
Une approche multirésolution dédiée aux problèmes d'identification

Philippe Vidal — Olivier Allix

*LMT-Cachan - ENS de CACHAN/CNRS/Université P. et M. Curie
61, avenue du Président Wilson, 94235 Cachan Cedex, France
{vidal, allix}@lmt.ens-cachan.fr*

RÉSUMÉ. Ce travail concerne une stratégie multirésolution visant à réduire le coût d'un problème d'identification structurale. Elle est basée sur l'exploitation de la méthode LATIN [LAD 96]. Celle-ci permet de représenter la solution d'un problème non linéaire d'évolution sous la forme d'une somme de produits de fonctions d'espace - fonctions du temps. La réutilisation des fonctions d'espace, lorsque les paramètres varient, permet, a priori, de diminuer fortement le coût de l'ensemble des analyses requises pour minimiser la distance entre l'expérience et la simulation.

ABSTRACT. This work presents a multiresolution strategy intended to decrease the computational cost of a structural identification problem. It is based on the LATIN method [LAD 96] which allows us to represent the solution of a non-linear time-dependent problem as the sum of products of space functions by time functions. The reutilization of the space functions when the parameters change allows us to greatly decrease the cost of all the analyses which are necessary to minimize the distance between experiments and calculations.

MOTS-CLÉS : identification structurale, méthode LATIN, multi-résolution.

KEYWORDS: structural identification, LATIN method, multi-solution.

1. Introduction

Dans le domaine de la prévision de la tenue en service des structures, la question des liaisons, des bords, des zones d'introduction d'efforts est une préoccupation croissante. Ces zones clés sont des lieux privilégiés d'initiation de l'endommagement et sont le siège de gradients de contraintes importants. L'identification du comportement de liaisons, de collages, d'interfaces . . . sont des exemples de problème d'identification structurale. Ces problèmes sont caractérisés par la nécessité de recourir à de grand nombre de calculs non linéaires, bien souvent 3D, pour parvenir à des comparaisons essais/calculs satisfaisantes.

Pour diminuer le coût de ces nombreux calculs, nous cherchons à tirer parti du fait que les solutions de deux problèmes pour des jeux de paramètres voisins sont également voisines. Pour cela, nous exploitons les possibilités qu'offre la "*Large Time INcrement method*" (LATIN method), proposée par P. Ladevèze. Celle-ci permet de représenter la solution d'un problème non-linéaire d'évolution sous la forme d'une somme de produits de fonctions d'espace - fonctions du temps. La réutilisation des fonctions d'espace, lorsque les paramètres varient, permet, a priori, de diminuer fortement le coût de l'ensemble des analyses requises pour minimiser la distance entre l'expérience et la simulation. Une fois construite une "base" de fonctions d'espace adaptée au problème, le calcul des solutions ne demande que de corriger les fonctions du temps, ce qui s'effectue à coût très réduit.

Par rapport aux travaux précédents exploitant la méthode LATIN, son utilisation dans le cadre de l'identification nous a amenés à traiter de nouveaux problèmes. Ceux-ci dépendent de la stratégie d'identification utilisée. Plusieurs ont été étudiées.

Le plus souvent, le problème d'identification est formulé comme un processus d'optimisation et des approches déterministes qui considèrent les essais comme fiables sont fréquemment utilisées. Une stratégie courante pour résoudre celui-ci s'appuie sur un algorithme basé sur l'évaluation du gradient par rapport aux paramètres pour des raisons d'efficacité [MAH 96]. Cette évaluation peut être faite par différentiation directe [MAH 96], par la méthode de l'état adjoint [KLE 95, TAR 99] ou par interpolation [AOK 97, COR 01]. Toutes ces méthodes s'appuient donc sur les méthodes incrémentales classiques pour les calculs non linéaires. Pour traiter les problèmes liés aux bruits de mesure, des méthodes stochastiques ont été élaborées, notamment les filtres de Kalman [AOK 97, KAL 60]. Pour étudier la faisabilité et les possibilités de la "LATIN method", nous avons étudié ces diverses méthodes que nous pensons représentatives des difficultés rencontrées dans le cas de l'identification structurale sur un cas unidimensionnel, puis sur un cas bidimensionnel, dans le cadre de la viscoplasticité. Toute cette étude a été menée sous l'environnement MATLAB.

2. Méthode LATIN et multirésolution pour l'identification

Le problème modèle étudié est celui de l'identification d'un modèle viscoplastique à partir d'essais de flexion.

2.1. Principes de résolution du problème direct

L'identification s'effectue dans le cadre des problèmes non linéaires d'évolution. La résolution du problème direct s'effectue à l'aide de la méthode LATIN, dont les principes ont été donnés par P. Ladevèze [LAD 85]. Elle permet d'étudier l'ensemble du chargement en un seul incrément [LAD 96]. Le premier principe est de séparer les difficultés du problème non linéaire. Les équations sont divisées en deux groupes :

- équations linéaires globales : étape globale (A_d)
 - équations de liaisons, équation d'équilibre, et relation de comportement ([LAD 96]) linéaire (lois d'état)

$$\begin{aligned} R &= \beta \cdot p \\ \sigma &= K_e (\varepsilon - \varepsilon^p) \end{aligned} \tag{1}$$

avec K_e l'opérateur d'élasticité, tenseur du quatrième ordre.

