

Modèle probabiliste d'homogénéisation des plaques multicouches carton-plâtre-carton: expérimentations et simulations

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

► **To cite this version:**

S. Sakji, Christian Soize, J.-V. Heck. Modèle probabiliste d'homogénéisation des plaques multicouches carton-plâtre-carton: expérimentations et simulations. 4ème Conférence Nationale JNF'05 sur la Fiabilité des Matériaux et des Structures, Université Blaise Pascal, Oct 2005, Clermont-Ferrand, France. pp.Pages: 1-10. hal-00773354

HAL Id: hal-00773354

<https://hal-upec-upem.archives-ouvertes.fr/hal-00773354>

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 probabiliste d'homogénéisation des plaques multicouches carton-plâtre-carton - Expérimentations et simulations.

Probabilistic homogenization model of cardboard-plaster-cardboard multilayer - Experiments and numerical simulation

S. Sakji^{*1, 2}, C. Soize², J.V. Heck¹

¹ **Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Paris, France.**

² **Laboratoire de Mécanique (LAM), Université de Marne-la-Vallée (UMLV), Paris, France.**

RÉSUMÉ – *On propose dans cet article l'application de l'approche probabiliste non-paramétrique à la modélisation du comportement thermomécanique des plaques multicouches carton-plâtre-carton (CPC). On présente l'approche expérimentale qui a permis la caractérisation thermomécanique des CPC prenant implicitement en compte la phase hydrique. Les résultats expérimentaux issus de cette caractérisation valident le modèle moyen non linéaire d'homogénéisation autour duquel le modèle probabiliste est construit.*

ABSTRACT – *This paper deals with a non parametric probabilistic approach for modelling the multilayer cardboard-plaster-cardboard (CPC) thermomechanical behaviour. We present first, the experimental approach which allows the thermomechanical characterization of the CPC taking implicitly into account the hydrous phase. Secondly we present the developed CPC non-linear mean model of homogenization which simulation results are compared to the experimental ones. Finally we present the probabilistic non linear model of the multilayer homogenization.*

Introduction

L'évaluation par la voie expérimentale de la résistance au feu des cloisons légères de grande hauteur est limitée par la dimension des fours d'essais existants. Cet article présente une recherche dont le but est de développer un modèle de simulation numérique pour évaluer la résistance au feu de ce type de cloison. On s'intéresse dans cet article aux parements des cloisons et on propose une modélisation probabiliste non paramétrique du comportement thermomécanique des plaques multicouches carton-plâtre-carton (CPC). Construit autour d'un modèle moyen d'homogénéisation de plaque multicouche CPC, ce modèle probabiliste prend en compte aussi bien les incertitudes sur les données que les incertitudes de modélisation. Il est à même de reproduire les effets conjoints d'historiques de température et de chargement au cours desquels le carton et le plâtre peuvent subir un endommagement partiel ou total.

Cet article est structuré en trois parties. La première partie concerne la caractérisation expérimentale des propriétés thermomécaniques des plaques CPC. Les essais thermomécaniques montrent une forte dispersion des résultats. La deuxième partie présente le modèle moyen non linéaire d'homogénéisation développé pour les plaques multicouches. Ce modèle est basé sur une homogénéisation selon l'épaisseur du CPC et aboutit à une loi de comportement généralisée du multicouche avec prise en compte de l'endommagement. Une modélisation aux éléments finis et une comparaison entre simulations et essais thermomécaniques sur le multicouche seront présentées. La troisième partie présente le développement du modèle aux éléments finis stochastique qui met en évidence des paramètres de dispersion propres à chaque matériau du CPC et dépendants

de la température. Elle est complétée par la comparaison des prévisions numériques du modèle probabiliste avec les résultats d'essais.

Caractérisation expérimentale des propriétés thermomécaniques des parements CPC.

L'approche retenue pour l'identification des caractéristiques des plaques CPC est de type thermomécanique. Dans cette approche on prend en compte implicitement la phase hydrique contenue dans le plâtre. Ceci suppose que lors des essais sur les différents matériaux du CPC on reproduise le même type de sollicitation que celui subi par les plaques de plâtre lors des essais normalisés. Pour cela, la plaque, placée parallèlement à la source de chaleur, est sollicitée sur l'une de ses faces selon l'historique de sollicitation thermique correspondant à la courbe nominale ISO834. De ce fait, le flux de chaleur et le transfert hydrique dans la plaque lui sont essentiellement normaux.

Les essais se déroulent en deux étapes :

- Sollicitation thermique par le biais d'un banc conçu à cet effet.
- Essais de caractérisation mécanique à l'aide d'un banc de flexion circulaire.

