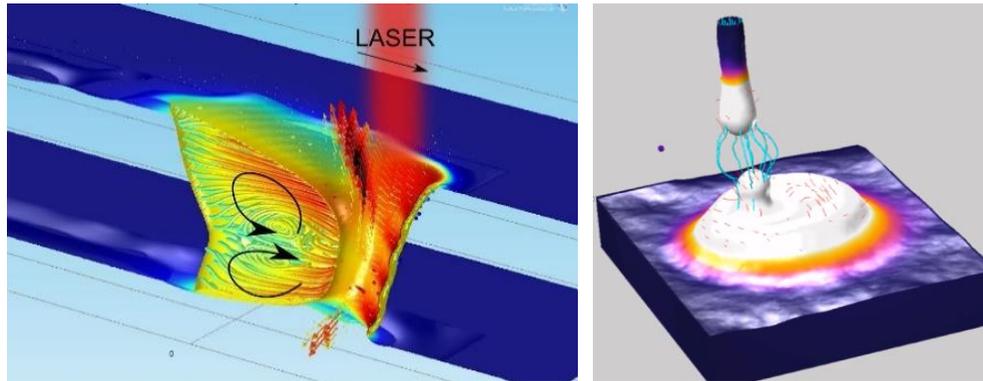




Modèle 3D thermo-hydraulique complet de soudage laser Comment réduire les temps de calcul ?

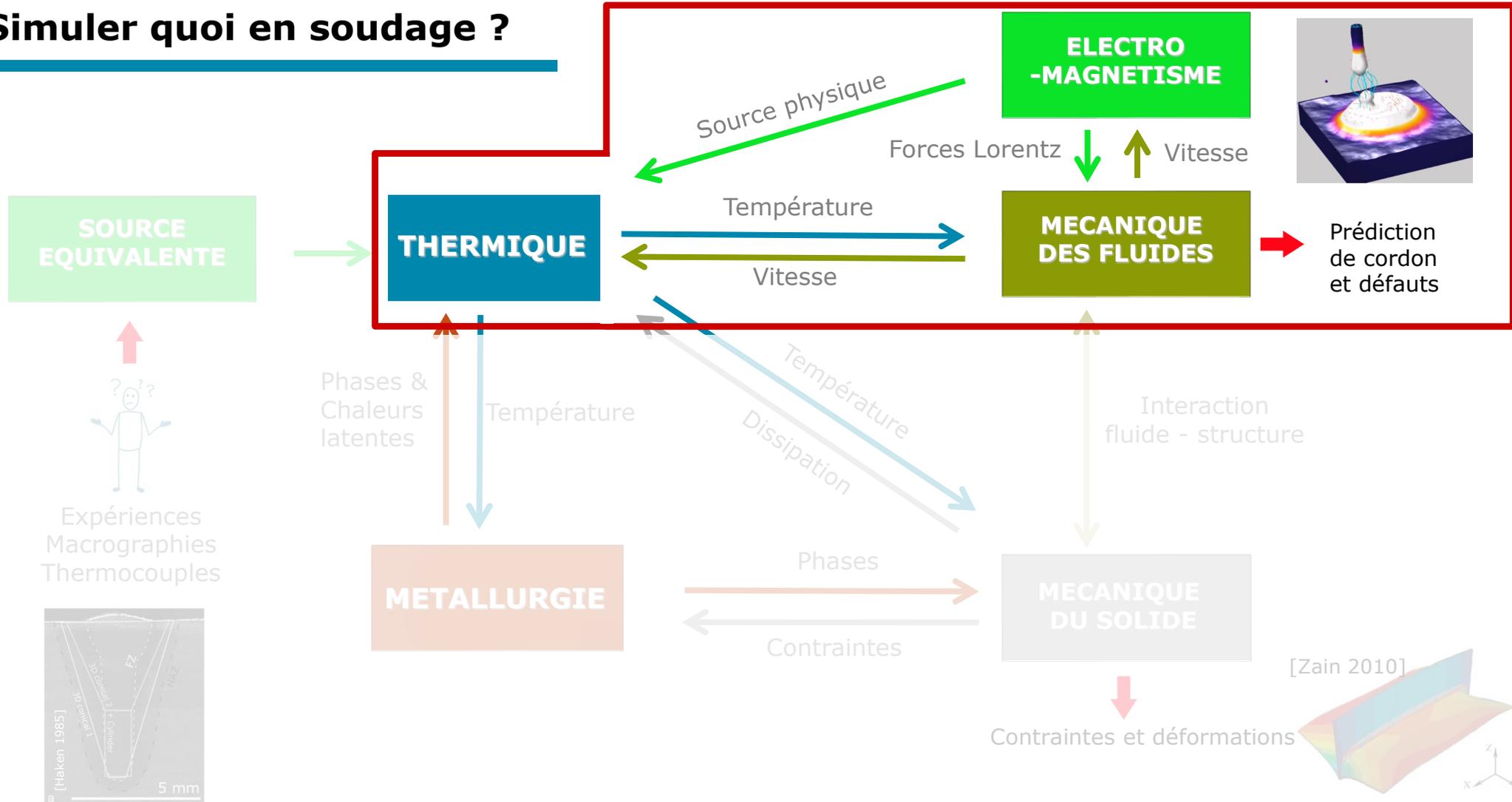


Institut de Recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027

Mickael Courtois Muriel Carin Philippe Le Masson

Pourquoi simuler le bain de fusion ?

Simuler quoi en soudage ?



Soudage laser en mode keyhole : Principaux phénomènes influençant la géométrie du bain et du keyhole

Optique / électromagnétisme :

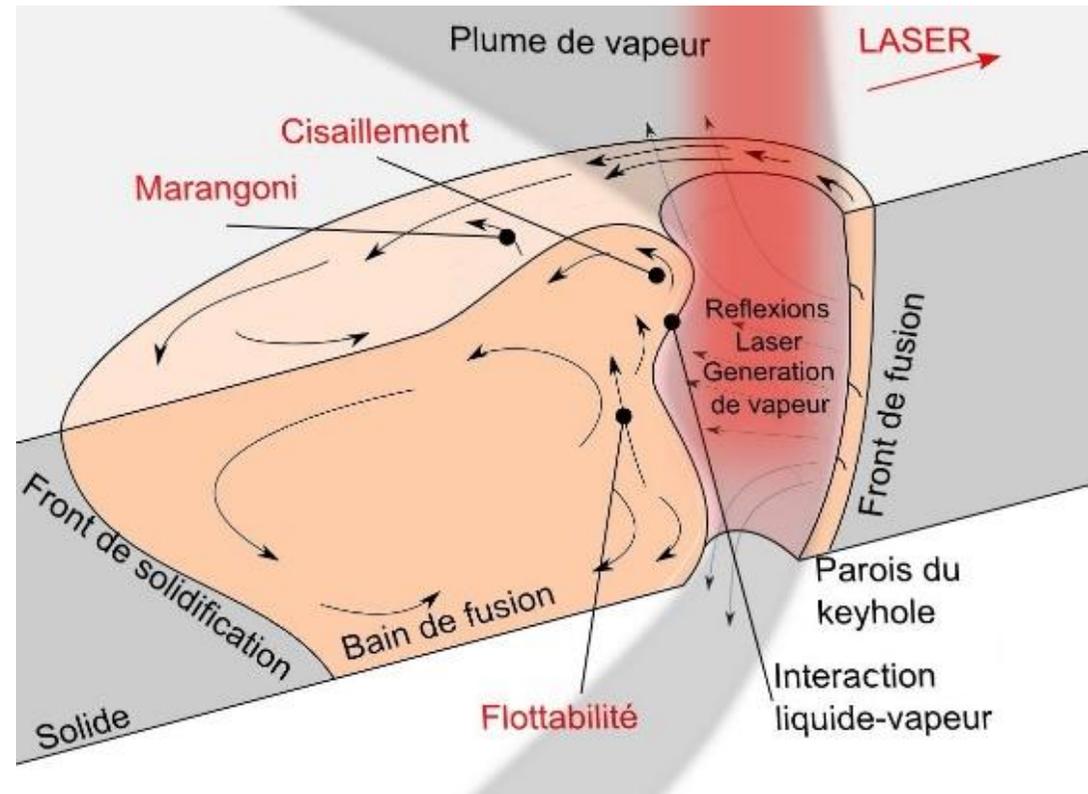
- Réflexions laser
- Absorptivité globale