- équations non linéaires locales : étape locale (Γ)
 - relation de comportement non linéaire : lois d'évolution

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varepsilon^p \\ -p \end{bmatrix} = B \left(\begin{bmatrix} \sigma \\ R \end{bmatrix} \right) = k_v < z >_+^{n_v} \begin{bmatrix} \frac{\sigma^D}{\|\sigma^D\|} \\ -1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

avec $\varepsilon^p = p = 0$ à $t = 0$, et $z = \|\sigma^D\| - R - R_0$

où k_v et n_v sont des constantes matériau, R l'écroutissage isotrope, R_0 le seuil d'élasticité initial, σ^D la partie déviatorique du tenseur des contraintes, et p (la variable associée à R) la déformation plastique cumulée.

Un modèle viscoplastique associé au modèle de Prandtl-Reuss est utilisé. La formulation du modèle est ici normale en référence à [LAD 96], du fait de la relation linéaire entre R et p , linéarité obtenue par changement de variables. L'algorithme construit des solutions appartenant successivement aux deux groupes en suivant des directions de recherche. Chaque itération donne une solution approchée du problème dont la qualité est connue. La détermination d'une solution de A_d conduit à la résolution d'un problème linéaire traité par E.F. En ce qui concerne le deuxième groupe, le problème est explicite en intégrant la relation de comportement à partir des valeurs de σ et R obtenues à l'étape globale précédente. Le processus itératif est illustré sur la figure suivante :

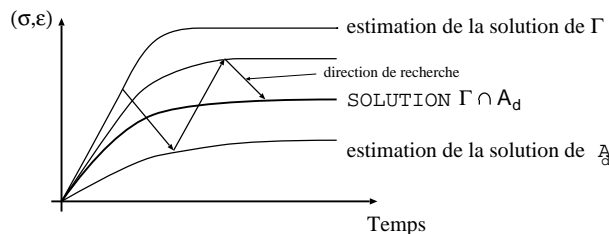


Figure 1. Processus itératif de la méthode LATIN

Sur la figure 1, chaque courbe schématise l'évolution d'un champ ($\sigma, \varepsilon, \dots$) sur l'ensemble de l'intervalle de temps $[0, T]$ qui satisfait, soit les lois d'évolution Γ , soit l'équation d'équilibre et les lois d'état A_d . Cette figure vise à montrer que le processus itératif est un processus global sur tout l'intervalle de temps, et non une procédure itérative pas-à-pas.

2.2. Représentation temps/espace d'un élément de A_d et exploitation dans le cadre de l'identification

À l'étape globale, on cherche des corrections $(\Delta\dot{\sigma}_n, \Delta\dot{R}_n)$ admissibles à zéro en fonction des résidus entre l'étape globale et l'étape locale précédente $(-\Delta\dot{\varepsilon}_n^p, \Delta\dot{p}_n)$ qui sont connus. La direction de recherche et les lois d'état étant données, le problème en correction des variables statiques se met sous la forme :

trouver $\Delta\sigma_n \in \mathbf{S}_0$ et ΔR_n tels que :

$$\begin{aligned} & \int_0^T \int_{\Omega} \left(K_e^{-1} \Delta\dot{\sigma}_n : \sigma^* + \beta^{-1} \Delta\dot{R}_n \cdot R^* + H(M, t) \begin{bmatrix} \Delta\sigma_n^D \\ \Delta R_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma^* \\ R^* \end{bmatrix} \right) d\Omega dt \\ & = \int_0^T \int_{\Omega} \left(-\Delta\dot{\varepsilon}_n^p : \sigma^* + \Delta\dot{p}_n \cdot R^* + H(M, t) \begin{bmatrix} \Delta\dot{\sigma}_n^D \\ \Delta\dot{R}_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma^* \\ R^* \end{bmatrix} \right) d\Omega dt \\ & \forall \sigma^* \in \mathbf{S}_0, \forall R^* \end{aligned} \quad [3]$$

avec

$$\begin{aligned} \Delta q_n &= q_{n+1} - q_n \\ \Delta \hat{q} &= \hat{q} - q_n \end{aligned}$$

où $H(M, t)$ est un opérateur linéaire calculé à l'étape locale précédente, et \mathbf{S}_0 est l'ensemble des champs statiquement admissibles. Pour diminuer le temps de calcul de l'étape globale (la plus coûteuse), il a été mis en œuvre de représenter ces corrections sous forme de chargement simple. Par exemple, pour la contrainte et l'écroutissage isotrope, elles s'écrivent :

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_n(M, t) &= \sigma_{n+1}(M, t) - \sigma_n(M, t) = \sum_{i=1}^m \beta_i(t) \cdot B_i(M) \\ \Delta R_n(M, t) &= R_{n+1}(M, t) - R_n(M, t) = \sum_{i=1}^m \gamma_i(t) \cdot C_i(M) \end{aligned} \quad [4]$$

où $\beta_i(t)$ et $\gamma_i(t)$ sont des fonctions scalaires définies sur $[0, T]$, avec $\beta_i(0) = 0$, $\gamma_i(0) = 0$ et $B_i(M)$, $C_i(M)$ sont des champs devant assurer l'appartenance de ΔS_n à \mathbf{S}_0 (admissibilité à zéro), de même pour les autres quantités statiques et cinématiques. Pour construire le couple fonction du temps - fonction de l'espace, une technique itérative de type point-fixe est utilisée. On cherche successivement les fonctions du temps et les fonctions d'espace. On trouvera une description complète de la démarche dans [LAD 96].

