



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

# **Quelques nouvelles fonctionnalités pour la simulation numérique du soudage et de la fabrication additive dans Cast3M**

S. Pascal, CEA/DES/ISAS/DM2S/SEMT/LTA

**Notion de séquence de soudage**

**Spécification d'une séquence de soudage – la procédure SOUDAGE**

**Maillage d'une séquence de soudage – la procédure WAAM**

**Modélisation de l'apport de matière – les chargements MODE et MATE**

**Modélisation d'une source de chaleur mobile – le modèle THERMIQUE SOURCE**

**Illustrations : waam1.dgibi et waam2.dgibi**

## **Notion de séquence de soudage**

Spécification d'une séquence de soudage – la procédure SOUDAGE

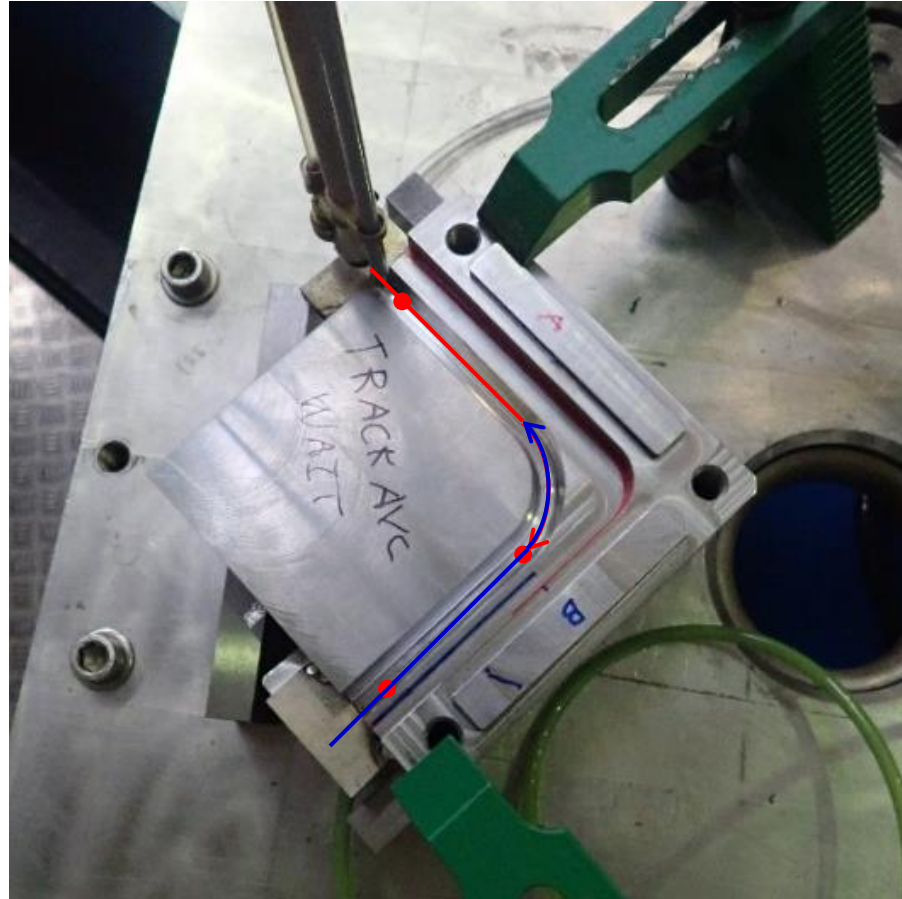
Maillage d'une séquence de soudage – la procédure WAAM

Modélisation de l'apport de matière – les chargements MODE et MATE

Modélisation d'une source de chaleur mobile – le modèle THERMIQUE SOURCE

Illustrations : waam1.dgibi et waam2.dgibi

## Séquence de soudage – Illustration



Crédit photo : L. Forest, SEMT/LTA

## Définition d'une séquence de soudage

- Cinématique de l'outil (déplacements et temps d'arrêt le long de sa trajectoire)
- Actions de soudage (réalisation de points et de cordons de soudure)
- Paramètres du procédé :
  - Vitesse de soudage
  - Débit de fil / de matière
  - Energie de soudage
  - Technologie employée (TIG, électrode enrobée, laser-fil...)
  - Inertage
  - Etc.

Notion de séquence de soudage

**Spécification d'une séquence de soudage – la procédure SOUDAGE**

Maillage d'une séquence de soudage – la procédure WAAM

Modélisation de l'apport de matière – les chargements MODE et MATE

Modélisation d'une source de chaleur mobile – le modèle THERMIQUE SOURCE

Illustrations : waam1.dgibi et waam2.dgibi

## La procédure SOUDAGE – Présentation

Syntaxe générale :

```
SOUDAGE TAB1 options... ;
```

Avec, en entrée :

TAB1 . <b>VITESSE_DE_SOUDAGE</b>	: objet FLOTTANT, vitesse de soudage
TAB1 . <b>PUISSANCE_DE_SOUDAGE</b>	: objet FLOTTANT, puissance thermique de soudage
TAB1 . <b>DIAMETRE_DE_FIL</b>	: objet FLOTTANT, diamètre du fil de métal d'apport
TAB1 . <b>VITESSE_DE_FIL</b>	: objet FLOTTANT, vitesse de dévidement du fil de métal d'apport
TAB1 . <b>DEBIT_DE_FIL</b>	: objet FLOTTANT, débit volumique de fil de métal d'apport (surchargé si les indices VITESSE_DE_FIL et DIAMETRE_DE_FIL sont renseignés)
TAB1 . <b>POINT_DE_DEPART</b>	: objet POINT, origine de la séquence de soudage ((0 0 0) par défaut)
TAB1 . <b>VITESSE_DE_DEPLACEMENT</b>	: objet FLOTTANT, vitesse de déplacement de la torche sans soudage (égale VITESSE_DE_SOUDAGE par défaut)
TAB1 . <b>LARGEUR_DE_PASSE</b>	: objet FLOTTANT, largeur d'une passe (requis pour appel option DEPLA COUCHE)
TAB1 . <b>TEMPS_DE_COUPURE</b>	: objet FLOTTANT, temps de mise à zéro ou à valeur nominale de la puissance de soudage (0,1 par défaut)

## La procédure SOUDAGE – Présentation

Syntaxe générale :

```
SOUDAGE TAB1 options... ;
```

Avec, en sortie :

TAB1 . **TRAJECTOIRE** : objet MAILLAGE, **ligne orientée** définissant trajectoire de la torche de soudage. Les **segments de couleur rouge** représentent les **passes de soudage**, les **segments de couleur verte**, les **déplacements**.

TAB1 . **EVOLUTION\_DEPLACEMENT** : objet EVOLUTION, évolution temporelle de la position de la torche de soudage sur sa trajectoire.

TAB1 . **EVOLUTION\_PUISSANCE** : objet EVOLUTION, évolution temporelle de la puissance thermique délivrée.

TAB1 . **EVOLUTION\_DEBIT** : objet EVOLUTION, évolution temporelle du débit de fil de métal d'apport.



## La procédure SOUDAGE – Présentation

Option **POINT** : spécifier un point de soudure

```
SOUDAGE TAB1 POINT FLOT1 ('PUIS' FLOT2) ('DEBI' FLOT3) ;
```

Avec :

- **FLOT1** : objet FLOTTANT, **durée** de réalisation du point de soudure
- **FLOT2** : objet FLOTTANT, puissance thermique utilisée pour la réalisation de ce point de soudure. Ne modifie pas la valeur fournie dans TAB1.'PUISSANCE\_DE\_SOUDAGE'.
- **FLOT3** : objet FLOTTANT, débit de fil utilise pour la réalisation de ce point de soudure. Ne modifie pas la valeur fournie dans TAB1.'DEBIT\_DE\_FIL'.

