

La simulation par couplage non-intrusif : De la recherche à l'industrie

école _____
normale _____
supérieure _____
paris – saclay _____

Lionel GENDRE

Edité le 21/04/2010

Cette ressource a pour objectif de présenter quelques solveurs innovants et opérationnels, ainsi qu'une technique permettant de les faire cohabiter avec les outils de simulation utilisés dans l'industrie : le couplage non-intrusif.

1 - Introduction

La simulation du comportement mécanique des structures est souvent réalisée au moyen de solveurs généralistes basés sur la méthode des éléments finis (comme Abaqus, Nastran, Ansys...) qui sont très complets, mais assez anciens et difficilement adaptables. Des chercheurs ont développé de nouveaux modèles et des solveurs plus performants. Cependant, ces innovations sont délicates à implanter en milieu industriel car remplacer les solveurs demande des investissements colossaux, et les modifier est généralement très difficile. Le couplage non-intrusif offre une réponse à cette problématique ; il consiste à conserver les solveurs industriels existants en leur adjoignant des fonctionnalités de façon externe, sans les modifier.

2 - Des solveurs innovants

Afin d'améliorer les performances des simulations réalisées dans l'industrie (c'est-à-dire d'augmenter leur précision ou leur domaine de validité, et de réduire leurs coûts), de nombreux travaux de recherche visent à proposer de nouveaux solveurs spécialisés. Ceux-ci permettent de simuler des phénomènes actuellement hors de portée des solveurs généralistes basés sur la méthode des éléments finis, largement employés dans l'industrie.

On peut notamment citer deux catégories de solveurs innovants :

- Les solveurs enrichis, comme la méthode des éléments finis étendus (X-FEM) [1], permettent de simuler la propagation de fissures (voir ressource « *La simulation des dégradations dans les structures* ») dans une pièce sans mailler la fissure, c'est-à-dire en se basant sur un modèle de la pièce saine et sans effectuer aucun remaillage au cours de la fissuration, voir figure 1a. Cela représente un gain de temps considérable pour les ingénieurs.
- Les solveurs multi-échelles [2,3,4] permettent de simuler des phénomènes se produisant à une échelle microscopique (comme certaines formes de fissuration, ou de nombreux modes de ruine des matériaux composites) au sein de pièces de tailles macroscopiques, voir figure 1b. Alors qu'une étude par éléments finis classiques demanderait de mailler toute la pièce à l'échelle microscopique et serait donc très coûteuse, ces solveurs consistent à distinguer deux échelles dans la modélisation, et ainsi à utiliser deux modèles : un modèle « macroscopique » décrivant toute la pièce, et un modèle « microscopique » qui se limite à une petite région (quitte à en employer plusieurs, si un niveau de détail microscopique est requis sur une grande étendue). Ceci permet de conserver des tailles de problèmes, et donc des coûts, raisonnables.

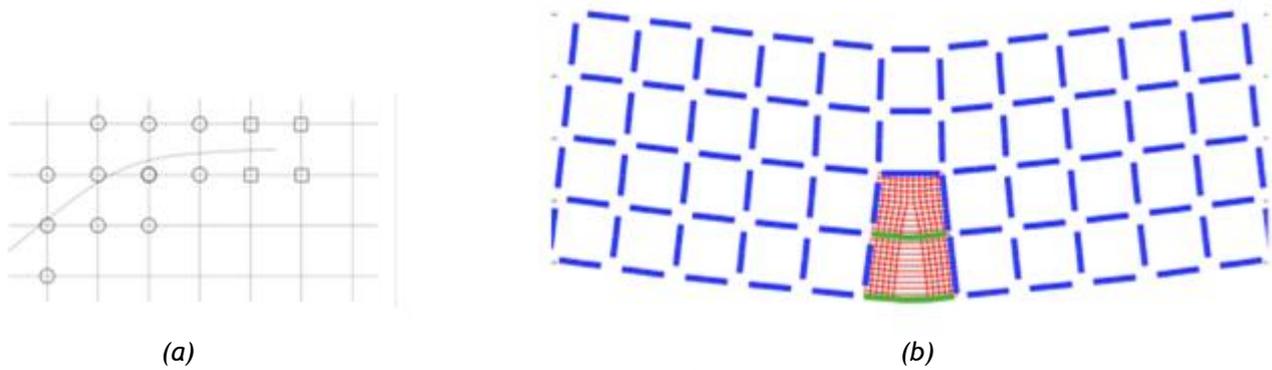


Figure 1 : Exemples de solveurs innovants :