Thermique :

- Conduction, convection
- Rayonnement
- Chaleurs latentes

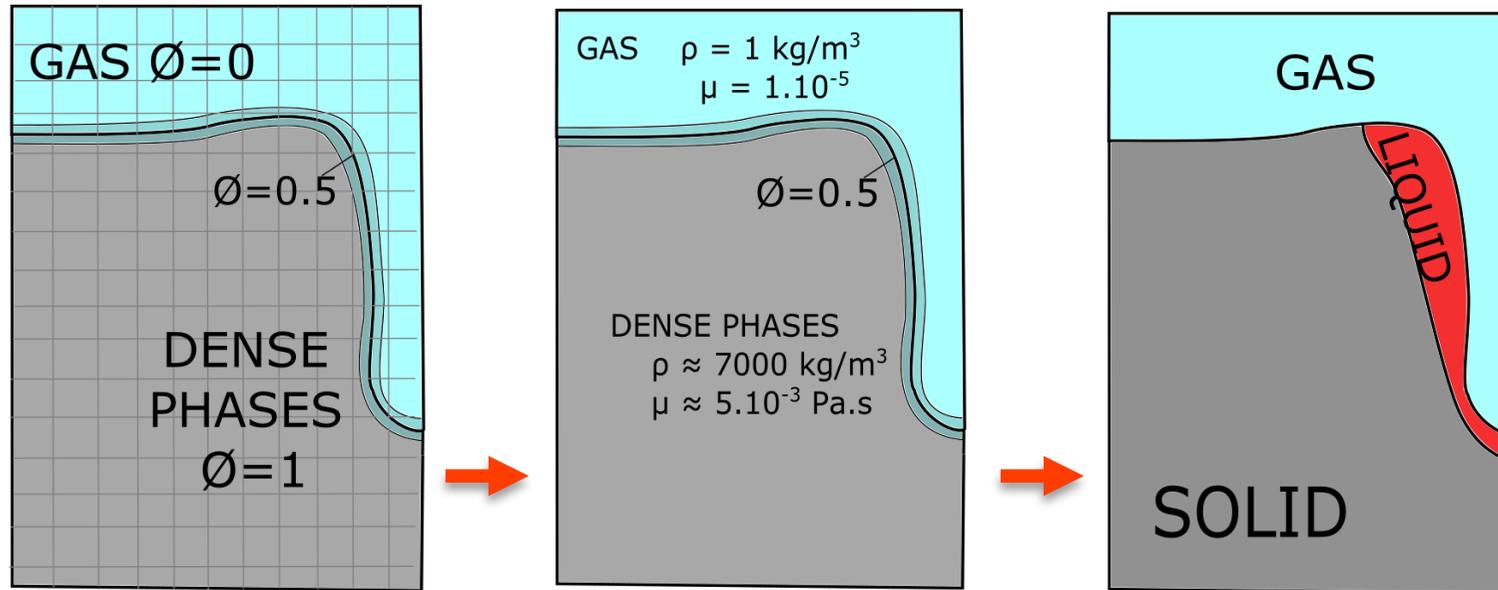
Mécanique des fluides :

- Ecoulements liquide et gaz
- Tension de surface, gravité
- Vaporisation, pression de recul
- Plume de vapeur



Objectif : Modéliser tous ces phénomènes → **Uniquement à partir des paramètres opératoires**

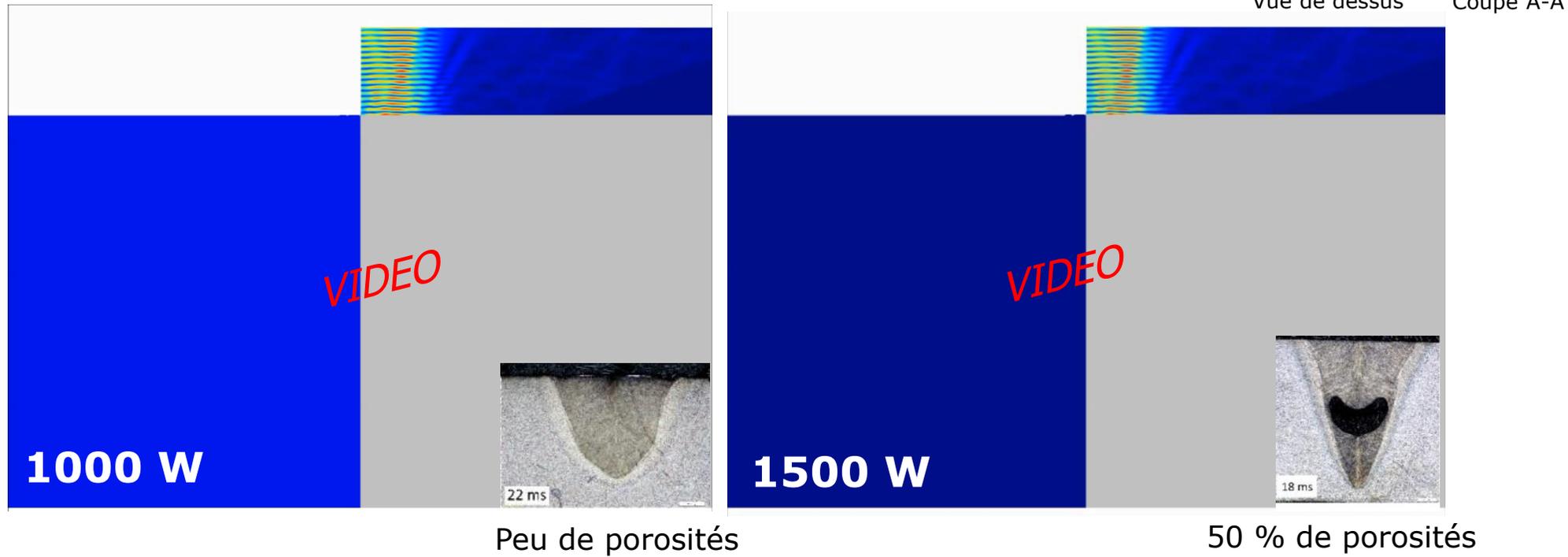
Suivi dynamique de l'interface liquide / vapeur : Méthode Level set



Equation de transport liée à la mécanique des fluides :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \phi - \dot{m} \delta(\phi) \left(\frac{1}{\rho} \right) = \gamma_{ls} \nabla \cdot \left(\varepsilon_{ls} \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right)$$