## La procédure SOUDAGE – Présentation

Option PASSE : spécifier une passe de soudage

```
SOUDAGE TAB1 PASSE | 'DROI' P1          | ('RELA') | ('VITE' FLOT1) ('PUIS' FLOT2) ('DEBI' FLOT3) ;  
                  | 'CERC' P1 P2 (N1) | 'ABSO'  |  
                  | 'MAIL' LIGN1 ;
```

Avec :

- P1 : objet POINT, extrémité finale de la passe a réaliser
- P2 : objet POINT, centre du cercle
- N1: objet ENTIER, nombre de segments discrétisant la passe  
(par défaut, valeur calculée pour avoir 5 degrés d'angle entre deux segments).
- LIGN1 : objet MAILLAGE, **ligne orientée** représentant la trajectoire de la passe
- 'RELA' : objet MOT, indique que les points sont fournis relativement au point courant
- 'ABSO' : objet MOT, indique que les points sont fournis dans le repère général
- FLOT1 : objet FLOTTANT, vitesse de déplacement de la torche en soudage. Ne modifie pas la valeur fournie dans TAB1. VITESSE\_DE\_SOUDAGE'.
- FLOT2, FLOT3 : idem option POINT.

## La procédure SOUDAGE – Présentation

Option **DEPLA** : spécifier un déplacement de l'outil

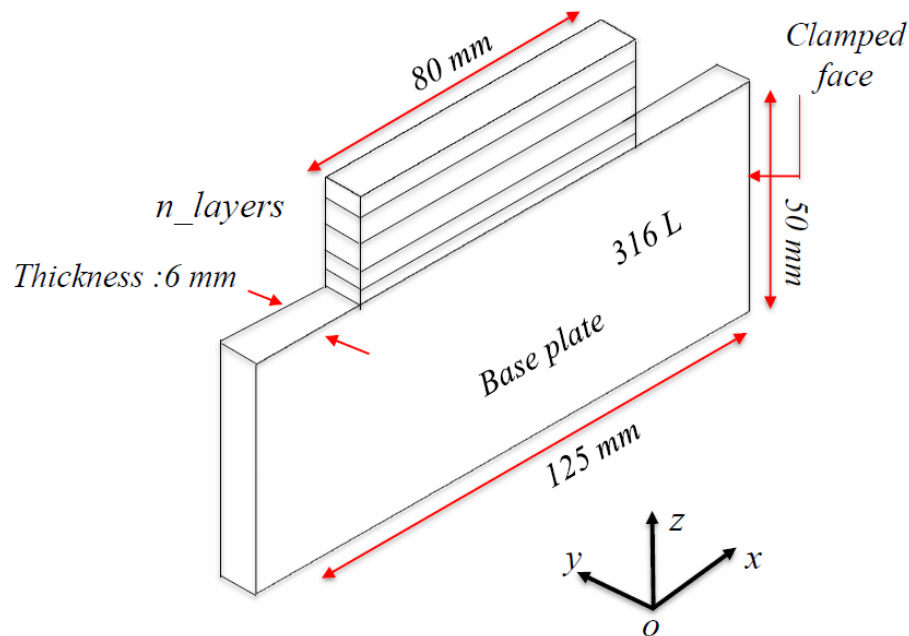
```
SOUDAGE TAB1 DEPLA | 'DROI' P1          | ('RELA') | ('VITE' FLOT1) ;  
                | 'CERC' P1 P2 (N1)| 'ABSO'  |  
                | 'MAIL' LIGN1 ;  
                | 'COUCHE' ('PAUSE' FLOT2) ;
```

Avec :

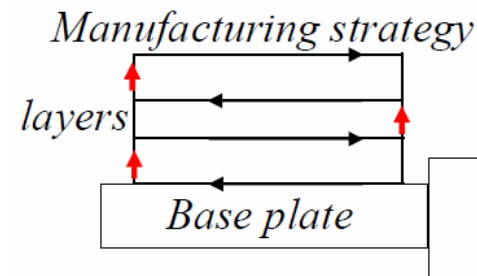
- P1 : objet POINT, extrémité finale de la passe a réaliser
- P2 : objet POINT, centre du cercle
- N1: objet ENTIER, nombre de segments discrétisant la passe  
(par défaut, valeur calculée pour avoir 5 degrés d'angle entre deux segments).
- LIGN1 : objet MAILLAGE, **ligne orientée** représentant la trajectoire du déplacement
- 'RELA' : objet MOT, indique que les points sont fournis relativement au point courant
- 'ABSO' : objet MOT, indique que les points sont fournis dans le repère général
- FLOT1 : objet FLOTTANT, vitesse de déplacement de la torche sans soudage. Ne modifie pas la valeur fournie dans TAB1. VITESSE\_DE\_DEPLACEMENT'.
- FLOT2 : objet FLOTTANT, temps de pause entre 2 couches

## La procédure SOUDAGE – Exemple d'application

Exemple : « mur » en WAAM<sup>1</sup>



Parameter	value
Power supply	Fronuis TransPlus CMT
Welding speed [ $m \cdot min^{-1}$ ]	0.42
Wire feed speed [ $m \cdot min^{-1}$ ]	3.2 first layer / 2.5 others
Filler wire [mm]	1.2
Shielding gas	Argon + 2% CO <sub>2</sub>
Shielding rate [ $l \cdot min^{-1}$ ]	15
Average current [A]	108- first layer / 99- others
Average voltage [V]	13.2- first layer / 13- others
Time between layers [s]	30



- 10 layers , 80 mm weld bead length
- Time between layers : 30 s
- Z-incrementation layers : 2.5 mm

(1) Camille Cambon, Issam Bendaoud, Sébastien Rouquette, Fabien Soulié. "Influence of the first weld bead on strain and stress states in wire+arc additive manufacturing".

The 12th International Seminar "Numerical Analysis of Weldability", Institute for Materials Science, Joining and Forming (IMAT),