(a) la méthode X-FEM, qui permet de simuler par éléments finis la fissuration sans devoir mailler les fissures ; (b) une simulation multi-échelle de la flexion d'une éprouvette entaillée, où seul le voisinage de l'entaille est modélisé finement. Images Pierre-Alain Guidault

De même, d'autres recherches ont permis de développer des modèles de comportement innovants ; bien que théoriquement utilisables au sein d'un solveur éléments finis classique, il arrive que ces modèles nécessitent quelques adaptations du solveur. C'est le cas, par exemple, de certains modèles d'endommagement des matériaux composites [5]. Ces modèles permettent de simuler le comportement du matériau à l'échelle de la pièce (donc sans décrire les phénomènes microscopiques), jusqu'à la rupture et avec un rapport précision/coût remarquable ; toutefois, ils sont formulés de telle sorte que la contrainte en un point ne dépend pas que de la déformation en ce point, mais également de l'état du matériau au voisinage de ce point. Cette particularité les rend peu compatibles avec le fonctionnement de nombreux logiciels de calcul par éléments finis, et nécessite l'emploi d'un solveur éléments finis adapté.

3 - Le couplage non-intrusif

Cependant, tous ces outils innovants sont souvent difficiles à utiliser en milieu industriel. En effet, la simulation dans l'industrie fait souvent appel à des solveurs généralistes basés sur la méthode des éléments finis, comme Abaqus, Nastran, Ansys... Ces solveurs sont très complets, polyvalents et bien maîtrisés, mais anciens et relativement fermés d'un point de vue logiciel, c'est-à-dire que la moindre adaptation peut demander des développements lourds. Il est donc souvent difficile de leur ajouter de nouvelles fonctionnalités ou de les faire évoluer pour mettre en œuvre les techniques du paragraphe précédent. Quant à remplacer ces solveurs par des logiciels plus innovants, cela demanderait la plupart du temps des investissements colossaux.

Le couplage non-intrusif [6] offre une réponse à cette problématique ; il consiste à introduire un second modèle et un second solveur, construits sur les outils innovants souhaités, et à les faire cohabiter avec un modèle et un solveur industriels, voir figure 2. Le domaine de validité de cette stratégie se limite pour l'instant au cas (fréquent dans l'industrie) où les phénomènes difficiles à simuler, justifiant l'emploi d'une technique innovante, ne se produisent que dans une petite partie de la pièce étudiée ; autrement dit, on suppose que les phénomènes se produisant dans tout le reste de la pièce sont très bien simulés par les outils industriels. On suppose de plus que dans tout le reste de la pièce, le comportement du matériau demeure élastique linéaire.

Les deux modèles et les deux solveurs utilisés pour réaliser la simulation (figure 2) sont donc :

- Le modèle éléments finis « industriel », dit global, muni d'un comportement élastique linéaire et analysé au moyen d'un solveur éléments finis généraliste ;
- Un modèle local limité à la petite zone nécessitant l'emploi d'outils innovants, généralement non-linéaire et raffiné, analysé au moyen d'un solveur « maison » spécialisé.

