

14^{EME} COLLOQUE MODÉLISATION ET SIMULATION NUMÉRIQUE DU SOUDAGE
"COMMENT LES MODÈLES ET LEURS CARACTÉRISATIONS EXPÉRIMENTALES
INFLUENCENT LES RÉSULTATS D'UNE SIMULATION NUMÉRIQUE"

Modélisation des opérations de soudage et de parachèvement dans le cas de structures métalliques du Génie Civil

17 mars 2016

Intervenant : Lamine Dieng

Co-authors : D. Amine,
S. Chataigner,
L. Gaillet

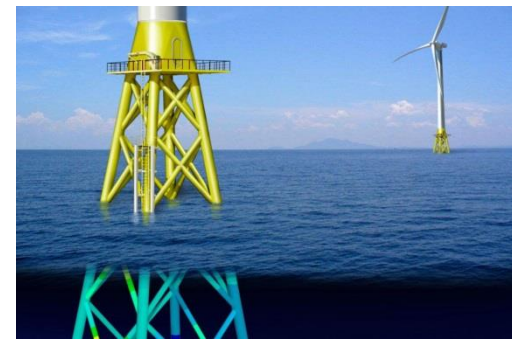
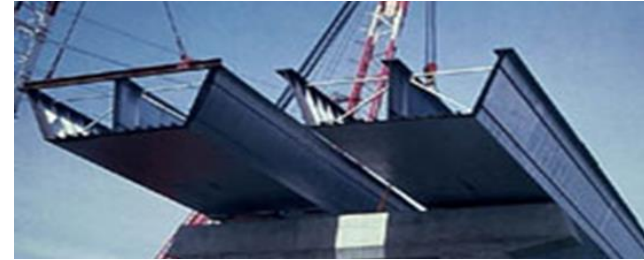


IFSTTAR

Structures métalliques :

Contexte

- Depuis les années 1970, les structures métalliques ont regagné un intérêt certain.
- Acier permet des structures soudées très compétitives
 - **Ouvrages d'art** : Bipoutres, caissons, ponts,...
 - **Offshore, naval** : Bateaux, Jacket EMR,...
 - **Aéronautiques, automobiles** : Tuyauteries, Crépine,...
- En **neuve** ou en **réparation**



Structures métalliques :

Questions/Verrous

Durabilité des structures soudées : fatigue, corrosion

- Prise en compte de l'état initial non standard.
- L'identification expérimentale de l'état de la structure (évolution des contraintes résiduelles).
- Modélisation théorique des phénomènes.
- L'optimisation des processus et le prolongement de la durée de vie.
- Application industrielle des processus.



Structures métalliques :

Objectifs/Plan

1. Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

- Choix des types d'éprouvette et la technique de soudage.
- Mesure par DRX des contraintes résiduelles de surface.
- Modélisation EF du soudage.
- Évaluation des contraintes résiduelles après refroidissement.

2. Parachèvement de la soudure:

- Choix de la technique de parachèvement (meulage, grenaillage).
- Mise en œuvre expérimentale de ces techniques de parachèvement.
- Modélisation numérique du parachèvement.

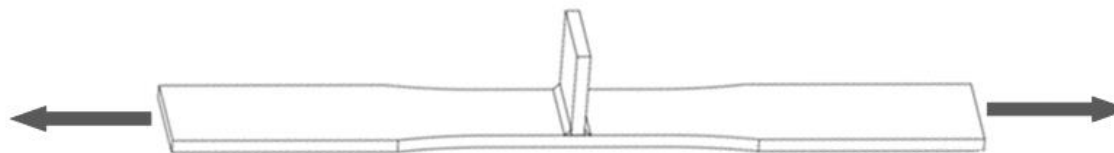
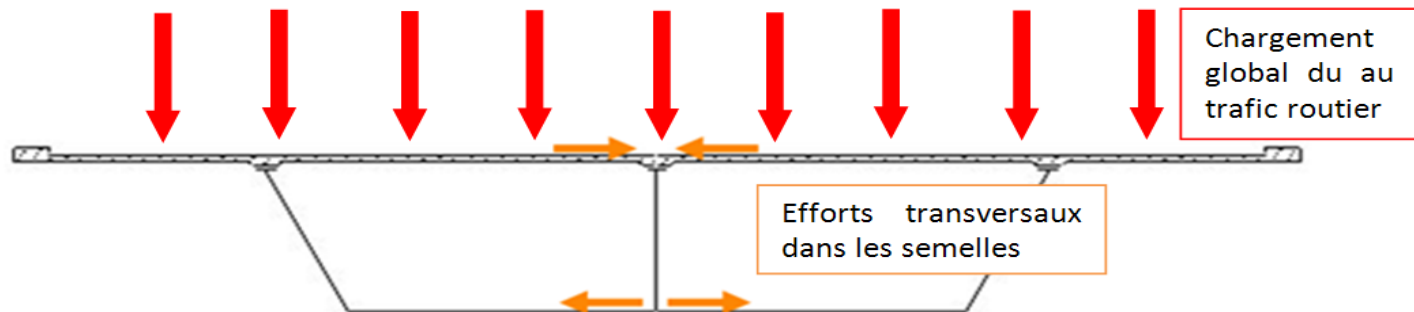
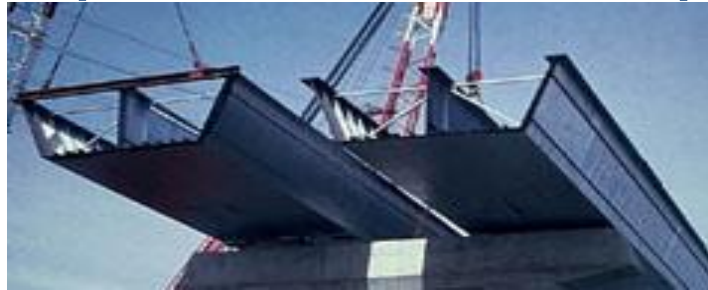
3. Evaluation de la durabilité en terme de fatigue:

- Essais de fatigue
- Suivi de la fissuration
- Modèles de fatigue et de fissuration adaptée pour les structures soudées.



Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

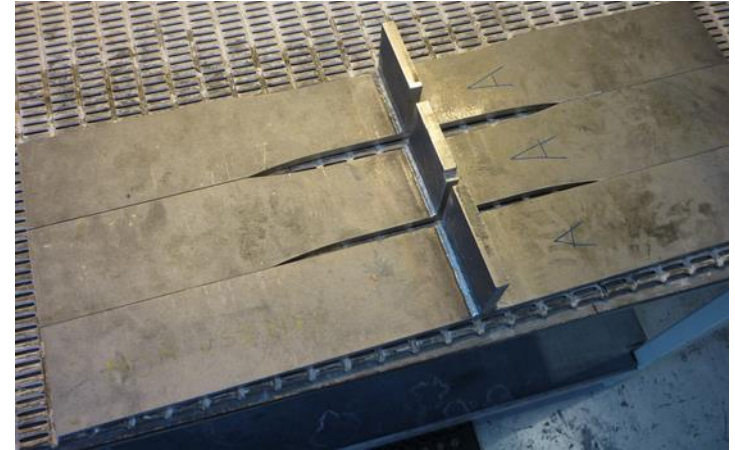
- Cas étudié (caisson métallique de pont):



Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

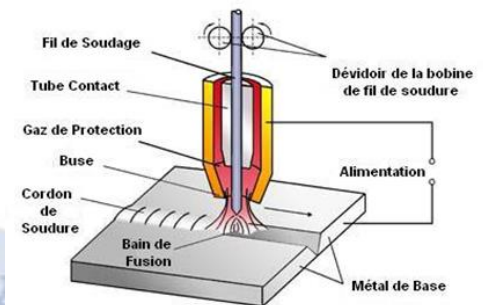
• Détail des éprouvettes:

- Assemblages soudés en « T »
- Nuance d'acier S355
- Dimensions:
 - 900 x 120 (100) x 15 mm pour la tôle
 - 100 x 120 (100) x 15 mm pour le renfort
- Soudure par procédé MAG (Metal Active Gas)



• Conséquence de la soudure:

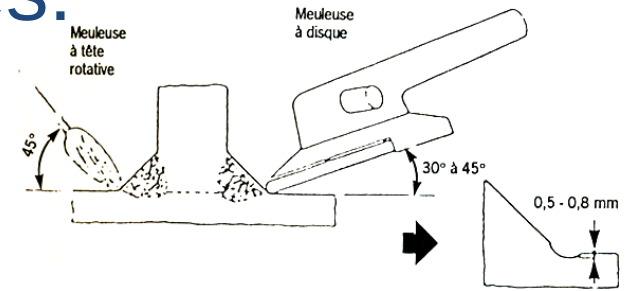
- Création de contraintes résiduelles autour du cordon de soudure.



Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

• Mesure DRX sur 3 éprouvettes:

- Epreuve N°1 vierge
- Epreuve N°2 Meulée
- Epreuve N°3 Grenaillée



• 7 points de mesure par éprouvette:

- Point A1-centre
- Point A1-Intermédiaire
- Point A1-Bord
- Point B1-centre
- Point B1-Intermédiaire
- Point B1-Bord
- Point B1-Ref

3 profils ont été réalisés de chaque côté du renfort (côtés A et B) sur environ 1 mm de profondeur, et dans deux directions

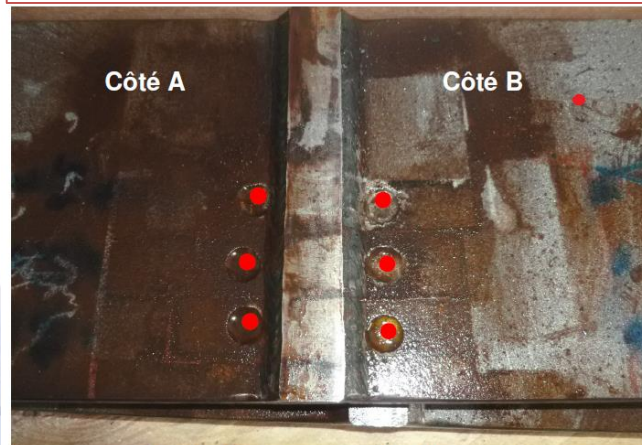
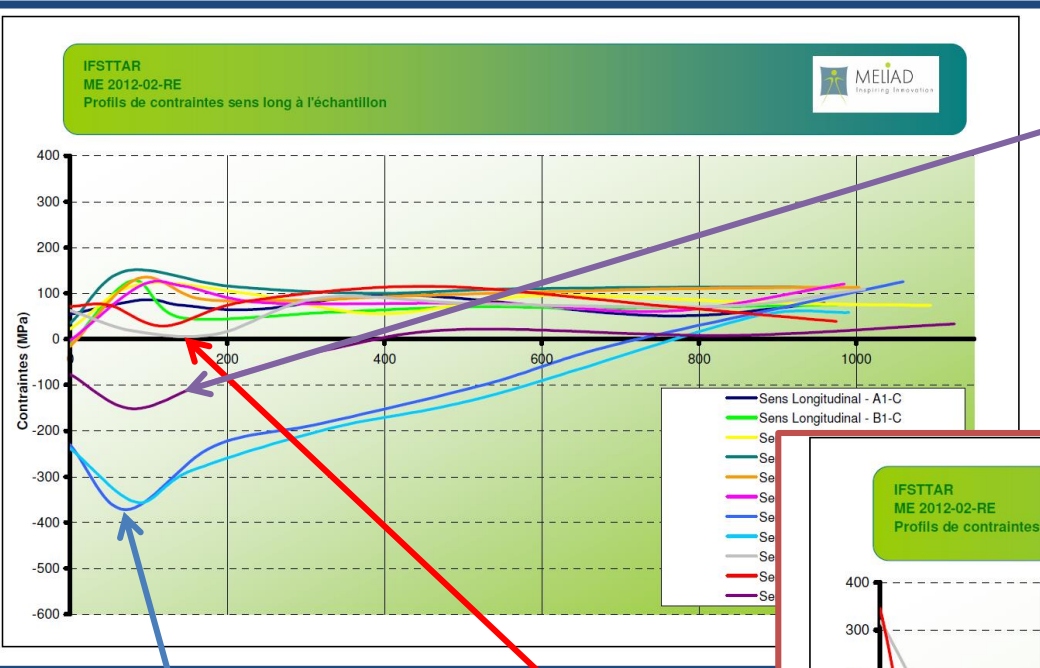


Photo N°1 : Epreuve N°1 vierge

Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

Contraintes Longitudinales



*Echantillon de référence
interne non contraint :
poudre ferritique*

Contraintes transversales



Ep. Meulée

Ep. Grenillée

Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

• Géométrie

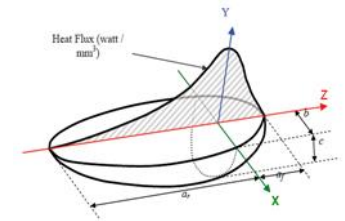
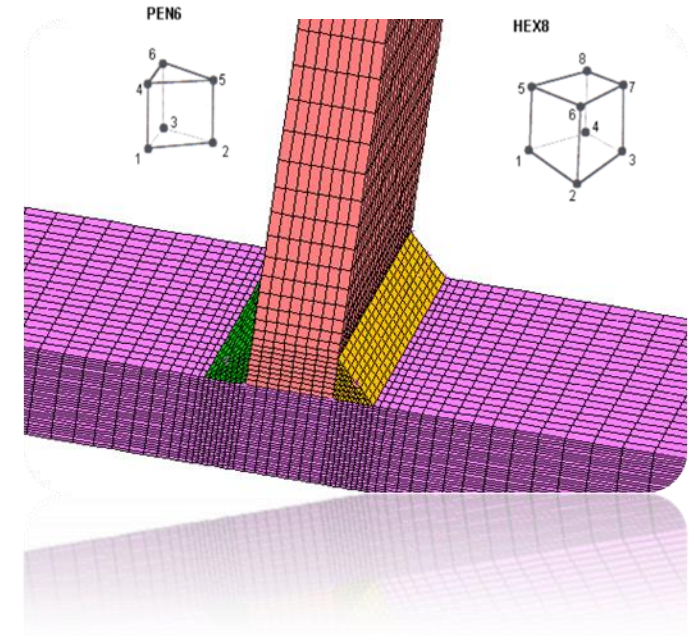
- Assemblage en T
- Éléments Hexa8 et Penta6

• Matériau

- Acier à carbone 0,22% - C22.
- Comportement thermo- mécanique
($E, \alpha, C_p, K, \epsilon_p, \epsilon$)= $f(T)$
- Loi de comportement élastoplastique

• Modélisation du soudage

- Température initiale homogène de l'assemblage: 30°C.
- Température de fusion de l'acier C22: 1538°C.
- Source de chaleur de soudage (modèle de Goldak-1984).



Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

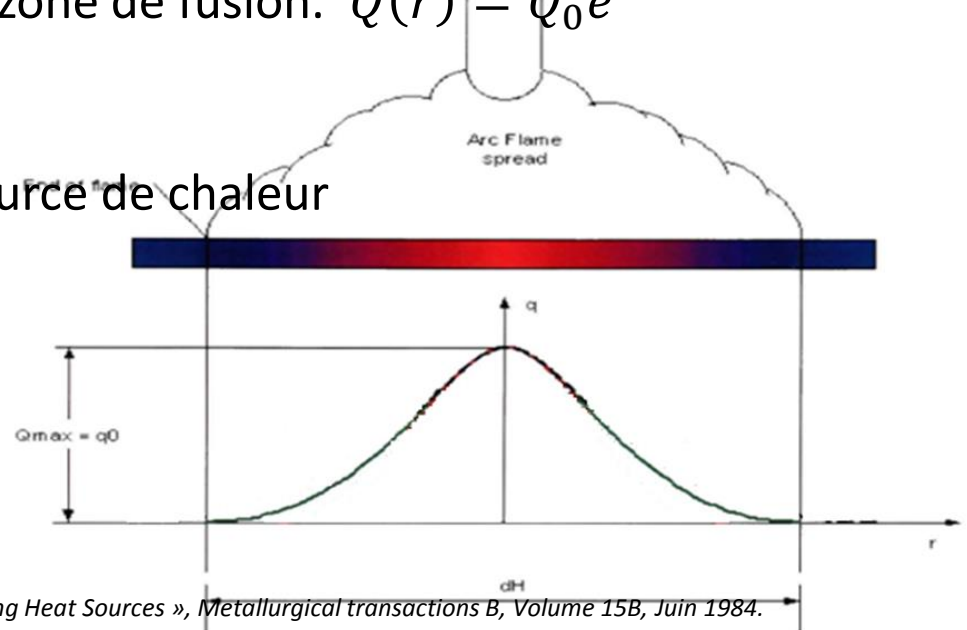
Modélisation du soudage : Source de chaleur

La forme de la source de chaleur peut être définie par une surface circulaire ou par un volume double ellipsoïdal.