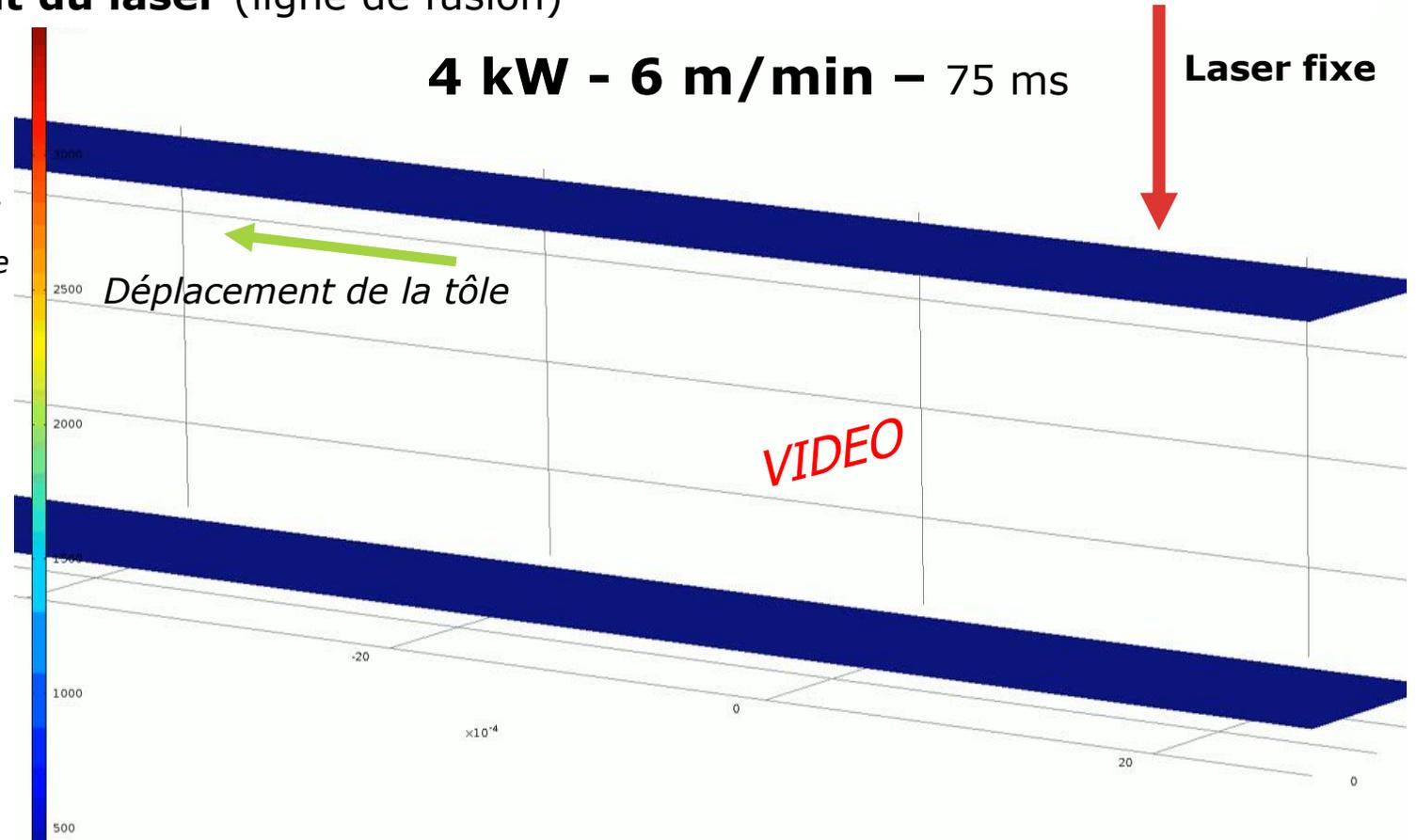
Résultats – Variation des paramètres opératoires



Soudage déplacement du laser (ligne de fusion)

A voir:

- Création du keyhole
- Oscillation sur le front avant
- Inclinaison du keyhole stable
- Grossissement du bain
- Cellules d'écoulement



- ➔ Utilisable sur une station de calcul moyenne (16 GB ram and 8-12 cœurs)
- ➔ Temps de calcul initial: + de 15 jours

4 grandes possibilités :

1 – Augmenter les capacités de calcul

Utilisation de cluster et de la parallélisation?

2 – Simplifier le modèle multiphysique

Ne pas calculer la formation du keyhole

3 – Simplifier les équations

Réduire les non-linéarités avec des simplifications

4 – Optimiser le maillage et les pas de temps

Augmenter la taille des éléments et des pas de temps

1 – Augmenter les capacités de calcul ?

Utilisation de cluster et de la parallélisation?

Principe :

A chaque pas de temps, la résolution est découpée et envoyée à plusieurs nœuds de calcul.

Problème:

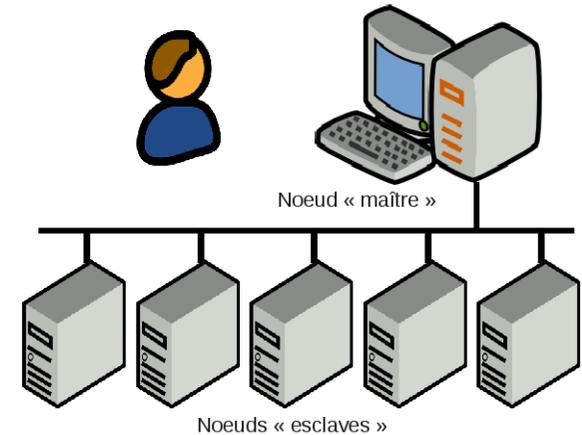
Temps physique à résoudre: ≈ 300 ms

Pas de temps : ≈ 10 μ s

Nombre d'itérations à résoudre: $300/0.01 = 30\ 000$ itérations

→ Problème peu parallélisable

Tests effectuées sur cluster ArcelorMittal : gain maximum: -20%

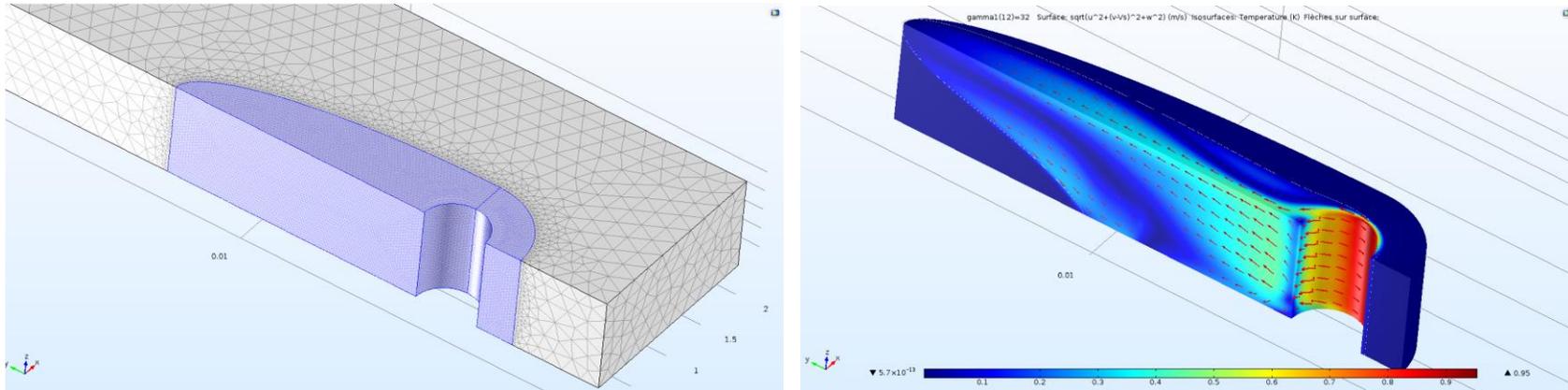


2 – Simplifier le modèle multiphysique ?

Ne pas calculer la formation du keyhole

Principe:

Géométrie fixée, gaz exclu, forme de capillaire supposée connue



Avantages: calcul (quasi)stationnaire et « rapide » (<24h)

Inconvénients : Pas de prédiction du keyhole, pas d'étude des défauts, beaucoup de paramètres à ajuster

Méthode à favoriser pour: champs de température & certaines études dans le bain

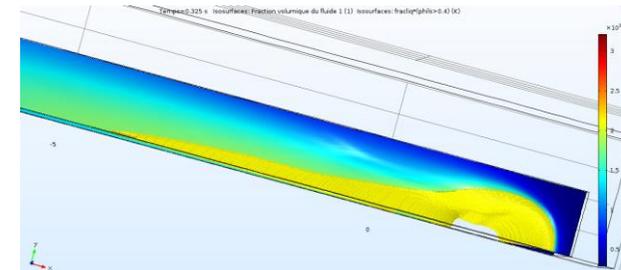
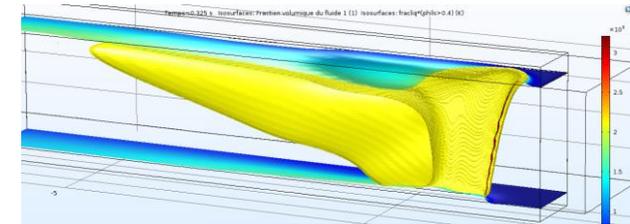
Principe:

Supprimer les variations de propriétés ou des phénomènes (non-linéarités).

$$\boxed{\rho(T)} \boxed{c_p^*(T)} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right] = \nabla \cdot (\boxed{\lambda(T)} \nabla T) + I_{laser} + Q_{vap} \quad \longrightarrow \quad \rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right] = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + I_{laser} + Q_{vap}$$