Pour réduire le coût de ces analyses, un premier calcul étant fait pour un jeu de paramètres choisi *a priori*, la méthode exploite la base de fonctions d'espace construite lors de cette première résolution. Le principe est le suivant : soit σ^{ini} la contrainte solution correspondant au jeu initial, qui a été représentée sous la forme de produits de (N+1) fonctions du temps et de (N+1) fonctions de l'espace notées ici $(B_0^{ini}(M), B_1^{ini}(M), \dots, B_N^{ini}(M))$. Pour un problème correspondant à un nouveau jeu de paramètres, et pour les premières étapes globales, on exploite la base de fonctions $(B_1^{ini}(M), \dots, B_N^{ini}(M))$, qui correspond à la condition d'admissibilité cinématique à zéro, en déterminant itérativement les meilleures fonctions du temps associées au jeu de fonctions de l'espace précédent. Après un certain nombre d'itérations, et si l'erreur de résolution reste trop grande, de nouveaux couples (fonctions du temps, fonctions de l'espace) sont générés et ceci jusqu'à convergence.

A chaque étape globale, on va donc chercher à corriger les N fonctions du temps. Le problème se met sous la forme d'un système d'équations différentielles du premier ordre. Les matrices N , M et le second membre B dans [5] sont obtenues par intégration en espace du Principe des Puissances Virtuelles [4] en y injectant la représentation de la solution approchée :

Hypothèse : $(B_1^{ini}(M), \dots, B_N^{ini}(M)), (C_1^{ini}(M), \dots, C_N^{ini}(M))$ sont connues

Trouver $G(t) = \{\beta_1^C(t), \dots, \beta_N^C(t), \gamma_1^C(t), \dots, \gamma_N^C(t)\}^T$ tel que :

$$N\dot{G}(t) + MG(t) = B(t) \quad \forall t \in [0, T] \quad \text{et} \quad G(t=0) = 0. \quad [5]$$

En résolvant ce système linéaire avec la θ -méthode, on obtient donc la correction $\{\beta_1^C(t), \dots, \beta_N^C(t), \gamma_1^C(t), \dots, \gamma_N^C(t)\}^T$ à apporter aux fonctions du temps pour le nouveau jeu de paramètres. Par exemple, pour les contraintes, à l'itération n, on a :

$$\begin{aligned} \sigma_n(M, t) &= \sigma_{n-1}(M, t) + \Delta\sigma_n^C(M, t) \\ \sigma_n(M, t) &= \beta_0^{ini}(t) \cdot B_0^{ini}(M) + \sum_{k=1}^N \underbrace{(\beta_k^{n-1}(t) + \beta_k^{C_n}(t))}_{\beta_k^n(t)} \cdot B_k^{ini}(M) \end{aligned} \quad [6]$$

où $\beta_k^{n-1}(t)$ est la $k^{ième}$ fonction du temps obtenue à l'itération n-1, $\beta_k^n(t)$ la $k^{ième}$ fonction du temps obtenue à l'itération n, $\beta_k^{C_n}(t)$ la correction de la $k^{ième}$ fonction du temps $\beta_k^{n-1}(t)$ à l'itération n.

3. Méthodes de résolution du problème inverse : approche par différentiation directe

Compte tenu de la souplesse de la méthode, plusieurs stratégies sont envisageables. La plus simple est l'optimisation des paramètres à l'étape locale, car seules les lois d'évolution sont à vérifier. Celle-ci a été testée pour différentes directions de recherche [ALL 00] et a montré la nécessité de prendre en compte les conditions d'admissibilité dans le calcul du gradient de la solution par rapport aux paramètres matériaux afin de garantir une certaine robustesse. C'est ce qui sera fait dans la suite.

Le problème d'identification est formulé classiquement de la façon suivante :

Trouver k paramètres structuraux, minimisant une fonction distance calcul/essai, $\|q(k) - q^{exp}\|^2$, avec $q(k)$ (contraintes, déformations, forces, déplacements,...) vérifiant le problème direct.

