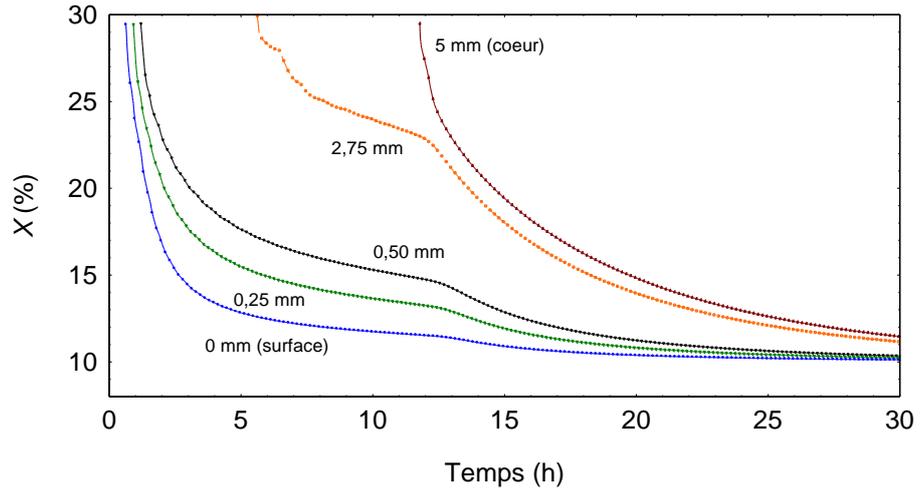


Figure 3.12. Solution analytique corrigée pour une planche de 2,5 mm d'épaisseur et période de 1 heure. [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 1%.]

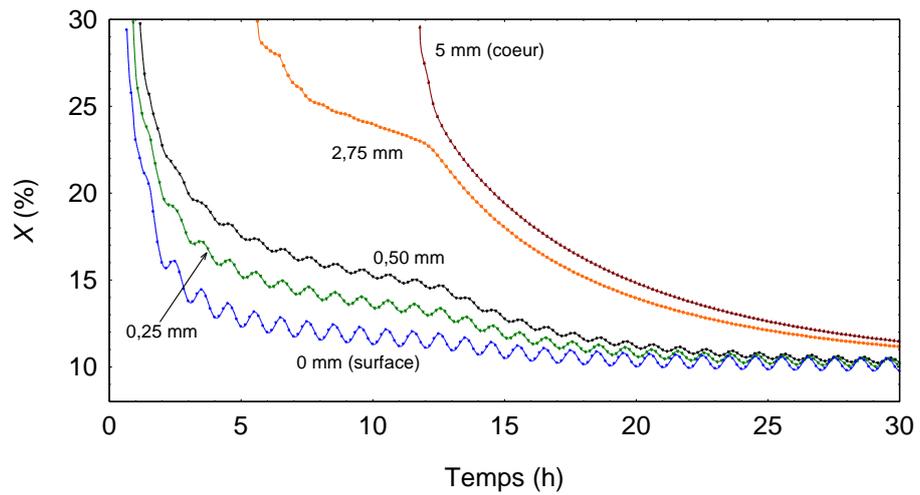
3.2.2. Etude des transferts internes en régime périodique non établi

Au cours de la première phase de séchage, l'eau libre migre du cœur vers la surface par migration capillaire et la température du produit tend vers la température humide de l'environnement. Les conditions climatiques oscillantes font varier les flux de masse et de chaleur échangés entre l'air et la planche. Ces variations de flux génèrent un champ de température et de teneur en eau fluctuant selon l'épaisseur de la planche mais sans générer de contraintes de séchage tant que le matériau reste dans le domaine de l'eau libre. En seconde phase de séchage, la périphérie de la planche entre dans le domaine hygroscopique et les contraintes de séchage apparaissent via le retrait différentiel selon l'épaisseur. L'évolution de la teneur en eau en quelques points de l'épaisseur a été tracée sur les figures ci-dessous dès lors qu'ils atteignent une teneur en eau en dessous du point de saturation des fibres. La Figure 3.13c représente l'écart entre la teneur en eau calculée à une position x de l'épaisseur lorsque la conduite est oscillante avec celle calculée à la même position mais avec la conduite constante.

