

Manuel d'Utilisation**Fascicule U2.08 : Fonctions avancées et contrôle des calculs****Document : U2.08.01**

Utilisation des indicateurs d'erreur et stratégies d'adaptation de maillages associées

Résumé :

Ce document décrit l'utilisation dans *Code_Aster* des indicateurs d'erreur et leur utilisation dans un contexte d'adaptation de maillage. En ce sens, il vise à faire une synthèse destinée à fournir à l'utilisateur les réponses préalables à l'utilisation de l'adaptation de maillages : où trouver des informations dans la documentation *Code_Aster*, quel est le périmètre d'utilisation, quelles sont les bonnes pratiques à mettre en œuvre ? Des exemples d'utilisation viennent illustrer les possibilités et la mise en œuvre de stratégies de remaillage.

1 Introduction

Les indicateurs d'erreur et l'adaptation de maillages sont utiles à l'utilisateur pour fournir des calculs les plus fiables possible vis-à-vis des erreurs de discrétisation (dues à la méthode éléments finis employée).

Les indicateurs d'erreur sont calculés en post-traitement de Aster, tandis que l'adaptation de maillage est effectué par appel à un programme externe, spécialisé dans cette tâche, HOMARD.

Le but de ce document est de fournir un « point d'entrée » le plus complet possible à destination de l'utilisateur désirant mettre en œuvre ce genre de techniques dans ses calculs. Le plan du document est alors le suivant :

- 1) le périmètre d'utilisation (que peut-on faire ?) ;
- 2) les références utiles à lire avant utilisation (où aller chercher des informations plus approfondies que celles apportées dans ce document ?) ;
- 3) un rappel schématique de la méthodologie d'adaptation de maillages ;
- 4) un rappel des commandes et options à utiliser (comment écrire le fichier de commande ?) ;
- 5) un ensemble de conseils sur les « bonnes pratiques » à mettre en œuvre (quels sont les points dignes d'attention lors de l'utilisation ?) ;
- 6) quelques exemples illustrant l'utilisation de ces techniques et les conseils donnés précédemment (comment faire en pratique ?).

2 Périmètre d'utilisation

Le domaine d'utilisation des indicateurs d'erreur et de l'adaptation de maillage est délimité par les contraintes suivantes (on se reportera aux documents de référence donnés ci-dessous pour plus de détails) :

- les erreurs prises en compte sont les erreurs de discrétisation spatiale (donc la taille des éléments employés) ; en particulier, les erreurs de discrétisation temporelle (ou pseudo-temporelle dans le cas de matériaux non-linéaires) sont en dehors de ce périmètre ;
- les phénomènes physiques sont limités à la mécanique (linéaire ou non-linéaire, Cf. ci-dessous) et à la thermique (idem.) ;
- en mécanique comme en thermique, le comportement peut être linéaire ou non linéaire (sauf pour l'estimateur d'erreur de Zhu-Zienkiewicz en mécanique qui ne traite que le comportement linéaire), sachant que les résultats théoriques des indicateurs d'erreur sont obtenus dans le domaine linéaire (leur utilisation dans le domaine non-linéaire n'est donc pas basé sur des résultats théoriques mais sur une constatation empirique de leur intérêt) ;
- les éléments utilisés peuvent être quelconques pour l'utilisation des indicateurs d'erreurs (sauf pour l'estimateur d'erreur de Zhu-Zienkiewicz en mécanique, qui ne traite que les éléments 2D ; l'estimateur ZZ2 n'accepte que des maillages composés soit de triangles soit de quadrangles) ; en revanche, l'utilisation de l'adaptation de maillages avec HOMARD nécessite pour l'instant l'emploi d'éléments dans la liste (point, segment, triangle, tétraèdre) à l'exclusion de tout autre. Ces éléments peuvent être linéaires ou quadratiques.

3 Références utiles

Les documents [bib1] à [bib5] traitent des estimateurs d'erreur et du l'outil d'adaptation de maillage HOMARD.

Les documents [bib6] à [bib8] forment le support des formations *Aster* sur le sujet.

A propos du choix des éléments finis, on pourra se reporter au document [bib9].

- [1] X. DESROCHES : « Estimateur d'erreur de Zhu-Zienkiewicz en élasticité 2D ». [R4.10.01], 1994.
- [2] X. DESROCHES : « Estimateur d'erreur en résidu ». [R4.10.02], 2000.
- [3] O. BOITEAU : « Indicateur d'erreur spatiale en résidu pour la thermique transitoire ». [R4.10.03], 2001.
- [4] G. NICOLAS & al. http://www.code_aster.org/outils/homard
- [5] G. NICOLAS : « Macro-commande MACR_ADAP_MAIL ». Doc [U7.03.01].
- [6] O. BOITEAU : Cas-test. « FORMA04 – Maillage adaptatif mécanique sur une poutre en flexion ». Doc [V6.03.119]
- [7] O. BOITEAU : Cas-test. « FORMA05 – Maillage adaptatif thermo-mécanique sur une culasse fissurée ». Doc [V6.03.120]
- [8] O. BOITEAU : Cours et TP « Indicateurs d'erreur et adaptation de maillage. Etat de l'art et implantation dans le *Code_Aster* ». http://www.code_aster.org/utilisation/formations
- [9] S. MICHEL-PONNELLE : « Notice d'utilisation sur le choix des éléments finis ». Doc [U2.01.10]

Principe général

Les indicateurs d'erreur utilisés dans *Aster* sont des indicateurs a posteriori, on donne ci-dessous un schéma précisant leur utilisation. On trouvera dans les cas-tests [bib6] et [bib7] ainsi que dans la suite de ce document des exemples d'utilisation des fonctionnalités du langage de commande *Aster* (basé sur Python) adaptés à cet usage.

1) Définition des données du calcul (en particulier le maillage) 2) Résolution du problème 3) Calcul des indicateurs d'erreur (post-traitement)	1) Définition des données du calcul (en particulier le maillage initial) 2) Résolution du problème 3) Calcul des indicateurs d'erreur (post-traitement) 4) Adaptation du maillage (basé sur un des indicateurs calculés à l'étape 3)
Utilisation des indicateurs d'erreur	Utilisation de l'adaptation de maillage

4 Rappel des commandes et options Aster à utiliser

4.1 Estimateur d'erreur en mécanique de Zhu-Zienkiewicz

Le calcul de l'estimateur d'erreur s'effectue directement dans l'opérateur `CALC_ELEM` avec les options :

`OPTION='ERRE_ELEM_NOZ1'` pour l'estimateur ZZ1 ;
`OPTION='ERRE_ELEM_NOZ2'` pour l'estimateur ZZ2.

Le calcul du champ (aux nœuds) de contraintes lissées peut être déclenché séparément (peu utile en pratique) :

`OPTION='SIGM_NOZ1_ELGA'` pour le lissage ZZ1
`OPTION='SIGM_NOZ2_ELGA'` pour le lissage ZZ2

L'estimateur fournit :

- un champ par élément comportant 3 composantes :

`'ERREST'` : l'erreur absolue estimée sur l'élément $\eta(K)$;

`'NUEST'` : l'erreur relative estimée sur l'élément $\eta_{rel}(K) = 100 \times \frac{\eta(K)}{\sqrt{\eta(K)^2 + \|\sigma_h\|_{0,K}^2}}$;

`'SIGCAL'` : la norme d'énergie de la solution calculée $\|\sigma_h\|_{0,K}$;

- des sorties-listing comportant les mêmes informations au niveau global.

4.2 Estimateur d'erreur en mécanique de type résidu

Avant de calculer l'indicateur d'erreur, il faut effectuer le calcul du champ (aux nœuds par éléments) de contraintes pour normer l'erreur, par l'opérateur `CALC_ELEM` :

`OPTION='SIGM_ELNO_DEPL'` en élasticité (après `MECA_STATIQUE`) ;
`OPTION='SIEF_ELNO_ELGA'` en non-linéaire (après `STAT_NON_LINE`).

Le calcul de l'estimateur d'erreur proprement dit s'effectue également dans l'opérateur `CALC_ELEM` avec les options :

`OPTION='ERRE_ELGA_NORE'` pour le calcul aux points de Gauss ;
`OPTION='ERRE_ELNO_ELGA'` pour le calcul aux nœuds par éléments.

L'estimateur fournit :

- un champ par élément comportant 3 composantes :

`'ERREST'` : l'erreur absolue estimée sur l'élément $\eta(K)$;

`'NUEST'` : l'erreur relative estimée sur l'élément $\eta_{rel}(K) = 100 \times \frac{\eta(K)}{\sqrt{\eta(K)^2 + \|\sigma_h\|_{0,K}^2}}$;

`'SIGCAL'` : la norme d'énergie de la solution calculée $\|\sigma_h\|_{0,K}$.

- des sorties-listing comportant les mêmes informations au niveau global.

4.3 Estimateur d'erreur en thermique (de type résidus)

Le calcul de l'estimateur d'erreur s'effectue dans l'opérateur CALC_ELEM avec les options :

OPTION='ERTH_ELEM_TEMP' pour le calcul par éléments ;

OPTION='ERTH_ELNO_TEMP' pour le calcul par éléments aux nœuds.