La stratégie d'optimisation choisie est un algorithme de type B.F.G.S. qui est basé sur l'évaluation du gradient. Pour la contrainte, il s'exprime par exemple de la façon suivante :

$$\frac{d\sigma_{n+1}(M, t)}{dk} = \frac{d\sigma_0(M, t)}{dk} + \sum_{k=1}^n \left[\frac{d\beta_k(t)}{dk} \cdot B_k(M) + \beta_k(t) \cdot \frac{dB_k(M)}{dk} \right] \quad [7]$$

L'expression [7] montre que l'on doit calculer le gradient par rapport aux paramètres des fonctions du temps et de l'espace. Pour obtenir ces quantités, on suit les mêmes procédures exposées à l'étape globale (point fixe). D'une part, on différencie donc l'équation [5] :

$$\frac{dG(t)}{dk} = L^{-1} \cdot \left(\frac{dF(t-1)}{dk} - \frac{dL}{dk} \cdot G(t) \right) \quad [8]$$

On obtient ici une formule de récurrence sur les pas de temps et sur les itérations LATIN.

Ensuite, pour le calcul du gradient des fonctions de l'espace, on différencie le problème en espace issu de [3] (problème linéaire). Ce gradient dépend des quantités des étapes locale et globale précédentes. Pour évaluer le gradient des quantités de l'étape locale précédente, un calcul analytique proposé par Stein [MAH 96] est adapté aux équations de l'étape locale. Les lois d'évolution s'écrivent sous la forme :

$$G_t(k, Y_t(k), Y_{t-1}(k), \hat{\sigma}_t(k), \hat{\sigma}_{t-1}(k), \hat{R}_t(k), \hat{R}_{t-1}(k)) = 0 \text{ où } Y_t = [\hat{\varepsilon}_t^p, \hat{p}_t] \quad [9]$$

En différenciant cette équation, on obtient l'expression de $\frac{dY_t}{dk}$. Il s'appuie donc sur le schéma numérique utilisé, et conduit à une formule récursive.

On a également adapté la méthode de l'état adjoint et la technique des filtres de Kalman à la méthode LATIN. Celles-ci ne seront pas détaillées ici. En effet, leur adaptation présente moins de difficultés que la méthode abordée dans ce chapitre. Plus de détails sur ces méthodes peuvent être trouvés dans [ALL] et [VID 01].

4. Résultats numériques

4.1. Exemple d'une poutre en flexion

Toutes les méthodes décrites précédemment sont traitées numériquement sur l'exemple d'une poutre en flexion, encastrée à une extrémité, et soumise à un dé-

placement imposé à son autre extrémité. Les caractéristiques de la poutre sont les suivantes :

$$\begin{aligned} E_0 &= 292914 \text{ MPa} & n_v &= 2 & l &= 1 \text{ m} & u_{dmax} &= 3.33e^{-2} \text{ m} \\ R_0 &= 0.7 \text{ MPa} & k_v &= 2.25 & t_{max} &= 0.4 \text{ s} & \beta &= 2 \end{aligned}$$

E_0 est le module d'Young, l la longueur de la poutre, u_{dmax} le déplacement maximale appliquée à la poutre, et t_{max} le temps final.

Le chargement imposé au bout de la poutre est une rampe.

Dans les exemples traités, les résultats expérimentaux sont simulés numériquement pour des valeurs de $R_0 = 0.7 \text{ MPa}$ et $\beta = 2$. En plus, on ajoute un bruit de mesure qui a un niveau de 10%, à distribution gaussienne. On note que la construction de la base a nécessité 6 fonctions d'espace pour R , et 2 fonctions pour les contraintes, pour des valeurs initiales de paramètres de $R_0 = 0.3 \text{ MPa}$ et $\beta = 1$.

4.2. Résultats d'identification : comparaison des techniques de gradient

Pour toutes les méthodes, l'identification des deux paramètres R_0 et β conduit à des valeurs de paramètres proches des valeurs souhaitées. La distance calcul / essai atteint alors sa valeur résiduelle due au bruit de mesure. On donne l'évolution des fonctions du temps des contraintes pour les différents jeux de paramètres S_k associés au calcul de gradient du processus de minimisation (figure 2). On rappelle que, dans l'algorithme d'optimisation choisi, la valeur des paramètres est modifiée dès qu'un calcul de gradient est réalisé. Les trois méthodes de gradient (différentiation direct, adjoint, interpolation) donnent des résultats similaires.

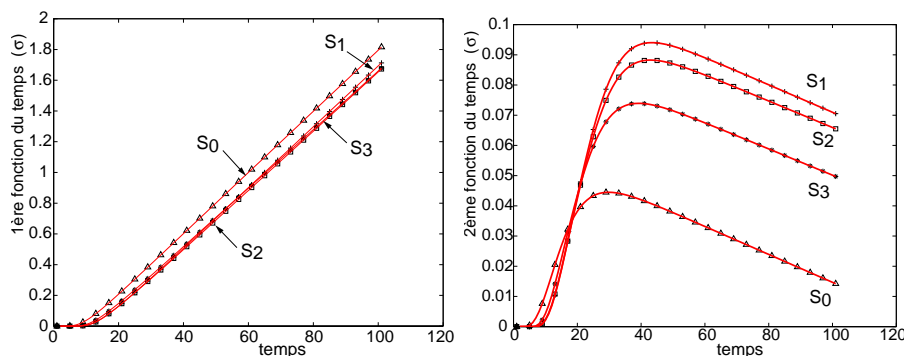


Figure 2. Evolution des fonctions du temps 1 et 2 associées à la contrainte

4.3. Comparaison des coûts de calcul

On compare les différentes méthodes en terme de nombre d'opérations en estimant le coût numérique des analyses E.F. avec la méthode LATIN ([GOL 96]). On exploite également le fait que la méthode a le même comportement en 2D et 3D. Les résultats 1D en terme de nombre d'itérations sont donc étendus aux 2D et 3D.

