Notice d'utilisation pour la simulation numérique du soudage

Résumé

L'objectif de ce document est de donner les informations nécessaires pour qu'un utilisateur puisse réaliser des calculs de soudage multipasses avec *Code_Aster*. Il constitue un guide méthodologique sur les outils disponibles et les bonnes pratiques à mettre en place pour conduire une étude de qualité en simulation numérique du soudage.
Les différents conseils donnés à l'utilisateur proviennent essentiellement du retour d'expérience issu de trois études :

- Une tuyauterie en 316L chanfreinée soudée par le procédé TIG, avec du métal d'apport en treize passes (fiche CEA/EDF 3488) ; les 2 premières passes de cet exemple constituent un cas-test *Code_Aster* [V7.42.100]) ;
- Une plaque chanfreinée en 316L soudée par le procédé TIG, avec du métal d'apport en deux passes de soudage (fiche CEA/EDF 2425) ; les différents fichiers de commande rattachés à cette étude sont stockés dans la base d'études de *Code_Aster* (SERVICE/BDD Etudes) ;
- Une plaque en 316L non chanfreinée, avec création d'un ligne de fusion par le procédé TIG, mais sans métal d'apport (thèse INSA de Lyon de L. Depradeux soutenue en 2004).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Table des matières

1 Références (IMPORTANT)....4
2 Généralités sur le soudage....6
2.1 Qu'est- ce le soudage ?....6
2.2 Phénomène mis en jeu lors du soudage....6
2.3 Revue des différentes interactions....6
2.3.1 Interaction Thermique - Métallurgique....6
2.3.2 Interaction Thermique - Mécanique....6
2.3.3 Interaction Métallurgique - Mécanique....7
2.4 Qu'entend-on par zone fondue, ZAT, zone revenue ?....7
2.5 Pourquoi est-il important de simuler le procédé de soudage ?....7
3 La simulation numérique du soudage....8
3.1 Représentation visuelle d'une opération de soudage....8
3.2 Que cherche t-on à calculer ?....9
3.3 Quelles sont les principales difficultés de la simulation ?....9
3.4 Les spécificités de Code_Aster....9
3.4.1 Quels sont les couplages considérés ?....9
3.4.2 Schéma type d'un fichier de commande Code_Aster....10
3.4.3 Restrictions de Code_Aster [5]....10
4 Méthodologie pour la simulation....12
4.1 Type de modélisation : 2D ou 3D ?....12
4.2 Le maillage....13
4.3 Calcul thermique....15
4.3.1 Introduction....15
4.3.2 Gestion de l'ajout de matière (les cordons de soudure)....15
4.3.3 Modélisation de la source de chaleur....16
4.3.4 Conditions aux limites thermiques avec l'environnement....19
4.3.5 Caractéristiques thermophysiques....20
4.4 Calcul métallurgique....21
4.4.1 Introduction....21
4.4.2 Modèles de comportement au chauffage et au refroidissement....21
4.4.3 Interaction thermique => Métallurgique....21
4.5 Calcul mécanique....22
4.5.1 Principe du calcul mécanique....22
4.5.2 Gestion de l'ajout de matière (les cordons de soudure)....22
4.5.3 Loi de comportement....22
4.5.4 Remarque sur les grandes déformations....23
4.5.5 Conditions aux limites....23

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4.6 Temps de calcul.....23

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Références (IMPORTANT)

Dans cette partie, nous donnons les références citées dans ce document mais également d'autres références qui pourraient servir l'ingénieur lors d'une simulation numérique du soudage.

Références citées

[1] C. BOIS : Simulation thermique du soudage multipasses par procédé TIG pulsé d'une tuyauterie en acier inoxydable. Note FRAMATOME EER DC 1509

[2] X. DESROCHES : Simulation numérique d'un essai de soudage sur tube en 13 passes. Note EDF DER HI-75/00/016/A

[3] L. DEPRADEUX : Simulation numérique du soudage, Acier 316L, Validation sur cas tests de complexité croissante, Thèse INSA, Note INSA n°201/1AB/010, 11/03/04.

[4] V. CANO : « Simulation numérique d'une opération de soudage TIG sur une plaque chanfreinée en matériau 316L en deux passes (Maquette 2425) » ; Note interne EDF/R&D, H-T64-2008-04060-FR, Parution courant 2009.

[5] L. DEPRADEUX & V. CANO : « Lot de validation pour *Code_Aster* sur la simulation numérique du soudage : Document de synthèse », Note interne EDF H-64-2007-00926, 27/09/07.

[6] W. EL-AHMAR : « Robustesse de la simulation numérique du soudage TIG de strucutures 3D en Acier 316L, Thèse INSA 2007

Références non citées

- **Cas test de *Code_Aster*** : nous donnons l'ensemble des cas test de *Code_Aster* qui mettent en œuvre des commandes *Code_Aster* utiles dans le cadre de la simulation numérique du soudage.

  - Transformation métallurgique (commande `CALC_META`) : V4.61.100, V4.61.102 et V4.61.103
  - Modèles de comportement mécanique avec effets des transformations structurales (mot-clé `META_XXX_XXX` à renseigner sous `STAT_NON_LINE`) : V7.20.104, V7.22.101, V7.22.102, V7.22.103-B, V7.22.104, V7.22.105, V7.22.122, V7.22.127, V7.22.128 et V7.22.126 ;
  - Méthodologie : V7.42.100 (fiche 3488, tube).
  - Les différents fichiers de commande (modélisations A à G) rattachés à l'étude sur la plaque 2425 sont stockés dans la base d'études de *Code_Aster* (SERVICE/BDD Etudes). La modélisation A est le calcul 3D thermique quasi-stationnaire en repère mobile. Les modélisations B, C et D sont les simulations thermiques transitoires 3D avec différentes méthodes de désactivation du métal non encore déposé, par affectation d'une conductivité quasi-nulle (A), par des modèles thermiques emboîtés (B), et enfin, par dédoublement des nœuds et recollement des nœuds à l'interface (D). Les modélisations E, F et G sont les simulations mécaniques des deux passes, avec différentes lois de comportement de Von Mises avec écrouissage linéaire : isotrope (E), cinématique (F) ou mixte (G).

- **Fiche 3488** (essais et simulations sur un tube en 316L chanfreiné, soudé en 13 passes par le procédé TIG

  - 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

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- F. WAECKEL, L. BIRONNEAU : Simulations mécaniques d'une opération de soudage multipasses sur plaque autobridée. Note EDF DER HI-74/96/006/0
- J. DEVAUX : Fiche tripartite 3488. Simulation numérique du soudage. Calculs thermo-mécaniques des passes 1 à 5. Note FRAMATOME LL/99.4564
- 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

- **Fiche 2425** (essais et simulation sur une plaque en 316L chanfreinée, soudée en 2 passes par le procédé TIG)

  - D. AYRAULT, O. BLANCHOT : « Maquettes instrumentées de soudage multipasses. Base de données expérimentale destinée à la validation de calculs», Rapport final de la fiche 2425 CEA DECS/UTA/02-RT-07, 25 Octobre 2002

- **Programme INZAT sur disque en 16MND5** chauffé par un laser (essais et simulations thermo-métallo-mécaniques)

  - Y. VINCENT : « Conséquences des transformations structurales dans la zone affectées thermiquement. Validation sur tests analytiques – Acier 16MND5 », Thèse INSA, Note INSA 201/1AB/005, 09/04/02.

