



Journée SNS – 27 Mars 2014

Maison de la mécanique - Paris

Modélisation thermo-hydraulique tri-dimensionnelle du soudage laser et validation expérimentale

Mickael COURTOIS, Muriel CARIN, Philippe LE MASSON, Sadok GAEID, Mikhael Balabane

I – Introduction

- Physique du soudage laser -> phénomènes pris en compte

II – Définition du modèle numérique

- Transfert de chaleur, mécanique des fluides, Level-Set
- Résumé modèle électromagnétique

III – Résultats et discussion

- Modèle 2D axisymétrique
- Modèle 3D
- Confrontation expériences

IV – Conclusions et travaux futurs



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

Thermique:

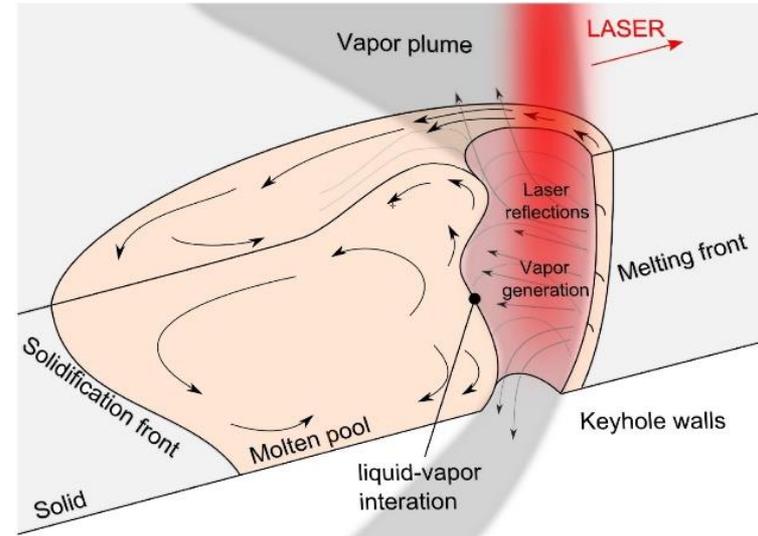
- Conduction
- Convection
- Rayonnement
- Chaleurs latentes

Optique / électromagnétisme:

- Réflexions laser
- Absorptivité globale

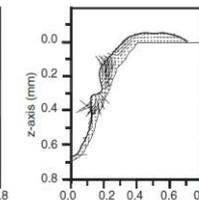
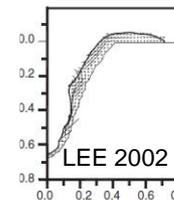
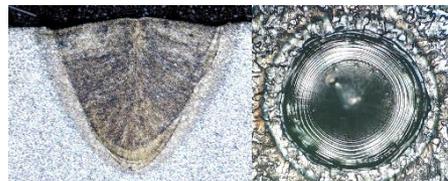
Mécanique des fluides:

- Ecoulements liquide et gaz
- Tension de surface, gravité;
- Vaporisation, Pression de recul, *plume de vapeur*



Développements préliminaires: Approche axisymétrique → tir laser statique

But: modéliser la création du keyhole afin de réaliser tous les développements et lever les problématiques

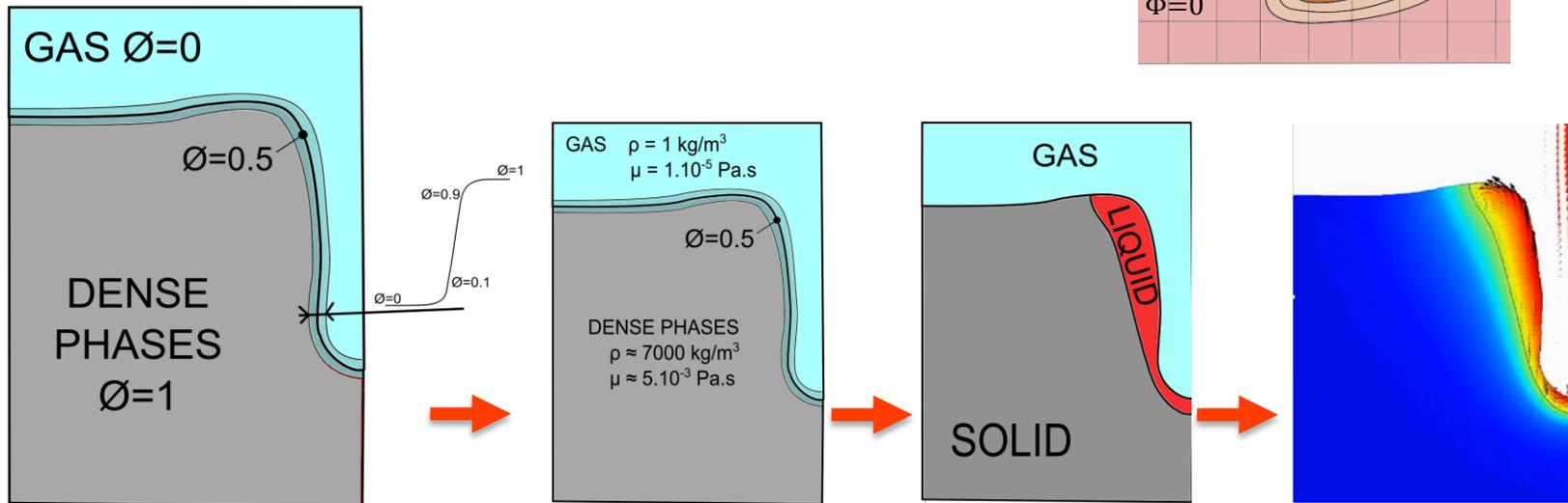
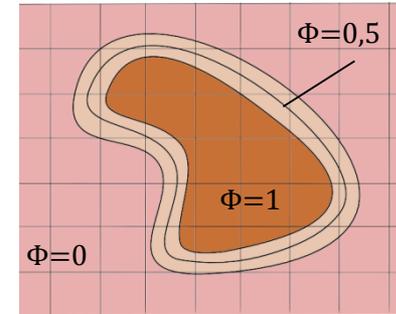


Moving interface

Code: Comsol Multiphysics® v4.3b (+ CFD module + *RF module*)

Méthode Level Set

Maillage fixé; Définition d'une variable ϕ dans tous les éléments



Equation de transport liée à la mécanique des fluides:

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

Equations résolues dans l'ensemble du domaine

Conservation de la masse:

Loin de l'interface

$$\nabla \cdot u = 0$$

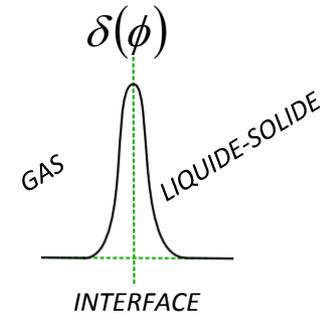


Génération plume de vapeur et pression de recul

$$\nabla \cdot u = \dot{m} \delta(\phi) \left[\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho^2} \right]$$

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{m}{2 \pi k_b}} \frac{P_{sat}(T)}{\sqrt{T}} (1 - \beta_r)$$

[Hirano-Fabbro 2011]



Quantité de mouvement: Equations de Navier-Stokes

Hypothèses: Fluides Newtoniens et incompressibles; Ecoulements laminaires

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot (\nabla u) \right) = \nabla \cdot \left[-PI + \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] - \rho (1 - \beta(T - T_{fusion})) g + K(T) u + (\gamma \cdot nk) \delta(\phi)$$

flottabilité

Condition de Darcy

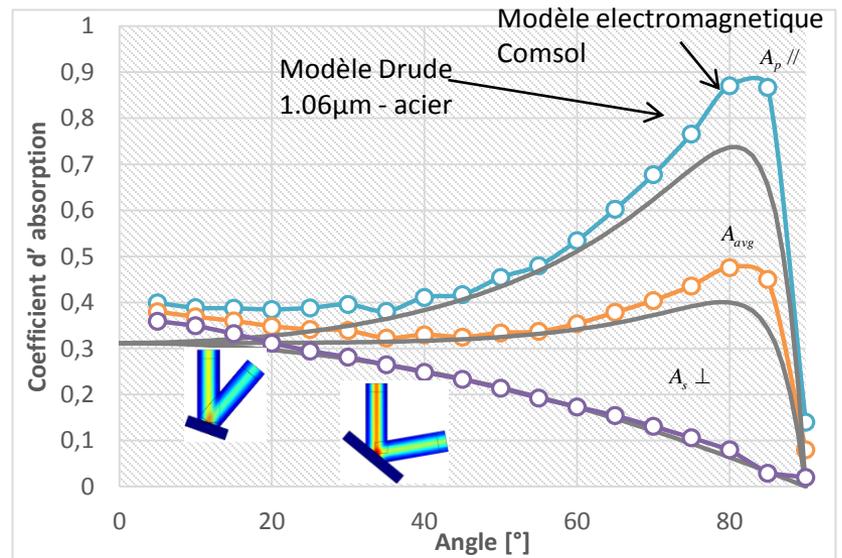
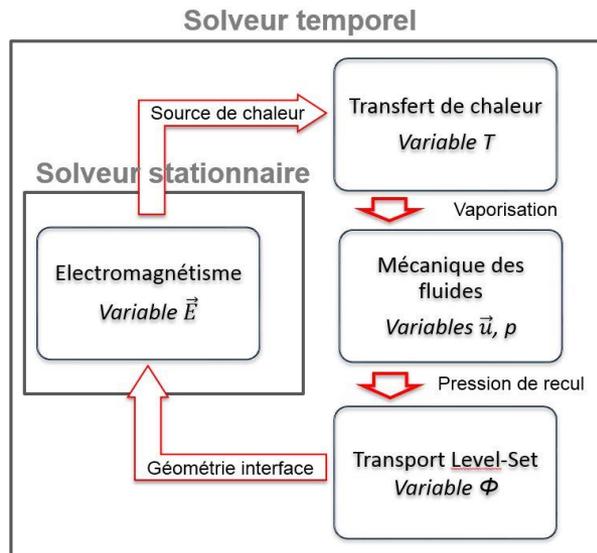
Tension de surface

Transfert de chaleur:

$$\rho c p^* \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (u T) \right] = \nabla \cdot (k \nabla T) + I_{laser} - Q_{vap}$$

Réflexions du laser – Description ondulatoire, équations de Maxwell:

- Principe:
- Surestimation de la longueur d'onde -> $\lambda_2 = 50 \mu\text{m}$
 - Identification propriétés électromagnétiques -> bon coefficient d'absorption
 - Validations propagation dans cavités type keyhole