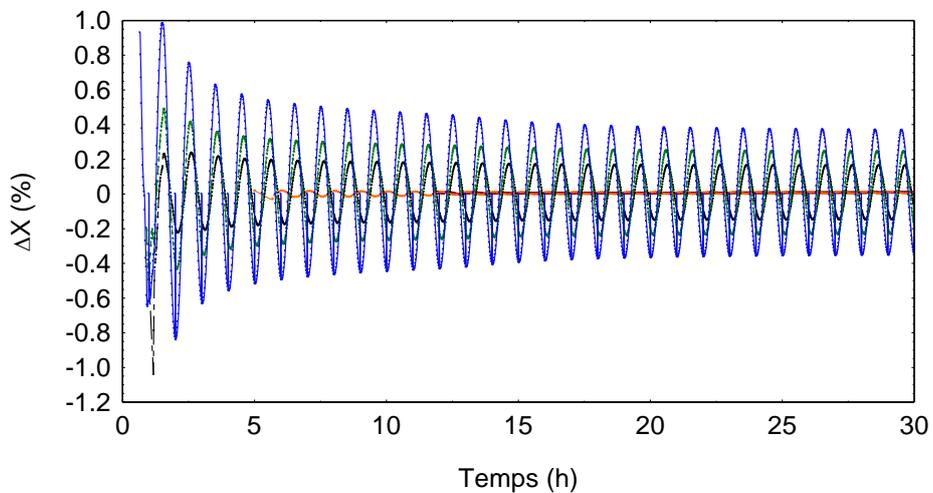
Au sein de la couche sèche périphérique en formation, la diffusion d'humidité est hydroactivée plus fortement au cours du régime transitoire qu'en régime établi. Un comportement proche de ce régime peut être observé dans la zone affectée par les oscillations à partir de 15 h de séchage (Figure 3.13c). Au cours de la phase transitoire, les oscillations atteignent des couches plus profondes de l'épaisseur de la planche. Notamment, la variation de la teneur en eau à 5 mm de la surface d'échange (cœur de la planche) a une amplitude supérieure à celle observée en régime établi, lorsque la teneur en eau oscille autour de la teneur en eau d'équilibre. Ainsi, **l'amplitude et la profondeur atteinte par les oscillations de teneur en eau évoluent au cours du processus.**



a. Conduite constante



b. Conduite oscillante (ΔX_{eq} 1%, période 1h)



c. Ecart de la teneur en eau entre les deux conduites

Figure 3.13. Evolution de la teneur en eau en cinq points situés à différentes distances de la surface en mm (0 - 0,25 - 0,50 - 2,75 - 5,00) d'une planche de 10mm d'épaisseur séchée à X_{eq} 10%.

3.3. Approche numérique du comportement mécanique en conduite oscillante

Dans cette partie, nous présentons l'approche numérique du comportement mécanique d'une planche soumise à des conditions oscillantes. La simulation du champ de contraintes et de déformations au sein de la planche est possible au moyen d'une formulation mécanique greffée au code numérique *TransPore* (Rémond, 2004 ; Rémond et al. 2007). Ici, quelques éléments succincts y sont présentés.

3.3.1. Modèles de comportement mécanique utilisés dans le code

La formulation du modèle mécanique et sa résolution numérique sont présentées en détail dans Rémond (2004) et Rémond et al. (2007). Quelques modifications ont été apportées afin de simuler différentes configurations de séchage : séchage symétrique, dissymétrique et sous charge. Les éléments de la formulation sont présentés ci-après de façon succincte.

La formulation mécanique considère les hypothèses suivantes :

- Le système de coordonnées géométriques coïncide avec les directions d'anisotropie.
- Le système mécanique est supposé quasi statique (l'équilibre de la planche est vérifié à chaque instant et les termes d'inertie de l'équation dynamique sont négligeables).
- L'hypothèse des petites déformations est supposée et le problème mécanique est résolu en termes de déplacement.
- Le champ de contraintes en trois dimensions est réduit à une formulation mécanique monodimensionnelle estimant les contraintes loin des bords latéraux et des bouts de la planche.
- Les conditions aux limites dépendent de la configuration étudiée : dans le cas du séchage dissymétrique, la force externe appliquée est négligée alors que pour un séchage sous charge, un moment externe est appliqué pour imposer la forme et la courbure de la planche.
- Le champ de contraintes est supposé égal à zéro à l'état initial.

La déformation mécanique est constituée de la déformation élastique, liée aux contraintes par la loi de Hooke, de la déformation du retrait/gonflement libre et de la déformation différée associée à la viscoélasticité et à l'effet mécanosorptif du bois. La plasticité n'est pas prise en compte dans cette formulation :

$$\varepsilon^{=tot} = \varepsilon^{=r} + \varepsilon^{=e} + \varepsilon^{=ms} + \varepsilon^{=ve} \quad (3.12)$$

où $\varepsilon^{=tot}$ est la déformation totale, $\varepsilon^{=r}$ le retrait libre, $\varepsilon^{=e}$ la déformation élastique, $\varepsilon^{=ms}$ la déformation mécanosorptive et $\varepsilon^{=ve}$ la déformation viscoélastique.

Le retrait libre ($\varepsilon^{=r}$) varie en fonction des variations de la teneur en eau liée. Le module d'élasticité est celui à l'état vert. L'expression viscoélastique utilise quatre éléments de Kelvin thermo-

hydroactivés. L'expression mécanosorptive utilise, au choix, le modèle de Ranta– Maunus (cité par Salin, 1992) ou celui de Salin (1992) initialement proposé pour prédire les contraintes de séchage. Ce deuxième comporte une limite mécanosorptive définie comme une constante liée à la déformation mécanosorptive maximale que le matériau peut atteindre pour un niveau de contrainte donné. D'après le modèle de Salin, le taux de fluage décroît en fonction de la déformation mécanosorptive déjà atteinte. Ainsi, la dérivée de la déformation mécanosorptive par rapport au temps est-il en fonction de la déformation mécanosorptive :

$$\frac{\partial \varepsilon_{ms}}{\partial t} = ms(\sigma - E_{ms} \varepsilon_{ms}) \frac{\partial X}{\partial t} \quad (3.13)$$

où ms est le coefficient mécanosorptif, σ est la contrainte, E_{ms} est la limite mécanosorptive et X est la teneur en eau.