1.1. Banc de sollicitation thermique (BST)

Le BST permet de reproduire sur des éprouvettes de 40x40 cm² le flux incident équivalent à celui que reçoit une cloison lors d'un essai réglementaire dans un four de résistance au feu.



Figure 1 : banc de sollicitation thermique

Le BST est composé d'un panneau rayonnant qui constitue la source de chaleur et d'un chariot mobile muni d'un porte-échantillon. L'opération de sollicitation thermique de l'éprouvette n'a lieu qu'une fois que le panneau rayonnant a atteint son régime permanent. De ce fait, nous pouvons considérer son éclairement comme constant tout au long de la durée d'un essai. Le flux de chaleur reçu par l'éprouvette est reproduit en déplaçant cette dernière par rapport au panneau rayonnant. Pour ce faire l'éprouvette est placée sur un chariot mobile

mu par un moteur pas à pas programmable. Pour définir le mouvement du chariot nous avons procédé en trois étapes. En premier lieu, le logiciel ECHAFO (Fromy et Curtat 1999), développé au CSTB pour modéliser les échanges thermiques dans un four d'essai, a permis de calculer l'évolution du flux total reçu à la surface d'un parement au cours d'un essai de résistance au feu. Ensuite le calcul théorique de la distance du parement à la source permettant de reproduire cette évolution du flux a permis la programmation du déplacement du chariot. Enfin, la mise en place d'un fluxmètre à la place de l'éprouvette a permis d'ajuster le programme. La combinaison d'une source de chaleur utilisée en régime permanent et du déplacement de l'éprouvette contrôlé au millimètre, assure une excellente reproductibilité des sollicitations thermiques (figure 2).

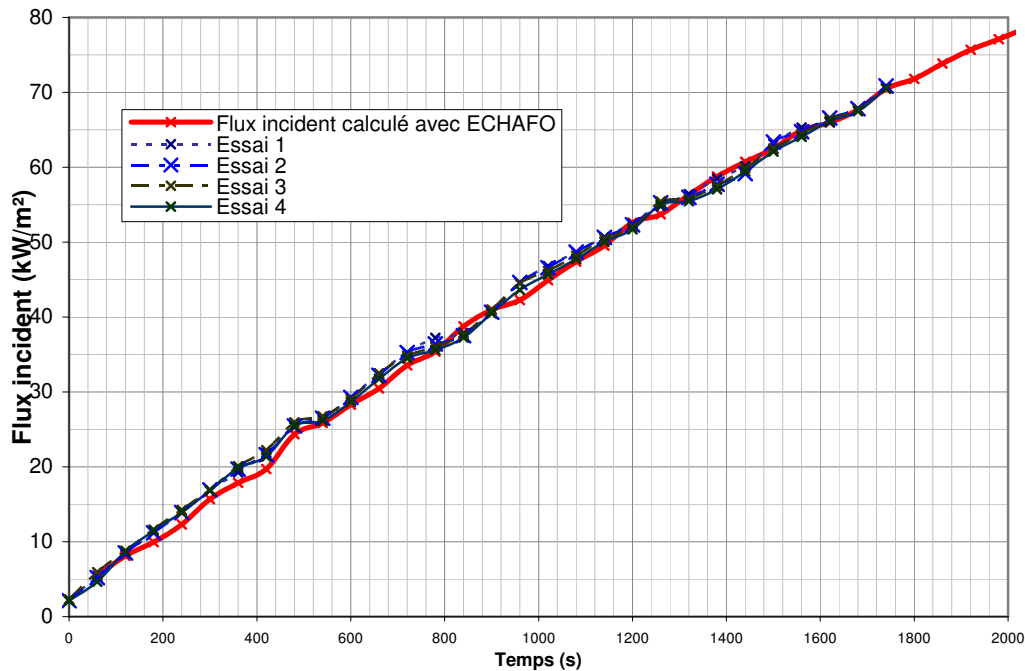


Figure 2 : essais de validation du BST : flux incident (KW/m²) en fonction du temps en secondes : trait épais : flux incident calculé avec ECHAFO, traits minces : différents tests de mesure de flux par le biais d'un fluxmètre.

La sollicitation thermique effectuée, l'éprouvette est transférée du banc thermique au banc de flexion circulaire, suffisamment rapidement pour éviter perte de chaleur et réhydratation.

Essais de caractérisation thermomécanique du multicouche CPC

Le multicouche CPC présente un comportement orthotrope dans son plan. Sa caractérisation nécessite, en l'absence d'essais de cisaillements trop compliqués à réaliser, des essais de flexion dans trois directions à 45° les unes des autres. Des essais de flexion sont donc réalisés à différents instants de l'historique de sollicitation thermique selon le sens longitudinal, transversal et à 45°.