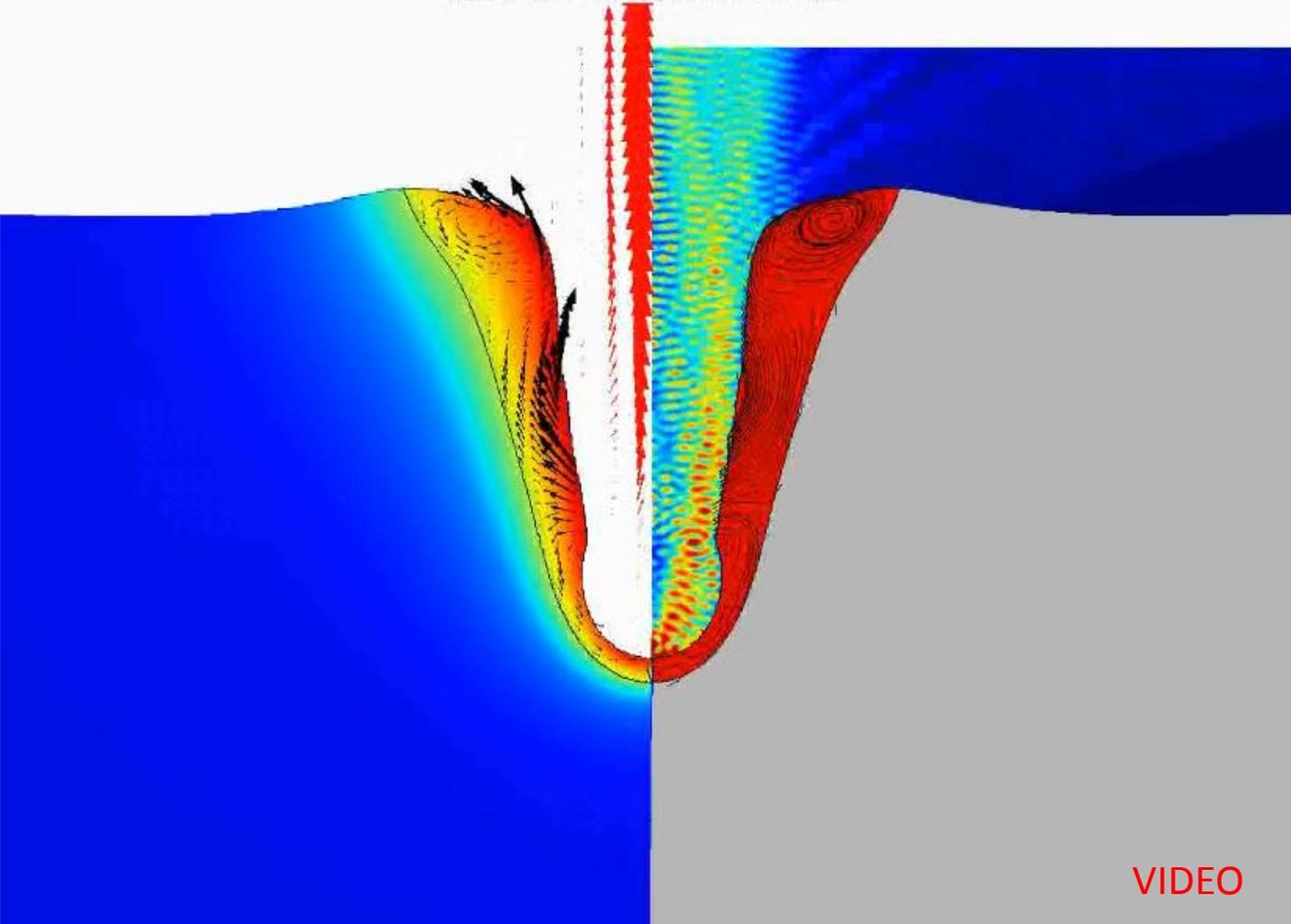


Conclusion:

- Description correcte dans un keyhole millimétrique. Petites différences si ondulations < $50 \mu\text{m}$

Résultat 1250W

Temps=0 Surface: 0 Surface: mod? idman? (mh norm F) (r=starret) (V/m) Surface: (mod1 nhils) (1) Surface: (frac10 nhils) (mir1 cid) Surface: (1 mir1 cid) (rnf V) Surface: (T) (1 mir1 cid) (nhils 0.5) Flèche sur surface: Flèches sur surface: Isovaleur: frac10 nhils 0.5) (3) Ligne de courant



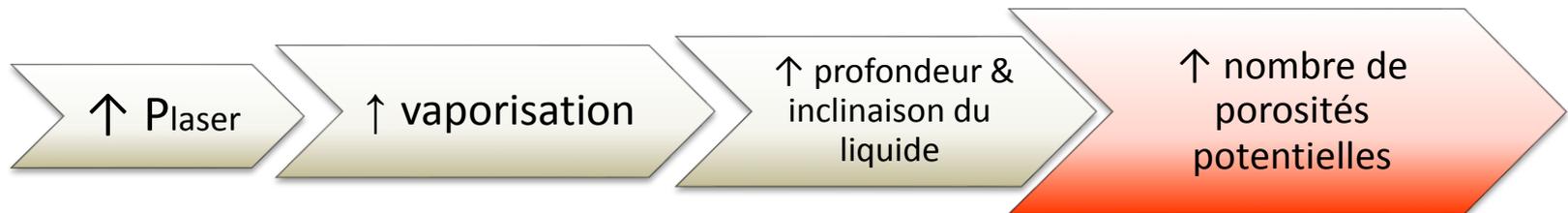
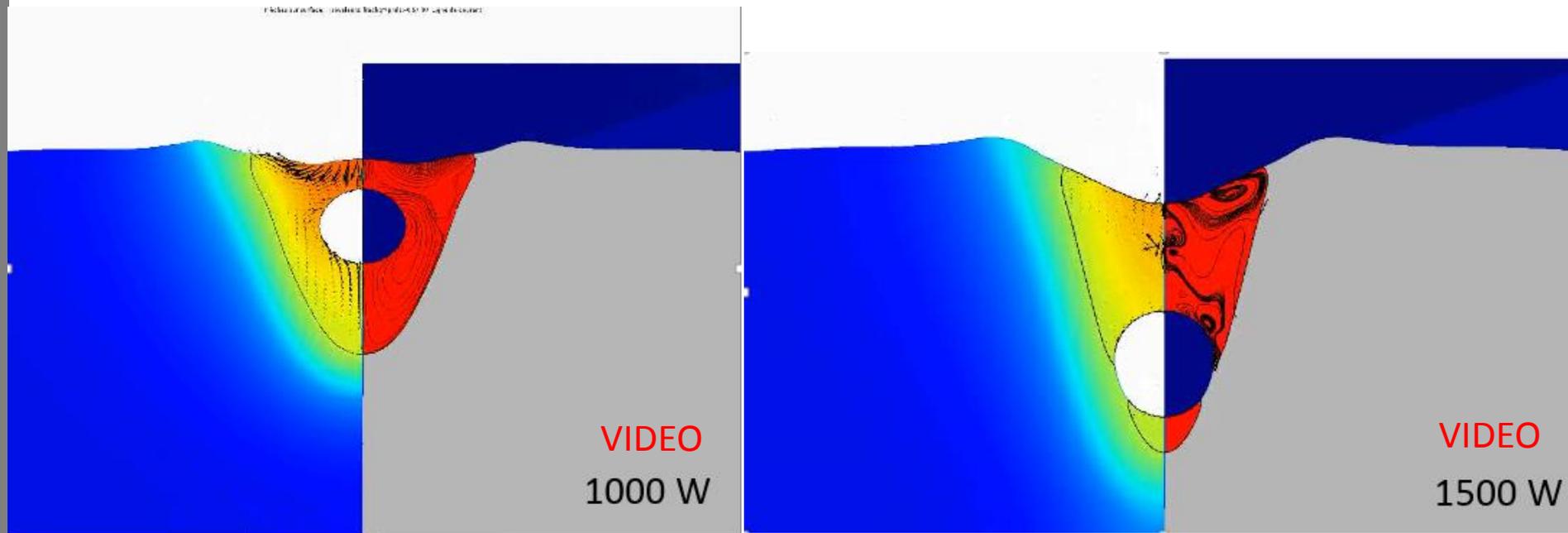
Températures atteintes:
≈ 3200 K

Vitesses dans le bain:
≈ 0,5 m/s

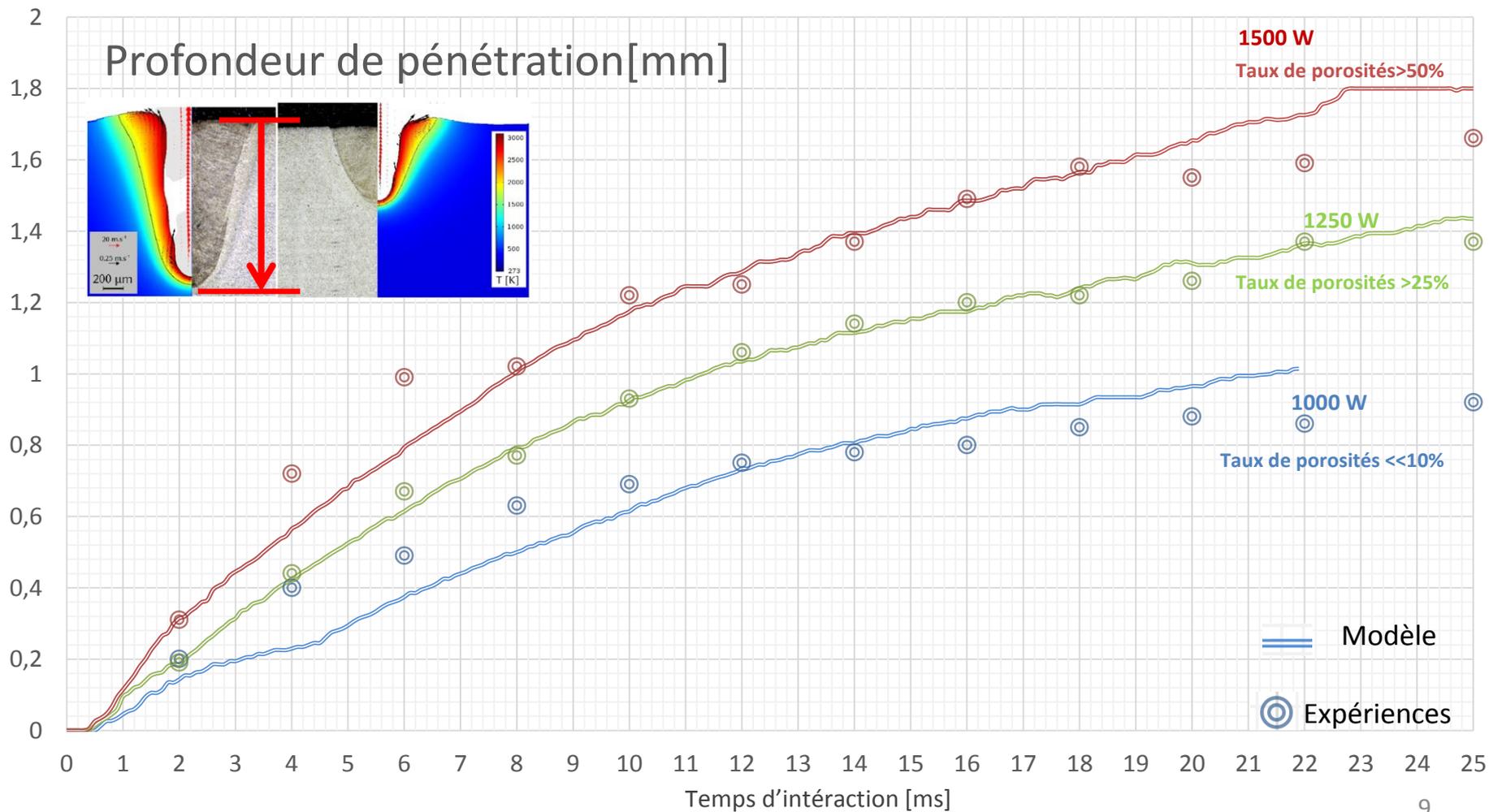
Vitesses dans le gaz:
≈ 40 m/s

VIDEO

Résultats



Confrontation modèle / expérience:



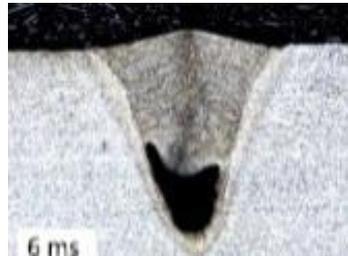
Pré-conclusion modèle 2D axisymétrique

- * Comparaison à l'expérience satisfaisante

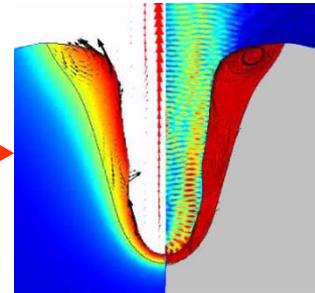
- * Principaux phénomènes pris en compte:
 - vaporisation, pression de recul, gravité, (*plume de vapeur*) ...
 - création du keyhole, écroulement du bain,
 - création de porosités, ... etc

- * Une nouvelle méthode pour modéliser le dépôt énergétique du laser:
 - description ondulatoire -> résolution des équations de Maxwell
 - Effets de concentration, de masque et de la polarisation calculés
 - Méthode utilisable dans des codes commerciaux
 - Mais méthode couteuse en temps de calcul

Développements du modèle en 2D axisymétrique :



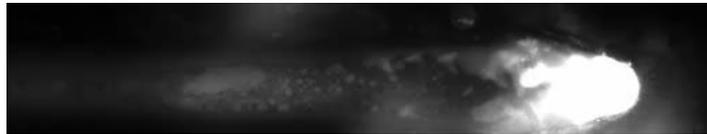
Expérimental



Numérique

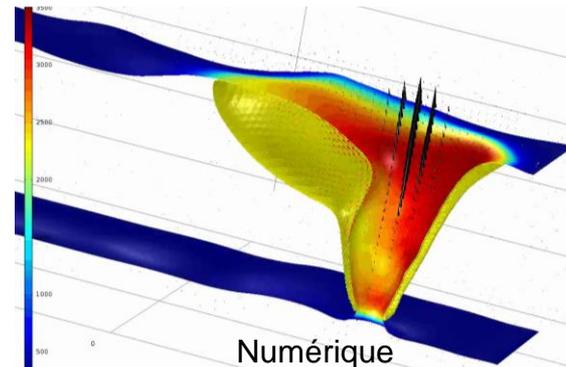
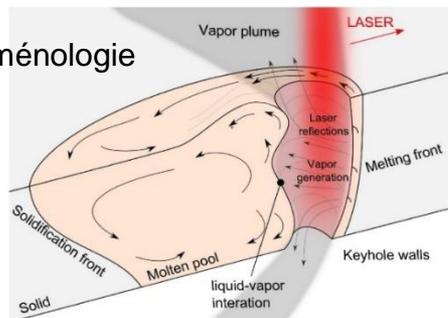


Export de la méthode en 3D :



Grandeurs expérimentales

Phénoménologie



Numérique



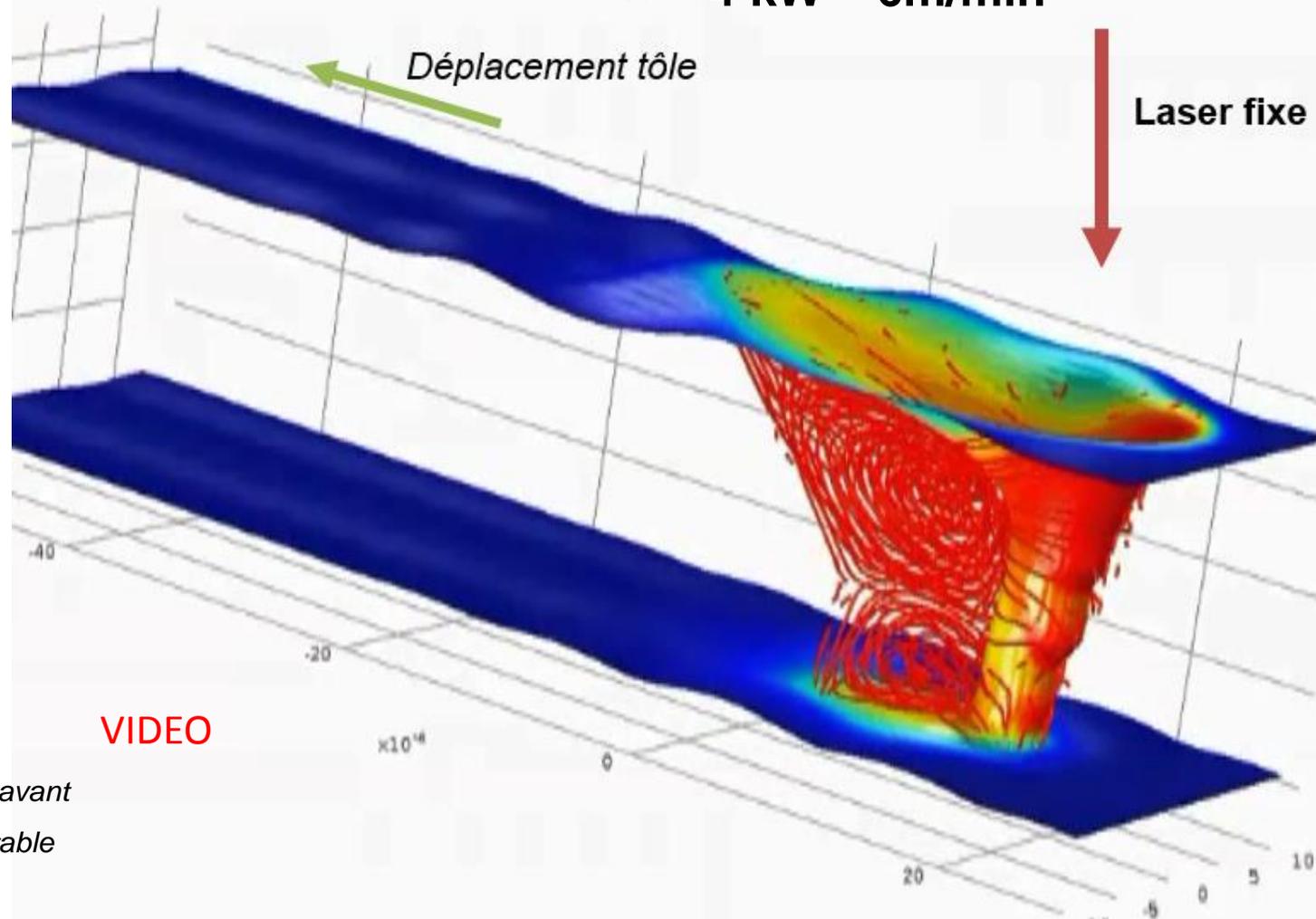
LIMAT B
Laboratoire d'Ingénierie
des MATériaux de Bretagne



ArcelorMittal

Premiers résultats 3D: (sans électromagnétisme)

4 kW – 6m/min



A voir:

- Création du keyhole
- Ondulations sur le front avant
- Inclination du keyhole stable
- Grossissement du bain



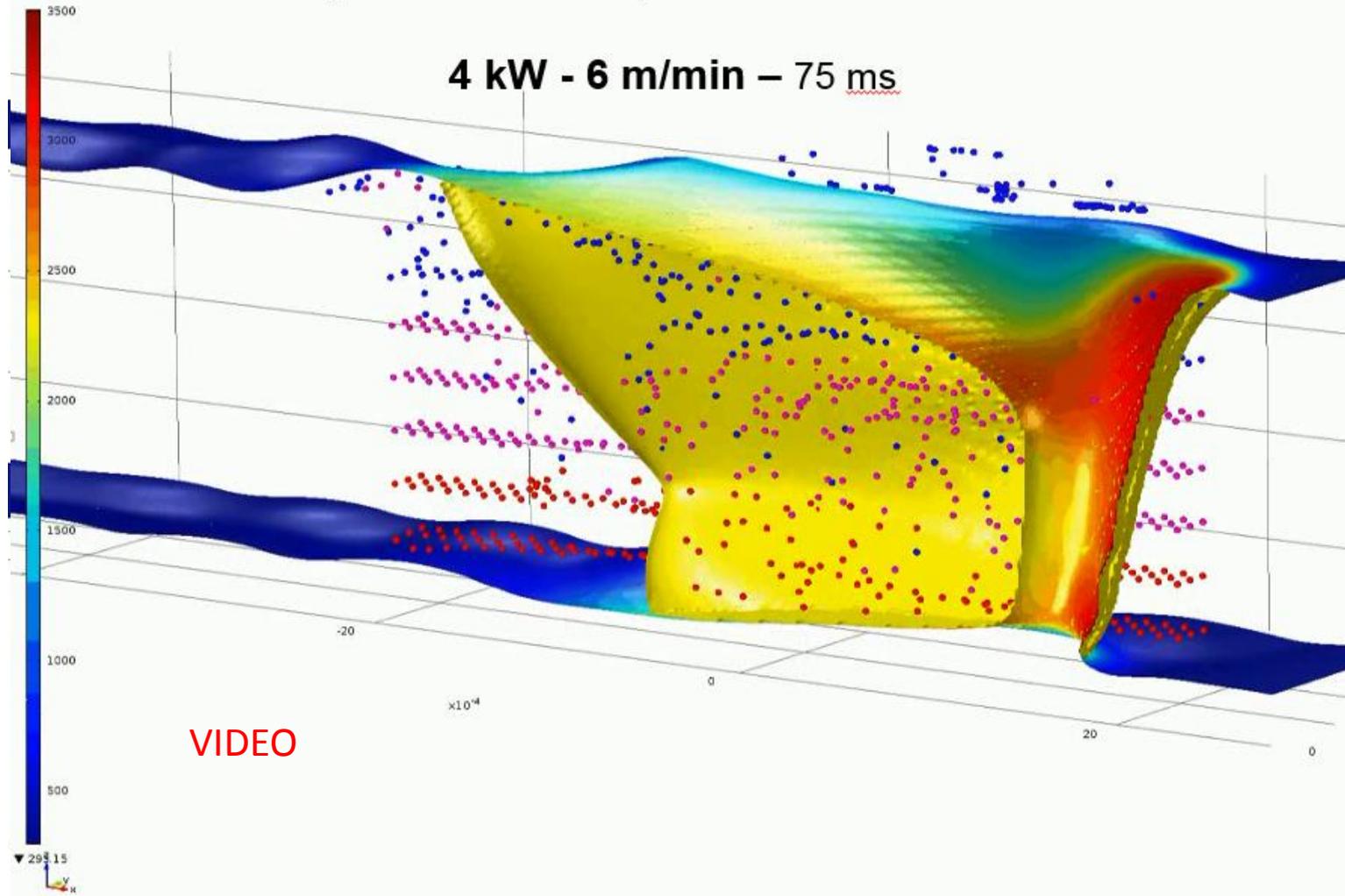
LIMAT B
Laboratoire d'ingénierie
des MATériaux de Bretagne



ArcelorMittal

Premiers résultats 3D: (traceurs sans masse)

