

Manuel d'Utilisation
Fascicule U2.03 : Thermo-mécanique
Document : U2.03.05

Notice d'utilisation pour des calculs de soudage

Résumé

L'objectif de cette note est de donner les informations nécessaires pour qu'un utilisateur puisse réaliser des calculs de soudage multipasses avec le *Code_Aster*. Elle s'appuie sur un exemple de soudage de tuyauterie en 13 passes. Les 2 premières passes de cet exemple constituent un cas-test *Aster* [V7.42.100].

Table des matières

1	Modélisation thermique du soudage	3
1.1	Généralités.....	3
1.2	Modélisation de l'apport de chaleur.....	3
1.3	Cas d'une tuyauterie soudée par le procédé TIG pulsé (fiche 3488).....	4
1.3.1	Méthodologie : choix d'une approche 2D ou 3D	4
1.3.2	Approche thermique 3D en repère mobile sur la plaque 3D développée du tube	4
1.3.3	Approche thermique 2D sur le tube.....	5
1.3.3.1	Températures imposées.....	5
1.3.3.2	Flux de chaleur	5
1.3.4	Conclusion	6
2	Modélisation du soudage dans <i>Aster</i>	7
2.1	Maillage des cordons de soudure.....	7
2.2	Calcul thermique.....	7
2.2.1	Modélisations associées aux passes	7
2.2.2	Conditions aux limites (convection et rayonnement).....	8
2.2.3	Prolongement des champs	8
2.3	Calcul mécanique	9
2.3.1	Modélisations associées aux passes	9
2.3.2	Bridage de la zone soudée	9
2.3.3	Calcul mécanique d'une passe	10
3	Conclusion	11
4	Bibliographie.....	12

1 Modélisation thermique du soudage

1.1 Généralités

La modélisation d'une opération de soudage nécessite la bonne connaissance du processus à simuler, en particulier celle des paramètres de soudage. De plus, les phénomènes à prendre en compte sont nombreux et complexes : apport du métal fondu, flux engendré par l'ensemble arc + électrode, effet du gaz protégeant le bain fondu, etc ...

La principale difficulté de la modélisation thermique du soudage est la façon dont on prend en compte l'apport de chaleur. Devant le grand nombre de données opératoires accessibles (énergie de soudage, vitesse de la source, vitesse de défilement du fil d'apport, rendement du procédé...), il faut en général adopter une méthode simplifiée. Ces méthodes seront décrites dans le § suivant. Les simulations réalisées dans le cadre d'un travail collaboratif EDF-CEA-Framatome [bib1] ont montré que les autres phénomènes en jeu (échanges thermiques, changement d'état, convection du bain fondu...) sont convenablement pris en compte par les codes de calculs par éléments finis.

Dans le cas que nous présentons dans la suite, on dispose à la fois d'une bonne connaissance des paramètres de soudage et d'éléments de recalage comme les macrographies et les cycles thermiques. Une simulation thermique correcte est donc possible. Le problème est alors de choisir une méthode qui permettra de représenter fidèlement l'apport de chaleur dû à l'ensemble Arc - Electrode - Métal d'apport.

Dans le cas où on ne dispose pas d'éléments de recalage, la simulation numérique d'une opération de soudage peut être réalisée de façon prédictive à l'aide de calculs simplifiés de type Rosenthal. Pour plus de détails, on consultera [bib1]

1.2 Modélisation de l'apport de chaleur

Deux méthodes sont possibles :

- la première consiste à imposer des cycles de température à la matière que l'on dépose. Ces températures imposées peuvent être appliquées soit sur le seul cordon déposé, soit sur l'ensemble cordon déposé plus zone fondue. Cette méthode ne s'applique facilement qu'aux problèmes bidimensionnels. Dans le cas où on impose une température dans le métal d'apport, le calcul se déroule en 3 phases :
 - 1) Température imposée dans le cordon déposé jusqu'à une température de bain fondu supérieure à la température de fusion.
 - 2) Maintien de la température constante pendant un temps caractéristique et augmentation de la conductivité thermique pour des températures supérieures à la température de fusion afin de retrouver la zone fondue.
 - 3) Refroidissement avec échange par convection et rayonnement

Le cycle thermique appliqué au métal d'apport peut être issu soit d'un calcul 3D soit en utilisant des calculs de type Rosenthal pour déterminer les temps de montée et de maintien.