Tous les exemples traités mettent en évidence l'avantage de la représentation particulière de la solution au niveau du coût de calcul (figures 3, 6). Il prend son sens sur des calculs 3D (également 2D), et l'est d'autant plus que le nombre de ddl augmente. Pour un cas 3D à 35000 ddl, le gain est de l'ordre de 50 entre une étape globale et préliminaire.

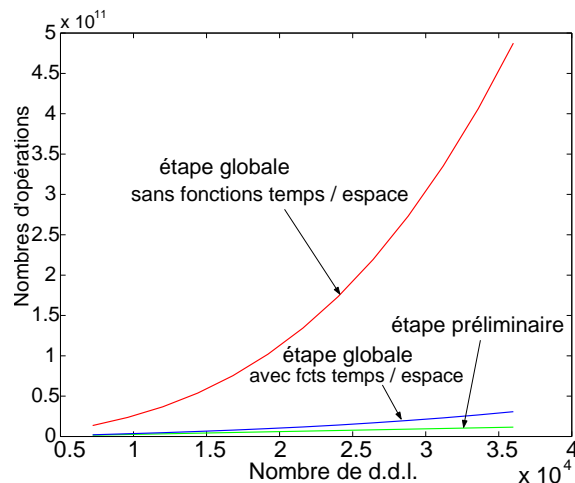


Figure 3. Comparaison des coûts de calcul étape globale / étape préliminaire, poutre 3D

En ce qui concerne la méthode de calcul du gradient, la technique d'interpolation a un coût relativement faible (coût d'un maillage pour 9 calculs directs, soit 20 étapes préliminaires) et nécessite un faible stockage (seulement les fonctions d'espace et du temps).

La méthode de l'état adjoint montre un coût inférieur à celui de la différentiation directe (voir figure 5) surtout pour un nombre de paramètres élevé. Elle est en plus bien adaptée à la méthode LATIN.

Les filtres de Kalman présentent des caractéristiques intéressantes pour le traitement des mesures incomplètes. La méthode donne également une mesure de l'incertitude sur les paramètres identifiés. Dans tous les résultats obtenus, il conduit à une bonne certitude sur les paramètres finaux (voir figure 4). Néanmoins, il s'avère plus coûteux que l'approche déterministe (figure 6) du fait du calcul du gradient à effectuer à chaque itération.

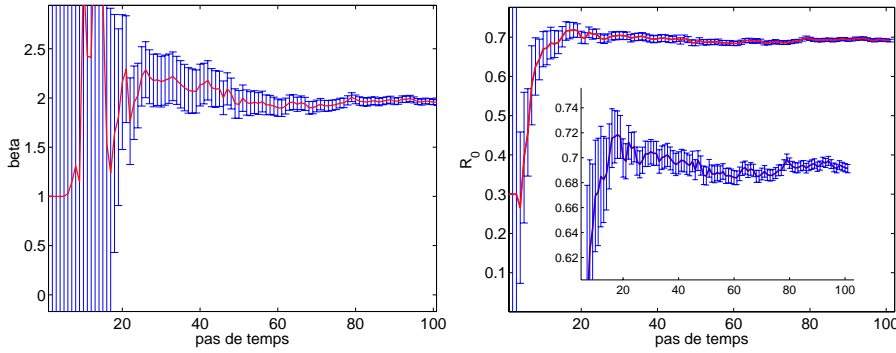


Figure 4. Evolution des paramètre β et R_0 au cours du temps avec son domaine de confiance

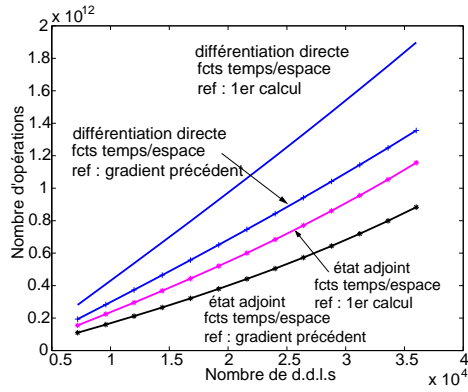


Figure 5. Comparaison du coût de calcul entre la différentiation directe et l'état adjoint (avec fonctions temps / espace)

