



FR9710014

Production d'énergie (hydraulique, thermique et nucléaire)

CALCUL DES CONTRAINTES RESIDUELLES CREEES PAR
LA TREMPE ET L'USINAGE D'UN TUYAU
AUSTENOFERRITIQUE MOULE

*CALCULATION OF THE RESIDUAL STRESS FIELD
CREATED BY QUENCHING AND GRINDING IN A CAST
DUPLEX STAINLESS STEEL PIPE*

97NB00032

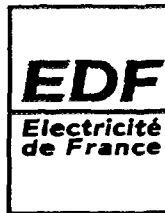
29 - 08
D



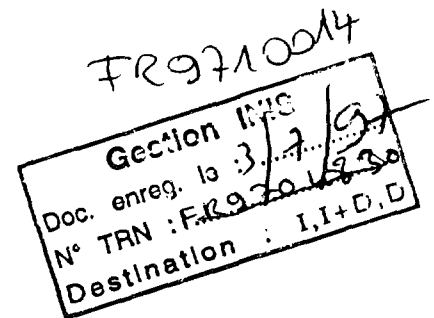
Direction des Etudes et Recherches

**DIRECTION DES ÉTUDES ET
RECHERCHES**

SERVICE RÉACTEURS NUCLÉAIRES ET ÉCHANGEURS
DÉPARTEMENT MÉCANIQUE ET TECHNOLOGIE DES
COMPOSANTS



FR9710014



Août 1996

DUPAS P.
LE DELLIU P.

**CALCUL DES CONTRAINTES RESIDUELLES
CREEES PAR LA TREMPE ET L'USINAGE D'UN
TUYAU AUSTENOFERRITIQUE MOULE**

***CALCULATION OF THE RESIDUAL STRESS
FIELD CREATED BY QUENCHING AND
GRINDING IN A CAST DUPLEX STAINLESS
STEEL PIPE***

Pages : 33

97NB00032

Diffusion : J.-M. Lecœuvre
EDF-DER
Service IPN. Département PROVAL
1, avenue du Général-de-Gaulle
92141 Clamart Cedex

29 - 08

© EDF 1997

ISSN 1161-0611

SYNTHÈSE :

On calcule les contraintes résiduelles créées par la trempe et l'usinage d'un tuyau austénoferritique moulé. Ces calculs sont effectués avec le Code Aster. Ils sont le préliminaire à une étude 3D sur un coude moulé.

La trempe est simulée par un calcul axisymétrique thermomécanique (linéaire en thermique, non linéaire en mécanique). Les usinages sont simulés soit par abaissement des caractéristiques mécaniques dans les zones usinées, soit par relâchement de nœuds.

Les contraintes après trempe sont en forte compression en peau, et en traction au cœur de la pièce. A la suite des usinages (le premier, simultanément en peaux interne et externe, puis le second uniquement en peau interne), les contraintes passent en traction en peau. Ces résultats sont comparés à une étude similaire effectuée par le CEA et à des mesures. On montre un bon accord qualitatif des contraintes calculées par les deux codes ainsi qu'avec les mesures. Des différences importantes dans les résultats du calcul thermique ont été mises en évidence entre les deux codes, dues à un pas de temps trop grossier utilisé dans CASTEM 2000. Néanmoins, l'effet sur le champ de contraintes résiduelles est assez faible.

Deux études complémentaires ont montré une influence négligeable du degré de raffinement du maillage ainsi qu'une équivalence entre les deux méthodes numériques de simulation de l'usinage (baisse du module d'Young et relâchement de nœuds), à condition de corriger les valeurs en peau données par la première méthode.

EXECUTIVE SUMMARY :

We calculate with a finite element program the residual stresses generated by quenching and grinding a cast duplex stainless steel pipe. These calculations are performed with Code Aster (developed by EDF/R&D D).

They are preliminar to a 3D study concerning an elbow made of the same material. Quenching is simulated by an axisymmetric thermomechanical calculation. Grindings are simulated either by lowering mechanical properties in grinded parts of the pipe, either by releasing the nodes.

Stresses due to quenching are in high compression in the skin and tensile in the middle. After grindings (the first concerning both internal and external skins, the second concerning only the internal skin), stresses become tensile on the skin.

These results are compared to those obtained in a similar study by CEA and also to the measurements. Some important differences appear in the thermal results between the two FE programs, due to a too coarse time step in the CASTEM 2000 calculation. However, the effect on the residual stress field is not very important.

Two complementary studies have shown a neglectible influence of mesh size, as well as an equivalence of the two numerical methods used for simulating grinding (lowering the Young modulus and releasing the nodes), according the values given at the nodes of the skin by the first method are corrected.

TABLE DES MATIÈRES

RÉFÉRENCES	6
INTRODUCTION	7
1. REPRISE DU CALCUL DU CEA	7
1.1. Présentation du modèle	7
1.2. Difficultés rencontrées	8
1.3. Résultats	9
1.3.1. <i>Calcul thermique de la trempe</i>	9
1.3.2. <i>Calcul mécanique de la trempe</i>	9
1.3.3. <i>Calcul mécanique du premier usinage</i>	10
1.3.4. <i>Calcul mécanique du deuxième usinage</i>	11
1.3.5. <i>Comparaison avec les mesures</i>	11
1.4. Remarques sur les différences observées	11
2. INFLUENCE DE LA TAILLE DU MAILLAGE	12
3. INFLUENCE DE LA MÉTHODE NUMÉRIQUE D'USINAGE	12
CONCLUSION	13
FIGURES	15
ANNEXE 1 : CARACTÉRISTIQUES MATÉRIAUX UTILISÉES	32
1 - Caractéristiques thermiques.....	32
2 - Caractéristiques mécaniques.....	32
ANNEXE 2 : INFLUENCE DU DÉCOUPAGE EN TEMPS SUR LA TEMPÉRATURE	33

RÉFÉRENCES

- [1] Essais d'éclatement sur tuyauterie vieillie. Calcul des contraintes résiduelles dans une virole en acier CF8M après hypertrempe et usinages.
V. Marelle, C. Poette.
Note technique CEA/SERA/LDCS 93/6140 du 02/08/93.

- [2] Programme de travail sur la mesure et le calcul des contraintes résiduelles dans les coudes moulés.
P. Le Delliou, P. Dupas.
Note DER/MTC HT-26/93/057/A du 30 novembre 1993.

- [3] RCC-MR.
Volume Z : annexe technique A3 "Caractéristiques des matériaux".

- [4] Base de données sur l'acier inoxydable 17-12 au molybdène à très bas carbone et azote contrôlé. Caractéristiques de traction.
M.F. Felsen, J. Gretier, D. Lehmann.
Note technique CEA SRMA 87-1519, juin 1987.

- [5] Recueil bibliographique de caractéristiques thermomécaniques pour l'acier de cuve, les revêtements inoxydables et les alliages 182 et 600.
P. Dupas, F. Waeckel.
Note EDF DER MMN/MTC HI-74/93/097, HT-26/93/058/A, 17 janvier 1994

INTRODUCTION

Cette note présente les calculs effectués pour simuler numériquement la création des contraintes résiduelles par trempe et usinage d'un tuyau en acier inoxydable austénoferritique.

Des calculs ont été déjà effectués par le CEA sur un maillage assez grossier [1]. Le but de cette note est de reprendre et poursuivre ces calculs, notamment sur des maillages plus fins. On étudiera aussi deux méthodes différentes pour simuler l'enlèvement de matière (par diminution du module d'Young et par relâchement de noeuds).

Ces calculs sont des calculs préliminaires à une étude 3D sur un coude [2].

1. REPRISE DU CALCUL DU CEA

1.1. Présentation du modèle

Dans un but de comparaison, la modélisation est identique à celle utilisée par le CEA pour le calcul avec CASTEM 2000.

Le calcul avec le *Code Aster* se déroule en trois étapes :

- calcul thermomécanique pour simuler la trempe de 1120°C à 20°C,
- calcul mécanique pour simuler le premier usinage,
- calcul mécanique pour simuler le deuxième usinage.

Le calcul est axisymétrique. Bien qu'étant en fait un calcul 1-D, le maillage du CEA (voir figure 1) comporte plusieurs éléments selon l'axe du tuyau. Cela était semble-t-il destiné à permettre des variations des chargements ou des conditions aux limites le long de cet axe lors d'études ultérieures. Par souci de simplicité, nous adoptons le même maillage dans un premier temps. Les éléments utilisés sont des quadrangles à huit noeuds.

On pourra trouver une description complète des données matériaux dans l'Annexe 1, issue de [1]. On peut remarquer que ces caractéristiques sont celles de l'acier inoxydable austénitique 316L.

Le calcul thermique est linéaire. Les caractéristiques thermiques (conductivité et chaleur volumique) sont constantes, indépendantes de la température et correspondant à la température de 600°C (voir Annexe 1). Un flux nul est imposé sur les extrémités du tuyau tandis que les faces internes et externes sont soumises à un échange convectif avec le milieu ambiant (voir figure 2).

Le calcul mécanique faisant suite au calcul thermique précédent permet de déterminer les contraintes résiduelles créées par la trempe. C'est un calcul élastoplastique. La loi de comportement du matériau est à écrouissage cinématique linéaire. La limite d'élasticité, le module d'Young, le module d'écrouissage et le coefficient de dilatation thermique dépendent de la température (voir Annexe 1). Le coefficient de Poisson est supposé constant (égal à 0,3). Les conditions aux limites sont des déplacements nuls sur une extrémité du tuyau et un déplacement uniforme selon l'axe du tuyau pour l'autre extrémité (voir figure 2), ceci pour modéliser un tuyau infiniment long

Le premier usinage est effectué simultanément en peau interne (20 mm) et en peau externe (10 mm). Le second usinage est effectué uniquement en peau interne (10 mm). Ces usinages sont simulés par abaissement du module d'Young des éléments finis correspondant à la matière enlevée lors de l'usinage.

Remarque : Dans la partie 3, on présente une comparaison des résultats obtenus avec deux méthodes différentes d'enlèvement de matière (par diminution du module d'Young et par relâchement de noeuds).

1.2. Difficultés rencontrées

La première difficulté rencontrée concerne le découpage en temps du calcul thermique. Le CEA a utilisé un découpage en temps constant de 10 secondes. Or avec un tel pas de temps, les résultats fournis par le Code Aster montrent des oscillations très importantes (voir figure 3), ce qui n'est pas le cas des résultats obtenus avec CASTEM 2000 (voir figure 4). Nous avons néanmoins tenté d'effectuer le calcul mécanique avec ces cartes thermiques, mais il a été impossible de converger.

La deuxième difficulté rencontrée a été la simulation des usinages. En effet, il s'est avéré qu'il n'était pas possible d'obtenir la convergence des calculs en élastoplasticité. Il a fallu, pour contourner ce problème, considérer que le matériau usiné (celui dont on abaisse le module d'Young) avait un comportement élastique, le reste du matériau conservant un comportement élastoplastique à écrouissage linéaire.

Hormis ces deux modifications (découpage en temps et loi de comportement du matériau usiné), nous avons conservé le modèle utilisé par le CEA.

1.3. Résultats

Les résultats fournis par le CEA et présentés dans [1] le sont sous forme de courbes (dont la plupart seront reproduites dans cette note) et non pas sous forme de données numériques. Les comparaisons effectuées avec ces calculs resteront donc dans une certaine mesure qualitatives, bien que les ordres de grandeur puissent être assez facilement obtenus à l'aide des échelles figurant sur ces courbes. On peut aussi indiquer qu'on s'intéresse essentiellement à la contrainte circonférentielle car une partie de la tuyauterie a été utilisée pour un essai d'éclatement réalisé dans le cadre de l'action tripartite T83. Cette tuyauterie comportait un défaut semi-elliptique orienté dans le sens longitudinal et sollicité par les contraintes circonférentielles.

1.3.1. Calcul thermique de la trempe

Le calcul thermique de la trempe a été effectué, compte tenu des remarques précédentes, avec un pas variable et plus raffiné que celui du CEA (45 pas dans les 10 premières secondes). Les résultats, présentés sur les figures 5 à 11, montrent un bon accord avec ceux obtenus par CASTEM 2000.

Une étude plus attentive des figures 6 et 7 montre cependant un écart de température relativement important au temps $t=10s$ ($475^{\circ}C$ avec CASTEM 2000, $375^{\circ}C$ avec *Code Aster*).

1.3.2. Calcul mécanique de la trempe

Les figures 12 à 17 montrent l'évolution de la contrainte de von Mises en fonction du temps. On remarque en comparant les figures 12 et 13 que les calculs effectués avec le *Code Aster* présentent des oscillations moindres pendant les 100 premières secondes de la trempe que ceux du CEA. Les valeurs obtenues sont globalement identiques (entre 0 et 50 MPa à coeur et entre 50 et 200 MPa sur les bords) sauf en peau où les valeurs du CEA sont plus grandes en peau interne et plus petites en peau externe.

Après 100 s (figures 14 et 15), les profils sont très ressemblants mais ce sont les valeurs calculées avec le *Code Aster* qui sont cette fois les plus grandes, essentiellement en surface. A la fin du refroidissement, les valeurs en peaux interne et externe sont supérieures de 100 MPa à celles du CEA. Les valeurs à coeur sont néanmoins identiques. On remarque deux pics, l'un à 20 mm de la peau interne et l'autre à environ 30 mm de la peau externe, dont les valeurs sont différentes selon le code utilisé. Toutes ces remarques se retrouvent sur les figures 16 et 17 présentant l'évolution de la contrainte de von Mises en fonction du temps, non plus dans l'épaisseur mais pour trois noeuds situés en peau interne, en peau externe et au coeur.

Les contraintes résiduelles circonférentielles après trempe (au temps 900 s, soit pour une température comprise entre 20 et 30°C) sont présentées sur les figures 18 et 19. Les profils obtenus par chacun des codes sont identiques : traction au coeur de la pièce et compression sur les bords. Les valeurs au coeur sont du même ordre (275 MPa) mais les valeurs en surface sont différentes (-400 MPa avec le *Code Aster* et -300 MPa avec CASTEM 2000).

Les contraintes principales (radiales, circonférentielles et longitudinales) après trempe sont représentées sur la figure 20. On voit que les contraintes longitudinales sont du même ordre et de profil similaire aux contraintes circonférentielles, tandis que les contraintes radiales sont plus faibles.

