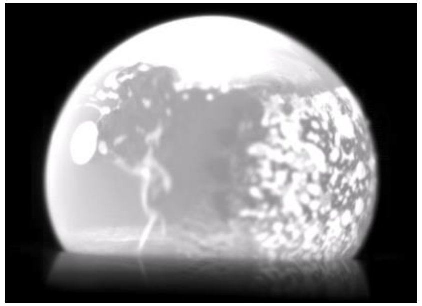
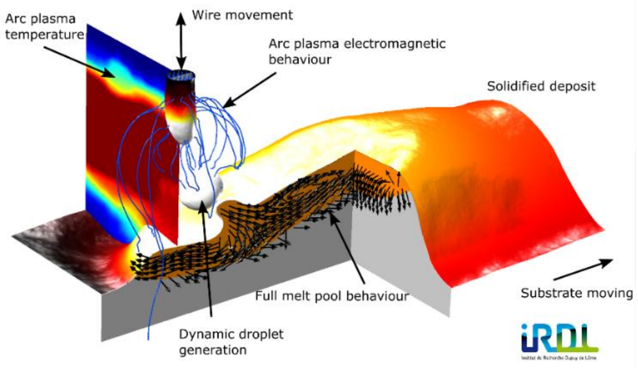
Séminaire AEE - Jeudi 12 janvier 2023

Institut de Recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027

Caractérisation expérimentale des propriétés des métaux liquides à haute température





mickael.courtois@univ-ubs.fr

06.23.50.77.28

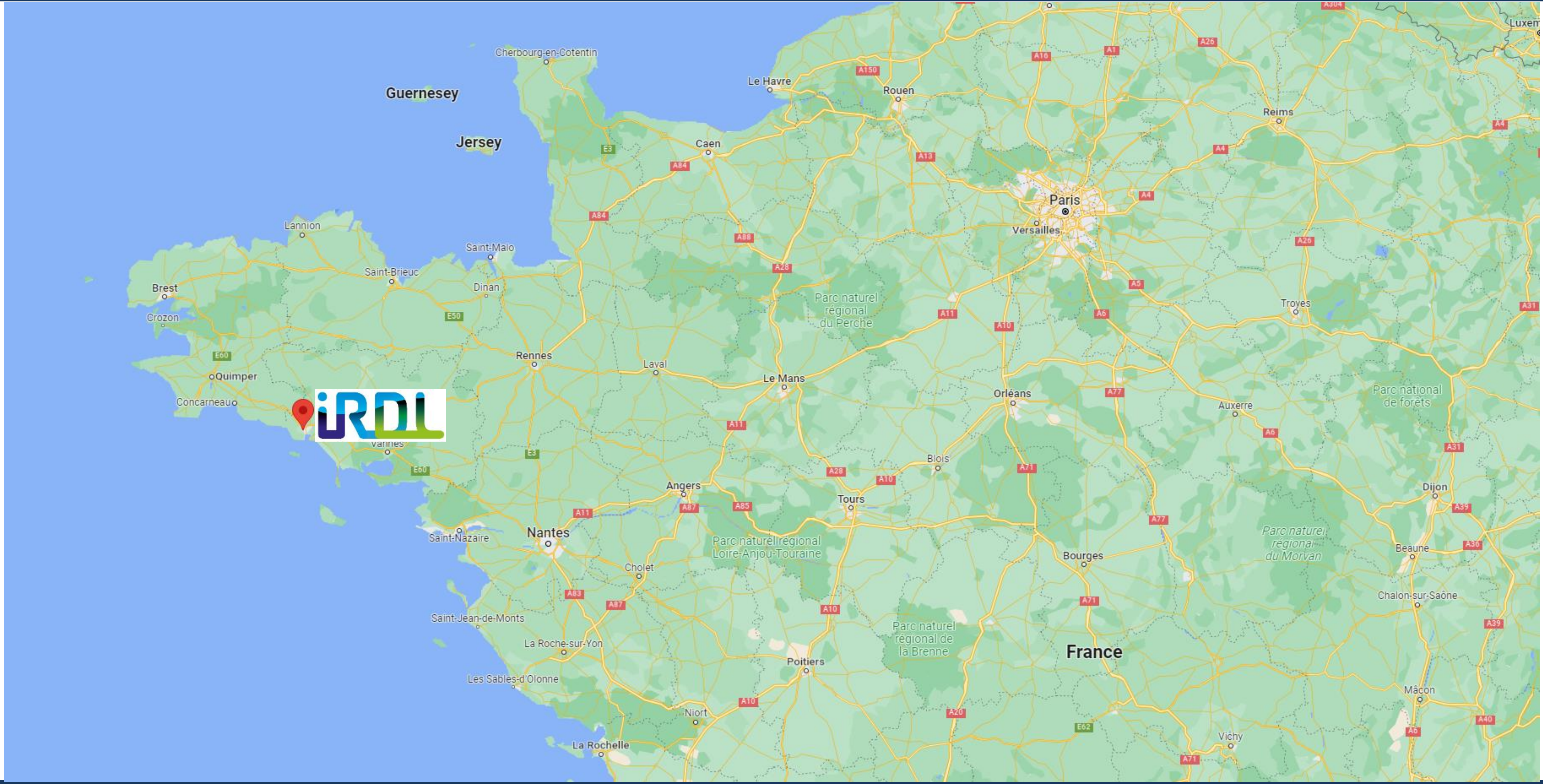
Mickael Courtois, Muriel Carin

Thomas Pierre, Philippe Le Masson, Stephen Cadiou, Dylan Le Maux, Vincent Klapsczinski

2023 IRDL - All rights reserved.

Présentation du laboratoire

Institut de Recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027



2023 IRDL - All rights reserved.

Présentation du laboratoire

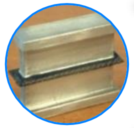
Institut de Recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027

Créé en 2016 de la fusion du LBMS (Brest) et du LIMATB (Lorient)

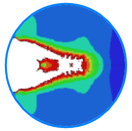
5 Pôles Thématiques de Recherche

\+ de 300 membres dont 110 enseignants chercheurs

Matériaux composites — comment concevoir de nouveaux matériaux pour avoir des propriétés particulières ?

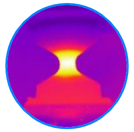


Assemblages multi-matériaux — pour réaliser des structures composées de métaux, de composites et de polymères



Couplages multi-physiques — pour modéliser les phénomènes aux interfaces de plusieurs domaines de la physique (chimie, mécanique, thermique, etc.)

Efficacité énergétique — pour réduire les coûts des consommations énergétiques



Durabilité et diagnostic — pour suivre la tenue en service des structures et prévoir leur durée de vie

2023 IRDL - All rights reserved.

Equipe – Pôle Assemblage Multi-matériaux - Lorient

Institut de Recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027

Effectifs :

Coordination : Muriel Carin (Pr, UBS)

7 Permanents (2 PR, 5 MCF) / 3 Ingénieurs / 4 doctorants / 3 post-doctorants

Compétences

Instrumentation

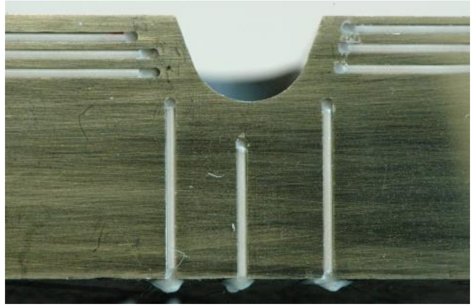
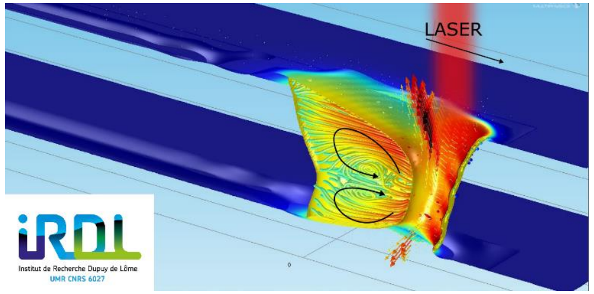
- Au cœur de l'assemblage !

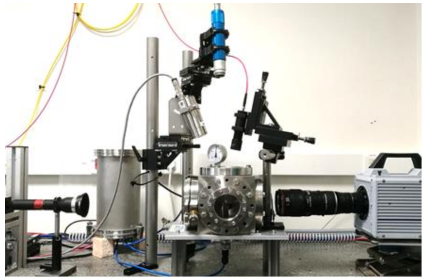
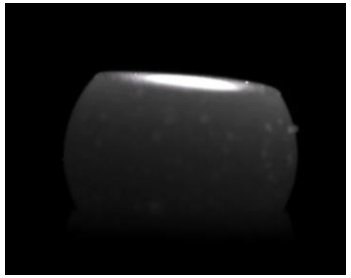
Modélisation

- Thermique, électromagnétique, fluide, métallurgie, mécanique…

Caractérisation

- Propriétés multiphysiques des matériaux

2023 IRDL - All rights reserved.

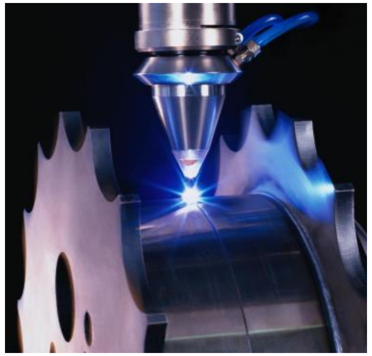
Eléments de contexte

Amélioration continue

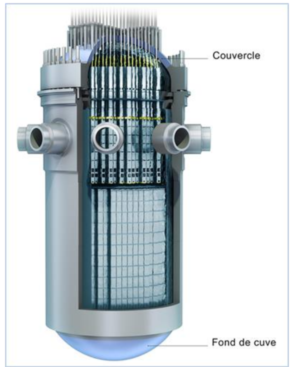
Source: Archives patrimoniales PSA

Source: Nissan

Nouvelles problématiques



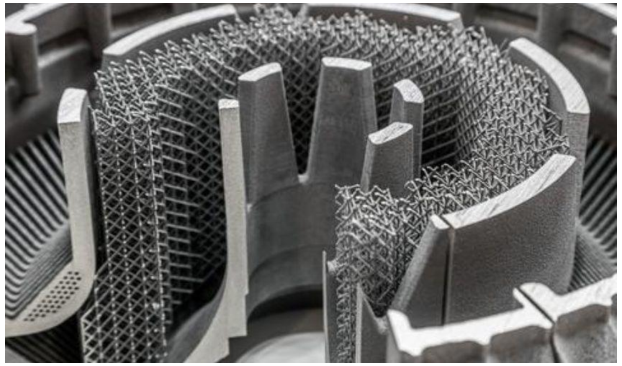
Source: Trumpf



Source: IRSN

Nouveaux procédés

Source: 3Dnative



Source: 3Dnative

2023 IRDL - All rights reserved.

Industrielles

ArcelorMittal
Autoliv
SEGULA TECHNOLOGIES
STELLANTIS
Roxel Propulsion systems
Schneider Electric
framatome

Académiques

IRT JULES VERNE
cea
IMN INSTITUT DES MATÉRIAUX JEAN ROUXEL
UFRJ
IREPA LASER
INSTITUT CARNOT MICA

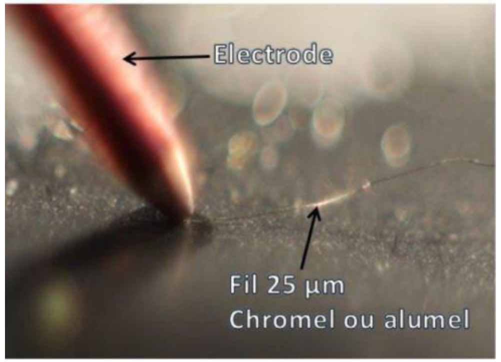
2023 IRDL - All rights reserved.