Temps=0 Isosurfaces: Fraction volumique du fluide 1 (1)



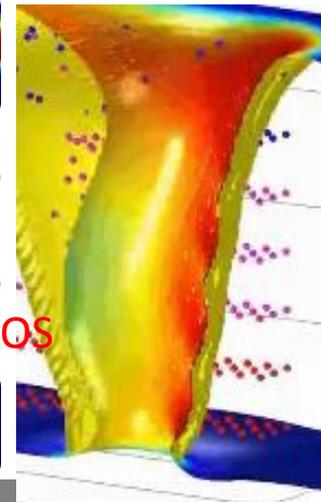
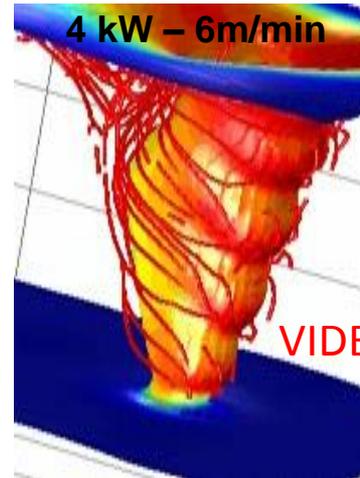
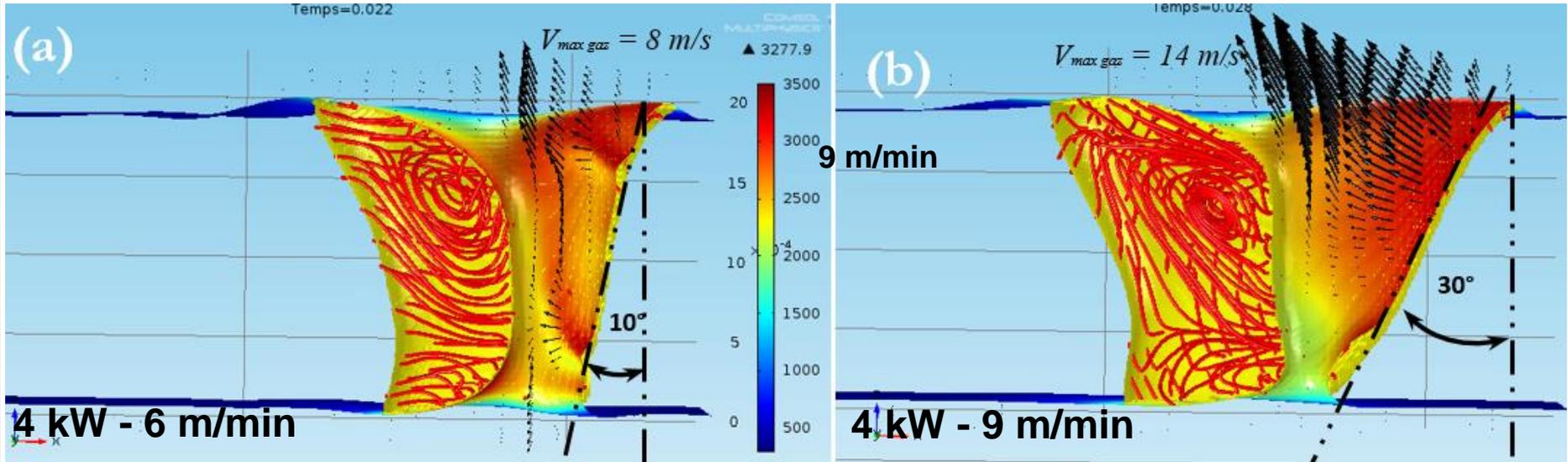


LIMAT B
Laboratoire d'ingénierie
des MATériaux de Bretagne



ArcelorMittal

Premiers résultats 3D: (sans électromagnétisme)



VIDEOS

-> phénoménologie OK

Validation expérimentale du modèle:

Approche simpliste: coupe macrographique:

Renseigne sur les largeurs de bain uniquement

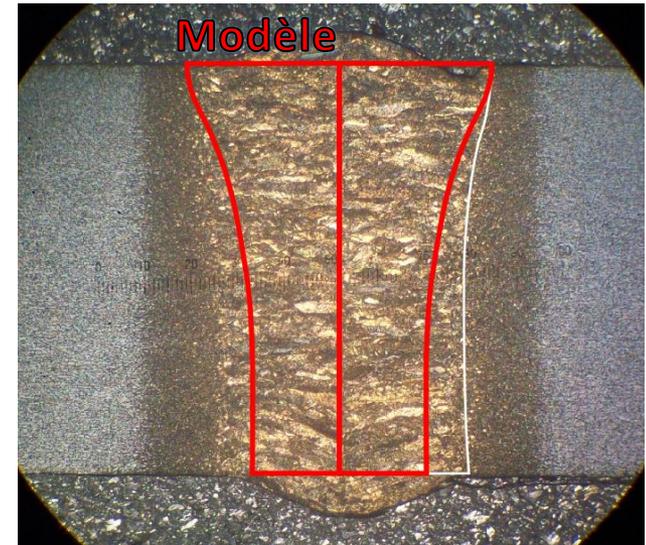
- > pas suffisant pour valider le modèle
- > peu d'indications sur les erreurs

Nécessité d'une campagne de validation plus complète:

- Buts:**
- Mettre en évidence les limites du modèle
 - Indiquer les erreurs potentielles

Moyens:

- Mesures de températures de surface en phase solide (LIMATB)
 - Mesures de températures de surface en phase liquide
 - Mesures de vitesses de surface dans le bain
- } PIMM



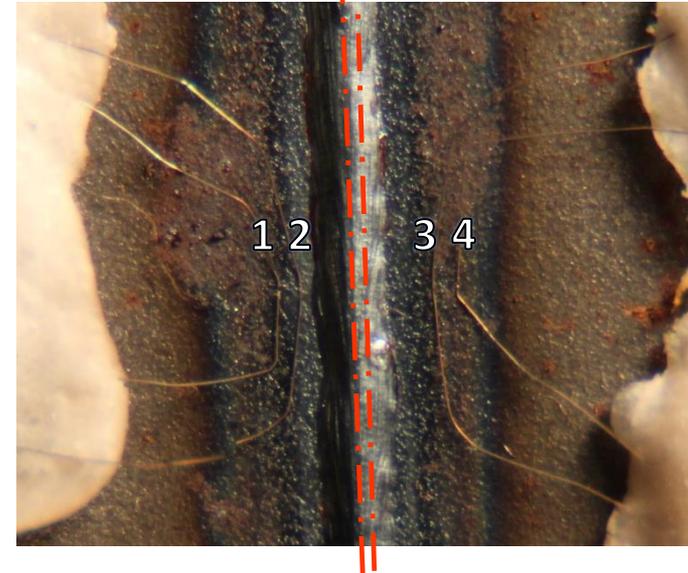
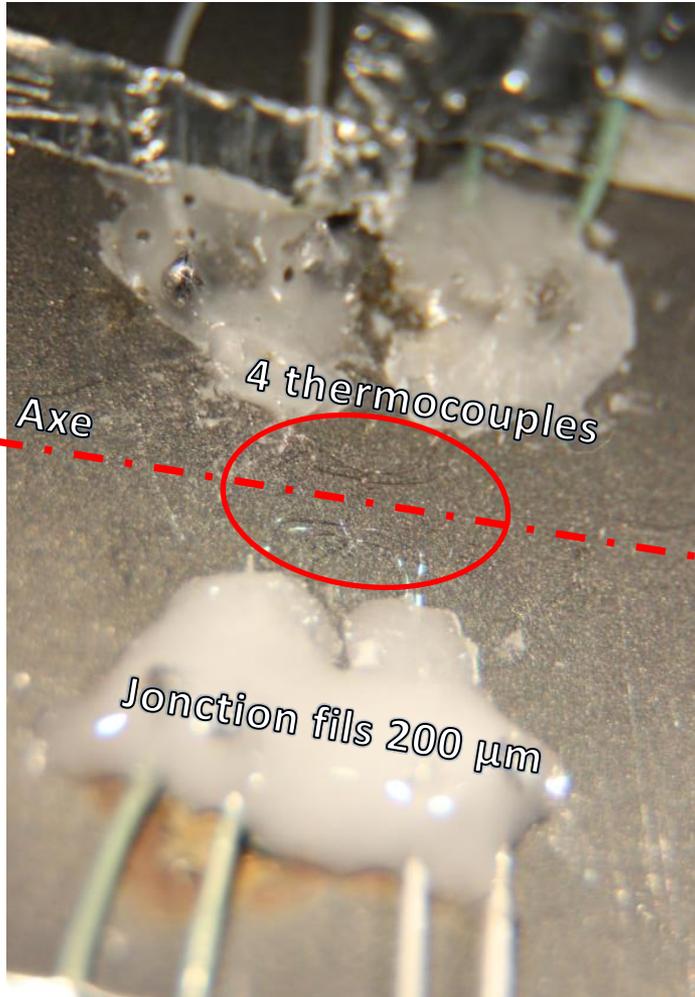


LIMAT B
Laboratoire d'Ingénierie
des MATériaux de Bretagne



ArcelorMittal

1 – Instrumentation thermocouples (K)



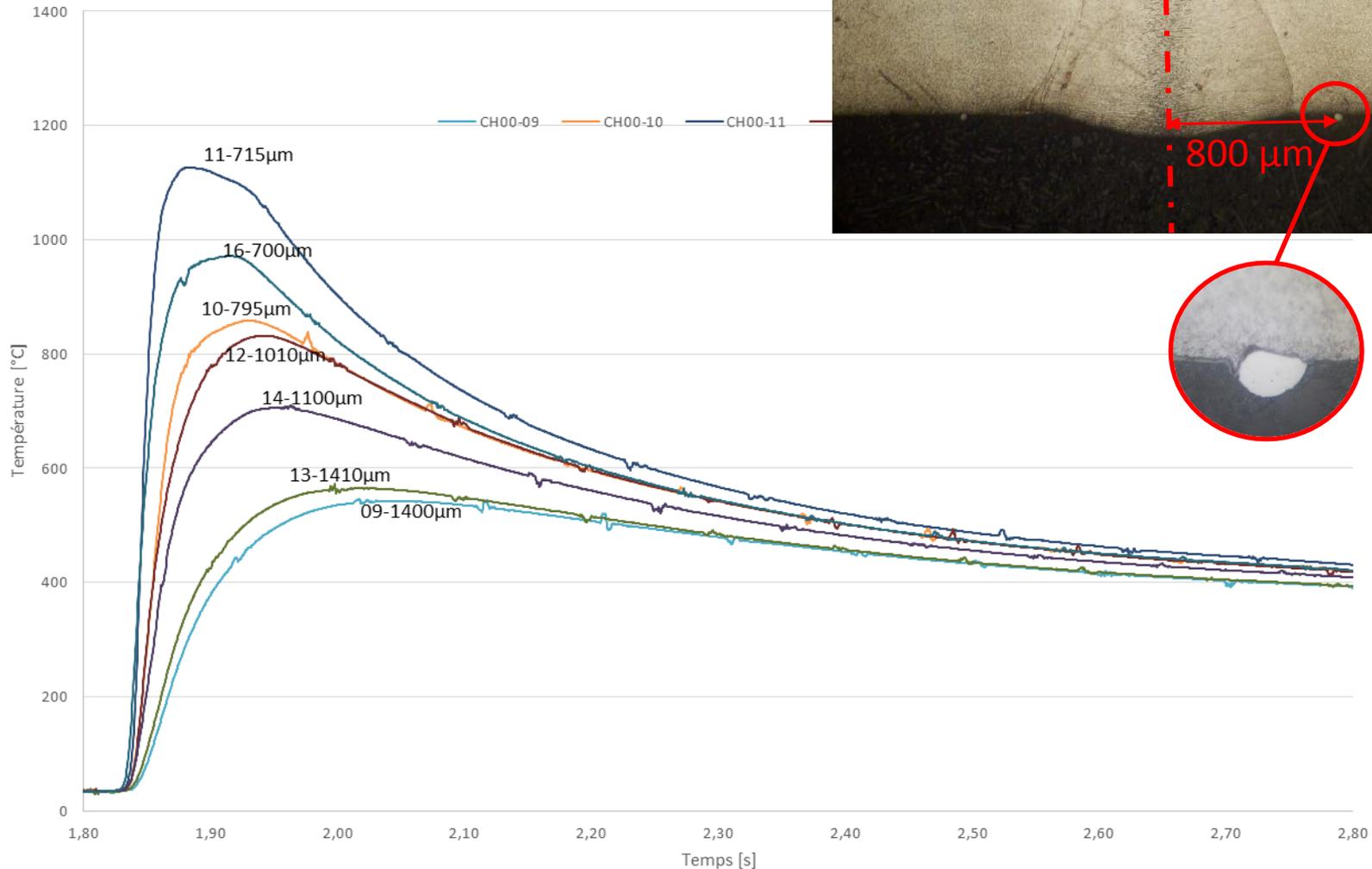
Objectifs:

- 16 thermocouples par tôle
- Températures entre 600 et 1200 °C
- Cinétiques complètes (chauffage et refroidissement)
- Largeur de mesure (moyenne de la température) ici $25\mu\text{m} < \delta < 50\mu\text{m}$

Précision attendue: erreur probable $\pm 50^\circ\text{C}$

- a- Modèle 2D axi
- b- Modèle 3D
- c- Expériences

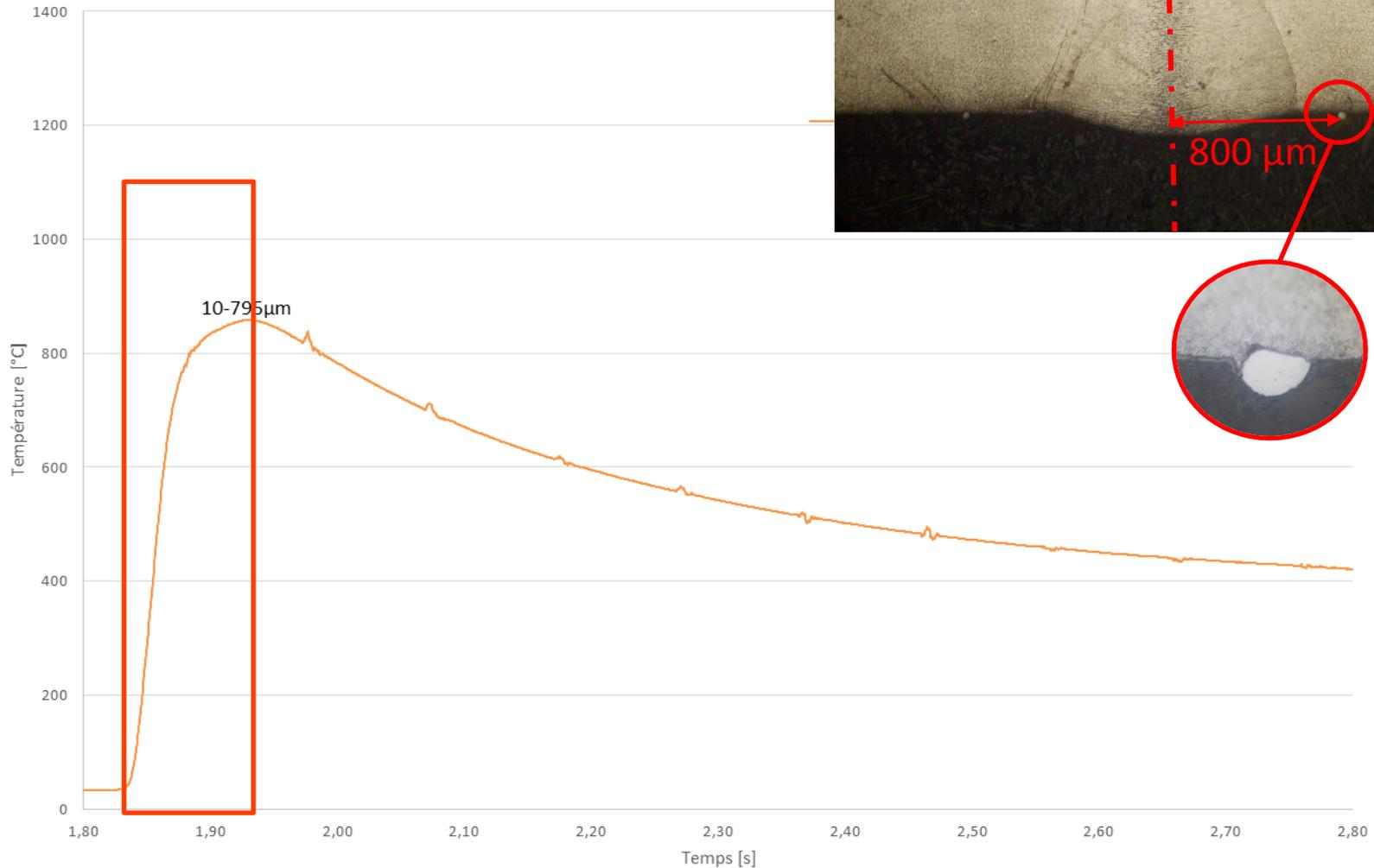
Résultats types: 4kW – 6 m/min – ep: 1,8mm – DP600



23/03/2014

- a- Modèle 2D axi
- b- Modèle 3D
- c- Expériences

Résultats types: 4kW – 6 m/min – ep: 1,8mm – DP600



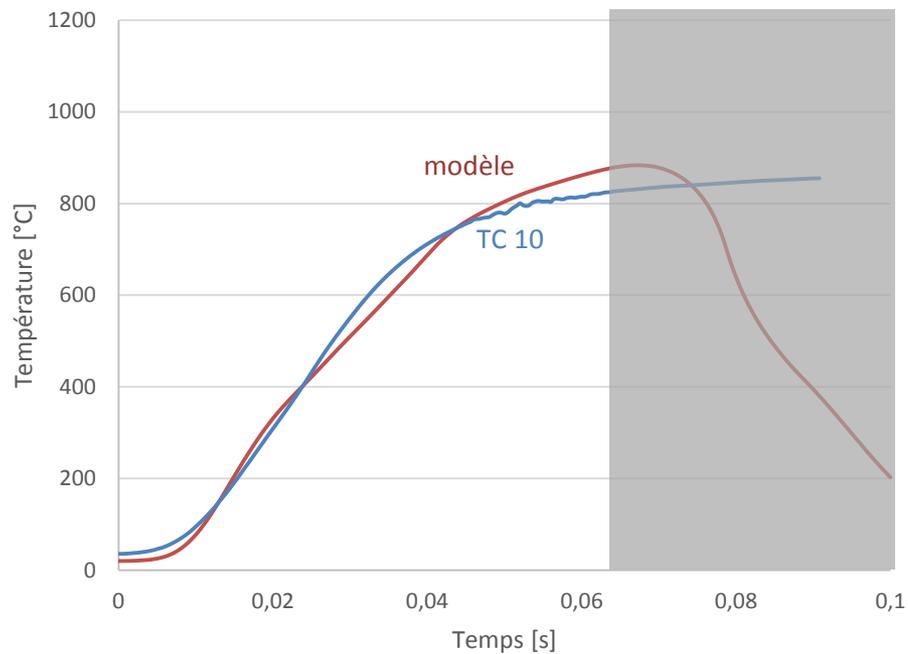


LIMAT B
Laboratoire d'Ingénierie
des MATériaux de Bretagne



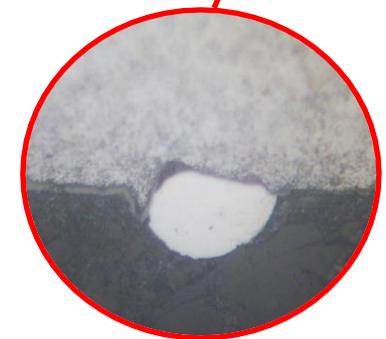
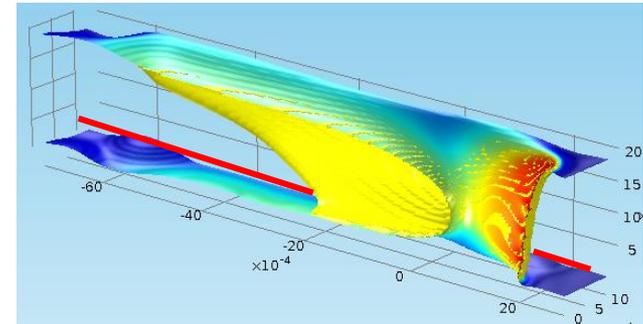
ArcelorMittal

Première comparaison: thermocouple Vs modèle



!Attention régime établi non-atteint dans le modèle!

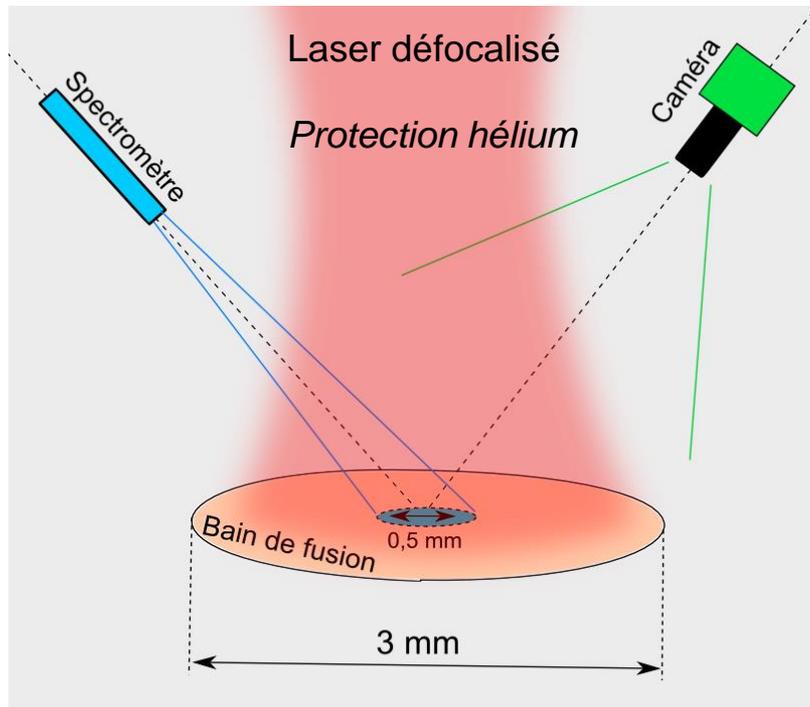
- Niveau de température atteint cohérent
- Vitesse de montée cohérente