Dans cette formulation, lorsque E_{ms} est égal à zéro on retrouve la formulation de Ranta – Maunus. La Figure 3.14 donne la représentation schématique de deux modèles.

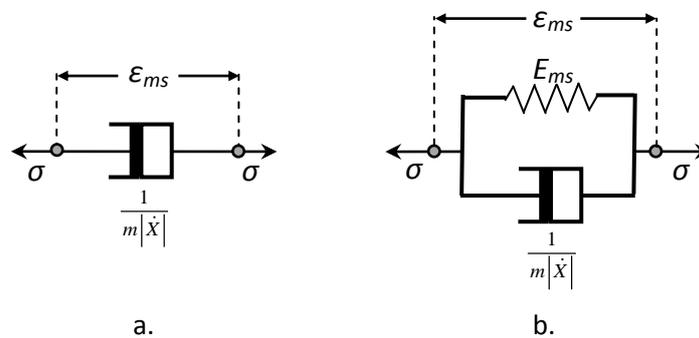


Figure 3.14. Modèle rhéologiques représentant la déformation mécanosorptive : a) Modèle de Ranta – Maunus ; b) Modèle de Salin.

L'application du champ de contraintes aux équations constitutives de cette formulation donne un tenseur de contraintes diagonal dépendant de la distance à la surface de la planche et du temps. Pour clore cette présentation succincte de la formulation, l'équilibre mécanique de la planche à l'échelle locale et globale doit être respecté. Le système des équations constitutives et d'équilibre mécanique est résolu numériquement.

3.3.2. Quelques simulations en traction simple

Dans cette partie, nous allons présenter à travers quelques simulations la réponse du modèle mécanique. Nous avons étudié le comportement d'un échantillon d'une épaisseur très fine (de 0,5mm d'épaisseur selon la direction longitudinale), dont la teneur en eau s'équilibre pratiquement instantanément avec son environnement. De la sorte, les variations d'humidité n'engendrent pas de contraintes mécaniques dues au champ de retrait dans l'épaisseur. L'échantillon est sollicité en traction simple (2 MPa) pendant 12 heures, suivie d'une relaxation de 12 heures (ΔX_{eq} 2,4%, période 2h, sans séchage) (Figure 3.15). La contrainte reste constante durant les changements d'humidité.

Cette hypothèse théorique est en fait très difficile à réaliser expérimentalement étant données les variations de sections qui accompagnent les variations de teneur en eau. Dans cette formulation nous avons utilisé le modèle de Salin avec les paramètres présentés dans les Tableaux 3.1 et 3.2.

Tableau 3.1. Valeurs mécaniques utilisées dans le code numérique *TransPore*.

	Valeur			Unités
	Radial	Tangentiel	Longitudinal	
Coefficient de retrait	0,233	0,467	0,005	%/%MC
Module de Young à l'état vert	0,520	0,390	14,1	GPa
Coefficient de Poisson	$\nu_{RT} = 0,73, \nu_{LR} = 0,36, \nu_{TL} = 0,03$			-
Complaisance viscoélastique (quatre éléments de Kelvin)	$a_1 = 2,82$ $a_2 = 8,00$ $a_3 = 18,86$ $a_4 = 51,28$	$a_1 \cdot E_R / E_T$ $a_2 \cdot E_R / E_T$ $a_3 \cdot E_R / E_T$ $a_4 \cdot E_R / E_T$	$a_1 \cdot E_R / E_L$ $a_2 \cdot E_R / E_L$ $a_3 \cdot E_R / E_L$ $a_4 \cdot E_R / E_L$	GPa ⁻¹
Terme de retard associé à 20°C	$\tau_1 = 1,77 ; \tau_2 = 700,4 ; \tau_3 = 4,93 \cdot 10^8 ; \tau_4 = 2,49 \cdot 10^5$			heures
Energie d'activation	$\Delta W_1 = 44,2 ; \Delta W_2 = 120,8 ; \Delta W_3 = 270,9 ; \Delta W_4 = 111,1$			kJ/mol
Coefficient mécanosorptif	$ms = 100$	$ms \cdot E_R / E_T$	$ms \cdot E_R / E_L$	GPa ⁻¹
Limite mécanosorptive	$Ems = 60$	$Ems \cdot E_T / E_R$	$Ems \cdot E_L / E_R$	MPa

Tableau 3.2. Valeurs caractéristiques du milieu poreux utilisées dans le code numérique *TransPore*.

