

Contraintes résiduelles de soudage dans l'acier 13-4

Etude paramétrique sur cas tests numériques de type « Satoh »

14EME COLLOQUE MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE DU SOUDAGE

17 MARS 2016

Paris, France

L. Depradeux*

* Lionel DEPRADEUX

EC2-Modélisation

66 bd Niels Bohr CS 52132

69 603 Villeurbanne Cedex, France

Problématique :

- Turbines en acier martensitique 13-4 pour l'industrie hydro-électrique
- Problématique de remplacement soudage TIG par soudage **faisceau d'électron FE**
- Usage de la SNS pour optimiser les procédures de soudage

- Nécessite d'avoir des **données matériaux** et des **modèles de comportements validés**
→ nécessite une BDD expérimentale : Quels essais élémentaires réaliser?

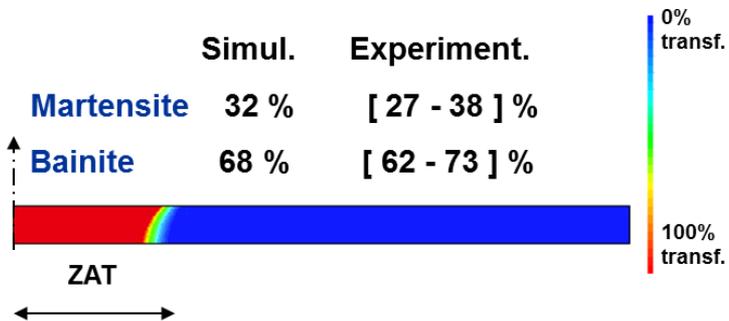
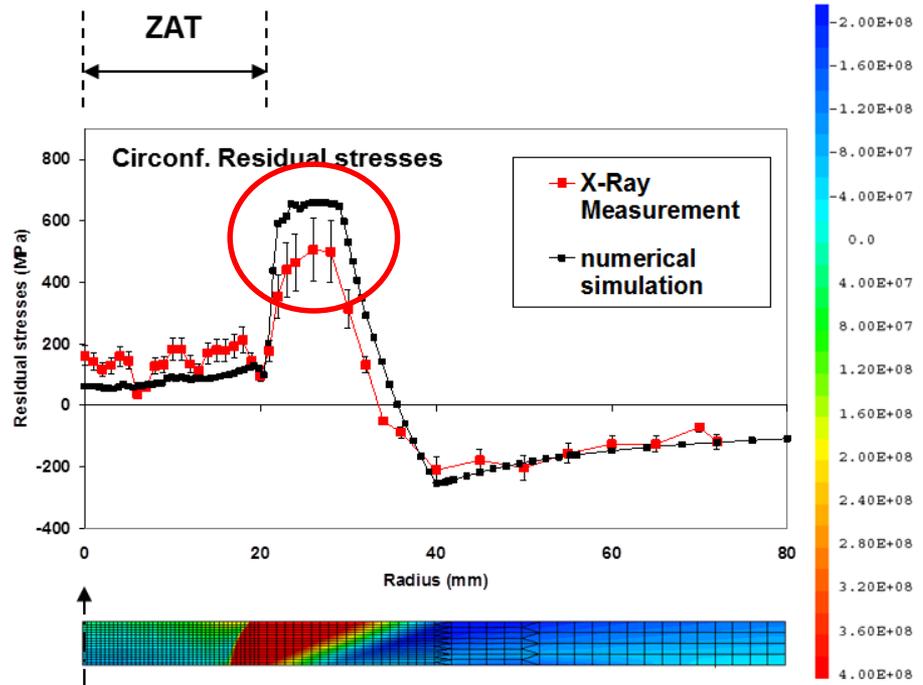
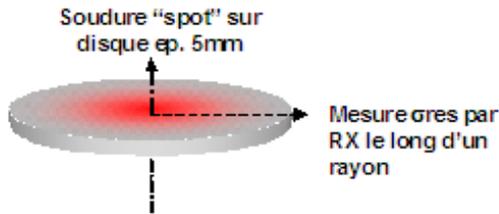
But de l'étude :

- Optimiser les caractérisations à réaliser grâce à des études paramétriques préliminaires sur des cas tests élémentaires
 - Comprendre les mécanismes de formation des contraintes résiduelles pour cet acier
 - Identifier les phénomènes et paramètres les plus influents
 - Définir un programme de caractérisation pour alimenter les BDD

- Etude focalisée sur les **contraintes**
- Calculs réalisés avec le logiciel Code_Aster

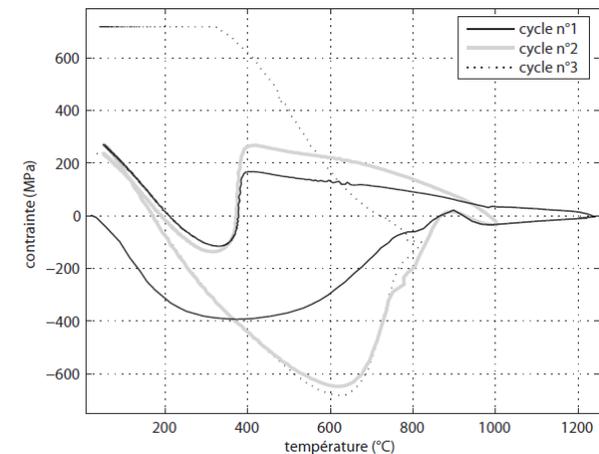
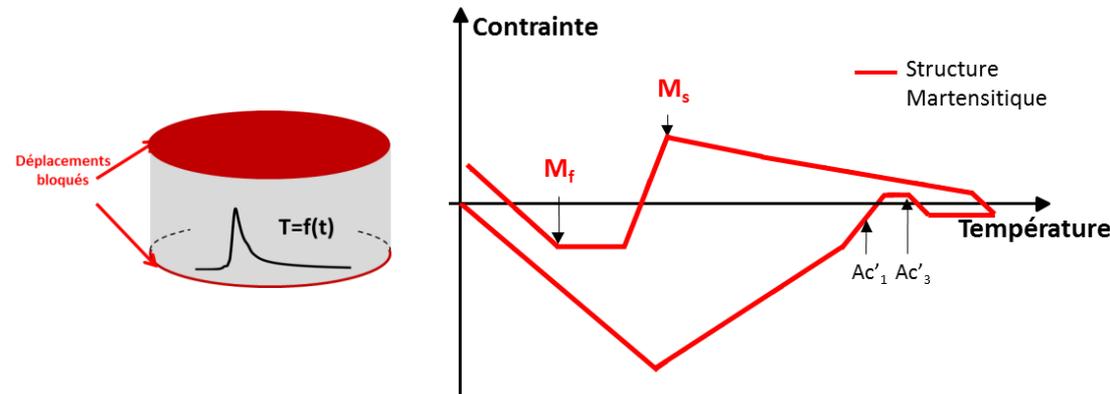
Remarque : Importance de valider le modèle pour la description des zones partiellement austénitisées (recouvrement de soudage) : les ZPAT sont le siège de fortes contraintes

Exemple : disque INZAT : acier 16MND5 ([Vincent2002])



Réalisation d'une BDD expérimentale :