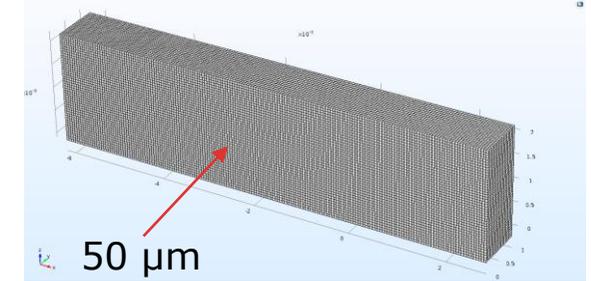
Simplifications testées:

- | | |
|----------------------------------------------|---------|
| - Propriétés constantes | -15% |
| - Flottabilité | -10% |
| - Propriétés constantes and flottabilité | -5% (!) |
| - Chaleur latente de fusion | -0% |
| - Condition de Darcy | -30% |
| - Options solveur, propriétés des fluides... | <30% |

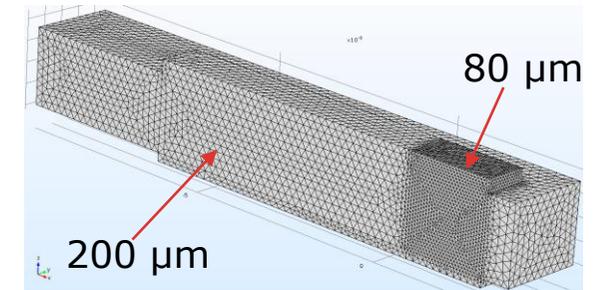


Principe: Optimiser le maillage à la physique résolue

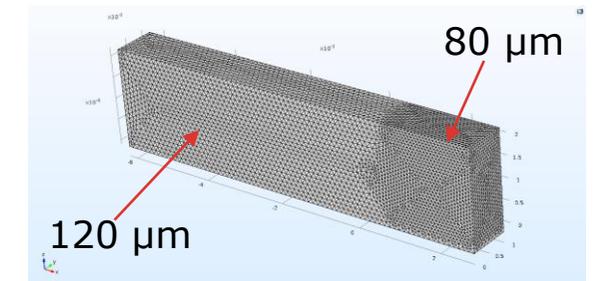
Level set: Maillage homogène et fin
140 000 éléments cubiques de 50 μm



Transfer de chaleur: Maillage raffiné seulement sous le laser
250 000 éléments triangulaires de 80 à 200 μm



Mécanique des fluides: Maillage intermédiaire
290 000 éléments triangulaires de 80 à 120 μm

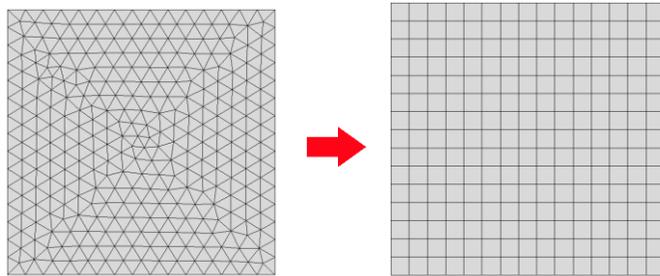


Intérêt : Maillage ultra-optimisé

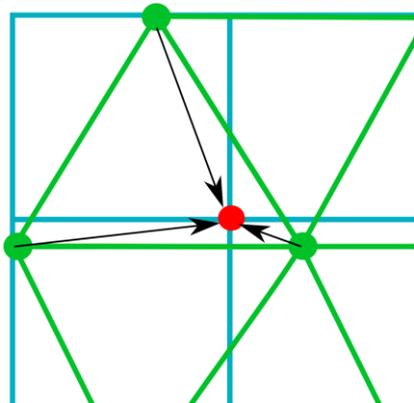
→ TOTAL: 400 000 DDL (vs 2 100 000 DDL avant!)

1 intérêt : Maillage optimisé localement et pour chaque physique

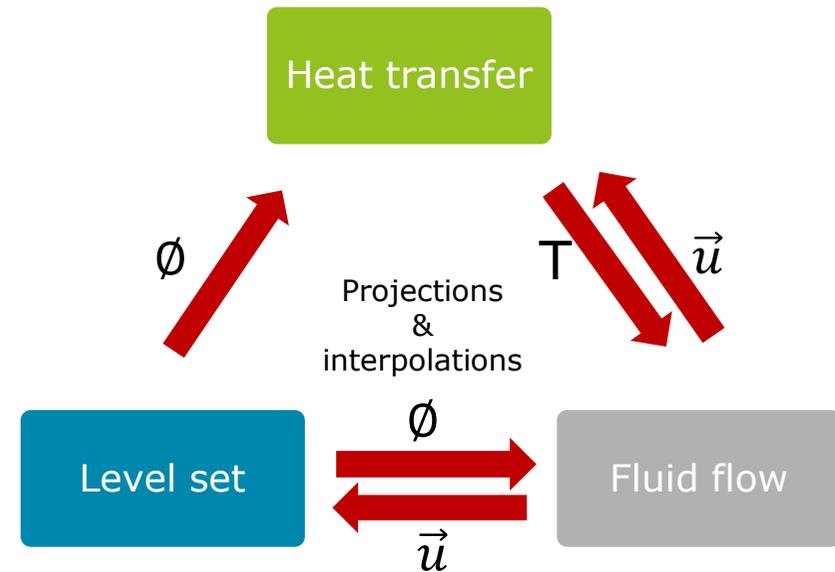
Problème : Nœuds de calculs ne coïncident pas



Solution : Opérateur de couplage avec interpolations



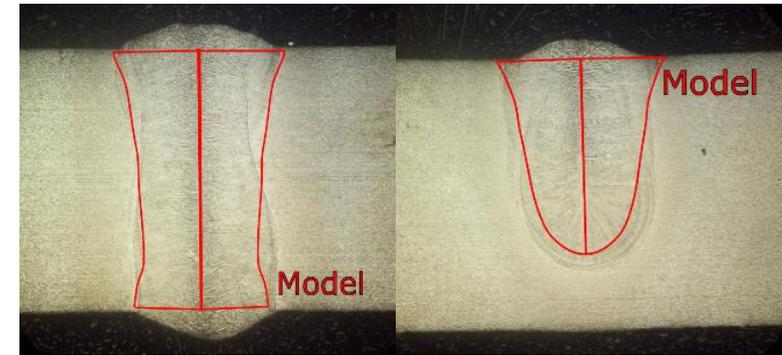
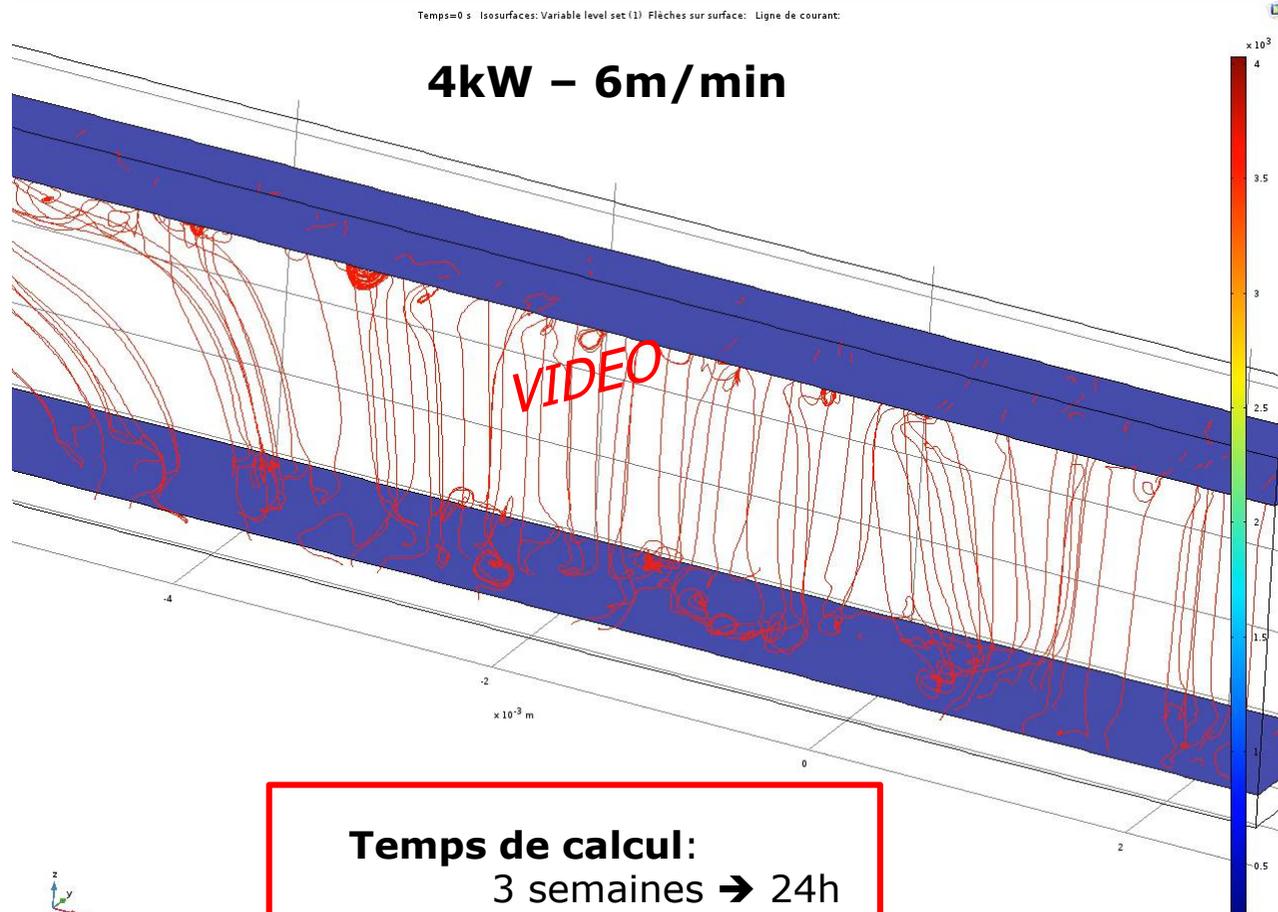
Nombreux couplages à réaliser