- la seconde méthode, qui est celle préconisée à présent, consiste à imposer un flux de chaleur au cordon de soudure modélisé. Elle peut cette fois s'appliquer en 2D et en 3D et présente l'avantage de ne modéliser que le métal d'apport (il n'est pas nécessaire de connaître la zone fondue). Par contre, elle est difficile à caler car des choix sont à effectuer sur la répartition spatiale du flux (surfactive, volumique) et la répartition temporelle du flux.
Le calage du flux peut être maîtrisé sur la base de calculs 2D de type Rosenthal ou en utilisant les cycles thermiques expérimentaux. Afin de retrouver la zone fondue et pour tenir compte de l'homogénéisation de la température due aux mouvements du bain fondu, on augmente au-delà de la température de fusion d'un facteur 100 la conductivité thermique dans le métal déposé.

1.3 Cas d'une tuyauterie soudée par le procédé TIG pulsé (fiche 3488)

Ici on connaît a priori la forme des cordons et des zones fondues grâce aux macrographies. Il est néanmoins difficile d'utiliser la méthode no 1 (approche en température imposée) dans la mesure où le chanfrein contient 13 passes de soudures. Modéliser les zones fondues associées aux 13 cordons aurait demandé trop de travail en terme de maillage. Cette méthode n'est applicable que si le nombre de cordons reste limité ou si on considère des macro dépôts.

Les autres méthodes ont été testées mais nécessitent toutes des calages avec les résultats expérimentaux et donnent des résultats inégaux. Ainsi, l'approche en température imposée ne considérant l'apport de chaleur que dans le métal d'apport surestime les zones fondues et les cycles thermiques. Cette méthode est trop calorifique.

C'est donc l'approche en flux thermique imposé qui est retenue. L'application de la quantité de chaleur Q_r présente deux variantes : l'application d'un Q_r surfacique ou volumique. Si l'on considère un modèle axisymétrique de la tuyauterie, la quantité de chaleur Q_r est appliquée dans toutes les mailles du cordon modélisé et on représente ainsi un flux 3D. Dans le cas d'un modèle 3D, il est difficile de considérer un Q_r volumique car on ne connaît pas précisément la forme de la source de chaleur. C'est donc un Q_r surfacique sur le bord libre du cordon qu'il vaut mieux retenir. Cependant, un Q_r surfacique n'est représentatif que si les cordons déposés ne sont pas trop épais, ce qui est le cas ici.

1.3.1 Méthodologie : choix d'une approche 2D ou 3D

En toute rigueur, le procédé de soudage est strictement 3D, l'apport de chaleur et éventuellement de matière étant mobile et de vitesse constante. Les calculs numériques devraient donc en tenir compte. Toutefois, les calculs 3D étant complexes et coûteux, ils sont rarement mis en œuvre et on se limite au 2D. La modélisation 2D implique une simplification importante : on néglige l'effet de vitesse du soudage et on suppose que le cordon est déposé simultanément sur toute la longueur du chanfrein. Cependant, afin de réaliser le calage du coefficient de rendement du procédé, des calculs 3D en repère mobile ont également été conduits pour 2 passes du chanfrein : la passe de racine et une passe courante (la passe 13).

Le calage de la passe 13 a ensuite été appliqué à toutes les autres passes courantes.

La méthodologie retenue pour la simulation thermique du procédé TIG pulsé est donc la suivante :

- calage du coefficient de rendement du procédé pour les passes 1 à 13 grâce à des calculs 3D en repère mobile sur les passes 1 et 13,
- transposition au modèle 2D en conservant le coefficient de rendement et en appliquant une quantité de chaleur aux mailles du cordon modélisé. La répartition temporelle de ce flux est calée sur les résultats des calculs 3D,
- validation de cette approche à la simulation thermique des passes 2 à 13.

1.3.2 Approche thermique 3D en repère mobile sur la plaque 3D développée du tube

Le calage de la méthode se fait sur la forme transversale de la zone fondue en ajustant le coefficient de rendement du processus. Plusieurs calculs itératifs permettent d'avoir une zone fondue acceptable. Pour la passe de racine, le coefficient de rendement vaut alors 0.65.