- **Nombreux phénomènes mis en jeu :**
 Thermiques, métallurgiques, mécaniques
- **Problème :** quels essais réaliser ?
- **Afin d'optimiser les essais, une analyse paramétrique numérique est effectuée sur un cas test élémentaire mettant en jeu les principaux phénomènes intervenant lors du soudage :** essais de type **Satoh** (dilatométrie bloquée)



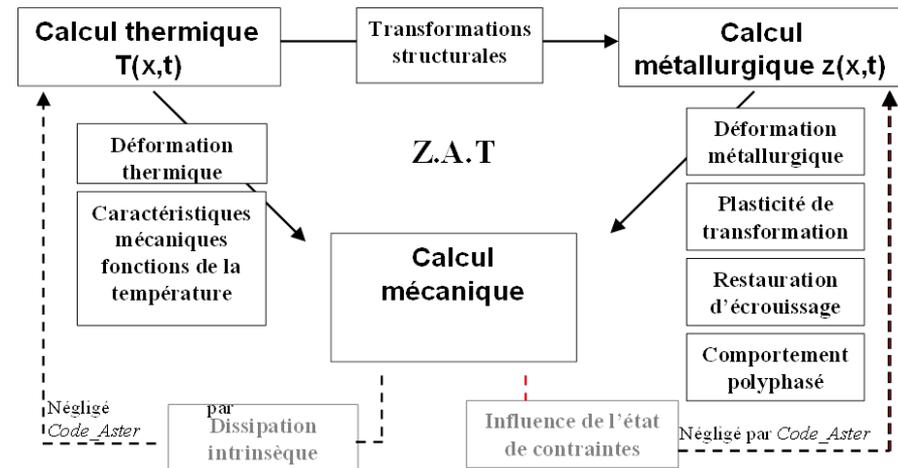
Ex. Résultats expérimentaux [Roux07]

Modélisation d'essai « Satoh » :

- Cycle thermique représentatif d'un cycle de soudage FE
- Un ou plusieurs cycles thermiques
- Avantages :
 - Calculs très rapides
 - Phénomènes faciles à dissocier et à analyser (1D)

Mise en donnée :

- Transformations de phases :
 - Austénitique : modèle de Leblond
 - Martensitique : modèle de K-M
- Caractéristiques EP des différentes phases
- Ecrouissage isotrope, cinématique, mixte,
- Ecr. linéaire ou non linéaire
- Plasticité de transformation (modèle de Leblond)
- Restauration d'écrouissage

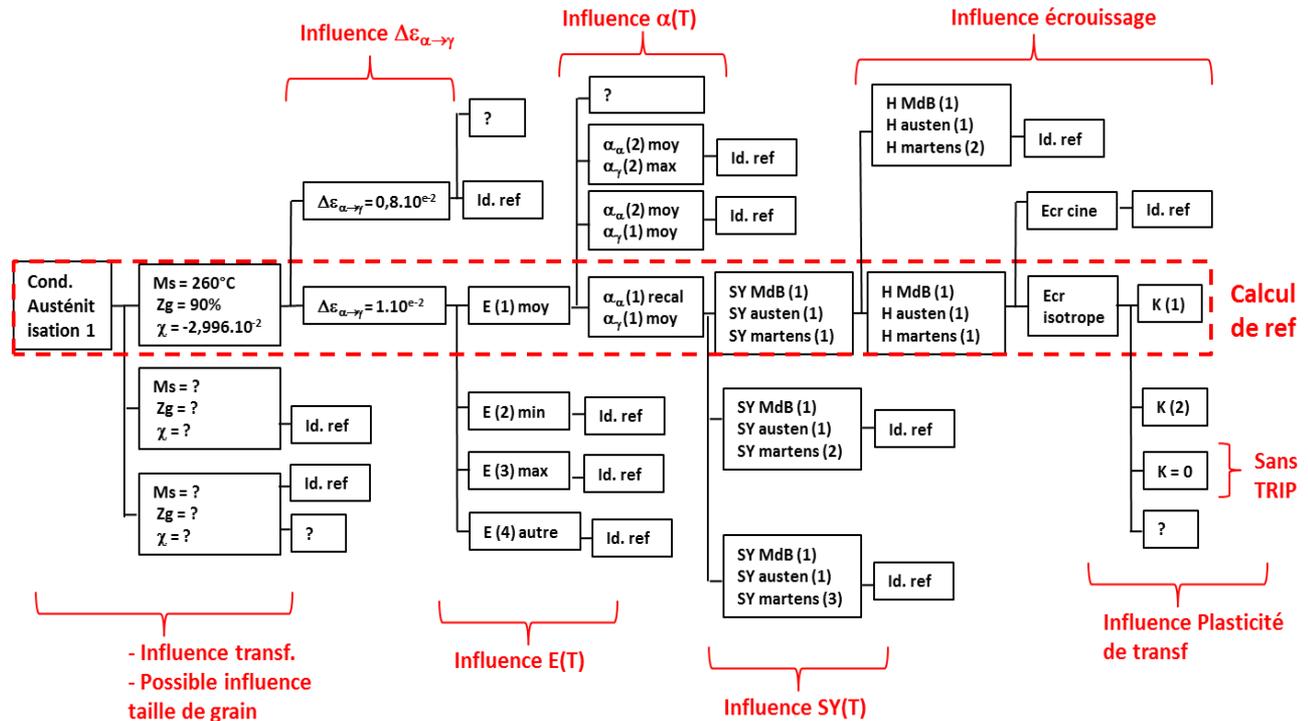


Choix des paramètres :

- Etude biblio :
 - Etablissement valeurs « de référence » / dispersion (valeurs « min » et « max »)
 - Quelles valeurs sont totalement inconnues?

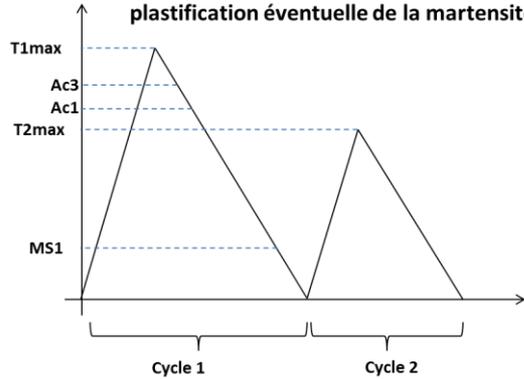
Influence :

- Caractéristiques élastiques :
E, nu
- Caractéristiques plastiques :
SY, H, type ecr.
- Plast. de transf (TRIP)
- Températures Ms/Mf /
cinétique KM
- Coef dilatations
alpha/gamma
- Diff. Compacité