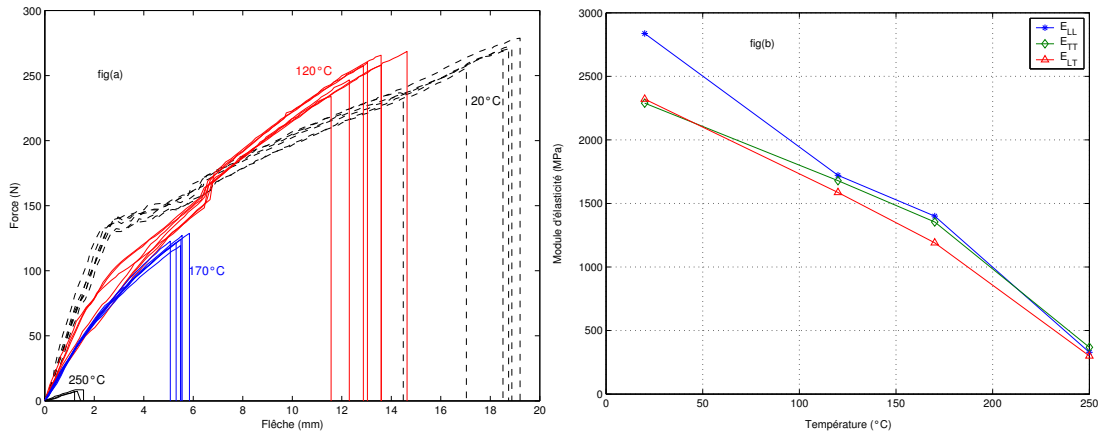


Figure 3 : caractérisation thermomécanique du multicouche. Fig 3.a : essais thermomécanique à différentes températures : courbe de la force (N) en fonction de la flèche en (mm) à 20, 120, 170 et 250°C. Fig 3.b : module d'Young du CPC en fonction de la température : trait rouge (E_{LT}), trait vert (E_{TT}), trait bleu (E_{LL}).

Modèle moyen de plaque multicouche avec endommagement

Loi de comportement généralisée du multicouche

Considérons une plaque multicouche formée par les trois milieux physiques (indiqués j) carton 1, plâtre et carton 2, discrétisée en n couches (indiquées k).

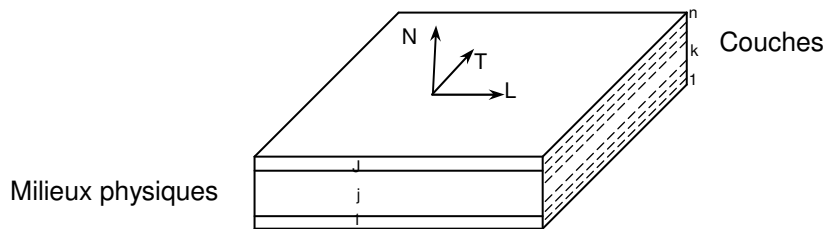


Figure 4 : représentation schématique du multicouche

Par une homogénéisation (Decolon 2000) selon l'épaisseur du multicouche et en adoptant les hypothèses de plaque de Reissner Mindlin, on obtient les huit relations qui expriment les efforts globaux généralisés en fonction des déformations globales généralisées selon;

$$\begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_6 \\ m_1 \\ m_2 \\ m_6 \\ n_4 \\ n_5 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{[H]} & \mathbf{[B]} & 0 \\ \text{Rigidité de membrane} & \text{Rigidité de couplage membrane flexion} & \\ \mathbf{[B]} & \mathbf{[C]} & 0 \\ \text{Rigidité de couplage membrane flexion} & \text{Rigidité de flexion} & \\ 0 & 0 & \mathbf{[F]} \\ & & \text{Rigidité de cisaillement transverse} \end{bmatrix}}_{\mathbf{[A^g]}} \cdot \begin{pmatrix} e_1^m \\ e_2^m \\ e_6^m \\ \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_6 \\ e_4 \\ e_5 \end{pmatrix} \quad (1)$$

avec les indices {1, 2, 4, 5, 6} correspondant respectivement à {LL, TT, TN, NL, LT}
et

$$\left\{ \begin{array}{l} [H]_{i\ell} = \sum_{k=1}^n (z_k - z_{k-1}) \cdot \tilde{Q}_{i\ell}^k(x), \quad (i \text{ et } \ell = 1, 2, 6), \\ [C]_{i\ell} = 1/3 \cdot \sum_{k=1}^n (z_k^3 - z_{k-1}^3) \cdot \tilde{Q}_{i\ell}^k(x), \quad (i \text{ et } \ell = 1, 2, 6), \\ [B]_{i\ell} = 1/2 \cdot \sum_{k=1}^n (z_k^2 - z_{k-1}^2) \cdot \tilde{Q}_{i\ell}^k(x), \quad (i \text{ et } \ell = 1, 2, 6), \\ [F] = \sum_{k=1}^n (z_k - z_{k-1}) \begin{bmatrix} G_{TN}^k & 0 \\ 0 & G_{NL}^k \end{bmatrix}. \end{array} \right.$$

