



**HAL**  
open science

**Modèle thermomécanique à haute température et à rupture pour les plaques multicouches carton-plâtre-carton soumises au feu. Expériences et simulations numériques**

S. Sakji, Christian Soize, J.-V. Heck

► **To cite this version:**

S. Sakji, Christian Soize, J.-V. Heck. Modèle thermomécanique à haute température et à rupture pour les plaques multicouches carton-plâtre-carton soumises au feu. Expériences et simulations numériques. 17ème Congrès Français de Mécanique 2005, AFM, Aug 2005, Troyes, France. pp.Pages: 1-6. hal-00773341

**HAL Id: hal-00773341**

**<https://hal.science/hal-00773341>**

Submitted on 13 Jan 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Modèle thermomécanique et à rupture pour les plaques multicouches carton-plâtre-carton soumises au feu. Expériences et simulation numérique.**

**Seddik Sakji(1)(2), Christian Soize(1) & Jean-Vivien Heck(2)**

(1) Université de Marne La Vallée,  
Laboratoire de Mécanique, Institut Navier, 5 boulevard Descartes, 75454 Marne La Vallée Cedex2  
sakji@univ-mlv.fr, seddik.sakji@cstb.fr, soize@univ-mlv.fr

(2) Centre scientifique et technique de bâtiment,  
Laboratoire de Modélisation, 84, Jean-Jaurès Champs sur marne  
jv.heck@cstb.fr

### **Résumé :**

*La réglementation en vigueur stipule que l'évaluation de la résistance au feu des cloisons requiert d'effectuer des essais en vraie grandeur. Ce type de test devient impossible lorsque les cloisons dépassent les cinq mètres (dimension maximale des fours existants). Le travail présenté correspond à une recherche dont les objectifs sont de développer un modèle de simulation numérique du comportement des cloisons de grande hauteur en présence d'incertitudes de modélisation. Dans une première étape de cette recherche, on développe un modèle thermomécanique multicouche moyen pour les panneaux carton-plâtre-carton. Le modèle développé s'adapte à un champ de température au cours duquel le carton et le plâtre peuvent subir un endommagement partiel ou total. Ce modèle est aussi développé pour un champ de contrainte qui correspond à la rupture du carton et/ou du plâtre. Une formulation et un code éléments finis ont été développés. Les résultats de simulation sont comparés avec les résultats d'essais thermomécaniques réalisés suivant un protocole expérimental spécialement développé pour cette recherche. Une description du protocole expérimental est donnée.*

### **Abstract :**

*Generally, the standard rules require conventional tests at scale one in order to justify the fire resistance of loaded plasterboard lined partitions. Such tests cannot be performed when panel dimensions exceed five meters. This paper corresponds to a research whose objectives are to develop a numerical simulation model validated with experiments in order to model large panel behavior. In this research a first step, is to develop a complete thermo-mechanical model for multilayer composite panel constituted of cardboard-plaster-cardboard (CPC). The developed model is adapted to a range of temperature for which the cardboard and the plaster can be destroyed. This model is also developed for a level of stress corresponding to the rupture of the cardboard and the plaster. The mathematical-mechanical model and numerical simulations are performed with a dedicated finite element code and the numerical results are compared to thermo-mechanical experiments especially developed in the context of this research. A description of the experiments is given.*

### **Mots-clefs :**

**Modèle thermomécanique; rupture ; plaque multicouche carton-plâtre-carton ; résistance au feu ; expérimentation**

## **1 Introduction**

L'évaluation de la résistance au feu des cloisons légères requiert d'effectuer des essais conventionnels en vraie grandeur. Ce type de test devient impossible lorsque les cloisons dépassent les cinq mètres (dimension maximale des fours existants). Une voie possible pour contourner ce problème dimensionnel consiste à adopter une démarche mixte associant l'expérimentation à la simulation numérique. Benouis [1] a suivi une telle démarche pour prévoir le