1.3.3. Calcul mécanique du premier usinage

L'usinage est modélisé par un calcul thermomécanique. Le calcul thermique est "fictif" et sert uniquement à faire varier les propriétés du matériau. Il consiste à chauffer de façon uniforme la pièce en imposant la température aux noeuds. Le calcul mécanique consiste ensuite à faire baisser le module d'Young des éléments correspondants à la partie usinée en fonction de la température. Le matériau non usiné a des propriétés identiques à celles qu'il avait pendant la trempe, mais sans dépendance vis-à-vis de la température. On suppose que l'usinage est effectué à température ambiante. Les éléments finis correspondant à la partie usinée ont un comportement élastique linéaire. On vérifie que ce premier usinage (simultané en peau interne et externe) est indépendant de la façon dont on diminue le module d'Young (brutalement en un seul pas ou lentement en plusieurs pas). On vérifie aussi que le résultat final est identique selon que l'usinage est simultané en peau externe et interne, ou que l'on usine une des surfaces avant l'autre. Par contre, on obtient des résultats différents selon que le comportement du matériau non usiné est élastique ou élasto-plastique (voir figure 25). La redistribution des contraintes est donc identique selon la chronologie des usinages, mais il y a bien plastification lors de cette redistribution des contraintes.

La comparaison avec les résultats du CEA (figures 21 et 22) montre que l'effet de l'usinage est globalement identique, les valeurs en peau étant différentes car on est parti d'un état après trempe différent. En peau externe, on observe une augmentation des contraintes (on passe de 400 MPa à -150 MPa avec le *code Aster* et de -300 MPa à -100 MPa avec CASTEM 2000). mais on reste en compression assez forte. Par contre, en peau interne, on passe d'une compression forte (-400 MPa avec le *Code Aster* et -300 MPa avec CASTEM 2000) à une traction (50 MPa) avec CASTEM 2000 et une légère compression (-5 MPa) avec le *Code Aster*. Le pic de compression situé entre le coeur et la peau externe reste inchangé dans les deux calculs. Par contre, la baisse du niveau des contraintes de traction au coeur de la pièce est plus sensible sur

le calcul du *Code Aster* (275 MPa après trempe et 125 MPa après le premier usinage) que sur le calcul du CEA (290 MPa après trempe et 175 MPa après le premier usinage).

1.3.4. Calcul mécanique du deuxième usinage

Le deuxième usinage a peu d'effet sur la distribution des contraintes résiduelles circonférentielles. On note simplement une légère augmentation du pic de traction à coeur et une légère baisse du pic de compression situé sous la surface externe. La légère compression obtenue en peau interne avec le *Code Aster* après le premier usinage a disparu au profit d'une traction un peu plus importante (50 MPa). Les résultats sont présentés sur les figures 21 et 22.

1.3.5. Comparaison avec les mesures

La figure 23 compare les résultats de mesures de contraintes résiduelles [1] et ceux des calculs effectués avec CASTEM 2000 et le *Code Aster* (après la trempe et les deux usinages). Les trois courbes sont qualitativement identiques.

1.4. Remarques sur les différences observées

Pour tenter d'expliquer les différences observées entre les calculs effectués avec CASTEM 2000 et avec *Code Aster*, nous avons étudié l'influence du découpage en temps de la trempe. Nous avons en effet signalé au paragraphe 1.3.1. qu'au temps $t=10s$, une différence d'approximativement $100^{\circ}C$ existait en peau interne.

Le CEA a confirmé que le pas de temps utilisé était de 10s, à la fois en thermique et en mécanique, sans redécoupage. Le schéma numérique permettant de résoudre le problème thermique utiliserait néanmoins les températures calculées aux deux pas précédents. On conçoit donc que les températures correspondant aux deux premiers instants de calcul (10 et 20s) soient évaluées plus grossièrement par un tel schéma que les températures aux instants ultérieurs. Or c'est justement pour $t=10s$ que les différences entre les codes sont les plus grandes.

De manière à confirmer le découpage en temps utilisé lors des calculs thermiques avec *Code Aster*, nous avons effectué une étude de l'influence de ce découpage sur la température obtenue en peau interne pendant les 10 premières secondes de la trempe. Des calculs complémentaires ont été effectués avec SYSTUS.

Les résultats sont présentés dans l'Annexe 2. On remarque que l'utilisation d'un pas variable (découpage minimum de 0,02s), ou d'un pas constant égal à 0,04s ou 0,4s donne des résultats très proches, notamment au bout de 10s ($373,7$ à $376^{\circ}C$). Pour différencier les calculs effectués

avec ces pas de manière non négligeable, il faut regarder l'évolution de la température pendant les 2 premières secondes. On remarque aussi que les calculs donnent des résultats presque identiques selon que l'on utilise SYSTUS ou *Code Aster*. Les calculs effectués avec des pas plus grands (4, 5 et 10s) montrent une très mauvaise approximation de la solution, avec notamment des valeurs à 10s très différentes des valeurs trouvées pour les pas plus faibles (492,1°C au bout de 10s avec un pas de 5s et 89,4°C au bout de 10s pour un pas de 10s).

Cette étude confirme la qualité des champs thermiques de trempe obtenus avec le *Code Aster*. Un pas constant de 10s est à l'évidence trop grossier pour simuler correctement les premiers instants de la trempe. De plus, les différences obtenues entre les champs thermiques avec *Code Aster* et CASTEM 2000 peuvent sans doute expliquer les différences observées dans les calculs mécaniques ultérieurs. Il nous semble néanmoins que seuls des calculs supplémentaires avec CASTEM 2000 en utilisant un découpage en temps plus fin permettront d'apporter une réponse définitive à ce problème.

2. INFLUENCE DE LA TAILLE DU MAILLAGE

Le CEA indiquait en conclusion de son étude que le maillage utilisé était trop grossier et qu'un des paramètres à étudier était le raffinement du maillage. Nous avons effectué cette étude. En plus du maillage utilisé par le CEA (18 éléments dans l'épaisseur de taille identique) et dont les résultats ont été décrits dans les paragraphes précédents, nous avons utilisé deux autres maillages, avec un raffinement plus important sur les bords. Ces maillages comportaient respectivement 35 et 122 éléments dans l'épaisseur.

Les résultats obtenus après trempe avec ces différents maillages sont quasiment identiques (voir figure 24).

3. INFLUENCE DE LA MÉTHODE NUMÉRIQUE D'USINAGE

Deux méthodes peuvent être utilisées pour simuler l'enlèvement de matière au cours de l'usinage.

La première (qui est celle utilisée par le CEA et qui a été utilisée pour les résultats présentés jusqu'à présent), consiste à faire tendre le module d'Young vers zéro dans les zones usinées, tout en donnant au matériau de cette zone un comportement élastique de manière à éviter les problèmes de convergence.

La seconde méthode consiste à relâcher les noeuds aux frontières des zones usinées et non usinées. Pour éviter les problèmes de convergence, les zones usinées ont comme dans la

méthode précédente un comportement élastique. On peut rappeler que cette méthode demande d'effectuer un maillage spécifique comportant des noeuds doubles aux frontières des zones à usiner.

La figure 26 présente les valeurs obtenues après chaque usinage avec chaque méthode. On voit que les résultats sont identiques, sauf pour la valeur en peau où la contrainte donnée par la méthode de diminution de E est la moyenne arithmétique entre la valeur « réelle » (celle donnée par relâchement de noeud) et zéro. Autrement dit, les résultats sont identiques avec les deux méthodes à condition de multiplier par 2 les valeurs en peau lorsque l'on utilise la méthode de diminution de E.

Enfin, la figure 27 compare les valeurs obtenues par relâchement de noeuds et les valeurs mesurées.

CONCLUSION

Les calculs effectués par le CEA et repris dans cette étude montrent la possibilité de simuler numériquement certaines étapes de fabrication des tuyaux et coudes moulés et d'en déduire les contraintes résiduelles qui en résultent. Ils montrent notamment la possibilité d'abaisser le module d'Young pour simuler l'enlèvement de matière, à condition de corriger les valeurs aux frontières des zones usinées et non usinées. Cela a été confirmé par comparaison aux résultats obtenus par relâchement de noeuds.

La comparaison des valeurs finales de contraintes résiduelles calculées obtenues par le CEA et EDF et des valeurs mesurées montre un bon accord qualitatif. Les valeurs données par *Code Aster* semblent plus proches des mesures à coeur et plus éloignées en peau que celles fournies par CASTEM 2000. Il n'est cependant pas possible d'en déduire qu'une modélisation ou un code donne de meilleurs résultats que l'autre. En effet, les valeurs mesurées ne constituent en aucun cas une valeur exacte. On sait que les mesures moyennent les contraintes et permettent donc rarement d'obtenir des gradients élevés. D'autres mesures, avec des méthodes différentes, seraient nécessaires pour conclure quant à la précision des calculs effectués.

De plus, l'étude de l'influence du découpage en temps du calcul thermique montre clairement qu'un pas de constant de 10s ne permet pas d'obtenir des valeurs de température correctes dans les premiers instants de la trempe. Les valeurs de température obtenues avec *Code Aster* et utilisées pour le calcul mécanique ont été confirmées par cette étude et validées par comparaison avec SYSTUS. Les différences observées en mécanique peuvent probablement s'expliquer par ces différences dans les champs de température. Il apparaît nécessaire que le

CEA effectue des calculs supplémentaires avec un découpage en temps plus fin pour clore ce sujet.

Ces premiers calculs en deux dimensions montrent la possibilité de poursuivre la modélisation des coudes moulés en trois dimensions. Les améliorations qui pourraient être apportées selon nous concernent essentiellement les données matériaux et la physique de la trempe (trempe non uniforme sur la longueur, caléfaction...).

FIGURES

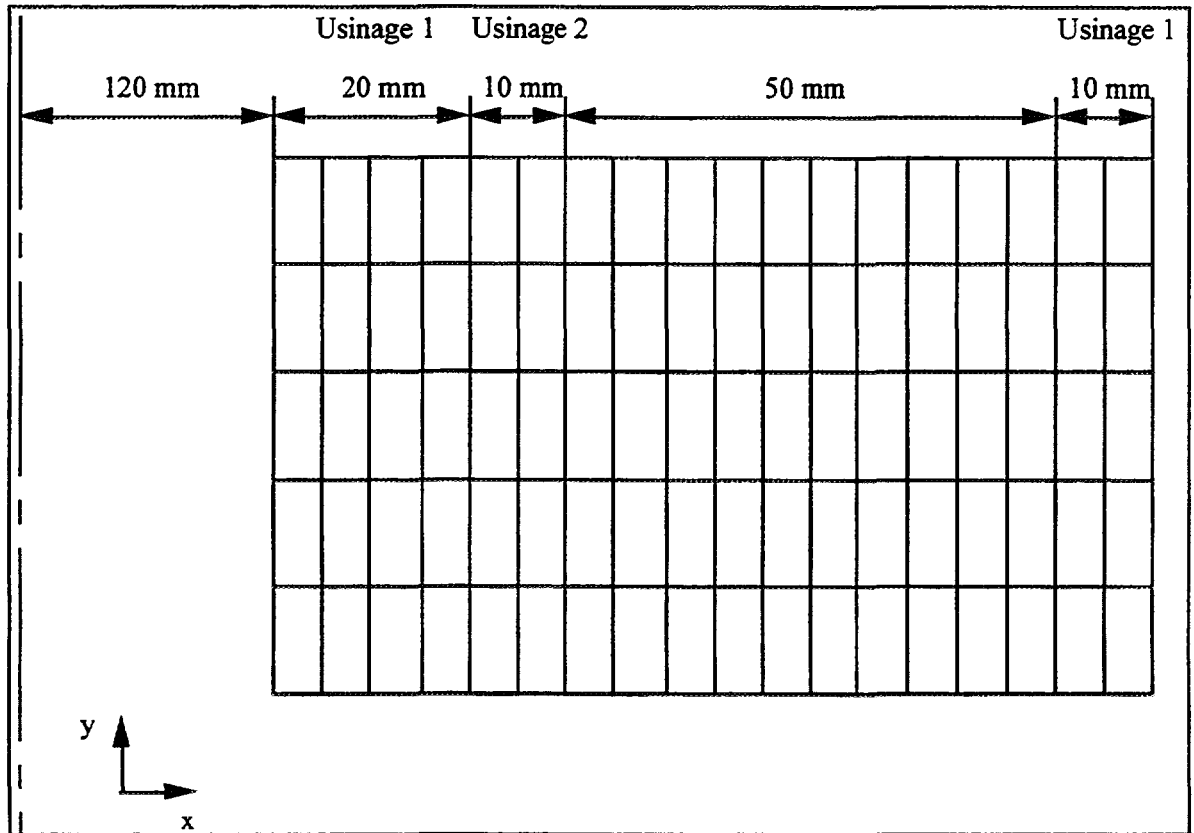


Figure 1 - Géométrie du problème et maillage du CEA.

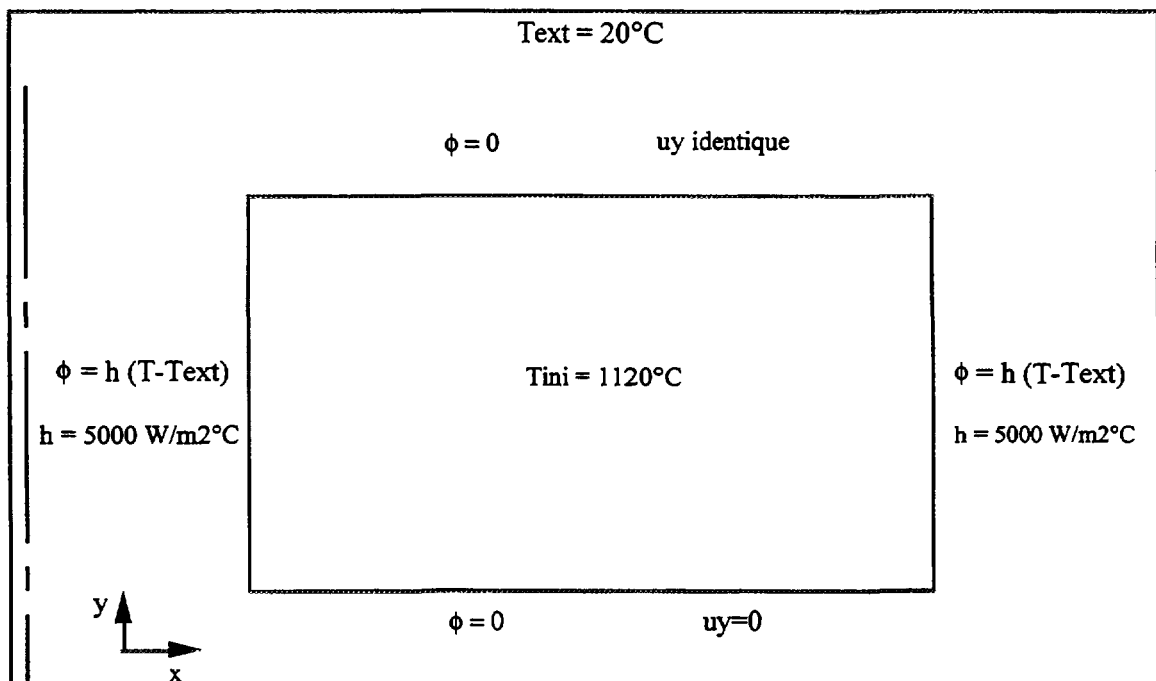


Figure 2 - Conditions aux limites et initiales en thermique et mécanique.