Les termes $\tilde{Q}_{i\ell}^k(x)$ correspondent aux coefficients de rigidités membranaires du modèle moyen à l'état endommagé et sont reliés aux coefficients de rigidités du matériau sain par l'intermédiaire de variables d'endommagement relatives à chaque couche k ($\tilde{Q}_{i\ell}^k(x) = (1 - d_{i\ell}^k) Q_{i\ell}^k(x)$ avec $Q_{11}^k = E_L / (1 - \nu_{LT} \nu_{TL})$, $Q_{22}^k = E_T / (1 - \nu_{LT} \nu_{TL})$, $Q_{26}^k = Q_{62}^k = Q_{16}^k = Q_{61}^k = 0$, $Q_{66}^k = G_{LT}$ et $Q_{12}^k = \nu_{LT} E_T / (1 - \nu_{LT} \nu_{TL}) = Q_{21}^k$).

Modèle moyen non-linéaire de plaque multicouche

Un code éléments finis a été développé sous Matlab. La loi de comportement précédente a été implémentée dans ce code conjointement à un élément de plaque de type Serendip avec une interpolation quadratique. Pour traduire l'endommagement progressif du plâtre, deux modèles d'endommagement ont été implémentés. Le premier modèle est de type « cut-off » où le plâtre est discrétisé en seize couches et dès que la contrainte au niveau d'une couche d'un élément fini atteint la contrainte de rupture correspondante, on lui affecte un endommagement total.

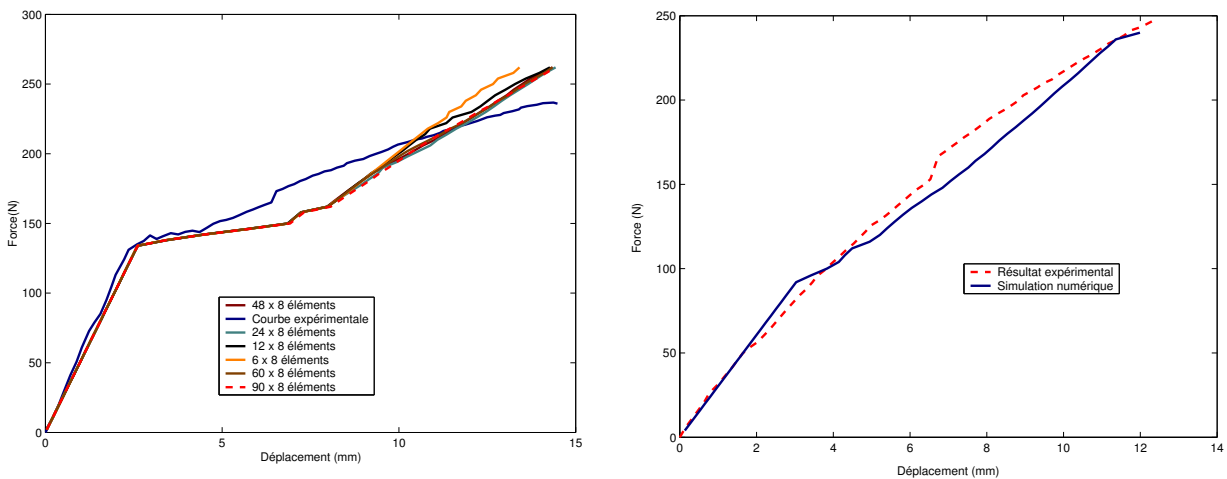


Figure 5 : Modèle « cut off » : force appliquée (N) en fonction de la flèche (mm). Fig 5.a : résultats à la température ambiante, fig 5.b : résultats à 120°C.