comportement d'une cloison à température ambiante tout en considérant les plaques comme un matériau homogène. Le travail présenté correspond à une recherche dont les objectifs sont de développer un modèle de comportement thermomécanique à rupture de panneau multicouche carton-plâtre-carton (CPC). Dans le modèle final on prend en compte l'incertitude de modélisation. Dans cet article, on décrit la première phase qui concerne la caractérisation et le développement du modèle moyen des plaques multicouches de parement. Il est structuré en quatre parties. La première concerne les mesures expérimentales pour des essais thermomécaniques sur des plaques multicouches CPC. Ces essais thermomécaniques sont réalisés suivant un protocole expérimental mettant en oeuvre un banc expérimental spécialement conçu pour cette recherche. La deuxième partie concerne le développement d'un modèle moyen thermomécanique multicouche homogénéisé pour les CPC. Le modèle est adapté pour un champ de température au cours duquel le carton et le plâtre peuvent subir un endommagement partiel ou total. Une formulation éléments finis a été développée ainsi qu'un code éléments finis permettant de simuler numériquement le comportement thermomécanique à rupture de tel panneau. La troisième partie concerne l'identification des paramètres des lois de comportement thermomécanique des différents matériaux du CPC soumis à différents historiques de sollicitation thermique. La quatrième partie concerne la comparaison des prévisions du modèle numérique avec les essais de la première partie en vue de valider le modèle.

## **2 Essais de caractérisation thermomécanique des plaques multicouches carton-plâtre-carton**

Dans l'approche expérimentale adoptée, la phase hydrique n'est pas modélisée implicitement. En effet, les caractéristiques thermomécaniques des différents matériaux du multicouche sont déterminées pour des échantillons ayant subi le même historique de sollicitation thermique que celui des essais de résistance au feu c'est à dire selon la courbe ISO 834 [2]. Pour ce faire nous avons opté pour une approche expérimentale en deux étapes :

1. Sollicitation thermique par le biais d'un banc de sollicitation thermique (BST) conçu spécialement pour cette recherche
2. Essais de caractérisation mécanique par le biais d'un banc de flexion circulaire.

### **2.1 Banc de sollicitation thermique (BST)**

Le BST [3] permet de reproduire sur des éprouvettes de  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  le flux incident équivalent à celui que recevrait un panneau lors d'un essai réglementaire dans les fours d'essai. Il se compose d'un panneau radiant qui constitue la source de chaleur rayonnante et d'un chariot mobile muni d'un porte-éprouvette. L'opération de sollicitation thermique de l'éprouvette a lieu une fois que le panneau radiant ait atteint son régime permanent. De ce fait, nous pouvons considérer son éclairage comme constant tout au long de la durée d'un essai. Le flux de chaleur équivalent à la sollicitation thermique ISO reçu par l'éprouvette est reproduit, non pas en variant le débit de gaz combustible comme il se fait au niveau des essais réglementaires, mais en déplaçant cette dernière par rapport au panneau radiant. Pour ce faire l'éprouvette est placée sur un chariot mobile mu par un moteur pas à pas. La combinaison d'une source de chaleur utilisée en régime permanent et du déplacement de l'éprouvette contrôlé au millimètre près assure une excellente reproductibilité des sollicitations thermique. Par ailleurs, le code Echaffo [4] permettant de modéliser le transfert thermique dans les fours d'essai nous a permis d'avoir l'historique du flux thermique que reçoit un échantillon lors d'un essai de résistance au feu et

de déterminer ensuite l'historique du déplacement du chariot du BST pour reproduire la sollicitation thermique ISO sur les éprouvettes à caractériser. Des essais effectués avec un fluxmètre total monté sur le BST ont permis de valider cette approche de sollicitation thermique et ont montré une bonne répétitivité.