- **Validation indépendante des outils de simulation numérique de soudage dans *Code_Aster***. On trouvera ces deux notes sur le site *Code_Aster* (Présentation/Démarche Qualité/Actions de validation indépendantes et complémentaires, item Soudage)

  - L. DEPRADEUX & V. CANO : « Lot de validation pour la simulation numérique du soudage avec *Code_Aster* : synthèse des documents analysés », Note interne EDF H-64-2007-00942, 27/09/07
  - (en référence) L. DEPRADEUX & V. CANO : « Lot de validation pour *Code_Aster* sur la simulation numérique du soudage : Document de synthèse », Note interne EDF H-64-2007-00926, 27/09/07.

- Données matériaux

  - **Matériaux 16MND5, Inconel 600 et 182 et acier 308L**, Ph. DUPAS & F. WAECKEL : « Recueil bibliographique de caractéristiques thermo-mécanqiues pour l'acier de cuve, les revêtements inoxydables et les alliages 600et 182 », Note interne EDF-DER HI-74/93/097 et HT-26/93/058/A, 17/01/94
  - **Matériau 316L,** A. RAZAKAINAVO : « Introduction dans *Code_Aster* d'un modèle de comportement élasto-viscoplastique prenant en compte des transformations métallurgiques », Note interne EDF HI-74/97/020/0
  - **Matériau 316L,** V. CANO : « Recueil bibliographique de caractéristiques thermomécaniques de l'acier inoxydable 316L », Note interne EDF HT-64/05/021/A, 09/05
  - **Matériau 16MND5** , V. CANO : « Identification des paramètres matériaux du 16MND5 associés aux modèles thermique, métallurgique et mécanique », Note interne EDF/R&D H-T64-2008-03224, Parution courant 2009.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Généralités sur le soudage

2.1 Qu'est- ce le soudage ?

Le soudage de deux pièces métalliques est l'obtention d'une continuité par fusion ou diffusion locale grâce à un apport de chaleur et éventuellement d'un apport de métal. Beaucoup de **procédés de soudage peuvent donc être décrits physiquement comme un bref passage à très haute température, d'une petite quantité de métal, suivi d'un refroidissement libre ou forcé**, le plus souvent par conduction dans la masse des pièces soudées et dans les éléments du poste de travail. Avec le temps, cette évolution de température détermine la structure métallurgique finale du joint soudé, parfois différente du métal de base.

2.2 Phénomène mis en jeu lors du soudage

D'un point de vue mécanique, les gradients thermiques très localisés mis en jeu lors du soudage de deux matériaux engendrent des dilatations et contractions locales ayant pour conséquence l'apparition de champs de déformations et de contraintes incompatibles, qui subsistent après retour à la température ambiante.

Pour certains matériaux, l'histoire thermique associée à l'opération de soudage engendre des changements de microstructures à l'état solide qui influencent l'état de contraintes résiduelles et de distorsions du joint soudé. Ces changements de microstructures interviennent lorsque la température atteint un seuil qu'on appelle température de début de transformation. Ces transformations s'arrêtent lorsque la température dépasse la température de fin de transformation.

On peut alors distinguer deux types de contrainte : les contraintes d'origine thermique engendrées durant toute la durée du processus de soudage et les contraintes d'origine métallurgique (éventuellement) engendrées pendant la durée des transformations.

Par conséquent, une simulation numérique du soudage doit prendre en compte les phénomènes couplés entre eux, thermique, métallurgique éventuellement et enfin mécanique.

2.3 Revue des différentes interactions

2.3.1 Interaction Thermique - Métallurgique

- Sens Thermique => Métallurgique : les propriétés thermo-physiques (conductivité, capacité calorifique, diffusivité…) dépendent des phases en présence.

- Sens Métallurgique => Thermique : les transformations métallurgiques s'accompagnent d'effets de chaleur latente qui modifient les distributions de température.

2.3.2 Interaction Thermique - Mécanique

- Sens Thermique => Mécanique : cette influence résulte, d'une part, des variations des caractéristiques mécaniques avec la température et, d'autre part, des dilatations et contractions d'origine thermique.

- Sens Mécanique => Thermique : l'évolution de la déformation irréversible ainsi que des variables internes d'écrouissage conduit à une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Toutefois, cette élévation de température d'origine mécanique est souvent négligeable en comparaison de celle provenant de l'apport de chaleur délivrée par le procédé de soudage, compte tenu des déformations et vitesses de déformation relativement faibles qui sont mises en jeu. Cette hypothèse n'est plus valide dans le cas de procédés mettant en jeu de fortes dissipations, par exemple, le soudage par friction.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2.3.3 Interaction Métallurgique - Mécanique

- Sens Métallurgique => Mécanique : l'influence de l'histoire métallurgique sur l'histoire mécanique résulte principalement de quatre facteurs. Le premier réside dans les dilatations et contractions provoquées par les transformations métallurgiques. Le second facteur est le phénomène de plasticité de transformation. Le troisième est le phénomène de restauration de l'écrouissage. Enfin le dernier facteur correspond au comportement particulier lié à l'aspect multi-phasé du matériau.

- Sens Mécanique => Métallurgique : l'application d'une contrainte modifie l'énergie stockée dans le matériau et la structure atomique du réseau. La présence d'une sollicitation mécanique peut donc jouer un rôle sur les transformations métallurgiques.

2.4 Qu'entend-on par zone fondue, ZAT, zone revenue ?

Lorsqu'on parle de soudage, l'ingénieur d'étude entendra souvent parlé de zone fondue, de ZAT et de zone revenue, qui correspond à trois zones distinctes dans un composant soudé. C'est pourquoi, nous donnons ci-dessous une définition très générale de ces zones.

- **La Zone Fondue (Z.F)** : c'est la zone où la **température est supérieure au solidus de l'acier considéré** ou du métal d'apport. La composition du métal fondu résulte de la chimie du métal d'apport, de la chimie du métal de base et des interactions avec l'environnement. Cette zone est séparée de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) par la ligne de fusion qui caractérise l'ensemble des points ayant atteint la température de solidus.
- **La Zone Affectée Thermiquement (ZAT)** : de manière très générale, c'est **la zone solide** de l'assemblage soudé où le **comportement du matériau est fortement influencé par le champ de température** du au soudage. Le terme ZAT a une signification toute particulière lorsque le matériau du métal de base ou du métal d'apport subit des transformations structurales : c'est la zone où la transformation a lieu. Cette Z.A.T se décompose elle-même en trois grandes parties : la zone où la transformation est complète, la zone où la transformation est partielle et enfin la **zone revenue (Z.R)** où la température maximale atteinte est légèrement inférieure à la température de début de transformation mais où le comportement du matériau est légèrement modifié par rapport à celui du métal de base.
- **La zone non affectée thermiquement** : de manière très générale, c'est **la zone solide** de l'assemblage soudé où le **comportement du matériau est peu influencé par le champ de température**. Pour les matériaux subissant des transformations structurales, il s'agit de la partie de l'assemblage soudé où la température maximale atteinte est bien inférieure à la température de début transformation et où l'opération de soudage n'engendre pas de modification des caractéristiques métallurgiques et mécaniques du métal de base.