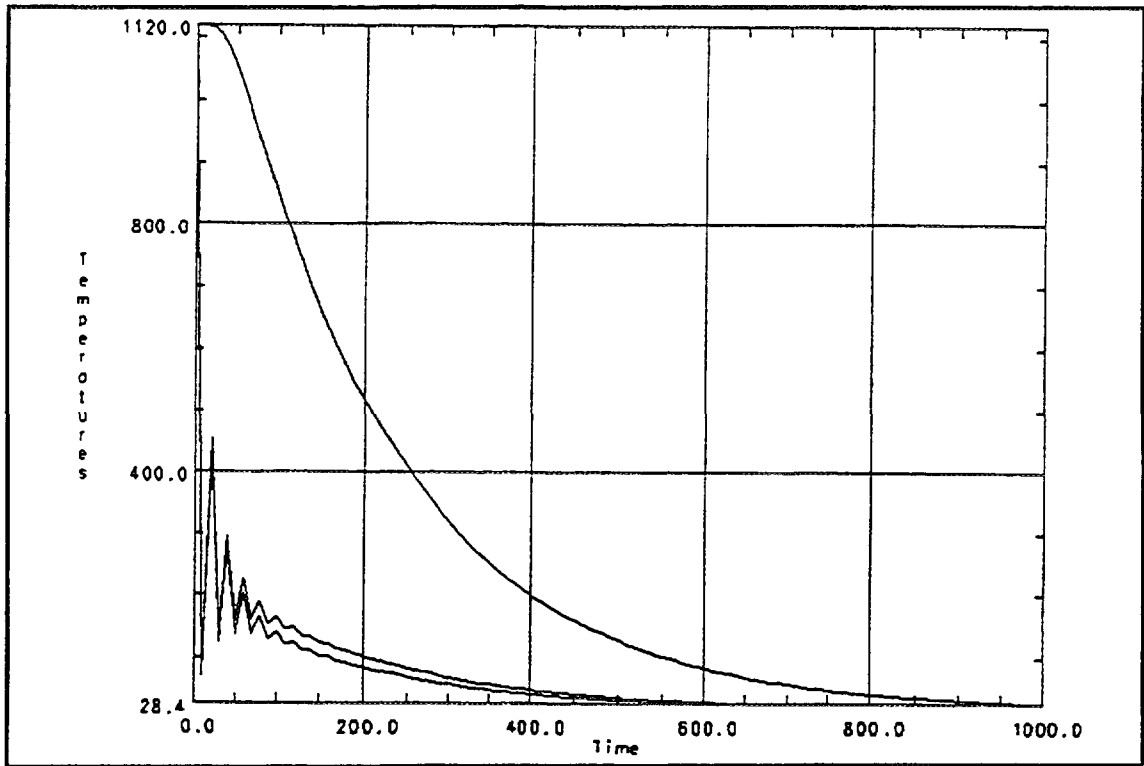


Figure 3 - évolution de la température en peaux interne et externe et à coeur en fonction du temps.
Calcul avec le Code Aster pour un pas constant de 10s.

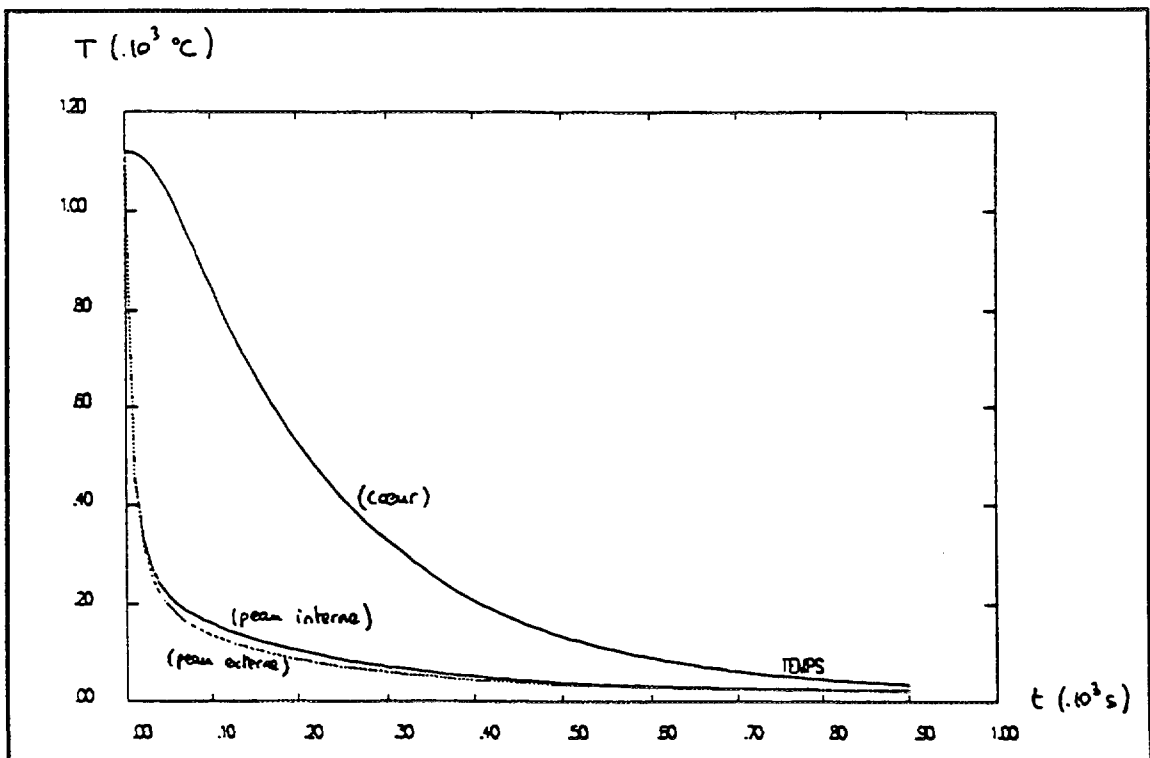


Figure 4 - Évolution de la température en peaux interne et externe et à coeur en fonction du temps.
Calcul du CEA avec CASTEM 2000 (pour un pas constant de 10s).

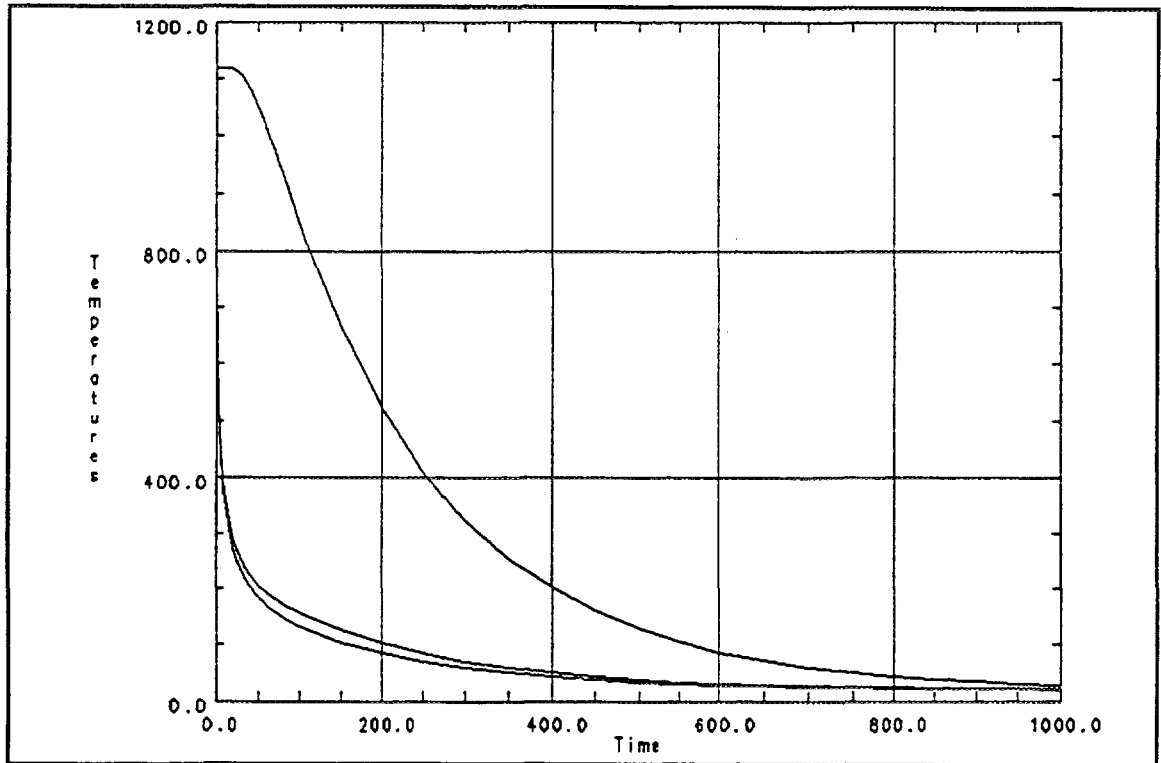


Figure 5 - Évolution de la température en peaux interne et externe et à coeur en fonction du temps. Calcul avec le *Code Aster* pour un pas variable.

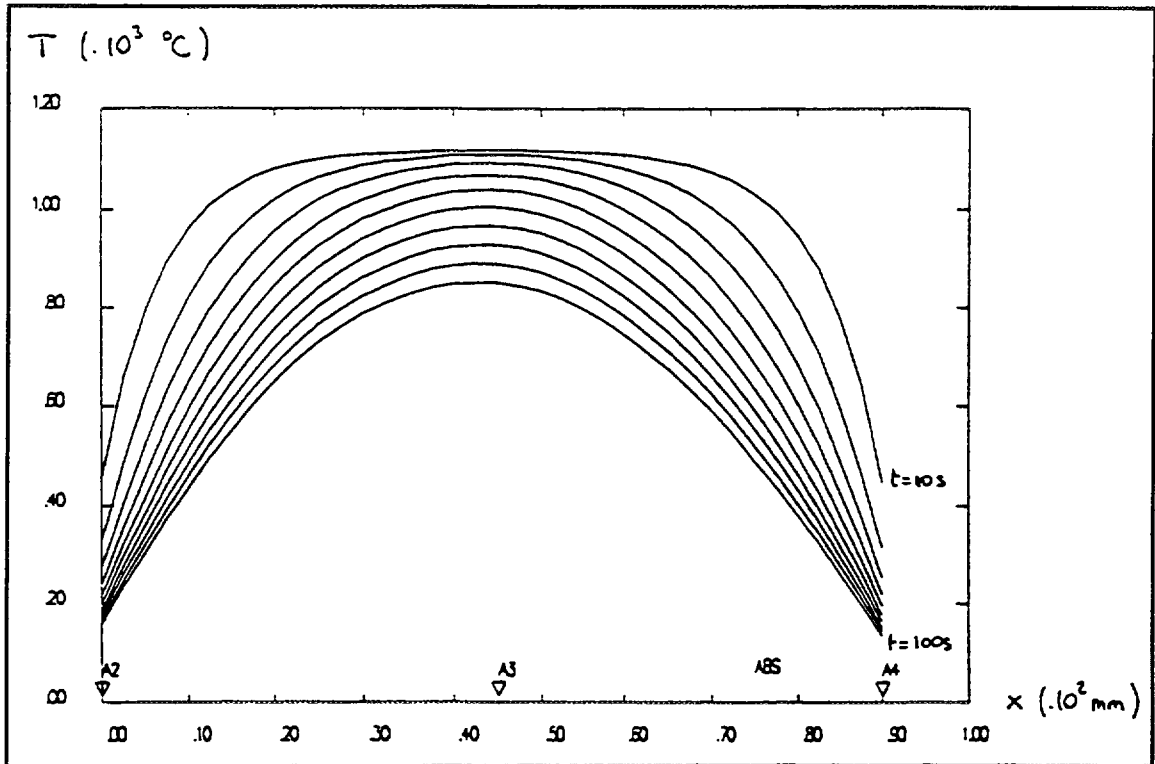


Figure 6 - Profils de température dans l'épaisseur du tuyau entre 10s et 100s par pas de 10s.
Calcul du CEA avec CASTEM 2000 (pour un pas constant de 10s).