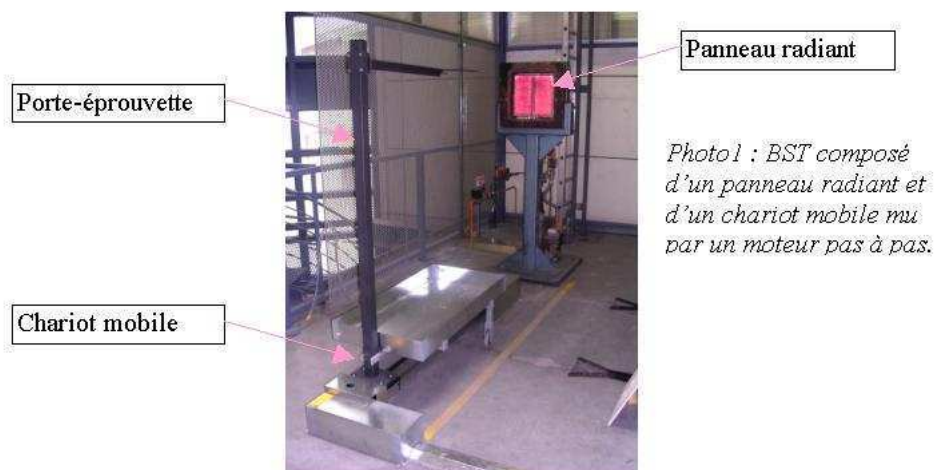


FIG. 1 – Banc de sollicitation thermique.

Une fois exposée à un historique de sollicitation thermique, l'éprouvette est soumise à un essai de flexion dans un délais de temps ne dépassant pas les 30s. Cet essai est réalisé sur un banc de flexion circulaire d'une presse Instron asservie en déplacement avec une vitesse de  $0,5\text{cm}/\text{min}$ .

## 2.2 Résultats de caractérisation thermomécanique des plaques de plâtre BA13 STD

Comme les plaques de plâtres sont des matériaux orthotropes, les essais de flexion ont été réalisés suivant les directions longitudinale, transversale et à  $45^\circ$  et ce à différents paliers de sollicitation thermique ISO. Pour chaque configuration (sens de sollicitation mécanique/historique de sollicitation thermique) six éprouvettes ont été testées. A titre indicatif, on présente sur la figure 2.a les résultats d'essais de flexion à différentes températures suivant le sens longitudinal des plaques. La dispersion des résultats aussi bien sur la pente que sur la force de rupture est aussi visible dans les autres configurations d'essais. On présente sur la figure 2.b la variation du module d'élasticité en fonction de la température pour les trois directions de sollicitation.

Le CPC présente un comportement non linéaire conditionné par le comportement de ces différents constituants. En effet, le plâtre ayant un comportement élastique fragile, présente une contrainte de rupture très faible par rapport à celle du carton ce qui entraîne une baisse de la rigidité globale du multicouche.

## 2.3 Caractérisation du plâtre et du carton

Une humidification du plâtre de l'ordre de 5% fait baisser de moitié sa résistance mécanique. Ce paramètre n'ayant pas pu être contrôlé, on présente ces résultats d'essais à titre indicatif. Les essais montrent que le plâtre a un comportement élastique fragile avec une contrainte à la rupture de l'ordre de 1.32MPa.

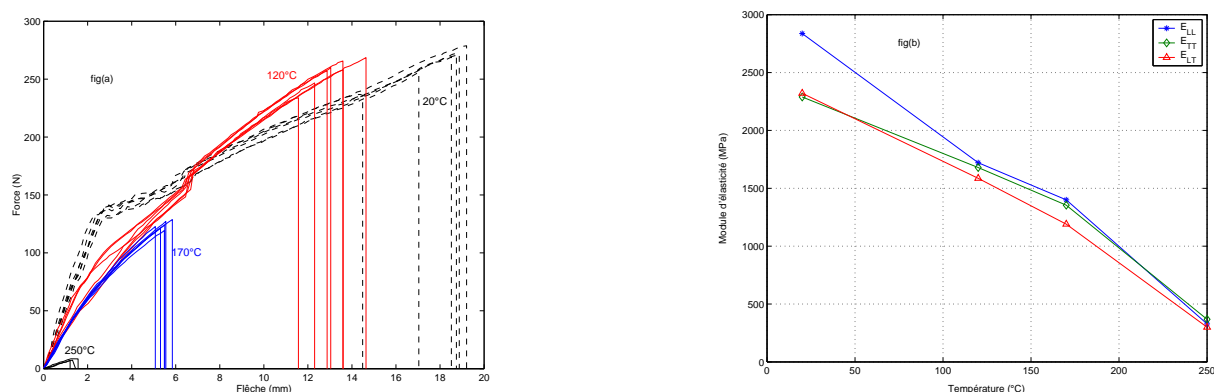


FIG. 2 – Essais thermomécaniques sur le CPC.