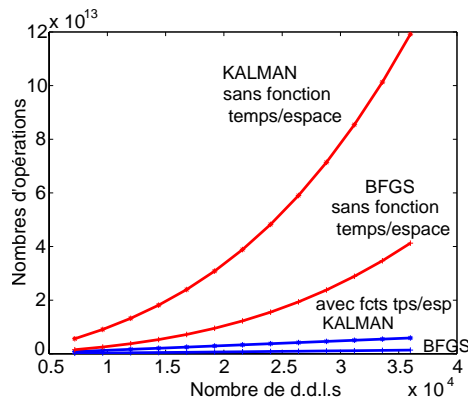


Figure 6. Comparaison du coût de calcul entre l'approche stochastique et l'approche déterministe avec et sans fonctions espace / temps

4.4. Application à un cas 2D

Afin d'illustrer les résultats précédemment obtenus sur un cas plus conséquent, le cas d'une plaque trouée est traité, ce qui permet de générer des répartitions de contraintes et déformations hétérogènes. La méthode de l'état adjoint est appliquée, comme elle s'avère la plus efficace en terme de coût de calculs.

Les caractéristiques matériaux et géométriques sont données ci-après :

$$\begin{array}{ll}
 E_0 = 85800 \text{ MPa} & n_v = 2 \\
 R_0 = 300 \text{ MPa} & k_v = 9 \cdot 10^{-5} \\
 \beta = 6000 & t_{max} = 0.4 \text{ s} \\
 \nu = 0.3 & u_{dmax} = 1.3 \text{ mm} \\
 long = 600 \text{ mm} & larg = 400 \text{ mm} \\
 R_{trou} = 100 \text{ mm} &
 \end{array}$$

L'hypothèse de contraintes planes est effectuée. Compte-tenu des symétries, seul un quart de la plaque est maillé avec des éléments TRI3. La figure 7 montre le maillage ainsi que les conditions limites appliquées. Un déplacement imposé monotone croissant au cours du temps est appliqué sur le bord droit de la plaque, et des conditions de symétrie sur les déplacements sont imposées sur deux autres côtés.

Les paramètres à identifier sont initialisés à $R_0 = 500 \text{ MPa}$, et $\beta = 7500$. Les mesures sont les déformations. Un bruit à moyenne nulle avec un niveau de 5 % est ajouté.

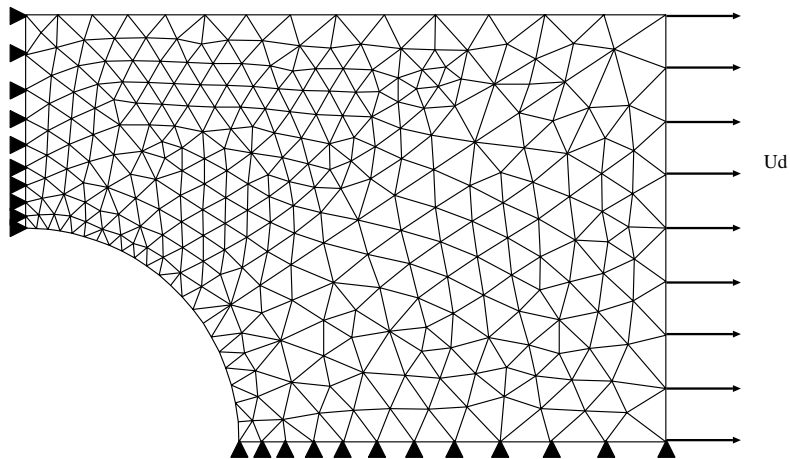


Figure 7. Maillage T3 de la plaque trouée

L'identification est effectuée en 8 calculs de gradient, et 31 calculs directs. Un premier calcul est effectué avec le jeu initial. Six fonctions d'espace constituent

la base qui est exploitée pour tous les calculs suivants. Puis, le deuxième jeu de paramètres nécessite de compléter cette base. En effet, on remarque que l'erreur du calcul se stabilise après plusieurs étapes préliminaires, la base initiale est donc insuffisante. Cinq fonctions supplémentaires sont alors nécessaires. Enfin, la base ainsi constituée est de nouveau exploitée pour les calculs suivants jusqu'au dernier, où une nouvelle fonction est construite.

L'évolution au cours de la minimisation des fonctions du temps associées aux déformations est donnée sur les figures 8, 9, 10, 11, 12, 13. Ces fonctions du temps sont corrigées pour chaque nouveau jeu de paramètres S_i , $i = 1, \dots, 8$ qui correspond à un calcul de gradient.

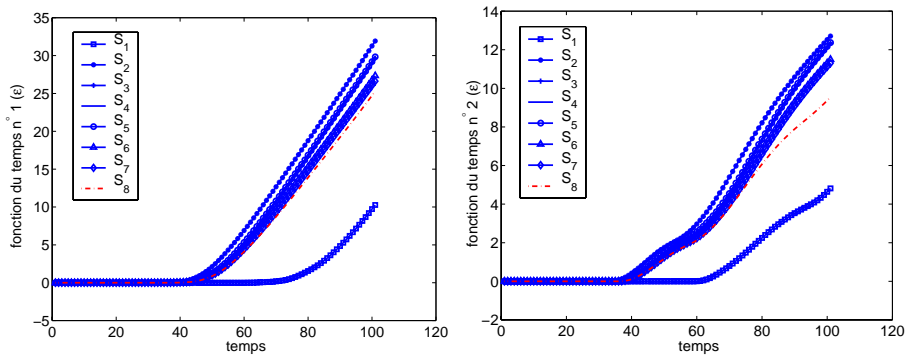


Figure 8. Evolution des fonctions du temps 1 et 2 associées aux déformations au cours de la minimisation