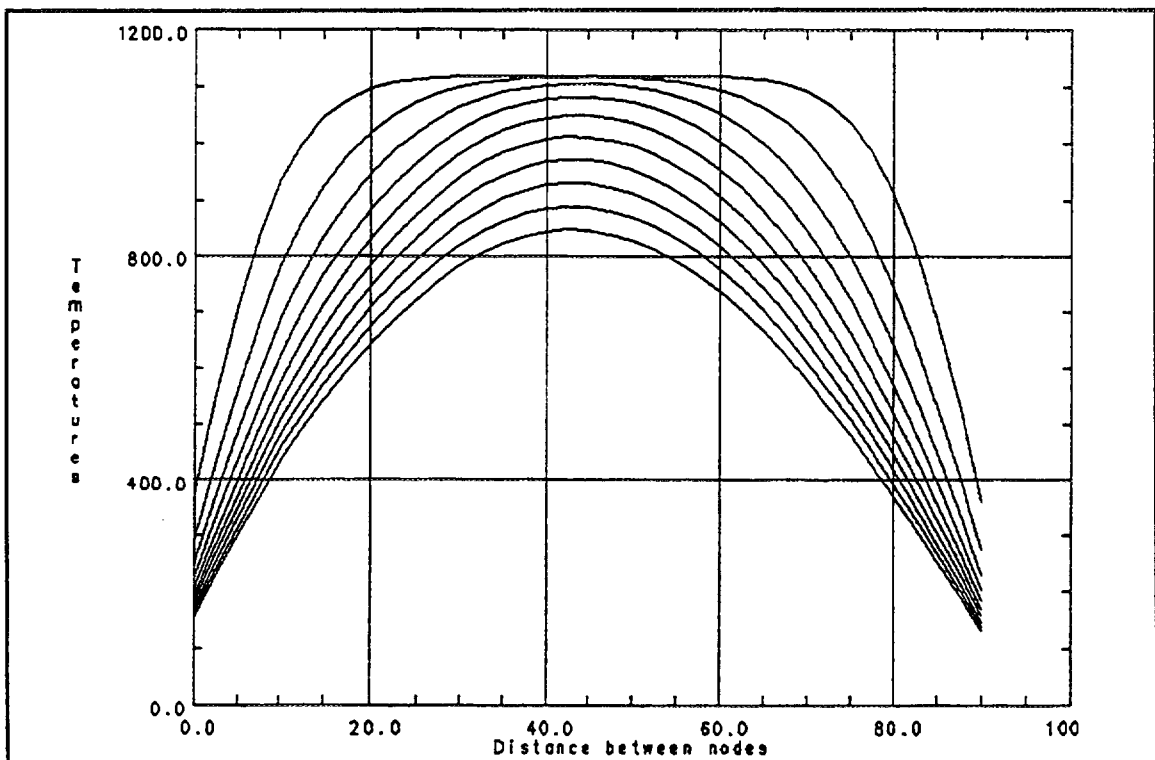


Figure 7 - Profils de température dans l'épaisseur du tuyau entre 10s et 100s par pas de 10s
Calcul avec le Code Aster pour un pas variable.

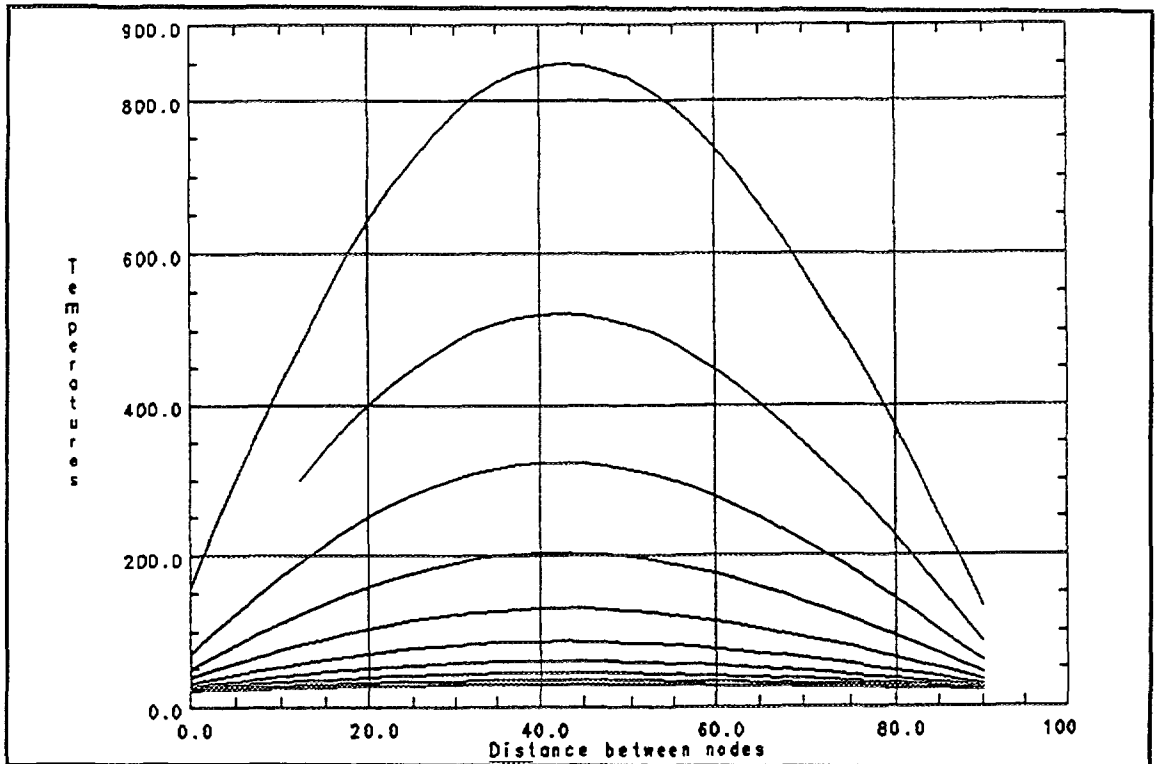


Figure 8 - Profils de température dans l'épaisseur du tuyau entre 100s et 900s par pas de 100s.
Calcul du CEA avec CASTEM 2000 (pour un pas constant de 10s).

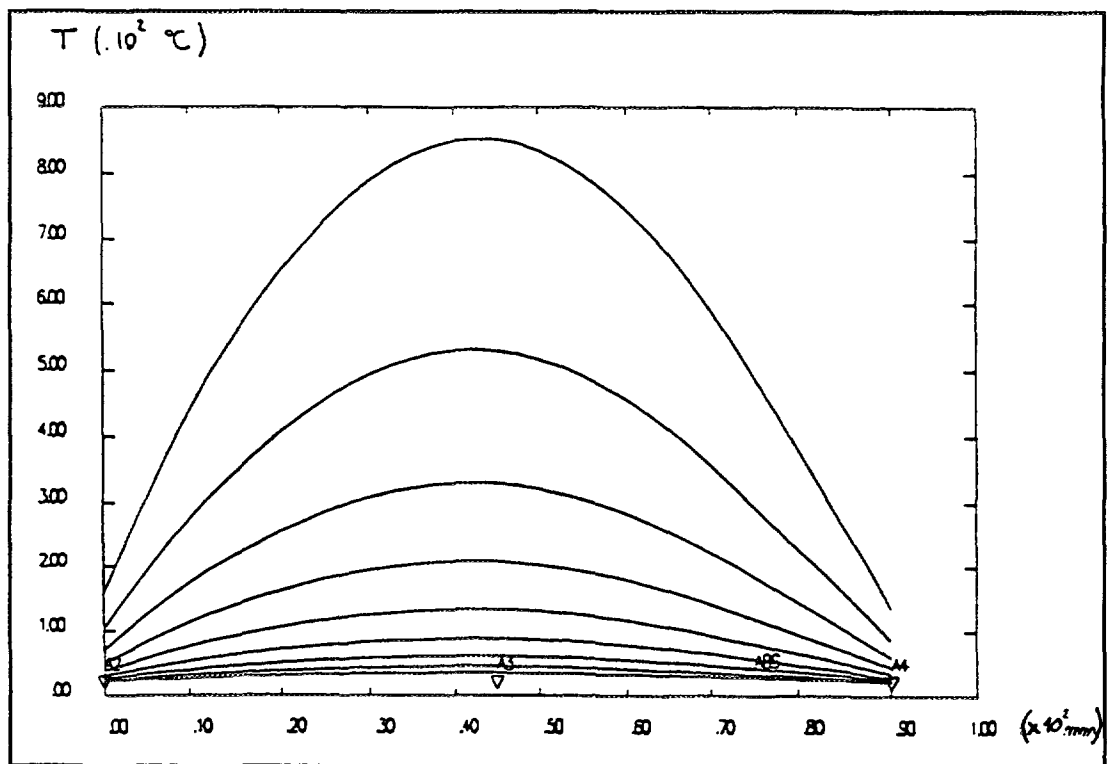


Figure 9 - Profils de température dans l'épaisseur du tuyau entre 100s et 900s par pas de 100s
Calcul avec le Code Aster pour un pas variable.

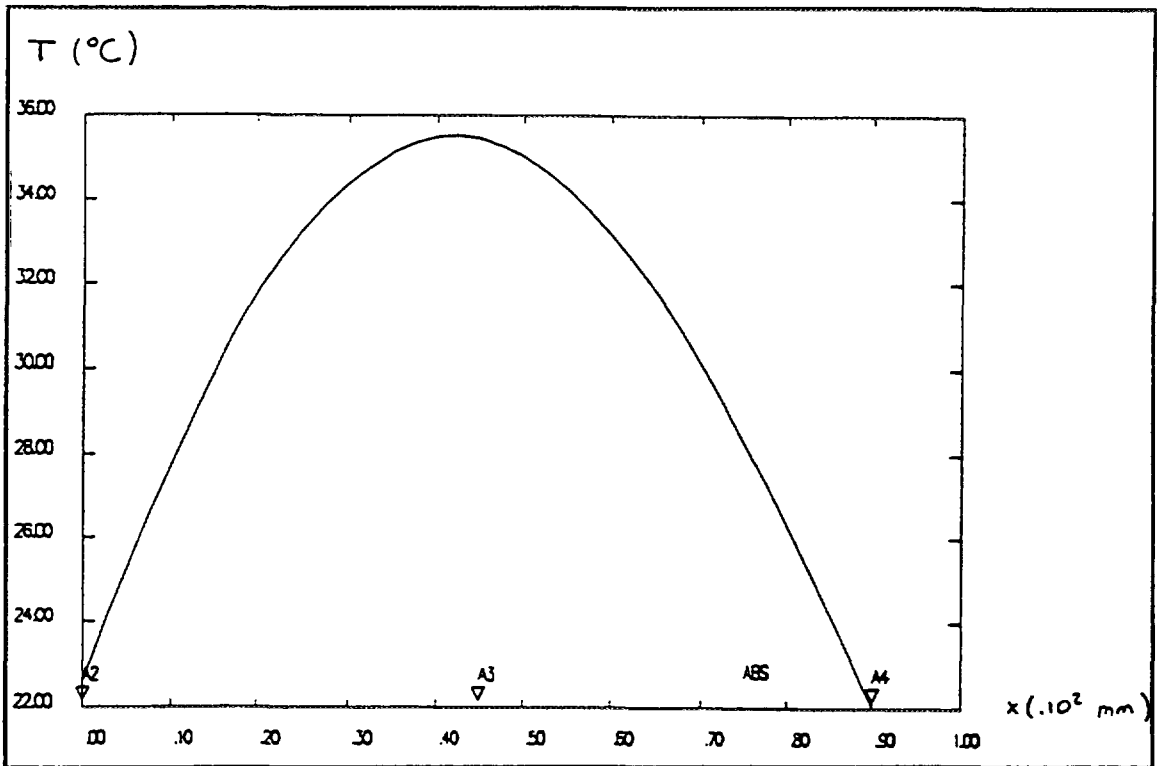


Figure 10 - Profil de température dans l'épaisseur du tuyau à 900s.
Calcul du CEA avec CASTEM 2000 (pour un pas constant de 10s).

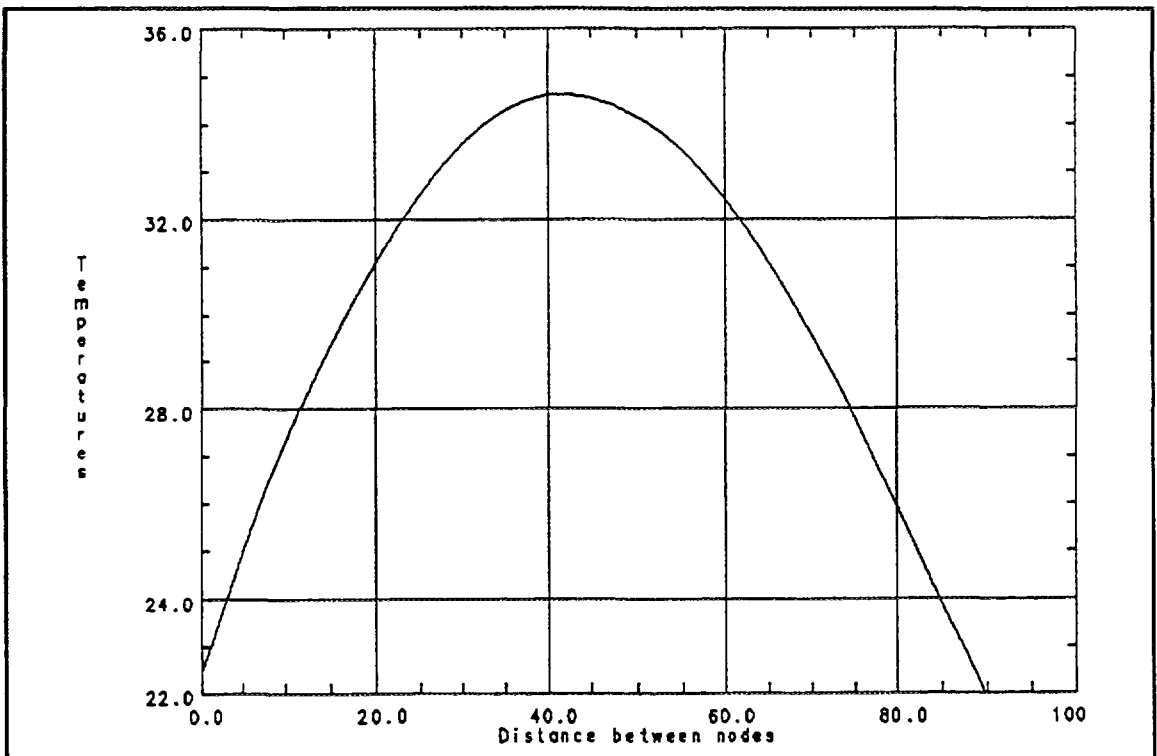


Figure 11 - Profil de température dans l'épaisseur du tuyau à 900s.
Calcul avec le Code Aster pour un pas variable.