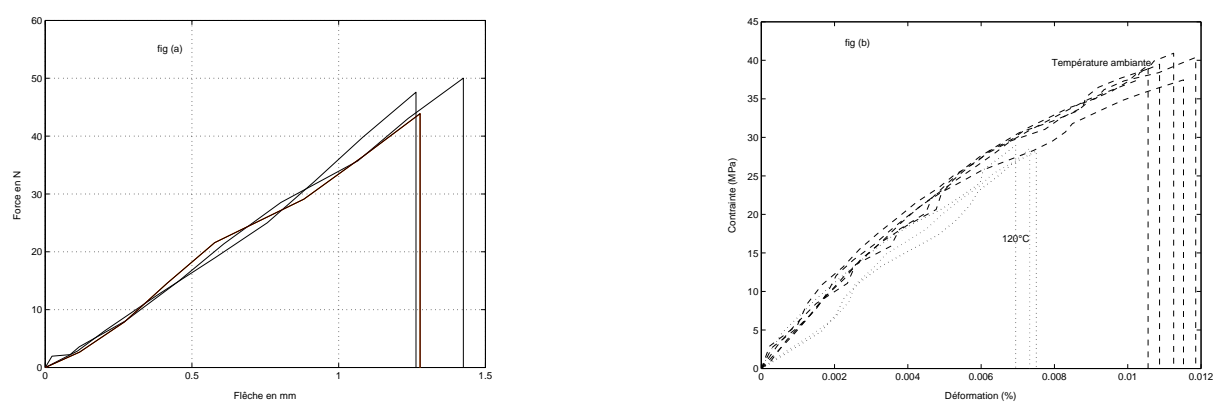


FIG. 3 – Essais de flexion sur le plâtre (figure a), essais de traction sur du carton (figure b).

D'après les essais réalisés sur le carton à température ambiante on voit qu'il présente un comportement élastoplastique avec un léger adoucissement. Sa contrainte à la rupture est de l'ordre de 40MPa. Les essais réalisés sur les deux matériaux montrent une forte dispersion.

### 3 Modèle de plaque multicouche homogénéisé avec endommagement

Par une homogénéisation sur l'épaisseur de la plaque [5], [6], les huit relations qui expriment les efforts globaux généralisés en fonction des déformations globales généralisées sont données par (1);

$$\begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_6 \\ - \\ m_1 \\ m_2 \\ m_6 \\ - \\ m_4 \\ m_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{H}_{11} & \underline{H}_{12} & \underline{H}_{16} & | & \underline{B}_{11} & \underline{B}_{12} & \underline{B}_{16} & | & 0 & 0 \\ \underline{H}_{12} & \underline{H}_{22} & \underline{H}_{26} & | & \underline{B}_{12} & \underline{B}_{22} & \underline{B}_{26} & | & 0 & 0 \\ \underline{H}_{16} & \underline{H}_{26} & \underline{H}_{66} & | & \underline{B}_{16} & \underline{B}_{26} & \underline{B}_{66} & | & 0 & 0 \\ - & - & - & | & - & - & - & | & - & - \\ \underline{B}_{11} & \underline{B}_{12} & \underline{B}_{16} & | & \underline{C}_{11} & \underline{C}_{12} & \underline{C}_{16} & | & 0 & 0 \\ \underline{B}_{12} & \underline{B}_{22} & \underline{B}_{26} & | & \underline{C}_{12} & \underline{C}_{22} & \underline{C}_{26} & | & 0 & 0 \\ \underline{B}_{16} & \underline{B}_{26} & \underline{B}_{66} & | & \underline{C}_{16} & \underline{C}_{26} & \underline{C}_{66} & | & 0 & 0 \\ - & - & - & | & - & - & - & | & - & - \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & 0 & | & \underline{F}_{44} & \underline{F}_{45} \\ 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & 0 & | & \underline{F}_{45} & \underline{F}_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1^m \\ e_2^m \\ e_6^m \\ - \\ \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_6 \\ - \\ e_4 \\ e_5 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} h'_1 \\ h'_2 \\ h'_6 \\ - \\ b'_1 \\ b'_2 \\ b'_6 \\ - \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T \quad (1)$$