On constate qu'à la température ambiante, le modèle « cut-off » engendre un endommagement trop brutal du plâtre (palier sur la figure 5 à gauche). Pour corriger ce

défaut, un modèle d'endommagement pour les matériaux fragiles (Najar 1987) a été implémenté. Ce modèle est basé sur une formulation énergétique symétrique en compression et en traction de l'endommagement. Pour chaque couche du CPC discrétisé, la loi d'endommagement s'écrit,

$$d^k = \begin{cases} d_0^k \exp(\omega^k) & \text{pour } \alpha = 0 \\ d_0^k (1 + \alpha \omega^k)^{1/\alpha} & \text{pour } \alpha \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

où $\omega^k = W_{perf}^k / W_k^*$, avec W_{perf}^k est l'énergie de déformation du matériau (couche k) n'ayant pas subi un processus d'endommagement, W_k^* est l'énergie nominale d'endommagement pour la couche k (définie comme étant la capacité nominale du matériau à stocker de l'énergie sous forme d'endommagement de la structure interne), d_0^k est l'endommagement initial du matériau et α est un paramètre du modèle. Les paramètres d'endommagement implémentés sont : $\alpha_{20^\circ C} = 0.1$, $(d_0^k)_{20^\circ C} = 0.005$, $(W_k^*)_{20^\circ C} = 3.2 KJ / m^3$ pour la simulation à la température ambiante et $\alpha_{120^\circ C} = 0.8$, $(d_0^k)_{120^\circ C} = 0.005$, $(W_k^*)_{120^\circ C} = 2 KJ / m^3$ pour la simulation à 120°C.

Comme précédemment, les simulations présentées reproduisent l'essai de flexion circulaire adopté pour la caractérisation des parements.

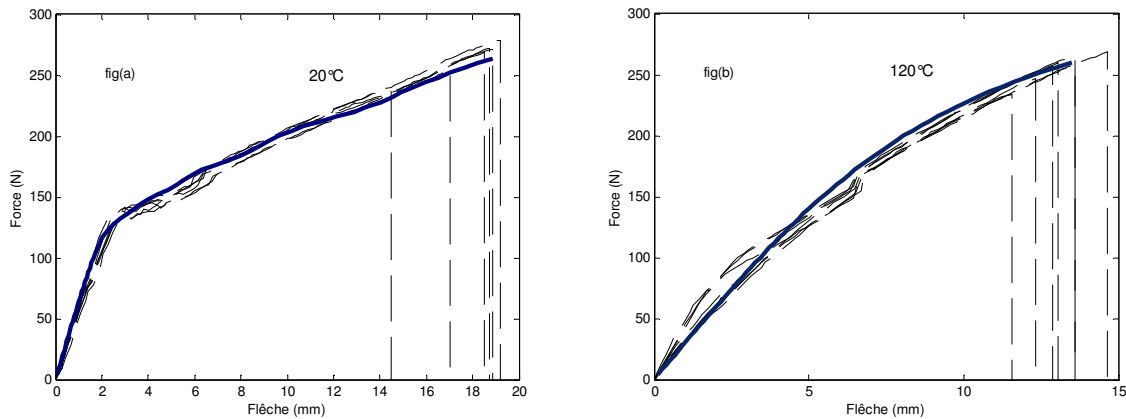


Figure 6 : Modèle d'endommagement : force appliquée (N) en fonction de la flèche (mm). Expérimentations (traits discontinus), résultats de simulation numérique pour le modèle d'endommagement (trait continu). Fig 6.a : résultats à la température ambiante, fig 6.b : résultats à 120°C.

On constate à présent une concordance très satisfaisante calcul/essai sur les différentes phases du comportement.

Modèle probabiliste de plaque multicouche avec endommagement

On se place dans le cadre de la modélisation probabiliste non paramétrique (Soize 2000) et on considère que les milieux physiques (représentés par les deux cartons et le plâtre) constituent des milieux aléatoires dont les matrices de rigidité sont désormais aléatoires.

1.2. Loi de probabilité de la matrice aléatoire $[A^j]$ associée au milieu j du multicouche

Les lois de probabilité des matrices de rigidité des différentes couches du CPC sont construites par l'application du principe du maximum d'entropie (Soize 2001). On rappelle que le principe du maximum d'entropie permet de construire la loi de probabilité d'une grandeur aléatoire en maximisant l'incertitude sous les contraintes définies par l'information disponible. L'information disponible relative aux matrices $[A^j]$, est la suivante : ces matrices doivent être définies positives ($[A^j] \in \mathbb{M}_n^+(\mathbb{R}) \forall j=1...J$), du second ordre et admettant pour moyenne $E\{[A^j]\} = [\underline{A}^j] \forall j=1...J$. Il faut également que les normes de l'inverse de ces matrices admettent une moyenne du second ordre telle que $E\{\|[A^j]^{-1}\|_F^2\} < +\infty, \forall j=1...J$, où $\|[A]\|_F = (\text{tr}\{[A][A]^T\})^{1/2}$ est la norme de Froebinus. Cette dernière condition assure l'existence d'une solution aléatoire du second ordre pour le problème.