	Valeur			Unités
	Radial	Tangentiel	Longitudinal	
Coefficient de transfert de chaleur	15			W.m ⁻² .°C ⁻¹
Coefficient de transfert de masse	15. 10 ⁻³			m . s ⁻¹
Porosité	0,61			(-)
Masse volumique	600			kg/m ³
	Radial	Tangentiel	Longitudinal	
Perméabilité liquide	4×10 ⁻¹⁶	3×10 ⁻¹⁷	1.4×10 ⁻¹²	m ²
Perméabilité gazeuse	4×10 ⁻¹⁶	3×10 ⁻¹⁷	1.4×10 ⁻¹²	m ²
Perméabilité relative liquide	$k_{rl} = S_{fw}^3$		$k_{rl} = S_{fw}^8$	(-)
Perméabilité relative gazeuse	$k_{rg} = 1 + (2 \cdot S_{fw} - 3) \times S_{fw}^2$		$k_{rg} = 1 + (4 \cdot S_{fw} - 5)$	(-)
Diffusion de l'eau liée	$D_b(T_K, X_{bnd}) = \exp\left(-a - \frac{b}{T_K} + c \cdot X_{bnd}\right)$			m ² s ⁻¹
	$a = -9,996$ $b = 4300$ $c = 9,8$	$a = -9,59$ $b = 4300$ $c = 9,8$	$a = 7,67$ $b = 4300$ $c = 9,8$	
Diffusion gazeuse	$D_{eff} = k_{rg} \cdot D_v \cdot 2 \cdot 10^{-3}$	$D_{eff}/2$	$5 \times D_{eff}$	m ² s ⁻¹
Diffusion de la vapeur dans l'air	$D_v = 2,26 \times 10^{-5} \cdot (T / 273)^{1,81} \cdot P_{atm} / P$			m ² s ⁻¹
Isotherme de sorption	$P_v / P_{vs} = 1 - \exp\left(-0,76427A - 3,6787 \cdot (X_b / X_{fsp})^2\right)$			(-)
Conductivité thermique	$\lambda_{eff} = 0,14 + 0,3 \cdot X$	λ_{eff}	$2 \times \lambda_{eff}$	W.m ⁻¹ .°C ⁻¹
Chaleur différentielle de sorption	$\Delta h_w = 0,4 \cdot h_{vap} \cdot \left[(X_{fsp} - X_b) / X_{fsp} \right]^2$			J kg ⁻¹

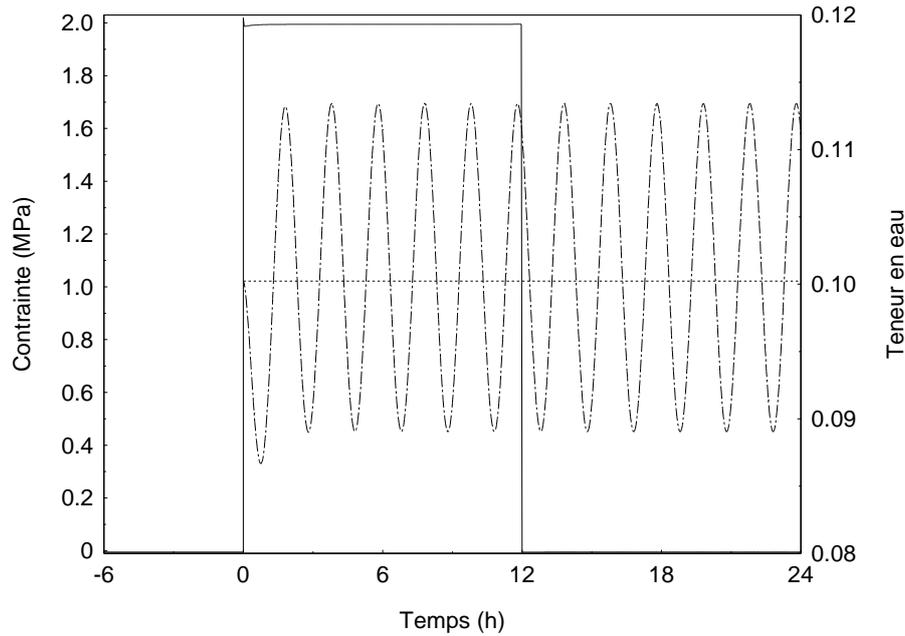


Figure 3.15. Contrainte et teneur en eau fonction du temps [ΔX_{eq} 2,4%, période : 2h]

La déformation totale de l'échantillon ainsi sollicité est présentée dans la Figure 3.16. En décomposant cette déformation, il est possible d'analyser la contribution de chacune des déformations individuelles. Le retrait libre oscille de façon homogène en fonction de la teneur en eau d'équilibre et du temps. On peut apprécier la déformation élastique qui apparaît instantanément au moment de l'application de la charge, et intégralement récupérable au moment du retrait de la charge. L'application de la charge entraîne un fluage viscoélastique de l'échantillon au cours du temps. La faible teneur en eau de l'échantillon ne permet pas l'hydroactivation des propriétés viscoélastiques. Le fluage reste donc faible. En revanche, le matériau étant sous contrainte et subissant des variations de teneur en eau, une déformation mécanosorptive apparaît, beaucoup plus important que la déformation viscoélastique. Au bout de quelques cycles d'oscillation de teneur en eau, le fluage mécanosorptif continue sa progression mais semble tendre asymptotiquement vers une limite. Lors de la relaxation, les deux fluages diminuent, chacun étant respectivement activé par le temps et les oscillations d'humidité. La recouvrance est totale au-delà de 24h pour ce test fictif. D'après cette simulation, la déformation mécanosorptive participe considérablement dans la déformation totale et aussi dans la relaxation des contraintes.