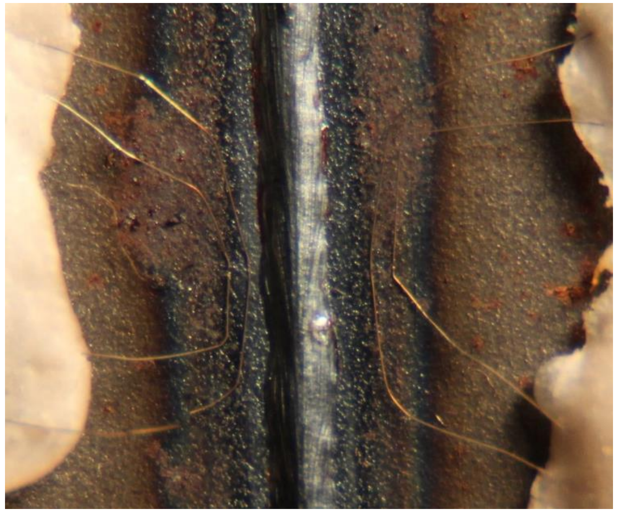
Instrumentation

Instrumentation en micro-thermocouples

Institut de Recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027

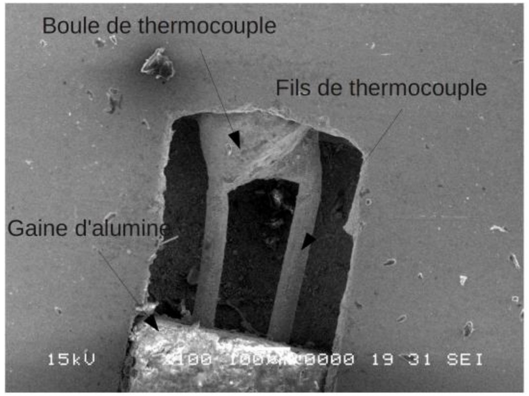
Instrumentation en surface

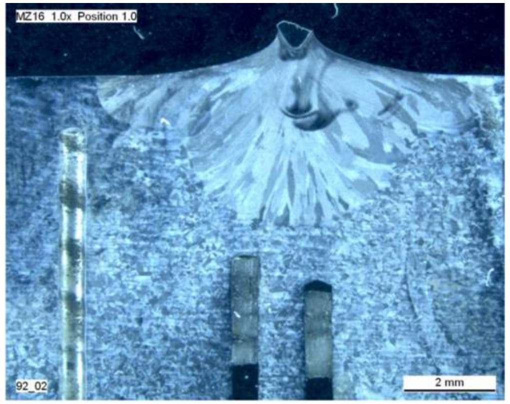




Soudage laser

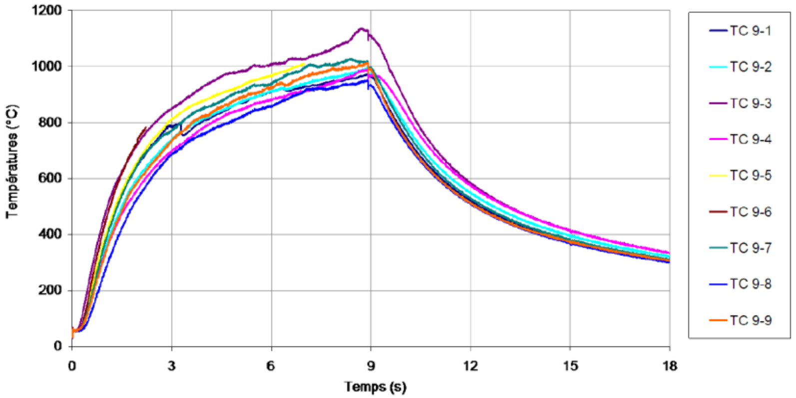
Instrumentation en profondeur





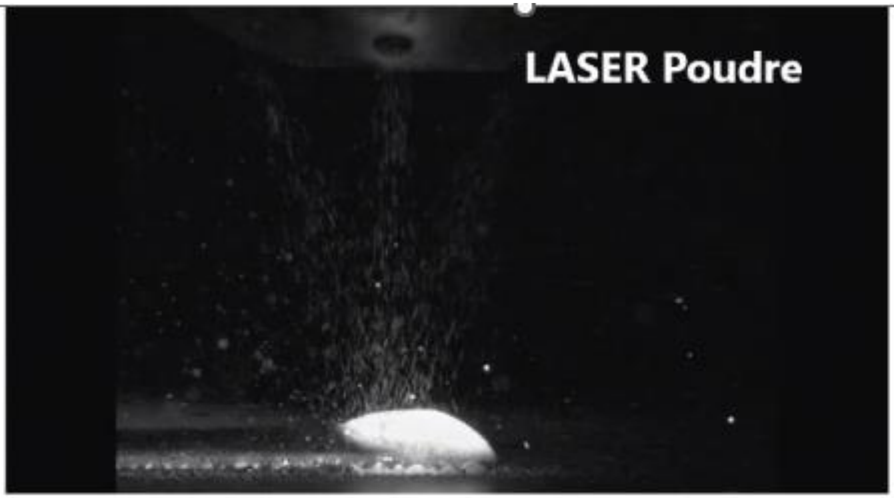
Soudage TIG

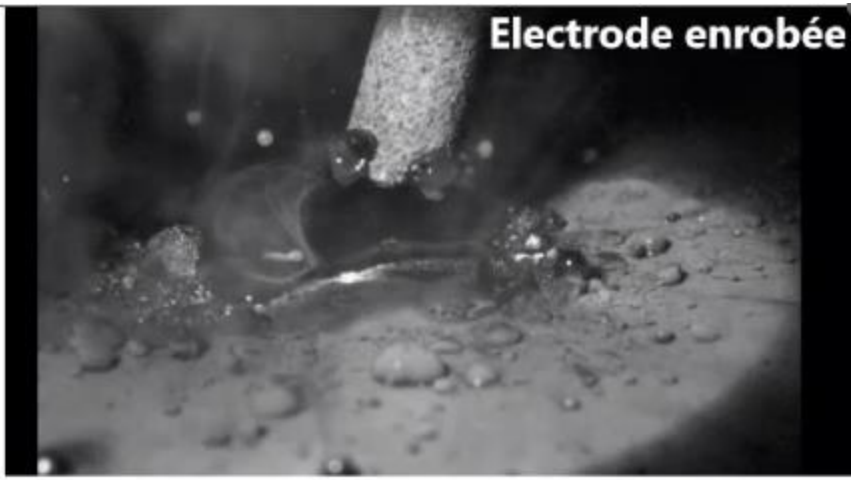
Soudage par point
Instrumentation de l'électrode

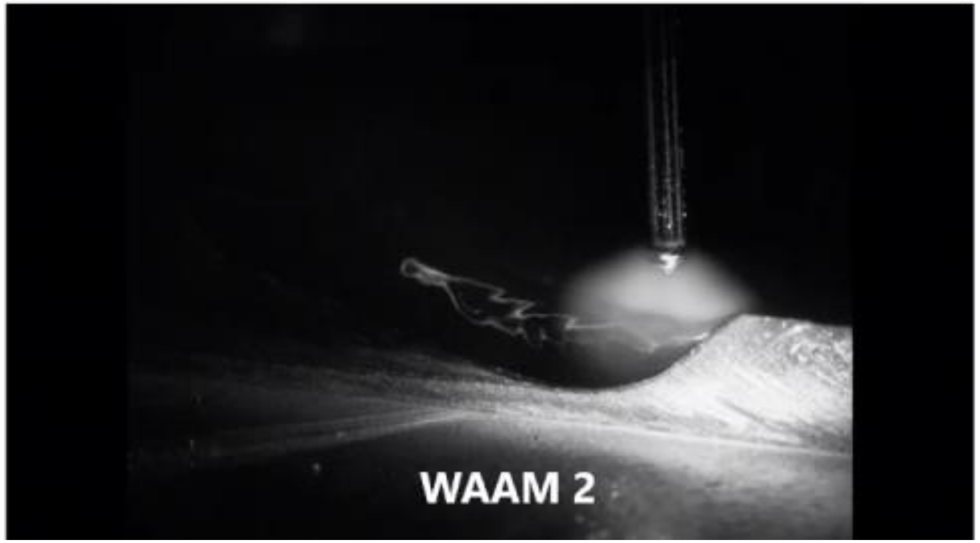


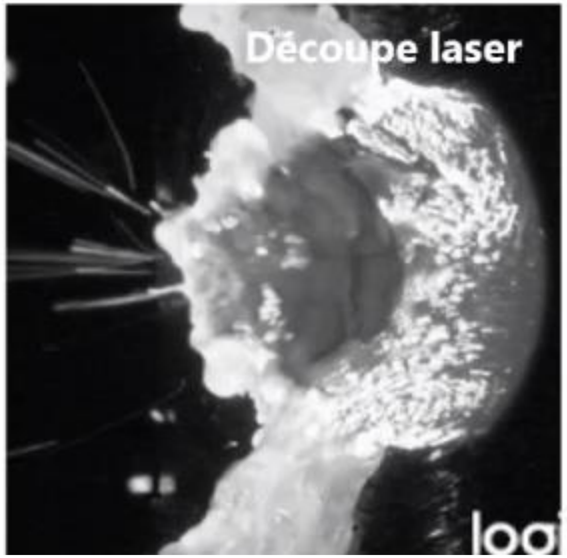
2023 IRDL - All rights reserved.

Instrumentation en camera rapide









2023 IRDL - All rights reserved.

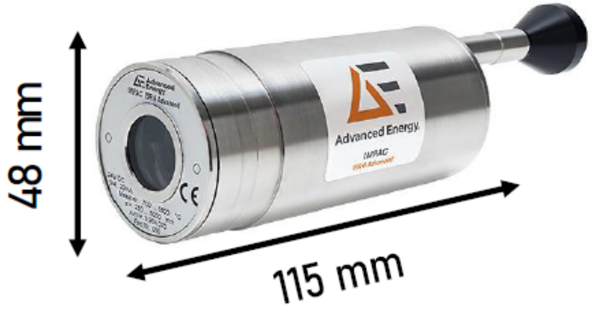
Narrow spectral band pyrometer [0.7 µm – 1.1 µm]

Lumasense IS6

600°C-3000°C

Bichromatic pyrometer

Lumasense ISR6

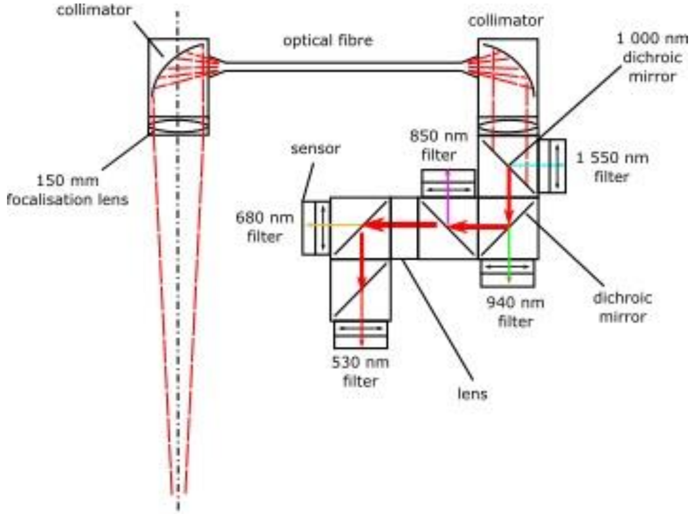


λ_1 = 0.90 µm λ_2 = 1.05 µm

1000°C-3000°C

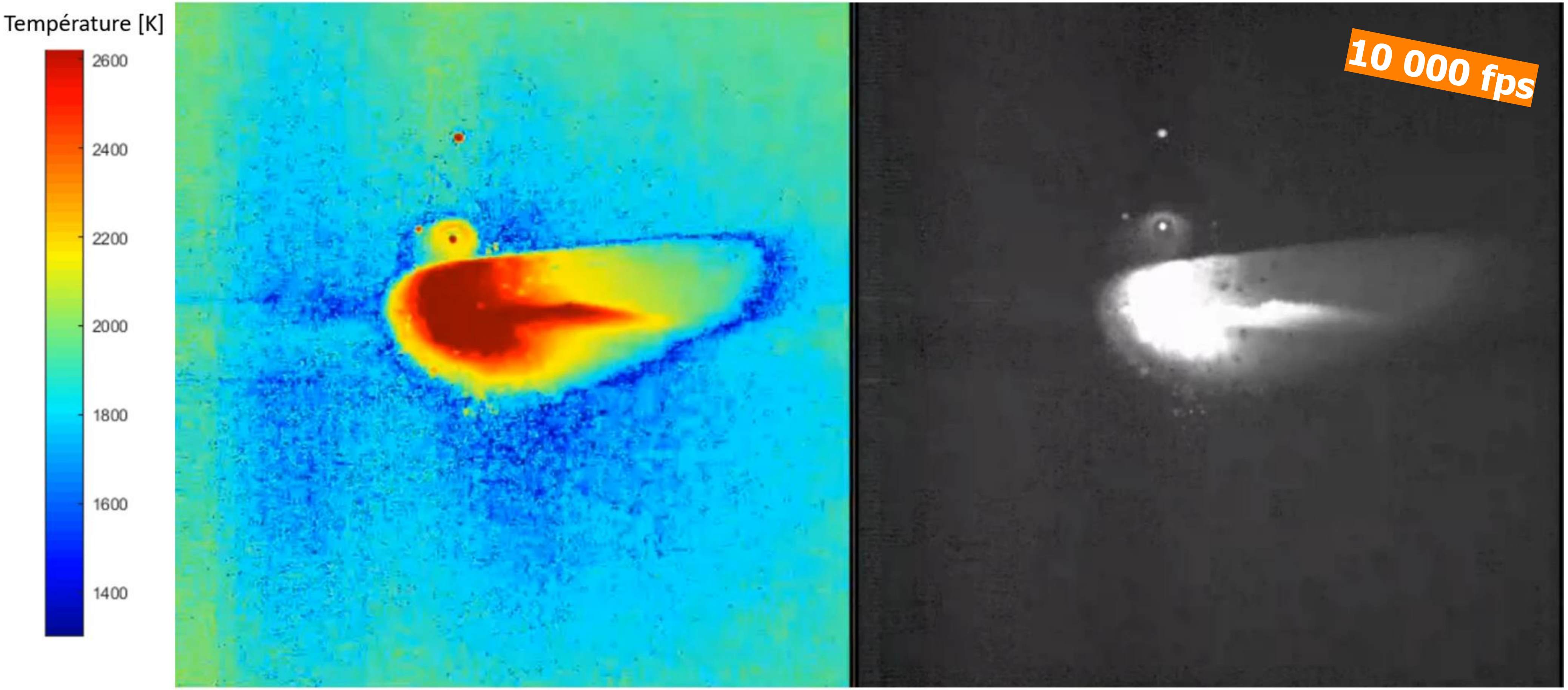
IRDL Pyrometer

500°C-4000°C



2023 IRDL - All rights reserved.

Mesure de température par caméra rapide

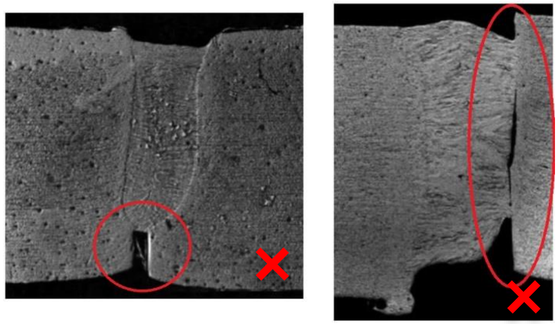


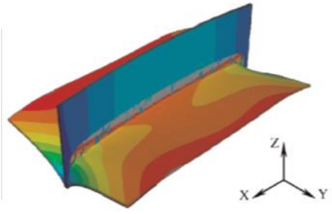
2023 IRDL - All rights reserved.

Modélisation

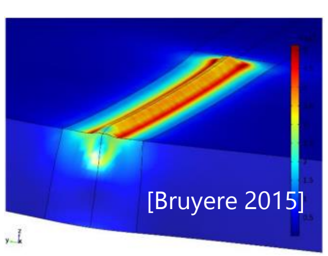
Pour une meilleure maitrise des paramètres opératoires

- **Comprendre** les phénomènes physiques, l'origine des défauts (porosités, fissures, distorsion,…)
- **Prédire** en fonction des paramètres opératoires
  - Forme et dimension du bain et du cordon
  - Métallurgie du joint soudé, état de contraintes et déformations





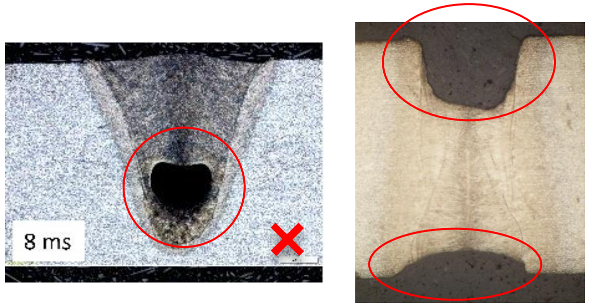
[Zain 2010]



Outil d'aide en soudage ou fabrication additive

- Optimiser les paramètres opératoires
- Définir des stratégies de soudage ou fabrication
- Anticiper l'apparition des défauts durant le procédé
- Limiter les essais-erreurs

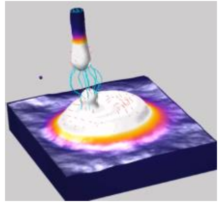
➡ Nécessité d'avoir des outils numériques fiables (validation expérimentale)



Quel intérêt à des modèles de bains fondus ?