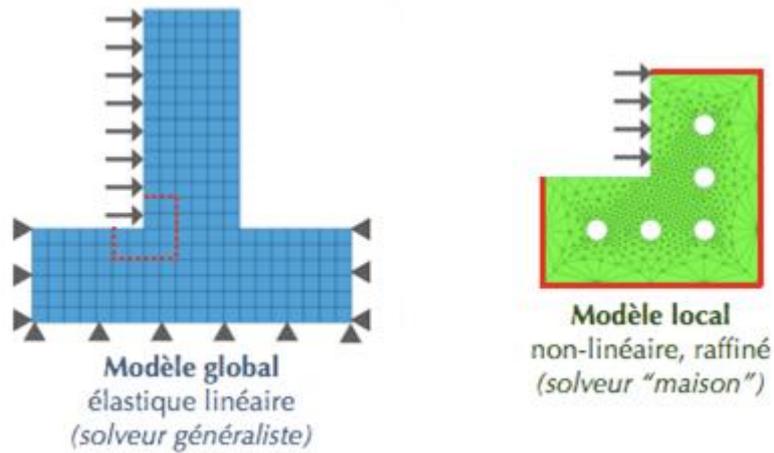


Figure 2 : Exemples de modèle global (à gauche) et local (à droite).

Une technique de couplage est alors employée afin de prendre en compte les interactions qui existent entre les phénomènes locaux, simulés à l'aide du modèle local, et l'équilibre global de la pièce. Cette technique est schématisée sur la figure 3 et comporte les étapes suivantes :

1. On effectue une simulation globale à l'aide du solveur industriel (en haut sur la figure 3).
2. Dans les résultats de cette simulation, on récupère la valeur du champ de déplacements global aux points correspondant à la « frontière » du modèle local (en pointillés rouges sur les schémas).
3. On effectue une simulation locale à l'aide du solveur innovant (en bas sur la figure 3), en utilisant le champ de déplacements global précédemment récupéré comme condition aux limites.
4. A ce stade, les déplacements de la « frontière » sont égaux d'une simulation à l'autre, mais les vecteurs contraintes sur la « frontière » ne sont a priori pas bien raccordées. A partir des résultats des deux simulations, on calcule donc le saut des contraintes sur la « frontière », qui serait nul si les deux solutions étaient correctement raccordées.
5. Si l'ordre de grandeur du saut est suffisamment faible par rapport aux niveaux de chargement observés dans le problème (typiquement, 1000 fois plus faible), on s'arrête là. On dit alors que la méthode a convergé.
6. Sinon, on corrige le résultat global pour tenir compte du résultat local. Pour cela, on prend le saut des contraintes précédemment calculé, et on l'impose en tant que chargement supplémentaire dans le modèle global. Ce chargement est localisé sur la surface intérieure au modèle global qui correspond à la « frontière » (en pointillés rouges).
7. On effectue alors une nouvelle simulation globale à l'aide du solveur industriel, munie de ce chargement supplémentaire, et on répète la méthode depuis l'étape 2, jusqu'à obtenir la convergence.