La formulation mécanique de la mécanosorption de Salin diffère de celle de Ranta – Maunus car elle comporte une limite mécanosorptive et considère possible la recouvrance complète de cette déformation. Les valeurs des paramètres de cette formulation sont éparses dans la littérature et peuvent varier d'un ordre de grandeur (Mauget, 1996 ; Ranta – Maunus cité par Salin 1992). Nous allons dans les parties suivantes modifier les valeurs des paramètres de la formulation de Salin afin d'étudier leur contribution sur la déformation de l'échantillon.

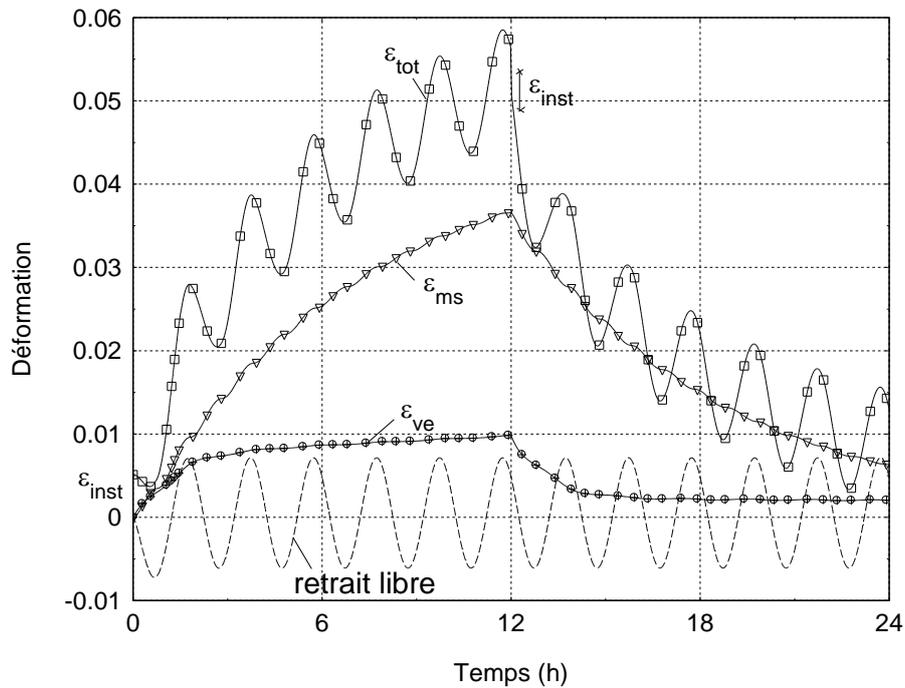


Figure 3.16. Déformation décomposée (selon la direction tangentielle du bois : $m_s = 135 \text{ GPa}^{-1}$, $E_{m_s} = 45 \text{ MPa}$).

3.3.2.1 Effet de la limite mécanosorptive dans la déformation totale

Nous avons simulé la déformation totale de la configuration précédente avec différentes limites mécanosorptives pour un coefficient mécanosorptif de 135 GPa^{-1} dans la direction tangentielle du matériau (Figure 3.17). Dans cette figure, le retrait libre a été soustrait de la déformation totale. La déformation corrigée intègre donc la déformation élastique et les déformations différées (viscoélastique et mécanosorptive). Une courbe de référence est tracée représentant la déformation totale corrigée du retrait lorsque la teneur en eau est constante durant l'essai. Elle permet de quantifier la contribution de la déformation élastique et viscoélastique dans la déformation observée avec des variations de teneur en eau. Sans oscillations de teneur en eau (courbe au-dessous) la déformation totale reste plus faible qu'avec les oscillations en raison de l'absence du fluage mécanosorptif. Avec un module mécanosorptif égale à zéro, nous retrouvons le modèle de Ranta-Maunus (courbe du haut). Dans ce cas la déformation sous contrainte augmente linéairement avec les cycles d'humidité. Lorsque la charge est retirée, la recouvrance n'est que partielle, puisque seules les déformations élastique et viscoélastique sont relaxées. L'ajout d'un module mécanosorptif entraîne d'une part une diminution de la déformation sous contrainte qui tend de façon asymptotique vers une limite et d'autre part une recouvrance complète de cette déformation qui n'est pas toujours atteinte au bout des 6 cycles d'humidité après la décharge. Lorsque le module mécanosorptif (E_{m_s}) augmente, la déformation mécanosorptive tend vers une limite plus basse en un nombre de cycles plus faible. Il en est de même pour atteindre la recouvrance complète au cours de la relaxation. En augmentant la limite mécanosorptive, le comportement de l'échantillon se rapproche du comportement sans fluage mécanosorptif.

