

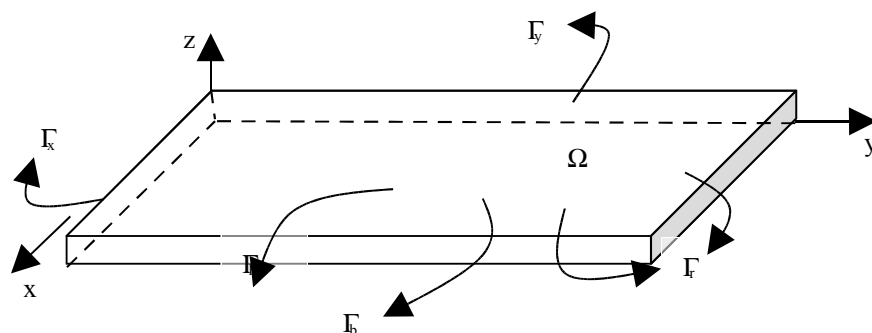
# Plan de stage

## Introduction

Dans le cadre du projet sur la modélisation du procédé de lamination des panneaux de fibres on s'intéresse au comportement thermique, hydrique et mécanique (le gauchissement) de panneau de composite à base de fibre de bois (MDF et HDF) lors de la lamination à chaud de papier décoration. Ce procédé est utilisé entre autre pour la production de panneaux servant à la fabrication de revêtement de plancher (plancher «flottant»). Le but étant de maîtriser la simulation par éléments finis du procédé et de pouvoir utiliser le modèle pour optimiser certains aspects du procédé (caractéristiques des matériaux, etc.).

L'application de chaleur sur le panneau a pour effet de modifier les caractéristiques du matériau ce qui peut produire des déformations du panneau (dilatation thermique). On doit aussi tenir compte d'effet hydrique puisque la chaleur provoque aussi, sous certaines conditions, des mouvements d'humidité qui a leur tour influence le comportement mécanique (dilatation hydrique). Les couplages, via les caractéristiques des matériaux, des trois variables d'états, température, humidité et déplacements du panneau, rendent complexe un système d'équation qui a priori semblent relativement simple.

Le stage s'inscrit dans ce projet de modélisation, il portera sur certains aspects simples du processus de lamination tout en tentant d'introduire un degré de complexité croissant au fur et à mesure du stage. Plus précisément on s'intéressera aux effets de variations des données initiales et des paramètres physiques sur le comportement du panneau de fibre (on exclura le papier de finition et de contre-balancement du problème). Il s'agit donc d'une étude sommaire de la sensibilité aux données d'un problème thermo-hygro-mécanique.



Description du domaine et des différentes entités.

## Équation du transfert de chaleur

$$C_T \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (K_T \nabla T) = 0 \quad \text{sur } \Omega \quad (1)$$

$T$  : température

$K_T$  : conductivité thermique

$t$  : temps

$C_T$  : chaleur spécifique effective

*Note* : a priori l'équation n'est pas explicitement couplée à l'humidité et aux déplacements. Ces couplages, s'ils existent, seront présents via les coefficients ou les conditions aux limites.

## Équation de transfert hydrique

$$C_M \frac{\partial M}{\partial t} - \nabla \cdot (K_M \nabla M + K_{TM} \nabla T) = 0 \quad \text{sur } \Omega \quad (2)$$

$M$  : teneur en humidité

$K_{TM}$  : coeff. de thermomigration (thermodiffusion)

$K_M$  : diffusivité effective

$C_T$  : capacité massique effective

*Note* : dans ce cas on a un couplage explicite avec la température  $T$  mais ici encore on peut aussi avoir un couplage mécanique via les coefficients ou les conditions limites.

## Équation des déplacements

Les variations de température et d'humidité dans le panneau peuvent avoir des effets suffisamment important pour changer de manière importante la nature du composite (grande déformation, plasticité, etc.). Néanmoins en première approche on suppose que ces variations permettent de rester dans le cadre des hypothèses d'un modèle d'élasticité linéaire (petites perturbations). On aura donc

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \nabla \cdot (E(\varepsilon(U)) - \beta_M \Delta M - \beta_T \Delta T) = 0 \quad \text{sur } \Omega \quad (3)$$

$$U = (U_1, U_2, U_3) \quad \varepsilon(U) = \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$\rho$  : masse volumique

$E$  : coefficients d'élasticité (tenseur d'ordre 4)