Simuler quoi en soudage / fab. add ?

ELECTRO -MAGNETISME



Source physique

Forces Lorentz

Vitesse

SOURCE EQUIVALENTE

THERMIQUE

Température

Vitesse

MECANIQUE DES FLUIDES

Prédiction de cordon et défauts

Phases & Chaleurs latentes

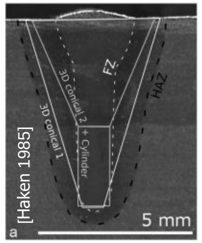
Température

Température

Dissipation

Interaction fluide - structure

Expériences
Macrographies
Thermocouples



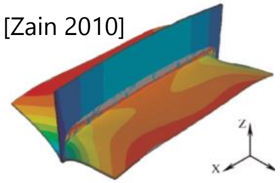
METALLURGIE

Phases

Contraintes

MECANIQUE DU SOLIDE

[Zain 2010]

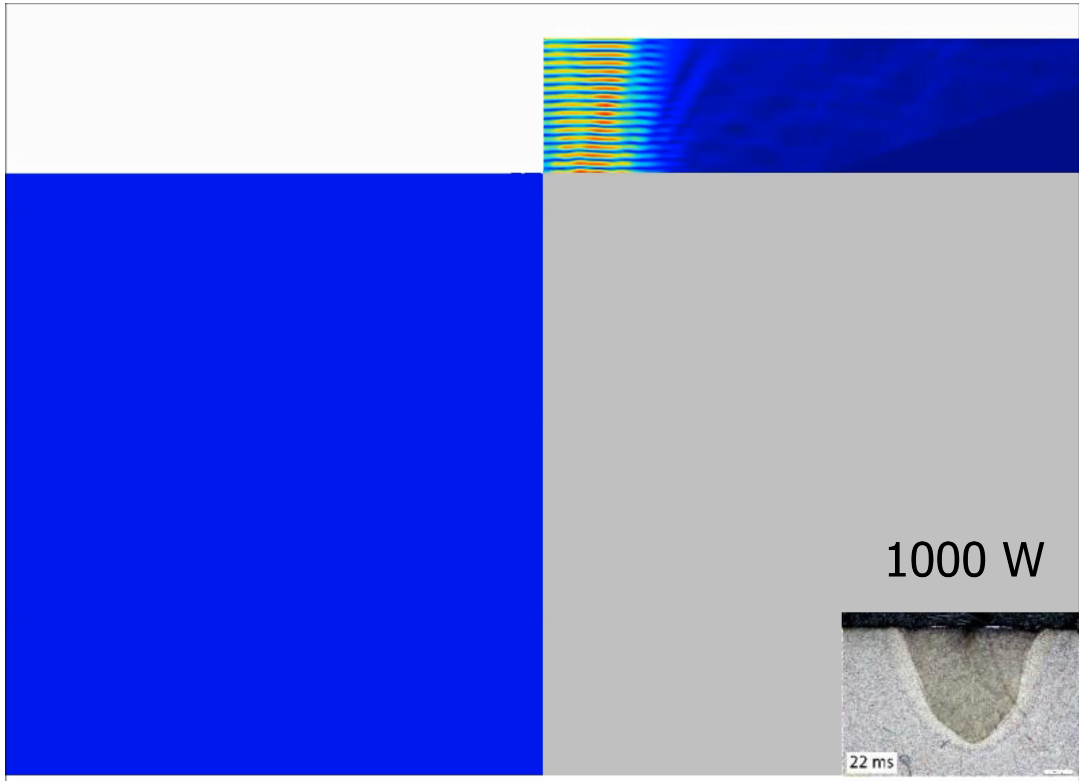


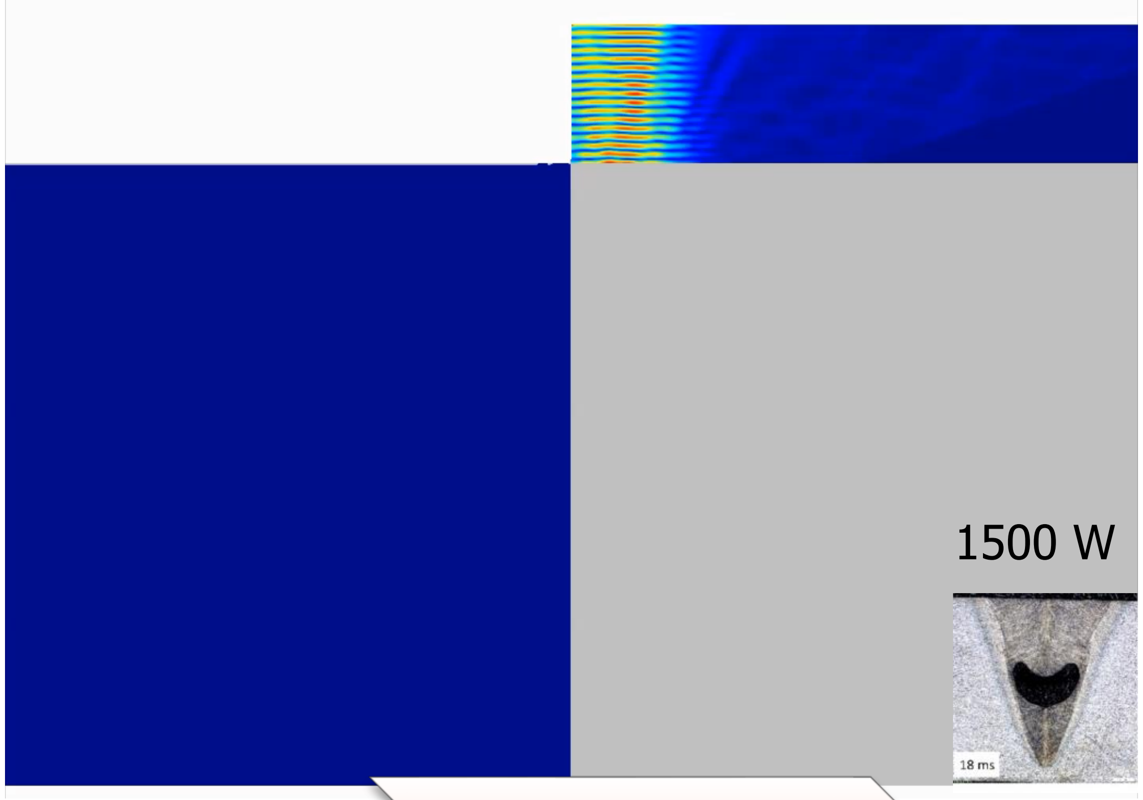
Contraintes et déformations

2023 IRDL - All rights reserved.

Modèle de soudage laser

Etude de l'apparition des porosités





↑ P_{laser}

↑ vaporisation

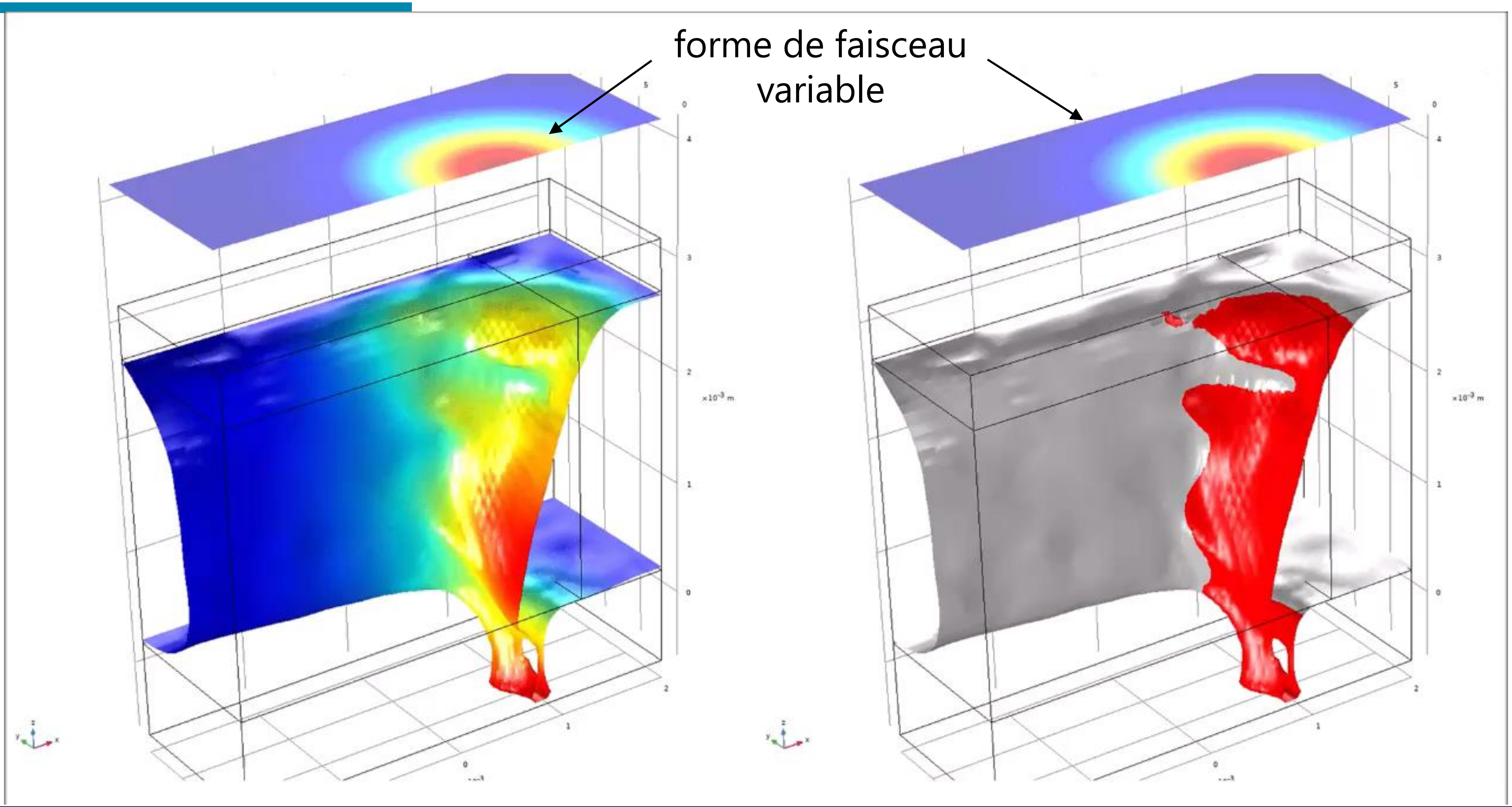
↑ pénétration & inclination

↑ nombre de porosités

2023 IRDL - All rights reserved.

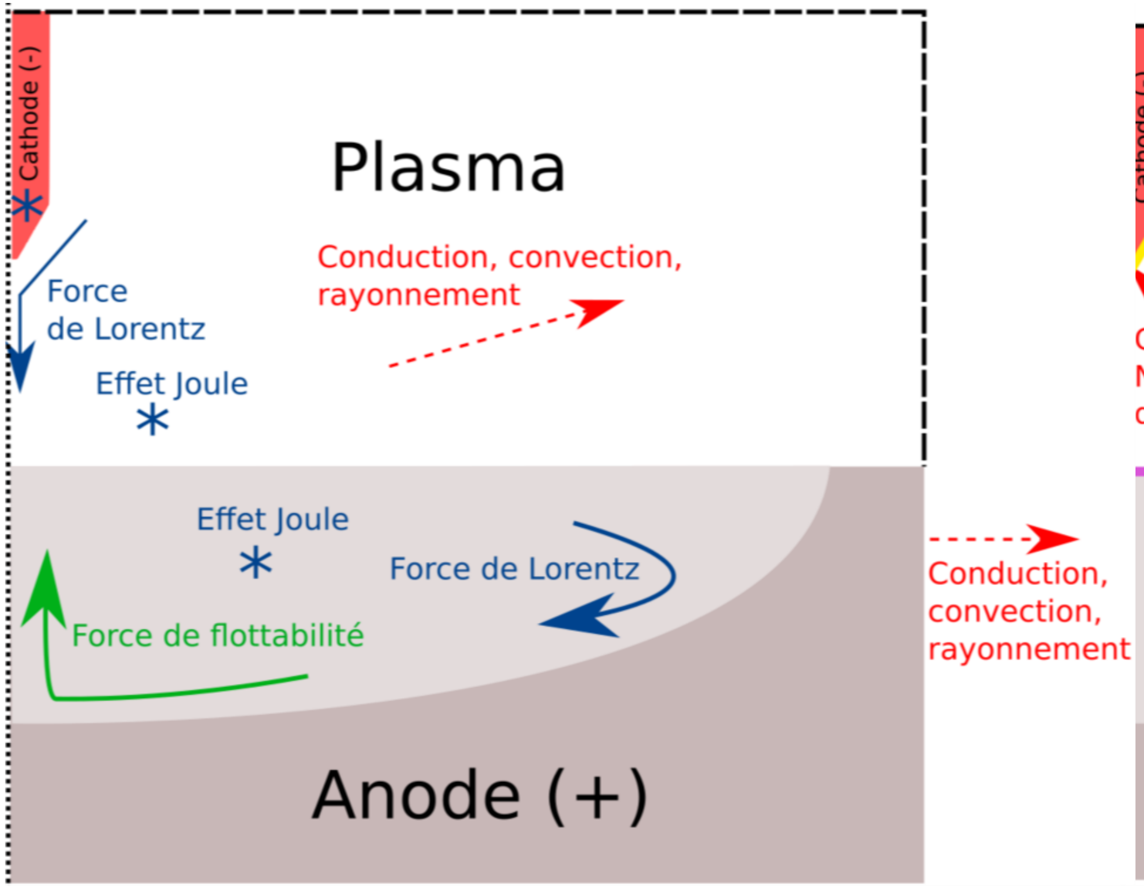
Institut de Recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027

Influence de la forme de faisceau



2023 IRDL - All rights reserved.

Modélisation thermique, électromagnétique, hydrodynamique temporelle et couplée
Hypothèses : Plasma en ETL, écoulements laminaires…