On introduit la représentation des matrices $[A^j]$ par rapport à leurs valeurs moyennes,

$$[A^j] = [\underline{L}_{A^j}]^T [G_{A^j}] [\underline{L}_{A^j}] \quad (3)$$

où $[\underline{L}_{A^j}]$ sont des matrices triangulaires supérieures dans $\mathbb{M}_n(\mathbb{R})$ telles que $[\underline{A}^j] = [\underline{L}_{A^j}]^T [\underline{L}_{A^j}] \forall j=1...J$. Les matrices $[G_{A^j}]$ appartiennent à l'ensemble SG^+ des matrices aléatoires définies sur l'espace probabilisé $(\mathcal{A}, \mathcal{T}, \mathcal{P})$ à valeurs dans $\mathbb{M}_n^+(\mathbb{R})$.

Les lois $P_{[G_{A^j}]}$ des matrices aléatoires $[G_{A^j}]$ sont définies par les densités de probabilité $[G_{A^j}] \mapsto p_{[G_{A^j}]}([G_{A^j}])$ de $\mathbb{M}_n^+(\mathbb{R})$ dans \mathbb{R}^+ par rapport à la mesure $\tilde{d}G_{A^j}$ sur l'ensemble $\mathbb{M}_n^s(\mathbb{R})$, telle que $\tilde{d}G_{A^j} = 2^{n(n-1)/4} \prod_{1 \leq i \leq k \leq n} d[G_{A^j}]_{ik}$. Les lois de probabilité des matrices $[G_{A^j}]$ sont construites en utilisant le principe du maximum d'entropie maximisant les fonctions

$$S(p_{[G_{A^j}]}) = - \int_{\mathbb{M}_n^+(\mathbb{R})} p_{[G_{A^j}]}([G_{A^j}]) \times \log(p_{[G_{A^j}]}) \tilde{d}G_{A^j} \quad (4)$$

sous les contraintes définies par l'information disponible

$$\int_{\mathbb{M}_n^+(\mathbb{R})} p_{[G_{A^j}]}([G_{A^j}]) \tilde{d}G_{A^j} = 1 \quad (5)$$

$$E\{[G_{A^j}]\} = \int_{\mathbb{M}_n^+(\mathbb{R})} [G_{A^j}] p_{[G_{A^j}]} \tilde{d}G_{A^j} = [I_n] \in \mathbb{M}_n^+(\mathbb{R}) \quad (6)$$

$$\int_{\mathbb{M}_n^+(\mathbb{R})} \log(\det[G_{A^j}]) p_{[G_{A^j}]} \tilde{d}G_{A^j} < \nu, |\nu| + \infty \quad (7)$$

La résolution du problème d'optimisation ainsi défini conduit à l'expression suivante des densités de probabilité

$$p_{[G_{A^j}]}([G_{A^j}]) = \mathbf{1}_{\mathbb{M}_n^+(\mathbb{R})}([G_{A^j}]) \times c_{G_{A^j}} \times (\det[G_{A^j}])^{(n+1)\frac{(1-\delta_j^2)}{2\delta_j^2}} \times \exp\left(-\frac{(n+1)}{2\delta_j^2} \text{tr}[G_{A^j}]\right) \quad (8)$$

où $c_{\mathbf{G}_{A^j}}$ sont les constantes positives de normalisation définies par,

$$c_{\mathbf{G}_{A^j}} = \frac{(2\pi)^{-n/(n-1)/4} \left(\frac{n+1}{2\delta_j^2} \right)^{n(n+1)(2\delta_j^2)^{-1}}}{\left\{ \prod_{l=1}^n \Gamma \left(\frac{n+1}{2\delta_j^2} + \frac{1-l}{2} \right) \right\}} \quad (9)$$

où $\Gamma(z)$ est la fonction gamma définie pour tout $z > 0$ par $\Gamma(z) = \int_0^{+\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$. Le paramètre δ_j permet de fixer le niveau de dispersion de la matrice aléatoire $[\mathbf{G}_{A^j}]$ et donc de la matrice aléatoire $[\mathbf{A}^j]$.

$$\delta_j = \left\{ \frac{E \left\{ \left\| [\mathbf{G}_{A^j}] - [\underline{\mathbf{G}}_{A^j}] \right\|_F^2 \right\}}{\left\| [\underline{\mathbf{G}}_{A^j}] \right\|_F^2} \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{1}{n} E \left\{ \left\| [\mathbf{G}_{A^j}] - [I_n] \right\|_F^2 \right\} \right\}^{1/2} \quad (10)$$