L'estimateur fournit les composantes suivantes (on remarquera que tous les champs sont accessibles individuellement, on en soulignera l'intérêt dans les exemples) :

	Erreur absolue	Erreur relative	Terme de normalisation
Terme volumique	$\eta_{R,vol}^{n+1}(K)$	$\frac{\eta_{R,vol}^{n+1}(K)}{N_{R,vol}^{n+1}(K)} \times 100.$	$N_{R,vol}^{n+1}(K) := h_K \ s_{\theta,h}^{n+1}\ _{0,K}$
	TERMVO	TERMV2	TERMV1
Terme de saut	$\eta_{R,saut}^{n+1}(K)$	$\frac{\eta_{R,saut}^{n+1}(K)}{N_{R,saut}^{n+1}(K)} \times 100.$	$N_{R,saut}^{n+1}(K) := \frac{h_F^{\frac{1}{2}}}{2} \left\ \frac{1}{\sum_{K \in \Delta_F} \lambda} \frac{\partial T_{\theta,h}^{n+1}}{\partial n}(K') \right\ _{0,F}$
	TERMSA	TERMS2	TERMS1
Terme de flux	$\eta_{R,flux}^{n+1}(K)$	$\frac{\eta_{R,flux}^{n+1}(K)}{N_{R,flux}^{n+1}(K)} \times 100.$	$N_{R,flux}^{n+1}(K) := h_F^{\frac{1}{2}} \ g_{\theta,h}^{n+1}\ _{0,F}$
	TERMFL	TERMF2	TERMF1
Terme d'échange	$\eta_{R,éch}^{n+1}(K)$	$\frac{\eta_{R,éch}^{n+1}(K)}{N_{R,éch}^{n+1}(K)} \times 100.$	$N_{R,éch}^{n+1}(K) := h_F^{\frac{1}{2}} \ (hT_{ext})_{\theta,h}^{n+1}\ _{0,F}$
	TERMEC	TERME2	TERME1
Total	$\eta_R^{n+1}(K) := \sum_i \eta_{R,i}^{n+1}(K)$	$\frac{\eta_R^{n+1}(K)}{N_R^{n+1}(K)} \times 100.$	$N_R^{n+1}(K) := \sum_i N_{R,i}^{n+1}(K)$
	ERTABS	ERTREL	TERMNO

Pour une bonne utilisation, il faut faire attention aux points suivants (Cf. documentation R7.10.03) :

- appel préliminaire 'FLUX_ELNO_TEMP' obligatoire avant le calcul des indicateurs d'erreurs ;
- homogénéité entre le paramétrage du solveur thermique et l'outil de post-traitement ;
- règles de surcharge particulières concernant les chargements (génération d'alarme <A> en cas de non-respect) ;
- calcul sur tout le maillage associé au modèle (génération d'erreur <F> en cas de non-respect) entre deux pas de temps contigus ou non (génération d'alarme <A> en cas de non-respect) ;
- tous les éléments 2D-plan/axi et 3D sont traités (sauf PYRAM : génération d'alarme <A>) ;
- toutes les conditions limites sauf ECHANGE_PAROI, FLUX_NL et RAYO sont prises en compte (génération d'alarme <A> en cas d'utilisation d'ECHANGE_PAROI, FLUX_NL ou RAYO) ;
- le maillage tolère les « ébauches » mais nécessite d'être un peu « nettoyé » (pas de SEG/FACE intercalés dans des surfaces/volumes, problème de symétrisation, de points doubles : génération d'alarme <A> ou d'erreur <F>).

4.4 Adaptation de maillage avec HOMARD

La macro-commande MACR_ADAP_MAIL se contrôle avec les options suivantes :

_F	Mot-clé	Choix
ADAPTATION	LIBRE	'RAFF_DERA'
		'RAFFINEMENT'
	ou	'DERAFFINEMENT'
	UNIFORME	'RAFFINEMENT'
		'DERAFFINEMENT'
	MAILLAGE_N/NP1	
	RESULTAT_N	'EVOL_NOLI' (*)
	INDICATEUR	'ERRE_ELGA_NORE' (*)
	NOM_CMP_INDICA	'ERREST' (*)
	CRIT_RAFF_PE	Permet de contrôler la proportion d'éléments à raffiner/déraffiner
	_REL	
	_ABS	
	CRIT_DERA_PE	
	_REL	
	_ABS	
	NIVE_MAX	Niveau max. de raffinement
	NIVE_MIN	Niveau min. de raffinement

(*) exemple donné sur un calcul non-linéaire, utilisation de l'indicateur en résidu absolu.

Autres options possibles :

- mise à jour de champs sur le nouveau maillage (MAJ_CHAMP) ; on ne peut pas (encore) mettre à jour des champs aux points de Gauss (comme les variables internes par exemple) ;
- diagnostics sur la qualité du maillage (QUALITE, INTERPENETRATION, TAILLE, CONNEXITE).

Précautions d'emploi :

- adaptation d'un maillage total (pas de sélection par mailles, groupes de mailles, nœuds, groupe de nœuds) ;
- les groupes de mailles sont adaptés, en revanche les groupes de nœuds sont laissés inchangés (il faut donc s'astreindre à imposer des conditions aux limites sur des groupes de mailles et non des groupes de nœuds) ; il faut donc proscrire (mais c'est une règle de bon sens) l'utilisation directe de mailles et nœuds lors des affectations pour lui préférer la notion de groupe de mailles ;
- les reprises (par le mot-clé 'POURSUITE') sont à éviter : HOMARD perd alors la hiérarchie des éléments raffinés : le premier maillage de la poursuite est considéré par HOMARD comme un maillage initial (sans possibilité de déraffiner par exemple) ;
- on rappelle que l'adaptation par HOMARD n'accepte que des nœuds, POINT, SEG, TRIA ou TETRA, de degré 1 ou 2, dans un maillage conforme en zones connexes ou non, de même dimension ou non ;
- HOMARD ne réalise pas encore le suivi de courbe (il se base sur les éléments fournis : par exemple, si le maillage d'un cercle est fourni dans le maillage initial par son approximation en N segments d'ordre 1, HOMARD raffinerait éventuellement les N segments mais le cercle sera toujours vu géométriquement comme une succession de ces N segments).

4.5 Préanalyse d'un maillage

Le diagnostic sur la qualité d'un maillage activable dans la macro `MACR_ADAP_MAIL` peut aussi être obtenu indépendamment par la macro `MACR_INFO_MAIL`. Il permet de réaliser les vérifications suivantes :

- vérifier la concordance du maillage avec la géométrie initiale (en masse, en dimension, en surface et en volume) ;
- lister les `GROUP_MA` et `GROUP_NO`, pour une bonne modélisation des conditions aux limites ;
- diagnostiquer d'éventuels problèmes (symétrisation ou connexité, éléments d'ébauche, mauvaise prise en compte de conditions aux limites, interpolation d'éléments) ;
- évaluer la qualité du maillage par l'indicateur $\sigma_K = \frac{h_K}{\rho_K}$ (normalisé à 1 pour des triangles/tetraèdres équilatéraux ; par définition supérieur à 1). Un critère empirique peut être proposé : par exemple, au moins 50% des EFs < 1.5, au moins 90% des EFs < 2, pas d'éléments au dessus de 10.

5 Conseils et bonne pratique

- Choix de l'indicateur d'erreur en mécanique : l'utilisateur a le choix entre ZZ1 (première version de l'indicateur de Zhu-Zienkiewicz), ZZ2 (deuxième version de l'indicateur de Zhu-Zienkiewicz), et l'indicateur en résidus. Les deux premiers ont un domaine d'application assez réduit (2D linéaire pour ZZ1 et ZZ2, un seul type d'élément fini dans tout le maillage pour ZZ2) : pour une utilisation « standard », on préférera l'indicateur en résidus.
- L'enchaînement « opérateurs thermo-mécaniques / `MACR_ADAP_MAIL` option 'UNIFORME' » (i.e. sans indicateur d'erreur) permet de faire converger proprement, automatiquement et facilement un maillage. Il faut cependant prendre garde au nombre de degrés de liberté engendrés ! Ceci constitue une solution de facilité, rapide et robuste, mais rapidement extrêmement coûteuse (plutôt à réserver pour évaluer s'il y a de grosses erreurs de discrétisation ou pour de petites études).
- L'enchaînement « opérateurs thermo-mécaniques / `MACR_ADAP_MAIL` option 'LIBRE' » (i.e. avec indicateur d'erreur) permet de faire converger de la manière la plus optimale possible (compte-tenu des outils disponibles) le maillage. Cette méthode demande plus d'efforts que la précédente mais le nombre de degrés de liberté générés est proportionnellement beaucoup plus faible.
- L'enchaînement « opérateurs thermo-mécaniques / `MACR_ADAP_MAIL` » peut être réalisé efficacement dans une boucle Python (boucle de type « for »), avec éventuellement un test de sortie (boucle de type « while »).
- La qualité des éléments est peu impactée par le processus de raffinement / déraffinement. Compte-tenu des choix opérés dans HOMARD®, elle peut même s'améliorer en 3D !
- `MACR_ADAP_MAIL` ne dispose pas de processus de régularisation, donc un mauvais maillage initial produira probablement un mauvais maillage adapté !
- Les éléments linéaires sont déconseillés en mécanique. La bonne pratique est plutôt : P_1 lumpé en thermique (`PLAN_DIAG`, `AXIS_DIAG`, `3D_DIAG`) et P_2 (éventuellement sous-intégrés) en mécanique, Cf. [bib9].
- Le choix du type d'éléments finis prime sur la qualité des mailles sur lesquelles viennent s'appuyer les éléments (Cf. exemple de la poutre ci-dessous).
- Le type d'indicateur et son mode de normalisation peut avoir une incidence sur le maillage adapté. Par exemple, en mécanique, $\eta_{rel}(K) = 100 \times \frac{\eta(K)}{\sqrt{\eta(K)^2 + \|\sigma_h\|_{0,K}^2}}$. Cette façon de

normaliser peut être dangereuse : s'il y a des zones où la norme de contraintes est faible, l'erreur va avoisiner 100% sur cette zone ; s'il y a des zones où la norme de contraintes est très élevée (singularités par exemple), l'erreur va être faible sur cette zone. Ce n'est évidemment pas le résultat recherché. *Il faut donc utiliser de préférence l'indicateur absolu, à moins de savoir précisément ce que l'on fait.*

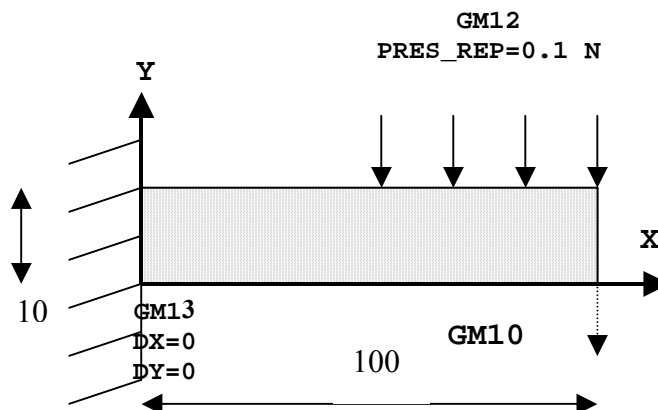
- En thermique, on peut aussi « jongler » avec les composantes de l'indicateur thermique et des conditions aux limites, « fictives » ou non, pour orienter la construction d'un maillage raffiné ou déraffiné par zones.
- En cas de présence de singularités, il est conseillé de sélectionner le nombre d'éléments sur lesquels le raffinement porte par une fraction d'éléments à raffiner 'CRIT_RAFF_PE' (et non pas par le quantum d'éléments présentant une erreur supérieur à une fraction de l'erreur totale 'CRIT_RAFF_REL'). En effet, dans le cas d'une singularité, en utilisant 'CRIT_RAFF_REL', au bout d'une ou deux itérations d'adaptation, seuls les éléments touchant la singularité seront raffinés. En utilisant 'CRIT_RAFF_PE', d'autres zones pourront continuer à être raffinées. Enfin le critère 'CRIT_RAFF_ABS' (choix par barrière fixe d'erreur) est à réserver aux cas où l'utilisateur connaît très bien le problème envisagé.
- En tant que « simple post-traitement » du problème thermo-mécanique, l'indicateur ne peut malheureusement pas fournir de diagnostic plus fiable dans les zones où la résolution du problème initial achoppe. Il est donc préférable de débiter un processus d'adaptation, avec un maillage déjà un peu raffiné « à la main ».
- En thermo-mécanique, différentes stratégies d'adaptation de maillage s'offrent à l'utilisateur :
 - adapter le maillage suivant un critère thermique uniquement,
 - adapter le maillage suivant un critère mécanique uniquement,
 - adapter conjointement ou séparément (i.e. avec une ou deux boucles d'adaptation) ; en clair chaîner ou coupler les deux premières stratégies.