Pavelic a suggéré une distribution gaussienne du flux sur une surface circulaire.

Le disque de Pavelic, combiné à l'analyse par éléments finis, donne une bonne distribution de la température dans la zone de fusion. $Q(r) = Q_0 e^{-cr^2}$

- $Q(r)$ flux surfacique
- Q_0 flux maximal
- r distance radiale du centre de la source de chaleur



J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, « A new Finite Element Model for Welding Heat Sources », *Metallurgical transactions B*, Volume 15B, Juin 1984.

Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

Modélisation du soudage : Source de chaleur

Une alternative a été proposée par Friedman (1975) puis par Krutz et Segerlind (1978) → Un modèle tridimensionnel à double ellipsoïdal.

Il consiste à exprimer le disque de Pavelic en fonction d'un système de coordonnées qui bouge avec la source.

Une coordonnée locale ξ est introduite et l'équation du disque dans le système de coordonnées local devient (J. GOLDAK, 1984) :

$$q(x, \xi) = \frac{3Q}{\pi c^2} e^{-3x^2/c} e^{-3\xi^2/c}$$

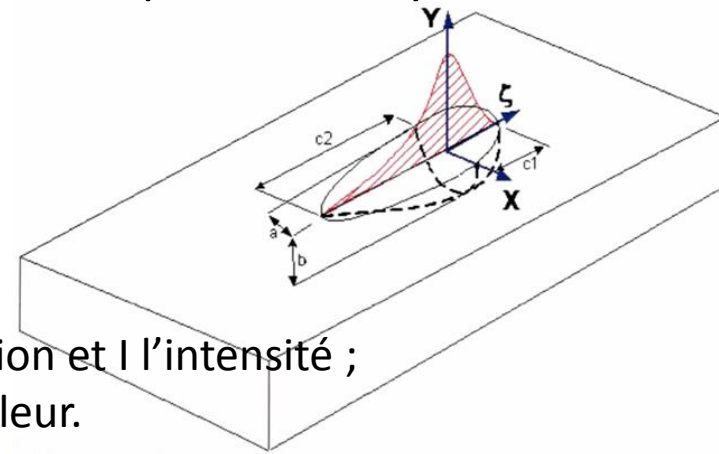
q : la vitesse du flux de chaleur par unité d'air,

$Q = \eta VI$: la puissance appliquée avec η l'efficacité, V la tension et I l'intensité ;

c : le rayon caractéristique de la distribution du flux de chaleur.

ξ : la coordonnée locale le long de la trajectoire de soudure.

x : la coordonnée locale tangente à la trajectoire de soudure.



1

Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

Modélisation du soudage : Paramètres

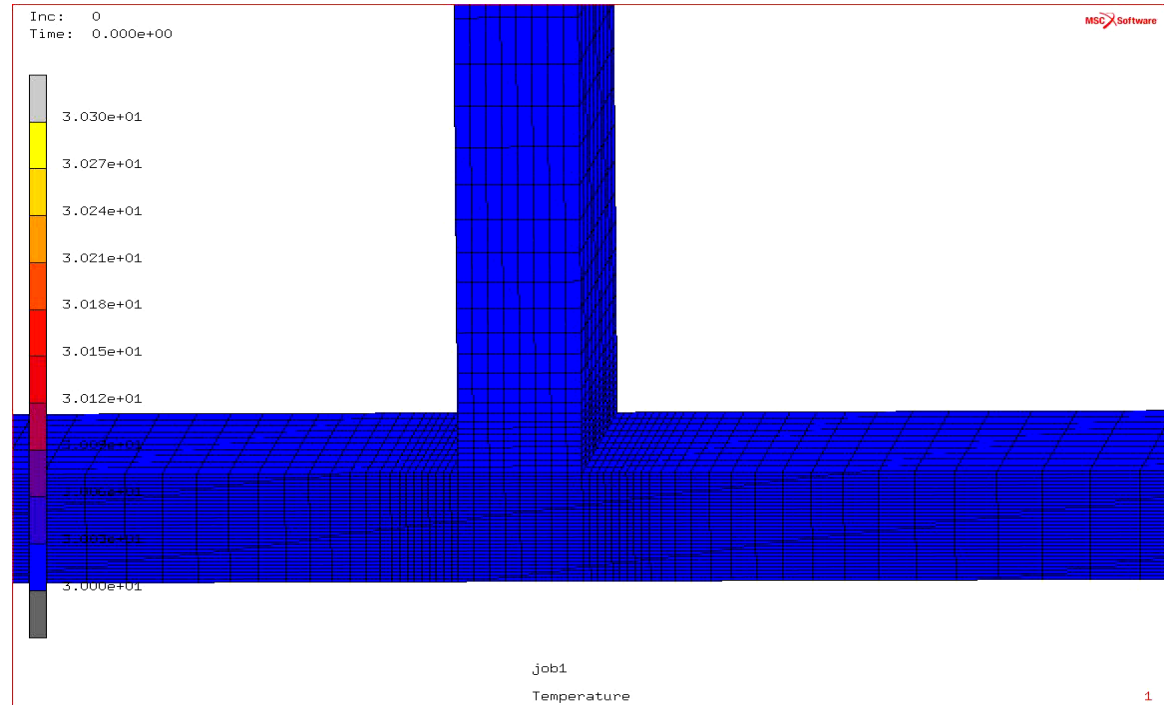
Paramètres Choisis

Température ambiante = 30 C

Température de fusion = 1480 C

Maillage : Cordon de soudure =
8x8 éléments (M3)

Conditions aux limites : Bords
encastres (soudage) et libres
(refroidissement)