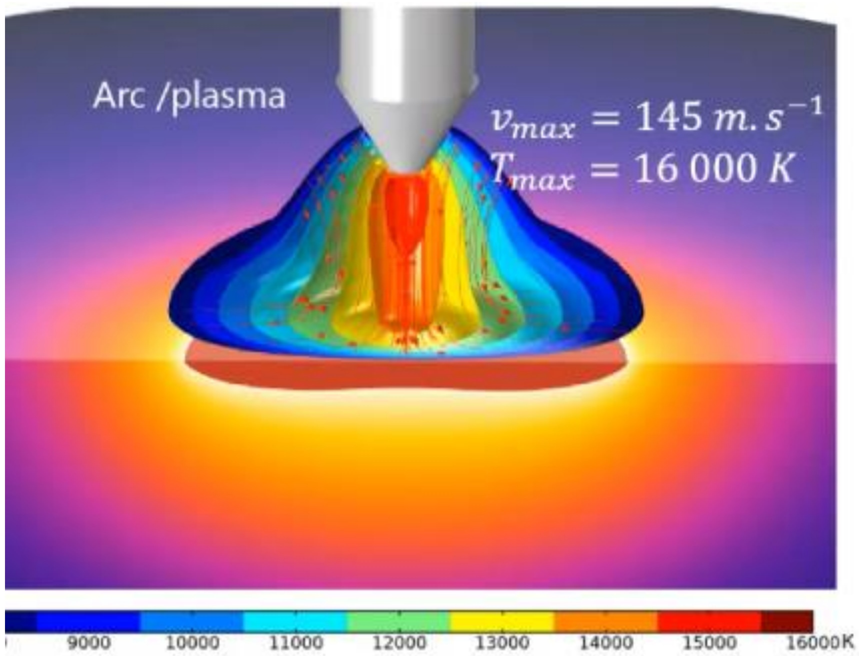


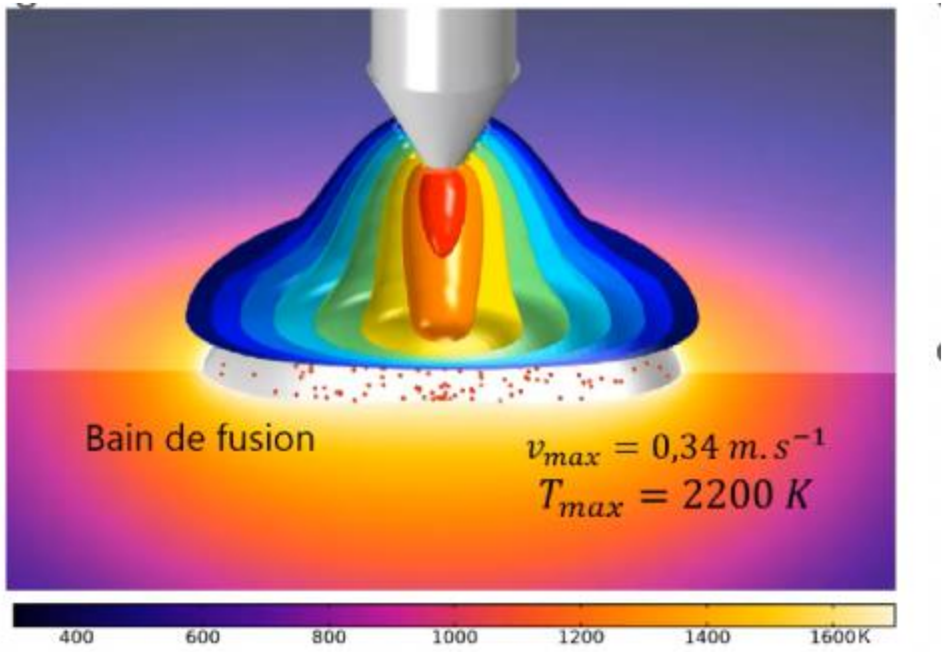
2023 IRDL - All rights reserved.

Paramètres du modèle (cas test Tanaka 2002) :

- I = 150 A, hauteur d'arc 5 mm
- Argon à 15 L.min^{-1}
- Anode en acier inox 304
- Cathode en tungstène thorié

Champ de température (K) et vecteurs vitesses dans l'ensemble de la géométrie

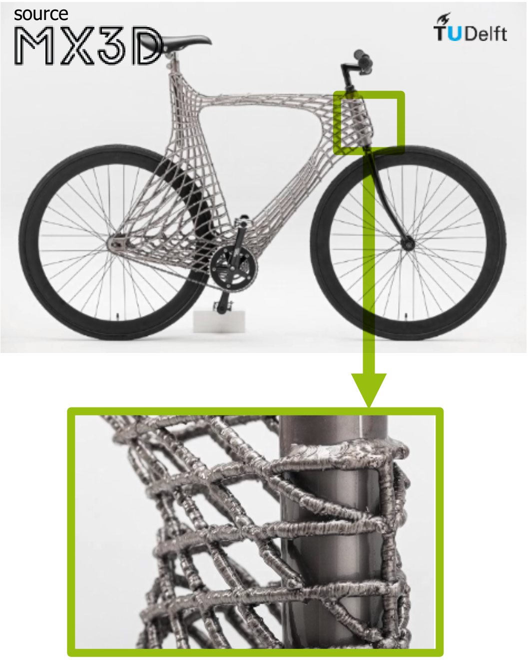




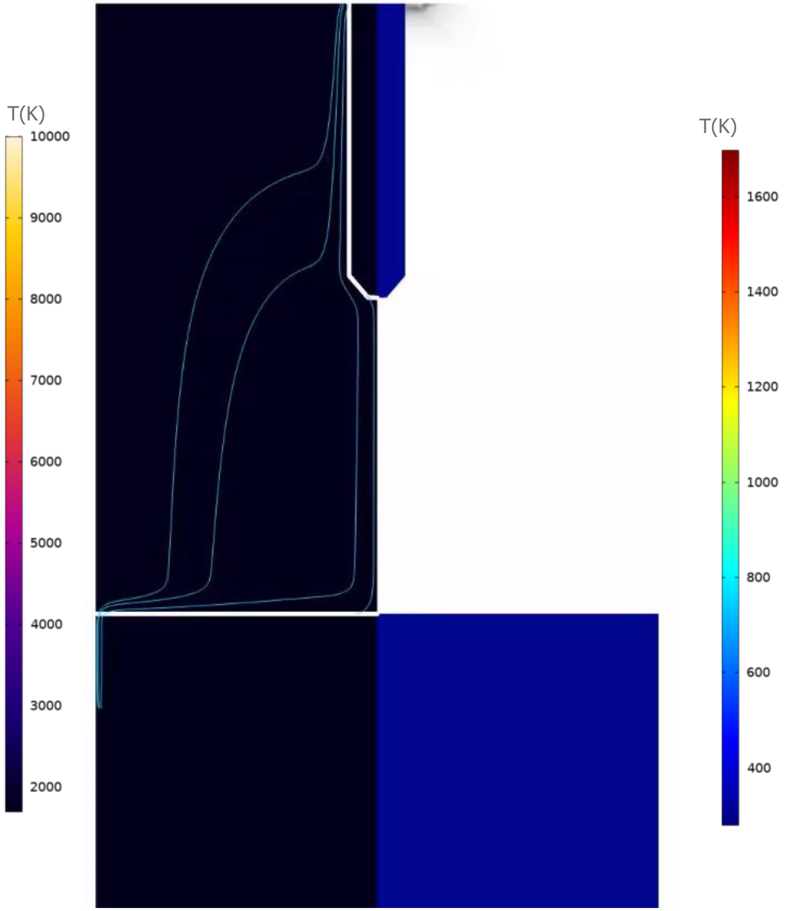
Modèle permettant l'étude des tous les phénomènes magnéto-thermo-hydrodynamiques

2023 IRDL - All rights reserved.

Arc welding & WAAM Additive manufacturing



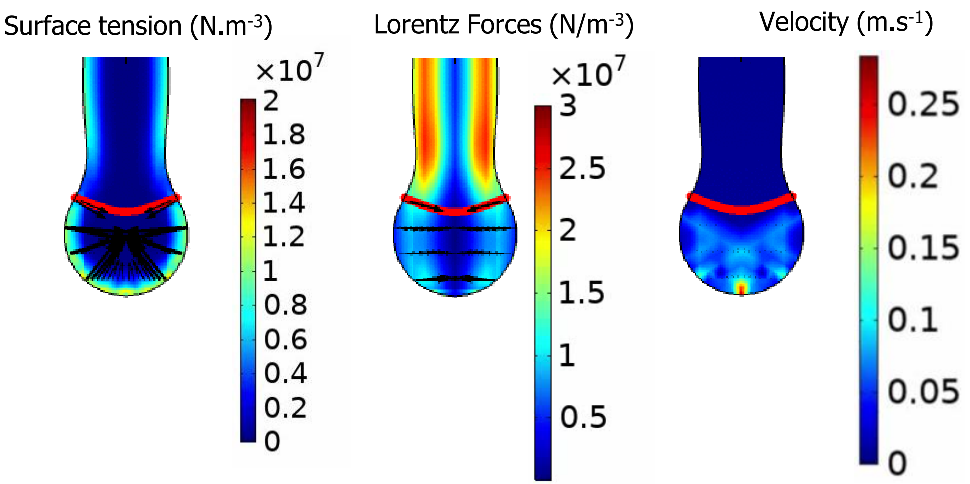
Goal: Development of a fully coupled multiphysics model
- **Heat transfer** in **solid** / **liquid** / **plasma**
- **Fluid flow** in liquid / plasma
- Surface tension, gravity, Lorentz forces
- **Electromagnetism** in metal and plasma
- Dynamic behavior of droplets

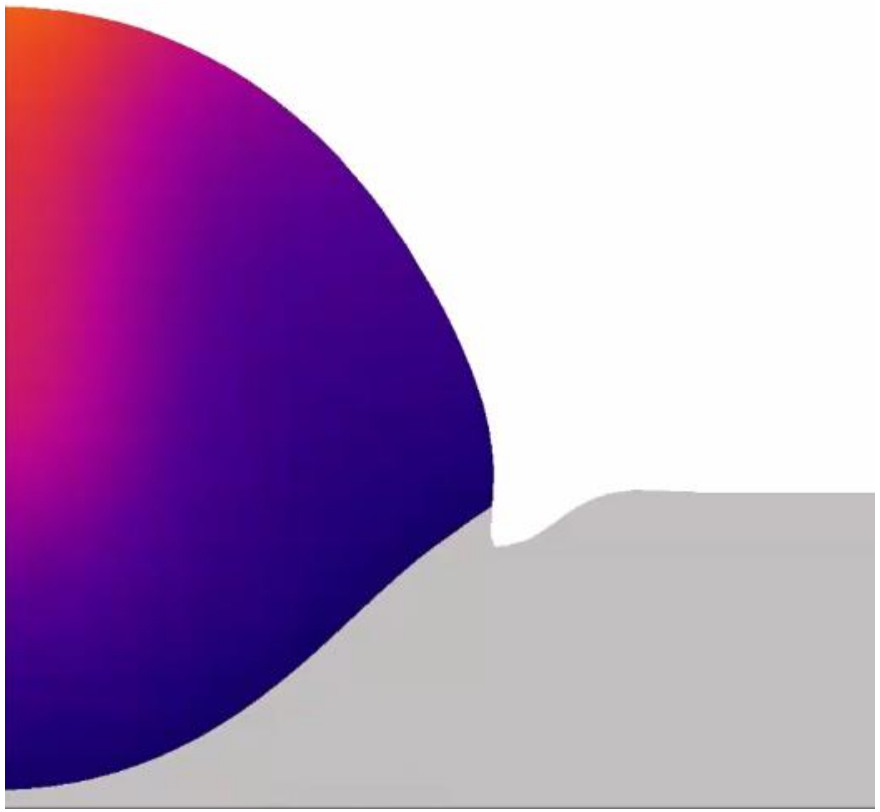


- Representation of all known physical phenomena: used to understand the droplet detachment
- Demonstration that energy is brought by the droplet and not arc above the melt pool