2.5 Pourquoi est-il important de simuler le procédé de soudage ?

L'évolution des procédés de soudage appliqués aux aciers a permis d'atteindre aujourd'hui une bonne reproductibilité de l'opération et une bonne qualité des assemblages soudés. **Les soudures constituent tout de même les points faibles des structures.** Les champs de déformations et de contraintes induits par l'opération de soudage ont un rôle déterminant sur la qualité et la tenue mécanique du composant soudé ; les contraintes résiduelles induites par le soudage accentuant tous les risques d'endommagement par fatigue, par fluage, par corrosion et par rupture fragile…

C'est pourquoi il est important de se doter d'outils robustes et fiables pour simuler ce procédé.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

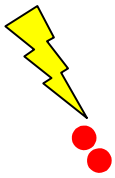
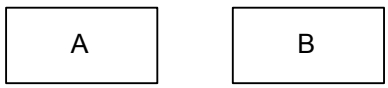
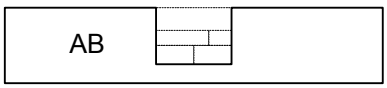
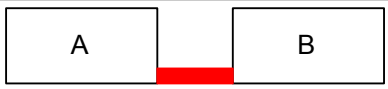
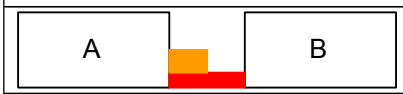
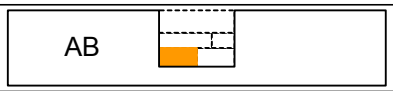
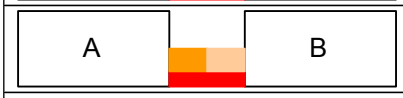
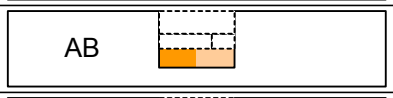
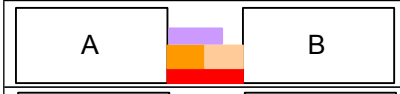
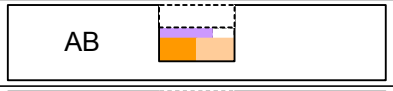
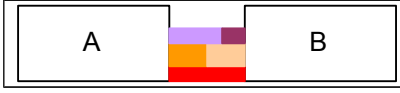
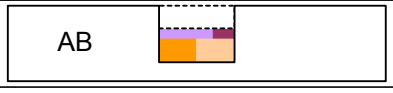
3 La simulation numérique du soudage

Tout ce qui est écrit, par la suite, peut être mis en œuvre dans deux situations d'études :

- Lorsqu'on simule, évidemment, le soudage de deux pièces ;
- Mais également, lorsqu'on simule la dépose d'un revêtement sur une pièce. On peut appliquer la même méthodologie que celle adoptée pour une opération de soudage.

3.1 Représentation visuelle d'une opération de soudage

- **La réalité** : on a deux pièces A et B que l'on souhaite souder pour obtenir une pièce AB en utilisant un procédé de soudage adapté (par exemple par apport de chaleur). Les deux pièces ne sont jamais soudées en une seule fois mais pas passes successives, la première passe s'appelant la passe de racine.
- **La représentation numérique** : la première passe de racine n'est jamais modélisée. On suppose donc qu'initialement, les deux pièces A et B sont en un seul bloc. Par la suite, nous verrons qu'il existe plusieurs méthodes pour activer les passes. Le plus souvent (c'est la configuration présentée dans le dessin ci-dessous), on choisit de représenter toutes les passes dans le modèle initial et on les active au fur et à mesure.

La réalité		La représentation numérique	
	Le soudeur		
	La source de chaleur apportée par le procédé de soudage, avec métal d'apport ici		
	Les deux pièces à souder		La pièce initiale à modéliser, avec ici toutes les passes représentées initialement dans le modèle
	1ère passe = Passe de racine		
	2ème passe		Activation de la 1ère passe à simuler
	3ème passe		Activation de la 2ème passe à simuler
	4ème passe		Activation de la 3ème passe à simuler
	5ème passe		Activation de la 4ème passe à simuler

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

AB 	6ème passe Pièce AB soudée	AB 	5ème passe Pièce AB simulée

3.2 Que cherche t-on à calculer ?

Le but final de la simulation est de déterminer les champs de contraintes et de déformations résiduelles. Pour ce faire, il est nécessaire de coupler ou de chaîner des calculs thermique, éventuellement métallurgique et enfin mécanique.

3.3 Quelles sont les principales difficultés de la simulation ?

Les grandes difficultés, questions et choix de méthodologie auxquelles l'ingénieur sera confronté peuvent se résumer en six points :

- Représentation 2D ou 3D de la structure étudiée ?
- Quel maillage adopté ?
- Comment prendre en compte l'apport de chaleur ?
- Comment gérer l'ajout de matière, en thermique, en mécanique ?
- Quel modèle de comportement mécanique (pour les transformations métallurgiques, il existe un unique modèle dans *Code_Aster*) ?
- Quelles données physiques ?

Remarque : Les choix qui seront adoptés au final pour la simulation dépendent de beaucoup des données expérimentales en la possession de l'ingénieur. Ces données regroupent :

- Des données matériau ; Comme dans toute simulation, il est important d'avoir des données matériau pour identifier le plus proprement possible les lois de comportement (thermique, métallurgique et mécanique). Le soudage impliquant des températures très élevées (jusqu'à la fusion du matériau), il faut disposer, si possible, d'une part, de paramètres entre 20°C et la température de fusion, et d'autre part, d'essais permettant de caractériser les phénomènes visqueux.
- Des données sur les conditions de soudage ; Parmi les nombreuses incertitudes sur les données d'entrée qui interviennent lors de la simulation numérique d'une opération de soudage ou de dépose d'un revêtement, l'indétermination de l'apport de chaleur est la plus pénalisante. En effet, même lorsqu'il s'agit d'un soudage automatisé, et que les paramètres de soudage sont bien connus, la modélisation de l'apport de chaleur reste de toute façon difficile, et un recalage est presque toujours nécessaire (sur des mesures de températures ou sur des macrographies de zones fondues) si une **simulation numérique prédictive est visée**.

Dans le paragraphe 3 et pour chacun de ces points, nous présenterons les différentes méthodologies possibles et, parfois, les choix conseillés.

3.4 Les spécificités de *Code_Aster*

3.4.1 Quels sont les couplages considérés ?

Dans *Code_Aster*, il est actuellement possible de prendre en compte l'essentiel des phénomènes mais de façon découplée, par l'intermédiaire de **calculs chaînés thermique, puis métallurgique (éventuellement) et enfin mécanique.**

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Le calcul métallurgique éventuel est ainsi effectué en post-traitement du calcul thermique, sans tenir compte de l'influence de la métallurgie sur la thermique (différence de propriétés thermo-physiques selon les phases et chaleurs latentes de transformation).

De même, le calcul mécanique est découplé des calculs thermique et métallurgique : l'influence de la dissipation intrinsèque sur les champs thermiques est négligée, ainsi que l'influence de l'état de contraintes sur les transformations métallurgiques.