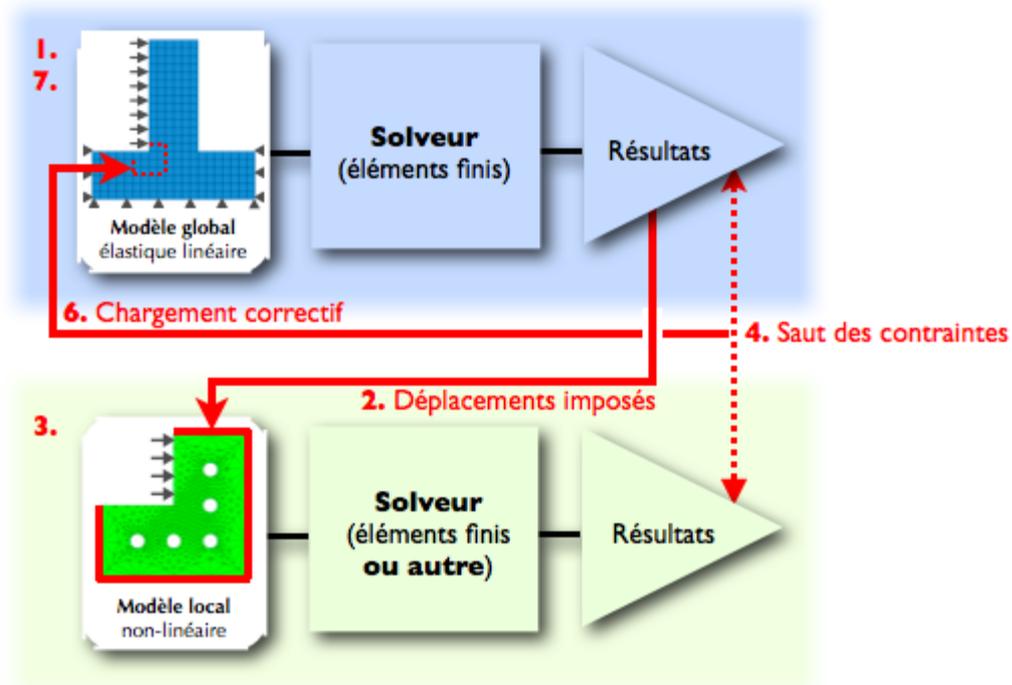


Figure 3 : Principe de la technique de couplage : alterner des simulations locales (sous une condition aux limites issue des résultats globaux) et globales (munies d'un chargement correctif issu des résultats locaux).

Ce mode opératoire possède deux propriétés importantes. La première est qu'il fournit, une fois la convergence atteinte, la solution du problème que l'on obtiendrait en substituant le modèle local au sein du modèle global, voir figure 4. On peut ainsi introduire des outils théoriques complexes, comme ceux évoqués dans la Section 2, au sein d'une simulation industrielle sans pour autant disposer du « solveur idéal » permettant de réaliser cette simulation enrichie : il s'agit donc de coupler des solveurs afin de bénéficier à la fois de la polyvalence et de la robustesse des solveurs généralistes utilisés dans l'industrie, et de la performance des solveurs « maison » issus de la recherche.

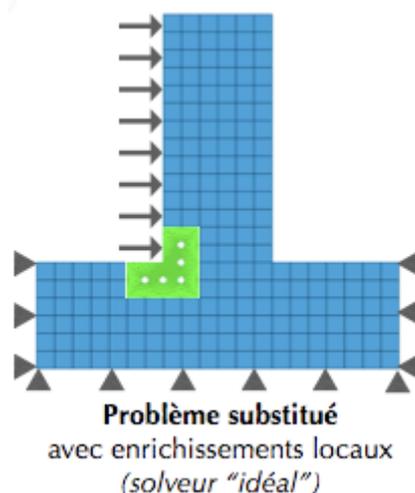


Figure 4 : Le problème « substitué » (que l'on ne sait généralement pas résoudre directement, faute de solveur adapté).

La seconde propriété essentielle est que ni le modèle industriel, ni le solveur généraliste utilisé pour l'analyser ne sont modifiés : l'environnement de calcul industriel (modèles et solveurs) est utilisé tel quel (d'où le terme « non-intrusif ») et les outils « maison » viennent simplement se greffer à côté, ce qui évite aux ingénieurs de devoir modifier leurs modèles ou leurs solveurs et représente donc un gain de temps considérable. La mise en œuvre de la méthode demande

simplement de récupérer des déplacements et des efforts et d'imposer des conditions aux limites et des chargements supplémentaires, ce que permettent de faire la plupart des solveurs éléments finis.

4 - Un exemple d'application : la plasticité locale

Une application possible de cette démarche est la simulation de la plasticité locale dans les aubes des turbines de moteurs d'avions. Cette simulation a pour but d'estimer la durée de vie des aubes, c'est-à-dire le nombre d'heures de vol avant rupture.

4.1 - Problématique industrielle

L'étude porte sur une aube d'une turbine haute pression (figure 5), située juste après la chambre de combustion et exposée notamment à des températures pouvant atteindre 1000 °C. Du fait de cet environnement, lors du fonctionnement du moteur, ces aubes ne restent pas intégralement dans le domaine élastique : il se développe une zone plastique avec des effets visqueux marqués dans la zone la plus sollicitée, c'est-à-dire au niveau du pied de la pale.



Figure 5 : Une aube de turbine haute pression (image G.L. Kindlmann) et la zone où survient la plasticité.