La bonne pratique lors d'un tel calcul thermo-mécanique conduit à utiliser deux maillages et à interpoler le champ thermique P_1 sur le maillage mécanique P_2 (via l'opérateur PROJ_CHAMP). Si on souhaite ne travailler qu'avec un seul maillage, on peut décliner l'une des stratégies via l'option MAJ_CHAMP de MACR_ADAP_MAIL. Cela permet, tout en adaptant le maillage suivant un critère, de mettre à jour le champ complémentaire sur le nouveau maillage adapté.
- En thermique, pour effectuer une adaptation de maillage basée sur l'indicateur ERTH_ELNO_ELEM au cours d'un transitoire, il ne faut pas oublier de démarrer le calcul du pas de temps suivant avec l'ancien EVOL_THER remis à jour sur le nouveau maillage.

6 Exemples d'utilisation

6.1 Exemple mécanique (poutre 2D)

Il s'agit d'une poutre métallique (acier 16MND5, $E = 210.10^3$ Mpa, $\nu = 0.2$) en flexion. Calcul élastique (MECA_STATIQUE ou STAT_NON_LINE) en modélisation contraintes planes (C_PLAN). Maillages initiaux en TRIA3 ou TRIA6.



6.1.1 Utilisation de MACR_INFO_MAIL

La macro MACR_INFO_MAIL est lancée dans le fichier de commande par le bloc suivant. Le maillage est ici rangé dans un tableau Python : MA[num_calc] pourrait être remplacé par un nom plus conventionnel en l'absence d'utilisation de boucles Python.

```
MACR_INFO_MAIL(MAILLAGE=MA[num_calc],
               QUALITE='OUI',
               INTERPENETRATION='OUI',
               CONNEXITE='OUI',
               TAILLE='OUI')
```

Et on obtient dans le fichier de message :

```
ANALYSE DU MAILLAGE
=====
Maillage a analyser
MA_0
Date de creation : vendredi 27 septembre 2002 a 15 h 58 mn 20 s
Dimension : 2
Degre : 1
C'est un maillage de depart.
```

Direction	Unite	Minimum	Maximum
X	INCONNUE	0.	100.00
Y	INCONNUE	0.	10.000

INTERPENETRATION DES ELEMENTS

=====

```
*****
*
*      Recapitulatif sur les faces actives
*
*      Aucun probleme n'a ete rencontre.
*
*****
```

QUALITE DES ELEMENTS

=====

```
*****
*      Qualite des triangles du maillage de calcul
*      Rappel : la qualite est egale au rapport du diametre
*      du triangle sur le rayon du cercle inscrit,
*      normalise a 1 pour un triangle regulier.
*****
*      Minimum : 1.0117          Maximum : 2.0158
*****
```

```
*****
*      Fonction de repartition
*
*      Valeurs      *      Nombre d'elements
*      Mini < < Maxi *      par classe      *      cumul
*      *      en %      . nombre      *      en %      . nombre
*****
*      1.00 < 1.05 * 14.75 .      9 * 14.75 .      9 *
*      1.05 < 1.10 * 42.62 .      26 * 57.38 .      35 *
*      1.10 < 1.15 * 16.39 .      10 * 73.77 .      45 *
*      1.15 < 1.20 * 1.64 .      1 * 75.41 .      46 *
*      1.20 < 1.25 * 6.56 .      4 * 81.97 .      50 *
*      1.25 < 1.30 * 11.48 .      7 * 93.44 .      57 *
*      1.30 < 1.35 * 0.00 .      0 * 93.44 .      57 *
*      1.35 < 1.40 * 3.28 .      2 * 96.72 .      59 *
```

Titre : Utilisation des indicateurs d'erreur et stratégies d'adaptation Date : 17/10/03
Auteur(s) : P. BADEL, O. BOITEAU, V. CANO Clé : U2.08.01-A Page : 10/30

```

* 1.40 < 1.45 * 0.00 . 0 * 96.72 . 59 *
* 1.45 < 1.50 * 0.00 . 0 * 96.72 . 59 *
* 1.50 < 1.55 * 0.00 . 0 * 96.72 . 59 *
* 1.55 < 1.60 * 0.00 . 0 * 96.72 . 59 *
* 1.60 < 1.65 * 0.00 . 0 * 96.72 . 59 *
* 1.65 < 1.70 * 0.00 . 0 * 96.72 . 59 *
* 1.70 < 1.75 * 1.64 . 1 * 98.36 . 60 *
* 1.75 < 1.80 * 0.00 . 0 * 98.36 . 60 *
* 1.80 < 1.85 * 0.00 . 0 * 98.36 . 60 *
* 1.85 < 1.90 * 0.00 . 0 * 98.36 . 60 *
* 1.90 < 1.95 * 0.00 . 0 * 98.36 . 60 *
* 1.95 < 2.00 * 0.00 . 0 * 98.36 . 60 *
* 2.00 < 2.05 * 1.64 . 1 * 100.00 . 61 *
* 2.05 < 2.10 * 0.00 . 0 * 100.00 . 61 *
* 2.10 < 2.15 * 0.00 . 0 * 100.00 . 61 *
* 2.15 < 2.20 * 0.00 . 0 * 100.00 . 61 *
* 2.20 < 2.25 * 0.00 . 0 * 100.00 . 61 *
* 2.25 < 2.30 * 0.00 . 0 * 100.00 . 61 *
* 2.30 < 2.35 * 0.00 . 0 * 100.00 . 61 *
* 2.35 < 2.40 * 0.00 . 0 * 100.00 . 61 *
* 2.40 < 2.45 * 0.00 . 0 * 100.00 . 61 *
* 2.45 < 2.50 * 0.00 . 0 * 100.00 . 61 *
* 2.50 < inf. * 0.00 . 0 * 100.00 . 61 *
*****

```

NOMBRE D'ENTITES DU CALCUL

=====

```

*****
*                               Les noeuds                               *
*****
* Nombre total * 48 *
*****

*****
*                               Les mailles-points                       *
*****
* Nombre total * 2 *
*****

*****
*                               Les aretes                               *
*****
* Nombre total * 15 *
* . dont aretes isolees * 0 *
* . dont aretes de bord de regions 2D * 15 *
* . dont aretes internes aux faces/volumes * 0 *
*****

```

Titre : Utilisation des indicateurs d'erreur et stratégies d'adaptation
 Auteur(s) : P. BADEL, O. BOITEAU, V. CANO

Date : 17/10/03
 Clé : U2.08.01-A Page : 11/30

```
*****
*                               Les faces                               *
*****
* Nombre total                               * 61 *
*****
```

CONNEXITE DES ENTITES DU CALCUL =====

```
*****
* Les faces sont en un seul bloc. *
*****
```

TAILLES DES SOUS-DOMAINES DE CALCUL =====

Direction	Unite
X	INCONNUE
Y	INCONNUE

```
*****
*                               Sous-domaines 2D                               *
*****
*Numero*                               Nom                               * Surface *
*****
* -4 * FAMILLE_MAILLE_-4                               * 1000.0 *
*****
* Total :                               * 1000.0 *
*****
```

```
*****
*                               Sous-domaines 1D                               *
*****
*Numero*                               Nom                               * Longueur *
*****
* -3 * FAMILLE_MAILLE_-3                               * 10.000 *
* -2 * FAMILLE_MAILLE_-2                               * 50.000 *
* -1 * FAMILLE_MAILLE_-1                               * 40.000 *
*****
* Total :                               * 100.00 *
*****
```

On apprend par ce message :

- les coordonnées extrêmes du maillages ;
- l'absence de problème d'interpénétration ;
- un histogramme de la qualité géométrique des éléments (on observera la bonne qualité de ce maillage) ;
- le nombre de nœuds, de mailles points, d'arêtes, de faces ;
- la connexité du maillage ;
- la taille des domaines définis par les groupes de mailles (cette description n'est pas très lisible, néanmoins, on observera que le domaine 2D de la poutre est bien de surface 1000 comme prévu).

6.1.2 Utilisation de MACR_ADAP_MAIL option UNIFORME

Dans une boucle Python, le raffinement uniforme est demandé par l'appel suivant. Remarque importante : une subtilité dans les boucles Python, il faut déclarer le concept sortant avant de l'utiliser avec la commande CO.

```
# SUBTILITE MACRO_COMMANDE VIS A VIS DES ENTREES
MA[num_calc1]=CO('MA_%d' % (num_calc1))

# RAFFINEMENT UNIFORME VIA HOMARD
# MAILLAGE DE DEPART: MA[num_calc]
# MAILLAGE D'ARRIVE: MA[num_calc1]
MACR_ADAP_MAIL(
    ADAPTATION=_F(
        UNIFORME = 'RAFFINEMENT',
        MAILLAGE_N = MA[num_calc],
        MAILLAGE_NP1 = MA[num_calc1]),
    QUALITE='OUI',
    INTERPENETRATION='OUI',
    TAILLE='OUI',
    CONNEXITE='OUI')
```

Observons les résultats obtenus, en comparant un maillage linéaire (TRIA3) et un maillage quadratique (TRIA6), le maillage initial étant présenté sur la [Figure 6.1.2-a]. Sur les courbes présentant l'évolution de l'énergie et de la flèche de la poutre en fonction du nombre de raffinement, Cf. [Figure 6.1.2-b] et [Figure 6.1.2-c], deux conclusions s'imposent :

- d'une part les éléments quadratiques démontrent leur évidente supériorité ;
- d'autre part, le remaillage (ici très simpliste puisqu'il est uniforme) prouve son intérêt : le maillage linéaire initial étant très loin d'être suffisamment raffiné, le remaillage permet d'obtenir de bons résultats après quelques itérations.