Pour résumer, voici les interactions prises (OUI) ou non (NON) en considération :

- Influence de la Thermique sur la Métallurgie : OUI
- Influence de la Métallurgie sur la Thermique : NON
- Influence de la Thermique sur la Mécanique : OUI
- Influence de la Mécanique sur la Thermique : NON
- Influence de la Métallurgie sur la Mécanique : OUI
- Influence de la Mécanique sur la Métallurgie : NON

3.4.2 Schéma type d'un fichier de commande *Code_Aster*

Pour résumer, voici les grandes étapes d'un calcul d'une opération de soudage dans *Code_Aster* :

1) On réalise un calcul thermique qui permet d'obtenir le champ de température en chaque nœud du maillage.
2) **Si le matériau considéré subit des transformations métallurgiques** : on réalise en post traitement du calcul thermique, le calcul métallurgique qui permet d'obtenir la proportion des différentes phases métallurgiques (et éventuellement la dureté associée) en chaque nœud du maillage.
3) A partir du champ de température et éventuellement des phases métallurgiques, on réalise le calcul mécanique en choisissant un modèle de comportement qui prend en compte éventuellement les différents effets possibles des transformations métallurgiques. On obtient ainsi les champs de contraintes, de déformations et de variables internes en chaque point de Gauss.

3.4.3 Restrictions de *Code_Aster* [5]

- **Calcul thermique**

  - La résolution de l'équation de la chaleur en repère mobile par la commande THER_NON_LINE_MO [U4.53.03] (utile pour caler la source de chaleur d'un calcul thermique 3D instationnaire) n'est disponible que dans le cas d'un trajet rectiligne de la source de chaleur, et pas dans le cas d'un trajet axisymétrique, comme lors du soudage de conduites cylindriques par exemple.
  - Il est actuellement impossible de définir une fonction de plus de deux variables avec *Code_Aster*, alors que les sources de chaleur « classiques » (Gaussienne, double ellipsoide, source CIN) sont des densités de flux volumiques ou surfaciques, fonction de l'espace et du temps. Si la source est fonction du temps (a minima, excepté si le calcul est effectué en repère mobile), il ne reste plus qu'un seul paramètre d'espace disponible.

- **Calcul métallurgique**

  - Le phénomène de revenu (qui a en particulier pour conséquence une diminution de la limite d'élasticité) des phases brutes de trempe n'est pas pris en compte. On peut éventuellement contourner ce problème. Si le nombre de phases formées au refroidissement permet de laisser des variables internes métallurgiques « libres », on peut alors assigner à ces variables internes

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

des proportions de phases revenues et modéliser la cinétique de revenu en introduisant un TRC fictif.

- **Calcul mécanique**

  - Il serait intéressant de développer, pour un matériau ne comportant qu'une seule phase métallurgique, les modèles équivalents à `META_XXX_XXX` (plusieurs phases). Cela oblige actuellement à réaliser un faux calcul métallurgique pour bénéficier de ces lois. Cela peut poser en 3D d'importants problèmes de temps de calculs et de capacité mémoire, pour peu qu'on utilise par exemple un modèle avec écrouissage cinématique (on stocke un tenseur comme variable interne pour chaque pas de calcul et pour chaque phase).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Méthodologie pour la simulation

Les retours d'expérience cités dans cette partie sont essentiellement issus des trois études suivantes :

- Une tuyauterie en 316L chanfreinée soudée par le procédé TIG [2], avec du métal d'apport en treize passes (fiche CEA/EDF/FRAMATOME 3488) ; les 2 premières passes de cet exemple constituent un cas-test *Code_Aster* [V7.42.100]) ;
- Une plaque chanfreinée en 316L soudée par le procédé TIG [4], avec du métal d'apport en deux passes de soudage (fiche CEA/EDF 2425) ; les différents fichiers de commande rattachés à cette étude sont stockés dans la base d'études de *Code_Aster* (SERVICE/BDD Etudes) ;
- Une plaque en 316L non chanfreinée, avec création d'un ligne de fusion par le procédé TIG [3], mais sans métal d'apport (thèse INSA de Lyon de L. Depradeux soutenue en 2004).

Par souci de simplicité, nous les nommerons par la suite fiche 3488, fiche 2425 et thèse L.D 2004.

4.1 Type de modélisation : 2D ou 3D ?

En toute rigueur, le procédé de soudage est strictement tridimensionnel, l'apport de chaleur et éventuellement de matière étant mobile et de vitesse souvent constante. Les champs de températures et mécaniques engendrés sont donc tridimensionnels et transitoires.

Il est donc préférable de réaliser une analyse transitoire tridimensionnelle.

Cependant, ce choix n'étant pas toujours possible du fait de la complexité, du temps calcul et de la capacité mémoire requis par des calculs 3D, on a souvent recourt à une modélisation 2D en simulation numérique du soudage (notamment pour du soudage multi-passe avec un grand nombre de passes).

Cas d'une modélisation 2D

- Dans la majorité des cas, les simulations 2D considèrent une section transverse, perpendiculaire à l'avancée de la torche de soudage. Ces simulations sont réalisées avec l'hypothèse des déformations planes ;
- Des calculs 2D axisymétriques sont également adoptés pour le cas du soudage de conduites cylindriques.
  - **Le point faible des deux modélisations précédentes, c'est qu'on néglige l'effet de vitesse du soudage et qu'on suppose que le cordon (ou la chaleur) est déposé(e) simultanément sur toute la longueur de la pièce à souder.**
- D'autres choix, moins classiques, sont également envisageables : on peut choisir par exemple de mailler une section longitudinale (dans le sens du soudage) ou bien, si on considère que les températures sont constantes dans l'épaisseur, on peut choisir de mailler le plan moyen de la plaque. Ces simulations sont alors réalisées avec l'hypothèse des contraintes planes.

Retour d'expérience

- Fiche 3488 : Le calcul du tube chanfreiné est réalisé en axisymétrique. Des comparaisons entre cette approche 2D axisymétrique et une approche 3D ont été réalisées dans [1] et montrent la bonne représentativité de l'approche 2D, même si celle-ci ne tient pas compte des effets de vitesse.
  - Thèse L.D 2004 : Sur la plaque non chanfreinée, plusieurs modélisations sont testées :
  - Calcul 3D thermo-mécanique complet ;

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Calcul 2D en déformation plane où on modélise une section perpendiculaire à l'avancée de la torche ;
- Calcul 2D en contrainte plane où on modélise le plan moyen de la plaque.

On constate, **dans ce cas de figure**, que le calcul 2D en déformation plane ne reproduit pas bien les résultats obtenus sur le calcul 3D, en terme de déplacements et de contraintes résiduelles, excepté pour ces dernières dans la zone centrale de la plaque. Quant au calcul 2D en contrainte plane, il donne des résultats très proches en contraintes résiduelles du calcul 3D.