2023 IRDL - All rights reserved.

Arc welding & WAAM Additive manufacturing

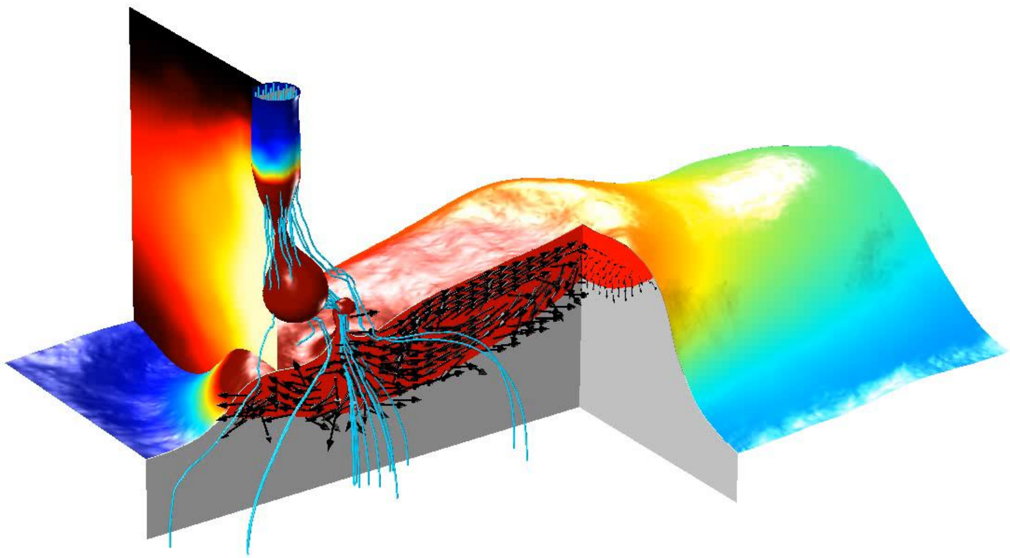


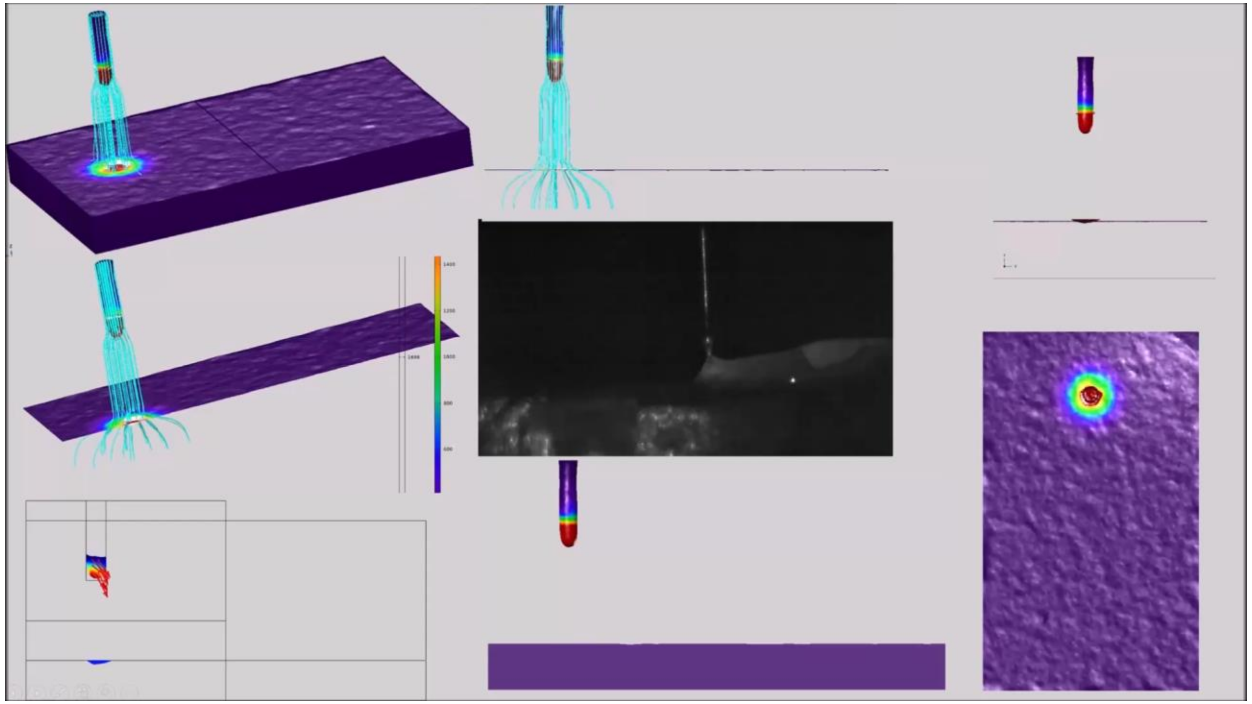


- Representation of all known physical phenomena: used to understand the droplet detachment
- Demonstration that energy is brought by the droplet and not arc above the melt pool

Institut de Recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027

Arc – wire – droplet – melt pool interaction





Interest:

First 3D model fully coupled with dynamic description of arc, wire, droplet and melt pool

Limits:

- Calculation times in 3D : 15 days
- Knowledge of operating parameters (very complex with WAAM)
- **Knowledge of thermophysical properties !!**

2023 IRDL - All rights reserved.

Caractérisation – métaux liquides

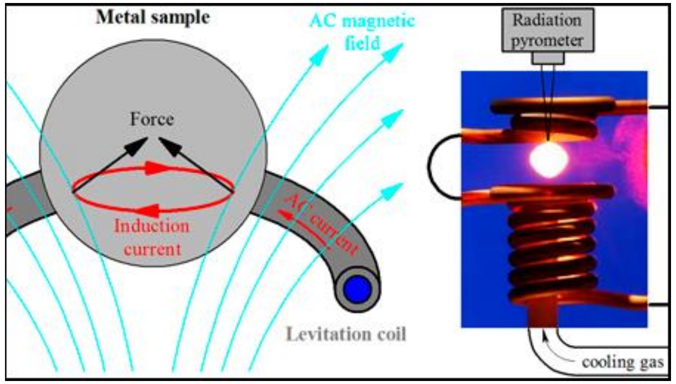
Caractérisation des métaux fondus

Une multitude de méthodes !

Pulse ohmique

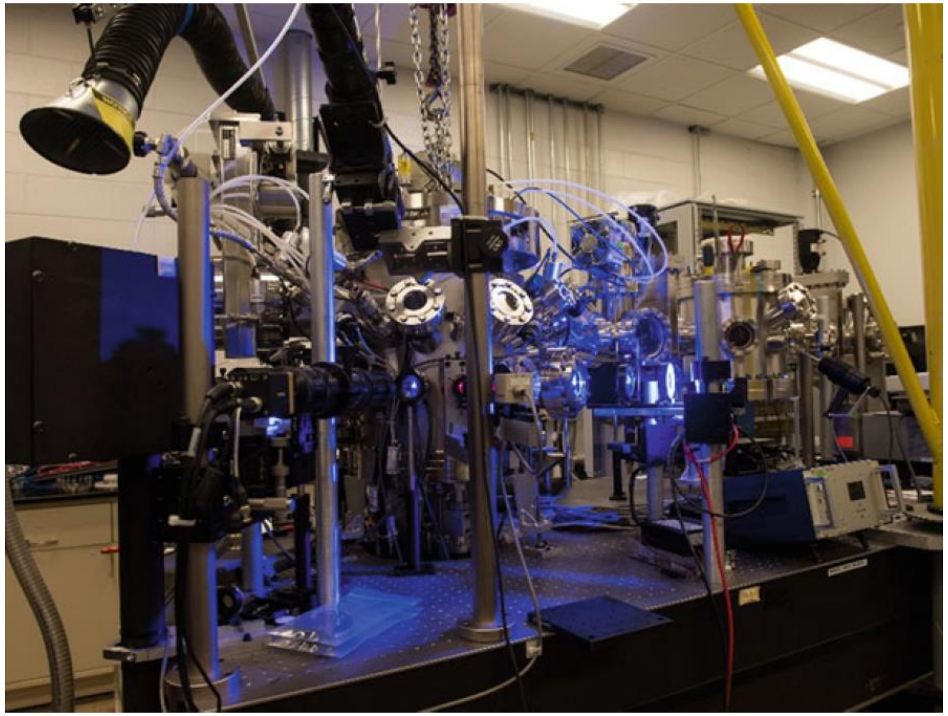
Source: TU Graz

Lévitation électromagnétique



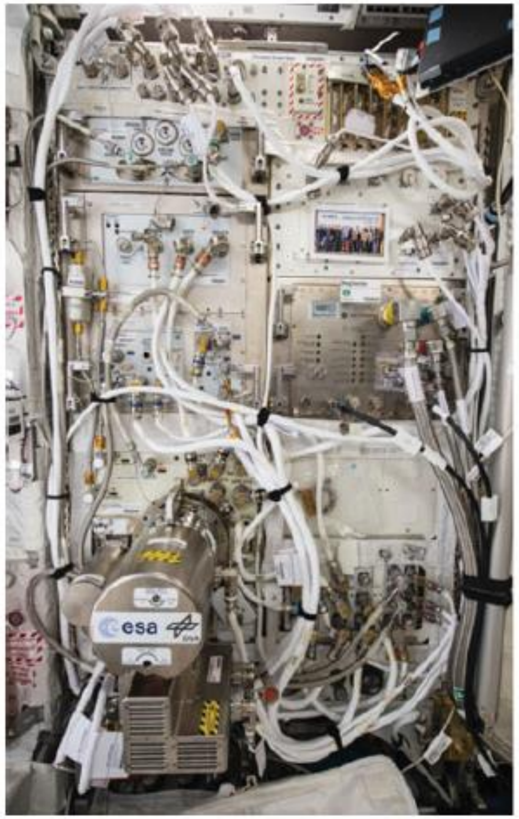
Source: DLR Space Administration

Lévitation électrostatique



NASA MSFC ESL lab's main levitation chamber

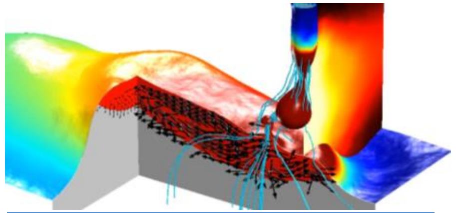
ISS



EML facility, source Airbus Defence and Space

2023 IRDL - All rights reserved.

Caractérisation des métaux fondus



Modèles numériques à hautes températures

Expériences à hautes températures

Caractérisation des métaux à l'état liquide

Dispositifs de mesure

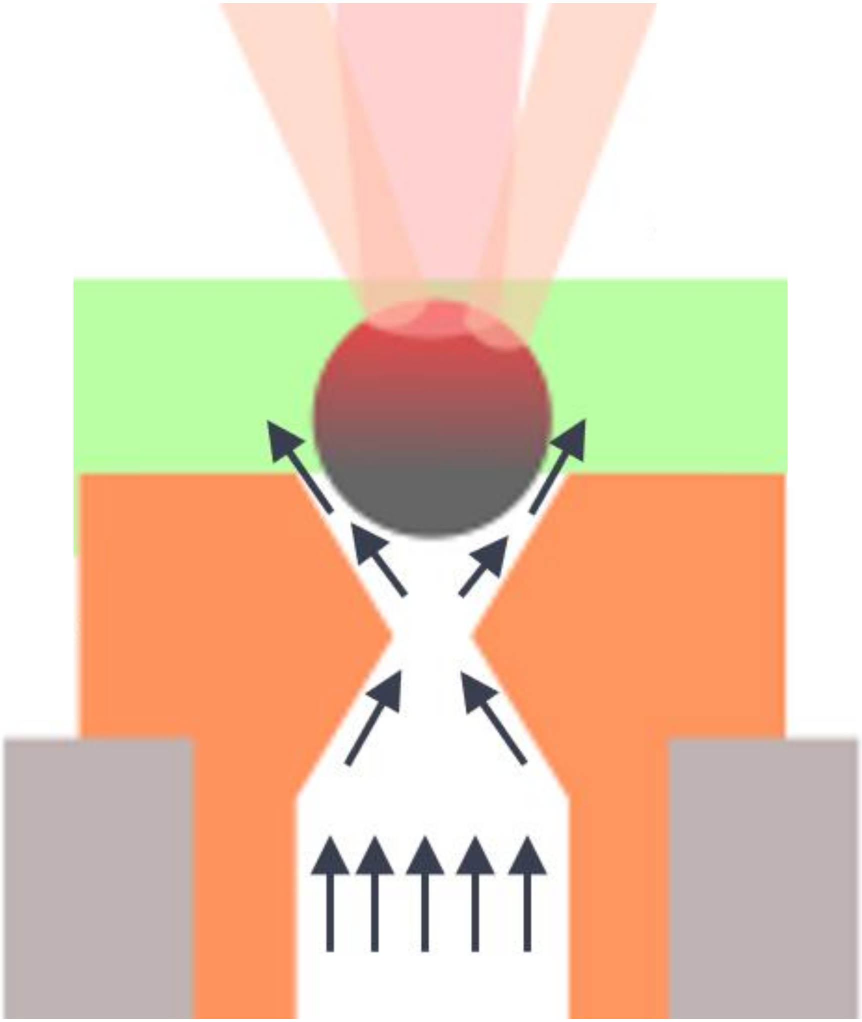
PhD Le Maux	Masse volumique
PhD Le Maux & Klapzcinski	Tension superficielle
Interne + stages	Viscosité

Diffusivité thermique	PhD Houssein
Capacité thermique massique	Bientôt (Phd + ANR)
Émissivité	PhD Dejaeghere

Maitrisé	En développement	Non maitrisé

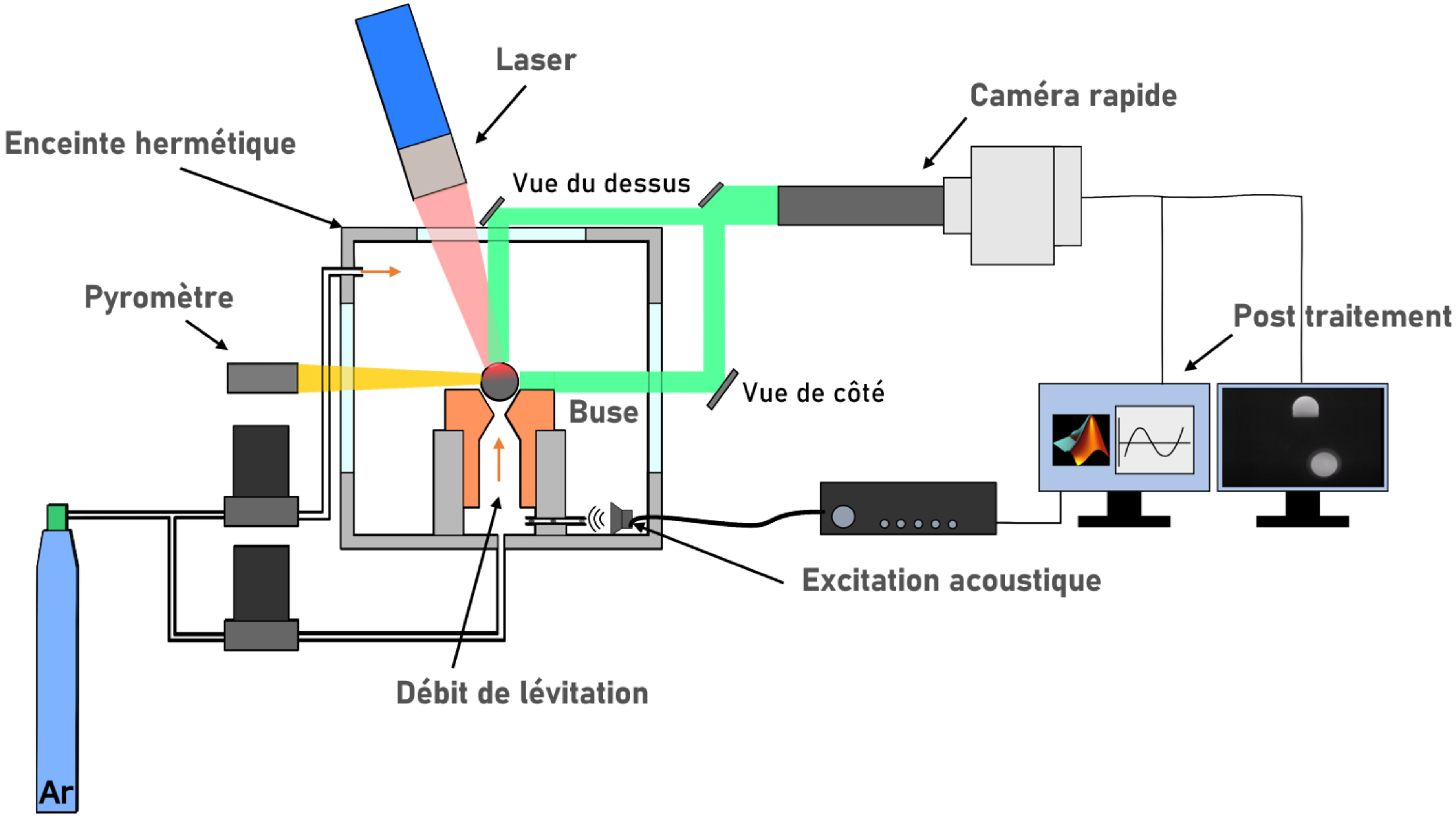
2023 IRDL - All rights reserved.