$U$  : déplacements

$\varepsilon$  : déformations (tenseur d'ordre 2)

$\beta_T$  : tenseur de dilatation thermique

$\Delta T$  : écart de  $T$  par rapport à une référence

$\beta_M$  : tenseur de dilatation hydrique

$\Delta M$  : écart de  $M$  par rapport à une référence

*Note* : le comportement mécanique est dynamique (i.e. évolue dans le temps). On peut cependant supposer que la composante inertielle (la contribution de la dérivée partielle en temps à l'équation) est négligeable. Cela correspond à permettre l'utilisation d'une approche quasi-statique pour résoudre le problème d'élasticité :

$$-\nabla \cdot (E(\varepsilon(\Delta U) - \beta_M(M - M_p) - \beta_T(T - T_p))) = 0 \quad \text{sur } \Omega \quad (5)$$

$$t \in [t_p, t_p + \Delta t_p] \quad U_{p+\Delta t_p} = \Delta U + U_p$$

$t_p$  : temps «précédent» (déjà calculer)  $\Delta t_p$  : incrément du temps relatif à  $t_p$

$\Delta U$  : incrément des déplacements  $M_p$  : valeur de  $M$  en  $t_p$

$U_p$  : déplacements en  $t_p$   $T_p$  : valeur de  $T$  en  $t_p$

On prendra garde d'exprimer aussi les conditions limites en fonction de l'incrément  $\Delta U$  plutôt que.

## Étape 0 : initiation à MEF++ et iMEF++

En premier lieu, une initiation à MEF++ et iMEF++. On travaillera donc sur

$$C_T \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (K_T \nabla T) = 0 \quad \text{sur } \Omega$$
$$C_M \frac{\partial M}{\partial t} - \nabla \cdot (K_M \nabla M + K_{TM} \nabla T) = 0 \quad \text{sur } \Omega$$

conditions initiales :  $M(0) = M_0$   $T(0) = T_0$

conditions limites :  $q_M = K_M \nabla M \cdot n = h(M - M_\infty) \quad \text{sur } \Gamma_r$   
 $T = T_p \quad \text{sur } \Gamma_h \cup \Gamma_b$

a) Construire le domaine avec iMEF++ et construire le programme dans MEF++.

En sortie du programme on a beaucoup d'informations.

b) Développer une méthode «souple» permettant de produire «facilement» des illustrations **pertinentes** des résultats : suivre dans le temps les variables d'états  $T$  et  $M$  en un point/sur l'épaisseur/sur tout le domaine. Que ce soit animation ou graphique.

## Étape 1 : sensibilité thermique et hydrique

Étude de sensibilité sur les équations de chaleur et humidité (les équations de l'étape 0). Il ne s'agit pas ici d'une étude exhaustive de la sensibilité, qui ne procéderait pas de la façon que l'on propose, mais plutôt d'explorer les possibilités d'effets importants dues à des variations plus ou moins importantes des données.

a) Dans un premier temps on voudrait connaître l'effet du maillage et du type d'interpolation sur la solution.

On voudrait aussi connaître l'effet de petites variations dans les données initiales ou les coefficients qui sont mesurés en laboratoire.

b) Effets des conditions initiales :

- $M_0 + = \varepsilon_M$   $T_0 + = \varepsilon_T$
- $M_0, T_0$  non-homogènes

c) Effets de variations de  $\rho, K_T, K_M, K_{TM}, C_T, C_M$

## Étape 2 : problème de contact et sensibilité mécanique

On travaille maintenant sur la sensibilité des déplacements et l'humidité. On complexifie en considérant un problème de contact pour les déplacements. Le problème de contact considéré ici diffère d'un problème usuel par ces conditions limites. Dans ce problème de contact on n'impose pas un déplacement (condition de Dirichlet) sur la composante verticale de  $U$  en un point mais plutôt une borne inférieure sur cette composante (ce qui correspond effectivement à un contact unilatéral : le panneau ne peut pas pénétrer le milieu sur lequel il est posé mais il peut s'en éloigner).

$$C_M \frac{\partial M}{\partial t} - \nabla \cdot (K_M \nabla M) = 0 \quad \text{sur } \Omega$$
$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \nabla \cdot (E(\varepsilon(U) - \beta_M \Delta M)) = 0 \quad \text{sur } \Omega$$

conditions initiales :  $M(0) = M_0$   $U(0) = U_0$   $\sigma(0) = E\varepsilon(U(0)) = \sigma_0$

conditions limites :  $q_M = K_M \nabla M \cdot n = h(M - M_\infty) \quad \text{sur } \Gamma_h$   
 $U_1 = 0 \quad \text{sur } \Gamma_y, \quad U_2 = 0 \quad \text{sur } \Gamma_x$   
 $U_3 \geq 0 \quad \text{sur } \Gamma_b$

Dans ce cas les programmes utilisés sont les programmes créés pour le projet.