4.2 Le maillage

Conseils généraux

- Comme toute étude numérique, il est toujours difficile de donner précisément des valeurs sur la densité du maillage ; cela dépend beaucoup du problème physique considéré. Dans le cas du soudage, le maillage doit être suffisamment fin autour de la source de chaleur (cordons de soudure et zone fondue) pour appréhender correctement les forts gradients thermiques et mécaniques dans cette zone.
- Dans le cas d'une modélisation thermique quasi-stationnaire en repère mobile (cf. § 3.3.2), la rapidité des calculs autorise une densité de maillage plus importante, notamment autours de la source.
- Dans le cas de soudage sur aciers avec transformations de phases métallurgiques, il est nécessaire de mailler de façon suffisamment fine la ZAT. Ceci est d'autant plus important que le maxima de contraintes est généralement atteint en périphérie de ZAT, en zone partiellement austénitisée. La densité de maillage dans cette zone est donc primordiale. Les simulations de soudage sur un acier qui présente des transformations de phases nécessitent donc à priori des maillages plus volumineux en nombres d'éléments par rapport à des simulations de soudage sur aciers sans transformations (à étude identique).
- Pour des calculs mécaniques 3D, il est très important de déraffiner le plus possible le maillage mécanique lorsqu'on s'éloigne de la zone soudée. En effet, la forte non-linéarité du problème (et les temps de calculs qui vont avec) et l'aspect transitoire (nécessitant de nombreux pas de temps) limitent en pratique le nombre de nœuds du modèle.
- Comme pour n'importe quel problème, il est nécessaire de prévoir dès l'étape de maillage les groupes destinés à recevoir les conditions aux limites thermiques et mécaniques (trajet de la source, surface d'échange…), ainsi que les zones destinées au post-traitement. Ceci est d'autant plus vrai pour le maillage thermique où le chargement (source chaleur) et les conditions aux limites (convection et rayonnement) se déplacent au fur et à mesure de la dépose des cordons.
- Pour la zone fondue, il est souvent difficile de la représenter car, en l'absence de macrographie, sa forme est inconnue.

Retour d'expérience

- Fiche 3488 : Les cordons de soudure peuvent être représentés géométriquement et maillés de façon plus ou moins complexes. 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 ;
  - On respecte au mieux le volume de la passe.

Des comparaisons ont été faites dans [2] avec ces trois possibilités. Il s'avère que les résultats des calculs mécaniques diffèrent très peu d'un maillage à l'autre (à thermique équivalente). En conclusion,

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

un maillage courbe n'apporte rien de significatif au niveau des résultats par rapport à un maillage polygonal. Il importe en revanche de respecter approximativement le volume des cordons déposés.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4.3 Calcul thermique

Le point critique pour la partie thermique concerne la modélisation de l'apport de chaleur.

4.3.1 Introduction

Dans *Code_Aster* , le calcul de l'évolution thermique s'effectue par la résolution non linéaire de l'équation de la chaleur (opérateur THER_NON_LINE [R5.02.02]) dans le volume de la pièce, étant donné une condition initiale et des conditions aux limites thermiques sur les frontières. La résolution est transitoire, la source de chaleur se déplace sur le maillage.
La diffusion de la chaleur est traitée par une formulation enthalpique, qui est l'intégrale de la chaleur spécifique sur la température $\beta(T)=\int_0^T \rho C_p(u)\,du$. On peut donc fournir, soit la conductivité et la chaleur spécifique ρC_p en fonction de la température, soit, et c'est préférable (cf. remarque ci-dessous), la conductivité et l'enthalpie en fonction de la température.

Remarque sur le choix d'une formulation enthalpique

- A la température de fusion, la capacité thermique (qui est l'énergie à fournir pour élever la température du corps) subit une discontinuité qui se traduit par la chaleur latente de fusion, qui représente l'énergie à fournir pour franchir la température de changement de phase. Dans le cas d'un mélange de constituant (c'est le cas des alliages), la fusion s'étale entre les températures de liquidus et de solidus Tl et Ts . Une formulation « enthalpique » de l'équation de la chaleur est utile pour la prise en compte des phénomènes de chaleur latente de changement de phases. En effet cette formulation évite de « rater » la transformation, ce qui risque d'arriver pour la formulation en capacité si les pas de temps ne sont pas suffisamment petits.

4.3.2 Gestion de l'ajout de matière (les cordons de soudure)

Description des différentes méthodes

Il existe plusieurs méthodes pour prendre en compte, dans le modèle thermique transitoire, l'ajout successif de matière lors des différentes passes de soudage :

- La première méthode consiste à ne considérer qu'un seul modèle (au sens de *Code_Aster* défini par la commande AFFE_MODELE) contenant toutes les passes et à « désactiver » artificiellement les cordons non encore déposés en leur imposant une conductivité thermique nulle ($10^{-5} W/m°C$ en pratique).

- La seconde méthode consiste à emboîter les modèles thermiques (au sens de *Code_Aster*) : un maillage global de tous les cordons est utilisé, mais le modèle thermique n'est affecté que sur la partie du maillage correspondant au métal déjà déposé (lors de l'étape AFFE_MODELE). Les cordons non encore déposés ne sont pas inclus dans le modèle. Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir autant de modèles thermiques qu'il y a de cordons déposés. Les différents modèles sont emboîtés les uns dans les autres, c'est-à-dire que le modèle thermique I contient les passes de 1 à I et le modèle thermique $I+1$ contient les passes 1 à I et la passe $I+1$. Cette méthode est plus propre que la précédente dans la mesure où les éléments non déposés ne perturbent pas le calcul de la passe en cours, puisqu'ils ne sont pas inclus dans le modèle. En revanche, ceci pose un problème lors de l'enchaînement des calculs thermiques, les champs de température du modèle I n'étant pas définis en tous les nœuds du modèle correspondant à la passe suivante $I+1$. Il faut donc effectuer un prolongement des champs calculés d'un modèle à l'autre. Pour ce faire, on procède en 4 étapes :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- 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).

- Enfin, la troisième méthode consiste, sur un seul modèle thermique (au sens de *Code_Aster*), à dédoubler les nœuds à l'interface de chaque cordon, ce qu'il faut prévoir dans l'étape de construction du maillage. Lors de l'affectation du chargement thermique (AFFE_CHAR_THER), on n'affecte que la partie du modèle qui correspond au métal déjà présent. Ainsi, les cordons non déposés ne voient pas le chargement, et le dédoublement des nœuds empêche le transfert de chaleur à l'interface des cordons non déposé (une température égale à l'ambiante est appliquée dans les cordons non encore déposé). Lors de l'ajout d'un nouveau cordon, on recolle les nœuds correspondant en appliquant l'égalité des températures aux nœuds dédoublés par la commande LIAISON_GROUP. Cette méthode est certainement la plus fiable mais la construction du maillage devient fastidieuse si le nombre de passes est grand.

Retour d'expérience

- L'avantage de la première méthode (un seul modèle et conductivité presque nulle pour le cordon non encore déposé) est sa simplicité de mise en œuvre. En revanche, elle peut conduire à des oscillations numériques de la température dues à la discontinuité de la conductivité aux interfaces entre les cordons, comme constaté dans la fiche 3488 [2]. Néanmoins, cette méthode est souvent choisie du fait de sa simplicité.
- Les trois méthodes ont été testées sur la plaque 2425 [4] et comparées à des mesures expérimentales de température. Les trois calculs conduisent à des résultats sensiblement identiques aux points de mesures.