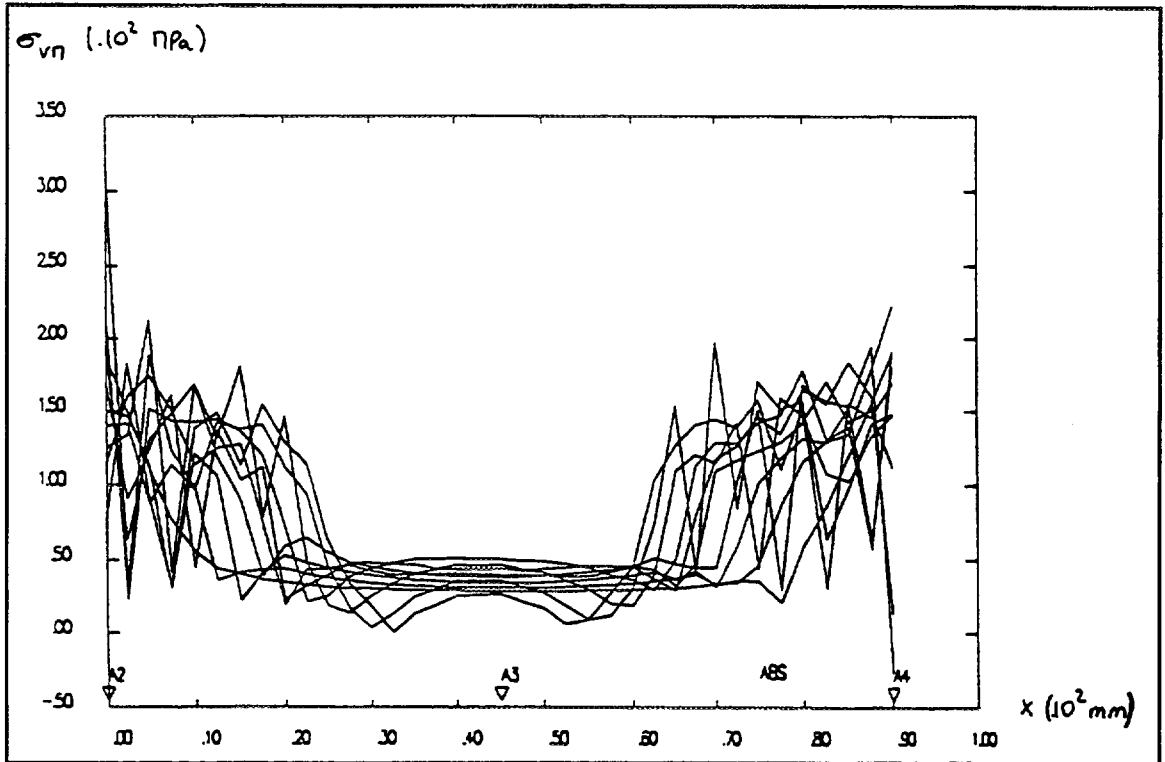


Figure 12 - Contrainte de von Mises dans l'épaisseur du tuyau entre 10 et 100s par pas de 10 s.

Calcul du CEA avec CASTEM 2000.

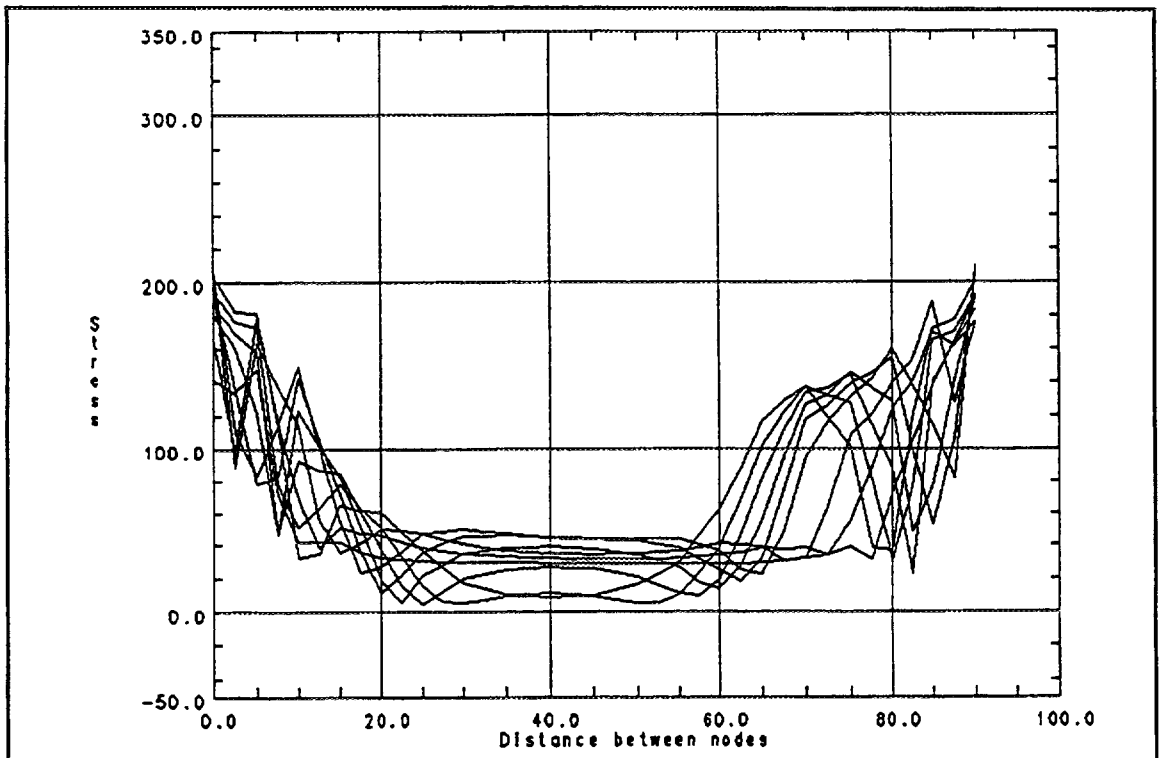


Figure 13 - Contrainte de von Mises dans l'épaisseur du tuyau entre 10 et 100s par pas de 10 s.

Calcul avec le Code Aster.

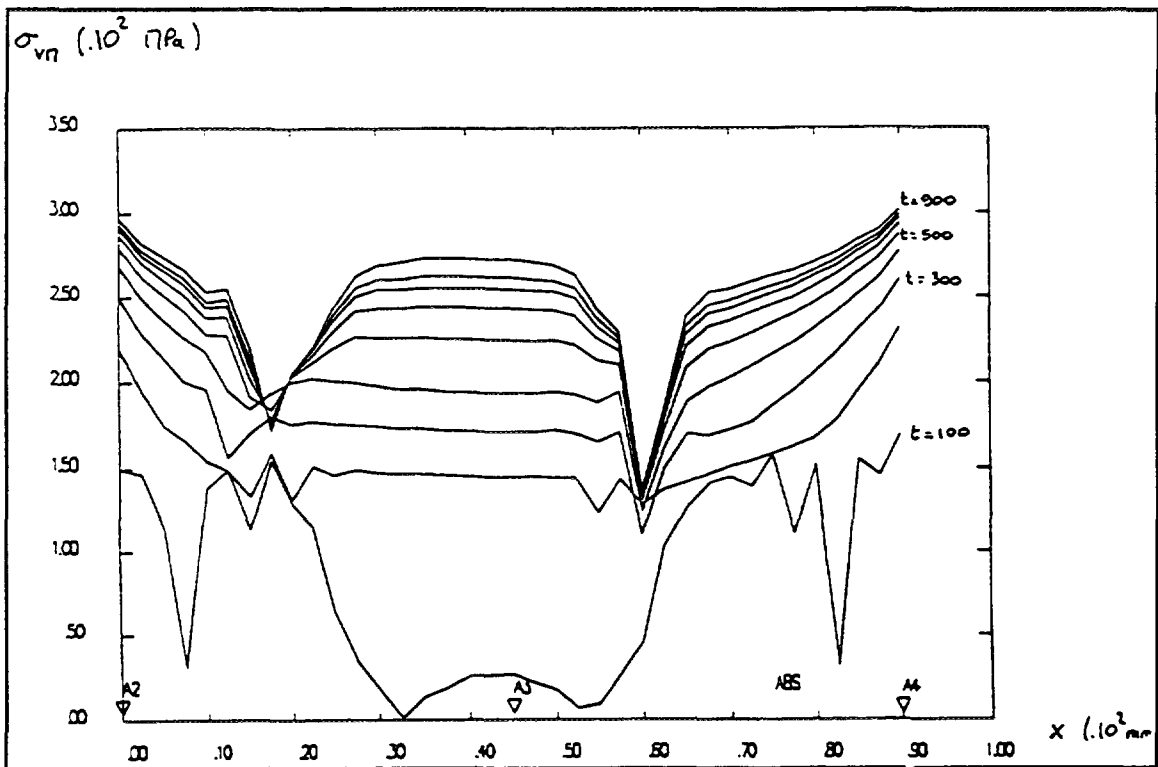


Figure 14 - Contrainte de von Mises dans l'épaisseur du tuyau entre 100 et 900s par pas de 100 s.
Calcul du CEA avec CASTEM 2000.

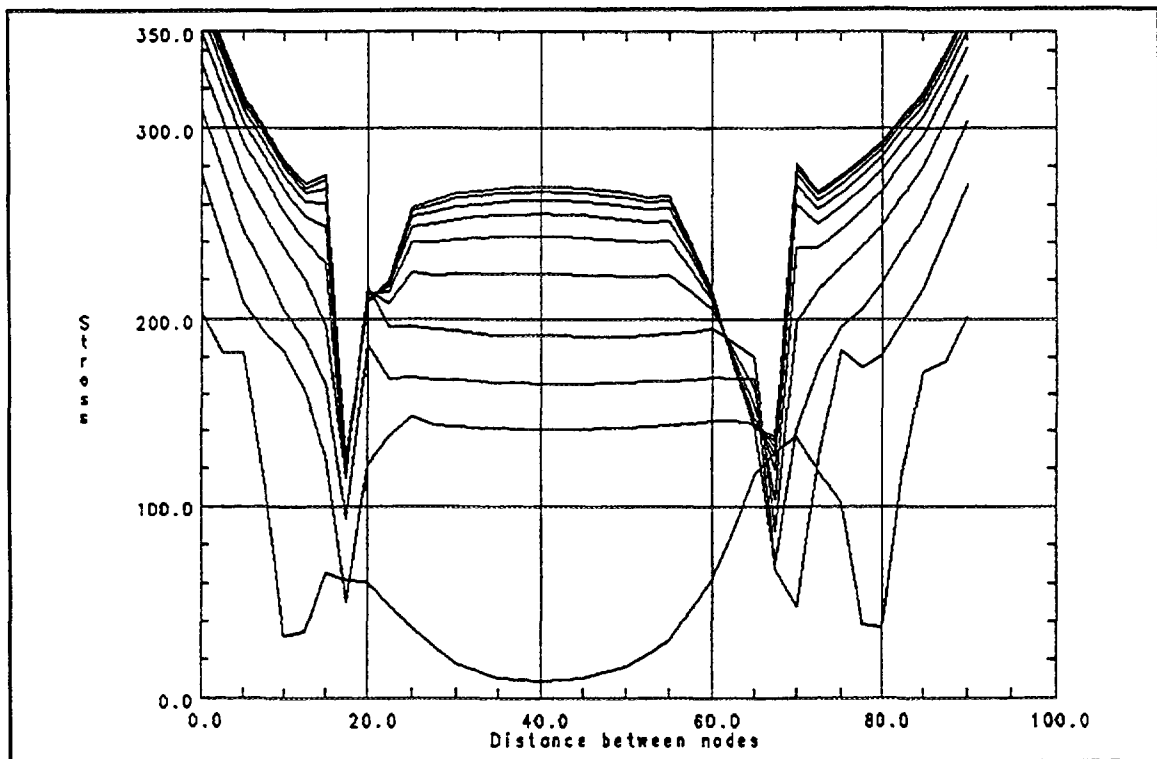


Figure 15 - Contrainte de von Mises dans l'épaisseur du tuyau entre 100 et 900s par pas de 100 s.
Calcul avec le Code Aster.

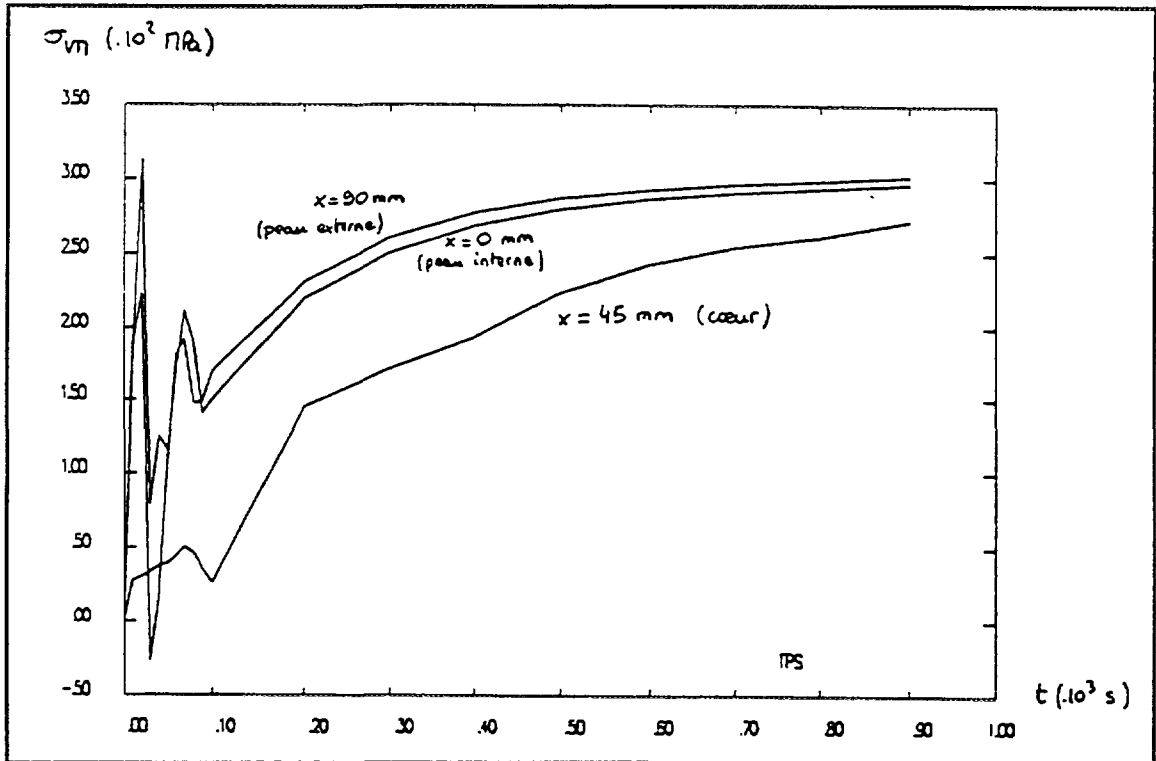


Figure 16 - Evolution de la contrainte de von Mises en peaux interne et externe et à coeur en fonction du temps. Calcul du CEA avec CASTEM 2000.