Lévitation aérodynamique
Principe et méthodologie



2023 IRDL - All rights reserved.

Lévitation aérodynamique
Principe et méthodologie

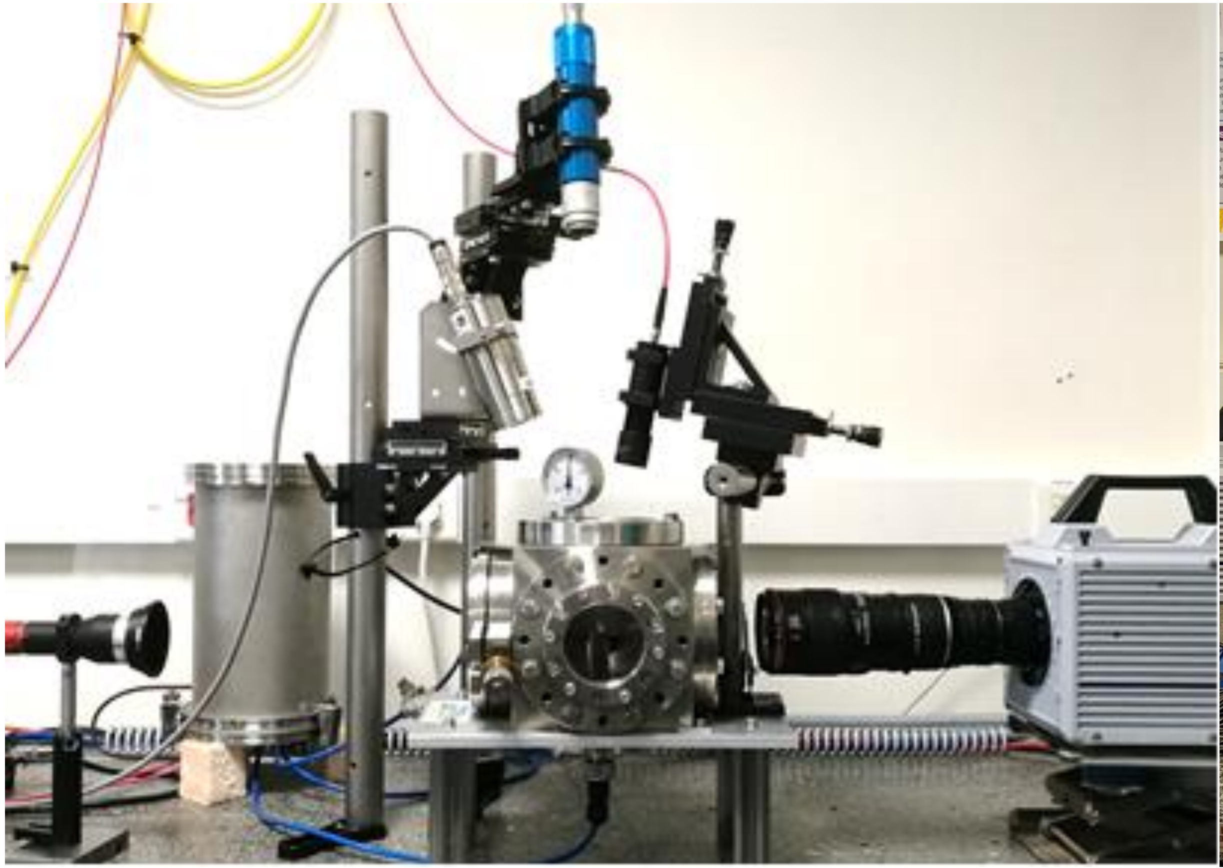


2023 IRDL - All rights reserved.

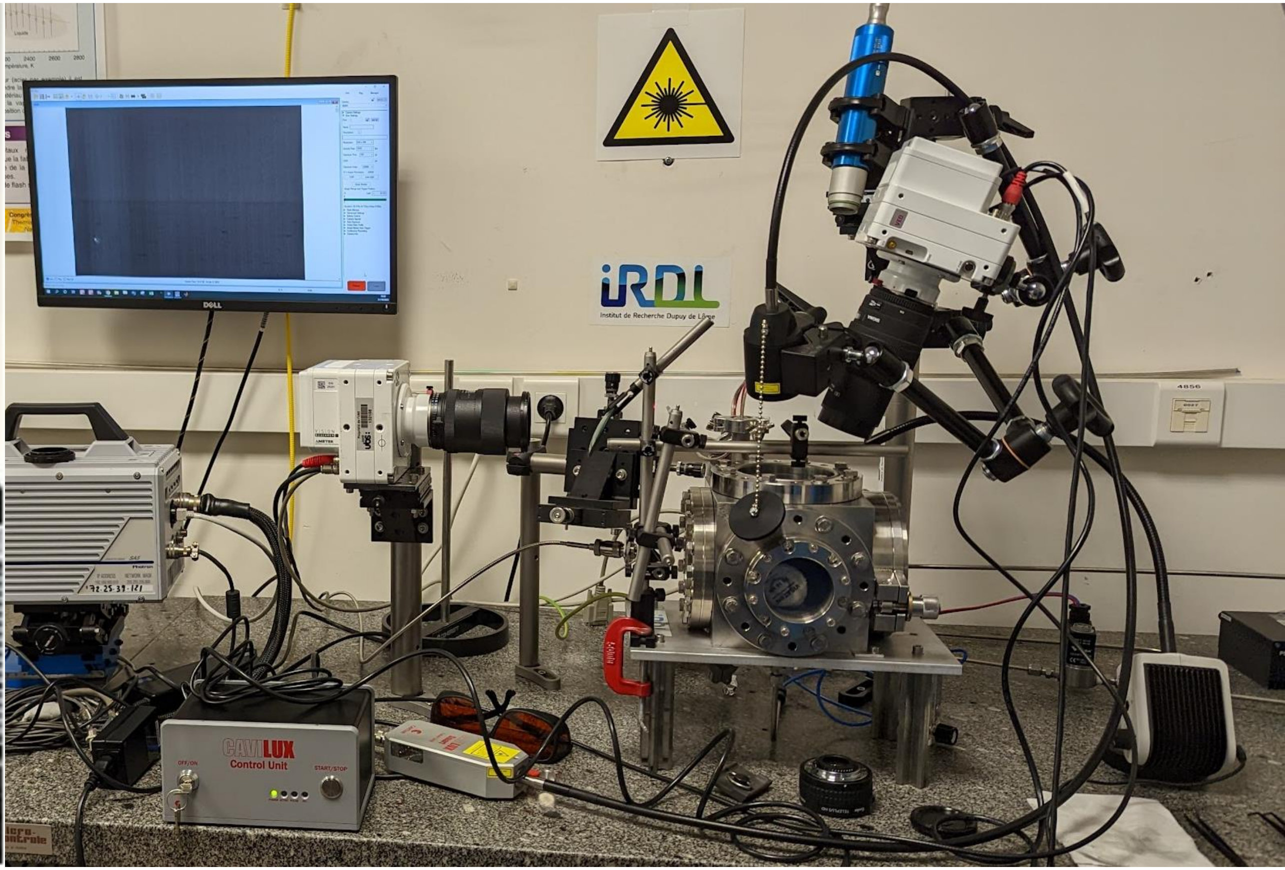
Lévitation aérodynamique
Principe et méthodologie

Institut de Recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027

2018



2022

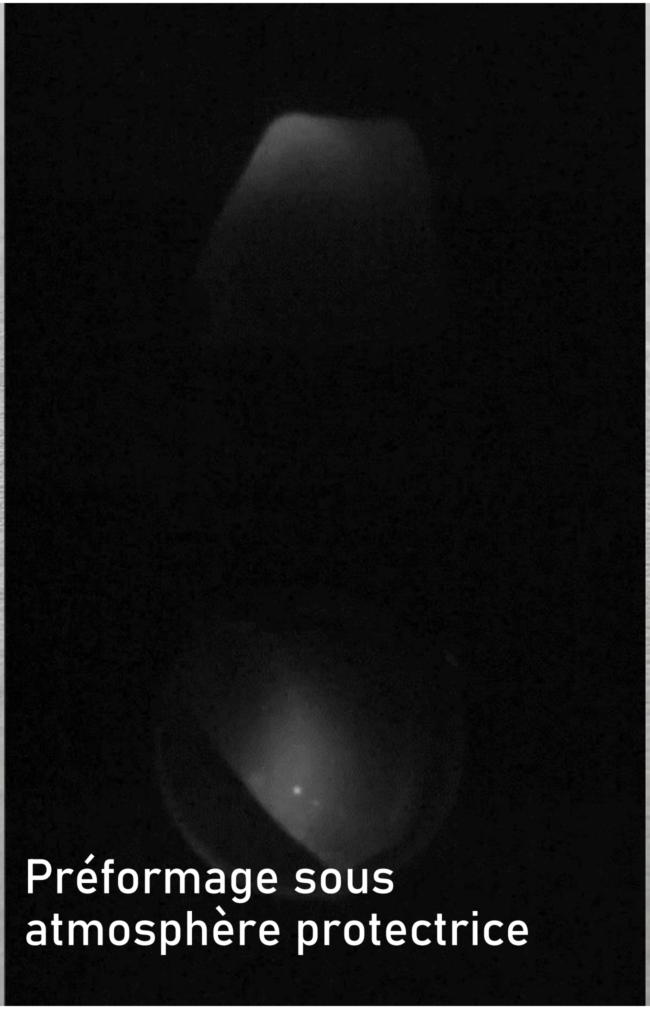


2023 IRDL - All rights reserved.

Lévitation aérodynamique
Principe et méthodologie

Matière première

Morceaux de 30 à 40 mg

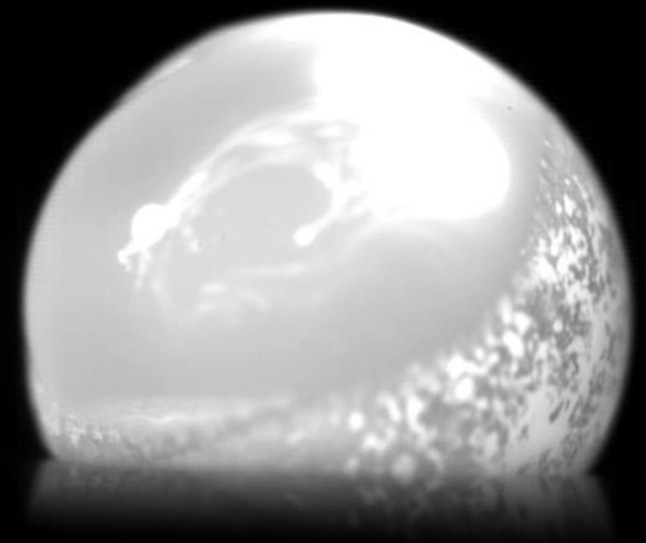


Préformage sous atmosphère protectrice

Billes de fer 30 à 40mg

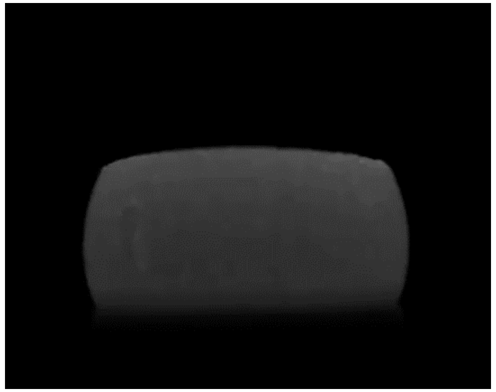
2023 IRDL - All rights reserved.