Sep 2018, Seggau, Austria. hal-01954354

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01954354>

## La procédure SOUDAGE – Exemple d'application

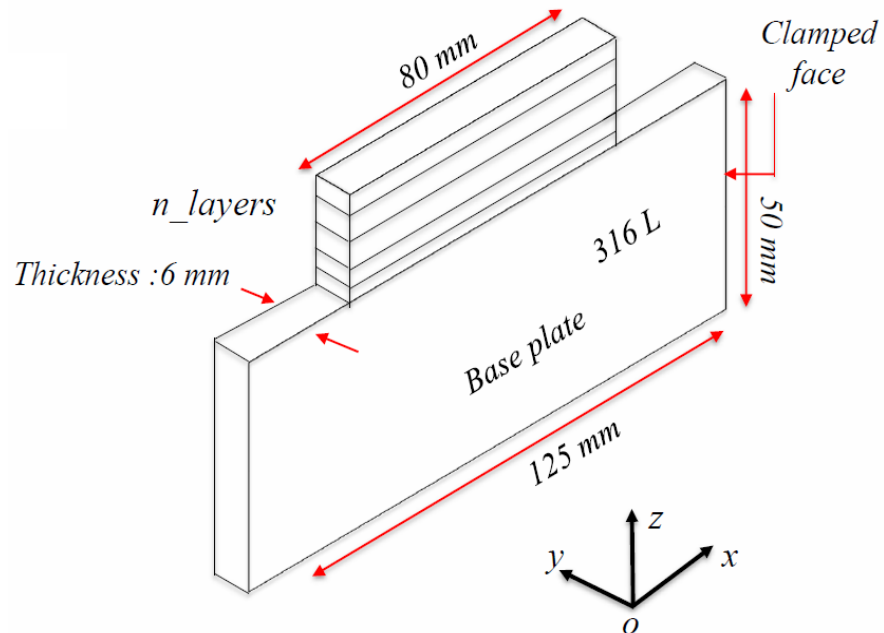
### Exemple : « mur » en WAAM

Mise en données Gibiane :

```

4 * Paramètres d'entrée :
5 tab1.vitesse_de_soudage = 0.42 / 60. ;
6 tab1.puissance_de_soudage = 99 * 13 ;
7 tab1.diametre_de_fil = 1.2e-3 ;
8 tab1.vitesse_de_fil = 2.5 / 60. ;
9 tab1.largeur_de_passe = 6.e-3 ;

```



Parameter	value
Power supply	Fromuis TransPlus CMT
Welding speed [ $m \cdot min^{-1}$ ]	0.42
Wire feed speed [ $m \cdot min^{-1}$ ]	3.2 first layer / 2.5 others
Filler wire [mm]	1.2
Shielding gas	Argon + 2% $CO_2$
Shielding rate [ $l \cdot min^{-1}$ ]	15
Average current [A]	108- first layer / 99- others
Average voltage [V]	13.2-first layer / 13-others
Time between layers [s]	30

## La procédure SOUDAGE – Exemple d'application

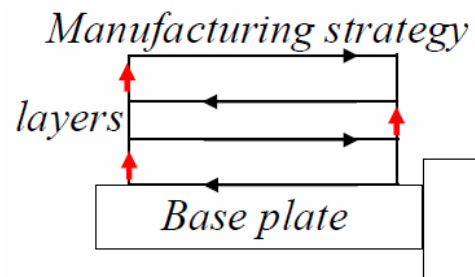
### Exemple : « mur » en WAAM

Mise en données Gibiane :

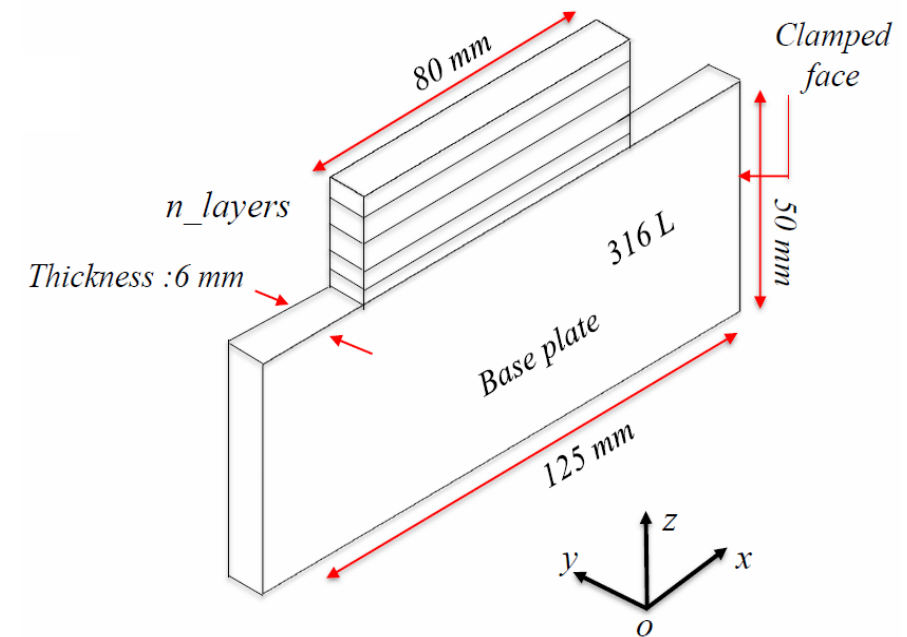
```

4  * Paramètres d'entrée :
5  tabl.vitesse_de_soudage   = 0.42 / 60. ;
6  tabl.puissance_de_soudage = 99 * 13 ;
7  tabl.diametre_de_fil     = 1.2e-3 ;
8  tabl.vitesse_de_fil      = 2.5 / 60. ;
9  tabl.largeur_de_passe    = 6.e-3 ;
10
11 * Définition de la séquence :
12 soudage tabl passe DROI (+80.e-3 0 0) ;
13 soudage tabl depla couche pause 30. ;
14 soudage tabl passe DROI (-80.e-3 0 0) ;
15 soudage tabl depla couche pause 30 ;

```



- 10 layers , 80 mm weld bead length
- Time between layers : 30 s
- Z-incrementation layers : 2.5 mm



## La procédure SOUDAGE – Exemple d'application

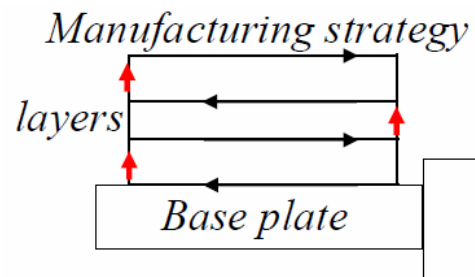
### Exemple : « mur » en WAAM

Mise en données Gibiane :

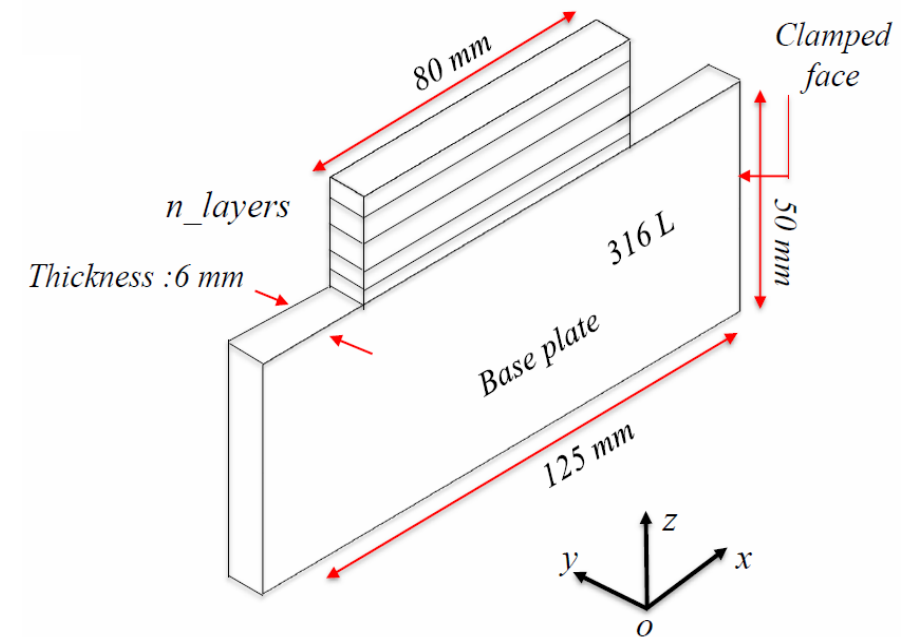
```

4 * Paramètres d'entrée :
5 tabl.vitesse_de_soudage = 0.42 / 60. ;
6 tabl.puissance_de_soudage = 99 * 13 ;
7 tabl.diametre_de_fil = 1.2e-3 ;
8 tabl.vitesse_de_fil = 2.5 / 60. ;
9 tabl.largeur_de_passe = 6.e-3 ;
10
11 * Définition de la séquence :
12 repe b1 5 ;
13 soudage tabl passe DROI (+80.e-3 0 0) ;
14 soudage tabl depla couche pause 30. ;
15 soudage tabl passe DROI (-80.e-3 0 0) ;
16 soudage tabl depla couche pause 30. ;
17 fin b1 ;