2 – Mesures de température en surface de liquide (Méthode lab. PIMM, Muller 2013)



Etape 1: identification de l'émissivité -> tir statique large



Spectromètre (Pyrométrie spectrale)

- > spot $\Phi=500\mu\text{m}$
- > température & émissivité

Caméra (pyrométrie 2D mono-bande)

- > champ large -> niveaux de gris
- > fréq. d'acquisition = 10 000 i/s
- > filtrée 800-950 nm

Niveaux de gris = température avec émissivité calé

-> Identification de l'émissivité sur le plateau de solidification

2 – Mesures de température en surface de liquide (Méthode lab. PIMM, Muller 2013)

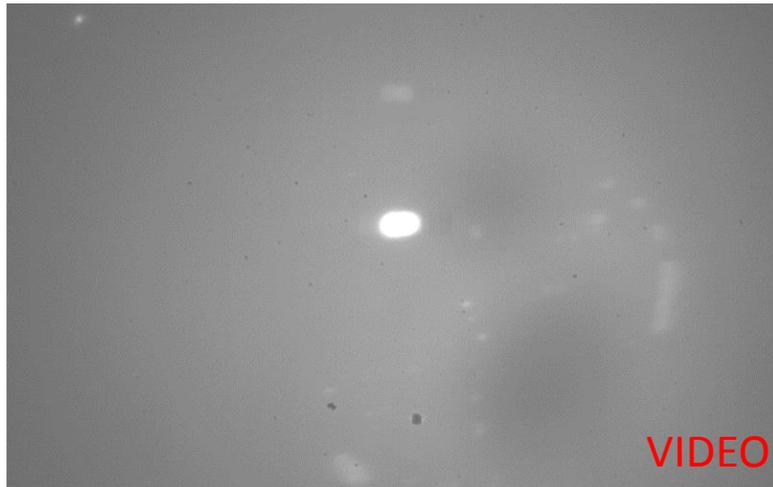


Etape 1: identification de l'émissivité -> tir statique large

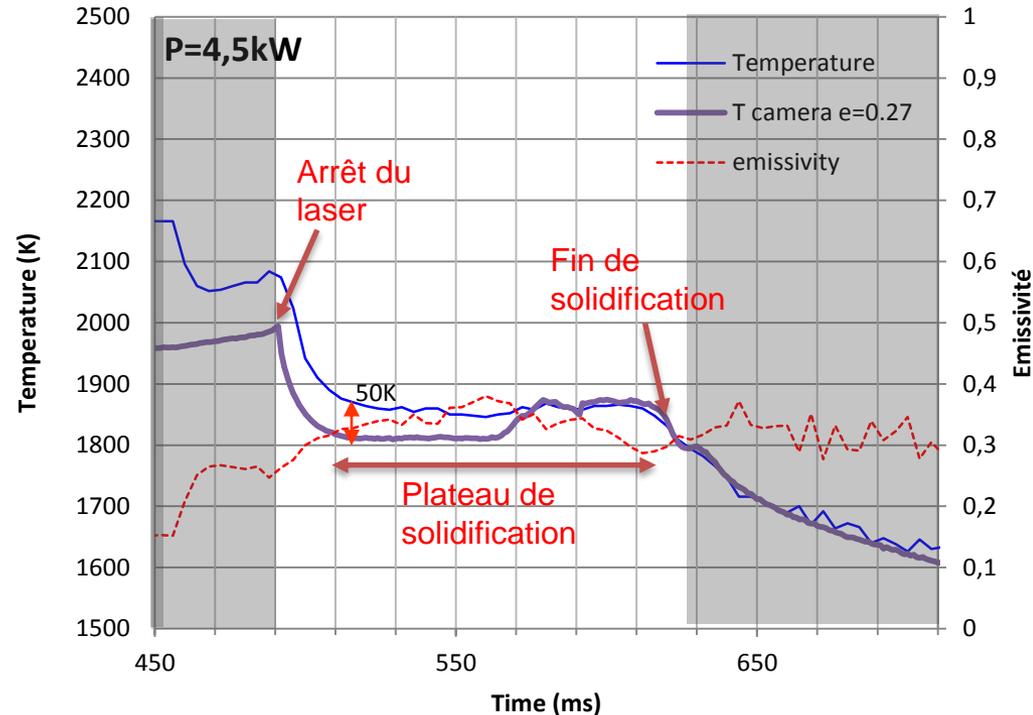
Pyrométrie spectrale: spot $\Phi=500\mu\text{m}$

Caméra (pyrométrie 2D monobande): fréq. d'acquisition=10 000 i/s; filtrée 800-950 nm

Résultats caméra (niveaux de gris):



Résultats traités spectromètre:

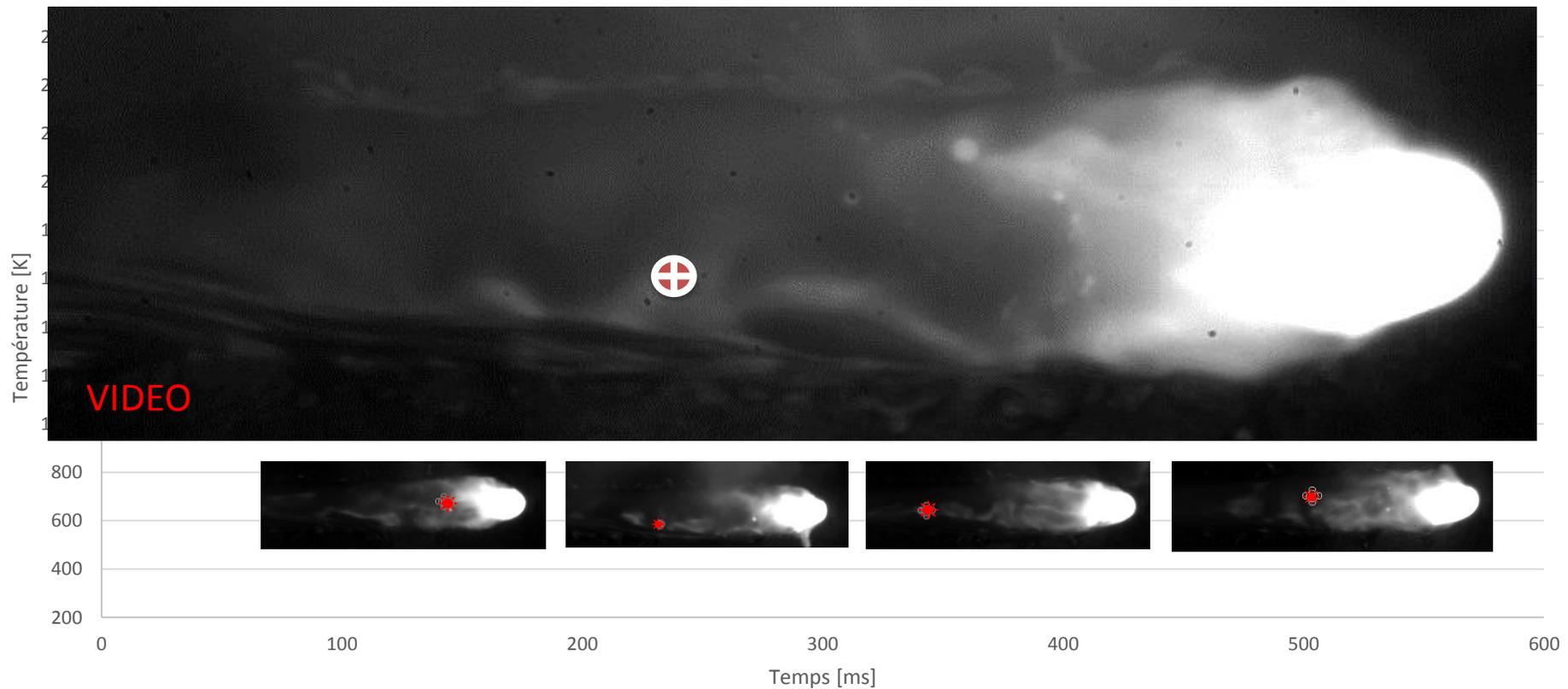


Permet de calibrer l'émissivité pour l'acier utilisé. Ici $\epsilon = 0,27$

2 – Mesures de température en surface de liquide (Méthode lab. PIMM, Muller 2013)

Caméra: 10000 i/s; filtrée 800-950 nm;

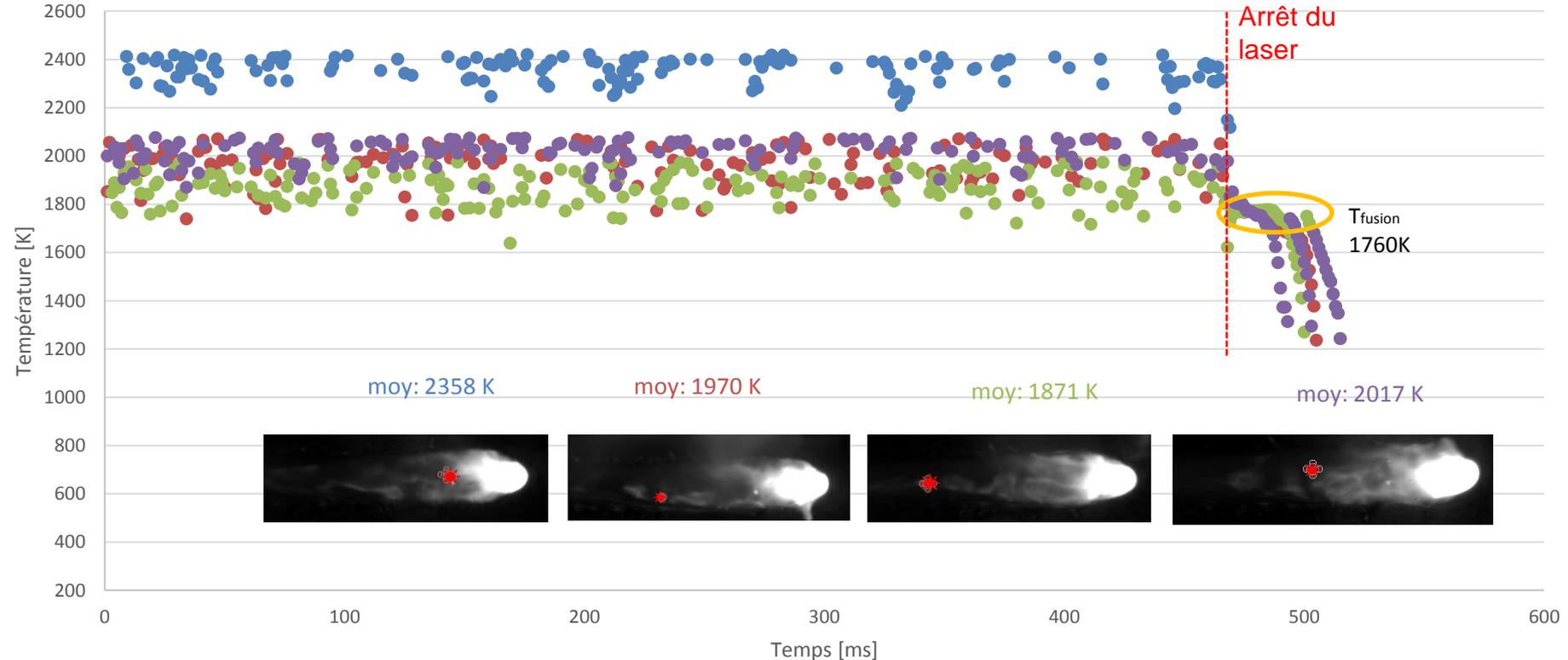
Mesure de la température à partir des niveaux de gris avec: $\epsilon = 0,27$