La quantité de chaleur appliquée vaut $Q_r = \eta \frac{UI}{S}$ avec :

- U, la tension de soudage prise égale à 11V,
- I, l'intensité de soudage prise égale à 200A,
- S, la surface de la source qui vaut ηR^2 avec R=5mm.

$$\eta = 0.65$$

$$\text{donc } Q_r = 18.21 \text{ W / mm}^2$$

Pour la passe 13, on considère une source de chaleur circulaire de rayon $R=3.5\text{mm}$, donc inférieur à celui de la passe de racine. A la suite du calage, le coefficient de rendement vaut 0.55 et.

$$Q_r = 32.87 \text{ W / mm}^2$$

1.3.3 Approche thermique 2D sur le tube

L'approche 2D axisymétrique est facile à mettre en œuvre mais présente l'inconvénient de ne pas prendre en compte l'effet de vitesse et de considérer que chaque cordon est déposé « d'un seul coup ». Des comparaisons entre approches 2D et 3D [bib3] ont néanmoins montré la bonne représentativité de l'approche 2D.

1.3.3.1 Températures imposées

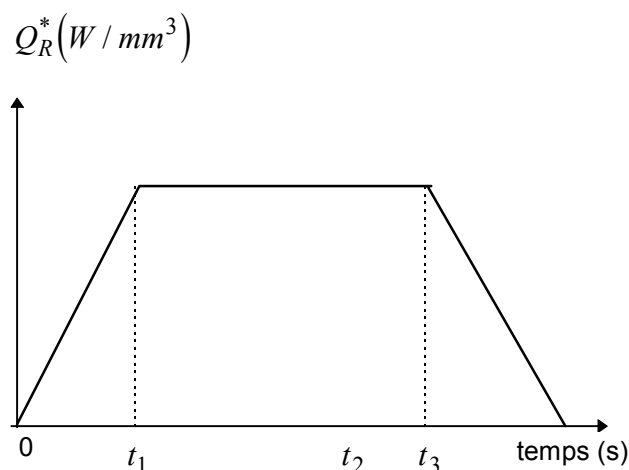
Cette méthode est la première méthode décrite en [§2.2]. L'apport de chaleur est modélisé par un cycle thermique issu du calcul en repère mobile. Ce cycle est appliqué aux noeuds du métal déposé. On constate que les calculs 2D surestiment la zone fondue et les maxima des cycles thermiques. L'approche en températures imposées est donc trop énergétique.

1.3.3.2 Flux de chaleur

Cette méthode est la deuxième méthode décrite en [§2.2] et est celle préconisée à présent. L'application du flux de chaleur Q_r est réalisée sur les mailles du cordon déposé. Ce flux de chaleur est volumique, c.a.d. par unité de longueur circonférentielle (J/mm3). Le flux est donné par :

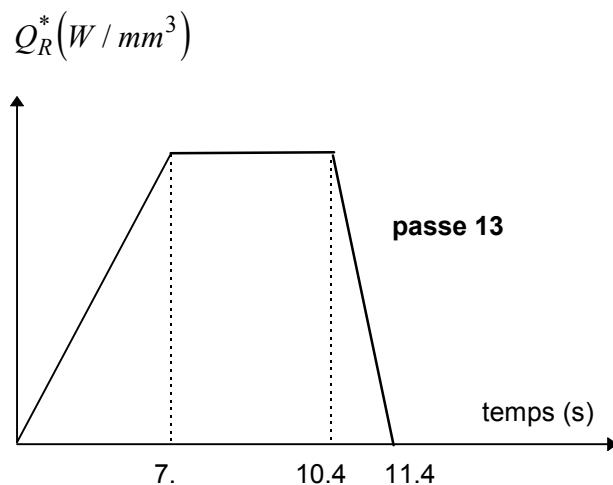
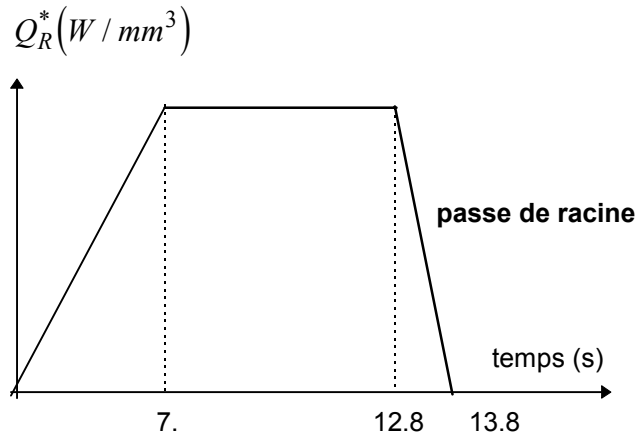
$$Q_r = \eta \frac{UI}{Sv} \text{ avec } v : \text{vitesse de la source.}$$