Ce paramètre est indépendant de la dimension n des matrices aléatoires et doit être tel que

$$0 < \delta < \sqrt{(n+1)(n+5)^{-1}} \quad (11)$$

La représentation algébrique suivante permet de construire des réalisations pour la méthode Monte-Carlo

$$[\mathbf{G}_{A^j}] = [\mathbf{L}_j]^T [\mathbf{L}_j] \quad (12)$$

où $[\mathbf{L}_j]$ est une matrice aléatoire triangulaire supérieure à valeurs dans $\mathbb{M}_n^+(\mathbb{R})$ telle que :

- Les variables aléatoires $\{[\mathbf{L}_j]_{kk'}, k \leq k'\}$ sont indépendantes.
- Pour $k \leq k'$, la variable aléatoire $[\mathbf{L}_j]_{kk'}$, s'écrit $[\mathbf{L}_j]_{kk'} = \sigma_j Y_{kk'}$, avec $\sigma_j = \delta_j (n+1)^{-1/2}$ et $Y_{kk'}$ est une variable aléatoire centrée réduite.
- Pour $k = k'$, $[\mathbf{L}_j]_{kk} = \sigma_j \sqrt{2V_{kj}}$ où V_{kj} est une variable aléatoire de loi gamma dont la densité de probabilité s'écrit,

$$p_{V_j}(v) = \mathbf{1}_{\mathbb{R}^+}(v) \frac{1}{\Gamma \left(\frac{n+1}{2\delta_j^2} + \frac{1-k}{2} \right)} v^{\left(\frac{n+1}{2\delta_j^2} + \frac{1-k}{2} \right)} e^{-v} \quad (13)$$

1.3. Loi de comportement aléatoire généralisée $[\mathbf{A}^g]$ du multicouche carton-plâtre-carton

Les matrices aléatoires $[\mathbf{A}^j]$ sont des matrices aléatoires de $\mathbb{M}_5^+(\mathbb{R})$ (modèle de plaque) pleines construites selon les lois de probabilités $P_{[\mathbf{A}^j]}$. Une homogénéisation selon

l'épaisseur, suivant le même principe que pour le modèle moyen, aboutit à une loi de comportement généralisée du multicouche qui prend en compte le caractère aléatoire des différents milieux.

$$[\mathbf{A}^g] = \text{hom} \left([\mathbf{A}^1], \dots, [\mathbf{A}^J] \right) \quad (14)$$

1.4. *Modèle stochastique engendré par la modélisation probabiliste non paramétrique de la loi de comportement globale du multicouche*

On discrétise les équations du modèle moyen et du modèle stochastique par la méthode usuelle des éléments finis. Le solveur stochastique est construit suivant la méthode de Monte-Carlo. Pour chaque réalisation, l'équation matricielle non-linéaire est résolue classiquement. La convergence stochastique par rapport au nombre n_s des réalisations r_1, \dots, r_{n_s} est étudiée en construisant la fonction qui au nombre de réalisations associe la fonction définie par,

$$\text{conv}(n_s) = \left\{ \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} U(r_k)^2 \right\}^{1/2} \quad (15)$$

La convergence est atteinte lorsque $\text{conv}(n_s)$ présente des variations négligeables.

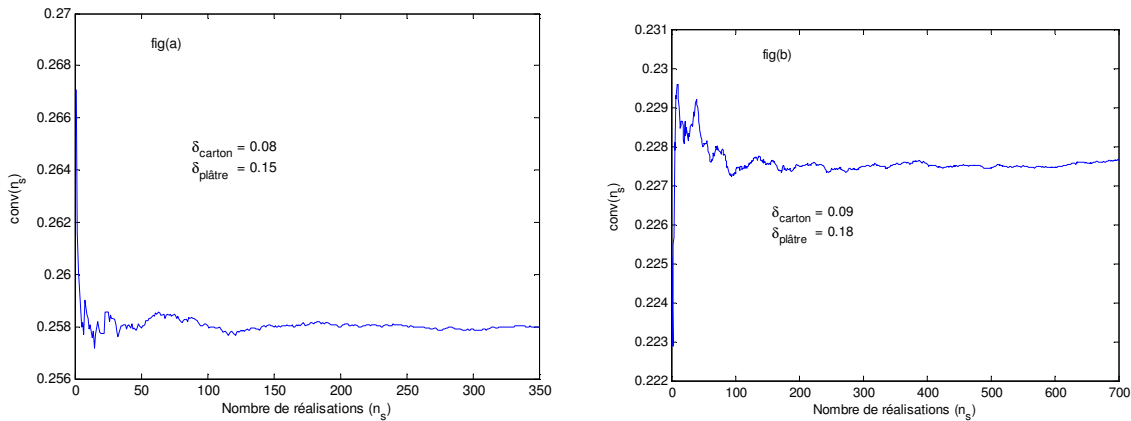


Figure 7 : Convergence stochastique du modèle probabiliste : fig 7.a : modèle probabiliste à la température ambiante, fig 7.b : modèle probabiliste à 120°C