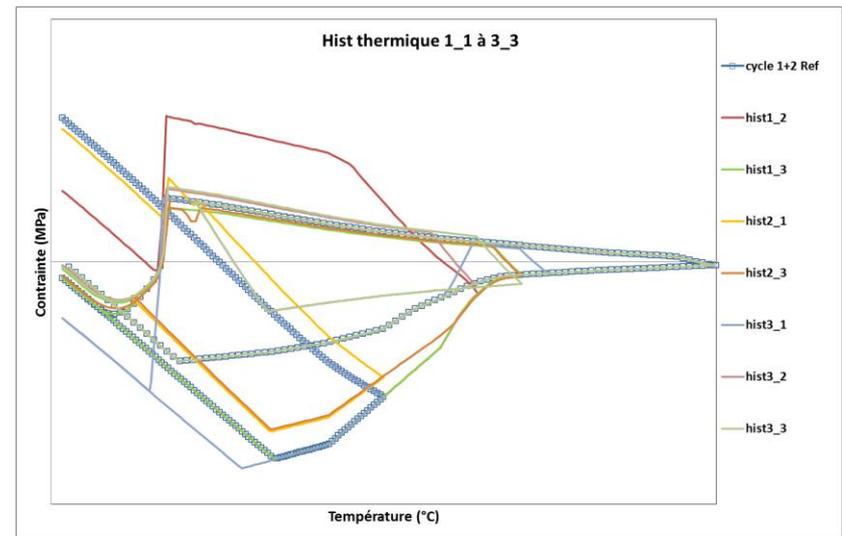
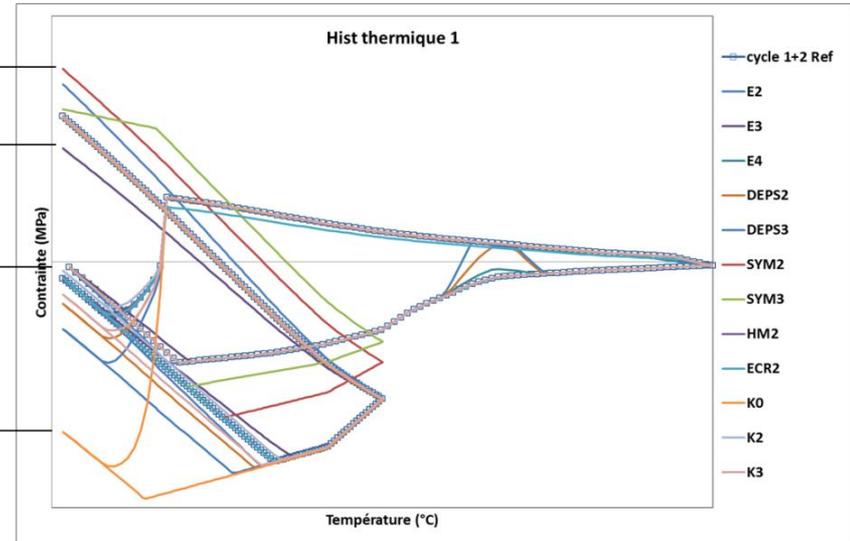
Résultats étude paramétrique

- 1^{er} cycle avec austénitisation
- 2nd cycle : sans austénitisation mais avec plastification éventuelle de la martensite



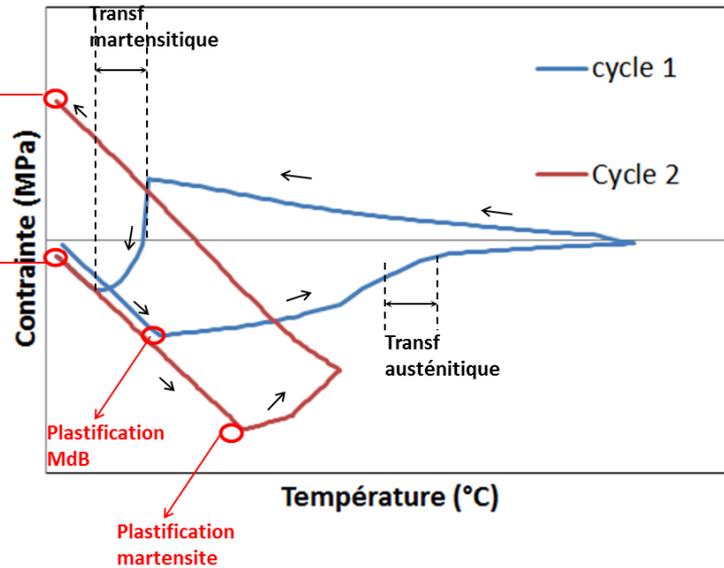
Variations sur le second cycle : () MPa

Variations sur le premier cycle : () MPa



Contrainte résiduelle fin cycle 2

Contrainte résiduelle fin cycle 1



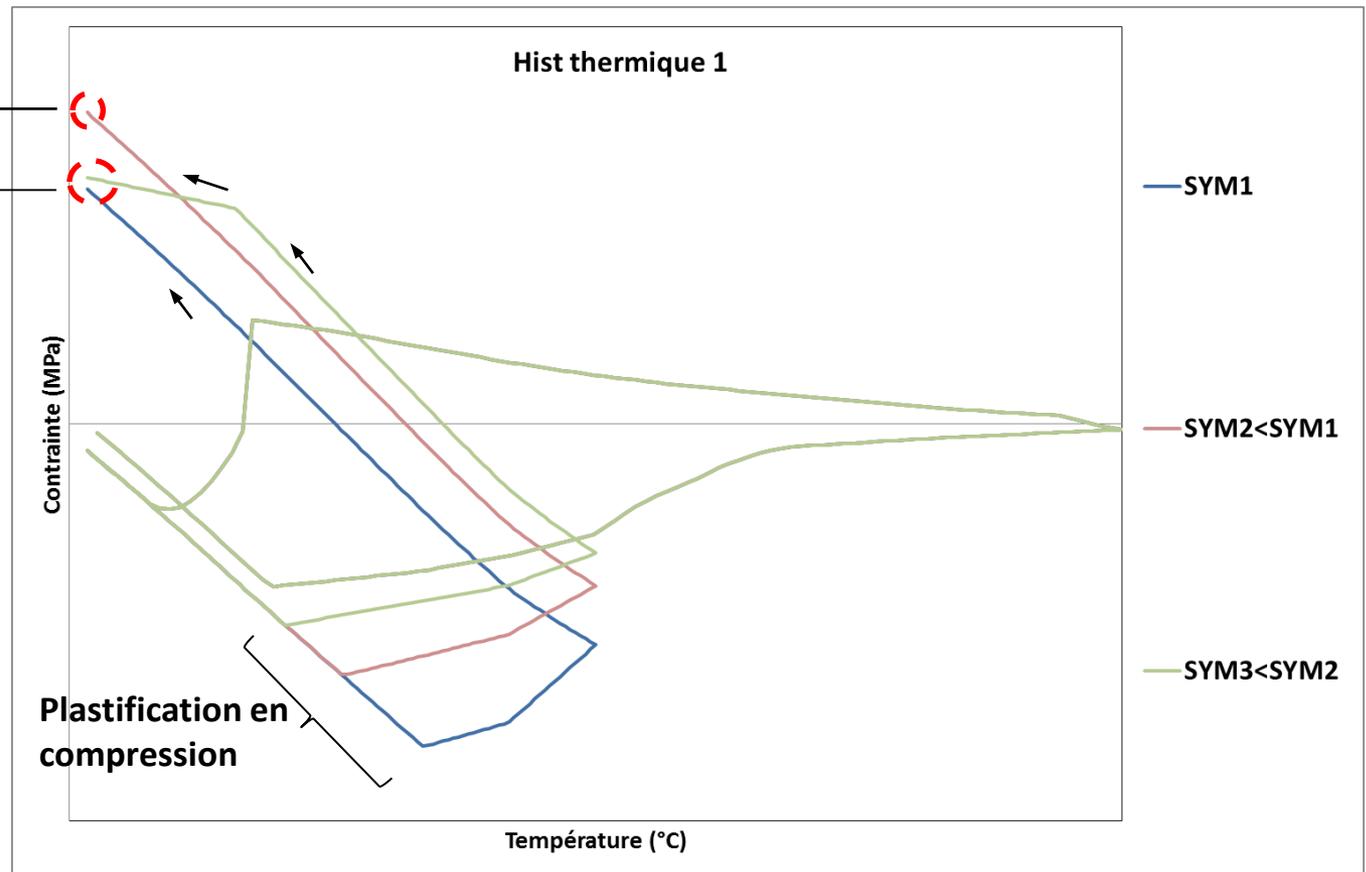
Modélisation d'essai « Satoh » :

- Résultats étude paramétrique :

Remarques : certains résultats sont anti-intuitifs!