Le calcul 2D faisant abstraction de la vitesse de la source, il faut distribuer ce flux de chaleur en fonction du temps : un temps de montée, de maintien et de descente.



$$Q_r = Q_r^* \times \frac{1}{2} (t_3 + t_2 - t_1)$$

Il faut déterminer les instants t_1 , t_2 et t_3 pour retrouver les zones fondues et les cycles thermiques. Plusieurs distributions correspondant à des temps de montée et de descente plus ou moins longs ont été comparées. Ce sont finalement les distributions suivantes qui ont été retenues [bib3] :



1.3.4 Conclusion

Dans le cadre de la simulation thermique du soudage par le procédé TIG pulsé d'une tuyauterie en acier inoxydable 316L, l'histoire thermique du procédé peut être représentée par un modèle 2D axisymétrique, même si le recalage est meilleur en considérant une approche 3D en repère mobile qui tient compte de l'effet de vitesse de la source de chaleur. La méthodologie retenue en 2D est une approche en flux de chaleur qui nécessite de caler le coefficient de rendement du procédé ainsi que la distribution temporelle de ce flux. Il faut également connaître soit les formes des zones fondues, soit les cycles thermiques du procédé étudié afin de permettre ce calage. Elle permet de ne pas modéliser les zones fondues, ce qui est un avantage important dans le cas d'un grand nombre de passes.

Les principales caractéristiques de la simulation sont les suivantes :

- flux de chaleur appliqué dans le métal déposé en fonction du temps (montée en 7s, temps de maintien de 5.8s pour la passe de racine et de 3.4s pour une passe courante et descente en 1s),
- le coefficient de rendement du procédé est fixé à $\eta = 0.65$ pour la passe de racine et à $\eta = 0.55$ pour les passes courantes,
- la conductivité du métal déposé est augmentée entre 1500°C et 1700°C d'un facteur 100 afin de prendre en compte une homogénéisation des températures dans le bain fondu,
- on prend en compte la chaleur de fusion-solidification,
- les caractéristiques thermiques varient avec la température.

2 Modélisation du soudage dans Aster

2.1 Maillage des cordons de soudure

Les cordons de soudure peuvent être maillés de façon plus ou moins complexe.

Il y a 3 choix possibles, en allant du plus compliqué vers le plus simple :

- on peut choisir de respecter à la fois le volume et la forme de la passe. La forme des cordons étant courbe, on devra mailler des surfaces à bords courbes, donc utiliser des éléments finis au moins de degré 2,
- on respecte seulement le volume de la passe, les cordons étant de forme triangulaire ou quadrangulaire. Dans ce cas, on peut utiliser des éléments linéaires,
- les cordons de soudure sont quadrangulaires, en essayant de respecter au mieux le volume de chaque passe.

Des comparaisons ont été faites dans le cas de la maquette tubulaire. Il s'avère que les résultats des calculs mécaniques diffèrent très peu d'un maillage à l'autre. Néanmoins, la comparaison avec le maillage plus grossier est délicate, la thermique étant différente.

On peut cependant noter que, à thermique équivalente, le maillage courbe n'apporte rien de significatif au niveau des résultats par rapport au maillage polygonal.

2.2 Calcul thermique

2.2.1 Modélisations associées aux passes

Pour simuler le soudage multipasses, on effectue un calcul thermique non linéaire transitoire, passe par passe, en ajoutant à chaque passe dans le modèle thermique correspondant les éléments finis modélisant le cordon de soudure déposé au cours de la passe. Ainsi, chaque passe i dispose d'un modèle thermique comprenant les cordons de soudure de numéros 1 à i . On a donc des modèles thermiques emboîtés au sens suivant :

si $moth_i$ désigne le modèle thermique de la passe i
et $moth_j$ désigne le modèle thermique de la passe j
alors $moth_i \subset moth_j$ si $i < j$.