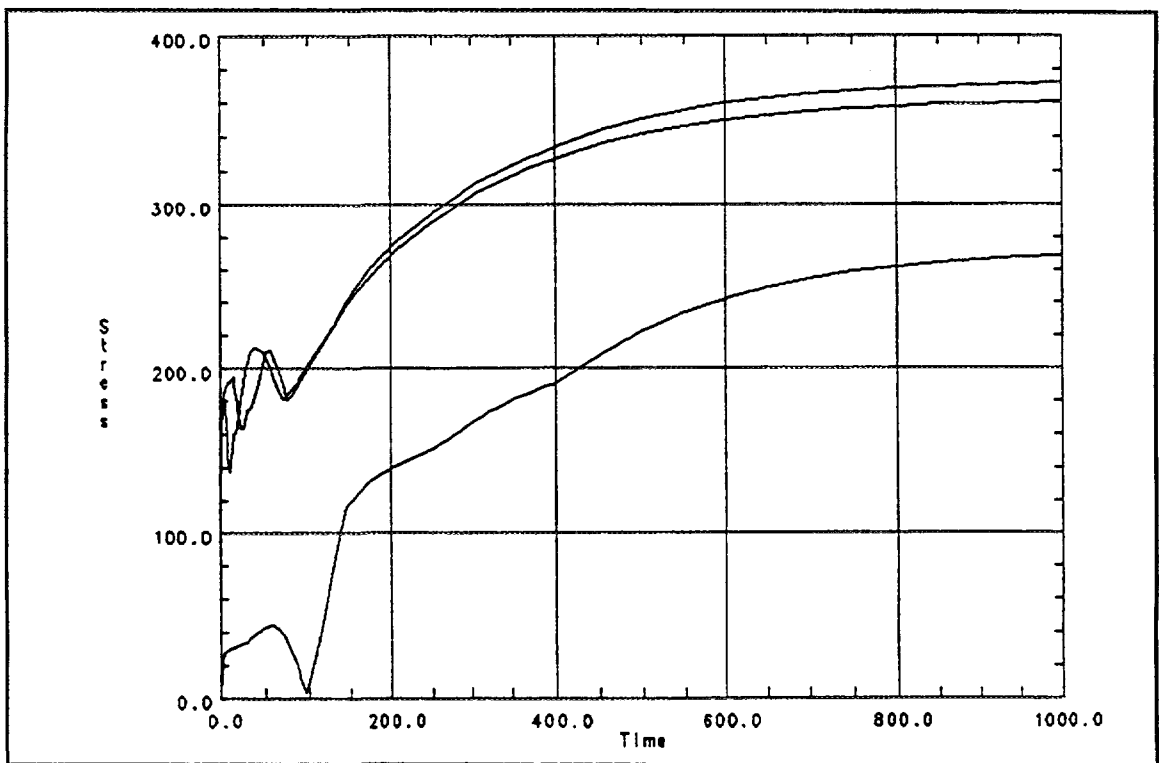


Figure 17 - Evolution de la contrainte de von Mises en peaux interne et externe et à coeur en fonction du temps. Calcul avec le Code Aster.

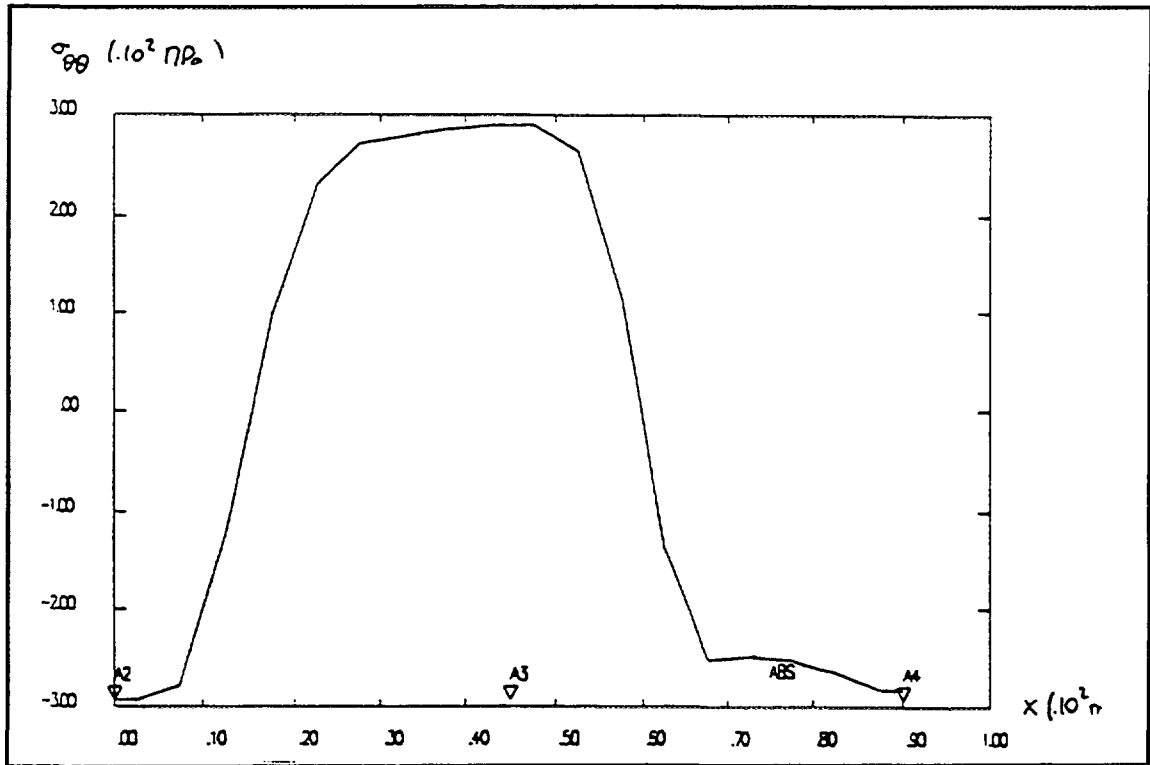


Figure 18 - Contrainte circonférentielle dans l'épaisseur après trempé.
Calcul du CEA avec CASTEM 2000.

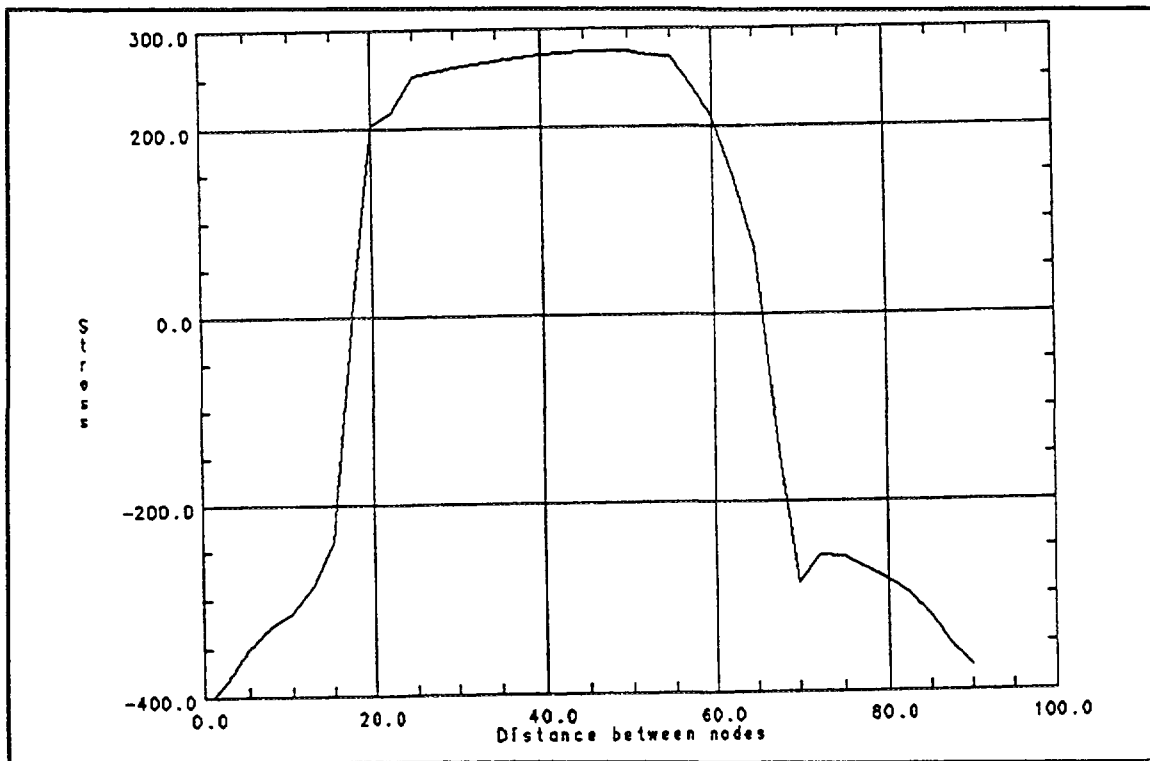


Figure 19 - Contrainte circonférentielle dans l'épaisseur après trempé.
Calcul avec le Code Aster.

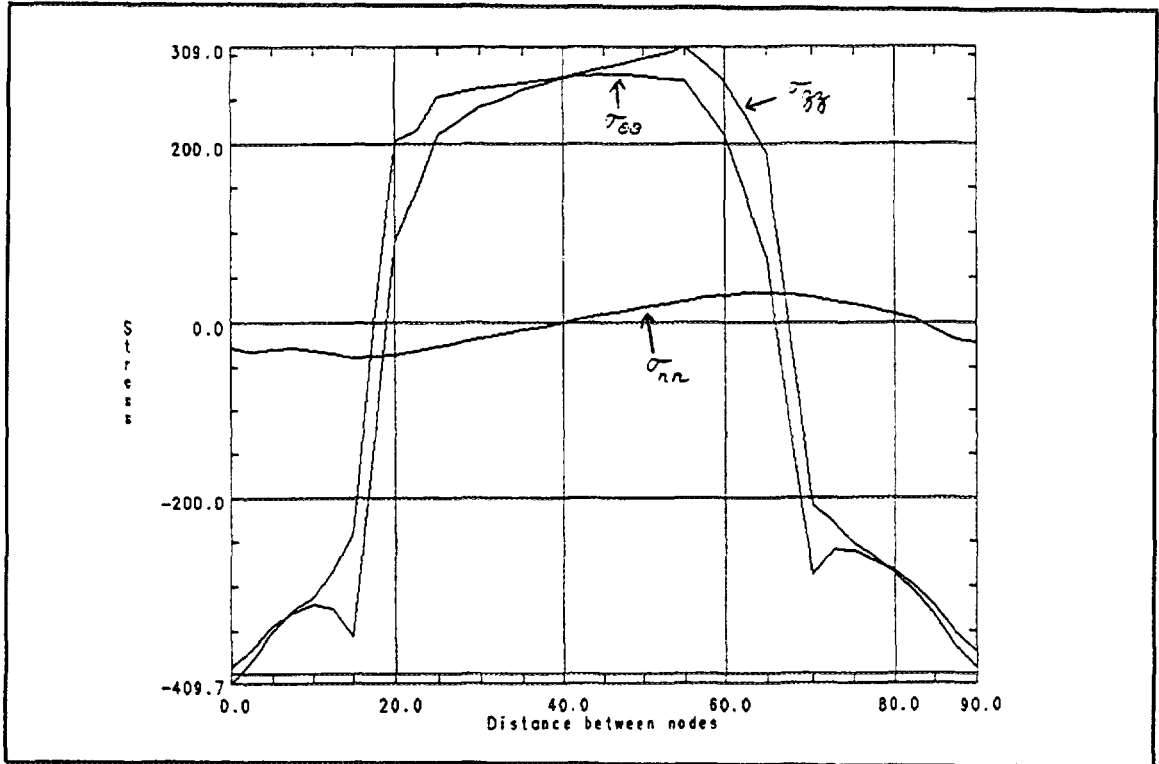


Figure 20 - Contraintes circonférentielles, longitudinales et radiales dans l'épaisseur après trempe.

Calcul avec le Code Aster.

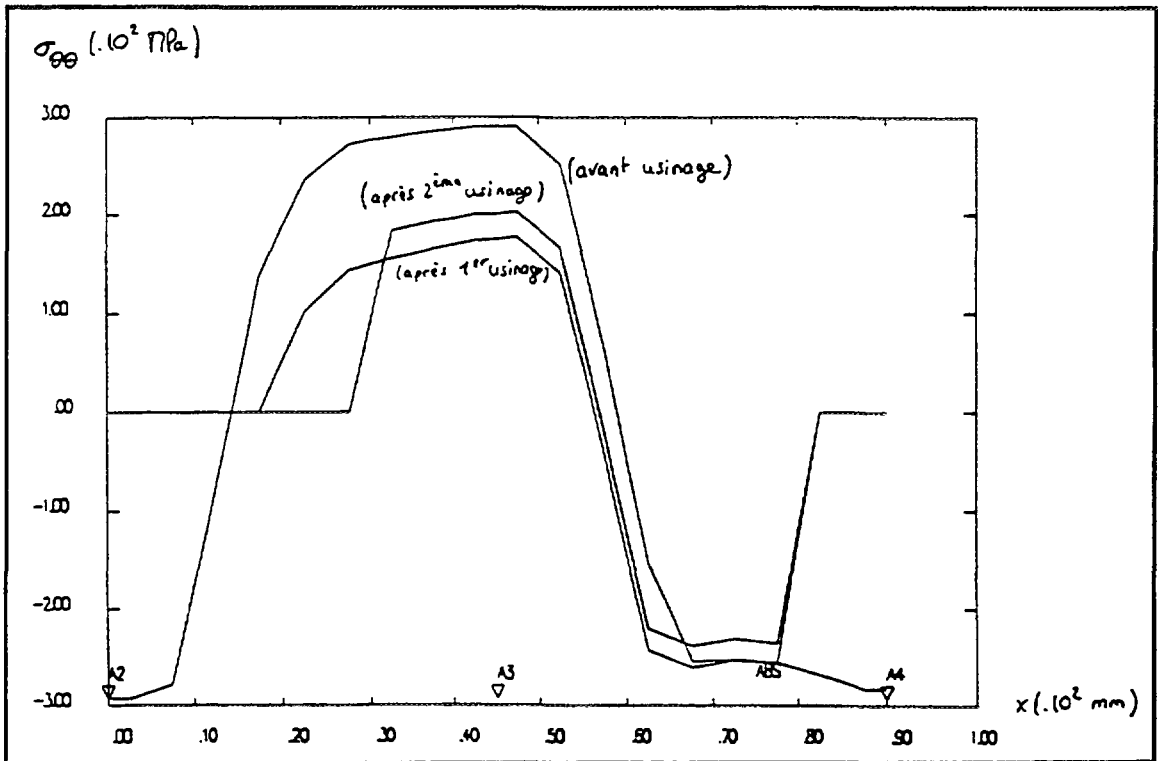


Figure 21 - Contrainte circonférentielle dans l'épaisseur après trempe, après premier usinage et après deuxième usinage. Calcul du CEA avec CASTEM 2000.