Dans l'Equation (1),  $h'_i = \underline{H}_{ij}\alpha_j$ ,  $i$  et  $j = 1,2,6$ ,  $b'_i = \underline{B}_{ij}\alpha_j$ ,  $i$  et  $j = 1,2,6$ . Les termes  $\underline{H}_{ij} = \sum_{k=1}^3 \tilde{Q}_{ij}^k(\mathbf{x})(z_k - z_{k-1})$ , correspondent aux coefficients de rigidité qui relient les forces globales de membrane  $n_i$  aux déformations de membrane  $e_i^m$ ,  $i$  et  $j = 1,2,6$ . Les termes  $\underline{C}_{ij} = \underline{C}_{ji} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 \tilde{Q}_{ij}^k(\mathbf{x})(z_k^3 - z_{k-1}^3)$ ,  $i$  et  $j = 1,2,6$  correspondent aux rigidités globales de flexion qui relient les moments globaux de flexion  $m_i$  aux déformations globales de flexion  $\kappa_i$ ,  $i = 1,2,6$ . Les termes  $\underline{B}_{ij} = \underline{B}_{ji} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \tilde{Q}_{ij}^k(\mathbf{x})(z_k^2 - z_{k-1}^2)$ ,  $i$  et  $j = 1,2,6$  correspondent aux termes de rigidité globale de couplage membrane-flexion qui relient les forces globales de membrane  $n_i$ ,  $i = 1,2,6$  aux déformations globales de flexion  $\kappa_i$ ,  $i = 1,2,6$  et les moments globaux de flexion  $m_i$  aux déformations globales de membrane  $e_i^m$ ,  $i = 1,2,6$ . Les termes  $\underline{F}_{ij} = \underline{F}_{ji} = \tau_{ij} \sum_{k=1}^3 \tilde{Q}_{ij}^k(\mathbf{x})(z_k - z_{k-1})$ ,  $i$  et  $j = 4,5$  correspondent aux rigidités de plaque pour les efforts tranchants. Avec  $\tau_{ij}$  le facteur de correction du cisaillement transversal calculé suivant le principe d'équivalences énergétique de manière à ce que la rigidité en cisaillement transverse du modèle plaque corresponde à celle définie par la théorie de l'élasticité tridimensionnelle. Les coefficients  $\tilde{Q}_{ij}^k(\mathbf{x})$  sont les coefficients de rigidité membranaire de la couche  $k$  à l'état endommagé et sont reliés aux coefficients de rigidité membranaire suivant l'expression;  $\tilde{Q}_{ij}^k(\mathbf{x}) = (1 - d_{ij}^k(\mathbf{x}))Q_{ij}^k(\mathbf{x})$  où  $d_{ij}^k(\mathbf{x})$  est le coefficient de l'endommagement de la couche indéxé par  $k$  et affecté au coefficient  $Q_{ij}^k(\mathbf{x})$ . On a  $Q_{11}^k = \frac{E_1^k}{1-\nu_{21}^k\nu_{12}^k}$ ,  $Q_{12}^k = \frac{\nu_{21}^k E_1^k}{1-\nu_{21}^k\nu_{12}^k}$ ,  $Q_{21}^k = \frac{\nu_{21}^k E_2^k}{1-\nu_{21}^k\nu_{12}^k}$ ,  $Q_{22}^k = \frac{E_2^k}{1-\nu_{21}^k\nu_{12}^k}$ ,  $Q_{66}^k = G_{13}^k$  et  $Q_{61}^k = Q_{16}^k = Q_{26}^k = Q_{62}^k = 0$ . Un élément de plaque multicouche avec les hypothèses de Reissner-Mindlin a été construit et un code éléments finis[7] a été développé sous Matlab. L'élément implémenté est de type Serendip avec une interpolation quadratique. Pour traduire l'endommagement progressif du plâtre, ce dernier a été discrétisé en quatre couches. Dès que la contrainte au niveau d'une couche d'un élément finis atteint la contrainte de rupture correspondante, on lui affecte une valeur d'endommagement unitaire.