Ceci pose un problème lors de l'enchaînement des calculs thermiques, les champs de température du modèle $moth_i$ n'étant pas définis en tous les noeuds du modèle correspondant à la passe suivante $i+1$. Il faut donc effectuer un prolongement des champs calculés d'un modèle à l'autre. (voir [§3.2.3]).

Remarque :

Une autre solution consiste à ne considérer qu'un seul modèle contenant toutes les passes et à « désactiver » artificiellement les cordons non encore déposés en leur imposant une conductivité thermique nulle. Cet artifice peut provoquer des légères oscillations numériques de la température dues à la discontinuité de la conductivité aux interfaces entre les cordons. C'est néanmoins cette méthode qui est utilisée dans le cast-test [V7.42.100]. Elle permet d'économiser l'étape de prolongement des champs [§2.2.3].

2.2.2 Conditions aux limites (convection et rayonnement)

Pour la modélisation de l'échange convectif et radiatif, on a choisi de faire figurer :

- pendant la montée et le maintien du Q_r : échange convectif et radiatif sur toutes les frontières sauf celle du cordon de la passe courante,
- pendant le refroidissement : mêmes conditions aux limites avec en plus la frontière du cordon de la passe courante (pour prendre en compte le cordon de soudure venant d'être déposé).

Les figures de conditions aux limites (mailles de bord support des conditions aux limites) sont à réactualiser à chaque passe au niveau du chanfrein, les cordons s'empilant les uns sur les autres. Il est nécessaire d'avoir prévu cette opération dès le départ, au moment du maillage, c'est-à-dire avoir créé autant de figures qu'il y a de passes.

2.2.3 Prolongement des champs

Le prolongement des champs de température (et éventuellement de métallurgie) est nécessaire à la fin de chaque passe afin que ceux-ci soient définis sur le modèle de la passe suivante. On procède en 4 étapes :

- on commence par créer un champ de température à l'ambiante (T20) sur tout le maillage par la commande CREA_CHAMP (opération 'AFFE'),
- on étend le premier champ de température calculé à la passe i (numéro d'ordre 1) en complétant par T20 sur les nouvelles mailles (CREA_CHAMP opérations 'EXTR' puis 'ASSE'),
- on stocke ce champ dans une nouvelle structure de données de type evol_ther par la commande CREA_RESU,
- on fait une boucle sur les numéros d'ordre restants et on répète les opérations 2 et 3 pour chaque numéro d'ordre en enrichissant la structure de données créée en 3 (mot-clé reuse de CREA_RESU).

Exemple :

```
#EVOTH1 : EVOL_THER SUR MODELE MOTH1 EST CONNU
#ON VEUT CALCULER EVOTH2 SUR UN MODELE MOTH2 "PLUS GROS" QUE MOTH1.
#LES 2 MODELES S'APPUIENT SUR LE MEME MAILLAGE MAIL
# EXTENSION DES CHAMPS DE TEMPERATURE PAR 20 DEGRES C :
T20=CREA_CHAMP( OPERATION='AFFE', TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
  MAILLAGE=MAIL, AFFE=_F( TOUT='OUI', NOM_CMP = ('TEMP',),
    VALE = (20.,) ) )
# EXTENSION DU CHAMP TCH1 EN TCH2 SUR LE PREMIER NUMERO D'ORDRE :
TCH1=CREA_CHAMP(OPERATION='EXTR',TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
  RESULTAT=EVOTH1, NOM_CHAM='TEMP', NUME_ORDRE=0,)
TCH2=CREA_CHAMP(OPERATION='ASSE',TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
  MAILLAGE=MAIL, ASSE=( _F( TOUT = 'OUI', CHAM_GD = T20),
    _F( TOUT = 'OUI', CHAM_GD = TCH1),))
EVOTH12 = CREA_RESU(TYPE_RESU='EVOL_THER', NOM_CHAM='TEMP',
  AFFE=( _F(CHAM_GD=TCH2, LIST_INST= LPAS,
    NUME_INIT=0, NUME_FIN=0,)),)
DETRUIRE(CONCEPT=_F(NOM=('TCH1', 'TCH2'),),);
# EXTENSION DES CHAMPS TCH1 EN TCH2 SUR LES AUTRES NUMEROS D'ORDRE :
for i in range(325) :
  iordr=i+1 ;
  TCH1=CREA_CHAMP(OPERATION='EXTR',TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
    RESULTAT=EVOTH1, NOM_CHAM='TEMP', NUME_ORDRE=iordr,)
  TCH2=CREA_CHAMP(OPERATION='ASSE',TYPE_CHAM='NOEU_TEMP_R',
    MAILLAGE=MAIL, ASSE=( _F( TOUT = 'OUI', CHAM_GD = T20),
      _F( TOUT = 'OUI', CHAM_GD = TCH1), ))
  EVOTH12=CREA_RESU(reuse=EVOTH12,TYPE_RESU='EVOL_THER',
    ,NOM_CHAM='TEMP',
    AFFE=( _F(CHAM_GD=TCH2,LIST_INST=LPAS,NUME_INIT=iordr,
      NUME_FIN=iordr,)),)
  DETRUIRE(CONCEPT=_F(NOM=('TCH1', 'TCH2', ),),);
```