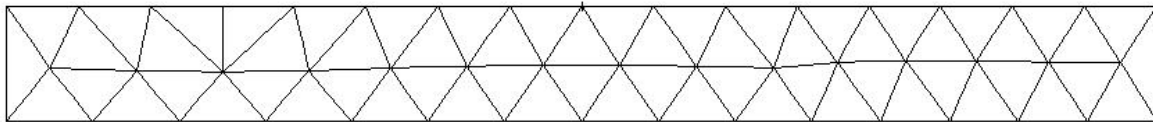


Figure 6.1.2-a : Maillage initial

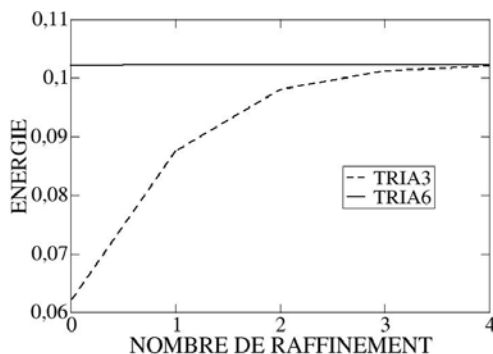


Figure 6.1.2-b : Evolution de l'énergie avec le nombre de raffinements

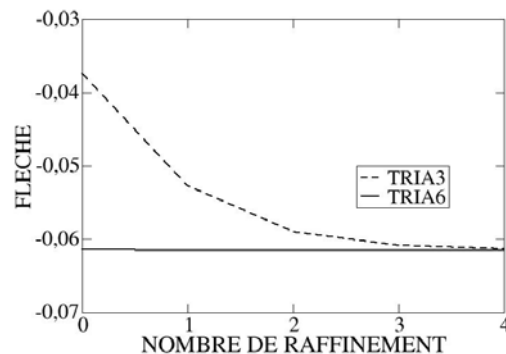


Figure 6.1.2-c : Evolution de la flèche avec le nombre de raffinements

6.1.3 Utilisation de MACR_ADAP_MAIL option LIBRE

La première question à régler lors de l'utilisation du raffinement libre avec HOMARD est le choix de l'indicateur d'erreur et de sa composante. Ici, suivant les principes énoncés dans le paragraphe des conseils, le choix a été fait d'utiliser l'indicateur en résidu (même si dans ce cas, on se trouve dans le périmètre d'utilisation des indicateurs de Zhu-Zienkiewicz). En revanche, cet exemple compare les composantes absolue et normalisée de l'indicateur afin d'illustrer la prudence qu'impose l'utilisation de la composante normalisée.

Le maillage est ici linéaire afin d'illustrer clairement l'effet de l'adaptation de maillage, car on a vu précédemment que le maillage initial donne déjà des résultats de bonne qualité avec des éléments d'ordre 2.

Le raffinement libre sur la composante absolue (pour la composante relative, il suffit de changer dans l'extrait ci-dessous `NOM_CMP_INDICA='ERREST'` en `NOM_CMP_INDICA='NUEST'`) est activé par les commandes suivantes :

```
# SUBTILITE MACRO_COMMANDE VIS A VIS DES ENTREES
  MA[num_calc1]=CO('MA_%d' % (num_calc1))

# RAFFINEMENT LIBRE VIA HOMARD
# MAILLAGE DE DEPART: MA[num_calc]
# MAILLAGE D'ARRIVE: MA[num_calc1]
  MACR_ADAP_MAIL(
    ADAPTATION=_F(
      LIBRE = 'RAFF_DERA',
      MAILLAGE_N = MA[num_calc],
      MAILLAGE_NP1 = MA[num_calc1],
      RESULTAT_N=DEPLA[num_calc],
      INDICATEUR='ERRE_ELGA_NORE',
      NOM_CMP_INDICA='ERREST',
      CRIT_RAFF_PE=0.2,
      CRIT_DERA_PE=0.2),
    QUALITE='OUI',
    INTERPENETRATION='OUI',
    TAILLE='OUI',
    CONNEXITE='OUI')
```

Si l'on compare les résultats sur la flèche avec la composante « absolue » et la composante « relative » en fonction du nombre de nœuds (Cf. [Figure 6.1.3-a] où l'on a ajouté la même évolution pour le raffinement uniforme), on observe :

- le raffinement libre avec la composante absolue converge plus vite vers la référence que le raffinement uniforme (d'où l'intérêt de faire du raffinement libre) ;
- le raffinement libre avec la composante relative converge plus lentement vers la référence que le raffinement uniforme, ce qui est à première vue surprenant.

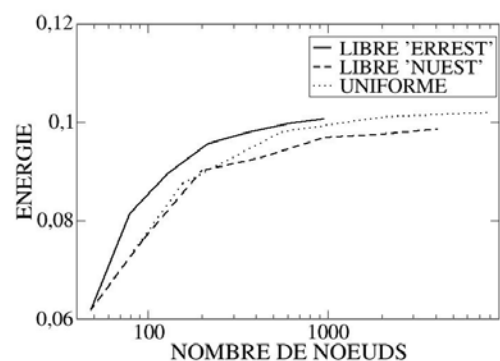


Figure 6.1.3-a : Evolution de l'énergie en fonction du nombre de nœuds

Ce dernier point s'explique si l'on trace les trois champs issus de l'indicateur d'erreur, ce qui est fait sur les [Figure 6.1.3-b]- [Figure 6.1.3-d].

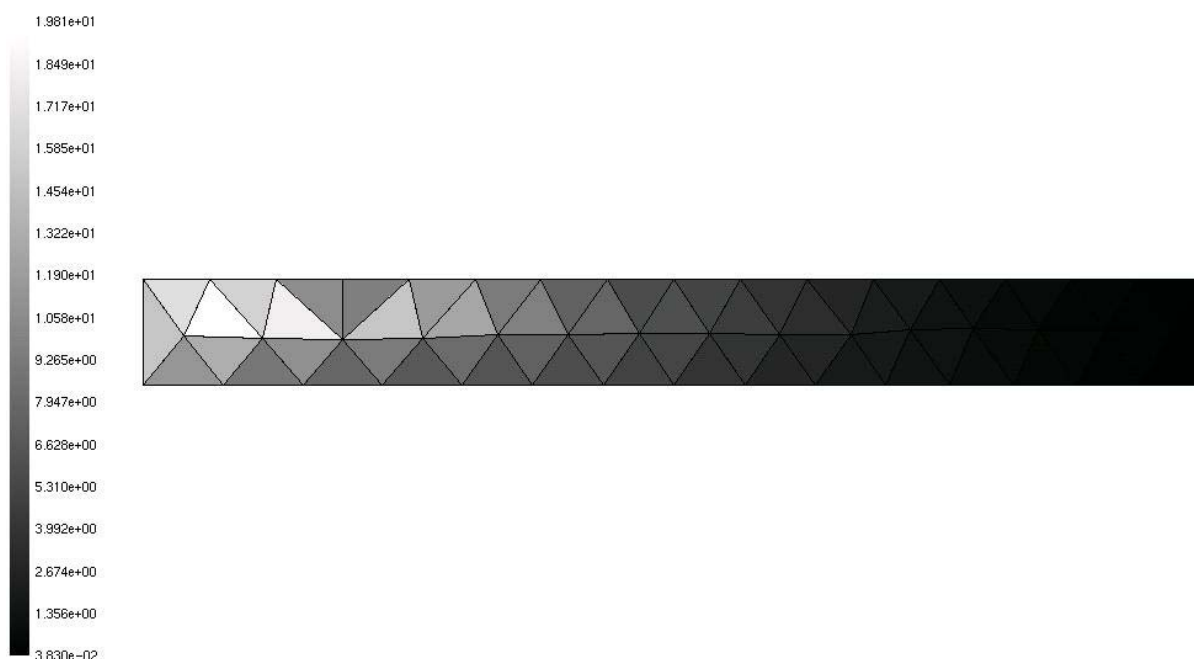


Figure 6.1.3-b : Composante absolue

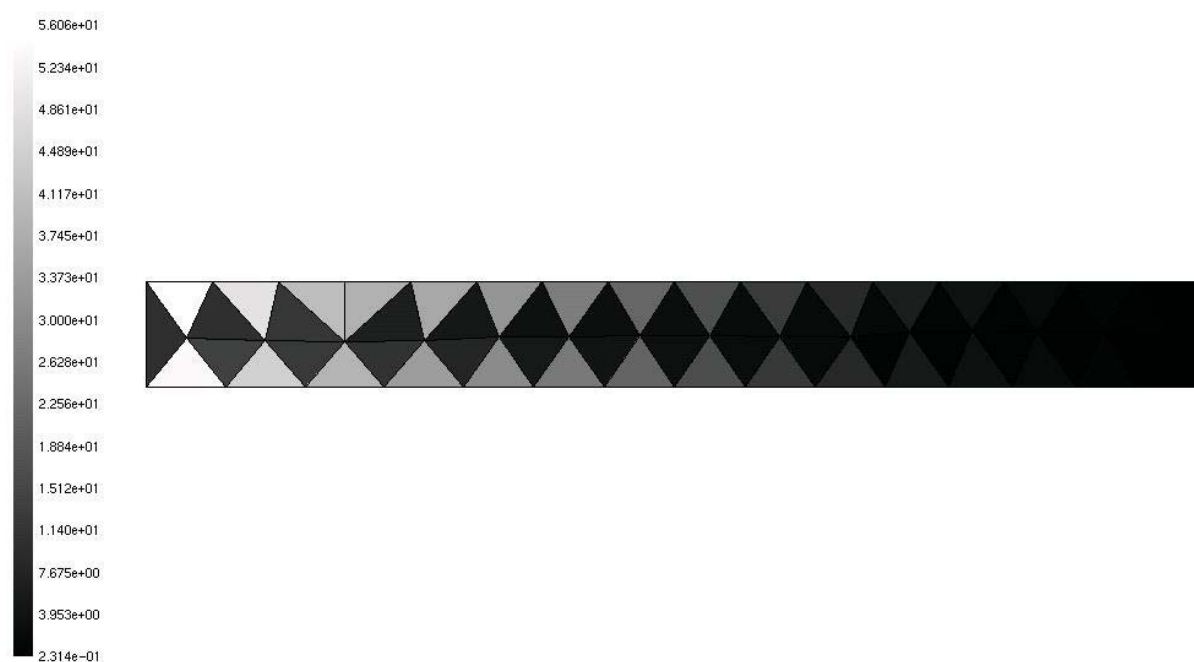


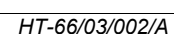
Figure 6.1.3-c : Norme de la contrainte de normalisation