```



- 10 layers , 80 mm weld bead length
- Time between layers : 30 s
- Z-incrementation layers : 2.5 mm



## La procédure SOUDAGE – Exemple d'application

### Exemple : « mur » en WAAM

Mise en données Gibiane :

```

4  * Paramètres d'entrée :
5  tabl.vitesse_de_soudage = 0.42 / 60. ;
6  tabl.puissance_de_soudage = 99 * 13 ;
7  tabl.diametre_de_fil = 1.2e-3 ;
8  tabl.vitesse_de_fil = 2.5 / 60. ;
9  tabl.largeur_de_passe = 6.e-3 ;
10
11 * Définition de la séquence :
12 repe b1 5 ;
13   si (&b1 ega 1) ;
14     soudage tabl passe DROI (+80.e-3 0 0) PUIS (108. * 13.2)
15     |         |         |         |         DEBI (pi * 0.25 * 1.2e-3 * 1.2e-3 * 3.2 / 60.) ;
16   sinon ;
17     soudage tabl passe DROI (+80.e-3 0 0) ;
18   finsi ;
19   soudage tabl depla couche pause 30. ;
20   soudage tabl passe DROI (-80.e-3 0 0) ;
21   soudage tabl depla couche pause 30 ;
22 fin b1 ;
23
24 * Refroidissement :
25 soudage tabl point 300. puis 0. debi 0. ;

```

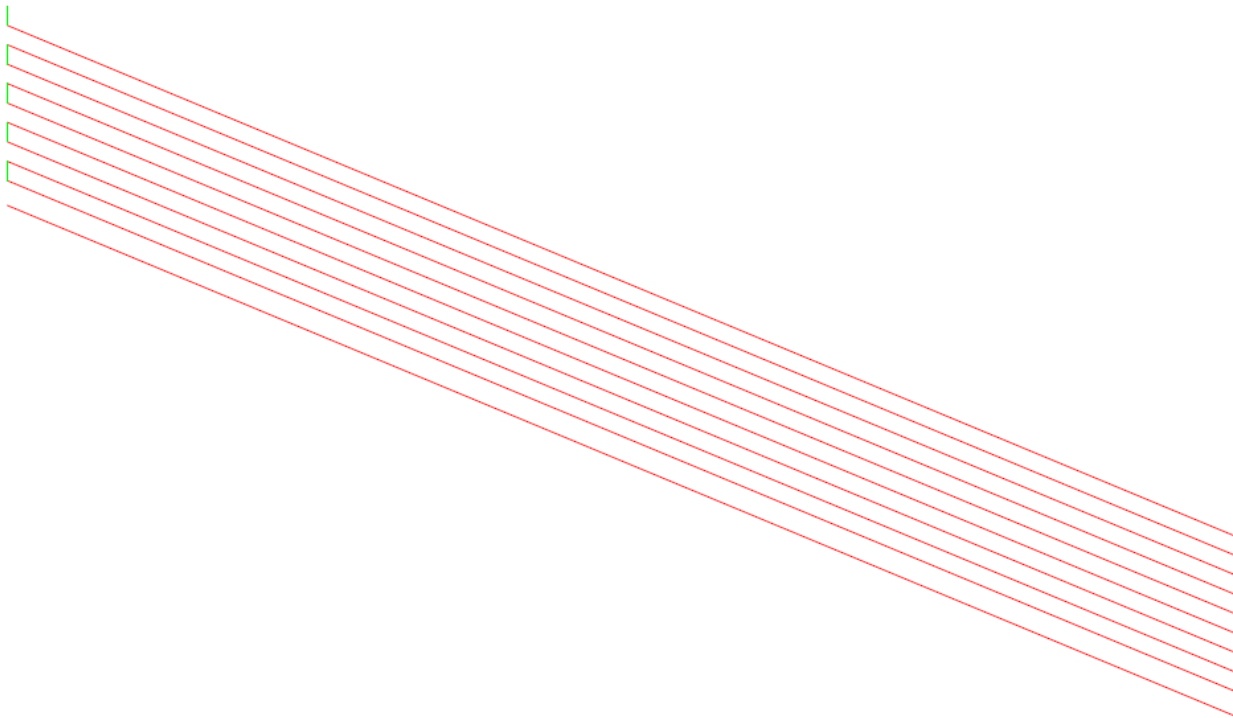
Parameter	value
Power supply	Fronuis TransPlus CMT
Welding speed [m.min <sup>-1</sup> ]	0.42
Wire feed speed [m. min <sup>-1</sup> ]	3.2 first layer / 2.5 others
Filler wire [mm]	1.2
Shielding gas	Argon + 2% CO <sub>2</sub>
Shielding rate [l. min <sup>-1</sup> ]	15
Average current [A]	108- first layer / 99- others
Average voltage [V]	13.2-first layer / 13-others
Time between layers [s]	30



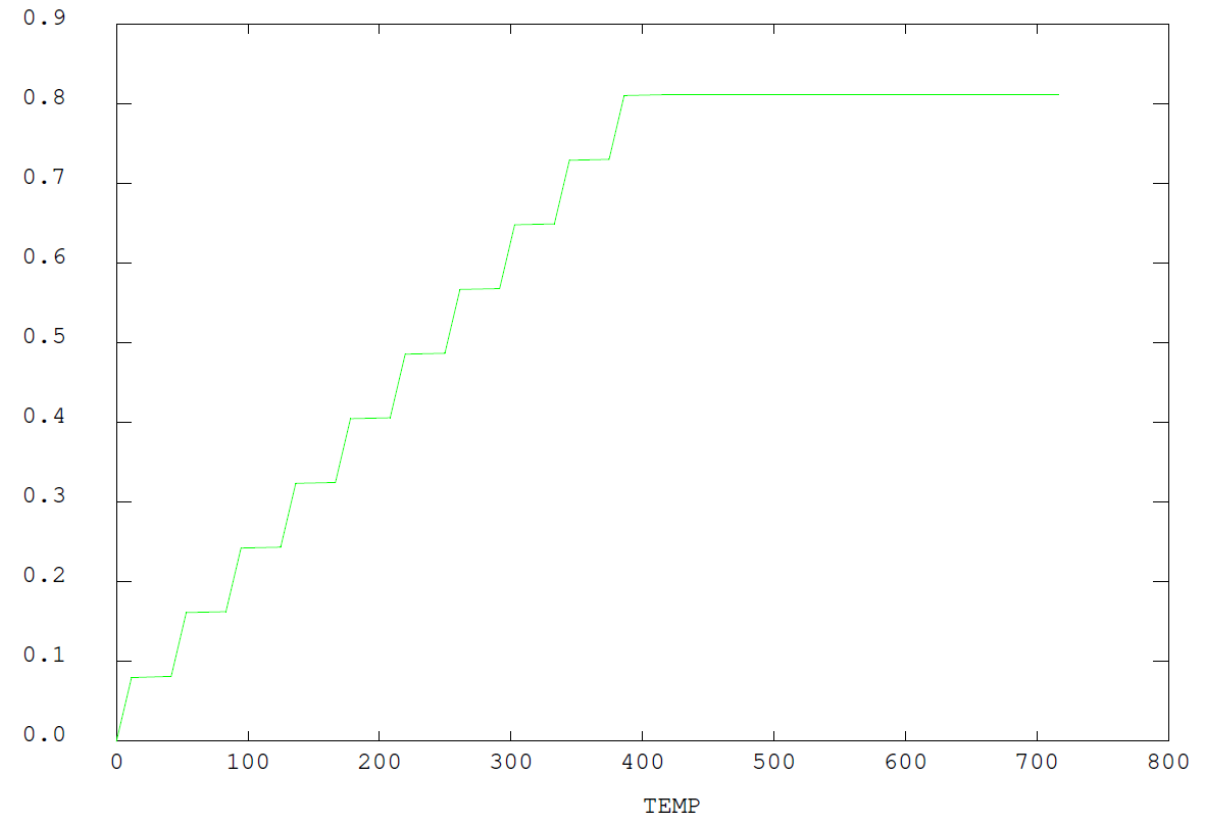
## La procédure SOUDAGE – Exemple d'application