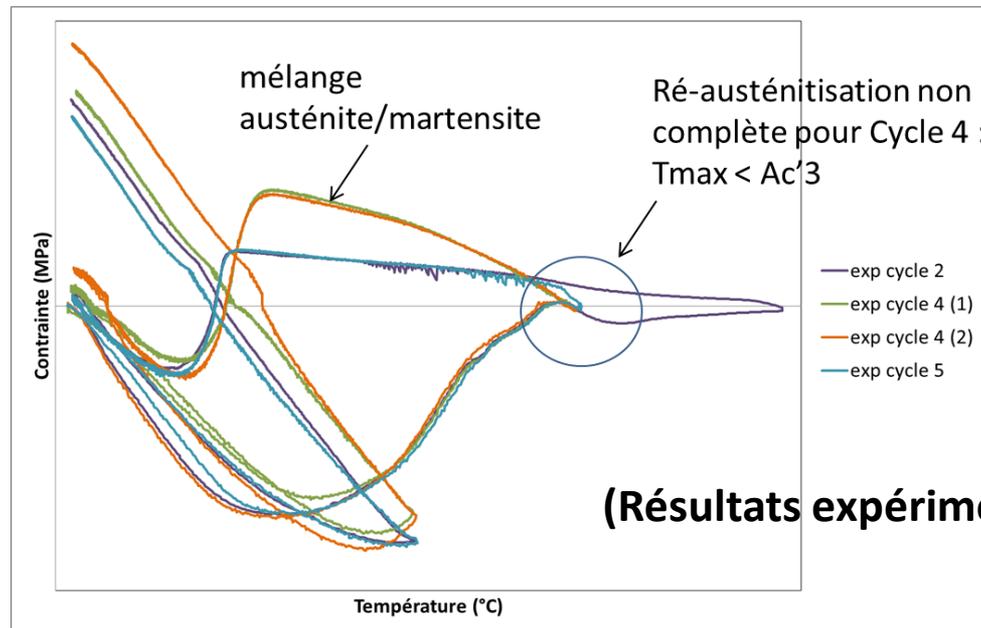
SYM2 : limite d'élasticité plus basse que SYM1, mais contrainte finale plus élevée !

SYM3 : comportement différent mais contrainte finale identique



Résultats et validation de l'étude paramétrique :

- Identification des données les plus influentes
- Sensibilité des différents paramètres
- Définition d'essais de caractérisation ciblés : uniquement sur les données sensibles
- Paramètres peu influents : données « biblio » suffisant
- Validation du modèle ainsi constitués : Essais Satoh **expérimentaux**
- Avec austénitisation complète ou **partielle** lors du second cycle

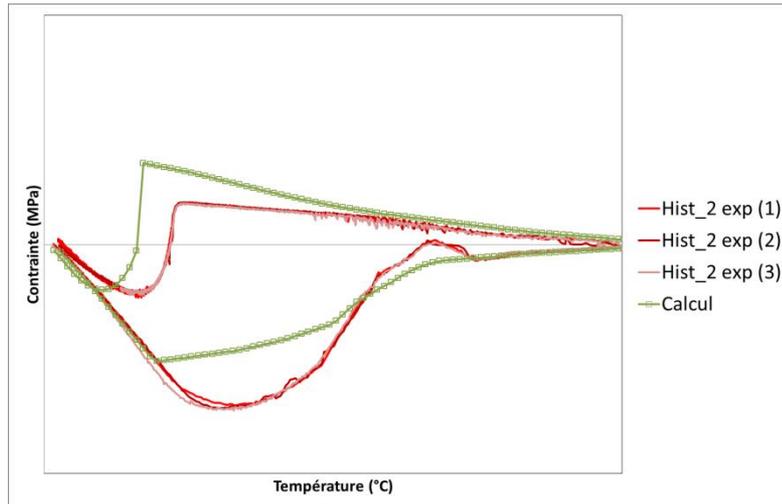


(Résultats expérimentaux)

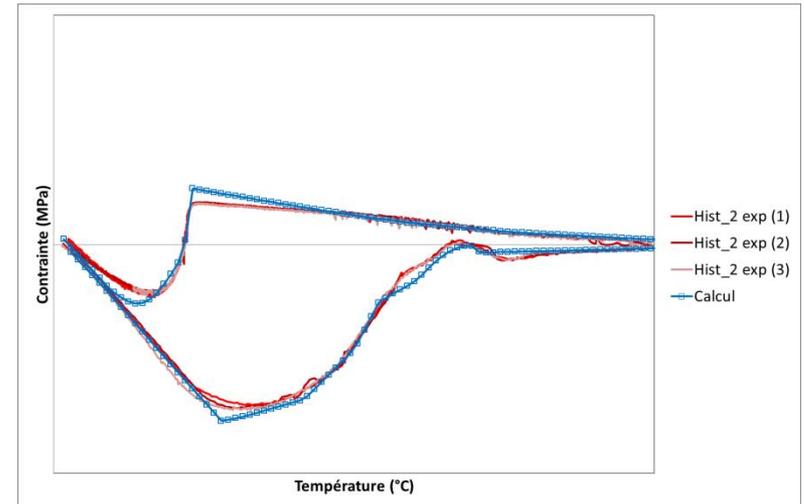
Modélisation d'essai « Satoh » :

- Comparaison calcul-essai : cas d'un unique cycle thermique avec transformation complète

calcul « en aveugle »
 (données avant caractérisation)