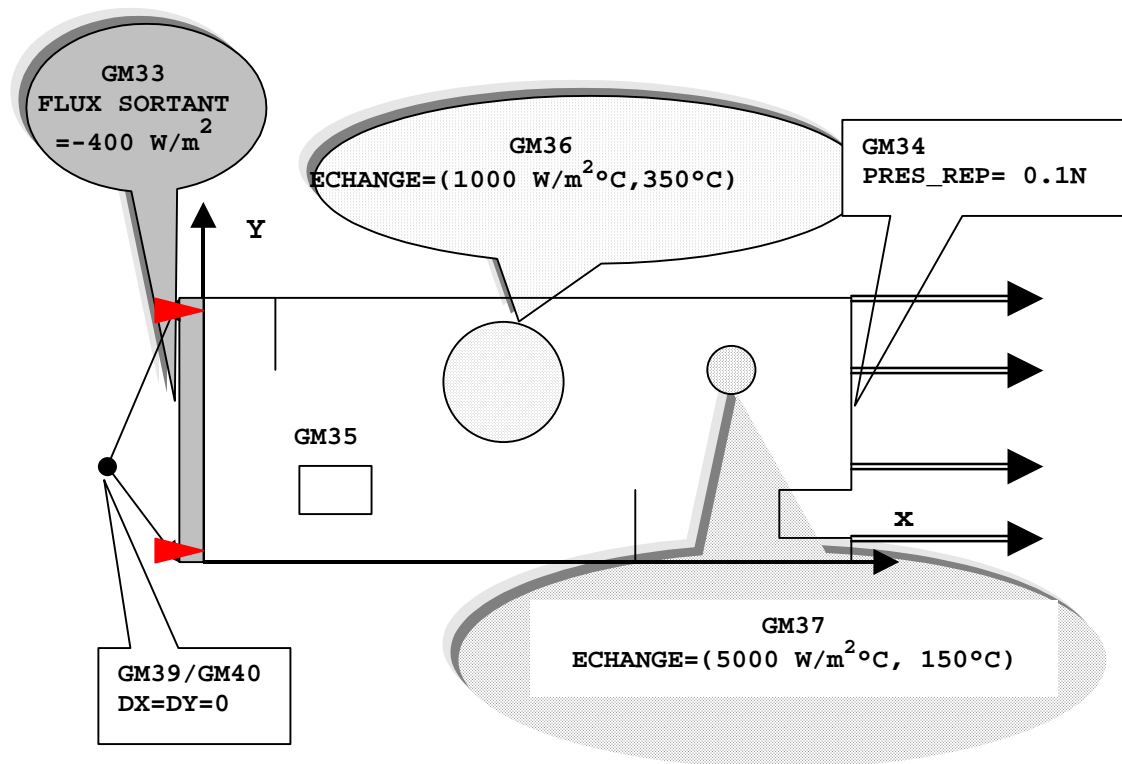
absolue) rend le résultat de la normalisation $\eta_{rel}(K) = 100 \times \frac{\eta(K)}{\sqrt{\eta(K)^2 + \|\sigma_h\|_{0,K}^2}}$ aléatoire. En effet,

on rappelle que des zones à contrainte de normalisation nulle seront considérées comme ayant une erreur de 100% : s'il faut raffiner dans cette zone, cela sera bon (quoique cela masquera les autres zones à raffiner), si le raffinement est moins nécessaire, cela sera mauvais. Il faut donc bien analyser son problème avant d'utiliser la composante relative de l'indicateur d'erreur, la composante absolue pouvant être considérée comme plus sûre. En particulier, il nous semble que l'utilisation de l'erreur normalisée n'est possible qu'après analyse par l'utilisateur de la carte de contrainte de normalisation.

On considère la structure suivante :



soumise aux chargements suivants :



Dans un premier temps, on s'intéresse à la thermique seule pour souligner la possibilité d'utiliser la décomposition des différents termes d'erreur. En effet, dans le cadre d'une utilisation « standard » (c'est-à-dire quand tous les termes d'erreur intéressent l'utilisateur), il faudra choisir l'erreur totale ('ERTABS' ou 'ERTREL'); en revanche, si l'utilisateur est particulièrement intéressé par une bonne prise en compte des conditions aux limites, il peut ainsi orienter le raffinement en utilisant les différents termes (de flux ou d'échange dans ce cas). Par exemple, en partant du maillage [Figure 6.2-a] - on notera que ce maillage vérifie l'un de nos conseils qui est de partir d'un maillage « raisonnable » - on réalise un raffinement sur l'erreur totale relative, Cf. le résultat [Figure 6.2-b] :

```
# MAILLAGE DE DEPART: MAT[num_calc]
# MAILLAGE D'ARRIVE: MAT[num_calcl]
MACR_ADAP_MAIL(
    ADAPTATION=_F(
        LIBRE = 'RAFF_DERA',
        MAILLAGE_N = MAT[num_calc],
        MAILLAGE_NPl = MAT[num_calcl],
        RESULTAT_N=TEMP[num_calc],
        INDICATEUR='ERTH_ELEM_TEMP',
        NOM_CMP_INDICA='ERTREL',
        CRIT_RAFF_PE=0.1,
        CRIT_DERA_PE=0.1,
    ),
    QUALITE='OUI',
    INTERPENETRATION='OUI',
    TAILLE='OUI',
    CONNEXITE='OUI')

```

et un raffinement sur le terme d'échange, Cf. le résultat figure (10) :

```
# MAILLAGE DE DEPART: MAT[num_calc]
# MAILLAGE D'ARRIVE: MAT[num_calcl]
MACR_ADAP_MAIL(
    ADAPTATION=_F(
        LIBRE = 'RAFF_DERA',
        MAILLAGE_N = MAT[num_calc],

```



```
        MAILLAGE_NP1 = MAT[num_calc1],  
        RESULTAT_N=TEMP[num_calc],  
        INDICATEUR='ERTH_ELEM_TEMP',  
        NOM_CMP_INDICA='TERME2',  
        CRIT_RAFF_PE=0.1,  
        CRIT_DERA_PE=0.1,  
    ),  
    QUALITE='OUI',  
    INTERPENETRATION='OUI',  
    TAILLE='OUI',  
    CONNEXITE='OUI')
```

On observe bien évidemment que les maillages adaptés diffèrent fortement. Dans le second cas de figure, le raffinement a bien été orienté vers les perçages, sièges des conditions d'échanges.

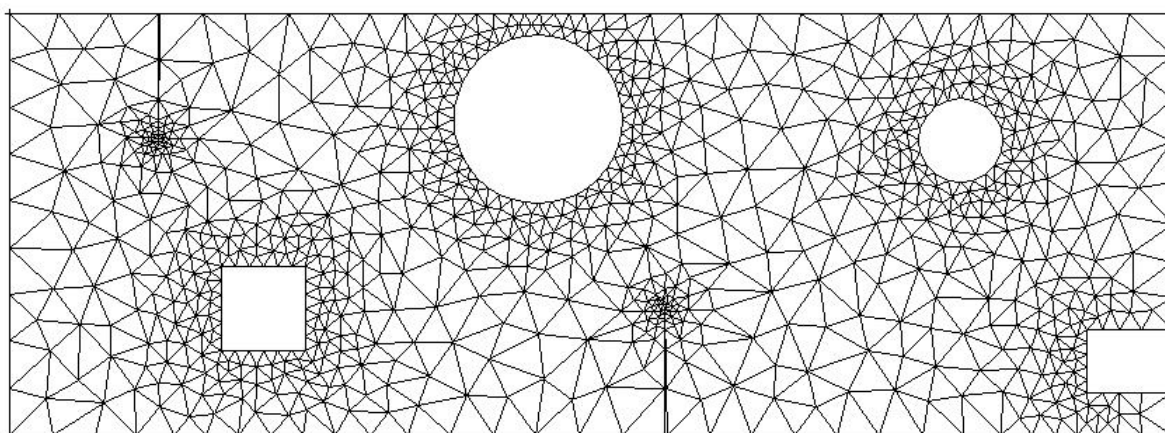


Figure 6.2-a : Maillage initial

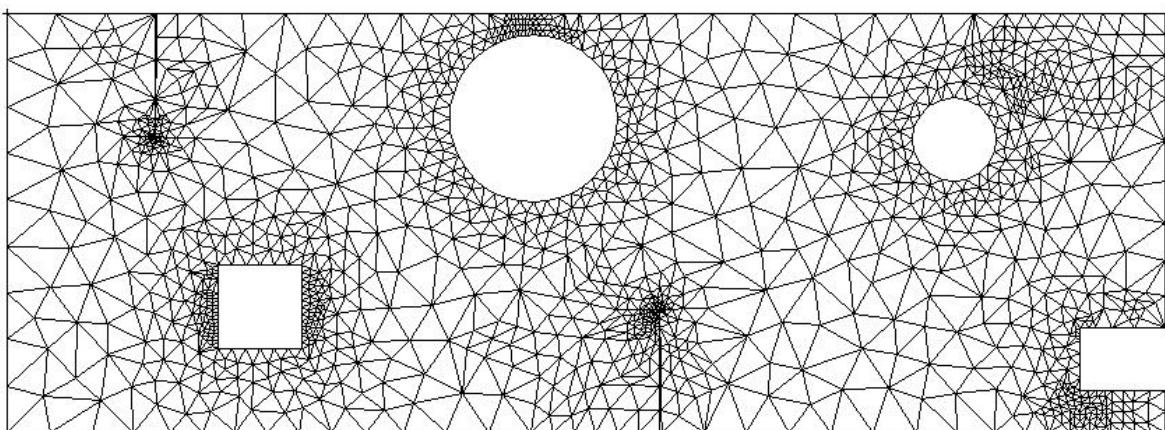


Figure 6.2-b : Maillage raffiné à partir de l'erreur totale relative

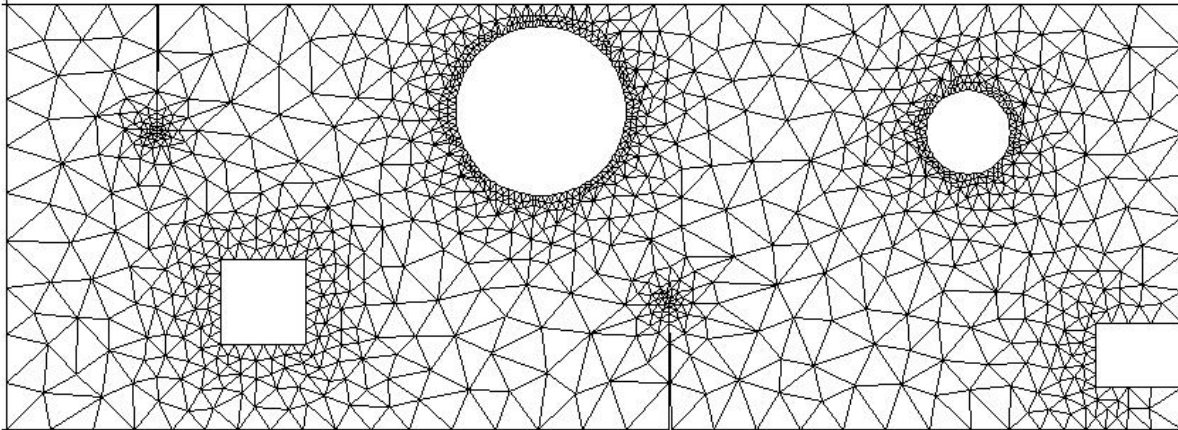


Figure 6.2-c : Maillage raffiné à partir de l'erreur relative sur le terme d'échange

On s'intéresse maintenant au calcul thermo-élastique couplé. Ce problème reste assez simple puisqu'il n'y a qu'un seul pas de temps. Suivant les conseils donnés précédemment, on effectue ce calcul couplé sur deux maillages différents : un maillage « thermique » linéaire sur lequel s'appuieront des éléments lumpés et un maillage « mécanique » quadratique, le passage de l'un à l'autre s'effectuant par l'opérateur 'PROJ_CHAMP'.