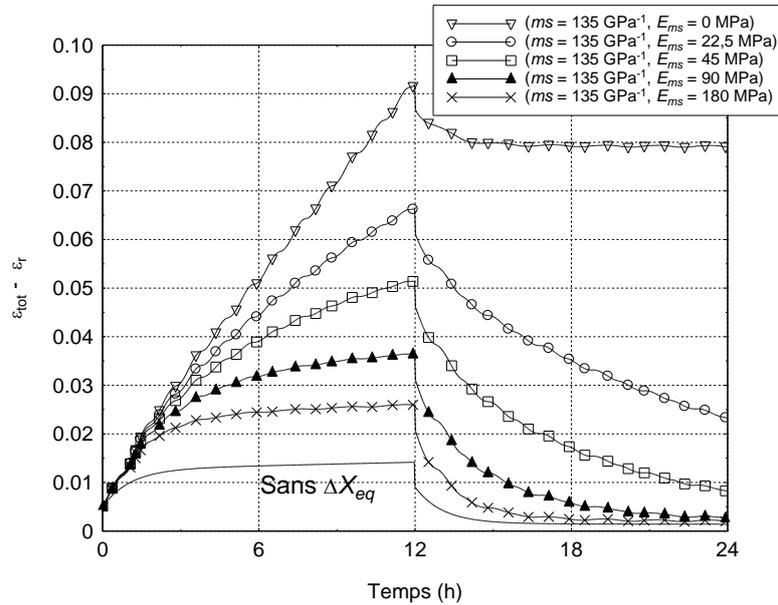


Figure 3.17. Effet de la limite mécanosorptive (E_{ms}) dans la déformation totale pour un coefficient mécanosorptif (ms) de 135 GPa^{-1} .

3.3.2.2 Effet du coefficient mécanosorptif sur la déformation totale

Nous avons étudié l'effet du coefficient mécanosorptif en présence d'un module mécanosorptif de 45 MPa (Figure 3.18). Plus le coefficient ms est faible, plus le nombre de cycle nécessaire pour atteindre la limite mécanosorptive est élevé, ou encore plus la déformation mécanosorptive sera petite pour un même nombre de cycle. De la même façon, au cours de la décharge, plus ce coefficient est faible et plus le nombre de cycle pour la recouvrance complète est grand. Ainsi, les coefficients mécanosorptifs élevés permettent-ils d'exprimer rapidement tout le potentiel mécanosorptif dans la limite de la valeur de E_{ms} . En d'autres termes, les valeurs élevées maximisent l'efficacité des oscillations par rapport aux variations de teneur en eau cumulées pour la relaxation des contraintes ou pour la recouvrance.

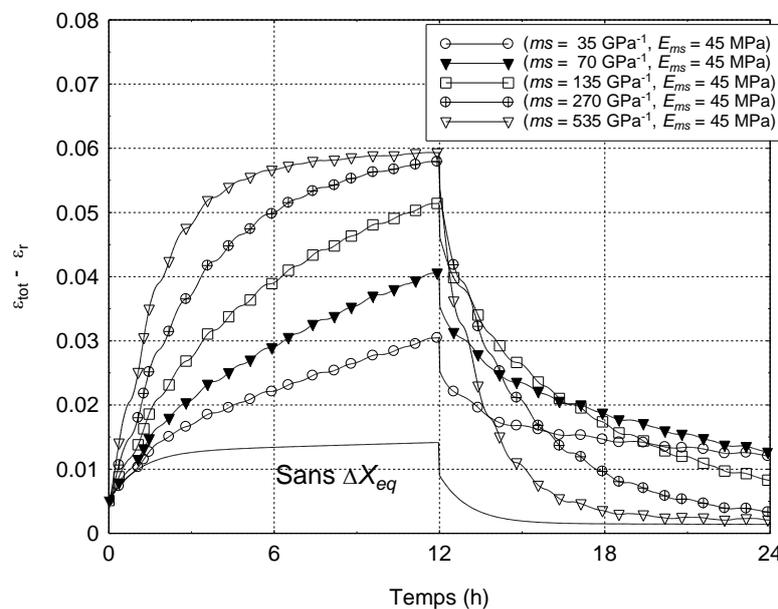


Figure 3.18. Effet coefficient mécanosorptif (ms) dans la déformation totale pour une limite mécanosorptive (E_{ms}) de 45 MPa.

3.3.2.3 Effet de l'amplitude des oscillations de la teneur en eau dans la déformation totale

A partir de ces deux dernières analyses, nous avons choisi un jeu de paramètres « intermédiaires », soit le coefficient ms égal à 135 GPa^{-1} et E_{ms} égale à 45 MPa , pour étudier l'effet de l'amplitude de la teneur en eau avec une période de 2 heures (Figure 3.19). En augmentant l'amplitude, la déformation sous contrainte augmente aussi et tend plus rapidement vers la limite mécanosorptive, ce qui est parfaitement cohérent avec l'équation 3.13. Les variations cumulées de teneur en eau étant plus importantes pour un même nombre de cycle l'activation de la mécanosorption est plus forte. Ainsi, plus l'amplitude des oscillations est élevée, plus la déformation mécanosorptive tend rapidement (en nombre de cycle) vers la limite définie par E_{ms} lorsque l'échantillon est sous charge, ou plus la recouvrance est rapide dans la phase de décharge.