- Sensibilité aux coefficients d'élasticité : module d'Young, cisaillement. Effet des variations de  $\rho, K_M, \beta_M, C_M, M_0, h$
- Effet de l'imposition de la gravité dans le problème.
- Étudier les avantages et désavantages de l'utilisation d'un schéma quasi-statique ou dynamique (schéma de Newmark) pour l'élasticité : temps CPU, espace mémoire, qualité de la solution.

### Étape 3 : problème de la pile de panneaux (si le temps le permet)

On a une pile de panneau en attente de traitement. Dépendant du temps d'attente et sous l'effet des conditions ambiantes on a déformations et modification de l'état initiale pour le problème de la lamination. Ce phénomène s'observe au moins sur le premier panneau, on travaillera donc seulement sur ce panneau.

Ce problème ajoute une composante intéressante puisque apparaît un couplage entre  $M$  et  $U$  dans via les conditions limites de l'équation de l'humidité. En utilisant les travaux des étapes précédentes on peut mesurer l'importance de ces variations des conditions initiales.

$$C_M \frac{\partial M}{\partial t} - \nabla \cdot (K_M \nabla M) = 0 \quad \text{sur } \Omega$$
$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \nabla \cdot (E(\varepsilon(U) - \beta_M \Delta M)) = 0 \quad \text{sur } \Omega$$

conditions initiales :  $M(0) = M_0 \quad U(0) = U_0 \quad \sigma(0) = E\varepsilon(U(0)) = \sigma_0$

conditions limites :  $q_M = K_M \nabla M \cdot n = h(M - M_\infty) \quad \text{sur } \Gamma_h$   
 $q_M = \chi(\{x \in \Omega \mid U_3(x) > 0\}) h(M - M_\infty) \quad \text{sur } \Gamma_b$   
 $U_1 = 0 \quad \text{sur } \Gamma_y, \quad U_2 = 0 \quad \text{sur } \Gamma_x$   
 $U_3 \geq 0 \quad \text{sur } \Gamma_b$

Où  $\chi$  est une fonction caractéristique : soit  $A$  un ensemble alors

$$\chi(A) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

- Introduire la nouvelle condition limite et résoudre le problème.
- Établir l'importance du phénomène relativement aux étapes 1 et 2.
- Établir les valeurs critiques de temps d'attente s'il y en a.

## Remarques

*Disponibilité* : j'envisage une visite d'une journée à toutes les 2 semaines environ. Naturellement on peut ajouter d'autres visites au besoin (pour préciser les différentes étapes entre autre).

*Courrier électronique* : [deteix@giref.ulaval.ca](mailto:deteix@giref.ulaval.ca)

Avant 15 :30 du lundi au vendredi je devrais répondre dans l'heure suivant la réception. Après cela je ne garanti rien.

Pour les questions purement techniques et nécessitant une réponse rapide Cristian fournira des réponses beaucoup plus rapidement.

Le plan du stage nous donne les moments pour des présentations des résultats et avancements des travaux (la fin de chacune des étapes). Ces présentations de fin d'étapes pourront être faites devant un auditoire plus ou moins important (dépend des disponi-bilité de chacun). Naturellement je serai toujours présent.

*Proposition* : dans la mesure ou il te faudra faire une présentation des travaux du stage lors d'un séminaire je propose que les présentations de fins d'étapes le soient sous forme de présentation Powerpoint. Tu auras ainsi à la fin du stage une première ébauche de ton séminaire. Il serait même possible, si le temps le permet, de présenter ce séminaire dans le cadre plus officiel du GIREF.

## Brouillon d'échéancier

		1	2	3	4
Étape 0	7				11
JUIN	14				18
	21				25
Étape 1	28				
				1	2
	5	6	7	8	9
JUILLET	12				16
Étape 2	19				23
	26				30
Étape 3	2				6
AOUT	9				13
	16				20
Séminaire ?	23				27