4.3.3 Modélisation de la source de chaleur

La modélisation véritablement complète du problème thermique nécessiterait la prise en compte des transferts de chaleur électro-thermo-fluides dans l'arc électrique, avec prise en compte des phénomènes électromagnétiques, et la modélisation des mouvements convectifs dans le bain fondu, en interaction avec le plasma de couverture, et les transferts de chaleur dans la partie solide. Bien qu'une littérature abondante existe en ce qui concerne la prise en compte de la modélisation de l'arc et du bain de fusion dans la simulation, nous nous placerons par la suite dans une optique de modélisation avec un code de calcul industriel, qui ne permet pas de modéliser les phénomènes présents dans l'arc et le bain fondu. Ceux-ci sont remplacés par la définition d'une source de chaleur de forme adéquate. Seule la conduction de la chaleur est donc modélisée, c'est pourquoi il ne sera pas fait allusion à la modélisation de l'arc et du bain par la suite.

Description des deux méthodes possibles

- La première méthode 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.
  - Par raison de simplicité, la fonction température imposée T^{imp} est choisie, le plus souvent, constante en espace mais variable dans le temps, soit $T^{imp}=T^{imp}(x,y,z;t)=T^{imp}(t)$;

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- De plus, on impose souvent cette température uniquement sur le cordon déposé : en effet, les formes et tailles de zones fondues sont rarement connues, et même si elles le sont, cela rend fastidieux la construction du maillage, surtout si le nombre de cordons est élevé ;
- La méthode en température est conseillée dans le cas de modélisations 2D ou bien lorsque aucune donnée n'est disponible sur les paramètres de soudage. La fonction $T^{imp}(t)$ a souvent la forme suivante :

$$T^{imp}(t)=\begin{cases}\dfrac{T^{max}}{t_1}t+T^{ini} & \text{si } t\le t_1\\ T^{max} & \text{si } t_1\le t\le t_2\\ \text{éventuellement,}\dfrac{-(T^{max}-T^{min})}{t_3-t_2}(t-t_2)+T^{max} & \text{si } t_1\le t\le t_3\end{cases}$$

On prescrit une montée de la température initiale T^{ini} à la température de fusion ou une température éventuellement supérieure T^{max} d'une durée t_1 (la montée en température prescrite peut être linéaire ou non linéaire, exponentielle par exemple), puis un maintien à cette température pendant une durée (t_2-t_1), et enfin éventuellement, on peut prescrire le début du refroidissement jusqu'à la température T^{min} . Les paramètres (t_1, t_2, t_3, T^{min}) peuvent être identifiés si des mesures de température existent ;

- La suite du refroidissement s'effectue avec des échanges par convection et rayonnement.

- La seconde méthode consiste à **imposer un flux de chaleur surfacique (J/sm^2) ou volumique (J/sm^3)** au cordon de soudure modélisé.
  - Elle est préférentiellement utilisée lorsque l'énergie de soudage délivrée est connue : c'est le cas pour le soudage à l'arc, pour lequel on peut estimer la puissance délivrée UI (avec U la tension et I l'intensité du courant). De cette puissance délivrée, seul une fraction ηUI pénètre effectivement dans la pièce et participe à l'échauffement et la fusion des matériaux. Pour le procédé TIG, par exemple, le paramètre η est de l'ordre de 0,6 à 0,9 ;
  - Il est alors possible de répartir cette puissance, en surface ou en volume (ou les deux), sur le maillage. La répartition de ce flux de chaleur peut-être extrêmement simple (constante en espace dans le métal déposé), ou plus élaborée (modèle double-ellipsoïde à répartition gaussienne élaboré par J. Goldak). Le calage des paramètres de la source de chaleur retenue nécessite des mesures de température.

Par la suite, nous détaillons la démarche à suivre dans le cas d'une modélisation par flux de chaleur, en distinguant les simulations 3D et 2D. On suppose qu'il existe des données disponibles en température.

Cas d'une modélisation 3D avec flux de chaleur

- Nous donnons ci-dessous quelques formes possibles pour la représentation spatiale des flux volumiques ou surfaciques :
  - Exemple d'un flux volumique, constant suivant y et z et variable dans la direction de soudage, ici x .

$$Q^V=Q^V(x,y,z;t)=Q^V(x;t)=\begin{cases}\dfrac{Q^{max}}{L/2}x & \text{si } 0\le x\le\dfrac{L}{2}\\ \dfrac{-Q^{max}}{L/2}(x-L) & \text{si } \dfrac{L}{2}\le x\le L\end{cases}$$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Exemple d'un flux surfacique $Q^S=Q^S(x,y;t)$ cylindrique à base circulaire de rayon R et d'intensité maximale Q^{max} .

- Lorsque des mesures de températures sont disponibles, les paramètres de cet apport de chaleur (tailles, valeurs de puissance maximale injectée) peuvent être calés de manière à reproduire au mieux, par calcul, les cycles thermiques mesurés.
- Cette étape de calage peut être effectuée facilement et avec de faibles temps de calculs par l'intermédiaire d'un calcul quasi-stationnaire en repère mobile (THER_NON_LINE_MO). Cela suppose que le trajet de la source est rectiligne uniforme, à vitesse constante. Dans ce cas de figure, on suppose qu'un régime permanent s'établit, et l'équation de la chaleur écrite dans ce repère devient indépendante du temps. On obtient donc le champ de température dans ce repère (fonction de l'espace uniquement). On peut éventuellement récupérer la dimension temporelle par un changement de variable ($X=x-V.t$). On peut donc rapidement (un seul pas de temps) identifier les paramètres de la source, qui sont ensuite réutilisés dans le cas du calcul transitoire.
- Une fois l'identification réalisée et si la puissance du procédé de soudage est connue, on pourra en déduire la valeur du paramètre η dans la puissance nette (afin de vérifier la cohérence de la valeur obtenue par rapport au procédé). En effet, l'intégrale de la densité volumique (respectivement surfacique) de flux de chaleur sur le volume choisi (respectivement la surface choisie) doit être égale à la puissance nette, soit

$$\int_V Q^V(x,y,z;t)\,dv=\eta\,\mathrm{UI} \quad \text{et} \quad \int_S Q^S(x,y,z;t)\,ds=\eta\,\mathrm{UI}$$

Dans les deux exemples présentés ci-dessus, cela donne :

- Exemple du flux volumique : $S\int_0^L Q^V(x;t)\,dx=S*\frac{L}{2}*Q^{max}=\eta\,\mathrm{UI}$ où S est la surface du cordon déposée perpendiculaire à la direction du soudage.
- Exemple du flux surfacique : $\int_S Q^S(x,y,z;t)\,ds=\pi*R^2*Q^{max}=\eta\,\mathrm{UI}$.

- Le flux de chaleur étant identifié spatialement, il faut maintenant mettre en œuvre le déplacement de cette source sur le maillage pour le calcul thermique transitoire. On définit ainsi une fonction dans la direction de soudage, ici x , et du temps par l'opérateur DEFI_NAPPE : un flux fonction du temps est appliqué successivement sur les mailles situées sous le trajet de la torche de soudage, en considérant une montée à valeur maximale, suivit d'une descente à zéro. La descente du flux sur une maille correspond à la montée du flux sur la maille adjacente suivante. Ainsi les sources sont « allumées » successivement le long de l'axe de soudage lors du passage de la torche, ce qui correspond à une source de chaleur d'intensité constante qui voyage dans l'espace le long de l'axe de soudage.