#### 4 Simulation numérique du comportement du multicouche CPC

Les simulations effectuées concernent une modélisation de l'essai de flexion selon le sens longitudinal et à température ambiante des plaques BA13 STD. Le code EF développé a été alimenté en données par les valeurs moyennes des résultats expérimentaux évoqués dans le deuxième paragraphe. En vue d'implémenter le modèle probabiliste non paramétrique autour de ce code, les différents matériaux, aussi bien le plâtre que les deux cartons, ont été considérés comme matériaux élastiques fragiles, ce qui n'est vraiment pas le cas pour le carton puisqu'il présente une légère plasticité.

La figure 4 représente une comparaison entre la simulation numérique et les résultats d'essais. Le changement de pente correspond à la rupture progressive du plâtre. Le modèle reproduit quantitativement le comportement global du multicouche.

#### 5 Conclusions

L'approche expérimentale adoptée a permis de prendre en compte implicitement la phase hydrique et de modéliser les plaques carton-plâtre-carton avec un modèle thermomécanique à

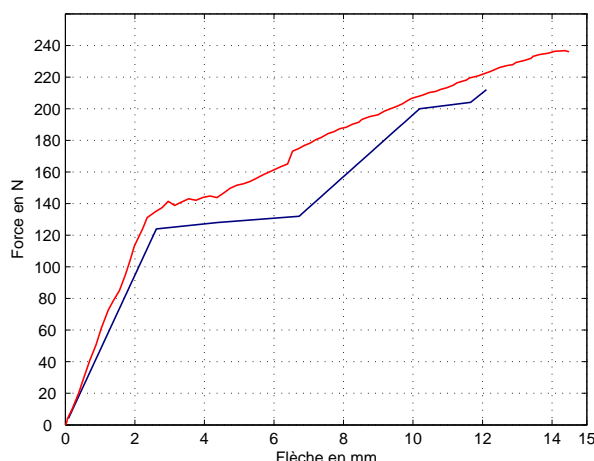


FIG. 4 – Courbe de la simulation (trait bleu) et courbe d'un essai de flexion sur le CPC (trait rouge).

rupture. Pour cette approche on a conçu et réalisé un banc de sollicitation thermique permettant de reproduire la sollicitation thermique selon la courbe ISO qu'on a brièvement présenté. Des essais effectués à l'aide de ce banc ont permis d'alimenter en données le modèle thermomécanique moyen de la plaque multicouche développé. Compte tenu des hypothèses sur le comportement du carton, le modèle mécanique de plaque multicouche homogénéisée avec prise en compte de l'endommagement reproduit assez bien le comportement global du multicouche. Le modèle thermomécanique présenté concerne le modèle moyen. Les travaux en cours sont relatifs à une modélisation probabiliste non paramétrique qui prendra en compte aussi bien l'incertitude sur les paramètres que sur la modélisation.

## Références

- [1] A. Benouis. *Comportement mécanique des ouvrages en plaque de plâtre sur ossature métallique*. PhD thesis, Ecole nationale des ponts et chaussées, septembre 1995.
- [2] European prestandard. *Eurocode1: Basis of design and actions on structures, Part 2-2: Actions on structures exposed to fire*.
- [3] J.V. HECK C. SOIZE S. SAKJI, P.FROMY. Fire resistance of a light partition assessment using a combined experimental (bench of thermal load) and numerical approach. In *8th International Symposium on Fire Safety Science, Beijing, Chine*. International Association for Fire Safety Science, Septembre 2005.
- [4] M. Curtat Ph. Fromy. Heat transfer in fire resistance furnaces piloted with thermocouples or plate thermometers. In Marne-La-Vallée France Michel Curtat, CSTB, editor, *Fire safety science -proceeding of the six international symposium*, pages 531–542. International Association for Fire Safety Science, 1999.
- [5] M.H. Philippe. *Etude de quelques modélisations de structures en composite a haute rigidité en flexion*. PhD thesis, Ecole nationale des ponts et chaussées, avril 1997.
- [6] C. Decolon. *Structures composites, calcul des plaques et poutres multicouches*. Hermes, Paris, 2000.
- [7] O. C. Zienkiewicz. *The finite element method in structural and continuum mechanics*. Third edition, Mc Graw Hill Book company. London, 1979.