Creation du 1er
cordon de soudure

- Encastrement des bords
- soudure : 12.5 secondes

Refroidissement

- bords libres
- Durée du refroidissement 700 secondes

Creation du 2eme
cordon de soudure

- Encastrement des bords
- soudure : 12.5 secondes

Refroidissement

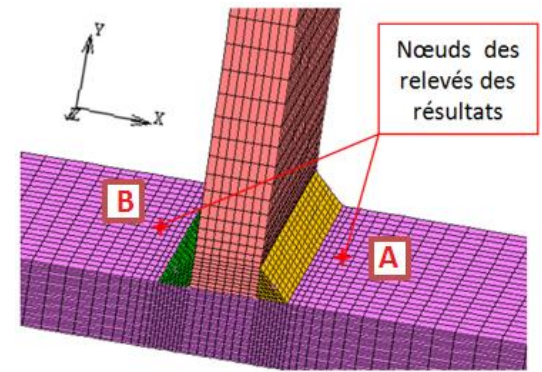
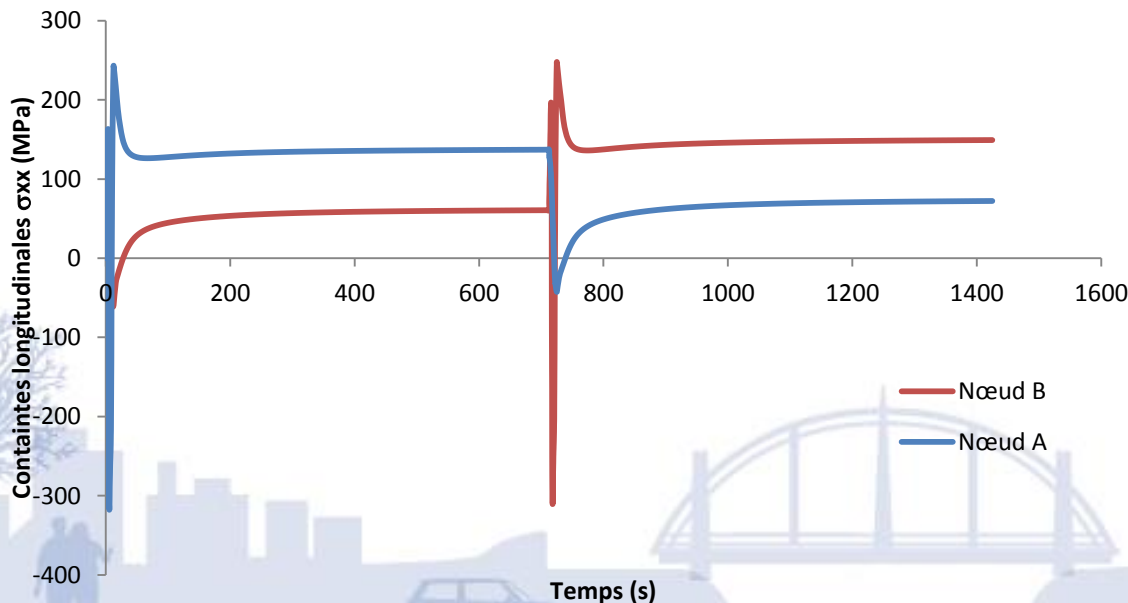
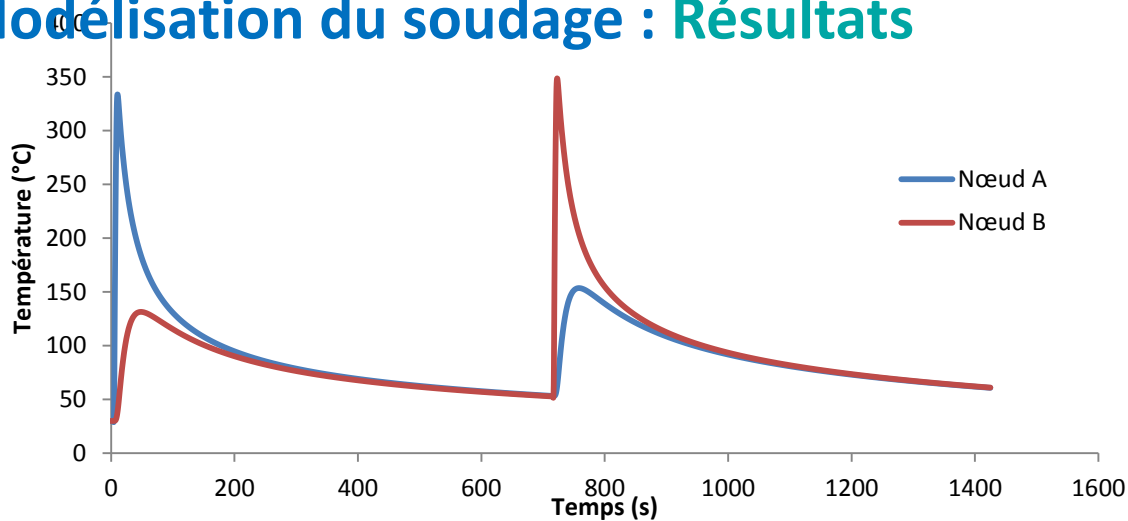
- bords libres
- Durée du refroidissement 700 secondes

www.ifsttar.fr

1

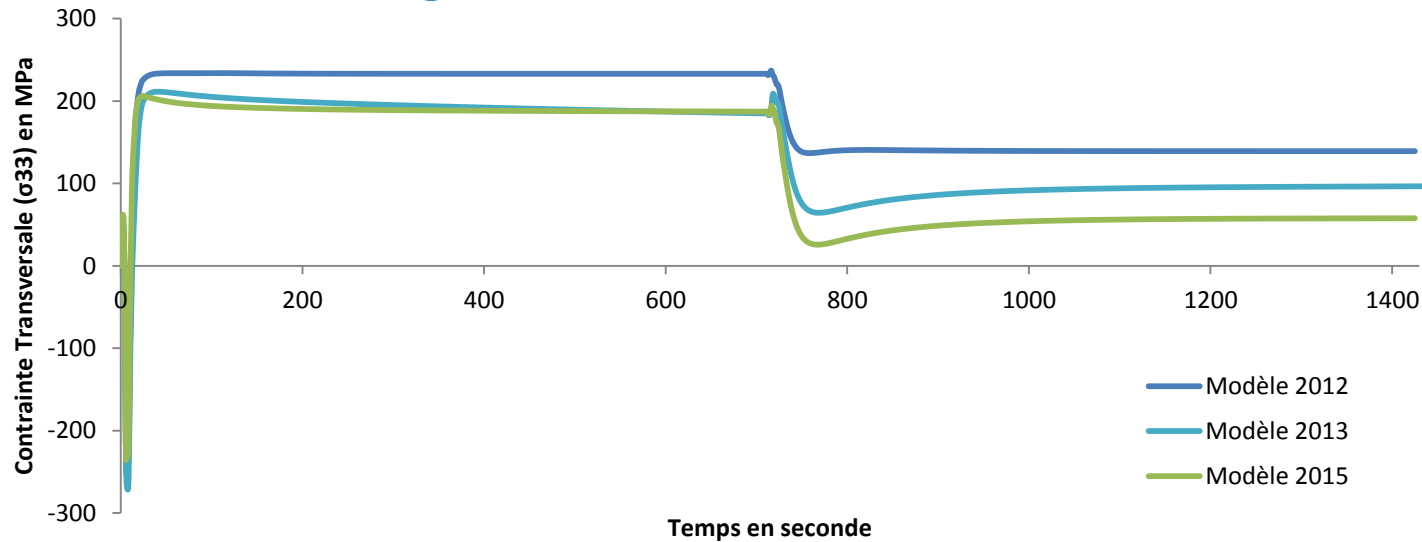
Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

Modélisation du soudage : Résultats



Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

Modélisation du soudage : Résultats

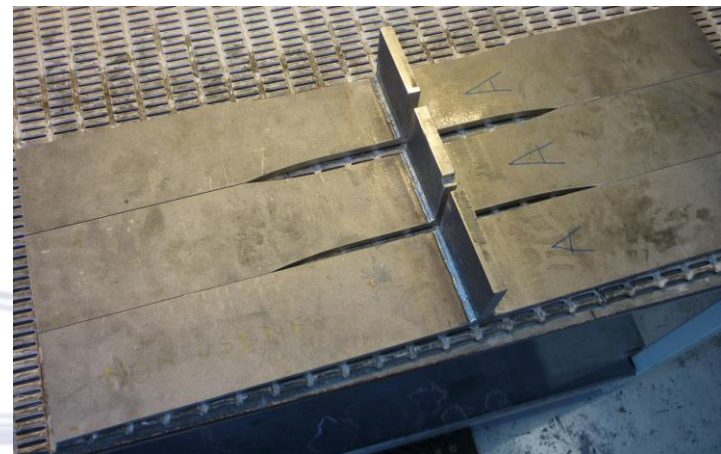
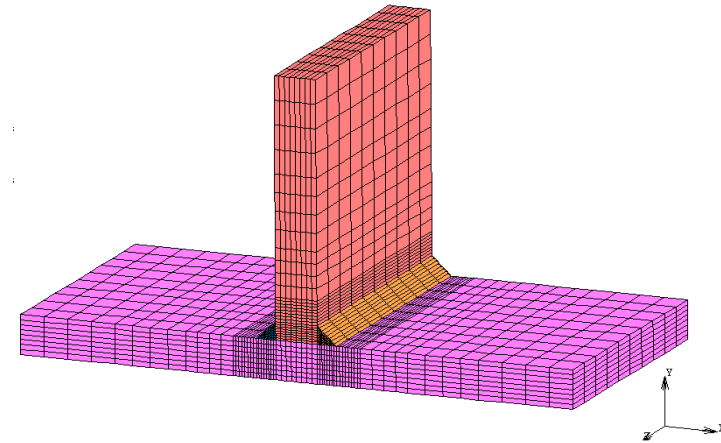
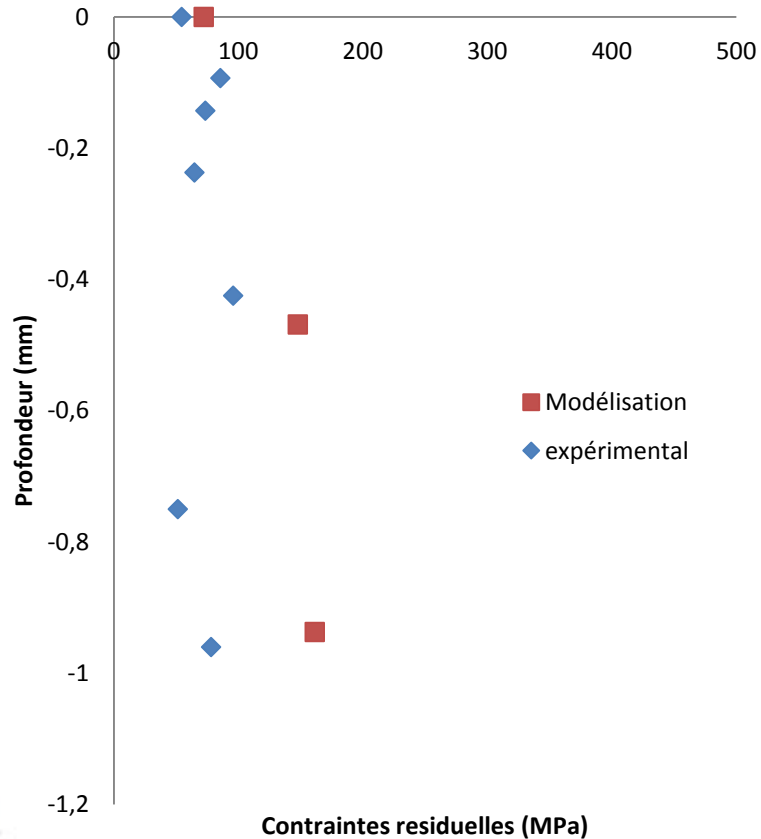