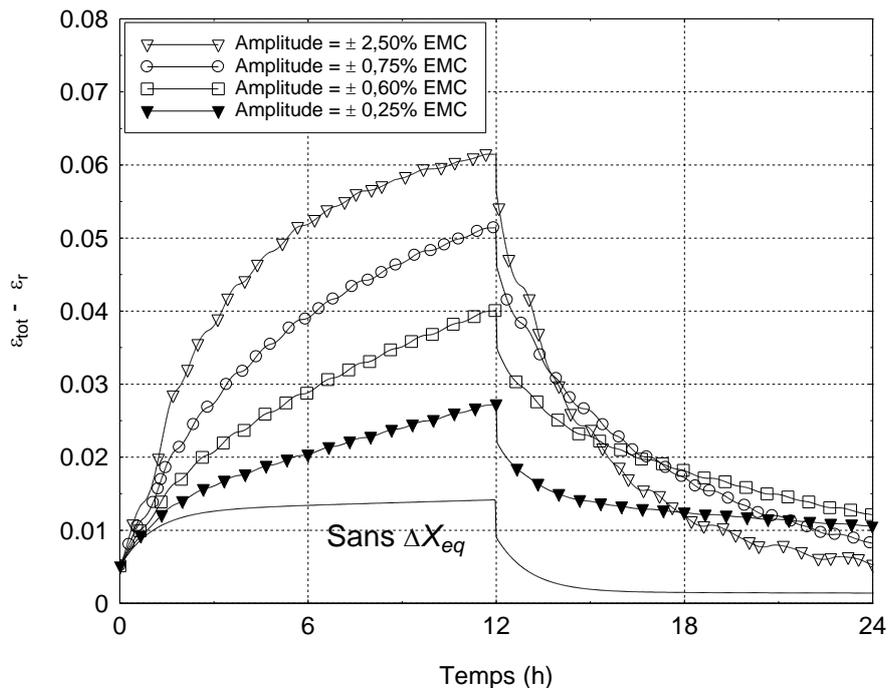


Figure 3.19. Effet de l'amplitude de la teneur en eau dans la déformation totale (période : 2 heures).

3.3.2.4 Effet de la période des oscillations dans la déformation totale

En ce qui concerne la période, plus elle est courte, plus le nombre de cycles par unité de temps est grande et plus le fluage mécanosorptif est activé. Inversement, au cours de la relaxation, plus la période est courte et plus la recouvrance sera rapide. Bien entendu, ce constat n'est valable que pour ce cas test avec un échantillon suffisamment fin pour garantir un champ de teneur en eau uniforme. Dans la Figure 3.20 la courbe correspondant à une période de 12 heures est à prendre avec précaution car dans notre simulation de 24 heures, seul deux cycles ont eu lieu, l'un pendant l'application de la contrainte et l'autre pendant la relaxation. Hormis cette courbe, on constate que la déformation maximale n'est pas inversement proportionnelle à la période.

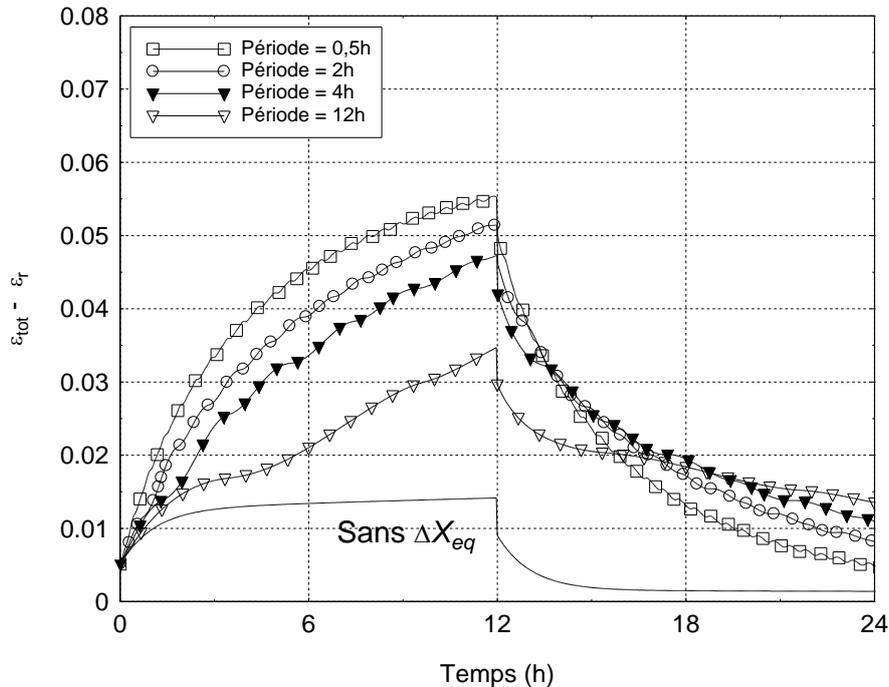


Figure 3.20. Effet de la période dans la déformation totale. ($\Delta X_{eq} = 0,75\%$)