Cas d'une modélisation 2D avec flux de chaleur

- Dans le cas d'une modélisation en 2D, l'approche est différente car il faut choisir un flux (volumique ou surfacique) qui soit variable dans le temps et ceci afin de prendre en compte, dans le calcul 2D, l'approche et l'éloignement de la torche. Pour la répartition spatiale de ce flux, on choisit souvent un flux constant en espace. Un exemple de flux surfacique est donné ci-dessous :

$$Q_r=Q_r(x,y,z;t)=Q_r(x;t)=\begin{cases}\dfrac{Q^{max}}{t_1}t & \text{si } t\le t_1\\ Q^{max} & \text{si } t_1\le t\le t_2\\ -Q^{max}\dfrac{(t-t_2)}{(t_3-t_2)} & \text{si } t_2\le t\le t_3\end{cases}$$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Là encore, il faudra identifier, à partir de mesures de température, les paramètres du flux choisi (dans notre exemple, les instants t_1, t_2 et t_3 ainsi que la valeur Q^{max}).

- Si l'on connaît la puissance délivrée par le procédé, on peut également en déduire le paramètre η. Cela donne pour notre exemple :

$$\int_t \left\{ \int_S Q_r(t)\, ds \right\} = S \int_t Q_r(t)\, dt = \frac{\eta\, UI}{V} \Leftrightarrow \int_t Q_r(t)\, dt = \frac{\eta\, UI}{SV}$$

ce qui fait :

$$\int_t Q_r(t)\, dt = Q^{max} * \frac{1}{2}(t_3 + t_2 - t_1) = \frac{\eta\, UI}{SV}$$

où V est la vitesse de soudage connue et S la surface du cordon déposé connue. Pour affiner l'identification des paramètres de la source, on peut utiliser le paramètre η trouvé par un calcul 3D quasi-stationnaire en repère mobile.

Retour d'expérience

- Thèse INSA L.D 2004 :
  - Pour la modélisation 3D transitoire de la plaque, plusieurs formes de flux surfaciques ont été testées : triangulaire dans le sens du soudage, cylindrique à base circulaire et gaussienne. Pour ces trois flux, la répartition en température s'est avérée à peu près identique.
  - Pour la modélisation 2D (déformation plane), trois représentations ont été testées : température imposée, flux surfacique et flux volumique avec identification des paramètres sur des mesures. Seule la modélisation avec température imposée a conduit la fusion du métal déposé. Avec un flux volumique, la zone fondue n'a pas été reproduite.
- Fiche 3488 : L'approche en température imposée a été utilisée sur le calcul axisymétrique du tube. Les résultats de cette simulation montrent que les calculs surestiment la zone fondue et les maxima des cycles thermiques. L'approche en température imposée est donc trop énergétique et c'est l'approche en flux qui est conseillée pour cette étude.

4.3.4 Conditions aux limites thermiques avec l'environnement

Les conditions aux limites thermiques sont modélisées par des échanges convectifs et radiatifs de la pièce soudée avec l'environnement, qui s'écrivent :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{air}) + \varepsilon\, \sigma (T^4 - T_{air}^4)$$

où n est la normale extérieure, h le coefficient d'échange convectif, σ la constante de Stefan-Boltzman et ε l'émissivité du matériau.

Remarques

- Dans le cas du soudage de pièces relativement épaisses, les valeurs prises pour le coefficient d'échange et l'émissivité n'ont souvent qu'une influence secondaire sur les calculs thermiques : en effet, le flux de chaleur échangé avec l'air ambiant pendant le chauffage et au refroidissement est très faible, comparativement au flux de chaleur par conduction dans la pièce provenant de l'apport de chaleur.
- A proximité immédiate de la source, le flux émis par rayonnement est non négligeable dans la réalité, mais les inconnues correspondantes peuvent être intégrées dans la définition de la taille et la répartition de la source de chaleur.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Le problème thermique se ramène donc le plus souvent à un problème purement conductif et la non prise en compte des échanges radiatifs et convectifs avec l'environnement n'est pas essentielle.

4.3.5 Caractéristiques thermophysiques

Les propriétés thermophysiques intervenant dans l'équation de la chaleur sont fonction de la température. Il s'agit de la conductivité thermique $\lambda(T)$ et de la chaleur spécifique ρC_p ou de l'enthalpie.

Remarques

- En ce qui concerne la conductivité thermique, il est parfois d'usage de l'augmenter artificiellement pour les températures supérieures à la température de fusion, de façon à « prendre en compte » les phénomènes convectifs à l'intérieur du bain, et à homogénéiser la température de celui-ci. Dans la littérature, la conductivité est ainsi augmentée d'un facteur 2, 10 ou 100 selon les auteurs (c'est ce qui est fait dans le tube 3488 avec un facteur 100). En pratique, il est souvent raisonnable de prendre une conductivité constante à partir de la température de fusion, et on estime qu'il n'est pas nécessaire de l'augmenter artificiellement, étant donnée que les inconnues concernant le bain de fusion (phénomènes convectifs, etc…) sont englobées dans la définition d'une source de chaleur ad hoc.
- Lors du soudage, la chaleur latente de fusion (cf. remarque du paragraphe 3.3.1) est faible par rapport à l'apport de chaleur provenant du procédé, et il n'est pas forcément utile de la prendre en compte. En outre, cette chaleur latente de fusion peut également être incluse implicitement dans la définition de l'apport de chaleur.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4.4 Calcul métallurgique

Le point critique pour la partie métallurgique concerne, essentiellement, la connaissance de données expérimentales afin d'identifier correctement les modèles de comportement métallurgiques.

4.4.1 Introduction

Dans cette partie, on ne s'intéresse qu'au matériau type acier, en particulier le 16MND5, qui peut comporter cinq phases métallurgiques différentes : la ferrite, la perlite, la bainite, la martensite, dites phase froide ou α, et l'austénite, dite phase chaude ou γ.
Lorsqu'on chauffe un matériau, les phases α se transforment en phase γ. Quand on refroidit le matériau, l'austénite se transforme, selon la vitesse de refroidissement, en ferrite et/ou perlite et/ou bainite et/ou martensite. Il faut donc définir pour le chauffage la cinétique de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ et pour le refroidissement la nature et la cinétique des transformations possibles $\gamma \rightarrow \alpha$.

Les phases métallurgiques en présence dépendent donc de la température et de la vitesse de température. Le calcul de ces phases est réalisé en post-traitement d'un calcul mécanique, par la commande `CALC_META`. Il faut préciser dans cette commande l'état métallurgique initial.

4.4.2 Modèles de comportement au chauffage et au refroidissement

Actuellement dans *Code_Aster*, pour des matériaux type acier, il n'existe qu'un seul modèle de comportement permettant de calculer, à chaque pas de temps, les proportions des différentes phases. Néanmoins, ce modèle est différent au chauffage et au refroidissement. On trouvera dans [R4.04.01] l'expression détaillée des cinétiques au chauffage et au refroidissement.

