



**HAL**  
open science

# Technique de substitution non-intrusive pour le calcul d'assemblage de plaques boulonnées

Guillaume Guguin, Pierre Gosselet, Olivier Allix

► **To cite this version:**

Guillaume Guguin, Pierre Gosselet, Olivier Allix. Technique de substitution non-intrusive pour le calcul d'assemblage de plaques boulonnées. 12e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2015, Giens, France. hal-01514284

**HAL Id: hal-01514284**

**<https://hal.science/hal-01514284>**

Submitted on 26 Apr 2017

**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.

Public Domain

# Technique de substitution non-intrusive pour le calcul d'assemblage de plaques boulonnées

G. Guguin<sup>1</sup>, P. Gosselet<sup>1</sup>, O. Allix<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LMT, ENS-Cachan, CNRS, UnivParis-Saclay  
pierre.gosselet@lmt.ens-cachan.fr

**Résumé** — Les méthodes de substitution non-intrusive ont ouvert la voie à un large éventail de couplages entre modèles parfois de natures très différentes. On présente ici une technique de couplage permettant de remplacer virtuellement des connecteurs 1D par des modèles 3D de boulons au sein d'assemblages de structures composites fines modélisées par des éléments plaques. Cette méthode permet de plus d'utiliser un solveur dédié spécialisé dans le traitement du contact (COFAST) pour le calcul des boulons, au sein d'un calcul industriel sous Code\_Aster.

**Mots clés** — couplage non-intrusif, assemblage, contact.

## 1 Introduction

La simulation des assemblages de plaques composites boulonnées et de l'évolution de leurs dégradations en situation réelle est un challenge particulièrement complexe à relever pour l'industrie aéronautique. En effet, si l'on souhaite observer la redistribution des charges et son effet à travers l'ensemble d'une structure ( $\sim 1\text{m}$ ), il est nécessaire de modéliser très finement les phénomènes locaux ( $\sim 0.1\text{mm}$ ) mis en jeu dans la dégradation des plaques composites tels que délaminage, contact, endommagement. L'inconvénient de tels modèles locaux est que ceux-ci requièrent une puissance de calcul importante, qui rend leur calcul possible que sur une petite portion de la structure. La pratique industrielle est alors d'utiliser des approches descendantes : partir de modèles grossiers de la structure et en extraire les quantités nécessaires à la création de modèles fins uniquement là où ceux-ci sont nécessaires. Cependant dans ce type d'approche l'influence de la réponse locale sur la structure est totalement négligée.

Les méthodes de type substitution non-intrusive cherchent à corriger ce problème tout en conservant l'environnement de calcul de l'industriel, notamment les solveurs et modèles déjà développés. Des modèles locaux assimilables à des patchs viennent *virtuellement* modifier le modèle global. Un aspect important de la technique de substitution non-intrusive est que la mise en œuvre peut être réalisée en dehors des solveurs utilisés. Il est ainsi possible d'intégrer des techniques particulières de calculs au sein de codes commerciaux généralistes. Le projet ANR ICARE<sup>1</sup>, regroupant laboratoires et industriels, est particulièrement dédié à l'étude et à l'application pratique de ce type de méthodes, avec notamment des travaux portant sur le couplage plaque/3D [5], le couplage XFEM/FEM dans le cas de suivis de fissure [2], ou encore le couplage entre approche déterministe et approche stochastique [1].

Ce papier est organisé comme suit : la méthode non-intrusive et quelques variantes sont présentées puis la question du raccord plaque-3D est abordée et illustrée par un exemple de calcul de liaison simplifiée.

## 2 Approches classiques et alternatives

### 2.1 Principe de l'approche classique

La technique de substitution non-intrusive telle que développée par L. Gendre [4] consiste à utiliser un modèle global  $\Omega^G$  dont une redéfinition partielle est réalisée par un modèle local  $\Omega^L$  (Figure 1). La

1. ANR-12-MONU-0002-04 finançant une partie de ces travaux. Partenaires : EADS-IW, EDF, DISTENE, GeM Nantes, LMT Cachan, Institut Clément Ader Toulouse

zone substituée est appelée zone d'intérêt et est notée  $\Omega^{G,I}$  dans le modèle global, on définit également la partie complémentaire globale notée  $\Omega^{G,C} = \Omega^G \setminus \Omega^{G,I}$ .