Pour les champs de métallurgie, l'enchaînement des commandes est le même mais les types de champ sont différents.

```
# MEME TRAITEMENT POUR LES CHAMPS DE METALLURGIE
MOTH13 = AFPE_MODELE ( MAILLAGE = MAIL, AFPE= F( GROUP_MA = ('PASSE13',),
    PHENOMENE = 'THERMIQUE', MODELISATION = 'AXIS',))
MINIT=CREA_CHAMP(OPERATION='AFPE',TYPE_CHAM='CART_NEUT_R',
    MODELE=MOTH13, AFPE= F( TOUT='OUI',
NOM_CMP = ('X1','X2','X3','X4','X5',), VALE = (1.,0.,0.,0.,10.,)) )
# EXTENSION DES CHAMPS MCH1 EN MCH2 SUR LES AUTRES NUMEROS D'ORDRE :
for iordr in range(325) :
    MCH1=CREA_CHAMP(OPERATION='EXTR',TYPE_CHAM='ELGA_VARI_R',
        RESULTAT=EVOTH1,NOM_CHAM='META_ELGA_TEMP',NUME_ORDRE=iordr,)
    MCH2=CREA_CHAMP(OPERATION='ASSE',TYPE_CHAM='ELGA_VARI_R',
        MODELE=MOTH13, PROL_ZERO='OUI',
    ASSE=( F(TOUT='OUI', NOM_CMP=('X1','X2','X3','X4','X5',),
        NOM_CMP_RESU=('V1','V2','V3','V4','V5',)CHAM_GD=MINIT,))
        F(TOUT='OUI', CHAM_GD=MCH1,))
    EVOTH12=CREA_RESU(reuse=EVOTH12,TYPE_RESU='EVOL_THER',
        NOM_CHAM='META_ELGA_TEMP',
    AFPE=( F(CHAM_GD=MCH2, LIST_INST= LPAS,
        NUME_INIT=iordr, NUME_FIN=iordr,))
    DETRUIRE(CONCEPT= F(NOM=('MCH1', 'MCH2', ),),),);
```

2.3 Calcul mécanique

2.3.1 Modélisations associées aux passes

Contrairement aux calculs thermiques, il est conseillé d'utiliser le même modèle mécanique pour toutes les passes. Ce modèle comprendra tous les cordons, les cordons non déposés étant désactivés artificiellement en leur affectant un module d'Young très faible ($E=10^{-11}$ E réel en pratique). L'intérêt d'une telle technique est que les cordons mous se déforment avec le chanfrein, permettant de reprendre la passe suivante sur la géométrie déformée sans avoir de remaillage à faire. Il faut néanmoins veiller à ce que les cordons non activés conservent une forme réaliste au cours des calculs. Si ce n'est pas le cas, il faut les remailler.

Pour le cordon déposé, les caractéristiques mécaniques réelles lui sont imposées lorsque celui-ci a atteint la température de fusion. Ainsi, dans la phase de chauffage, le cordon est encore fictif. Cette technique est préférable à celle consistant à doubler tous les noeuds des interfaces des cordons et imposer des liaisons en incrément de déplacement entre ddl. En effet, cette dernière technique, même si elle reproduit assez fidèlement la réalité, a pour inconvénient d'entraîner des déformées fantaisistes, les cordons n'étant pas attachés à la structure au début de chaque passe. De plus, la mise en données des liaisons est lourde et leur prise en compte coûteuse en temps CPU.