2 – Mesures de température en surface de liquide (Méthode lab. PIMM, Muller 2013)

Caméra: 10000 i/s; filtrée 800-950 nm;

Mesure de la température à partir des niveaux de gris avec: $\epsilon = 0,27$

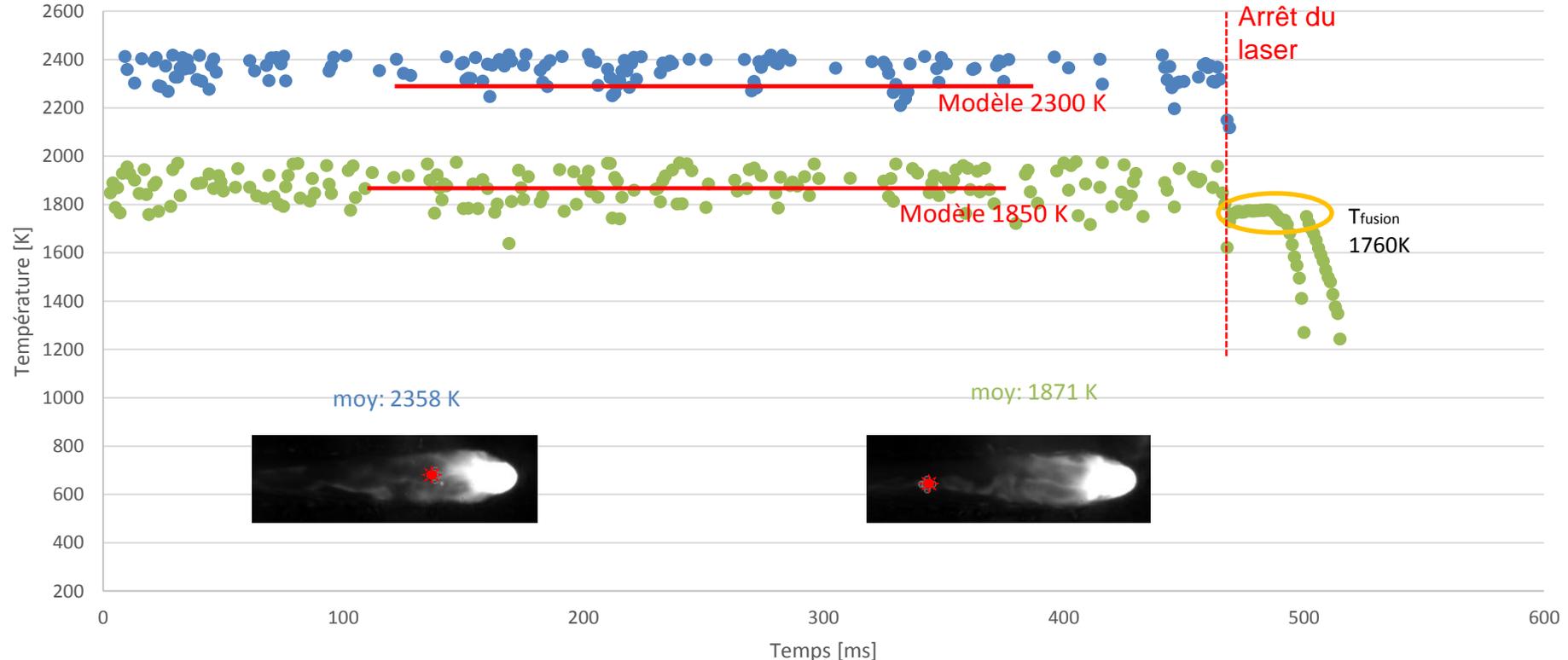
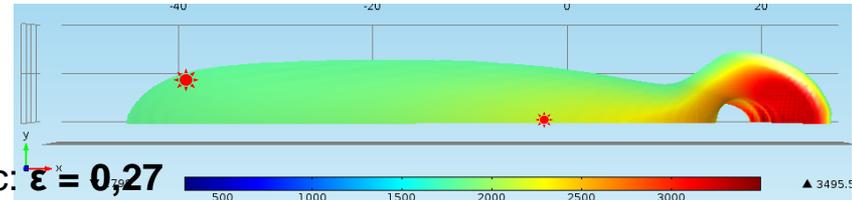




2 – Mesures de température en surface de liquide

Caméra: 10000 i/s; filtrée 800-950 nm;

Mesure de la température à partir des niveaux de gris avec: $\epsilon = 0,27$



Températures cohérentes! (+dimensions de bain cohérentes)



LIMAT B
Laboratoire d'Ingénierie
des MATériaux de Bretagne

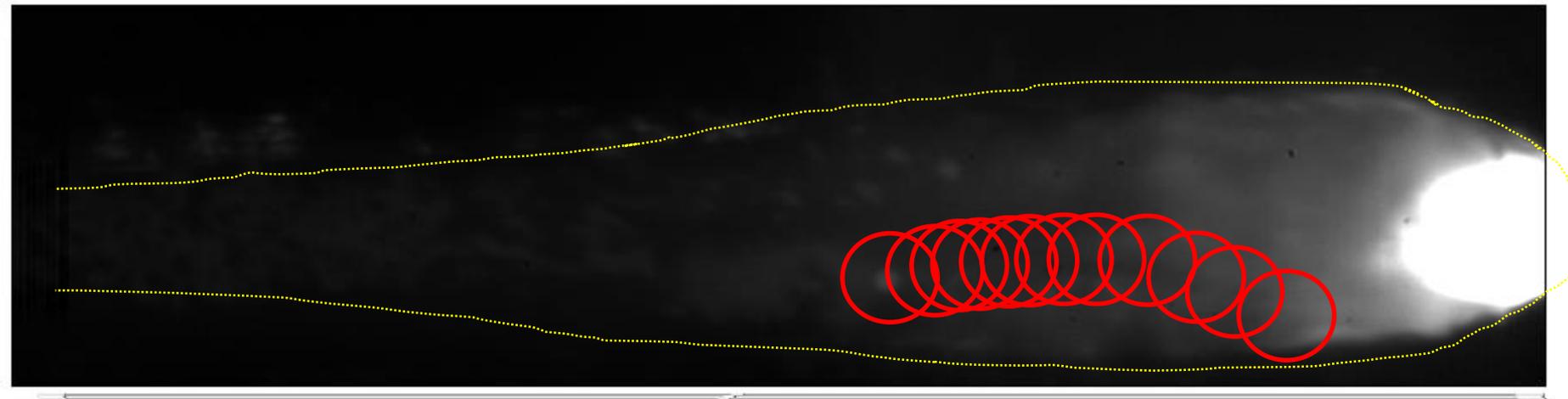
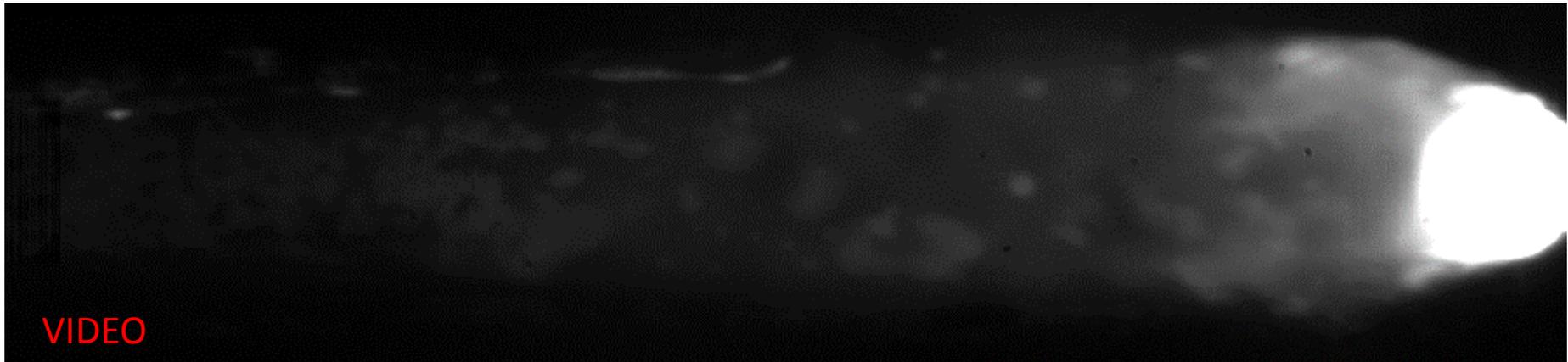


ArcelorMittal

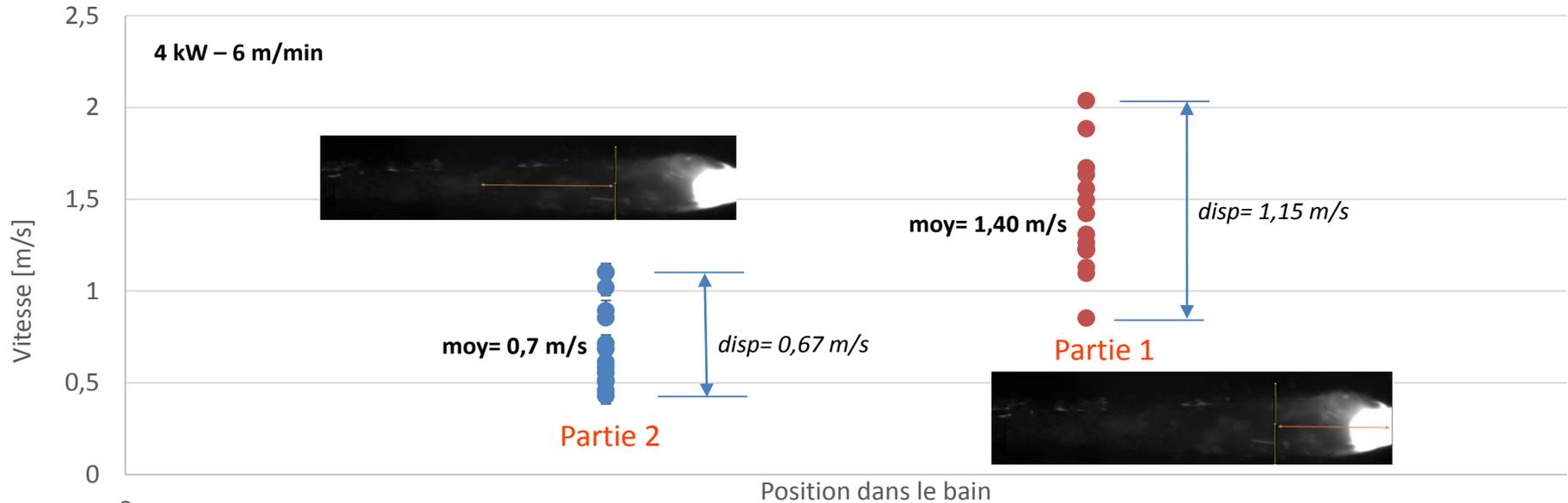
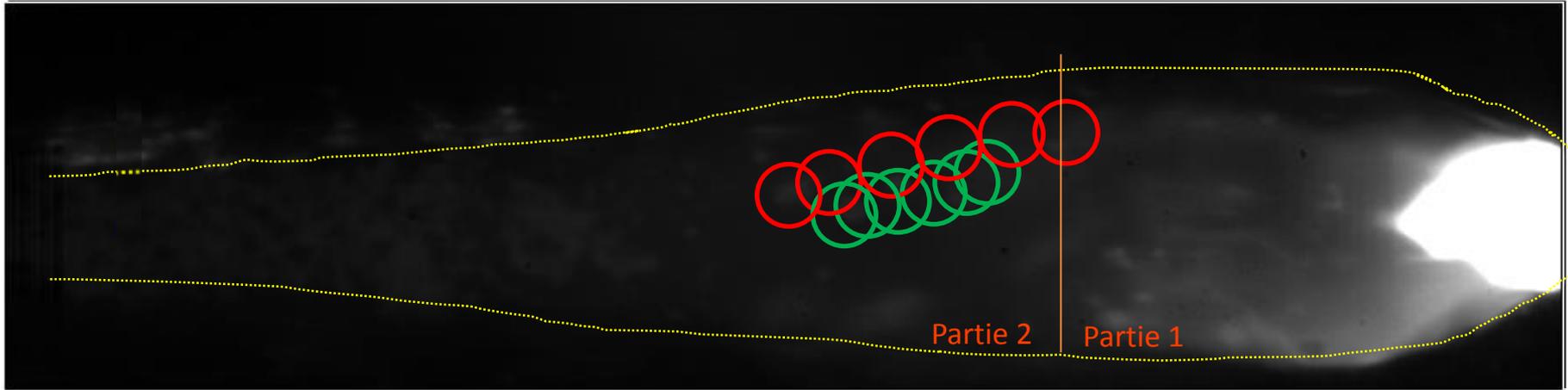
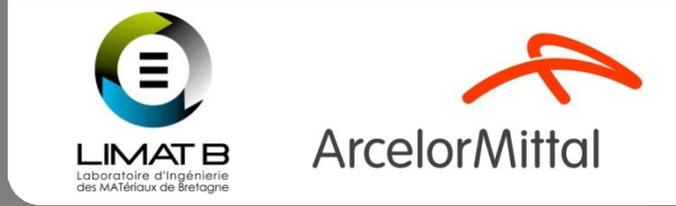
3 – Mesure de vitesses en surface – traceurs de silice