Exemple : « mur » en WAAM

Sorties : tab1.trajectoire



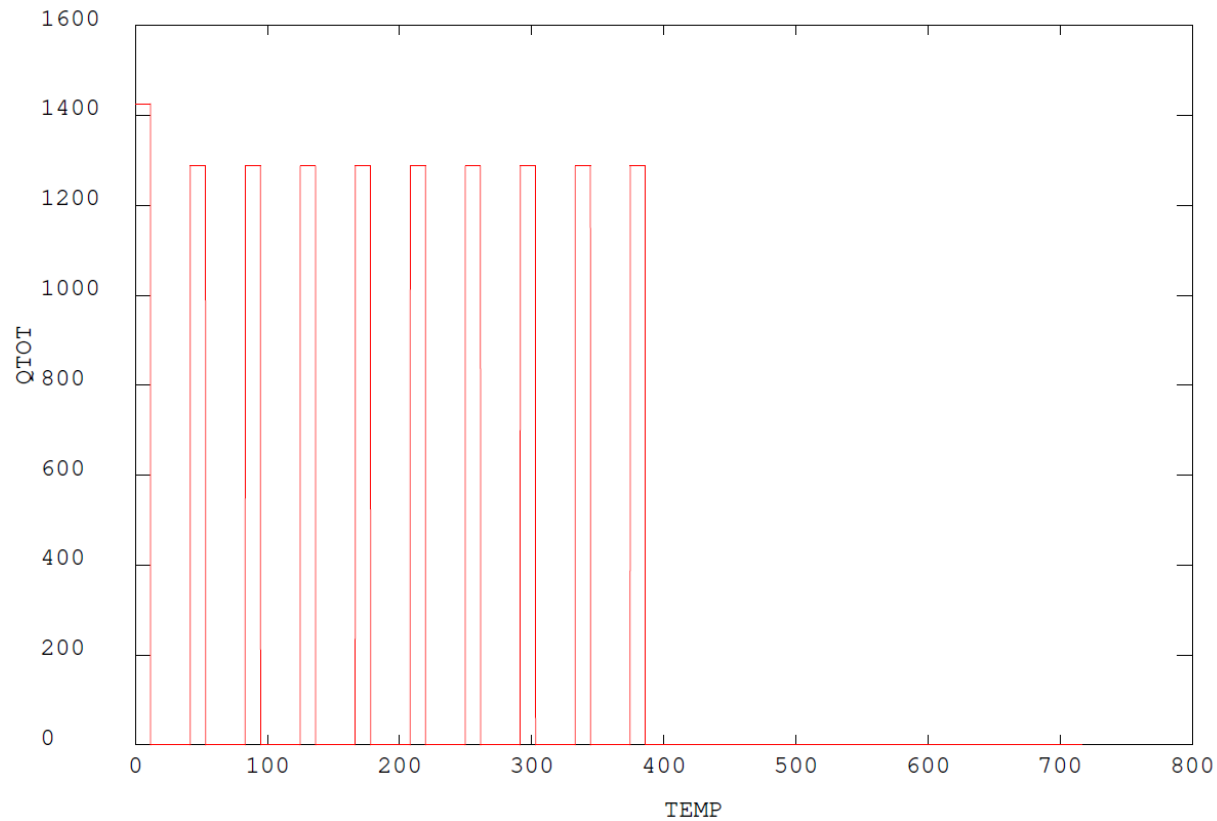
tab1.evolution\_deplacement



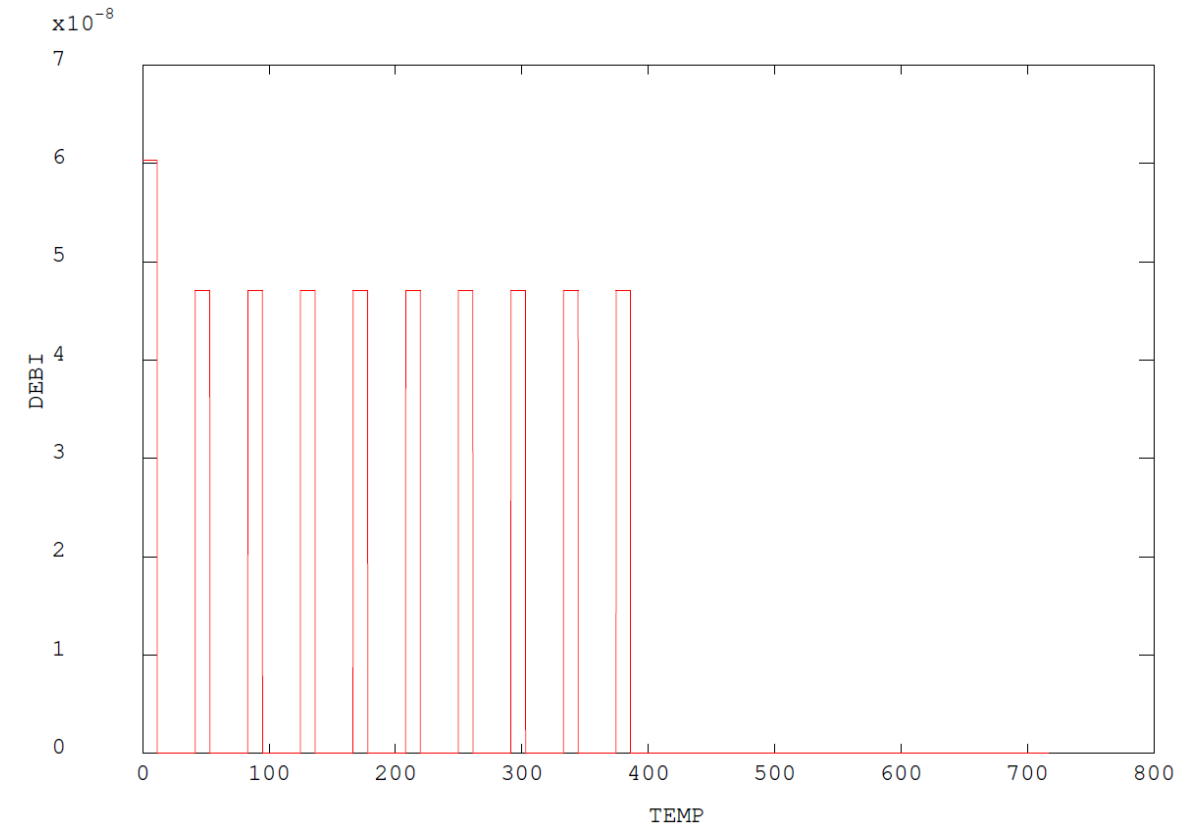
## La procédure SOUDAGE – Exemple d'application