	Modèle 2012	Modèle 2013	Modèle 2015
Température de fusion	1200°C	1538°C	1480°C
Température ambiante	20°C	30°C	30°C
Echange thermique	Convection	Convection + rayonnement	Convection + rayonnement
Conditions aux limites	Bords encastres	Bords encastres	Bords encastres pendant le soudage et libres pendant le refroidissement

1

Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

Modélisation du soudage : Résultats



Structures métalliques :

Plan

1. Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

- Choix des types éprouvette et la technique de soudage.
- Mesure par DRX des contraintes résiduelles de surface.
- Modélisation EF du soudage.
- Évaluation des contraintes résiduelles après refroidissement.

2. Parachèvement de la soudure:

- Choix de la technique de parachèvement (meulage, grenailage).
- Mise en œuvre expérimentale de ces techniques de parachèvement.
- Modélisation numérique du parachèvement.

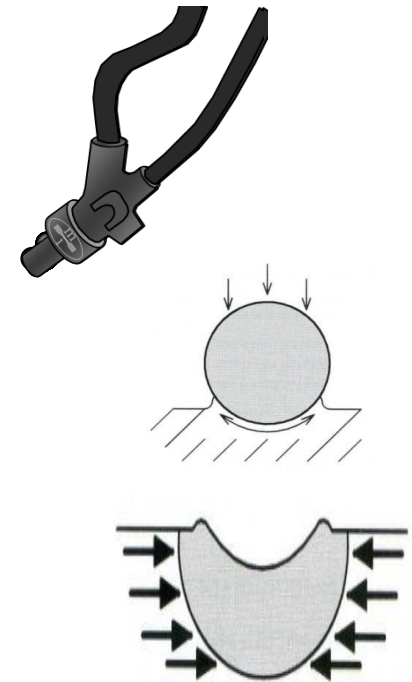
3. Evaluation de la durabilité en terme de fatigue:

- Essais de fatigue
- Suivi de la fissuration
- Modèles de fatigue et de fissuration adaptée pour les structures soudées.



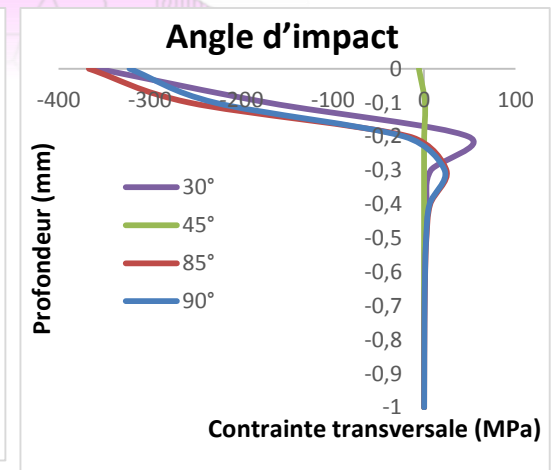
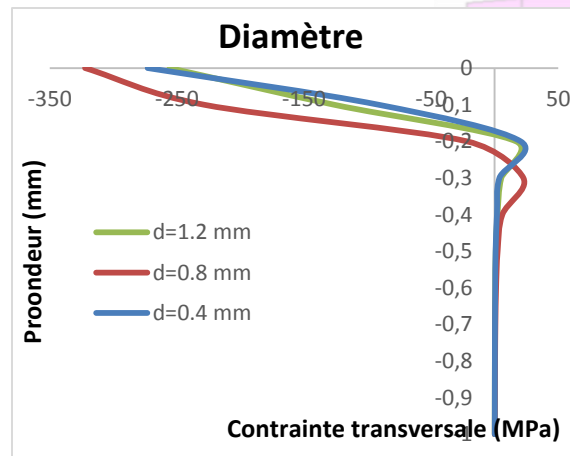
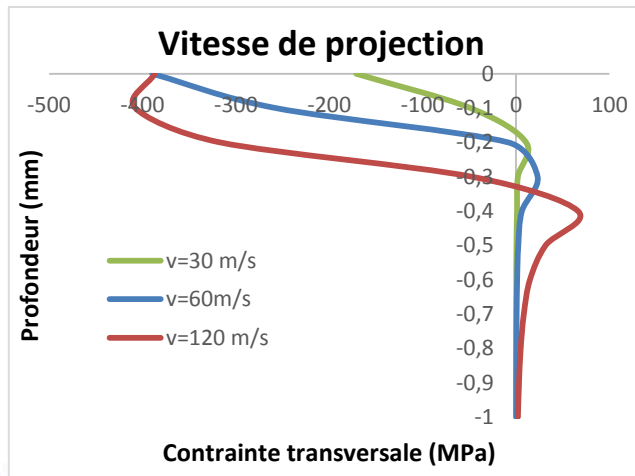
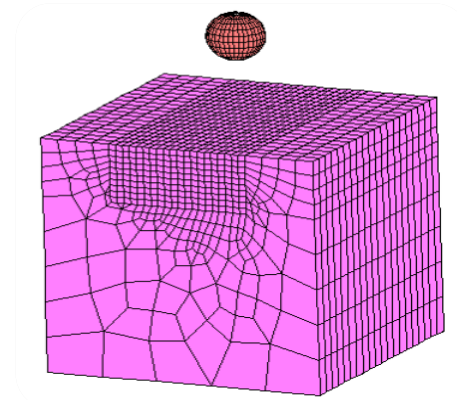
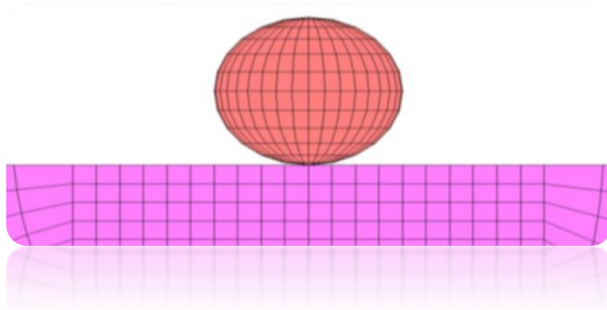
2 Parachèvement des soudures