Le modèle global est défini par les équations :

$$\begin{cases} \mathbf{K}^G \mathbf{u}^G = \mathbf{f}_{ext}^G + \boldsymbol{\delta} \\ \boldsymbol{\lambda}^{G,C} = \mathbf{K}^{G,C} \mathbf{u}^G - \mathbf{f}_{ext}^{G,C} \end{cases} \quad (1)$$

Où  $\boldsymbol{\delta}$  sont des forces nodales de correction introduites par le couplage, et  $\boldsymbol{\lambda}^{G,C}$  sont les réactions nodales de la zone complémentaire  $\Omega^{G,C}$  sur la zone d'intérêt  $\Omega^{G,I}$ . Au début du calcul on initialise en choisissant  $\boldsymbol{\delta} = 0$ .

On résout ensuite le problème local sur  $\Omega^L$  avec :

$$\begin{cases} \mathbf{u}^L = \mathbf{u}_{\Gamma^I}^G \\ \mathbf{f}_{int}^L(\mathbf{u}^L) = -\mathbf{f}_{ext}^L + \boldsymbol{\lambda}^L \end{cases} \quad (2)$$

La première équation représente la continuité des déplacements imposés à l'interface  $\Gamma^I$ . La seconde équation est la résolution du problème par un opérateur éventuellement non-linéaire  $\mathbf{f}_{int}^L$ . On extrait de ce calcul local les efforts de réaction  $\boldsymbol{\lambda}^L$  aux déplacements imposés.

Finalement l'équilibre des efforts est évalué par un résidu  $\mathbf{r}$  défini par :

$$\mathbf{r} = \boldsymbol{\lambda}^{G,C} + \boldsymbol{\lambda}^L \quad (3)$$

Si la norme de ce résidu est trop importante la correction à apporter dans le modèle global est définie comme :  $\boldsymbol{\delta} \leftarrow \boldsymbol{\delta} - \mathbf{r}$ . Une nouvelle solution globale est alors évaluée et on itère les calculs jusqu'à convergence du résidu et ainsi équilibre des efforts d'interface entre les modèles.

Cette stratégie est apparentée à une méthode de type point fixe et hérite des mêmes particularités. Il a été démontré que diverses améliorations pouvait être apportées à cette méthode :

- Utilisation de relaxation pour converger dans le cas d'une zone locale trop souple.
- Accélération quasi-newton, par mise à jour de l'opérateur de correction via formule de Sherman Morrison : technique SR1 [3].
- Accélération par optimisation du facteur de relaxation, algorithme de Aitken's (Delta-2) [6]
- Condition limite mixte bien choisie à appliquer sur le modèle local [3],
- Accélération Krylov dans le cas linéaire.

## 2.2 Adaptation de la stratégie pour le couplage plaque/3D

Pour appliquer cette stratégie à des cas de couplage plaque/3D, deux adaptations ont été proposées.

La première modification concerne la définition d'un déplacement 3D associé à une solution plaque via une technique de relèvement numérique [5]. Cette technique permet de créer automatiquement un déplacement 3D s'adaptant au mieux à la plaque considérée, en limitant le plus possible les effets artificiels engendrés par le raccord.

La deuxième modification concerne l'ajout d'une *zone tampon* ( $\Omega^B$ , voir la figure 2) permettant d'absorber la pollution locale due à l'imperfection du raccord. Dans la réalisation de la stratégie, cela revient à considérer désormais deux interfaces, la première  $\Gamma_C$  sur laquelle on applique le raccord en déplacement, et la seconde  $\Gamma_I$  permettant de calculer le résidu en effort dans une zone non polluée par les effets de bords dus à l'interface  $\Gamma_C$ .

En interprétant la méthode de couplage comme une méthode de Schwarz optimisée il est possible de montrer que ces deux ajouts n'impactent pas la formulation générale de la stratégie. Au final, le seul paramètre de la méthode est ainsi la taille de la *zone tampon* considérée, qui doit être suffisamment large pour absorber les effets locaux parasites produits par l'interface.