calcul après caractérisation

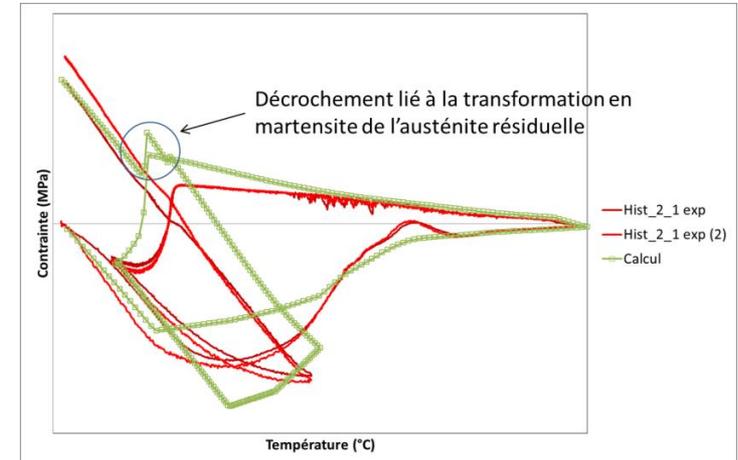
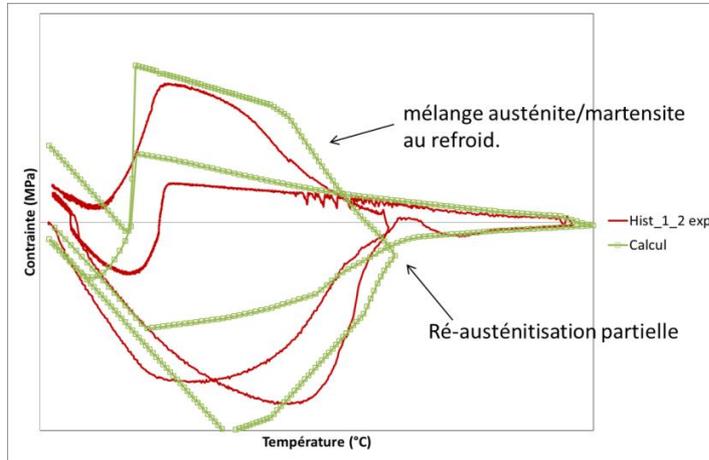


Remarque : La contrainte finale est correctement évaluée!

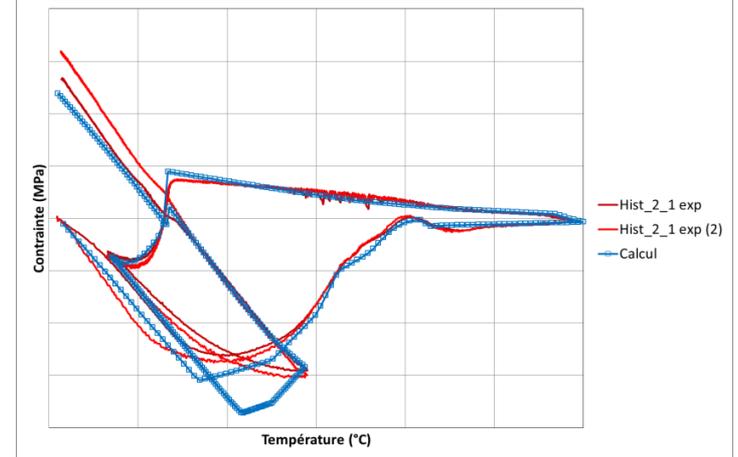
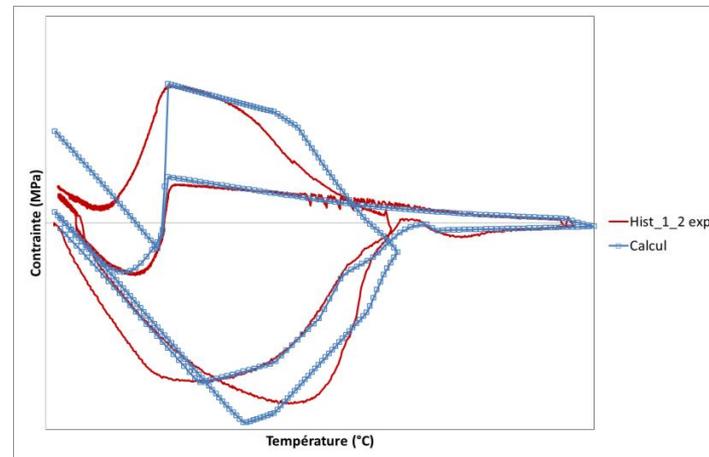
Modélisation d'essai « Satoh » :

- Comparaison calcul-essai : cas de deux cycles avec **transformation austénitique partielle** lors du second cycle

calcul avant caractérisation

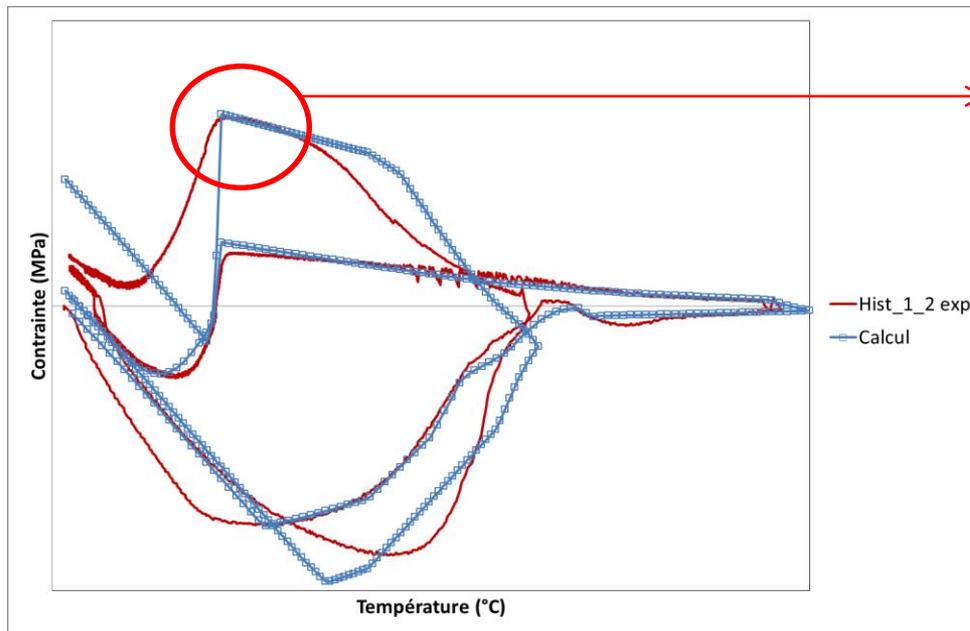


calcul après caractérisation



Modélisation d'essai « Satoh » :

- Limitation du modèle « classique »