Grenailage : Définition



2 Parachèvement des soudures

Grenailage : Etude paramétrique



Paramètres de la bille

- Vitesse = 60 m/s
- Diamètre = 0.8 mm
- Angle d'impact = 90°

② Parachèvement des soudures

Grenailage : Etude paramétrique

Géométrie



Matériaux

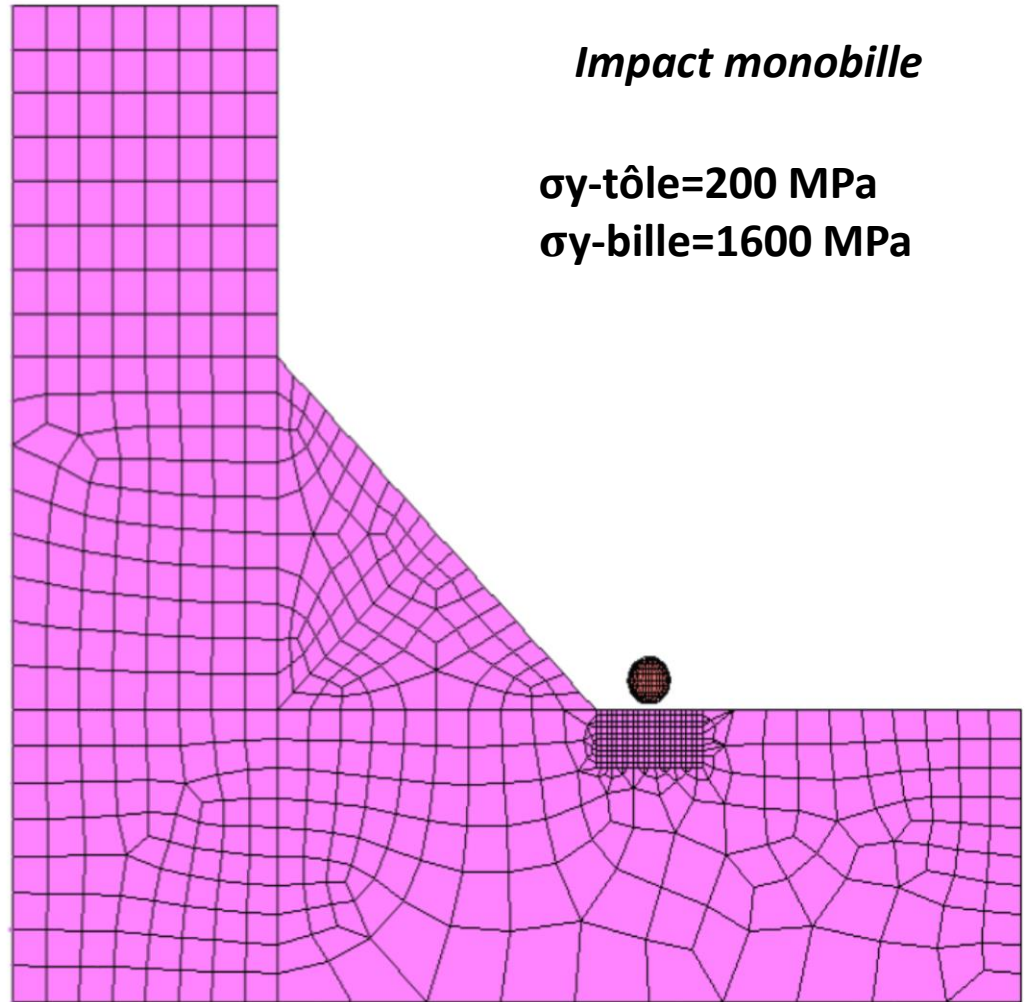
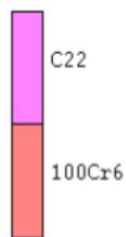