Exemple : « mur » en WAAM

Sorties : tab1.evolution\_puissance



tab1.evolution\_debit



Notion de séquence de soudage

Spécification d'une séquence de soudage – la procédure SOUDAGE

**Maillage d'une séquence de soudage – la procédure WAAM**

Modélisation de l'apport de matière – les chargements MODE et MATE

Modélisation d'une source de chaleur mobile – le modèle THERMIQUE SOURCE

Illustrations : waam1.dgibi et waam2.dgibi

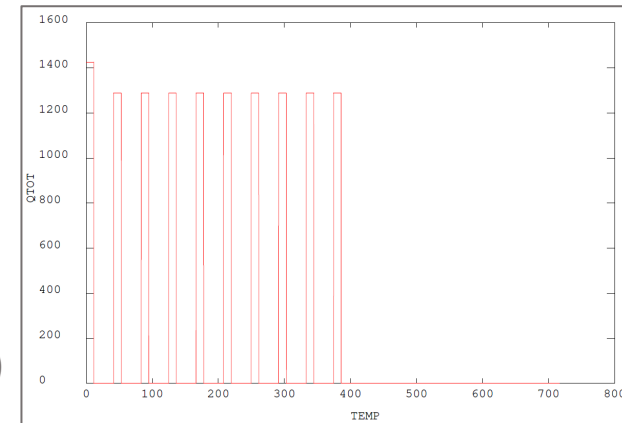
## Maillage d'une séquence de soudage – la procédure WAAM

Syntaxe , option 'MAIL' :

```
TAB2 = WAAM TAB1 'MAIL' 'PAS' | FLOT1 | ('LARG' FLOT2) | ('DENS FLOT3) | ('TEMP' (FLOT4));
      | LRE1 | | (N1) |
```

Avec, en entrée :

- **FLOT1** : objet FLOTTANT, pas de discrétisation en espace du dépôt de matière
- FLOT2 : objet FLOTTANT, largeur des passes de soudage (si TAB1.LARGEUR\_DE\_PASSE non défini)
- FLOT3 : objet FLOTTANT, densité du maillage
- N1 : objet ENTIER, nombre de mailles sur un pas de discrétisation (1 par défaut)
- FLOT4 : objet FLOTTANT, pas de temps de calcul lors des passes de soudage.  
Par défaut,  $(1/\pi)$  du temps de parcours du 1er pas de discrétisation en espace.



## Maillage d'une séquence de soudage – la procédure WAAM

Syntaxe , option 'MAIL' :

```
TAB2 = WAAM TAB1 'MAIL' 'PAS' | FLOT1 | ('LARG' FLOT2) | ('DENS FLOT3) | ('TEMP' (FLOT4));  
| LRE1 | | (N1) |
```

Et, en sortie :

- TAB2 . **MAILLAGE** : objet maillage, maillage des passes de soudage
- TAB2 . **EVOLUTION\_MAIILLAGE** : objet TABLE, contenant 2 sous-indices :
  - . **TEMPS** : objet TABLE, contenant les instants du séquençage indicés de 0 à N
  - . **MAILLAGE** : objet TABLE, contenant les maillages de la séquence de soudage indicés de 0 à N correspondants aux instants définis à l'indice TEMPS
- TAB2 . **TEMPS\_CALCULES** : objet LISTREEL, liste des temps de calculs fournie par l'option TEMP.

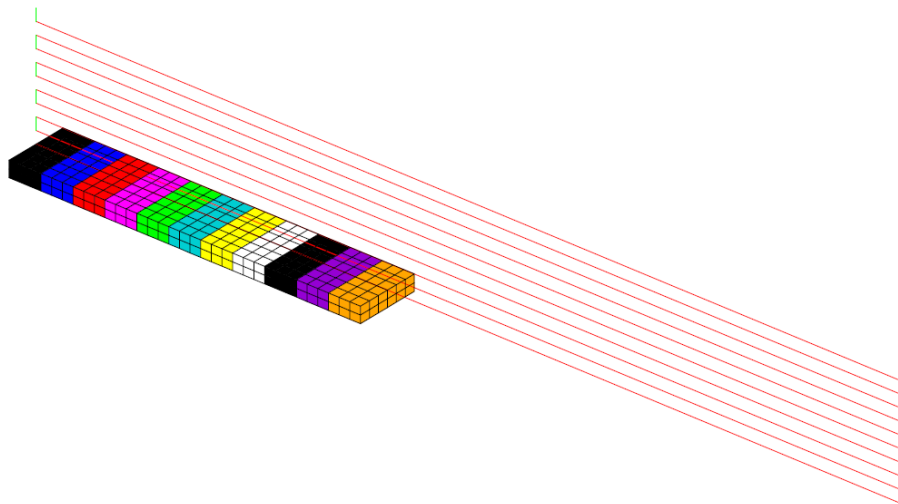
## Maillage d'une séquence de soudage – la procédure WAAM

Exemple : « mur » en WAAM

```

38 *----- Maillage avec WAAM -----*
39
40 tab2      = waam tab1 mail pas 3.e-3 dens 1.e-3 temp 0.2 ;
41 elim tab2.maillage 1.e-5 ;
42 ttps1     = tab2.evolution_maillage.temps ;
43 tmail     = tab2.evolution_maillage.maillage ;

```

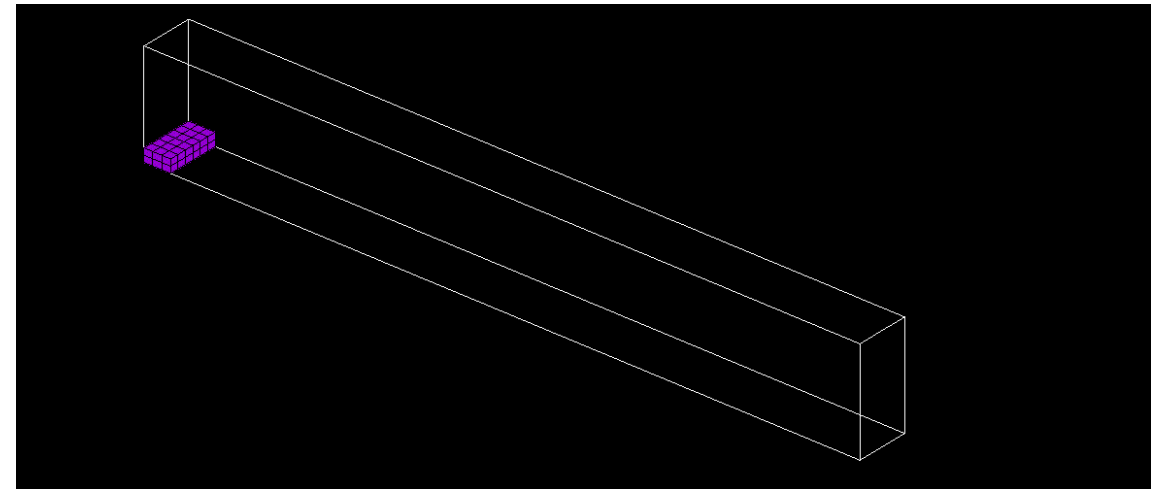


Maillage de la 1<sup>ère</sup> passe au temps  $t=5s$  (éléments massifs)  
et trajectoire de l'outil (tab1.trajectoire) (ligne rouge et verte)