Lévitation aérodynamique
Principe et méthodologie

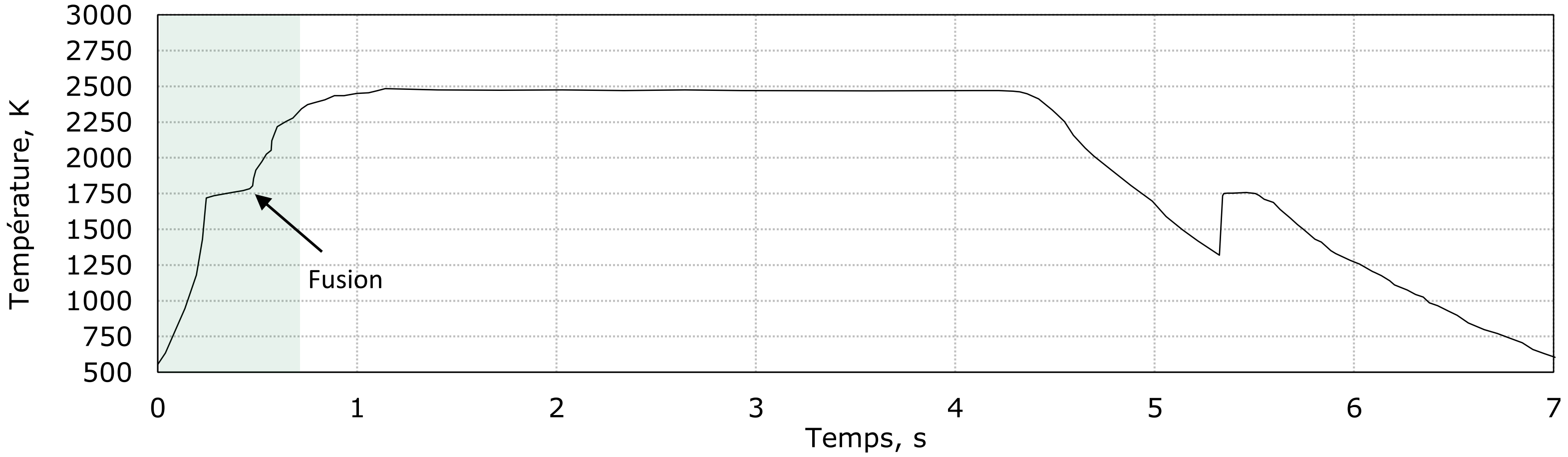


2023 IRDL - All rights reserved.

Lévitation aérodynamique
Principe et méthodologie



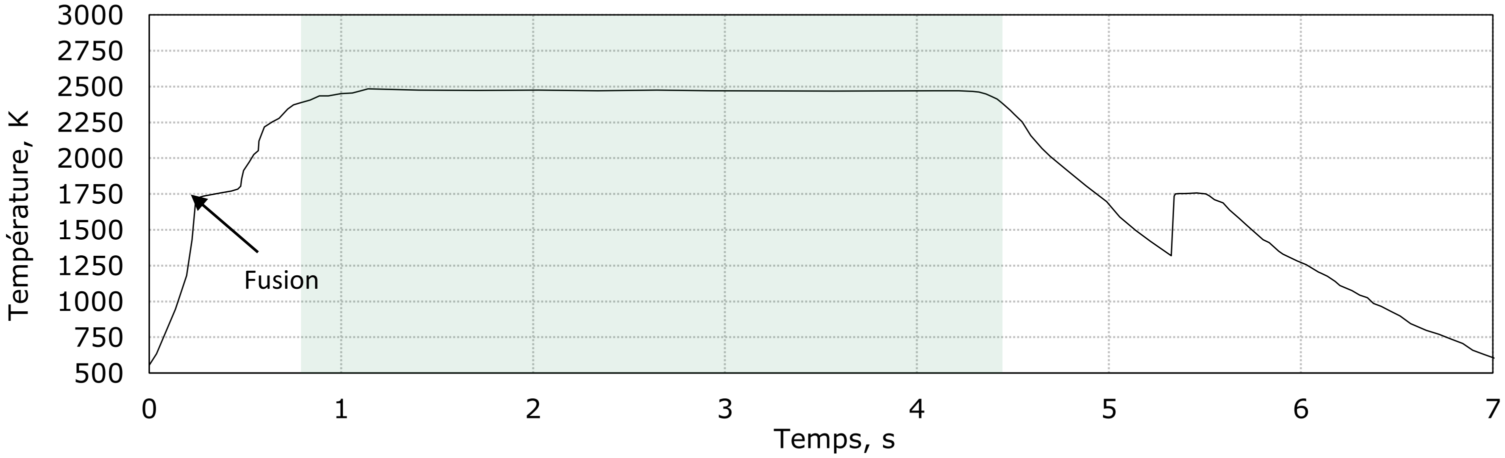
Fusion de l'échantillon avec méplat



2023 IRDL - All rights reserved.

Lévitation aérodynamique
Principe et méthodologie

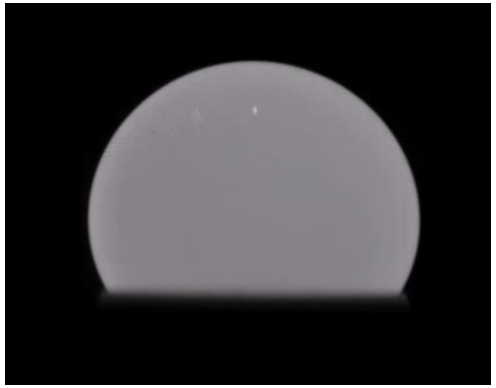
Haute température + évaporation éventuelle



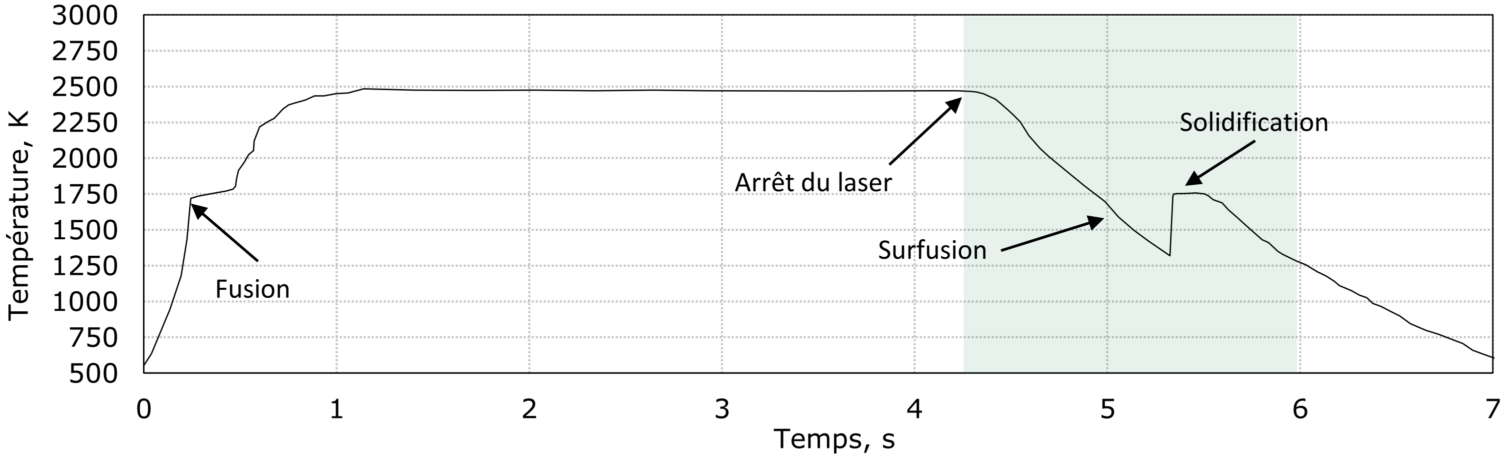
2023 IRDL - All rights reserved.

Lévitation aérodynamique
Principe et méthodologie

Institut de Recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027



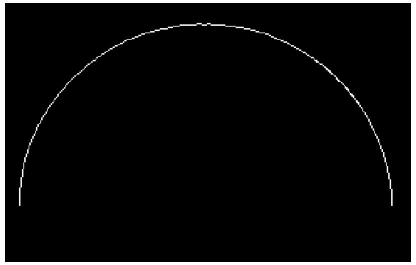
Refroidissement libre avec surfusion puis remontée en température



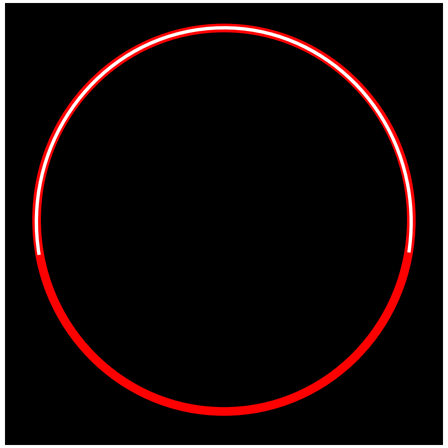
2023 IRDL - All rights reserved.

Mesure de la masse volumique liquide

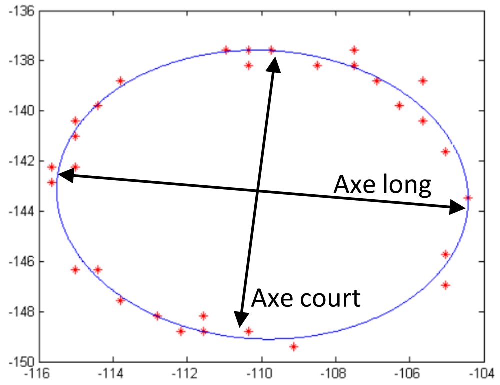
1000 i/s
Obt 1/2,7e6
Temps réel



Contour visible de l'échantillon

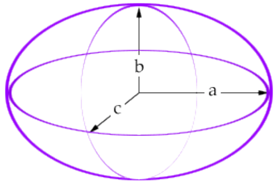


Contour de la partie visible de l'échantillon (blanc) et ellipse fitée (rouge)



Exemple de fit ellipse à partir d'un nuage de points (Nikolai Chernov, 2009)

Détermination de la masse volumique



$$V_{ellipsoïde} = \frac{4}{3}\pi abc$$

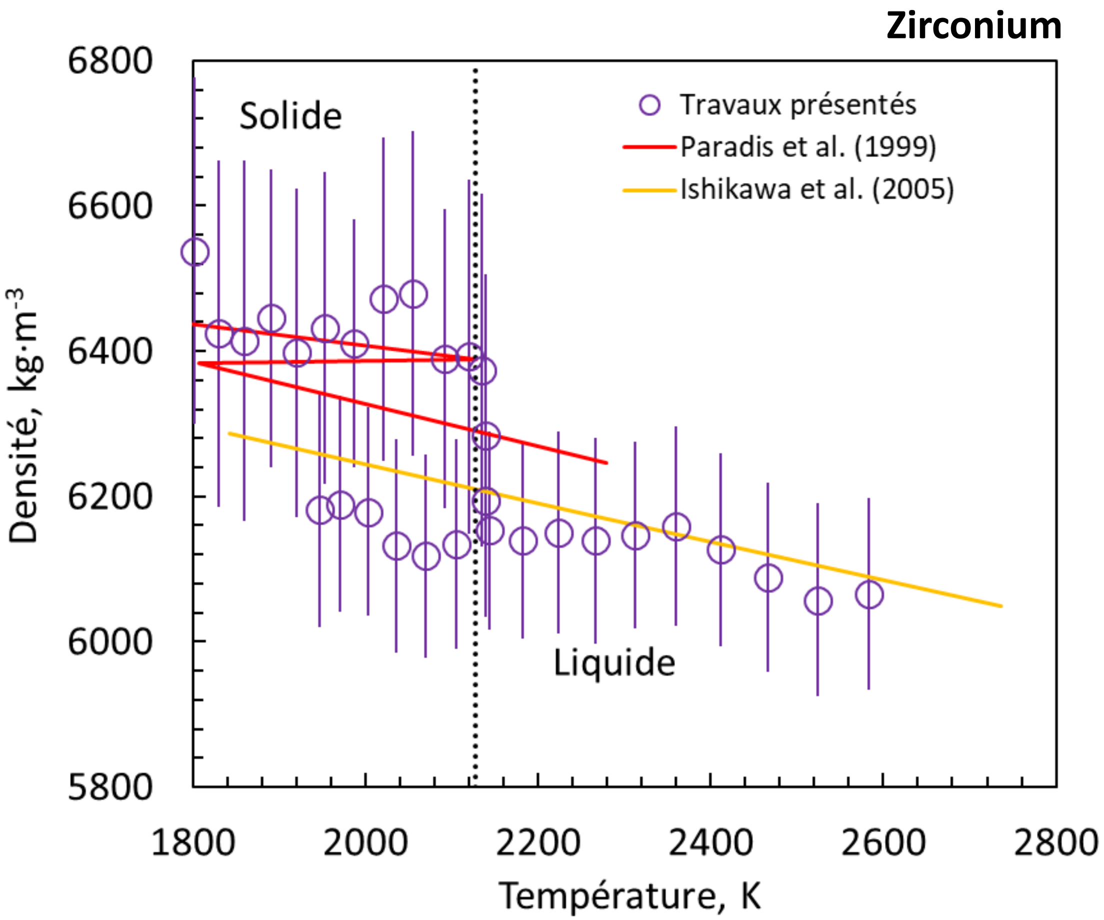
Hypothèse : axisymétrie, $a = c$

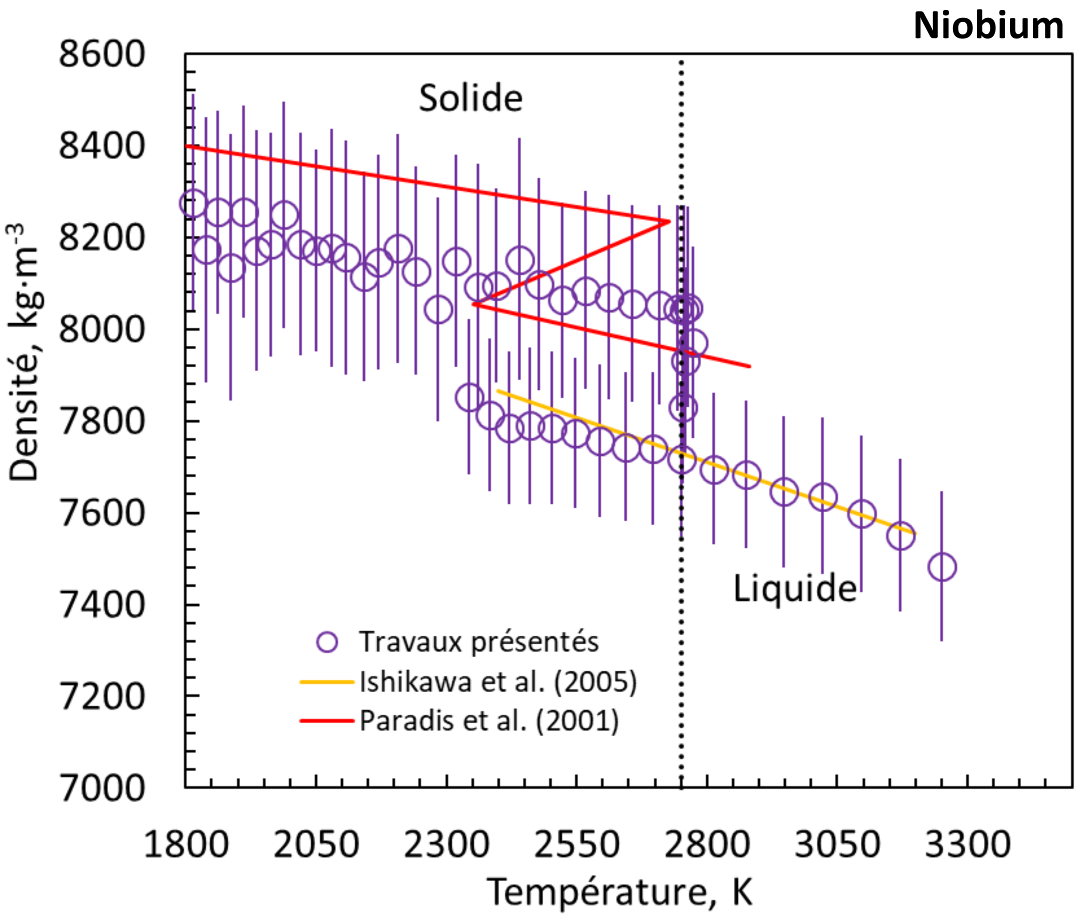
Masse volumique : $\rho = \frac{masse}{volume}$

2023 IRDL - All rights reserved.

Mesure de la masse volumique liquide

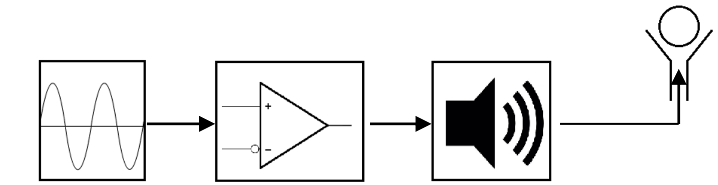
Exemples de résultats





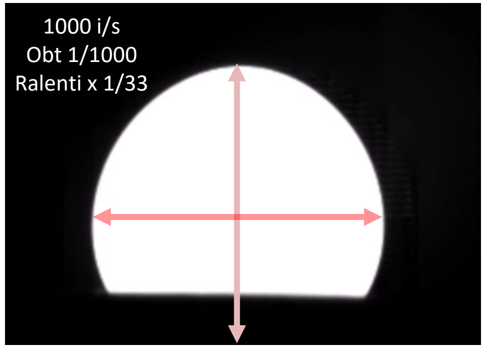
2023 IRDL - All rights reserved.