Conditions
aux limites



Conditions
initiales

**CALCUL
DYNAMIQUE
+
AMORTISSEMENT
DE RAYLEIGH**



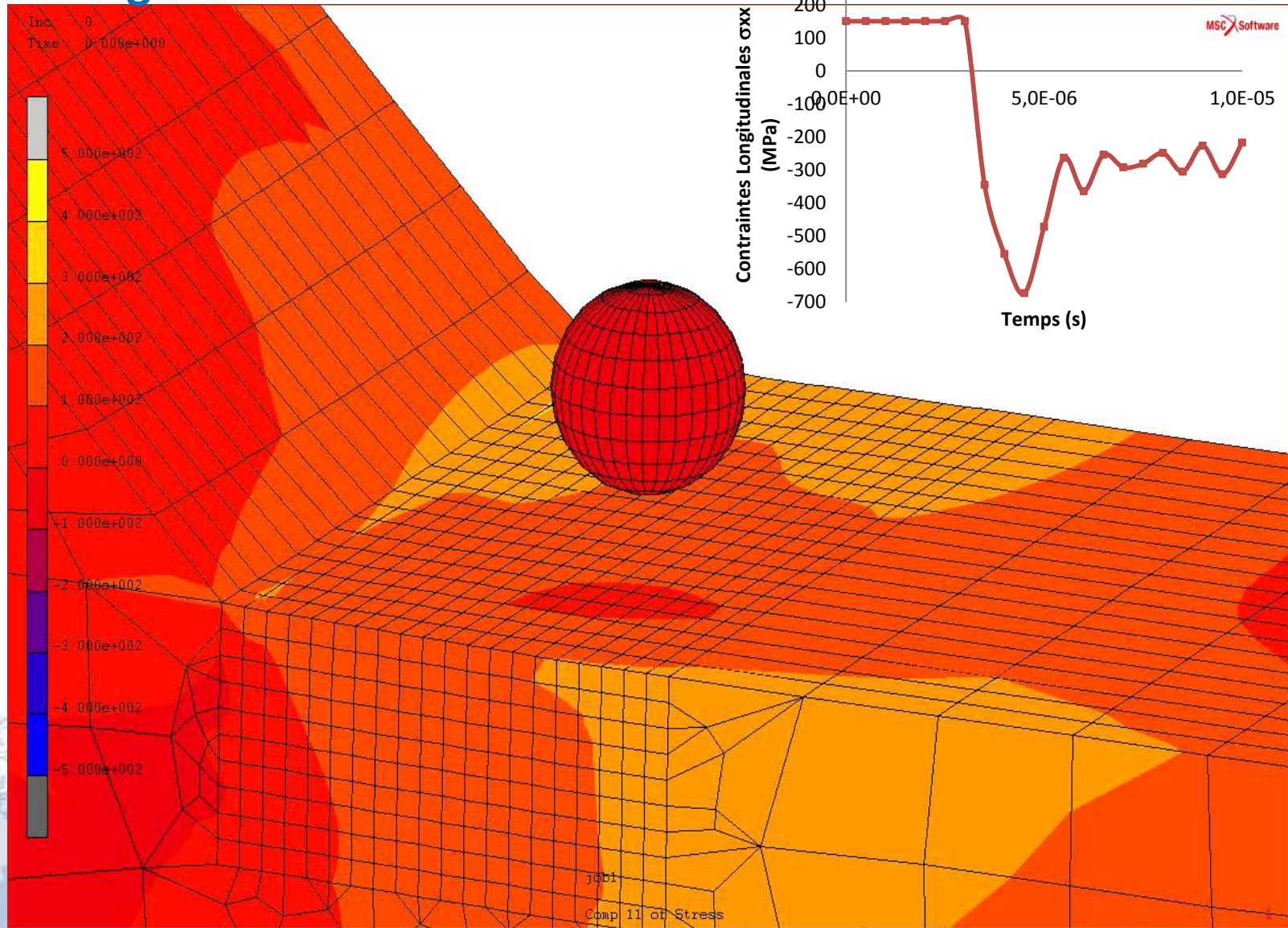
Impact monobille

$\sigma_y\text{-tôle}=200 \text{ MPa}$

$\sigma_y\text{-bille}=1600 \text{ MPa}$

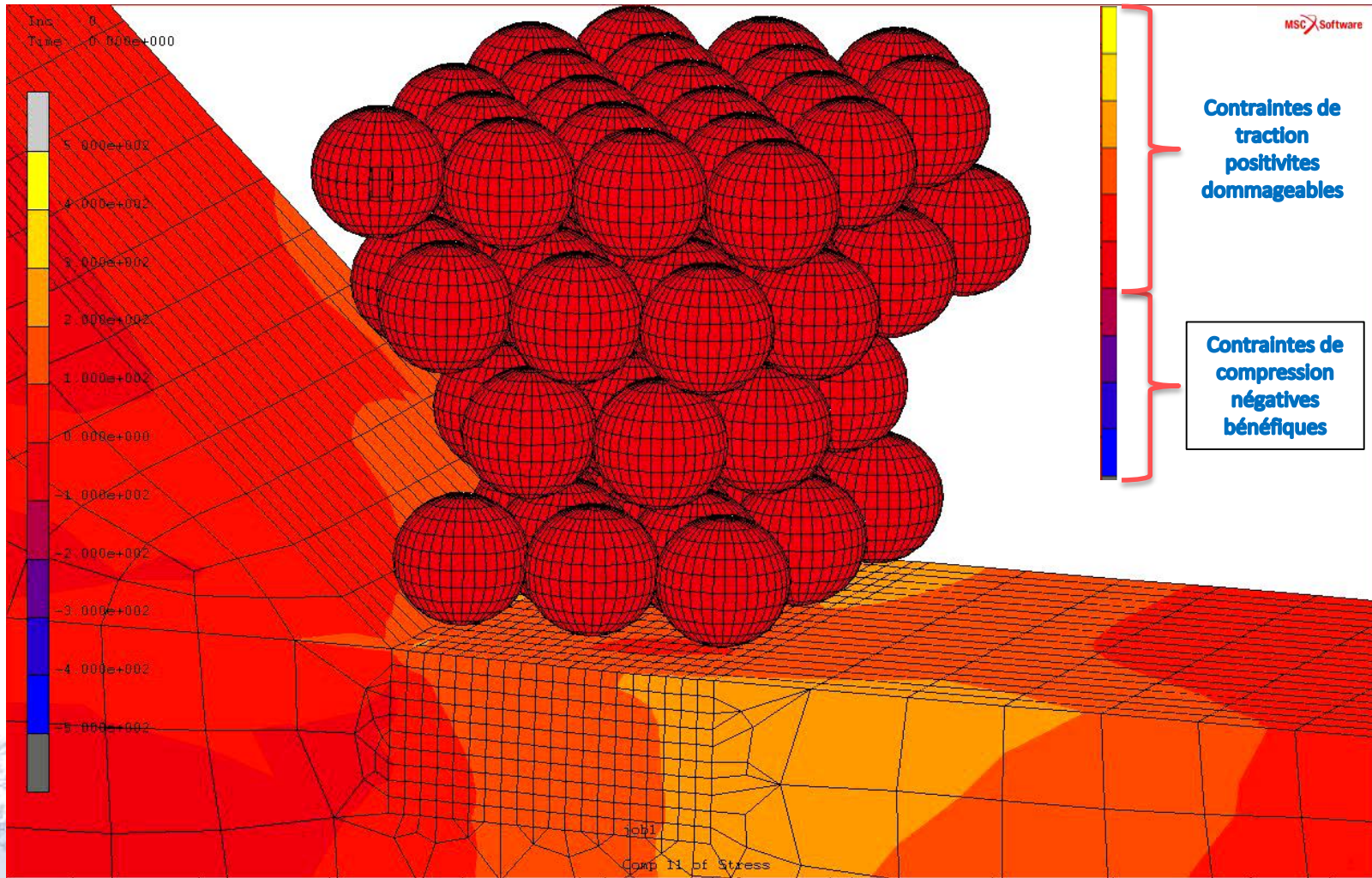
2 Parachèvement des soudures

Grenailage : Résultats



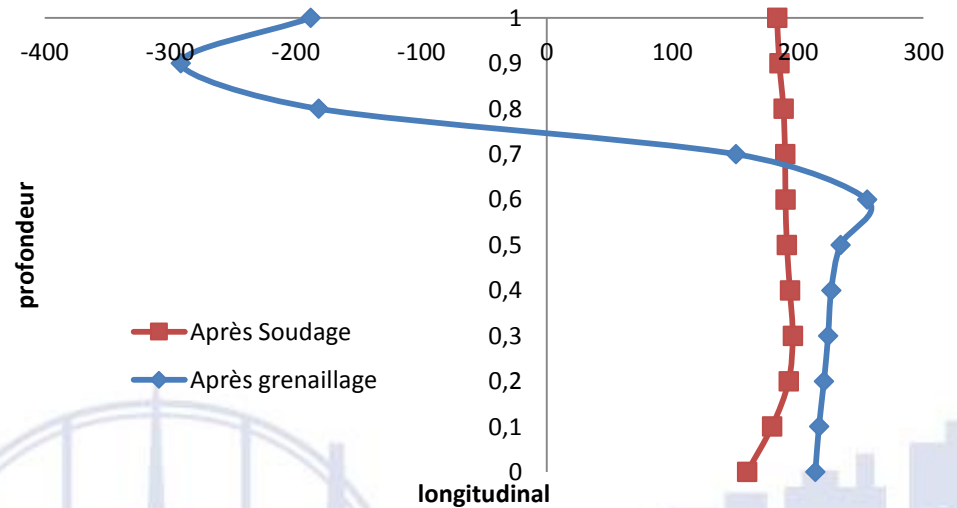
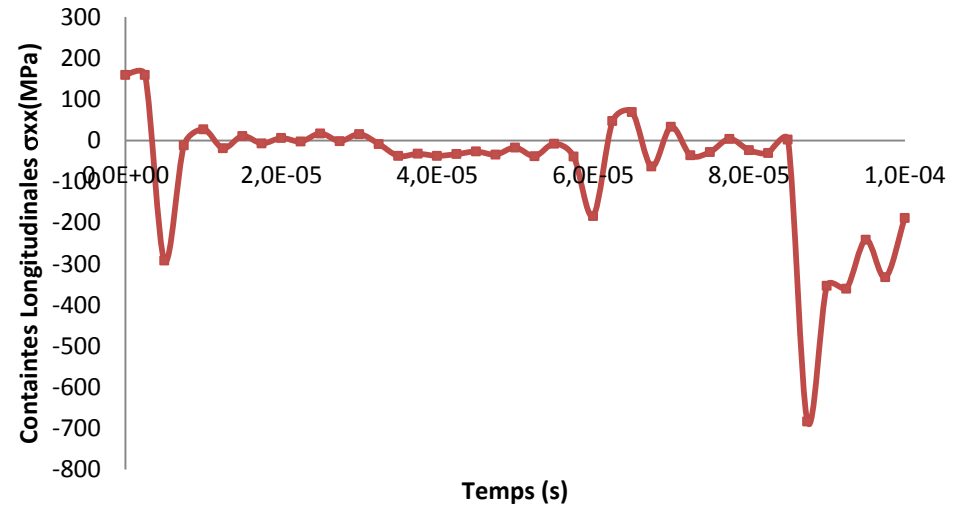
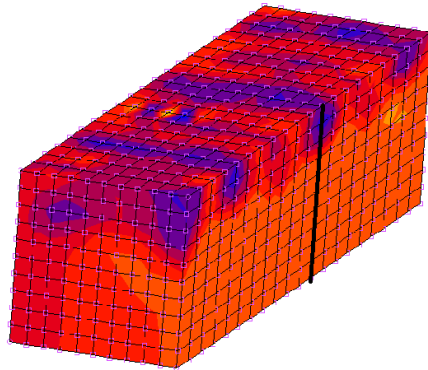
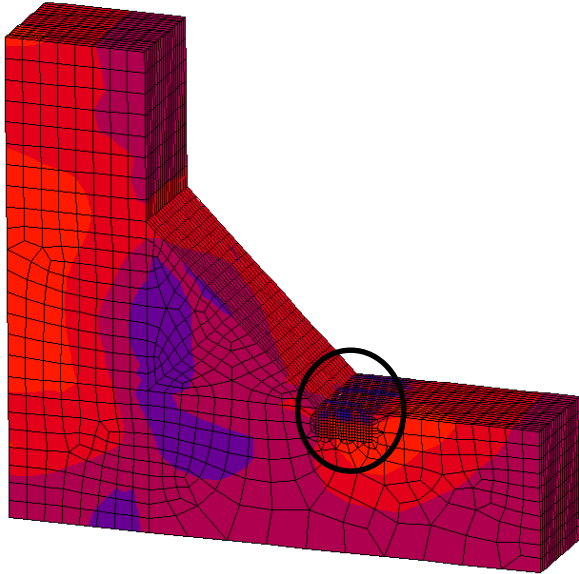
2 Parachèvement des soudures

Grenailage : Résultats



2 Parachèvement des soudures

Grenaillage : Résultats



Impact multibilles

Structures métalliques :

Plan

1. Quantification expérimentale et numérique des contraintes résiduelles induites par le soudage:

- Choix des types éprouvette et la technique de soudage.
- Mesure par DRX des contraintes résiduelles de surface.
- Modélisation EF du soudage.
- Évaluation des contraintes résiduelles après refroidissement.