Rq.: la trajectoire de soudage est positionnée sur la face supérieure  
à mi-largeur du maillage de la passe pour le modèle de source de chaleur

### Séquençage de l'apport de matière (maillage)

Pas d'apport de matière ~ 3 mm



Notion de séquence de soudage

Spécification d'une séquence de soudage – la procédure SOUDAGE

Maillage d'une séquence de soudage – la procédure WAAM

**Modélisation de l'apport de matière – les chargements MODE et MATE**

Modélisation d'une source de chaleur mobile – le modèle THERMIQUE SOURCE

Illustrations : waam1.dgibi et waam2.dgibi

## Rappel : le MODELE dans Cast3M

MOD1 = **MODE** GEO1 **MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE** ; → définit un modèle mécanique sur le maillage GEO1

MAT1 = **MATE** MOD1 **YOUN** 210.e9 **NU** 0.3 **SIGY** 300.e6 **TREF** 20. **TALPHA** 20. ; → définit les caractéristiques de MOD1

## Modélisation de l'apport de matière

GEO1 évolue au cours du calcul → séquençage du modèle sur celui du maillage

TTPS1 = TAB2.EVOLUTION\_MALLAGE.TEMPS ;

TMAI1 = TAB2.EVOLUTION\_MALLAGE.MALLAGE ;

NB1 = **DIME** TMAI1 ;

TMOD1 = **TABLE** ; TMAI1 = **TABLE** ;

→ I1 = 0 ;

**REPE** B1 NB1 ;

TMOD1 . I1 = **MODE** (TMAI1 . I1) **MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE FUSION CONS 'ACIER'** ;

TMAT1 . I1 = **MATE** (TMOD1 . I1) **YOUN** 210.e9 **NU** 0.3 **SIGY** 300.e6 **TREF** 20. **TALPHA** 20. **TFUS** 1450. ;

I1 = I1 + 1 ;

**FIN** B1 ;

## Définition de chargements MODE et MATE

CGMOD1 = **CHAR MODE** TTPS1 TMOD1 ; → définit un chargement MODE décrivant l'évolution du modèle au cours du temps

CGMAT1 = **CHAR MATE** TTPS1 TMAI1 ; → idem pour caractéristiques

MOD(t1) = **TIRE** CGMOD1 **MODE** t1 ; → fournit le modèle à utiliser au temps t1 (idem avec CGMAT1)



## Utilisation avec PASAPAS

En entrée : ajout des chargements MODE et MATE à l'indice chargement de la table de PASAPAS

```
TPAS1                = TABLE ;  
TPAS1 . CHARGEMENT   = CGMOD1 ET CGMAT1 ET ...  
TPAS1 . MODELE       = TIRE CGMOD1 MODE t0 ;  
TPAS1 . CARACTERISTIQUES = TIRE CGMAT1 MATE t0 ;  
...
```

En sortie : nouvel indice TAB1.MODELES = modèles utilisés aux différents pas de temps.

```
MODi1  = TPAS1 . MODELES . i1 ;  
SIGi1  = TPAS1 . CONTRAINTES . i1 ;  
TRAC SIGi1 MODi1 ;
```

Pour le maillage :

```
GEOi1  = EXTR MODi1 MAIL ;  
DEPi1  = TPAS1 . DEPLACEMENTS . i1 ;  
TRAC DEPi1 GEOi1
```

Remarque :

En THERMIQUE, modèles conduction + convection + ... → GEOi1 ne contient pas que des éléments massifs

```
GEOi1  = (EXTR MODi1 MATE CONDUCTION) EXTR MAIL ;
```

Notion de séquence de soudage

Spécification d'une séquence de soudage – la procédure SOUDAGE

Maillage d'une séquence de soudage – la procédure WAAM

Modélisation de l'apport de matière – les chargements MODE et MATE

**Modélisation d'une source de chaleur mobile – le modèle THERMIQUE SOURCE**

Illustrations : waam1.dgibi et waam2.dgibi

## Définition d'un modèle de source de chaleur Gaussienne

MOD1 = **MODE** GEO1 **THERMIQUE SOURCE GAUSSIENNE ISOTROPE** ;  
 MAT1 = **MATE** MOD1 'QTOT' PTH1 'ORIG' P1 'RGAU' RG1 ;

$$q(\vec{x}) = q_0 e^{\left(-2 \frac{(x-x_{P1})^2 + (y-y_{P1})^2 + (z-z_{P1})^2}{RG1^2}\right)} \text{ avec } q_0 = \frac{2^{5/2} PTH1}{\pi^{3/2} RG1^3}$$

On vérifie que :  $PTH1 = \iiint_{z \leq z_{P1}} q(\vec{x}) dV$

## Déplacement de la source de chaleur

P1 évolue au cours du calcul → définition de l'évolution de son abscisse curviligne le long de sa trajectoire  
 PTH1 évolue également (arrêt/ reprise de soudage) → évolution temporelle de la puissance thermique de soudage

EVQT1 = tab1.evolution\_puissance ;  
 EVXS1 = tab1.evolution\_deplacement ;  
 CHXS1 = (tab1.trajectoire) **COOR** CURV ;  
 CGXS1 = **CHAR TRAJ** CHXS1 EVXS1 ; → définit un chargement TRAJECTOIRE donnant la position de la source à chaque instant  
 MOD1 = **MODE** GEO1 **THERMIQUE SOURCE GAUSSIENNE ISOTROPE** ;  
 MAT1 = **MATE** MOD1 'QTOT' EVQT1 'ORIG' CGXS1 'RGAU' RG1 ;

## Si apport de matière, séquençage du modèle de source de chaleur

**REPE** B1 NB1 ;  
     TMOD1 . I1 = **MODE** (TMAI1 . I1) **THERMIQUE SOURCE GAUSSIENNE ISOTROPE** ;  
     TMAT1 . I1 = **MATE** (TMOD1 . I1) 'QTOT' EVQT1 'ORIG' CGXS1 'RGAU' RG1 ;  
     I1 = I1 + 1 ;

**FIN** B1 ;

## Utilisation avec PASAPAS

Ajout de MOD1 à l'indice MODELE de la table PASAPAS et de MAT1 à l'indice CARACTERISTIQUES

Si séquençage, ajout des chargements MODE et MATE du modèle de source de chaleur à l'indice CHARGEMENT