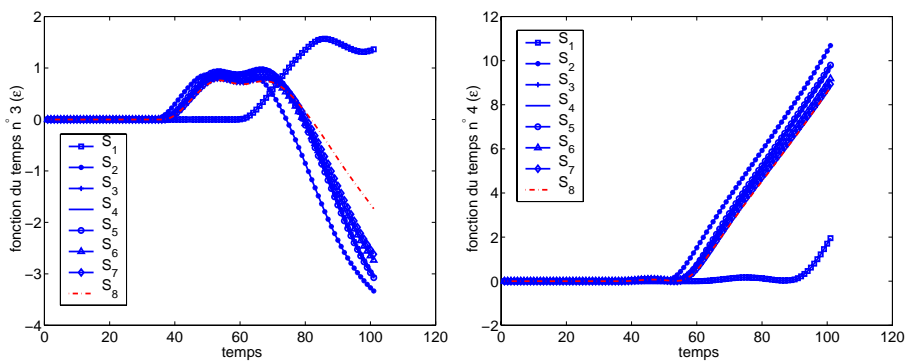


Figure 9. Evolution des fonctions du temps 3 et 4 associées aux déformations au cours de la minimisation

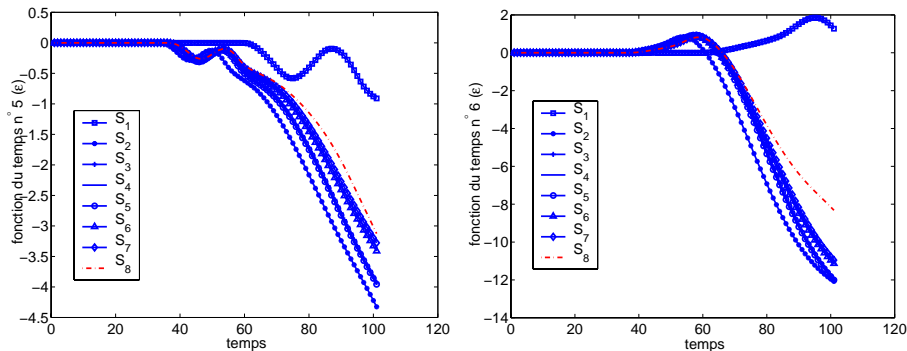


Figure 10. Evolution des fonctions du temps 5 et 6 associées aux déformations au cours de la minimisation

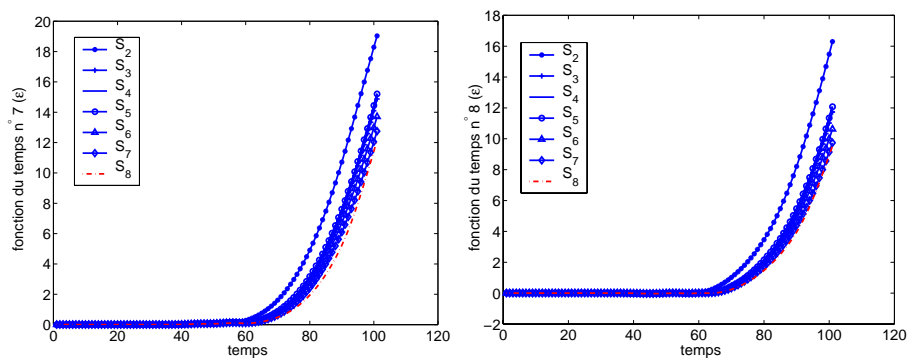


Figure 11. Evolution des fonctions du temps 7 et 8 associées aux déformations au cours de la minimisation

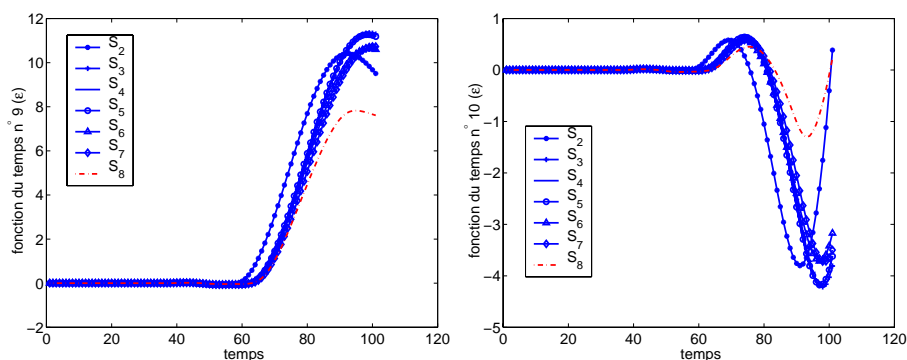


Figure 12. Evolution des fonctions du temps 9 et 10 associées aux déformations au cours de la minimisation