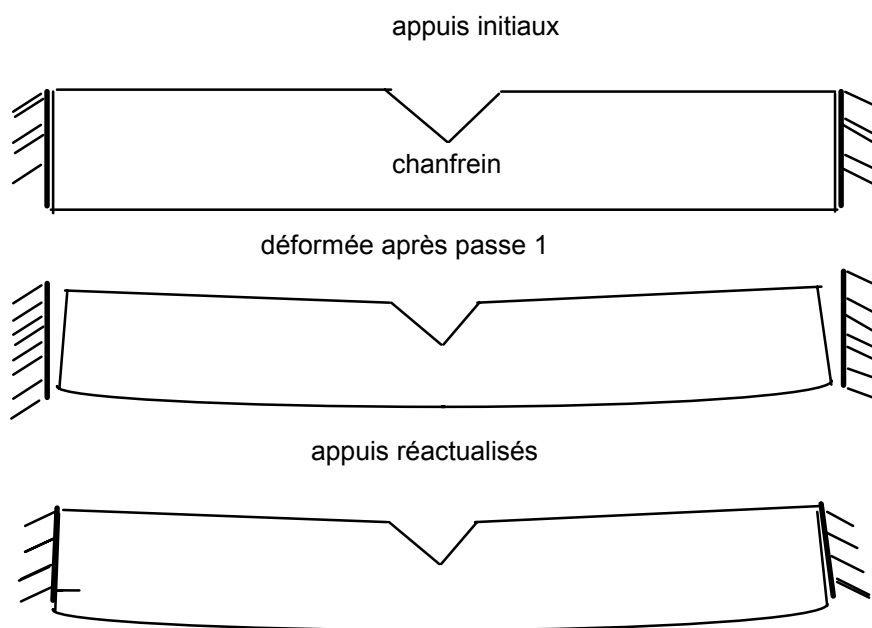
2.3.2 Bridage de la zone soudée

La modélisation axisymétrique du soudage sur un tube suppose implicitement à tort que le soudage a lieu simultanément sur toute la circonférence du tube, donc que la température s'élève partout dans le chanfrein. Dans la réalité, la source de chaleur progresse vers une partie de structure restée froide, qui bride obligatoirement la zone soudée. La pièce, au niveau de la source de chaleur, ne peut donc se dilater librement. Cet effet d'autobridage doit s'estomper quand la chaleur diffuse et disparaître au cours de la phase de refroidissement.

Pour remédier à ce problème, on peut imposer un bridage axial au tube, uniquement dans la phase de chauffage. On empêche ainsi le tube de se dilater librement au chauffage, par contre il est libre de se déformer au refroidissement.

La mise en œuvre dans Aster se fait de la façon suivante :

- on modélise les appuis par des éléments de bord (segments) dont on bloque les déplacements. Ces éléments ont des noeuds confondus géométriquement avec les noeuds en vis-à-vis de la frontière du tube,
- on met en contact les appuis et les éléments de bord de la frontière (mot-clé `CONTACT` de `AFFE_CHAR_MECA`),
- à la fin de chaque passe, lorsqu'on réactualise la géométrie, c'est-à-dire qu'on remplace la géométrie initiale par la géométrie déformée, il faut également réactualiser ces appuis fictifs en les repositionnant sur la frontière déformée, comme le montrent les 3 schémas ci-dessous :



2.3.3 Calcul mécanique d'une passe

Le modèle mécanique utilisé est celui qui peut prendre en compte les effets des transformations métallurgiques. La loi de comportement utilisée est élasto-visco-plastique. Le modèle est isotrope avec une fonction seuil de type VON MISES et un écrouissage isotrope non linéaire avec restauration visqueuse de l'écrouissage. On ne tient pas compte des phénomènes de plasticité de transformation et de restauration d'écrouissage métallurgique (**loi de comportement META_VNL** dans Aster). L'effet de l'écrouissage cinématique n'a pas été regardé mais il peut être pris en compte.

Les incréments de déformations utilisés pour la relation de comportement incrémentale sont les déformations linéarisées de l'incrément de déplacement dans la géométrie réactualisée (grands déplacements, petites déformations). C'est l'**option PETIT_REAC** de `STAT_NON_LINE` (les grandes déformations sont possibles mais ne sont généralement pas nécessaires)

La convergence de la méthode de Newton est difficile au début du refroidissement et il est nécessaire d'utiliser l'algorithme de recherche linéaire pour améliorer la convergence. (mot-clé `RECH_LINEAIRE` de `STAT_NON_LINE` en utilisant les valeurs par défaut).