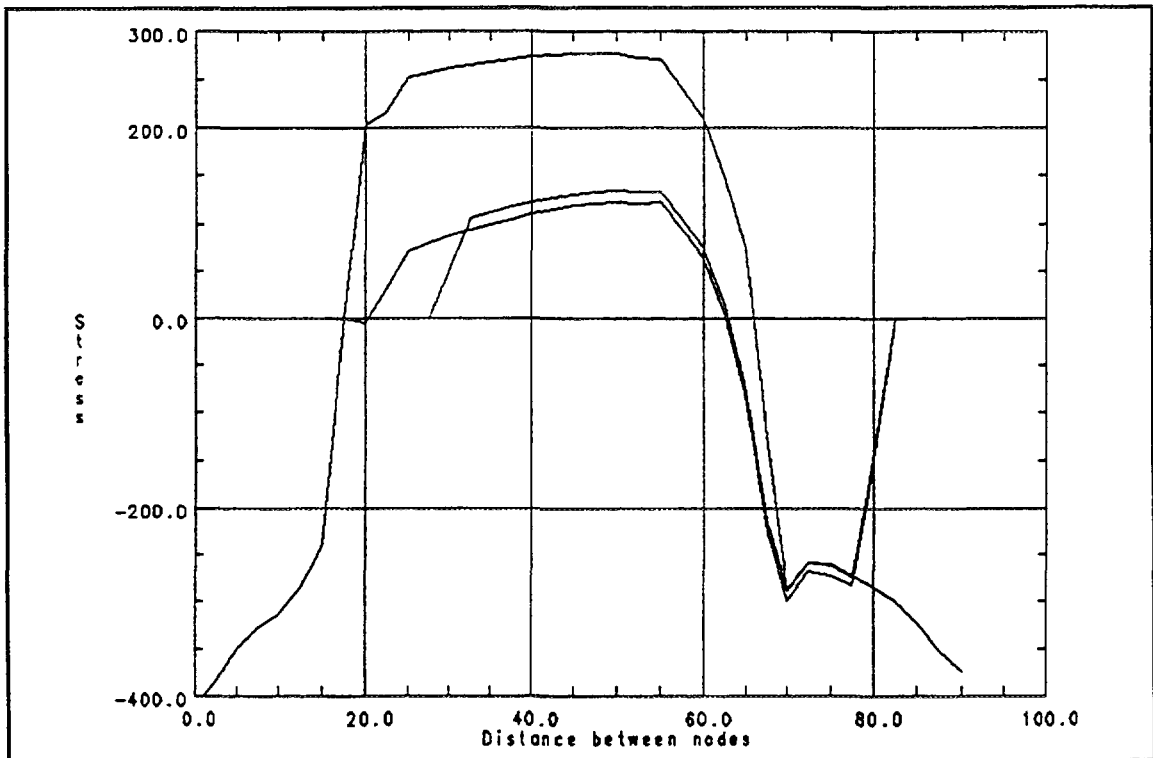


Figure 22 - Contrainte circonférentielle dans l'épaisseur après trempe, après premier usinage et après deuxième usinage. Calcul avec le Code Aster.

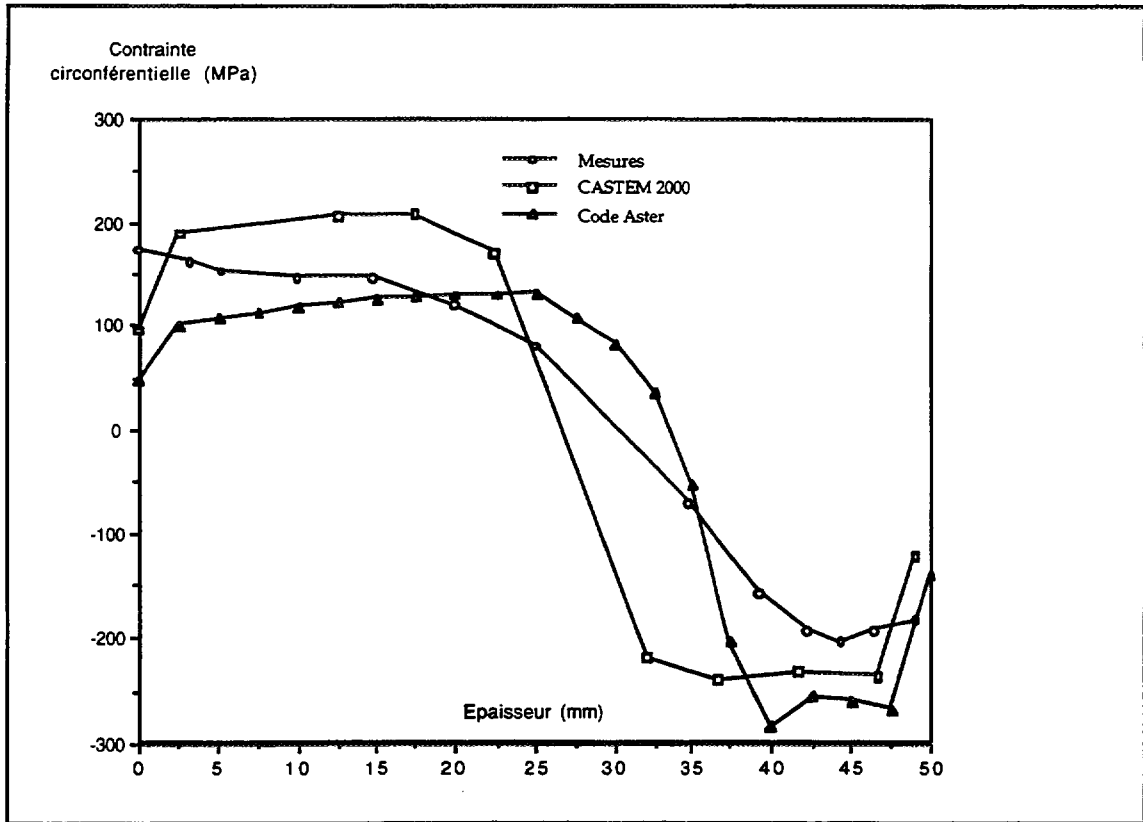


Figure 23 - Contrainte circonférentielle dans l'épaisseur. Comparaison des valeurs obtenues après mesure, calcul avec CASTEM 2000 et calcul avec le *Code Aster*.

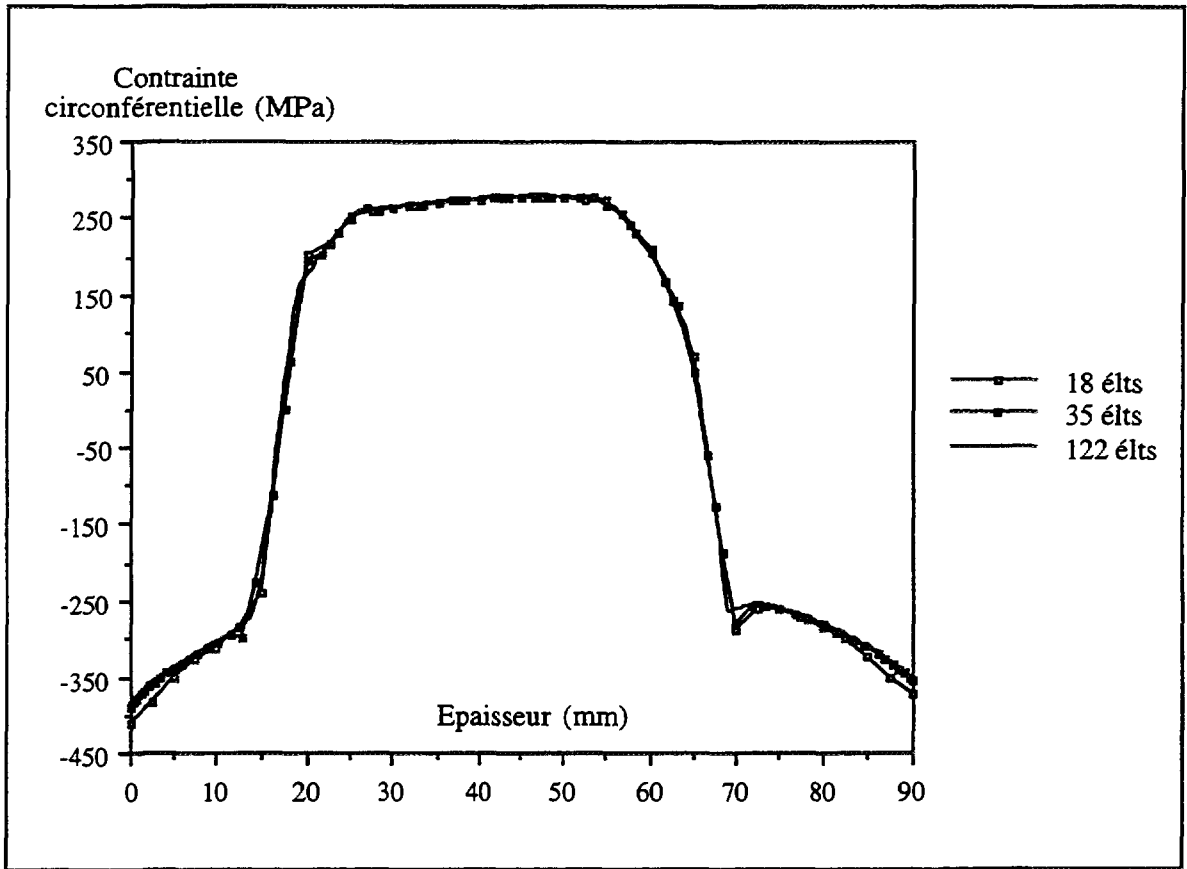


Figure 24 - Contrainte circonférentielle dans l'épaisseur. Comparaison des valeurs obtenues pour des maillages de 18, 35 et 122 éléments dans l'épaisseur.

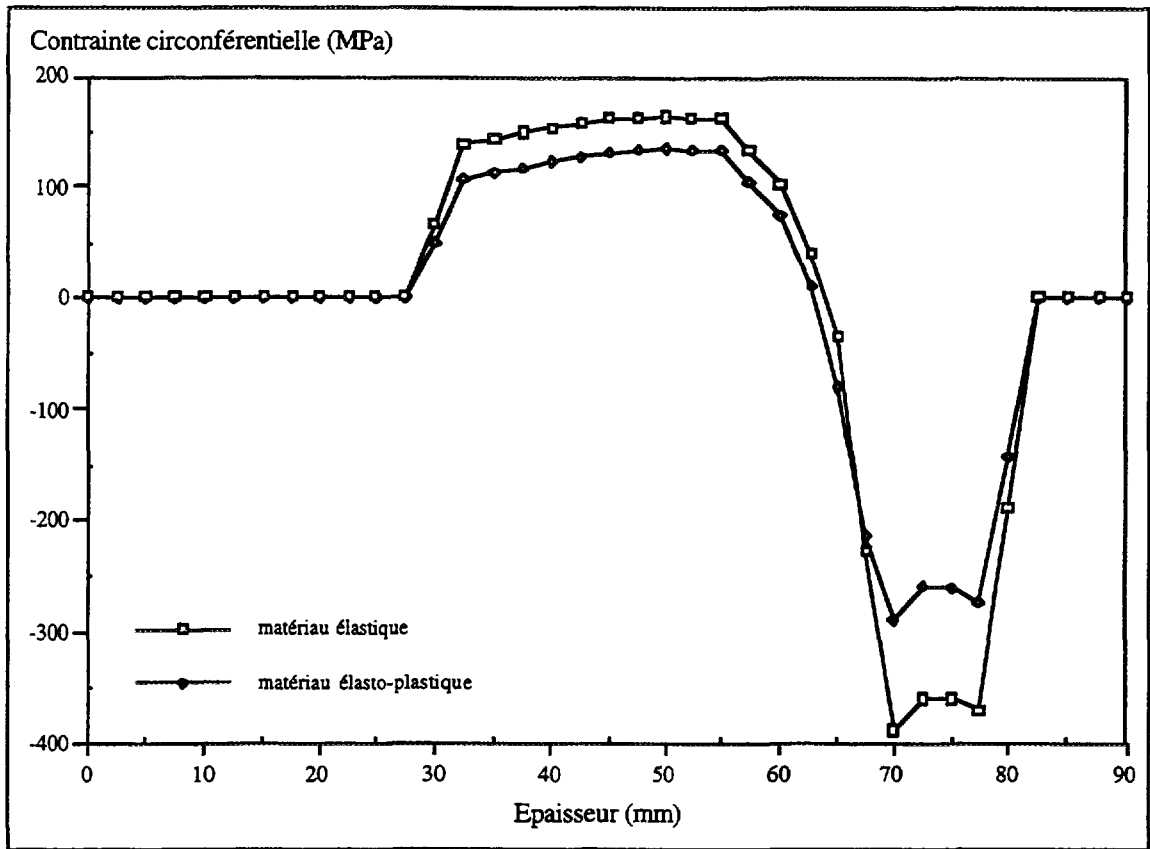


Figure 25 - Contrainte circonférentielle dans l'épaisseur. Comparaison des valeurs obtenues selon que le comportement du matériau non usiné est élastique ou élastoplastique (2ème usinage).