L'expérience des ingénieurs indique que la durée de vie de l'aube est pilotée par deux grandeurs : les contraintes et les déformations plastiques au pied de la pale. Pour prédire la durée de vie, il est donc nécessaire de simuler la réponse de l'aube, munie d'un modèle de comportement élasto-viscoplastique. Malheureusement, une réalisation directe de cette simulation par éléments finis est très longue et donc très coûteuse, car les calculs sont non-linéaires et les maillages des aubes sont complexes (de l'ordre du million de degrés de liberté). Il est donc nécessaire d'adopter une autre approche. Pour ce faire, on peut tirer parti du fait que la plasticité est localisée au pied de la pale.

Nous nous proposons donc de comparer les résultats obtenus par trois méthodes :

- Le couplage non-intrusif décrit au paragraphe précédent ;
- La résolution directe du problème élasto-viscoplastique par éléments finis, qui est coûteuse mais que nous utilisons comme référence ;
- Une technique approchée appelée zoom, qui équivaut à la première itération du couplage non-intrusif, c'est-à-dire une simulation globale suivie d'une simulation locale ; cette technique est abondamment utilisée dans l'industrie en raison de son coût peu élevé.

4.2 - Résultats

La figure 6 représente le modèle banalisé d'une aube ; la géométrie a été fortement simplifiée pour des raisons de confidentialité. Le modèle de comportement associé est élastique linéaire, avec prise en compte des dilatations thermiques. La figure 7 représente un modèle local de la zone plastique (située en pied de pale et repérée en gris sur la figure 6) muni d'un modèle de

comportement élasto-plastique simple, sans effets visqueux (le modèle de comportement a également été simplifié).

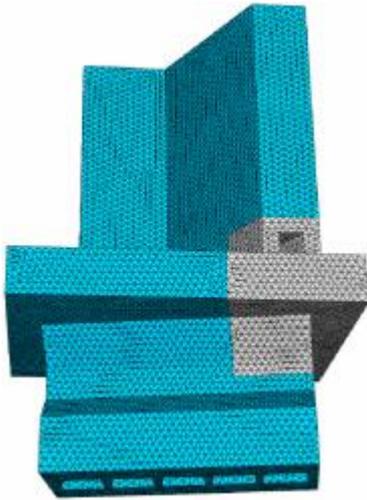


Figure 6 : Modèle global de l'aube simplifiée (avec un comportement élastique linéaire).

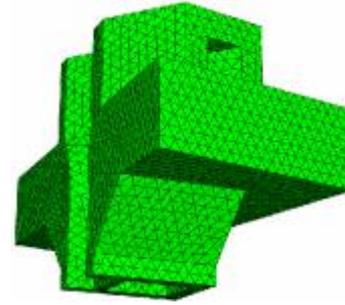


Figure 7 : Modèle local du pied de pale (avec un comportement élasto-plastique).

L'ensemble est soumis à un chargement thermo-mécanique représentatif de l'environnement d'une aube, non représenté sur les figures : champ de températures pré-calculé, efforts centrifuges et pression des gaz sur la pale, l'aube étant en appui sur les deux surfaces inclinées visibles au bas de la figure 6. Les deux modèles sont analysés à l'aide du solveur éléments finis généraliste Abaqus/Standard. Le modèle élasto-plastique complet « de référence » est quant à lui obtenu en substituant le modèle local au sein du modèle global, conformément à la figure 4, et lui aussi résolu à l'aide d'Abaqus/Standard.

Examinons les résultats obtenus pour les deux quantités d'intérêt (contraintes et déformations plastiques). La figure 8 montre la carte des contraintes de Von Mises dans la zone d'intérêt, obtenue par les trois méthodes. On constate que le couplage non-intrusif donne une solution quasiment identique à la référence, avec un écart relatif négligeable sur la contrainte maximale comme sur la contrainte moyenne (environ 0,01%). Le zoom donne quant à lui une solution légèrement différente (les différences sont visibles lorsque l'on regarde les cartes de près) : l'écart relatif n'excède pas 1%, ce qui peut être une valeur acceptable.