Plus précisément : à chaque étape de la boucle de raffinement, on commence par calculer la température sur le maillage thermique :

```
TEMP[num_calc]=THER_LINEAIRE(  
    MODELE=MOT[num_calc],  
    CHAM_MATER=CHMATT[num_calc],  
    EXCIT=(  
        _F(CHARGE = CHT[num_calc]),  
        _F(CHARGE = CLIMT[num_calc],),)  
    )
```

puis on projette cette température sur le maillage mécanique (on a préalablement créé un modèle thermique MOT2 lié au maillage mécanique) :

```
TEMP2[num_calc]=PROJ_CHAMP(  
    METHODE='ELEM',  
    RESULTAT=TEMP[num_calc],  
    MODELE_1=MOT[num_calc],  
    MODELE_2=MOT2[num_calc],  
    TOUT_ORDRE='OUI')
```

On utilise cette température dans les conditions aux limites du calcul mécanique :

```
CLIMM[num_calc]=AFFE_CHAR_MECA(  
    MODELE=MOM[num_calc],  
    TEMP_CALCULEE=TEMP2[num_calc],  
    DDL_IMPO=(  
        _F(GROUP_NO='GM39',DX=0.0,DY=0.0),  
        _F(GROUP_NO='GM40',DX=0.0,DY=0.0),)  
    )
```

on effectue le calcul mécanique :

```
DEPLA[num_calc]=STAT_NON_LINE(MODELE=MOM[num_calc],
                                CHAM_MATER=CHMATM[num_calc],
                                EXCIT=(_F(CHARGE=CLIMM[num_calc],),
                                         _F(CHARGE=CHM[num_calc],
                                              FONC_MULT=F_INST,)),
                                COMP_INCR=(_F(RELATION='ELAS',
                                                TOUT='OUI',),),
                                INCREMENT=_F(LIST_INST=L_INST),)
```

On calcule les indicateurs d'erreur thermique et mécanique :

```
TEMP[num_calc]=CALC_ELEM(reuse=TEMP[num_calc],
                          RESULTAT=TEMP[num_calc],
                          MODELE=MOT[num_calc],
                          TOUT='OUI',
                          TOUT_ORDRE='OUI',
                          CHAM_MATER=CHMATM[num_calc],
                          EXCIT=(
                              _F(CHARGE = CHT[num_calc]),
                              _F(CHARGE = CLIMT[num_calc],),),
                          OPTION=(
                              'FLUX_ELNO_TEMP',
                              'ERTH_ELEM_TEMP',
                              'ERTH_ELNO_ELEM',),)
```

```
DEPLA[num_calc]=CALC_ELEM(reuse=DEPLA[num_calc],
                          RESULTAT=DEPLA[num_calc],
                          MODELE=MOM[num_calc],
                          TOUT='OUI',
                          CHAM_MATER=CHMATM[num_calc],
                          EXCIT=(_F(CHARGE=CLIMM[num_calc],),
                                   _F(CHARGE=CHM[num_calc],),),
                          TOUT_ORDRE='OUI',
                          OPTION=(
                              'SIEF_ELNO_ELGA',
                              'ERRE_ELGA_NORE',),)
```

puis on enchaîne avec l'adaptation des maillages thermiques et mécaniques

```
MACR_ADAP_MAIL(
    ADAPTATION=_F(
        LIBRE = 'RAFF_DERA',
        MAILLAGE_N = MAT[num_calc],
        MAILLAGE_NP1 = MAT[num_calc1],
        RESULTAT_N=TEMP[num_calc],
        INDICATEUR='ERTH_ELEM_TEMP',
        NOM_CMP_INDICA='ERTREL',
        CRIT_RAFF_PE=0.1,
        CRIT_DERA_PE=0.1,
    ),
    QUALITE='OUI',
    INTERPENETRATION='OUI',
    TAILLE='OUI',
    CONNEXITE='OUI')
```

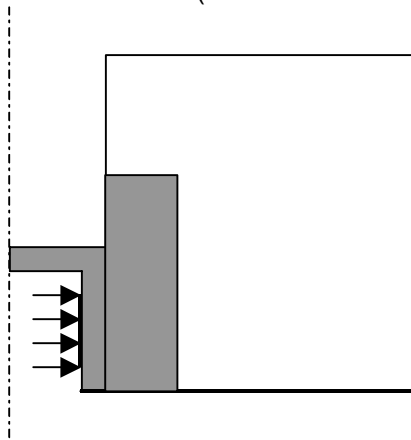
```
MACR_ADAP_MAIL(
    ADAPTATION=_F(
        LIBRE = 'RAFF_DERA',
        MAILLAGE_N = MAM[num_calc],
        MAILLAGE_NP1 = MAM[num_calc1],
        RESULTAT_N=DEPLA[num_calc],
```

```
INDICATEUR= 'ERRE_ELGA_NORE' ,  
NOM_CMP_INDICA= 'NUEST' ,  
CRIT_RAFF_PE=0.1 ,  
CRIT_DERA_PE=0.1 ,  
) ,  
QUALITE= 'OUI' ,  
INTERPENETRATION= 'OUI' ,  
TAILLE= 'OUI' ,  
CONNEXITE= 'OUI' )
```

Avant de recommencer à l'étape suivante...

6.3 Exemple thermo-plastique

On considère la structure de révolution suivante (modélisée en axisymétrie) :



où les parties grisées sont plastiques, le reste élastique. Le chargement est appliqué en 2 étapes :

- la première consiste en un chargement purement mécanique (pression sur la zone avec des flèches sur le schéma), avec une phase de charge suivie d'une phase de décharge ;
- la seconde consiste en un chargement thermique transitoire (condition d'échange sur les parties inférieures et supérieures de la structure).

6.3.1 Stratégie de remaillage et liste d'instant

Le chargement est discrétisé selon une liste d'instant, il se pose alors la question : quelle stratégie adopter vis-à-vis du remaillage ? En effet, suivant le cas traité, on peut :

- remailler à chaque pas de calcul : le maillage est alors adapté à chaque pas de calcul individuellement. Il faut alors projeter les champs d'un maillage sur l'autre (ce qui n'est pas encore totalement possible en mécanique non-linéaire) ;
- remailler une seule fois, à la fin du calcul, et recommencer le calcul depuis le début avec le nouveau maillage.

La première stratégie est à adopter dans le cas où les zones de raffinement évoluent beaucoup, nous en verrons un exemple dans le calcul thermique suivant ; la seconde peut être adoptée dans le cas où les zones de raffinement évoluent peu, comme dans ce cas mécanique où il s'agit de suivre la croissance d'une zone plastique.

6.3.2 Calcul mécanique

Pour le calcul mécanique, on adopte donc la stratégie suivante :

- 1) calcul de toute la liste d'instants ;
- 2) remaillage ;
- 3) répétition de (1 & 2) jusqu'au résultat satisfaisant.

Ce n'est pas tant la mise en œuvre dans Aster qui est intéressante dans ce cas (qui diffère des mises en œuvre précédentes uniquement par le fait qu'il y ait plusieurs instants de calcul) que les résultats obtenus par adaptation de maillage sur un cas non-linéaire. Pour rappel, les appels pour le calcul d'indicateurs d'erreur et pour remaillage sont les suivants :

```
V1[num_calc]=CALC_ELEM(reuse =V1[num_calc],  
    MODELE=MO1[num_calc],  
    CHAM_MATER=CMI[num_calc],  
    INST=-1.0,  
    OPTION=( 'ERRE_ELGA_NORE' ),  
    RESULTAT=V1[num_calc],)  
  
MA[num_calc+1]=CO( 'MA_%d' % (num_calc+1))  
  
MACR_ADAP_MAIL(  
    ADAPTATION=_F(  
        LIBRE = 'RAFFINEMENT',  
        MAILLAGE_N = MA[num_calc],  
        MAILLAGE_NP1 = MA[num_calc+1],  
        RESULTAT_N = V1[num_calc],  
        INDICATEUR = 'ERRE_ELGA_NORE',  
        NOM_CMP_INDICA='ERREST',  
        NUME_ORDRE = 4,  
        CRIT_RAFF_PE = 0.1,  
        NIVE_MAX = 5),  
    QUALITE='OUI',  
    INTERPENETRATION='NON',  
    TAILLE='OUI',  
    CONNEXITE='OUI'  
)
```

Pour juger de l'apport du remaillage, regardons les contraintes radiales sur le segment indiqué sur la [Figure 6.3.2-a], qui sont comparées à une « référence » obtenue par 3 remaillages uniformes : le gain des remaillages basés sur l'indicateur d'erreur est visible.

Ligne de post-traitement

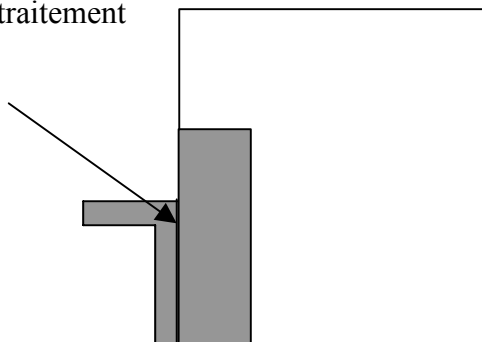


Figure 6.3.2-a : Lieu de post-traitement

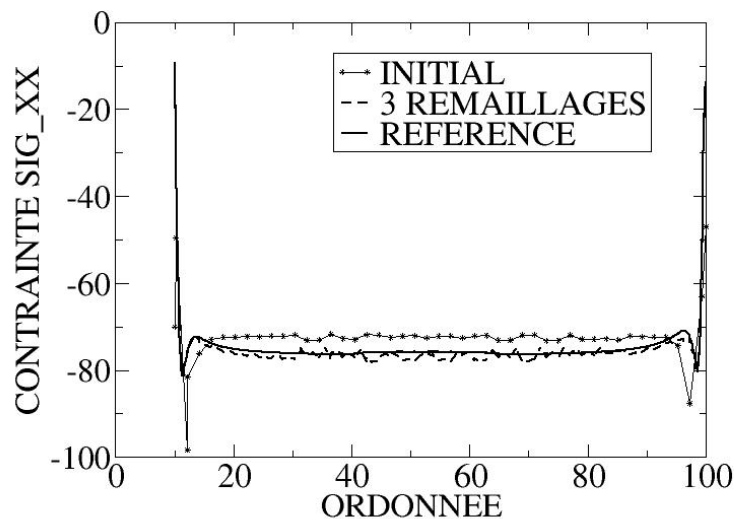


Figure 6.3.2-b : Profil de contrainte

On trouvera sur les figures [Figure 6.3.2-c] et [Figure 6.3.2-d] le maillage initial et le maillage après 3 remaillages basés sur l'indicateur d'erreur.