4.4.3 Interaction thermique => Métallurgique

Comme nous l'avons déjà précisé auparavant, il n'y a pas de couplage entre les calculs thermique et métallurgique. Or, les propriétés thermo-physiques (conductivité, chaleur spécifique ou enthalpie) du point matériel dépendent des proportions des différentes phases en présence : si ceci n'est en général pas trop préjudiciable vis à vis des prédictions mécaniques, cela peut l'être pour une prévision fine de la métallurgie finale (mais ce n'est pas, en général, l'objectif d'une simulation numérique du soudage).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4.5 Calcul mécanique

Les points critiques pour la partie mécanique concernent le choix de la loi de comportement et l'identification des paramètres de cette loi.

4.5.1 Principe du calcul mécanique

Le calcul mécanique s'effectue par résolution des équations d'équilibre (opérateur STAT_NON_LINE), en tenant compte de la dépendance des propriétés mécaniques vis à vis de la température et, éventuellement des proportions des phases métallurgiques.

4.5.2 Gestion de l'ajout de matière (les cordons de soudure)

En mécanique, il existe deux méthodes pour gérer l'ajout de matière, équivalentes dans le principe à celles de la thermique.

- On peut considérer un seul modèle mécanique comportant tous les cordons, où les nœuds à l'interface entre cordons sont dédoublés. Lors de l'ajout d'un nouveau cordon, on affecte des conditions à l'interface portant sur l'incrément des déplacements (LIAISON_DDL). Tout comme en thermique, cette méthode est certainement la plus fiable mais la construction du maillage devient fastidieuse si le nombre de passes est élevé. On n'a pas de retour d'expérience **récent** sur cette méthode.
- La méthode la plus couramment utilisée en mécanique est celle où on a un seul modèle mécanique pour toutes les passes, les éléments non encore présents étant désactivés artificiellement par affectation d'un module d'Young « quasi-nul » ($E=10^{-11}.E(20\,°C)$ en pratique)). La valeur de module d'Young à affecter dans le métal non déposé résulte d'un compromis : si la valeur est trop élevée, des contraintes seront générées dans le métal non encore déposé, mais si elle est trop faible, cela peut entraîner des problèmes de convergence.

4.5.3 Loi de comportement

Dans *Code_Aster*, il existe différentes lois de comportement pour décrire le comportement non linéaire d'un matériau (écrouissages isotrope, cinématique, mixte, effet visqueux,….). L'utilisateur trouvera dans le document [U4.51.11] l'inventaire de ces modèles. Étant donnés que ces modèles ne sont pas spécifiques aux seules simulations du soudage, nous ne les décrirons pas.

Remarque

Néanmoins, nous pouvons citer les modèles mécaniques avec effet des transformations structurales, qui ont été développés pour les aciers, tel le 16MND5 et spécialement dans le cadre des activités soudage.
Ces modèles, qui sont décrits en détail dans les documents [R4.04.02] et [R4.04.03], permettent de modéliser les phénomènes suivants : comportement plastique ou comportement visqueux, écrouissage isotrope linéaire ou non linéaire ou écrouissage cinématique linéaire, plasticité de transformation, restauration d'écrouissage d'origine métallurgique, restauration d'écrouissage d'origine visqueuse. On peut réaliser un calcul en petites déformations mais également en grandes déformations, soit avec l'option PETIT_REAC, soit avec l'option SIMO_MIEHE (les modèles avec écrouissage cinématique n'existent pas avec SIMO_MIEHE).

Les deux questions importantes au niveau du choix de la loi de comportement portent sur :

- Doit-on prendre en compte les effets visqueux du fait des hautes températures engendrées lors du soudage ?

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Quel type d'écrouissage doit-on considérer (isotrope, cinématique ou mixte) ? Cette question est importante en soudage car ce procédé implique des cycles de traction et compression ;

Les effets visqueux sont souvent négligés en raison essentiellement du manque de données expérimentales. Un modèle plastique peut alors être suffisant si son identification est réalisée à partir d'essais où la vitesse de chargement est proche de celle rencontrée dans la structure étudiée [6]. Sinon, il est préférable de prendre un modèle visqueux, surtout si l'on souhaite simuler un chargement de type détensionnement.

Pour le type d'écrouissage, on a constaté dans [3], [4] et [6] qu'un modèle à écrouissage isotrope conduit en général à un niveau final de contrainte très élevé (comparé à des mesures). Le niveau de contraintes maximal final sera d'autant plus élevé que les cycles de plastification en traction-compression seront nombreux. C'est pourquoi plus le nombre de passes modélisé est élevé, plus les contraintes résiduelles prévues par une modélisation avec écrouissage isotrope seront élevées. On peut atténuer ce résultat en utilisant un écrouissage isotrope avec de la restauration d'origine visqueuse, qui va compenser l'effet de l'écrouissage isotrope. Au contraire, un modèle à écrouissage cinématique a tendance à sous-estimer les contraintes résiduelles. Le comportement réel du matériau est souvent une combinaison des deux écrouissages.

4.5.4 Remarque sur les grandes déformations

La prise en compte des grandes déformations n'est en général pas indispensable pour une simulation du soudage sur structures épaisses. En revanche, ii les structures sont minces (fortes distorsions), il est nécessaire de les prendre en compte.
Dans *Code_Aster*, il existe deux possibilités pour tenir compte des grandes déformations dans l'opérateur STAT_NON_LINE :

- L'option PETIT_REAC adapté lorsque les rotations sont petites ;
- L'option SIMO_MIEHE pour une formulation exacte des grandes déformations, mais restreinte aux modèles à écrouissage isotrope.

4.5.5 Conditions aux limites

Retour d'expérience

- Fiche 3488 : La modélisation axisymétrique du soudage sur le 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.

4.6 Temps de calcul

On constate (en version STA9), aux travers de différentes études de soudage menées ces dernières années, que l'essentiel du temps calcul est consommé dans le calcul mécanique. Pour donner un ordre de grandeur, nous donnons deux exemples ci-dessous :

- Cas test HTNA100A qui considère un tube chanfreiné soudé en deux passes avec procédé TIG (fiche dite 3488) :
  - Nombre de nœuds = 3632
  - Modélisation : axisymétrique

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Temps CPU du calcul thermique = 307s
- Temps CPU du calcul métallurgique = 25s
- Temps CPU du calcul mécanique = 5169s

- Etude sur une plaque chanfreinée soudée en deux passes avec procédé TIG (fiche dite 2425)
  - Nombre de nœuds = 11600
  - Modélisation : 3D
  - Temps CPU du calcul thermique = 951s
  - Temps CPU du calcul mécanique = 64601s

Remarques

- Le calcul métallurgique éventuel ne coûte rien en temps calcul car il s'agit uniquement d'intégrer les modèles de comportement ; il n'y a pas d'équations d'équilibre à résoudre.
- Le temps mécanique pourrait être certainement amélioré si on considérait (lors de la résolution des équations d'équilibre mécanique par l'opérateur STAT_NON_LINE), dans la phase de prédiction, la dépendance du module d'YOUNG et peut-être du coefficient de dilation thermique, vis à vis de la température. Actuellement, seule est prise en compte, dans le second membre, la déformation thermique (en fait la dérivée).
- La partie mécanique étant un problème fortement non linéaire, il est souvent nécessaire d'utiliser la recherche linéaire dans le module STAT_NON_LINE afin de faciliter la convergence. De plus, un découpage adapté du pas de temps en fonction de l'évolution des températures permet de faciliter la convergence.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)