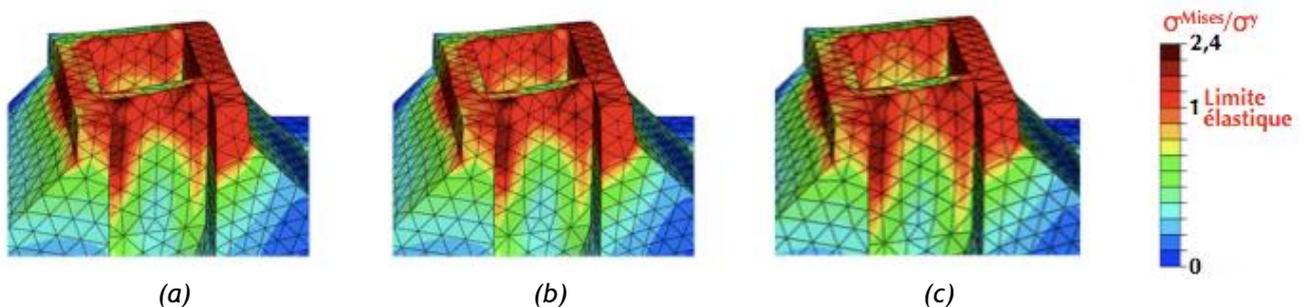


Figure 8 : Comparaison des contraintes de Von Mises obtenues par trois méthodes différentes : (a) couplage non-intrusif, (b) résolution directe (solution de référence), (c) zoom.

La figure 9 donne, de même, les trois cartes des déformations plastiques cumulées. Là encore, le couplage non-intrusif aboutit quasiment à la solution de référence (l'écart relatif est d'environ 0,1%). Cependant, le zoom sous-estime fortement les niveaux de déformations plastiques : la zone plastique est moins étendue que celle du résultat de référence, et l'écart relatif en maximum comme en moyenne est d'environ 60% ! Cette différence par rapport aux contraintes n'est pas surprenante : une fois la limite élastique franchie, les contraintes varient relativement

peu, tandis que les déformations peuvent devenir très élevées. Les écarts relatifs portant sur ces deux quantités n'ont donc naturellement pas le même ordre de grandeur.

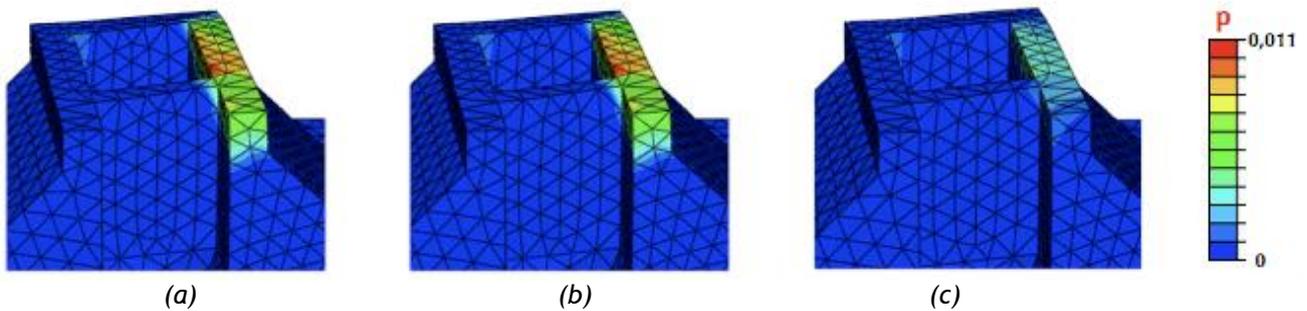


Figure 9 : Comparaison des déformations plastiques cumulées obtenues par trois méthodes différentes : (a) couplage non-intrusif, (b) résolution directe (solution de référence), (c) zoom.