## 3 Exemple des assemblage de plaques boulonnées

### 3.1 Couplage Code\_Aster/COFAST

Le cadre d'application visé étant les assemblages complexes, l'exemple minimal traité est l'assemblage de deux plaques isotropes via une liaison boulonnée. L'enjeu est de réutiliser un modèle global

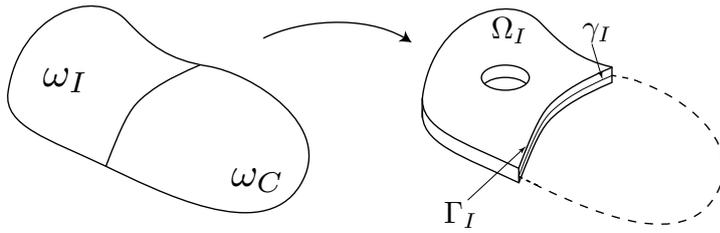


FIGURE 1 – Définition du modèle hybride.

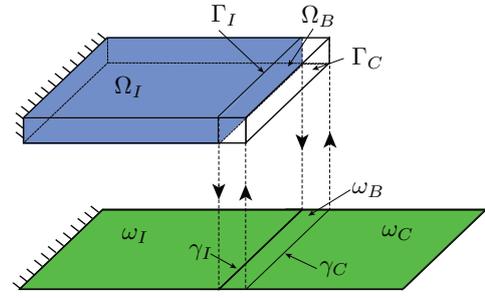


FIGURE 2 – Définition du modèle avec recouvrement.

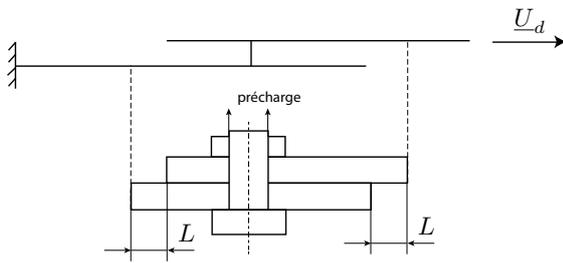


FIGURE 3 – Schéma du couplage plaque/3D.

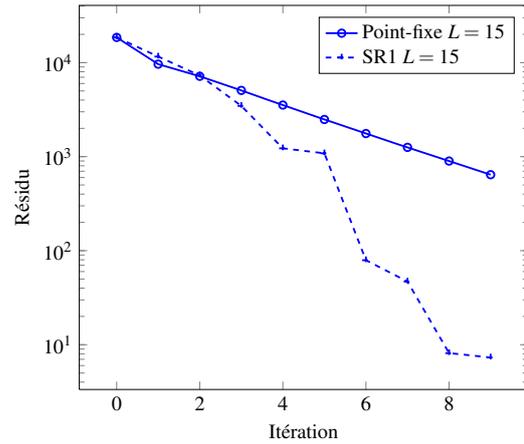


FIGURE 4 – Résidu au cours des itérations.

d'assemblage de plaques avec connecteur poutre, et de substituer à ce connecteur très simple un modèle 3D complet avec prise en compte du contact (Figure 3). Afin de démontrer les avantages de la substitution non-intrusive, on utilise ici un solveur généraliste pour le calcul global, Code\_Aster et un code dédié aux calculs de structures assemblées pour la partie 3D, COFAST. L'utilisation de COFAST permet de résoudre de façon très rapide les calculs locaux.

Sur ce type d'exemple, bien que assez irrégulière, l'accélération SR1 permet au résidu de converger en moins d'itérations (Figure 4). La Figure 5 montre la configuration déformée issue du couplage entre le modèle plaque élastique et le modèle 3D avec prise en compte du contact. Au final les seuls paramètres à choisir pour le couplage sont le placement de l'interface  $\Gamma^I$  et la largeur de la zone tampon à utiliser, les paramètres du connecteur poutre influencent la convergence de la méthode mais pas sa limite.