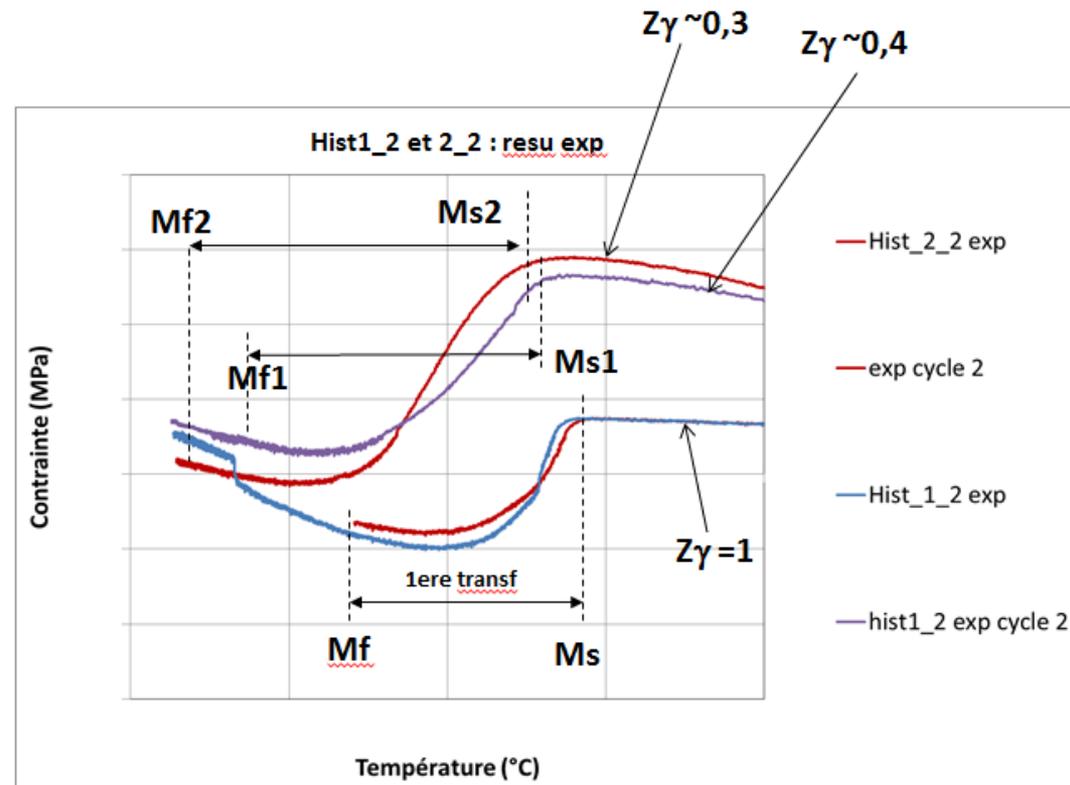
Limitation du modèle dans le cas de la transformation au refroidissement d'un mélange austénite-martensite

Modélisation d'essai « Satoh » :

- Amélioration de la cinétique de transformation martensitique dans le cas d'un mélange austénite martensite au refroidissement

Observations expérimentales :

- La température M_s dépend des proportions austénite/martensite du mélange lors du refroidissement
- La cinétique dépend également de ces proportions



Amélioration de la cinétique de transformation martensitique dans le cas d'un mélange austénite martensite au refroidissement :

Modification de l'implémentation de la transformation martensitique

- Ajout d'une variable interne Z_x = taux d'austénite résiduelle au franchissement de M_s
- Transformation traitée en incrémental $Z_m(i) = Z_m(i-1) + \Delta Z_m$

- Modification de M_s en fonction du taux d'austénite résiduelle Z_x

Hyp. : la transformation se poursuit à partir de la valeur de la dernière température atteinte au refroidissement : $M_s(Z_x) = M_{s0} - \ln(Z_x)/\chi$

- Modification de la cinétique au refroidissement en fonction du taux de martensite résiduel Z_x :

Si $Z_x = 1$: on doit retrouver la cinétique de K-M initiale

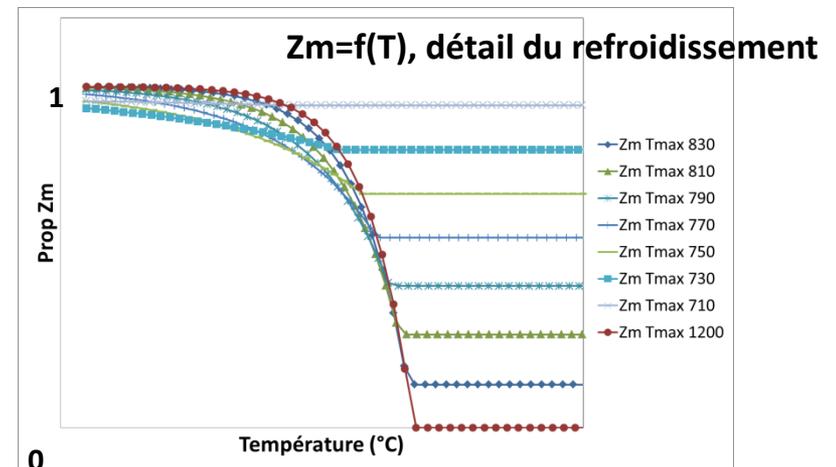
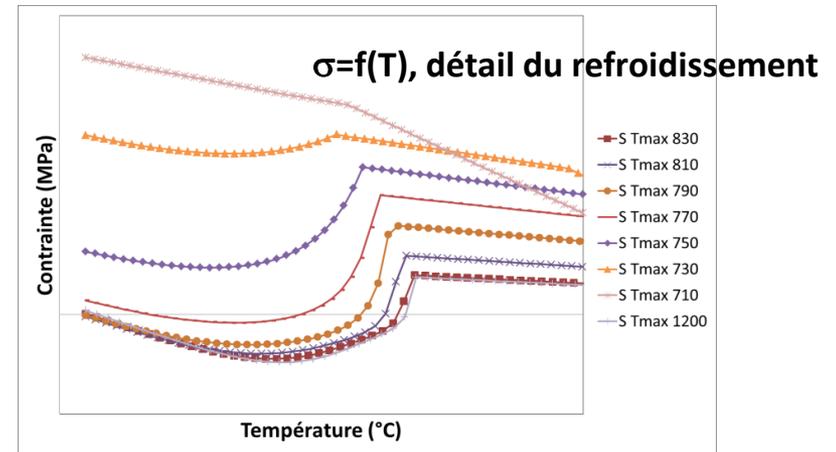
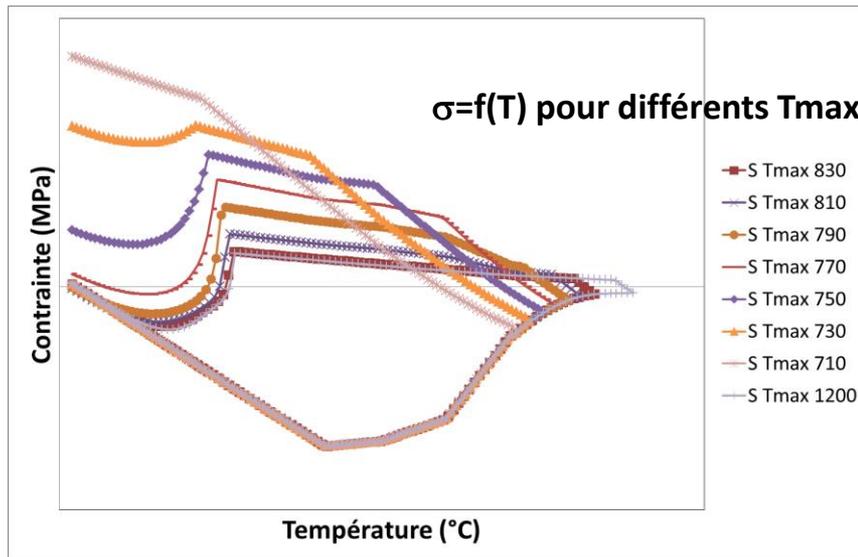
Si $Z_x \rightarrow 0$: la cinétique devient infiniment lente ($\Delta Z_m \rightarrow 0$)

Si $0 < Z_x < 1$: on conserve la cinétique de K-M, mais en modifiant le paramètre χ de la cinétique de K-M en fonction de Z_x