(Sable calibré 50-70 μm)

4kW – 6m/min – DP600 ep: 1,8mm

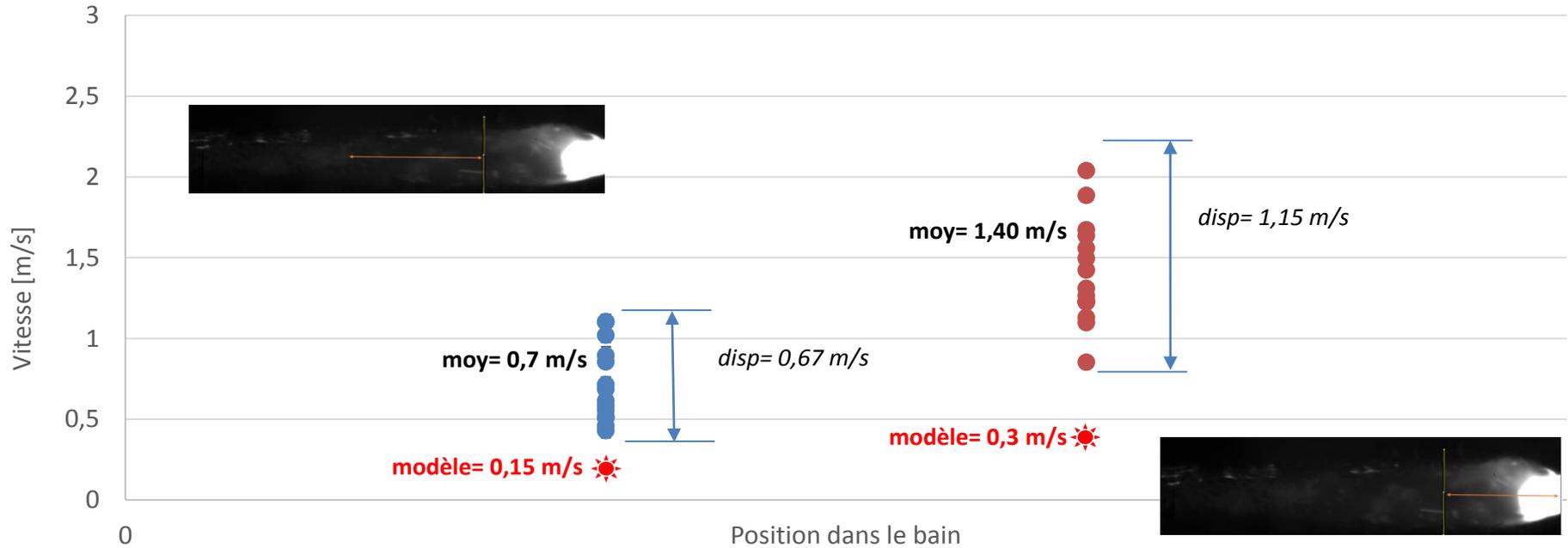
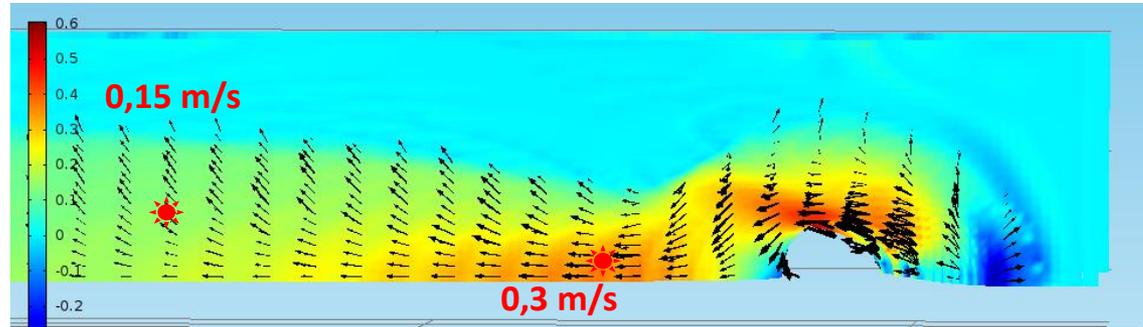
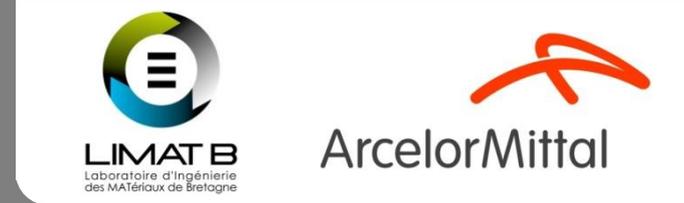


- a- Modèle 2D axi
- b- Modèle 3D
- c- Expériences



Chute rapide de la vitesse; dispersion importante

- a- Modèle 2D axi
- b- Modèle 3D
- c- Expériences

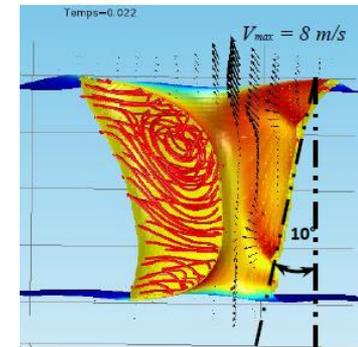


Manque un moteur d'écoulement: le cisaillement de la plume?!

Conclusions sur le modèle 3D

→* Modèle numérique: principaux phénomènes modélisés:

- Presque l'ensemble des phénomènes thermiques et fluides
- Inclinaison et oscillations du front avant du keyhole
- Création du keyhole, mélange dans le bain de fusion...etc
- Description de l'apparition de défauts à portée



→* Utilisable avec une station de travail moyenne (40 GB ram et 8-12 cœurs)

→* Temps de calcul: de 2 jours à 3 semaines

→* Utilisation d'un code commercial (GUI) -> presque utilisable en R&D industrielle

Conclusions sur le modèle 3D

→ Validation approfondie:

→ Mesures des températures en surface du liquide et du solide -> Cohérentes !

→ Mesures de vitesses sur le bain

↳ Manque de cisaillement -> invisible avec coupe macro, thermocouples et caméra rapide seule !

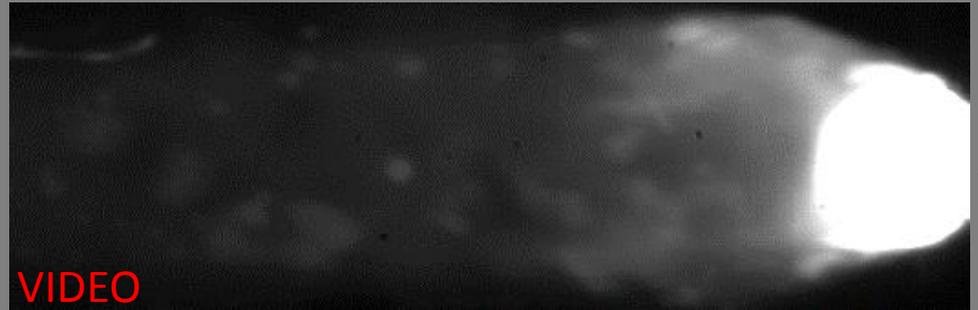
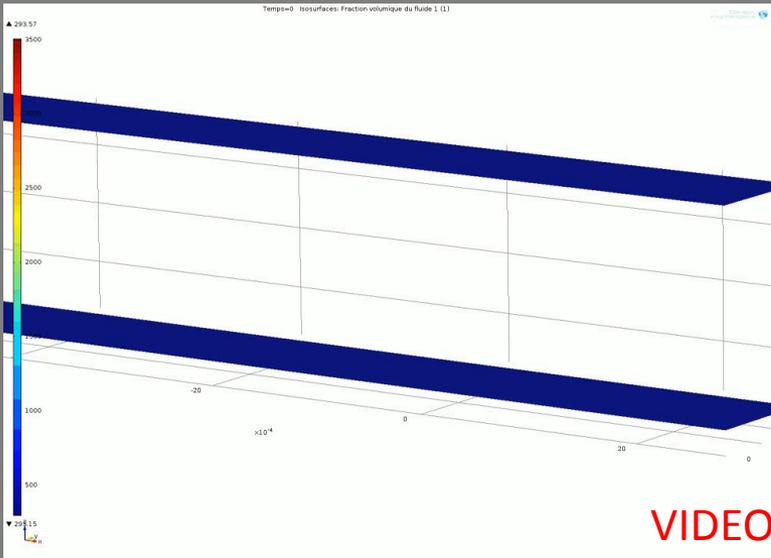
→ Modèle peut encore être amélioré:

→ effets de cisaillement -> augmentation des vitesses de plume

Perspectives

→ Décrire des configurations industrielles (soudage avec jeu)

→ Comprendre et prédire l'apparition de défauts de soudure (porosités, manque matière...)



VIDEO

VIDEO

... Merci pour votre attention ...

mickael.courtois@univ-ubs.fr
@arcelormittal.com