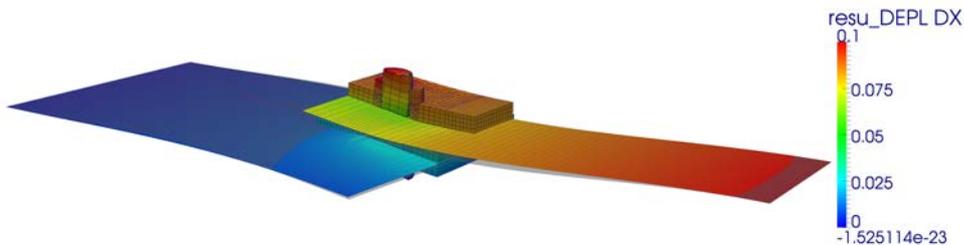


FIGURE 5 – Configuration déformée à l'issue des itérations.

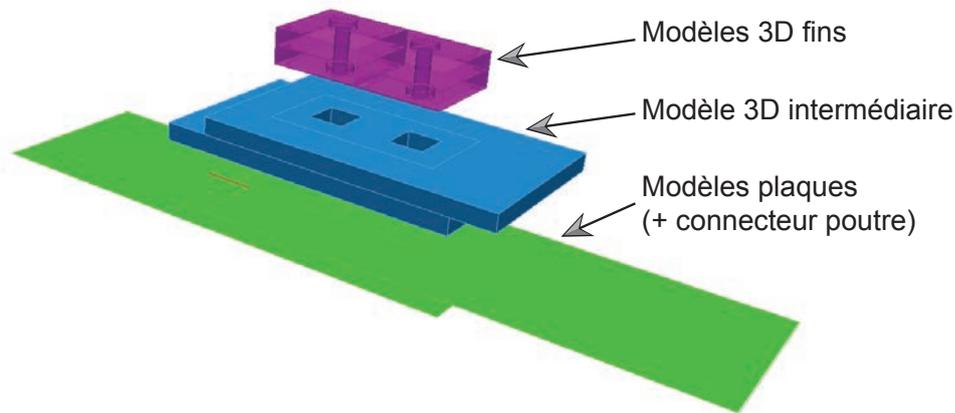


FIGURE 6 – Représentation des différents modèles selon les niveaux.

### 3.2 Évolution vers une stratégie multi-niveaux

L'utilisation de la *zone tampon* permet d'ajouter de la robustesse à la stratégie globale/locale dans le cas d'un raccord plaque/3D mais son utilisation ne permet pas d'avoir des patches directement adjacents, contrairement à une version classique d'un couplage entre modèles 3D/3D. Les assemblages complexes étant souvent composé de dizaines de boulons très rapprochés les uns des autres, l'utilisation de patches adjacents est *a priori* souhaitable.

On propose donc d'étudier une méthode non-intrusive sur plusieurs niveaux (Figure 6) : le modèle global est couplé avec un modèle intermédiaire 3D (couplage plaque/3D avec *zone tampon*). Ce dernier est lui même couplé avec plusieurs patches locaux 3D adjacents entre eux (couplage 3D/3D sans *zone tampon*).

### Références

- [1] M.Chevreuril, A.Nouy, E.Safatly. *A multiscale method with patch for the solution of stochastic partial differential equations with localized uncertainties*, Comp Meth. in Applied Mech. and Eng, Elsevier, 255–274, 2013.
- [2] M.Duval, JC.Passieux, M.Salaün, S.Guinard. *Non-intrusive coupling : recent advances and scalable nonlinear domain decomposition*, Arch. of Comp. Mech. in Eng., Springer, 2014.
- [3] L.Gendre, O.Allix, P.Gosselet. *A two-scale approximation of the Schur complement and its use for non-intrusive coupling*, Int. J. for Num. Meth in Eng., Elsevier, 889–905, 2011.
- [4] L.Gendre, O.Allix, P.Gosselet., F.Comte. *Non-intrusive and exact global/local techniques for structural problems with local plasticity*, Comp. Mech., Springer, 233–245, 2009.
- [5] G.Guguin, O.Allix, P.Gosselet, S.Guinard. *Nonintrusive coupling of 3D and 2D laminated composite models based on finite element 3D recovery*, Int. J. for Num. Meth in Eng., Elsevier, 324–343, 2014.
- [6] Y.Liu, Q.Sun, X.Fan *A non-intrusive global/local algorithm with nonmatching interface : Derivation and numerical validation*, Comp Meth. in Applied Mech. and Eng, 277 :81—103, 2014