➔ Possible dégradation de la solution

➔ Nombre d'éléments réduit au strict nécessaire

Ligne de fusion - Résultats et validation expérimentale



4kW – 6m/min

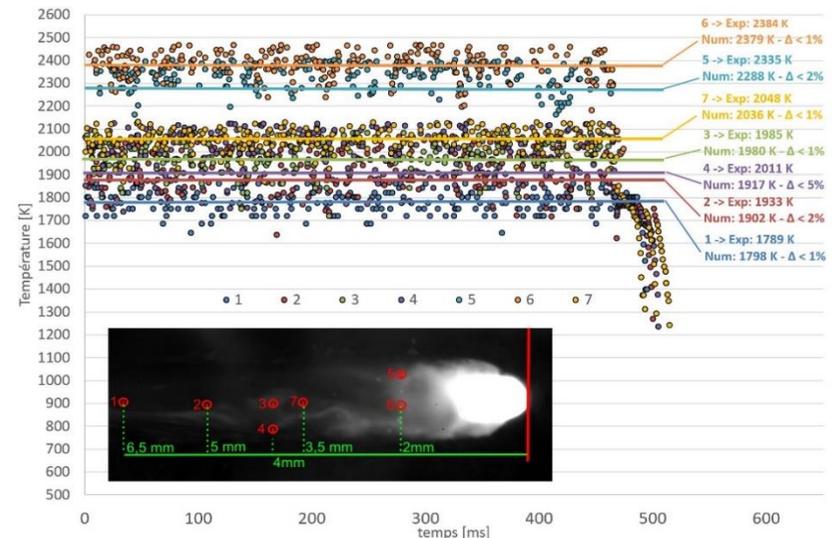
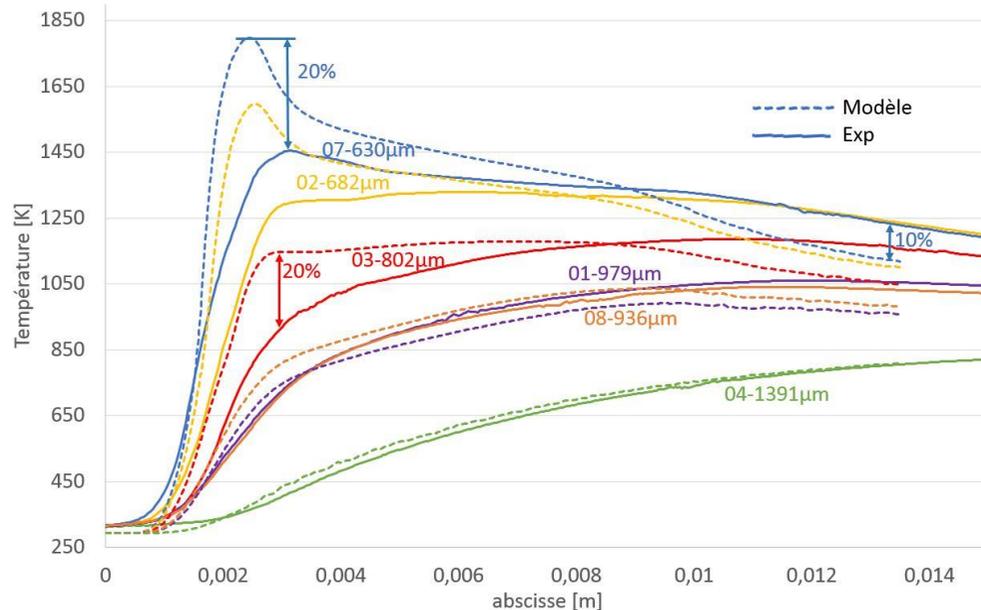
4kW – 8m/min

Bonne prédiction de:

- taille de zone fondue et la forme
- pénétration partielle
- inclination du keyhole