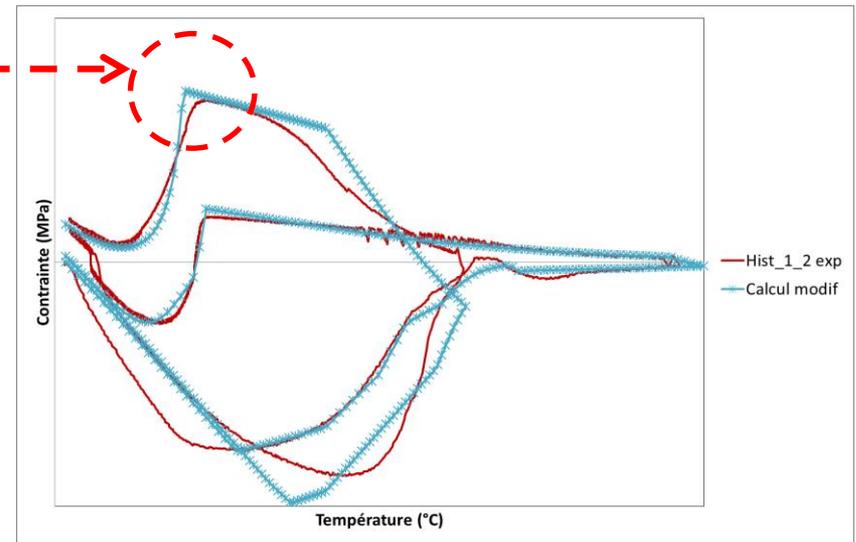
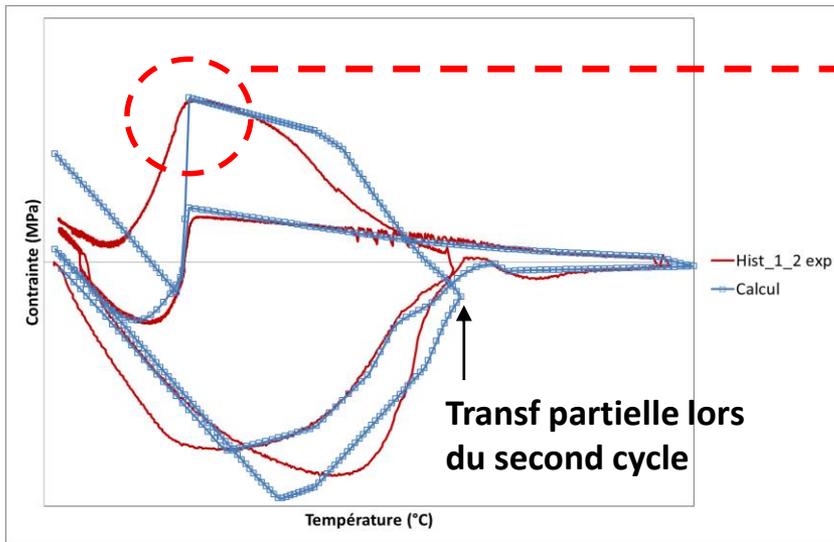
En première approche, on pose : $\chi(Z_x) = \chi \cdot Z_x$

$$Z_M = Z_x \cdot [1 - \exp(\chi(M_s - T))]$$

Calcul de la cinétique au refroidissement pour différents taux d'austénite Z_x

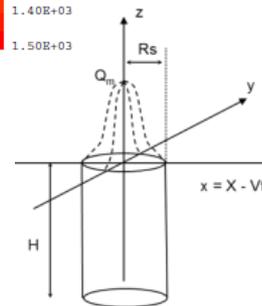
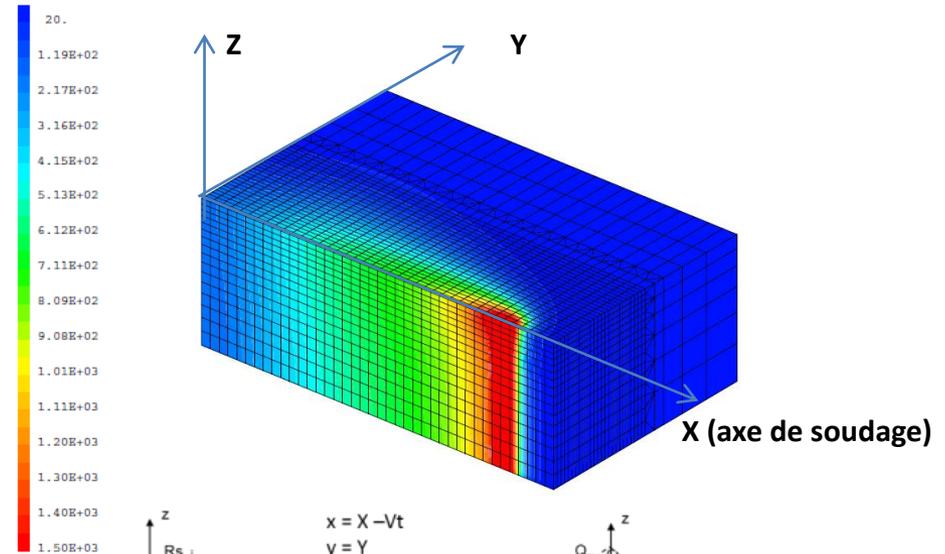
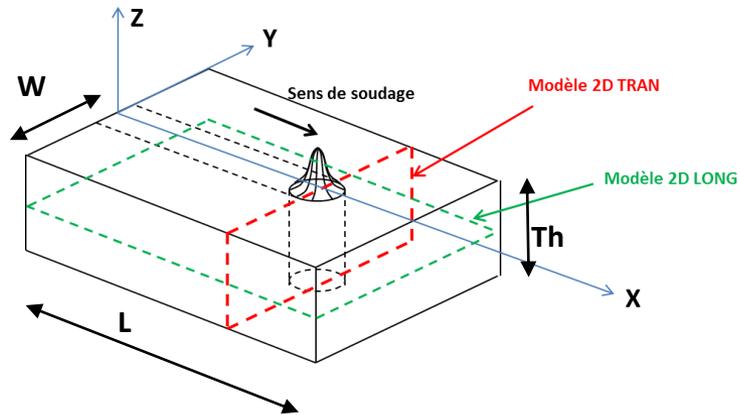


Validation du nouveau modèle de transformation :

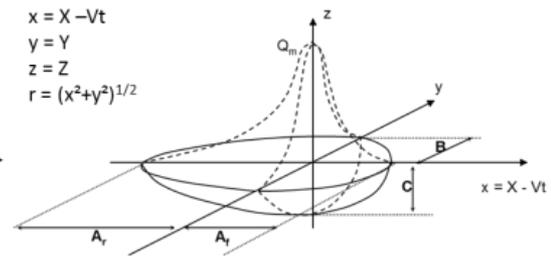


→ La contrainte finale est correctement évaluée!