Une indication de la taille (et donc du temps) de calculs entre le calcul de référence (3 raffinements uniformes) et le calcul avec 3 raffinements basés sur l'indicateur d'erreur est donnée dans le tableau [Tableau 6.3.2-1].

	Nombre de nœuds	Temps de Calcul
Maillage de référence	175 000	~3000 s
3 raffinements libres (soit 4 calculs)	8 500	~60 s

Tableau 6.3.2-1 : indication de performances

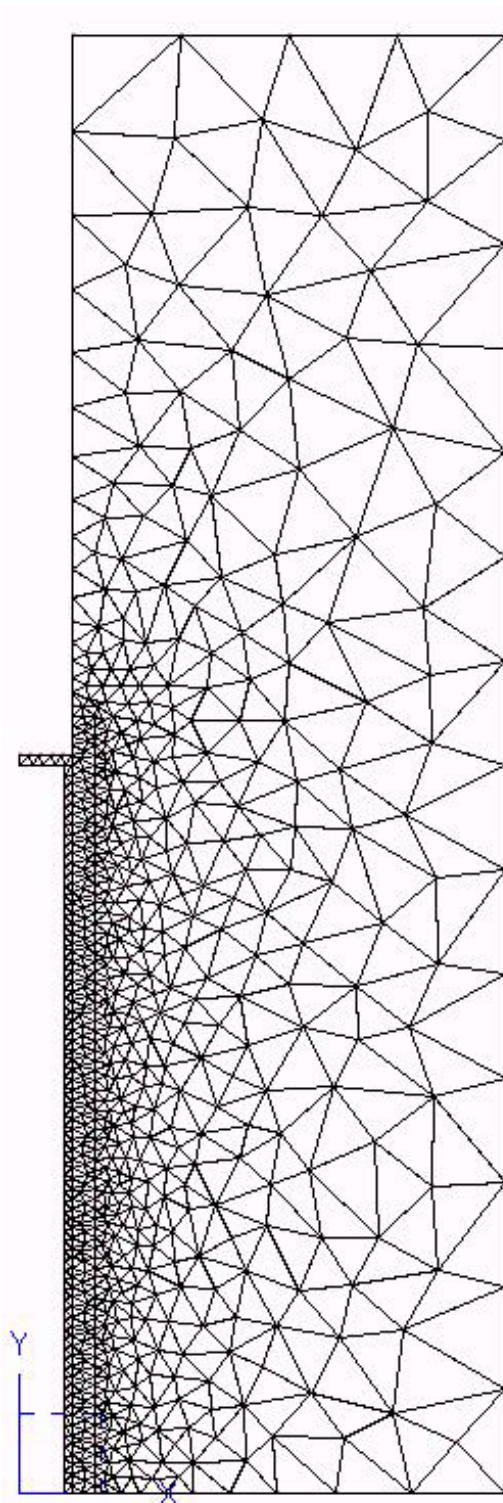


Figure 6.3.2-c : Maillage initial

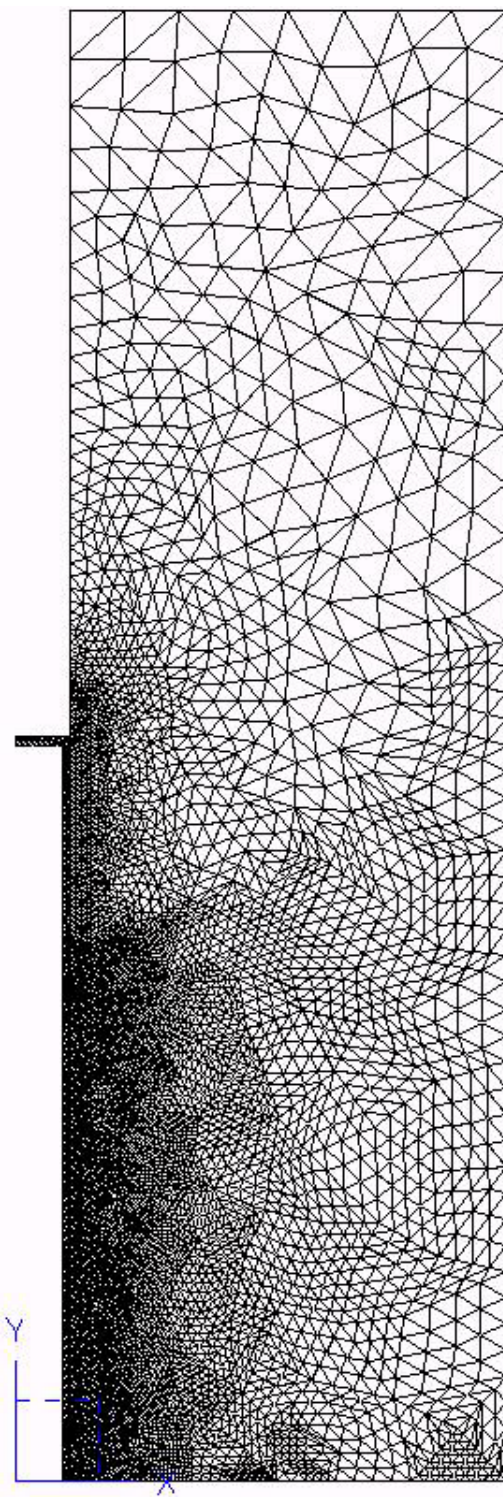


Figure 6.3.2-d : Maillage après 3 remaillages

6.3.3 Calcul du transitoire thermique

Il s'agit dans ce cas de calculer un transitoire thermique, deux conditions d'échanges étant imposées en bas et en haut de la structure. Comme la zone qui va présenter un fort gradient de température va se déplacer dans la structure (avancée d'un front), la stratégie adoptée pour le remaillage va en tenir compte : il faut réactualiser le maillage régulièrement au cours du transitoire. En pratique, on subdivise la liste d'instantanés en blocs, à l'intérieur de ces blocs d'instantanés de calcul le maillage sera le même (et le remaillage intervient à la fin du bloc). Il y a donc 3 boucles imbriquées :

- 1) la boucle sur les N blocs d'instantanés ;
- 2) la boucle sur les remaillages du bloc courant ;
- 3) la boucle (cachée dans THER_LINEAIRE) sur les instantanés du bloc.

Cela donne dans le fichier de commande :

```
for num_inst_raff in range(1,nb_raff-1) :
```

La boucle sur les blocs d'instantanés

```
num_inst_debut = (num_inst_raff-1)*pas_raff+1
num_inst_fin   = (num_inst_raff)*pas_raff

for num_calc in range(1,nb_calc-1) :
```

La boucle sur les remaillages

```
if (num_calc == 1) or (num_inst_raff == 1) :

    if (num_inst_raff == 1) :
```

S'il s'agit du premier bloc, on commence un calcul (donc pas de « reuse »)

```
EV[i]=THER_LINEAIRE(MODELE=MOTH[i],
                    CHAM_MATER=CHMAT[i],
                    EXCIT=(_F(CHARGE=CHBF[i],),
                           _F(CHARGE=CHFL[i],),),
                    INCREMENT=_F(LIST_INST=LIST,
                                  NUME_INIT=num_inst_debut-1,
                                  NUME_FIN=num_inst_fin,),)
else :
```

S'il s'agit du maillage initial du bloc d'instant (c'est-à-dire le dernier maillage du bloc d'instant précédent), on n'a pas créé de nouveau maillage (on n'a donc pas effectué de PROJ_CHAMP) et il faut aller chercher la température initiale dans le résultat du bloc précédent (dernier instant du bloc précédent) :

```
EV[i]=THER_LINEAIRE(reuse=EV[i],
                    MODELE=MOTH[i],
                    CHAM_MATER=CHMAT[i],
                    TEMP_INIT=_F(EVOL_THER=EV[i],
                                  NUME_INIT=num_inst_debut-1,
                                  ),
                    EXCIT=(_F(CHARGE=CHBF[i],),
                           _F(CHARGE=CHFL[i],),),
                    INCREMENT=_F(LIST_INST=LIST,
                                  NUME_INIT=num_inst_debut-1,
                                  NUME_FIN=num_inst_fin,),)
```


Enfin, s'il s'agit d'un remaillage, on va chercher la température initiale dans un CHAM_NO calculé au moment du remaillage (Cf. plus loin le remaillage) :

```
else :
    EV[i]=THER_LINEAIRE(
        MODELE=MOTH[i],
        CHAM_MATER=CHMAT[i],
        TEMP_INIT = _F(CHAM_NO = CT),
        EXCIT=( _F(CHARGE=CHBF[i]),
                _F(CHARGE=CHFL[i]), ),
        INCREMENT=_F(LIST_INST=LIST,
                     NUME_INIT=num_inst_debut-1,
                     NUME_FIN=num_inst_fin, ), )

    if num_calc != (nb_calc-2) :
```

Il faut remailler ...