6 m/min, 4 kW, fusion line -> Validation expérimentale

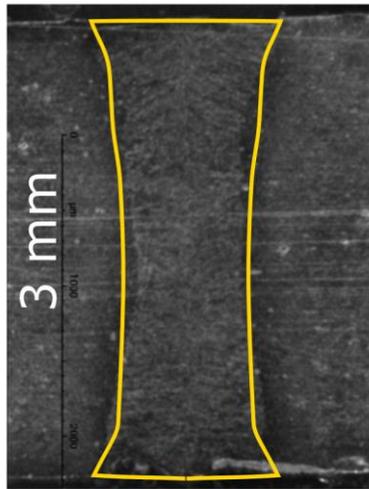
Températures en solide et liquide



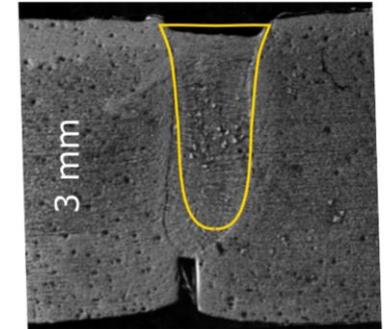
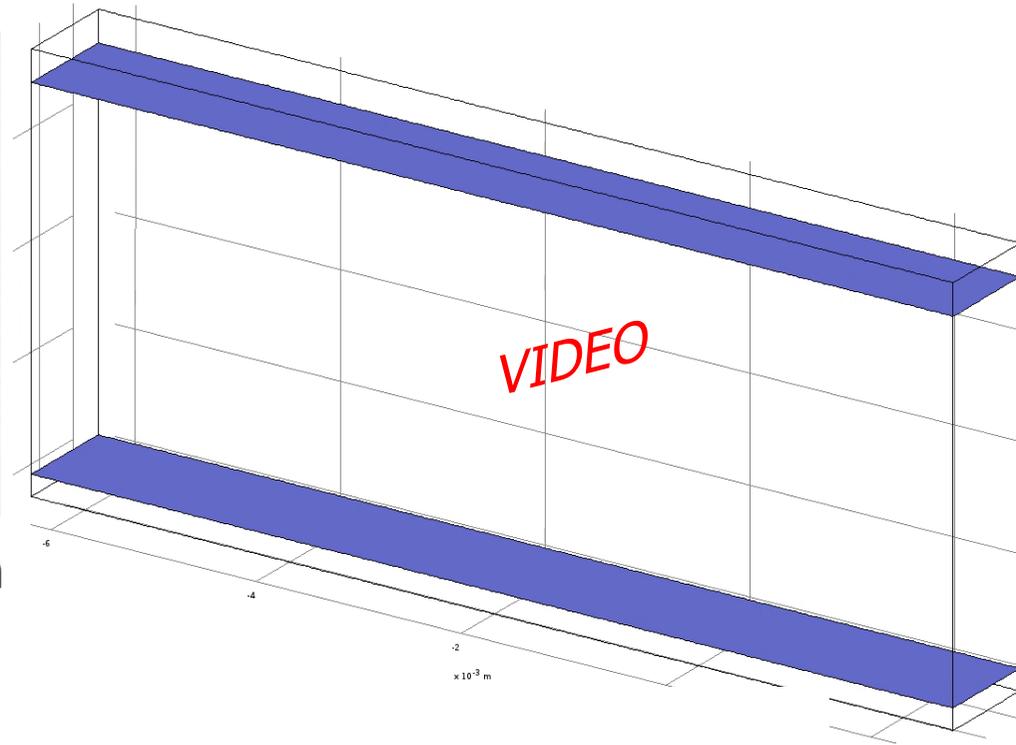
- ➔ Prédiction correcte, améliorable facilement (taille de domaine, coefficients d'échange)
- ➔ Mesures par pyrométrie dans le bain de fusion: très bonne prédiction

Autres configurations

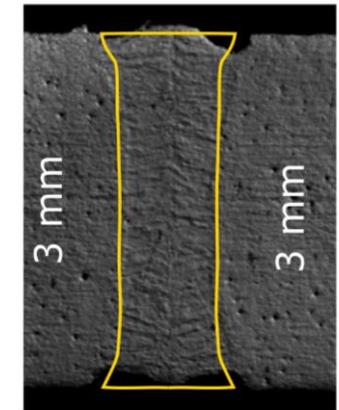
Soudage de tôles de 3mm



4kW 3 m/min



4kW 7 m/min

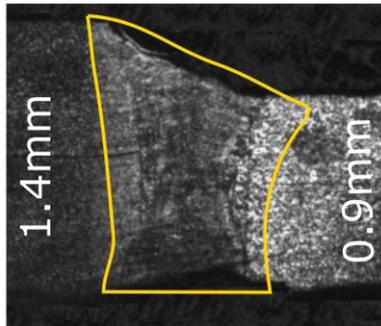


6kW 5 m/min

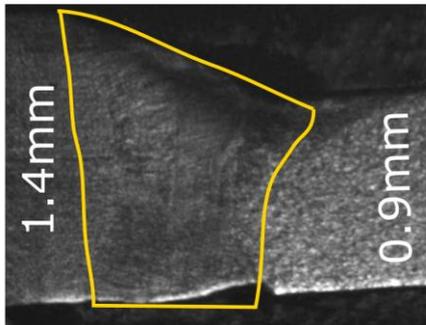
➔ Temps de calcul : entre 24 h et 48 h

Autres configurations

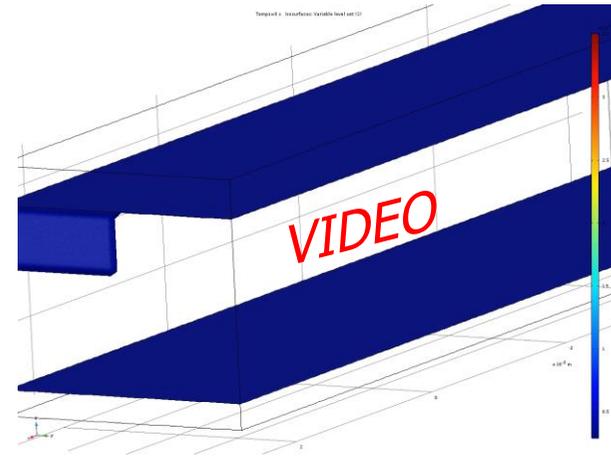
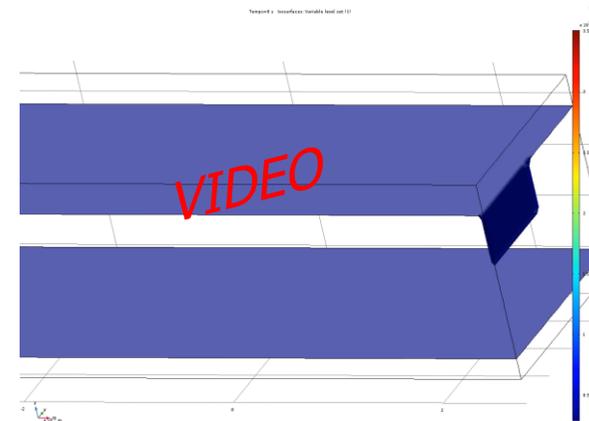
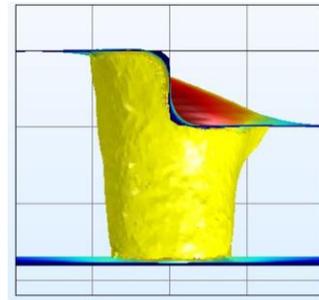
Soudage de différentes épaisseurs



6kW 5 m/min

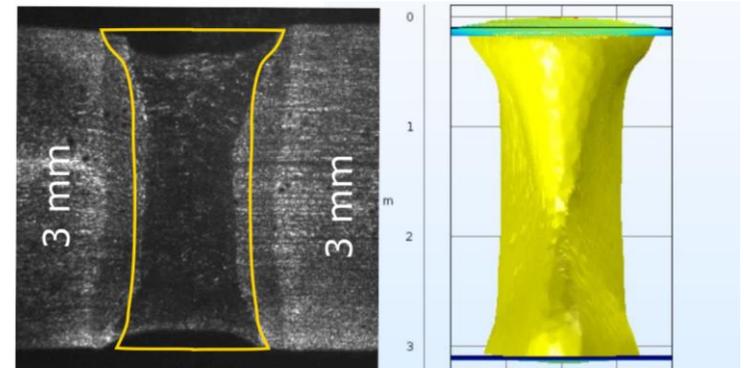
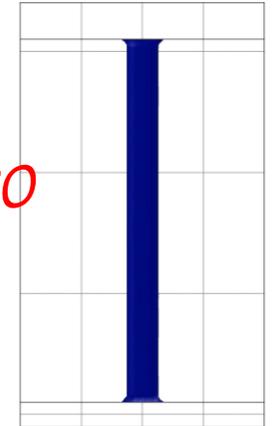
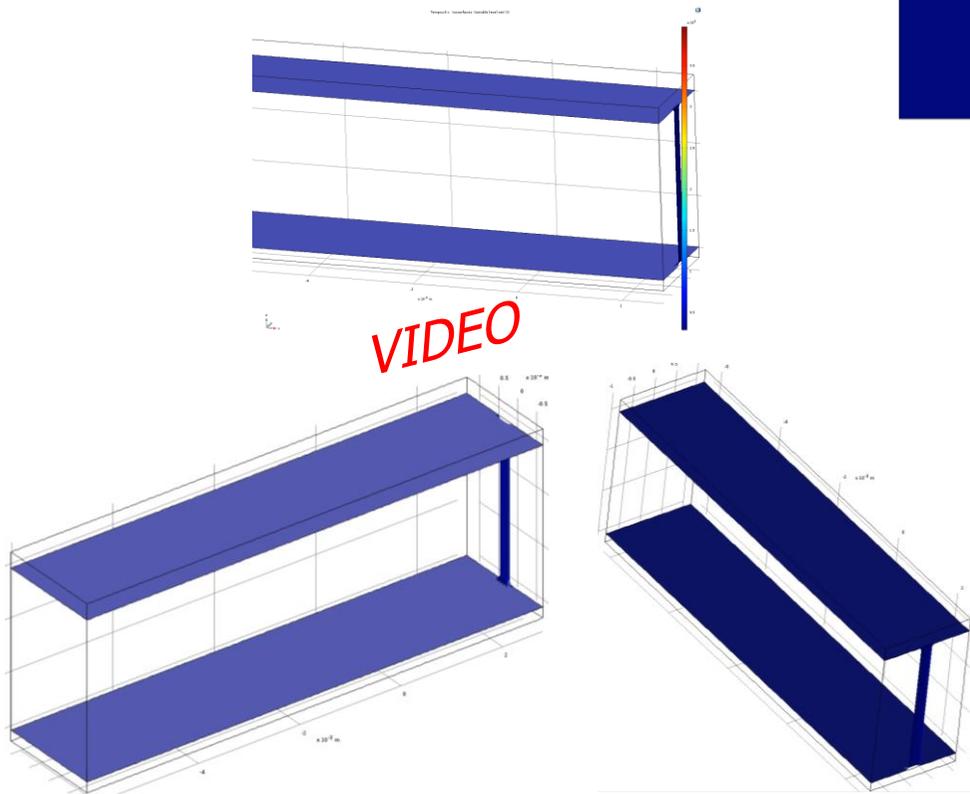