Ce résultat illustre le fait que les techniques de zoom peuvent introduire d'importantes erreurs. Ceci est dû à leur caractère purement descendant : la simulation locale est menée à partir d'un résultat global approché, et la simulation globale n'est jamais corrigée par les résultats locaux. Inversement, le couplage non-intrusif consiste à mener des échanges bidirectionnels entre les deux solveurs, ce qui permet une prise en compte correcte de l'interaction entre la zone élastique et la zone élasto-plastique.

Enfin, la figure 10 donne l'évolution de l'erreur relative (c'est-à-dire l'écart relatif par rapport à la solution de référence) portant sur la déformation plastique cumulée, au fil des itérations ; la valeur de 0,6 observée à l'itération « zéro » correspond aux 60% évoqués ci-dessus. On constate que cette erreur tend bien vers zéro et diminue très rapidement, puisqu'une valeur d'environ 0,1% est obtenue après seulement quatre itérations (c'est à ce stade que les solutions des figures 8 et 9 ont été représentées). Ceci illustre l'efficacité de la méthode.

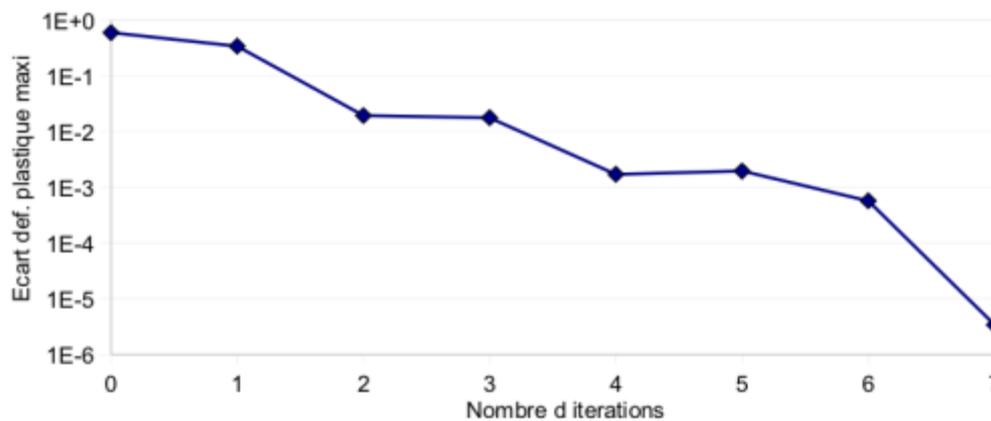


Figure 10 : Evolution de l'erreur relative en déformation plastique maximale au fil des itérations de la méthode.

5 - Conclusion

Le couplage non-intrusif est une technique permettant d'améliorer les performances ou le domaine de validité des solveurs généralistes utilisés dans l'industrie, en les couplant avec un second solveur « maison » de façon externe. Pour l'instant, la méthode a été appliquée pour traiter des problèmes de plasticité localisée. Les développements actuels visent à étendre son domaine de validité, aussi bien pour aborder de nouvelles problématiques (comme les dégradations localisées des matériaux composites) que pour traiter des configurations plus complexes (comme le couplage de trois solveurs, voire plus).

Références :

- [1]: N. Moës, J. Dolbow et T. Belytschko (1999). « A finite element method for crack growth without remeshing ». *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46:131--150.
- [2]: F. Feyel et J.-L. Chaboche (2000). « FE2 multiscale approach for modelling the elastoviscoplastic behaviour of long fiber SiC/Ti composite materials ». *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 183:309--330.
- [3]: H. Ben Dhia (1998). « Problèmes mécaniques multi-échelles : la méthode Arlequin ». *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, IIb(326):899--904.
- [4]: P. Ladevèze et D. Dureisseix (2000). « A micro/macro approach for parallel computing of heterogeneous structures ». *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 1:18--28.
- [5]: P. Ladevèze et G. Lubineau (2001). « On a damage mesomodel for laminates: micro-meso relationships, possibilities and limits ». *Composites Science and Technology*, 61:2149--2158.
- [6]: L. Gendre, O. Allix et P. Gosselet (2009). « Non-intrusive and exact global/local techniques for structural problems with local plasticity ». *Computational Mechanics*, 44:233--245.