On commence par calculer l'indicateur d'erreur :

```
EV[i]=CALC_ELEM(reuse=EV[i],
                NUME_ORDRE=num_inst_fin,
                RESULTAT=EV[i],
                MODELE=MOTH[i],
                TOUT='OUI',
                CHAM_MATER=CHMAT[i],
                EXCIT=( _F(CHARGE=CHBF[i]),
                        _F(CHARGE=CHFL[i]), ),
                OPTION=(
                    'FLUX_ELNO_TEMP',
                    'ERTH_ELEM_TEMP',
                    'ERTH_ELNO_ELEM', ), )

MATH[i+1]=CO('MATH_%d' % (i+1))

if (detr_ct == 1) :
    DETRUIRE(CONCEPT=_F(NOM='CT', ), )

if num_inst_raff == 1 :
```

Si on traite le premier bloc, il n'y a pas de champ de température à projeter sur le nouveau maillage :

```
MACR_ADAP_MAIL(
    ADAPTATION=_F(
        LIBRE = 'RAFF_DERA',
        MAILLAGE_N = MATH[i],
        MAILLAGE_NP1 = MATH[i+1],
        RESULTAT_N=EV[i],
        INDICATEUR='ERTH_ELEM_TEMP',
        NUME_ORDRE = num_inst_fin,
        NOM_CMP_INDICA='ERTREL',
        CRIT_RAFF_PE=0.03,
        CRIT_DERA_PE=0.2,
        NIVE_MAX=4,
    ),
    QUALITE='OUI',
    INTERPENETRATION='OUI',
    TAILLE='OUI',
    CONNEXITE='OUI' )

else :
```

si le bloc d'instant n'est pas le premier, il faut projeter la température du dernier instant de calcul du bloc précédent dans un CHAM_NO (ici appelé 'CT') afin d'utiliser ce CHAM_NO comme température initiale sur le nouveau maillage :

```
MACR_ADAP_MAIL(
  ADAPTATION=_F(
    LIBRE = 'RAFF_DERA',
    MAILLAGE_N = MATH[i],
    MAILLAGE_NPl = MATH[i+1],
    RESULTAT_N=EV[i],
    INDICATEUR='ERTH_ELEM_TEMP',
    NUME_ORDRE = num_inst_fin,
    NOM_CMP_INDICA='ERTREL',
    CRIT_RAFF_PE=0.03,
    CRIT_DERA_PE=0.2,
    NIVE_MAX=4,
  ),
  MAJ_CHAM=_F(
    RESULTAT=('EV_%d' % (i)),
    NOM_CHAM='TEMP',
    NUME_ORDRE=num_inst_debut-1,
    CHAM_MAJ=CO('CT'),
    TYPE_CHAM='CHAM_NO_TEMP_R',
  ),
  QUALITE='OUI',
  INTERPENETRATION='OUI',
  TAILLE='OUI',
  CONNEXITE='OUI')

detr_ct = 1

i=i+1
```

On définit les concepts Aster adhérents au maillage :

```
MOTH[i]=AFFE_MODELE(
  MAILLAGE=MATH[i],
  AFFE=_F(TOUT='OUI',
    PHENOMENE='THERMIQUE',
    MODELISATION='AXIS_DIAG',),)
#----- REORIENTATION DE GROUPES DE BORD
#

MATH[i]=MODI_MALLAGE(reuse =MATH[i],
  MAILLAGE=MATH[i],
  ORIE_PEAU_2D=_F(GROUP_MA=('GM58','GM42',
    'GM45','GM57','GM56'),),
  MODELE=MOTH[i],
  INFO=1,);
#----- AFFECTATION CARACTERISTIQUES THERMIQUES -----
#

CHMAT[i]=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=MATH[i],
  AFFE=( _F(GROUP_MA=('GM47','GM48'),
    MATER=MATHPL,
    TEMP_REF=20.0,),
    _F(GROUP_MA=('GM46'),
    MATER=MATHBO,
    TEMP_REF=20.0,),),)
```

```
CHFL[i]=AFFE_CHAR_THER_F(MODELE=MOTH[i],
                          FLUX_REP=_F(GROUP_MA=('GM57',),
                                      FLUN=ZERO,)),)
# CHARGEMENT ECHANGE SUR PLAQUE CÔTÉ INFÉRIEUR
# BRANCHE FROIDE - BRANCHE CHAUDE
#

CHBF[i]=AFFE_CHAR_THER_F(MODELE=MOTH[i],
                          ECHANGE=(_F(GROUP_MA=('GM45',),
                                      COEF_H=HP,
                                      TEMP_EXT=TBF,)),
                          _F(GROUP_MA=('GM42', 'GM58'),
                              COEF_H=HB,
                              TEMP_EXT=TBF,)),)
# CHARGEMENT ECHANGE SUR PLAQUE CÔTÉ SUPÉRIEUR
# CHOC 4EME CATEGORIE
#

CHTS4[i]=AFFE_CHAR_THER_F(MODELE=MOTH[i],
                          ECHANGE=_F(GROUP_MA=('GM56'),
                                      COEF_H=HS,
                                      TEMP_EXT=TS4,)),)
```

Si l'on regarde les résultats au dernier instant calculé, en particulier la température sur la ligne de post-traitement déjà utilisée en mécanique, Cf. [Figure 6.3.3-c], on constate l'intérêt de l'adaptation de maillage. Comme on pourra le constater sur les maillages initial et adapté (au dernier pas de temps), Cf. [Figure 6.3.3-a] – [Figure 6.3.3-b], le maillage n'a pas changé au voisinage proche de cette ligne de dépouillement : l'amélioration de la température calculée provient des zones que l'on a raffiné par ailleurs. On remarquera aussi que le maillage raffiné n'est pas très intuitif : il s'agit là aussi d'un des intérêt de l'adaptation automatique de maillage.

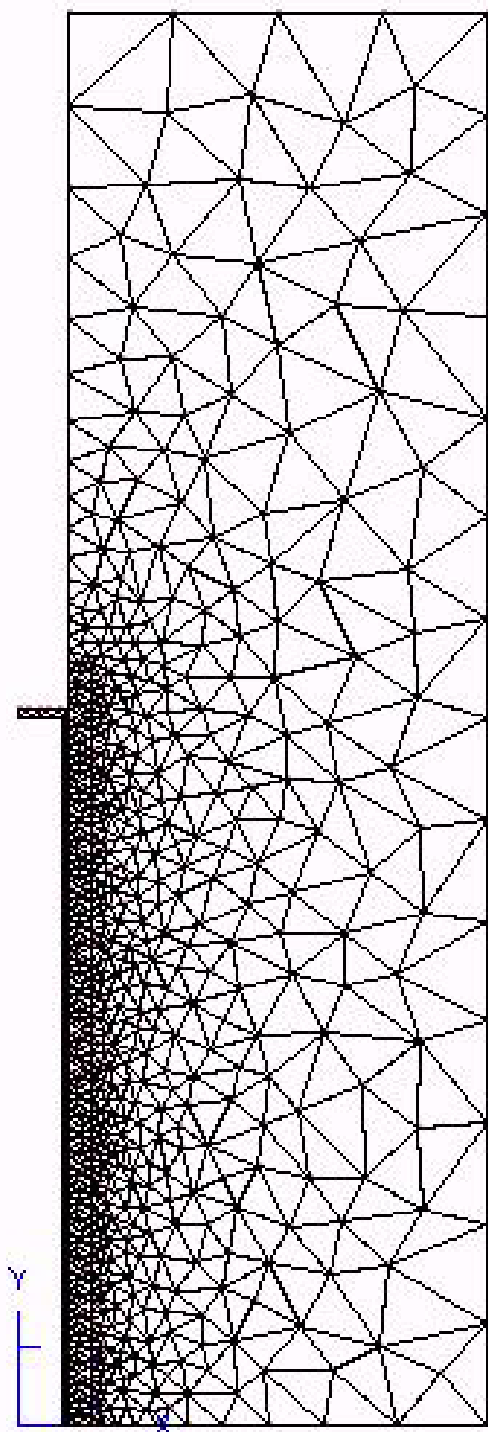


Figure 6.3.3-a : Maillage initial

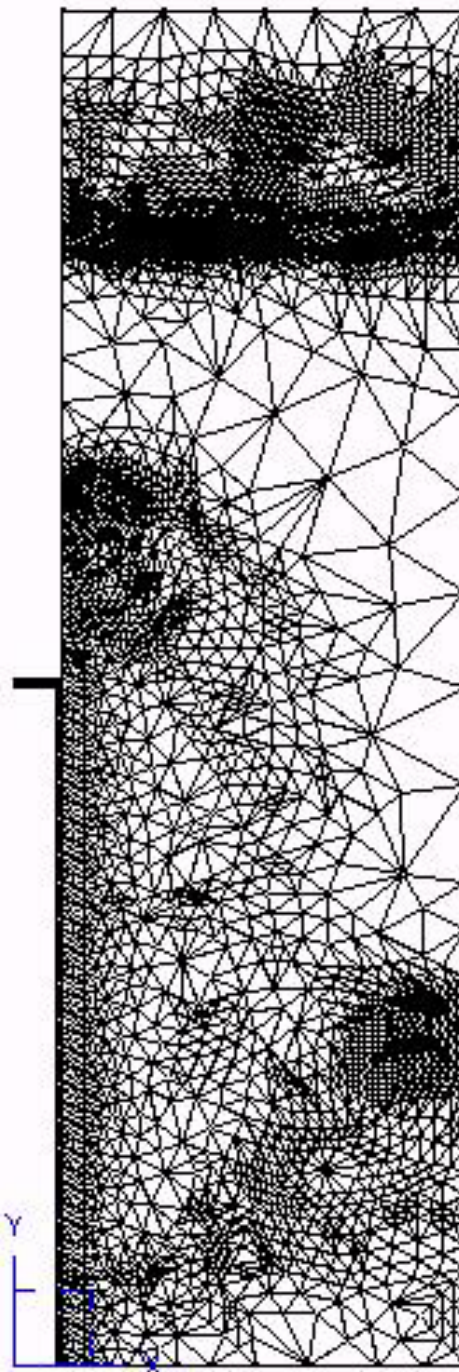


Figure 6.3.3-b : Maillage raffiné au dernier pas de temps de calcul

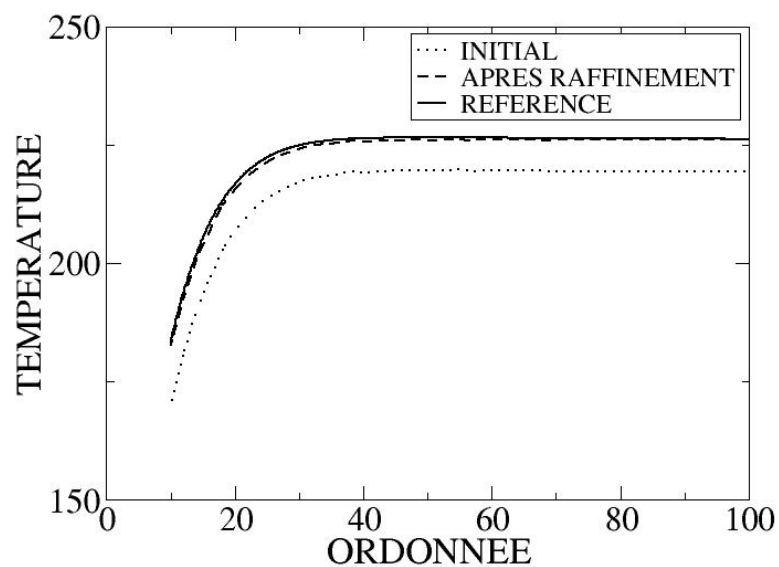


Figure 6.3.3-c : Profil de température

Page laissée intentionnellement blanche.