4kW 9 m/min



Autres configurations

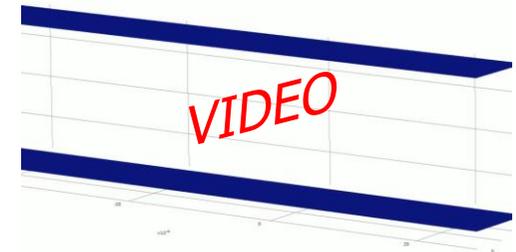
Avec jeu entre les tôles



4kW 3 m/min
with 250 μ m gap

Soudage laser

- Utilisation de plusieurs maillages ultra-optimisés
- Temps de calculs < 24h
- Code commercial
- Seulement dépendant des paramètres opératoires
- Réduisent drastiquement le nombre d'essais-erreurs



Challenges restants

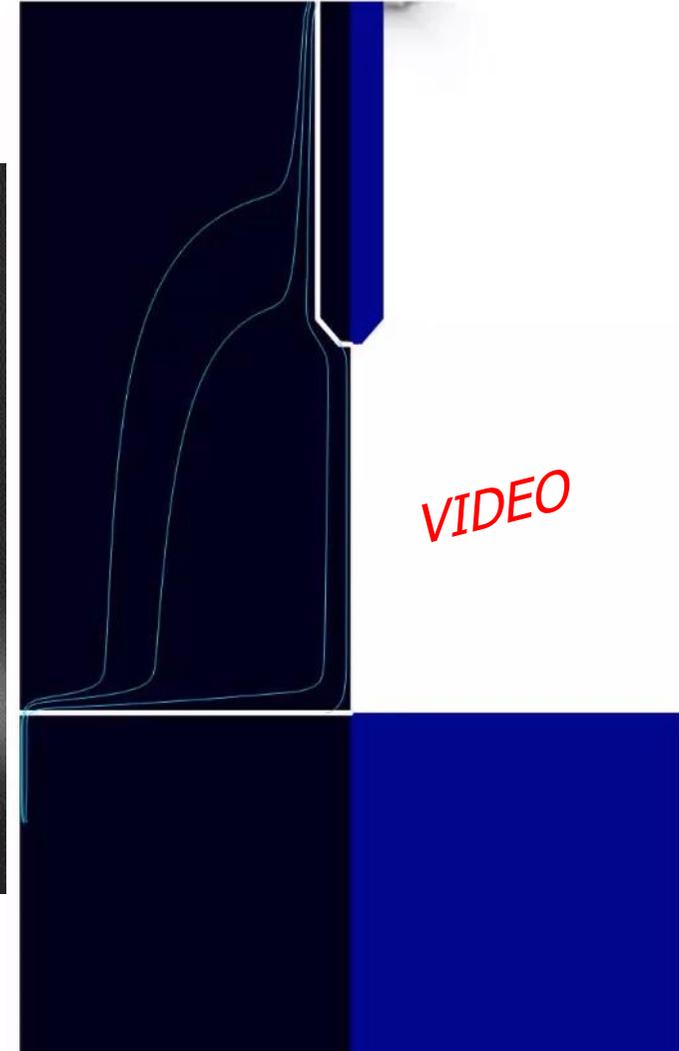
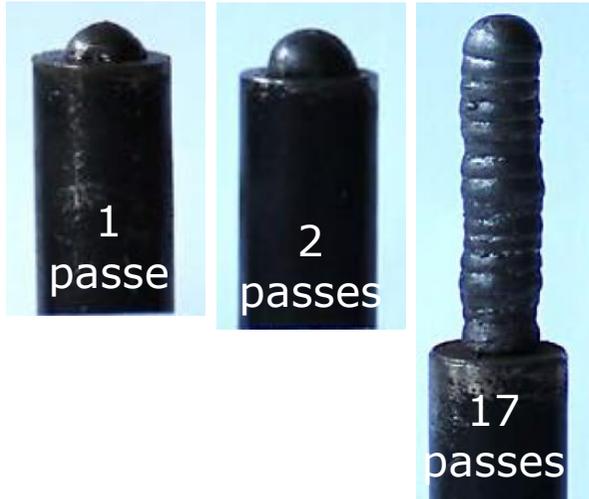
- Utilisation industrielle, abaques numériques, source équivalentes,
- Connaître les propriétés thermophysiques au delà de la fusion

Perspectives

- Continuer développer le même type de modèle pour du MIG-MAG

Modèle très multiphysique:

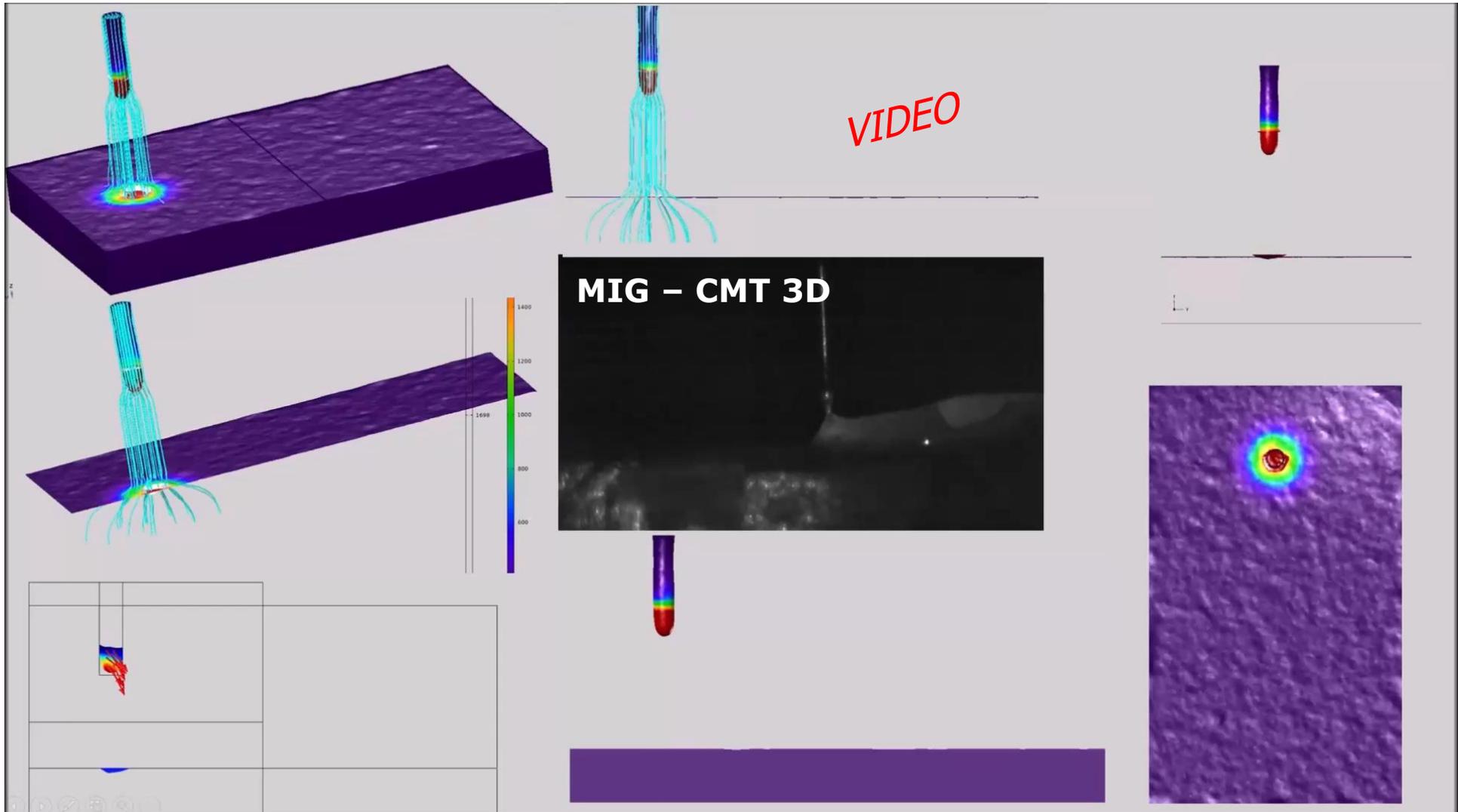
Thermique – Mécanique des fluides – électromagnétisme