1.5. *Confrontation du modèle probabiliste avec les résultats d'essais*

L'intervalle de confiance avec une probabilité $P_c = 0.98$ est défini par l'enveloppe inférieure et supérieure (\mathbf{U}^- et \mathbf{U}^+ respectivement) de telle sorte que

$$\text{Prob}(\mathbf{U}^- < \mathbf{U} \leq \mathbf{U}^+) = P_c \quad (16)$$

Deux pour cent des réalisations par rapport à la borne supérieur ainsi que par rapport à la borne inférieure ne sont pas ainsi prise en compte dans la construction de la zone de confiance.

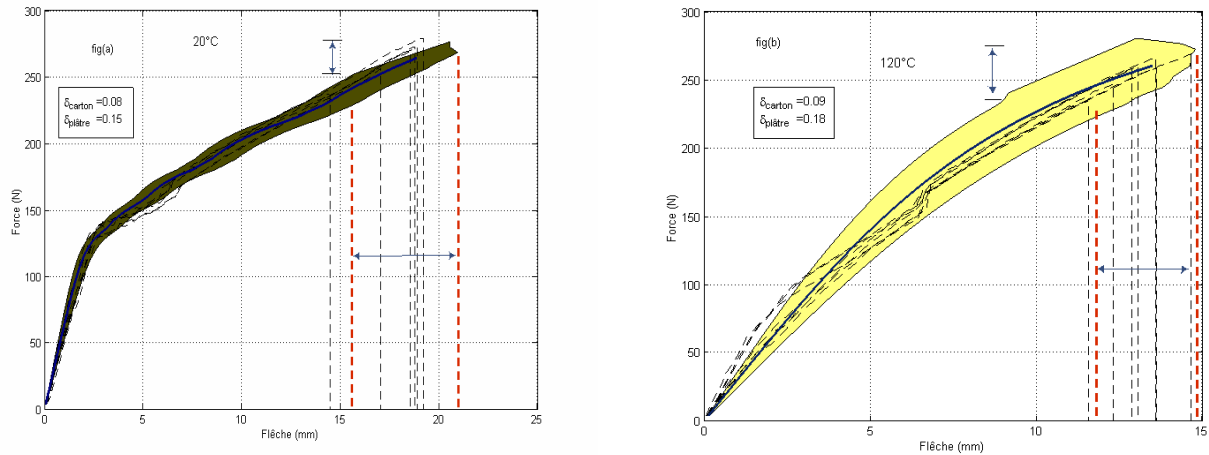


Figure 8 : Intervalle de confiance : fig 8.a : modèle probabiliste à la température ambiante, fig 8.b : modèle probabiliste à 120°C

On constate que les enveloppes des résultats numériques couvrent correctement les différents résultats d'essais.

Conclusions

Par une approche probabiliste non paramétrique, une région de confiance a été construite pour le comportement thermomécanique endommageable des plaques multicouches carton-plâtre-carton. Cette zone de confiance couvre la dispersion observée lors de la caractérisation des propriétés thermomécaniques du multicouche. L'ajustement des paramètres de dispersion du modèle est aujourd'hui réalisé pour deux températures (ambiante et à 120°C). L'objectif à court terme est d'étendre cet ajustement aux autres températures pour obtenir des fonctions continues des paramètres de dispersion au cours de la sollicitation thermique. A ce stade nous pourrions modéliser suivant l'approche probabiliste l'essai de résistance au feu de cloisons de grandes hauteurs.

Références bibliographiques

Fromy, Ph., Curtat, M.R., "Heat transfer in fire resistance furnaces piloted with thermocouples or plate thermometers", Fire Safety Science_Proceedings of the sixth international symposium, pp 531-542. July 1999.

Decolon C. Structures composites, calcul des plaques et poutres multicouches. Hermes, Paris, 2000.

Najar J. "Continuous damage of brittle solids", Continuum damage mechanics, theory and applications. PP 233-294. Springer- Verlag - Wien – New York. CISM, ITALY 1987.

Soize C., "A nonparametric model of random uncertainties for reduced matrix models in structural dynamics". Journal of Probabilistic engineering mechanics 15 (2000), PP 277-294.

Soize C., Maximum entropy approach for modeling random uncertainties in transient elastodynamics, PP 1979-1996, Journal of the Acoustics Society of America, May 2001.