A la fin de chaque passe, on réactualise le maillage, c'est-à-dire qu'on remplace le maillage initial par la géométrie déformée. (opérateur `MODI_MAILLAGE` mot-clé facteur `DEFORME`) et on réactualise les appuis.

Le traitement de l'incompressibilité plastique pose problème en générant des oscillations de contraintes importantes, en particulier de la trace. L'utilisation d'éléments sous-intégrés QUAD8 n'a pas permis de résoudre le problème car les maillages comportent beaucoup d'éléments TRIA6 dans les zones plastifiées pour lesquels on n'avait pas de version sous intégré. On préconise d'utiliser les nouveaux éléments incompressibles (modélisations `PLAN_INCO`, `AXIS_INCO` et `3D_INCO`), qui ont donné des résultats prometteurs sur ce plan. Ces éléments seront disponibles dans la version 6.3 d'Aster.

3 Conclusion

La simulation numérique d'un essai de soudage sur tube en 13 passes a permis de dégager une méthodologie de calcul dont les points principaux peuvent être résumés ainsi :

- **maillage** : chaque cordon doit être maillé par un groupe de mailles. Il n'est pas nécessaire d'avoir une représentation très précise de la forme des cordons. Par contre, le respect du volume et de la position du cordon dans le chanfrein est important.
- **thermique** : la modélisation de l'apport de chaleur est le point essentiel. La méthode préconisée consiste à imposer un flux de chaleur aux mailles des cordons déposés. Ce flux est constant en espace et fonction du temps. Pour déterminer la dépendance temporelle, il faut procéder à un recalage thermique à partir de données expérimentales (évolutions de température, zones fondues) ou à défaut de données sur le procédé de soudage et de calculs simplifiés.
le recalage thermique a un effet important sur les résultats mécaniques finaux, les déformations et les contraintes résiduelles étant sensibles autant à la valeur qu'à la répartition de la source de chaleur.
- **mécanique** : dans le cas d'un nombre élevé de passes, les déplacements cumulés dans le chanfrein sont importants et il est préférable de faire un calcul en grands déplacements avec réactualisation du maillage à la fin de chaque passe. L'hypothèse des grandes déformations n'est par contre pas nécessaire.
dans le cas d'un tube, la modélisation axisymétrique du soudage nécessite la prise en compte de conditions aux limites particulières, plus précisément le bridage axial de la zone soudée pour prendre en compte le fait que la torche progresse vers une partie de structure restée froide. Ce bridage est indispensable pour obtenir des valeurs correctes du rétrécissement du chanfrein.
- **modélisation Aster** : on préconise de construire des modèles thermiques emboîtés ne contenant que les cordons effectivement déposés et de prolonger les champs calculés d'un modèle à l'autre. Par contre, il est préférable d'avoir un seul modèle mécanique comportant la totalité des cordons dès le départ, les cordons étant désactivés artificiellement en leur affectant un module d'Young quasi-nul. De cette façon, on évite d'avoir à remailler les cordons de soudure au fur et à mesure que le chanfrein se déforme.

4 Bibliographie

- [1] F. WAECKEL : Synthèse des modélisations thermiques d'une opération de soudage réalisées dans la fiche coopérative 3449. Note EDF DER HI-74/95/028/0
- [2] F. WAECKEL, L. BIRONNEAU : Simulations mécaniques d'une opération de soudage multipasses sur plaque autobridée. Note EDF DER HI-74/96/006/0
- [3] C. BOIS : Simulation thermique du soudage multipasses par procédé TIG pulsé d'une tuyauterie en acier inoxydable. Note FRAMATOME EER DC 1509
- [4] J. DEVAUX : Fiche tripartite 3488. Simulation numérique du soudage. Calculs thermo-mécaniques des passes 1 à 5. Note FRAMATOME LL/99.4564
- [5] X. DESROCHES : Simulation numérique d'un essai de soudage sur tube en 13 passes. Note EDF DER HI-75/00/016/A
- [6] X. DESROCHES, A. RAZAKANAIVO, C. BOIS, Ph. GILLES, J. KICHENIN, Y. LEJAIL : Synthèse de la FC3488 : « Simulation du soudage multipasses : validation expérimentale ». Note Technique CEA DER/SERI/LCS/01/4027