Notion de séquence de soudage

Spécification d'une séquence de soudage – la procédure SOUDAGE

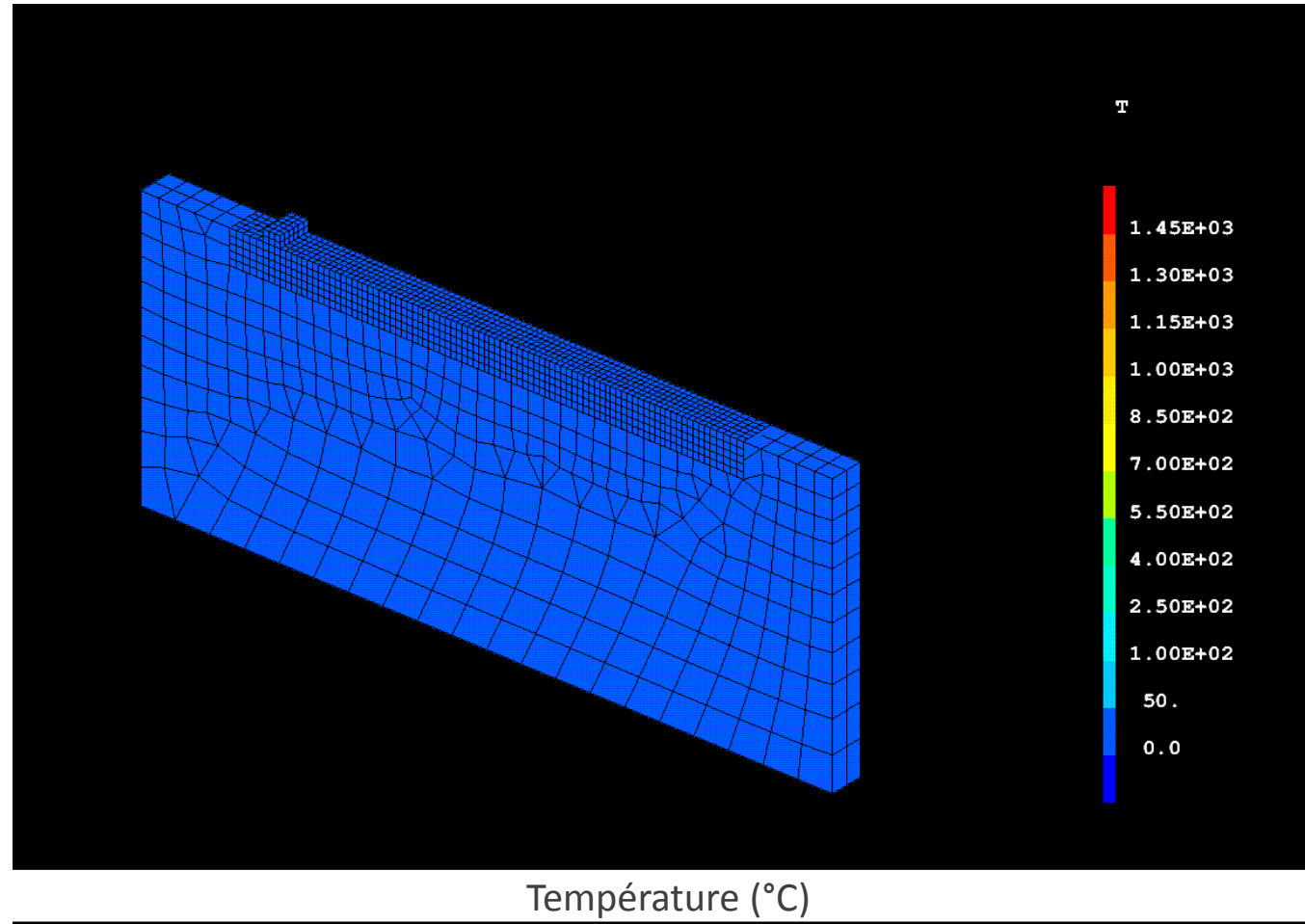
Maillage d'une séquence de soudage – la procédure WAAM

Modélisation de l'apport de matière – les chargements MODE et MATE

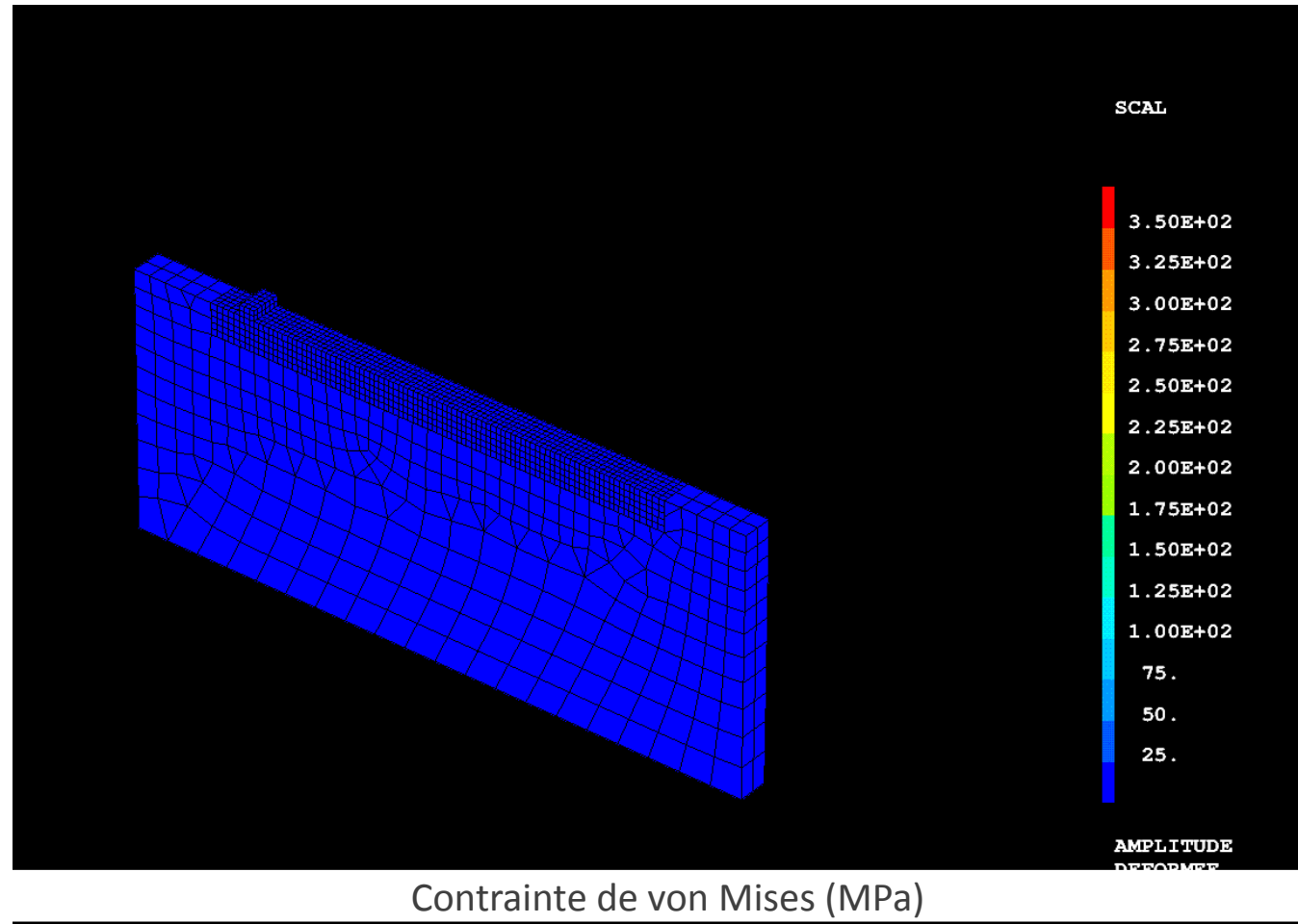
Modélisation d'une source de chaleur mobile – le modèle THERMIQUE SOURCE

**Illustrations : waam1.dgibi et waam2.dgibi**

## Analyse thermique – waam1.dgibi



## Analyse thermomécanique – waam2.dgibi



# Merci de votre attention

S. Pascal