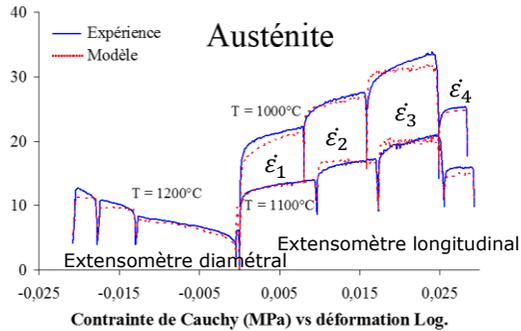
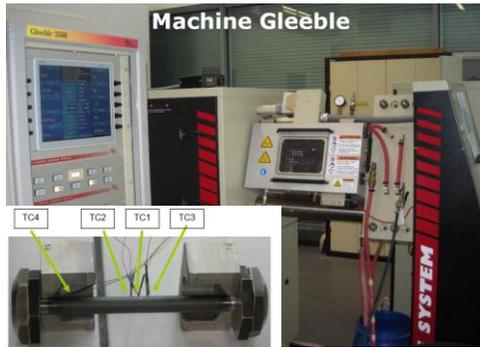
➔ Modèle de connaissance

➔ Issu uniquement des paramètres opératoires

Application au MIG-MAG (WAAM)



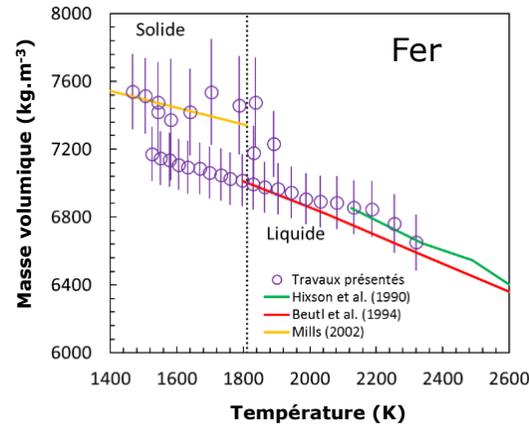
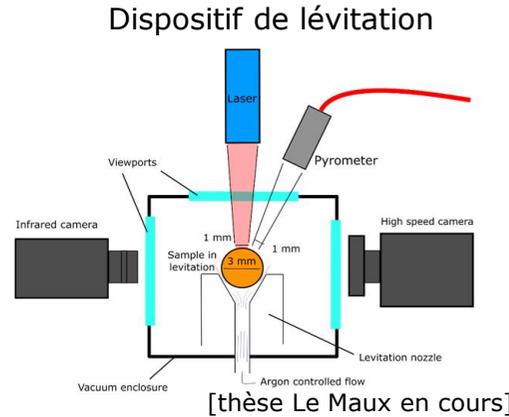
Caractérisation thermomécanique et thermométallurgique en phase solide



Conductivité thermique
Masse volumique
Chaleur spécifique
Conductivité électrique
Résistances de contact
...etc

Lois de comportement EVP en fonction de la température et des phases

Propriétés thermophysiques en phase liquide

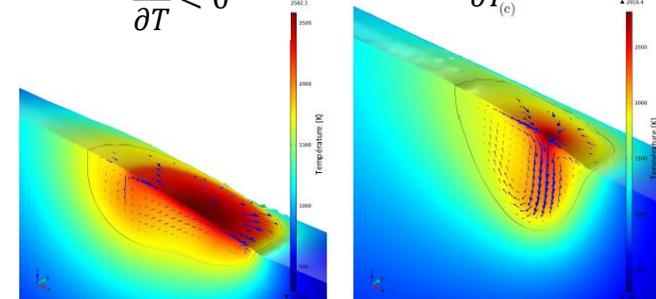


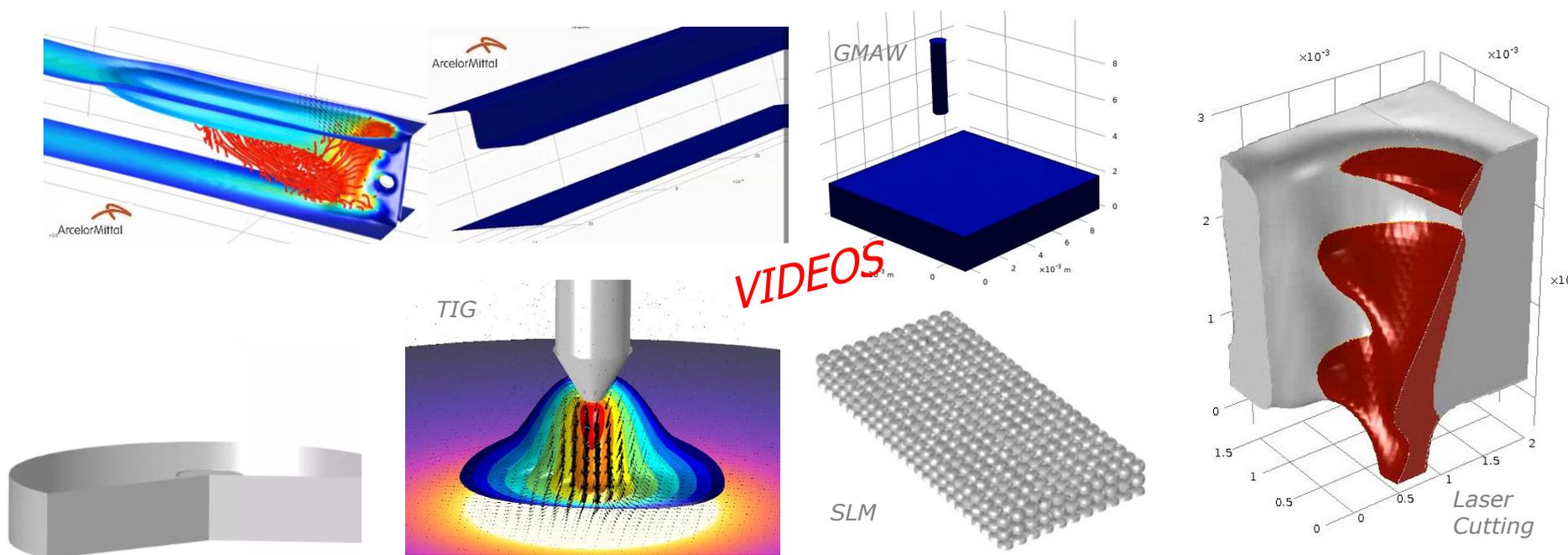
Masse volumique, viscosité, tension superficielle

Effet Marangoni

$$\frac{\partial \gamma}{\partial T} < 0$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial T_{(c)}} > 0$$





Merci pour votre attention

mickael.courtois@univ-ubs.fr