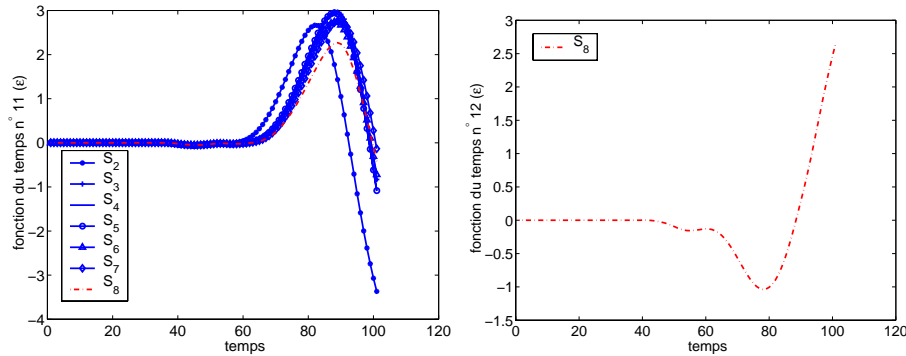


Figure 13. Evolution des fonctions du temps 11 et 12 associées aux déformations au cours de la minimisation

Au final, seulement 12 fonctions d'espace sont construites, et environ 170 étapes préliminaires sont nécessaires pour effectuer l'identification des deux paramètres. Les valeurs finales obtenues sont satisfaisantes : $R_0 = 299.9$ MPa et $\beta = 6008$. Compte tenu du coût de ces calculs par rapport à une approche sans décomposition de la solution, et du fait que ce dernier nécessite environ 7 itérations par jeu de paramètres, soient 217 itérations au total, le gain obtenu est donc d'autant plus élevé.

5. Conclusion

Trois approches pour l'identification structurale (méthode déterministe, état adjoint, filtre de Kalman) ont été adaptées au cadre de la méthode LATIN. Elles ont mis en évidence l'intérêt de la représentation particulière des solutions afin d'exploiter le caractère multi résolution de la méthode. Tous les résultats montrent clairement le gain significatif en terme de coût de calcul. Il sera d'autant plus important que le nombre de ddl, le nombre de calculs et le nombre de paramètres à déterminer sont grands. Une première étude est en cours sur l'identification de modèle d'interface pour l'analyse du délaminage. L'existence d'effets de bords conduit à résoudre des problèmes non-linéaires 3D coûteux. La stratégie de calcul proposée ici se révèle déjà prometteuse.

6. Bibliographie

- [ALL] ALLIX O., VIDAL P., « A new multi-solution approach suitable for structural identification problems. », *Comp. Meth. in Applied Mech. and Engrg.*, à paraître.
- [ALL 00] ALLIX O., VIDAL P., « Une première approche de l'identification structurale par la méthode LATIN. », vol. 232, Rapport Interne - LMT Cachan, 2000.
- [AOK 97] AOKI S., AMAYA K., TERUI F., « A new method for identifying elasto / viscoplastic material constants. », IDELSOHN S., ONATE E., DVORKIN E., Eds., *Computational*

Mechanics : New trends and Applications, Proceedings IV World Congress on Computational Mechanics CIMNE, Buenos Aires, 1997.

- [COR 01] CORIGLIANO A., MARIANI S., « Parameter identification of a time-dependent elastic-damage interface model for the simulation of debonding in composites. », *Composites Science and Technology*, vol. 61, 2001, p. 191–203.
- [GOL 96] GOLUB G., LOAN C. V., « Matrix Computations. », *Hopkins University Press*, 3rd edition, 1996.
- [KAL 60] KALMAN R., « A new approach to linear filtering and prediction problems. », *Trans. ASME J. Basic Engineering*, vol. 82, 1960, p. 35–45.
- [KLE 95] KLEIBER M., HIEN T., ANTUNEZ H., KOWALCZYK P., « Parameter sensitivity of elastoplastic response. », *Engrg. Computation*, vol. 12, 1995, p. 263–280.
- [LAD 85] LADEVÈZE P., « Sur une famille d'algorithmes en Mécanique des structures », *Comptes Rendus Acad. Sci. Paris, Série II*, vol. 300, 1985, p. 41–44.
- [LAD 96] LADEVÈZE P., « Mécanique non linéaire des structures, nouvelles approches et méthode de calcul non incrémentale. », Paris, Editions Hermès, 1996.
- [MAH 96] MAHNKEN R., STEIN E., « Parameter identification for viscoplastic models based on analytical derivatives of a least-squares functional and stability investigations. », *Int. J. of Plasticity*, vol. 12, n° 4, 1996, p. 451–479.
- [TAR 99] TARDIEU N., CONSTANTINESCU A., « On the identification of nonlinear constitutive laws from indentation tests. », *3rd Int. Conference on Inverse Problems in Engrg. : Theory and Practice*, Port Ludlow, 1999.
- [VID 01] VIDAL P., « Sur une méthode multi-résolution dédiée à l'identification structurale. », Thèse de doctorat - Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2001.