Contrainte circonférentielle (MPa)

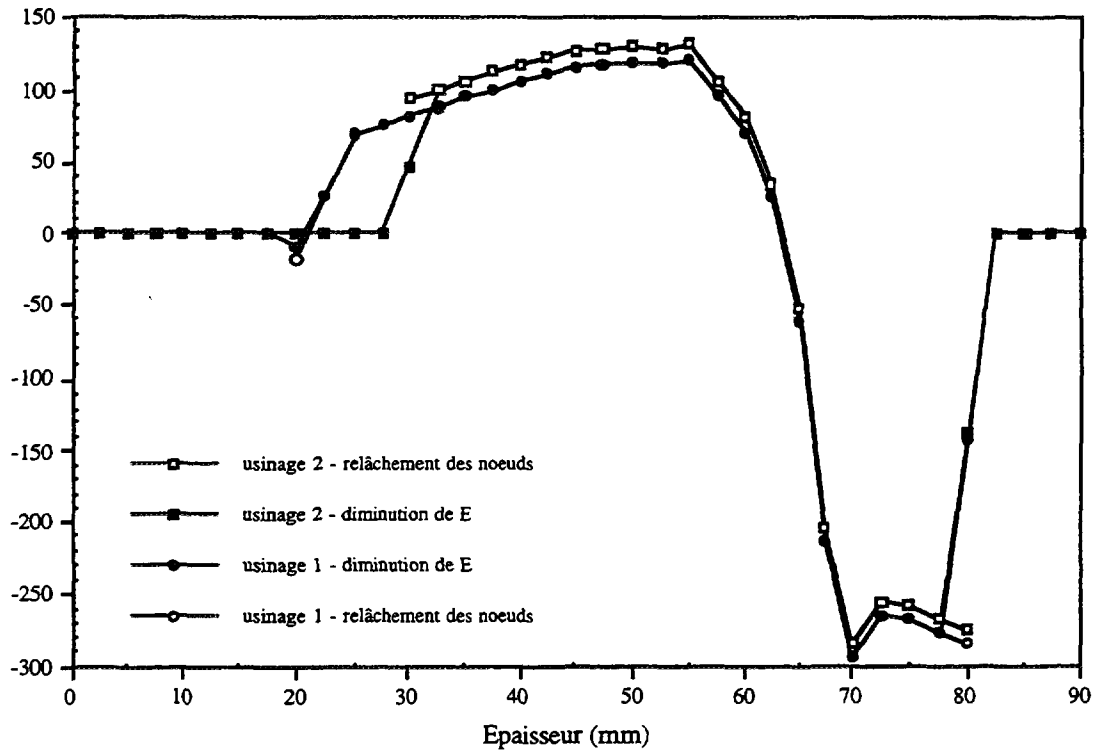


Figure 26 - Contrainte circonférentielle dans l'épaisseur. Comparaison des valeurs obtenues après chaque usinage pour 2 méthodes d'enlèvement de matière (relâchement de noeuds et baisse du module d'Young).

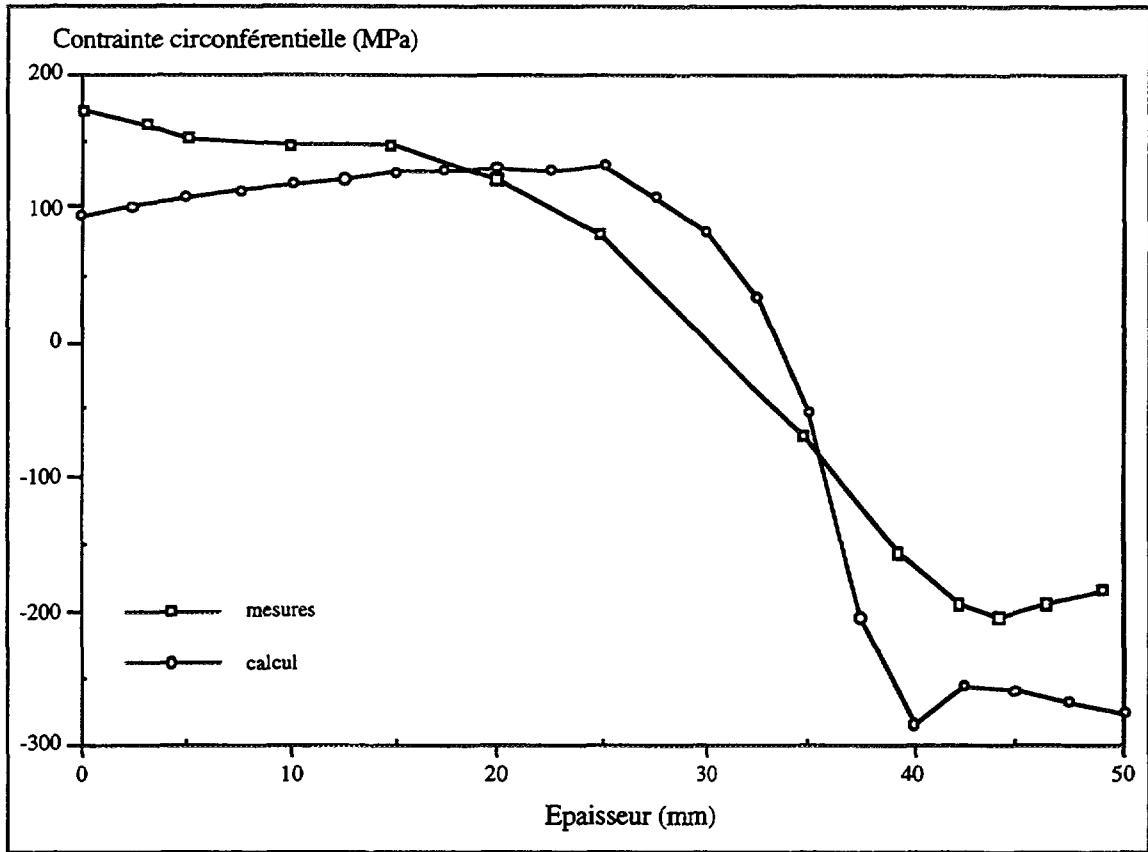


Figure 27 - Contrainte circonférentielle dans l'épaisseur. Comparaison des valeurs obtenues après le deuxième usinage expérimentalement et numériquement par relâchement de noeuds.

ANNEXE 1 : CARACTÉRISTIQUES MATÉRIAUX UTILISÉES

1 - Caractéristiques thermiques

Les valeurs proposées dans [1] sont des caractéristiques à 600°C dont l'origine n'est pas clairement précisée :

$\lambda = 23,1 \cdot 10^{-3} \text{ J/mm} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}$ (conductivité thermique).

$\rho = 7,71 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ (masse spécifique).

$c = 581,9 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ (chaleur spécifique).

2 - Caractéristiques mécaniques

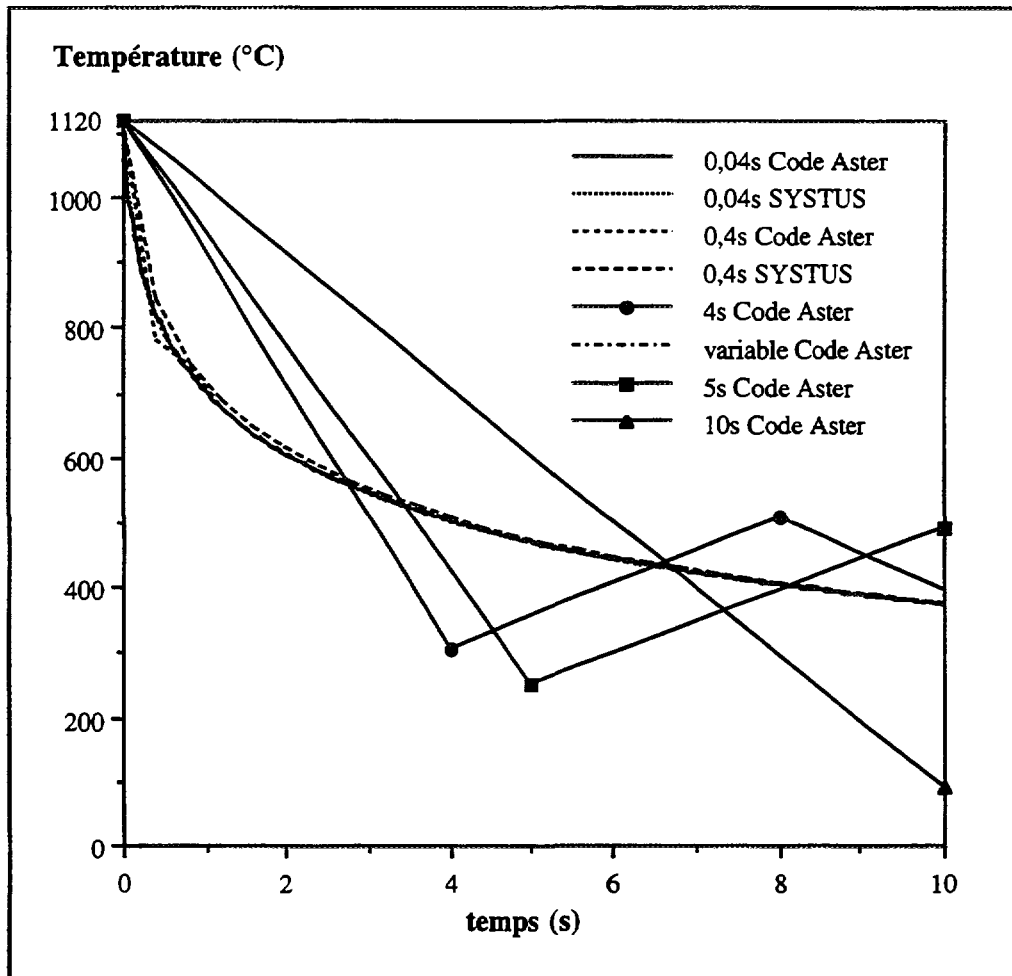
Les valeurs proposées dans [1] sont les suivantes :

Température (°C)	Coefficient de dilatation thermique [3] ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	Module d'Young [3] (MPa)	Limite d'élasticité [4] (MPa)	Module d'écrouissage [4] (MPa)
20	15,9	192000	260	6579
200	17	178000	182	4338
400	17,9	161000	150	2806
600	18,7	145000	136	2698
800	19,4	81158*	106	2100
1000	19,8	28303*	45	900
1200	20,2*	10230*	14,5	280

* : valeurs extrapolées

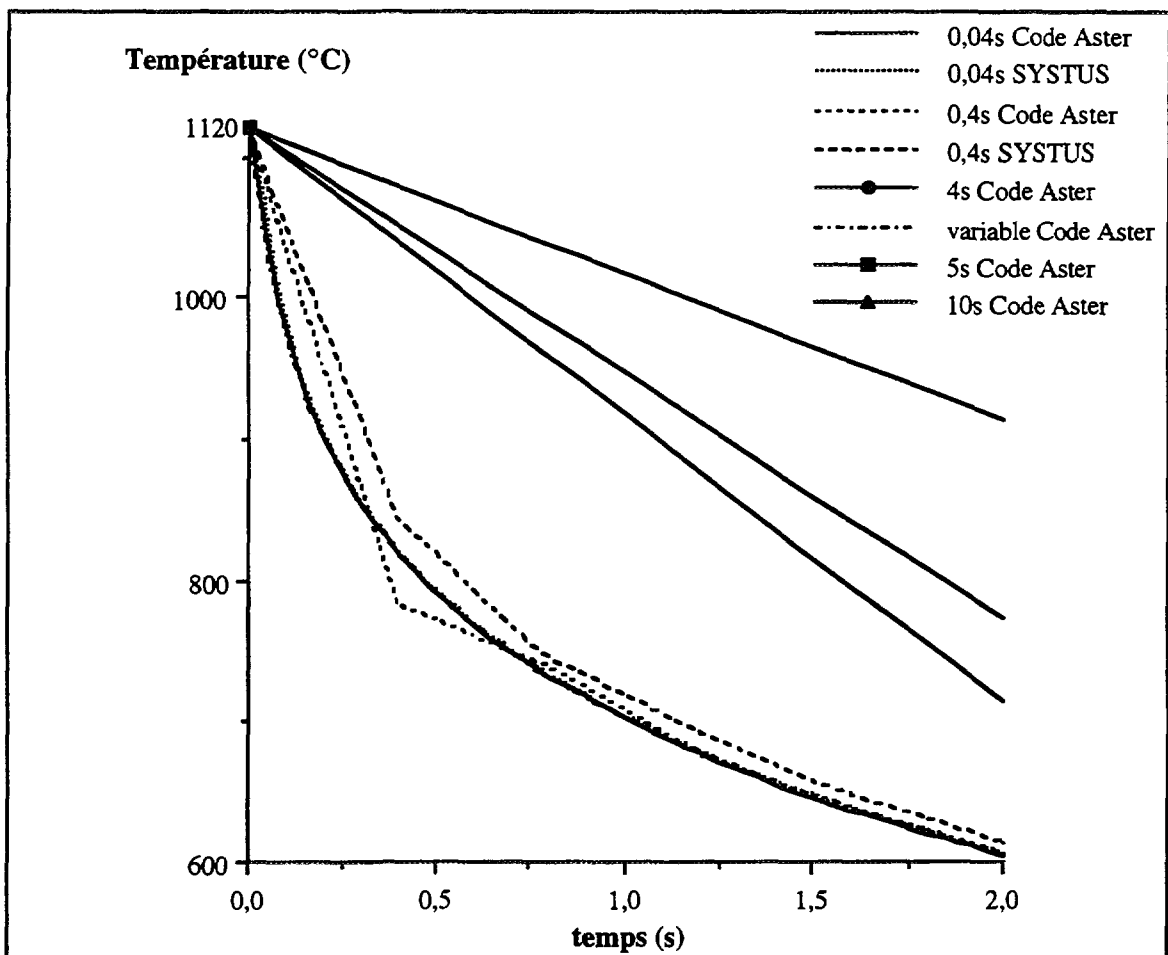
On peut remarquer que l'extrapolation du module d'Young n'est pas une extrapolation au sens mathématique, mais permet de reproduire l'évolution classique de cette grandeur en fonction de la température. On pourra se reporter à [5] pour la description de courbes de ce type.

ANNEXE 2 : INFLUENCE DU DÉCOUPAGE EN TEMPS SUR LA TEMPÉRATURE



Évolution de la température en peau interne pendant les 10 premières secondes de la trempé.

Comparaison des résultats obtenus pour différents découpages en temps avec les codes SYSTUS et *Code Aster*.



Évolution de la température en peau interne pendant les 2 premières secondes de la trempé. Comparaison des résultats obtenus pour différents découpages en temps avec les codes SYSTUS et *Code Aster*.

Code utilisé	Aster	Systus	Aster	Systus	Aster	Aster	Aster
Pas de calcul (s)	0,04	0,04	0,4	0,4	5	10	variable
T (°C) à 10 s	373,7	374	374	376	492,1	89,4	374

Valeur de la température en peau interne après 10 secondes de trempé. Comparaison des résultats obtenus pour différents découpages en temps avec les codes SYSTUS et *Code Aster*.