2. Parachèvement de la soudure:

- Choix de la technique de parachèvement (meulage, grenailage).
- Mise en œuvre expérimentale de ces techniques de parachèvement.
- Modélisation numérique du parachèvement.

3. Evaluation de la durabilité en terme de fatigue:

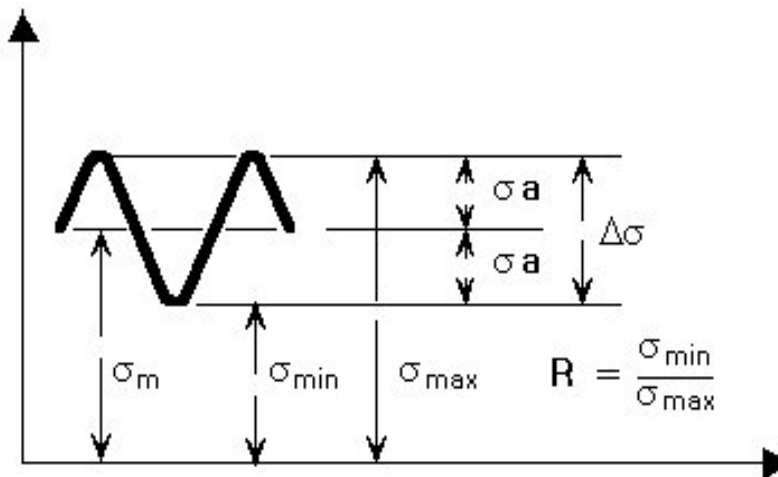
- Essais de fatigue
- Suivi de la fissuration
- Modèles de fatigue et de fissuration adaptée pour les structures soudées.



③ Evaluation de la durabilité en terme de fatigue

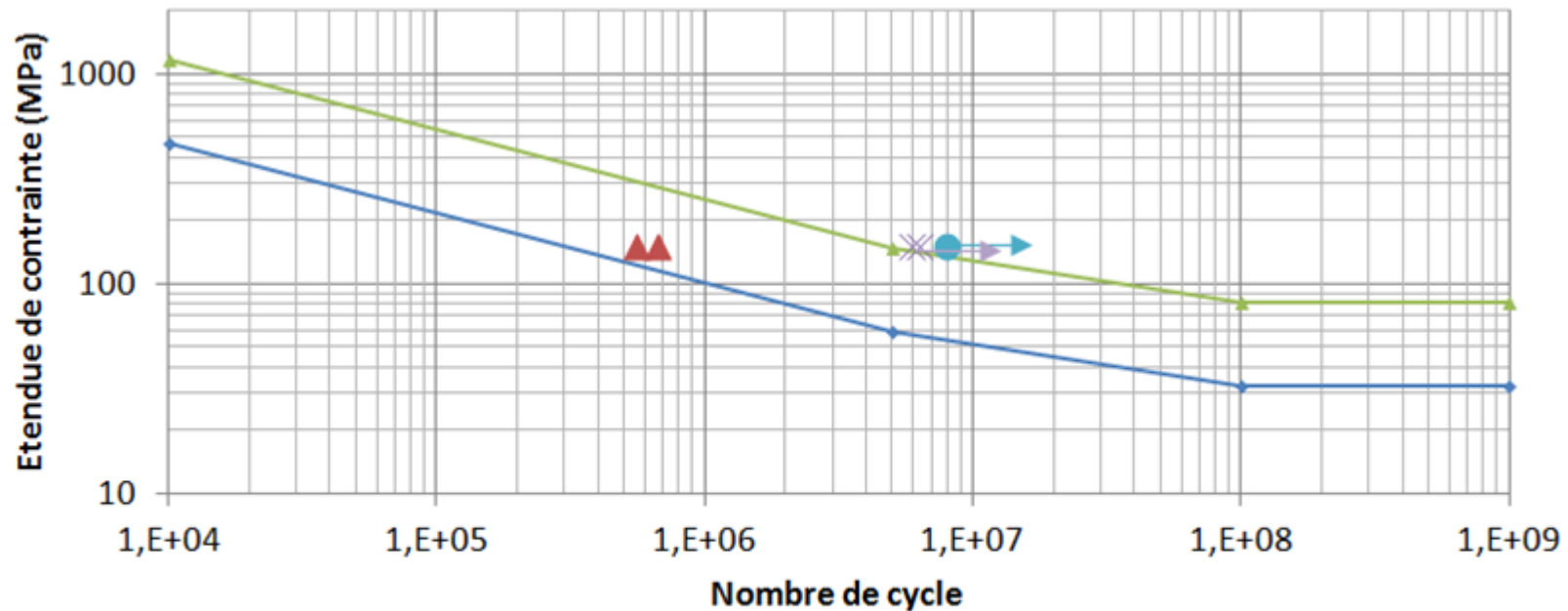
Sollicitation en Fatigue

- Force moyenne : 137.5 kN
- Amplitude de la force: 112.5 kN
- Forme d'onde sinusoïdale
- Rapport de contraintes: $R = 0,1$



③ Evaluation de la durabilité en terme de fatigue

Sollicitation en Fatigue : Courbe d'endurance $R=0,1$:



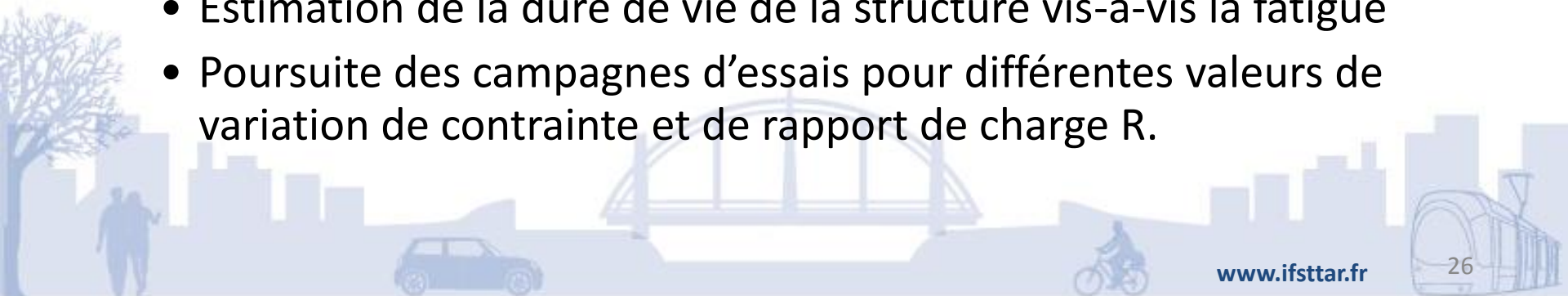
▲ Brute × Meulé ● Grenaillé
—●— Eurocode 3 Classe FAT 80 —▲— Eurocode 3 Classe FAT 200

Conclusions :

- La modélisation de la soudure est améliorée par rapport aux modèles précédents
- Détermination des valeurs de contraintes résiduelles très proches de valeurs expérimentales.
- La modélisation du grenailage a donné des résultats satisfaisants sur le modèle réduit

En cours :

- Modélisation du grenailage sur le modèle échelle 1
- Estimation de la durée de vie de la structure vis-à-vis la fatigue
- Poursuite des campagnes d'essais pour différentes valeurs de variation de contrainte et de rapport de charge R.



Merci de votre attention

Ifsttar

14-20 Bld. Newton

Cité Descartes

Champs sur Marne

77447 Marne-la-Vallée Cedex 2

France

Tél. +33 (0)1 81 66 80 00

www.ifsttar.fr

communication@ifsttar.fr

Lamine Dieng

Chercheur - HDR

Directeur Adjoint

Laboratoire Structures Métalliques et à Câbles

Département Matériaux et Structures de l'Ifsttar

Tél. +33 (0)2 40 84 56 06

Lamine.dieng@ifsttar.fr