Après avoir présenté la réponse du comportement mécanique pour cette configuration théorique simple, nous avons exploré le comportement mécanique d'un échantillon épais dont la teneur en eau initiale est éloignée de la teneur en eau d'équilibre de telle sorte qu'il sèche. En raison de la résistance aux transferts internes, un gradient de teneur en eau s'établit au sein de l'épaisseur ce qui induit des contraintes de séchage. Ce champ d'humidité variable et son histoire vont influencer fortement l'évolution du comportement mécanique dans l'épaisseur de l'échantillon. L'étude présentée en détail dans l'Annexe B nous a permis d'isoler avec l'aide de l'outil numérique des configurations de séchage intéressantes pour tenter d'apprécier les bénéfices des conduites oscillantes. Ces configurations, étudiées préalablement avec le code numérique, ont été reproduites au niveau expérimental et présentées dans le chapitre 4. Chacune de ces trois configurations de séchage présente la même évolution du champ de teneur en eau mais est différente au niveau mécanique :

- Séchage symétrique : transferts de masse et de chaleur au niveau des deux surfaces d'échange de la planche
- Séchage dissymétrique : transferts de masse et de chaleur au niveau d'une seule des deux surfaces d'échange de la planche
- Séchage sous charge : séchage symétrique mais avec un moment fléchissant imposé à l'échantillon.

Chacune de ces configurations a été testée pour une conduite constante et une conduite oscillante.

Il ressort de l'ensemble de ces résultats que le comportement mécanique testé n'est pas réaliste. Le modèle de comportement de la mécanosorption est tel que toutes les contraintes résiduelles peuvent être relaxées aux temps longs par les oscillations de teneur en eau en surface:

Chapitre 3

- Avec le modèle de Salin, la seule présence du module mécanosorptif donne au matériau une mémoire de forme totale, qui peut être retrouvée par activation hydrique,
- Sans ce module (modèle de Ranta-Maunus), c'est le couplage entre les différentes parties de la section, via l'équilibre mécanique global, qui permet le recouvrement tant que le champ de contrainte n'est pas complètement équilibré.

Ce modèle ne permet donc pas de retrouver les déformations permanentes effectivement observées lors des essais expérimentaux (Svensson et Toratti, 2002 ; Hanijarvi et Hunt, 1998). La mise en place dans le modèle d'une déformation mécanosorptive irrécouvrable semble donc absolument nécessaire pour modéliser correctement la double exigence rencontrée en séchage oscillant (activation hydrique permanente et contraintes équilibrées sur la section).

Conclusions

Dans de ce chapitre nous avons étudié dans un premier temps l'évolution des oscillations de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche par une approche analytique et une approche numérique. Les deux approches rendent compte d'une diminution des oscillations de teneur en eau de la surface d'échange vers l'intérieur de la planche selon un taux dépendant de la période. Des périodes plus longues permettent aux oscillations de teneur en eau de se produire dans des zones plus profondes de la planche. L'approche numérique, développée avec l'outil de simulation *TransPore*, permet une étude plus réaliste du séchage. Nous avons vu, par exemple, que l'amplitude et la profondeur perturbée par les oscillations évoluent au cours du processus. Ceci permet de guider la réflexion dans le choix des paramètres pertinents des conduites de séchage oscillantes. La confrontation des deux approches a mis en évidence les limites du modèle analytique qui échoue au niveau de la surface d'échange et aussi pour les faibles épaisseurs. Pour contourner ce problème, le domaine de validité du modèle analytique a été étendu au moyen de deux facteurs de correction obtenus à l'aide de l'outil numérique *TransPore*. Cela permet à la formulation analytique de devenir un outil particulièrement intéressant pour les utilisateurs de séchoirs n'ayant pas accès à un outil numérique sophistiqué.

La troisième partie de ce chapitre a été consacrée à l'étude du comportement mécanique en conduite oscillante. Nous avons testé le module mécanique de *TransPore* dans une configuration mécanique simple d'un échantillon fin en traction soumis à des conditions climatiques oscillantes, puis il a été utilisé sur des échantillons plus épais pour isoler des configurations de séchage intéressantes pour tenter d'apprécier les bénéfices des conduites oscillantes. Le comportement mécanique s'avère très sensible aux valeurs des paramètres mécanosorptifs. La période et l'amplitude ont aussi un effet dans le comportement mécanique. Aussi, le modèle mécanique utilisé semble-t-il peu raisonnable car il ne permet pas d'intégrer les déformations permanentes observées dans les travaux expérimentaux publiés.

Finalement, les résultats de ce chapitre mettent en évidence la difficulté à choisir les caractéristiques des oscillations pouvant améliorer la qualité du séchage conventionnel (sans oscillations) du bois. Les simulations effectuées et présentées dans l'Annexe B montrent la complémentarité d'informations apportées par le séchage sous charge et le séchage dissymétrique, notamment en ce qui concerne l'analyse du couple des propriétés viscoélastiques/mécanosorptives.

Ceci nous donne le fil directeur des essais à réaliser pour tester un modèle mécanosorptif et mieux comprendre l'effet des conduites oscillantes sur l'état des contraintes dans la planche. Le chapitre suivant présente des dispositifs et des résultats expérimentaux mis en place dans ce but.