Mise en œuvre du modèle validé sur un essai 1D dans le cas de premières simulations du soudage FE :

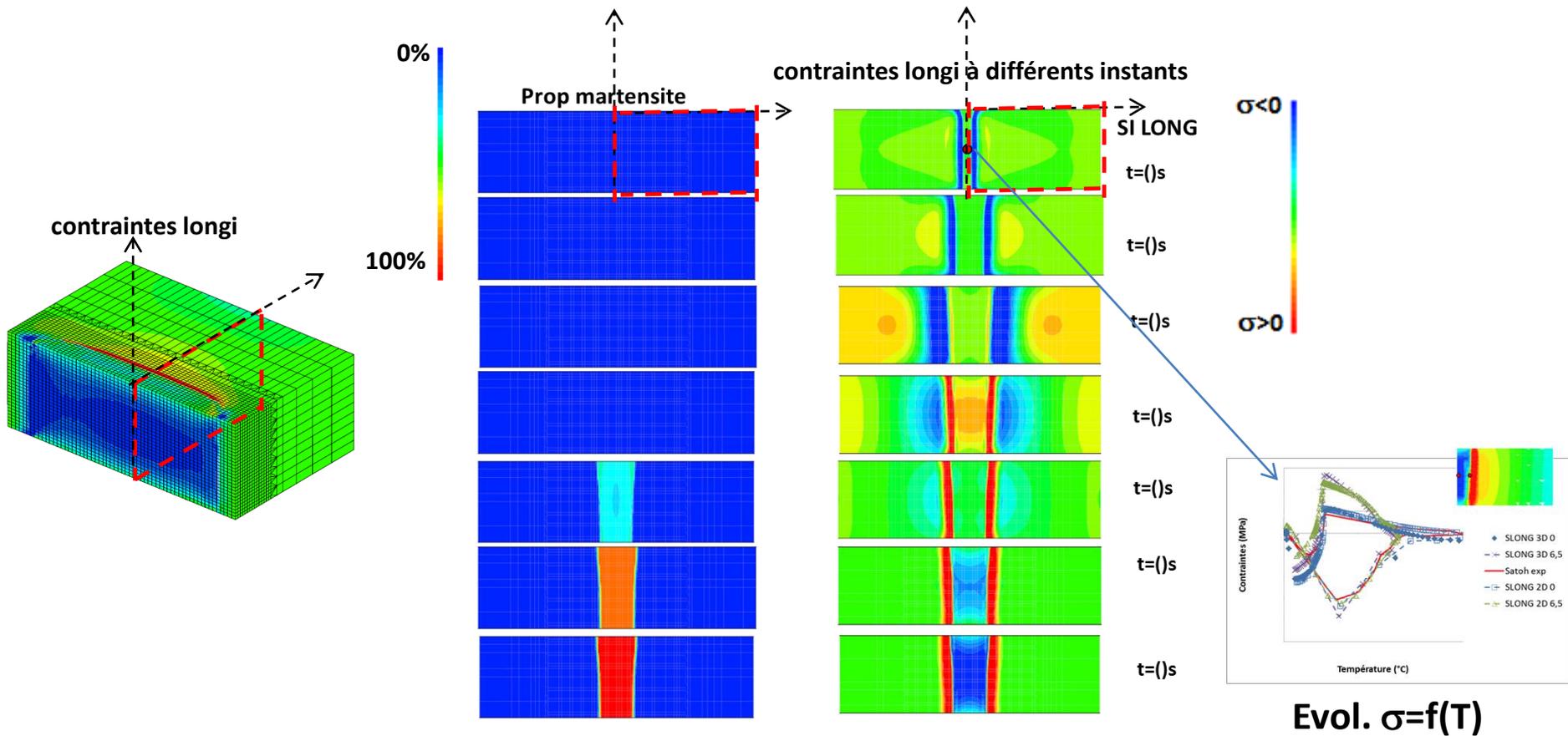


Source 1
 Dans l'épaisseur

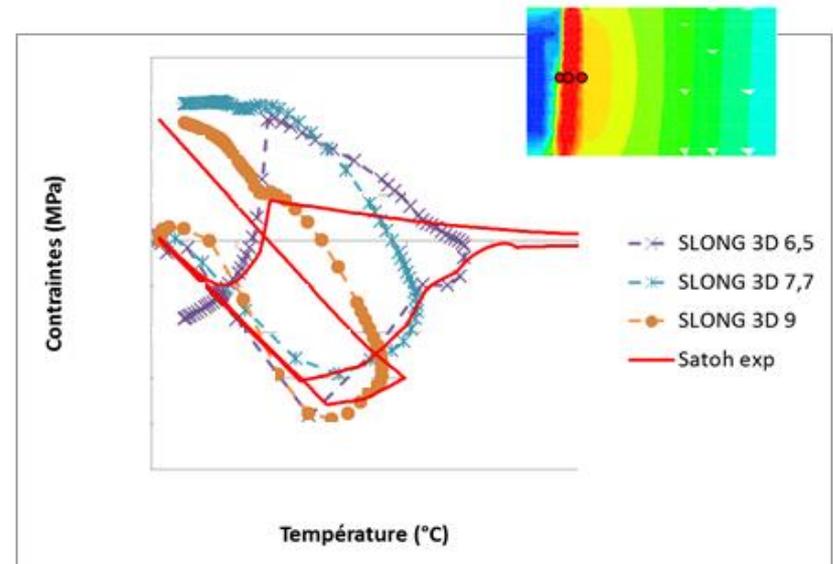
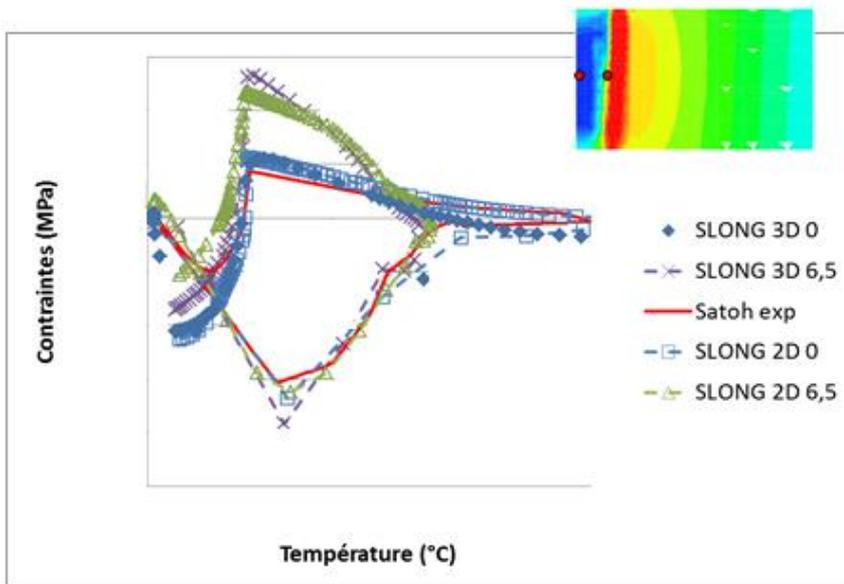


Source 2
 Vers surface sup.

Mise en œuvre du modèle validé sur un essai 1D dans le cas de premières simulations du soudage FE: évolution des contraintes longi dans un plan perpendiculaire au soudage



Mise en œuvre du modèle validé sur essai 1D dans le cas de premières simulations du soudage FE: évolution des contraintes longi dans un plan perpendiculaire au soudage



Conclusions :

- **Optimisation des essais à réaliser à partir d'études paramétriques sur cas test numériques élémentaires**
- **Réalisation des essais et validation des modèles**
- **Mise en évidence des limites du modèle dans le cas des zones partiellement austénitisées**
- **Amélioration du modèle de transformation martensitique et validation expérimentale**
- **Mise en œuvre d'une simulation soudage FE avec les modèles ainsi optimisés**

Perspectives :

- **Comparaison calculs- mesures d'après les tests sur maquettes de soudage FE**