Mesure de la tension de surface
Principe et méthodologie

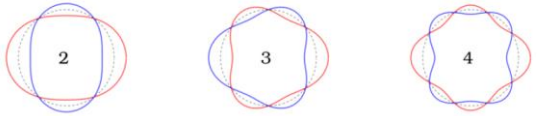


Objectif : trouver la fréquence de résonnance de l'échantillon

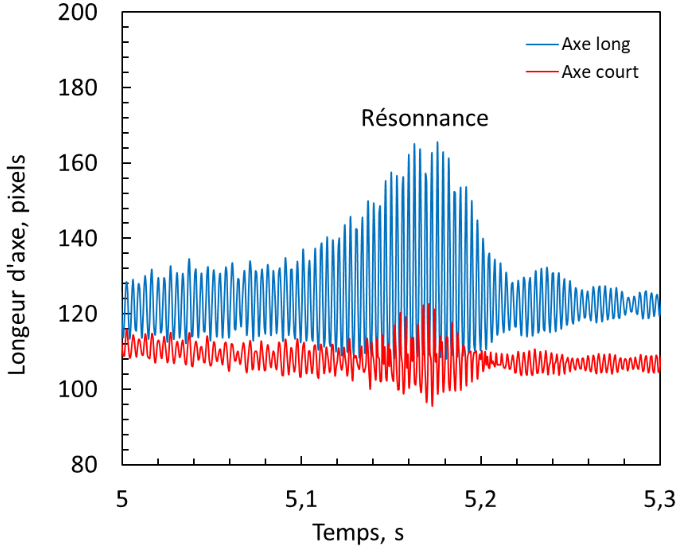
Exemple : balayage de 50 à 200 Hz sur 2 secondes



Modes d'oscillations :



Si mode 2 prépondérant :
Hypothèse de forme d'ellipse valide



Variation du diamètre de l'échantillon

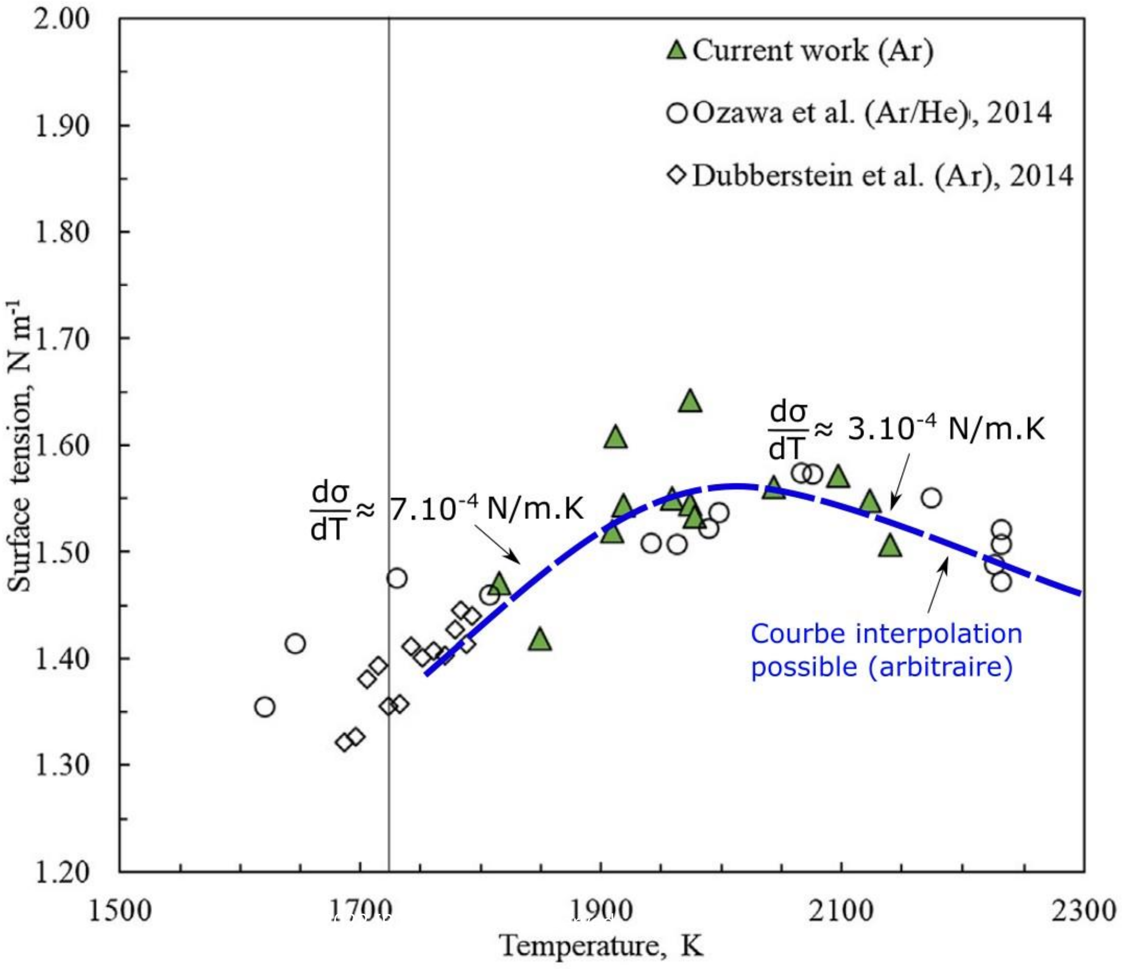
Formule de Rayleigh (1879) :

$$\gamma = \frac{3}{8}\pi v_R^2 m$$

γ : tension superficielle
v_R : fréquence de résonnance
m : masse de l'échantillon

2023 IRDL - All rights reserved.

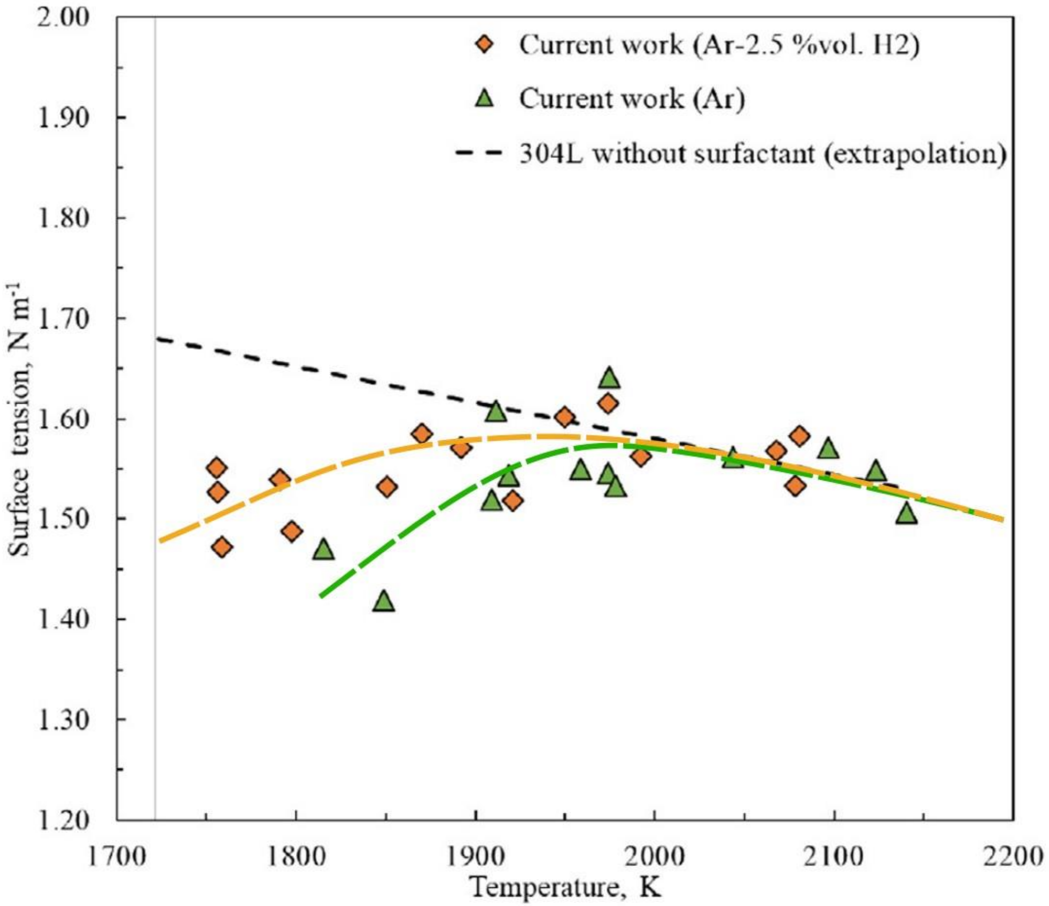
Application à un acier inoxydable 304L



- Application aux alliages d'intérêt industriel type inox
- Mesures sur une large plage de température
- Effet Marangoni mesurable !

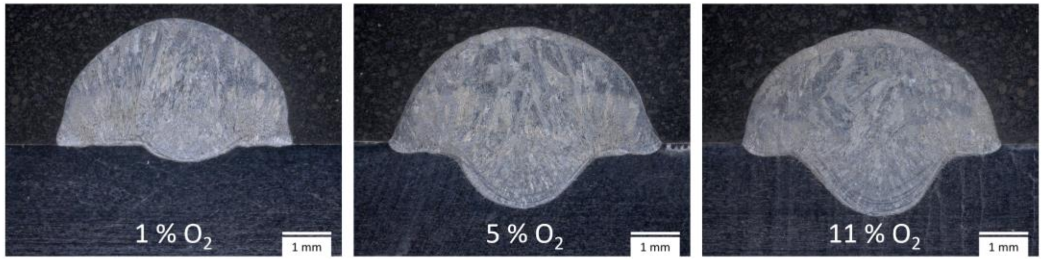
2023 IRDL - All rights reserved.

Application à un acier inoxydable 304L



- **Etude de l'effet de l'oxygène sur le procédé**
  - Peu ou pas d'effet à haute température
  - Pas de modification majeure à basse température

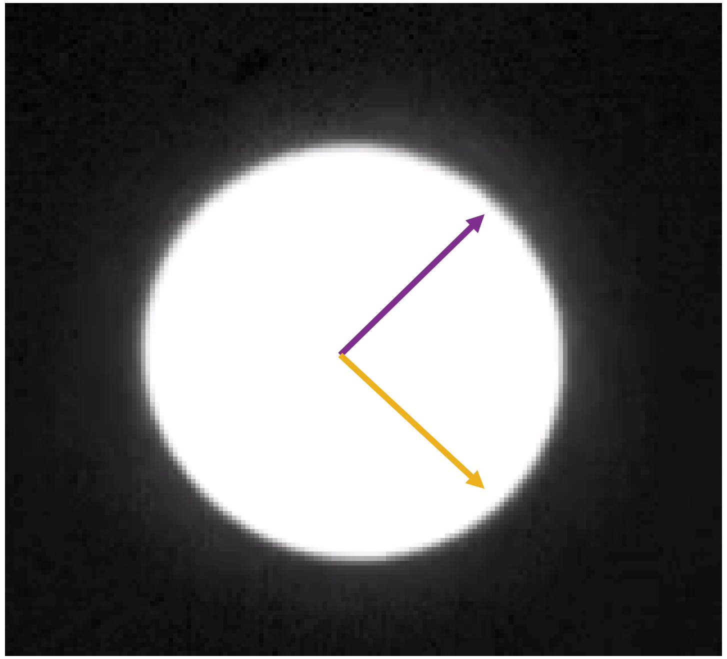
Lien avec le WAAM:



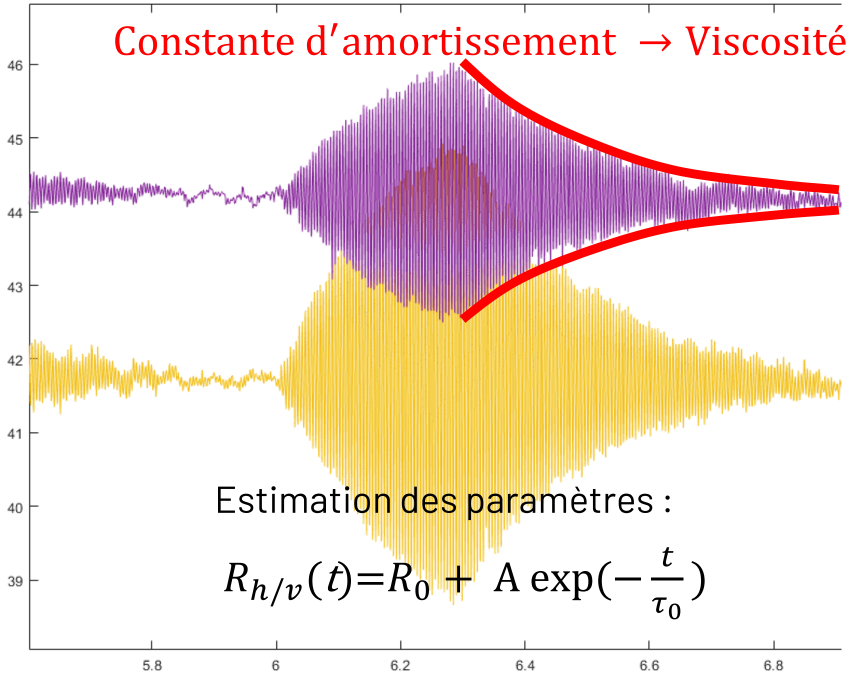
2023 IRDL - All rights reserved.

Mesure de viscosité

Expérience:



Estimation:



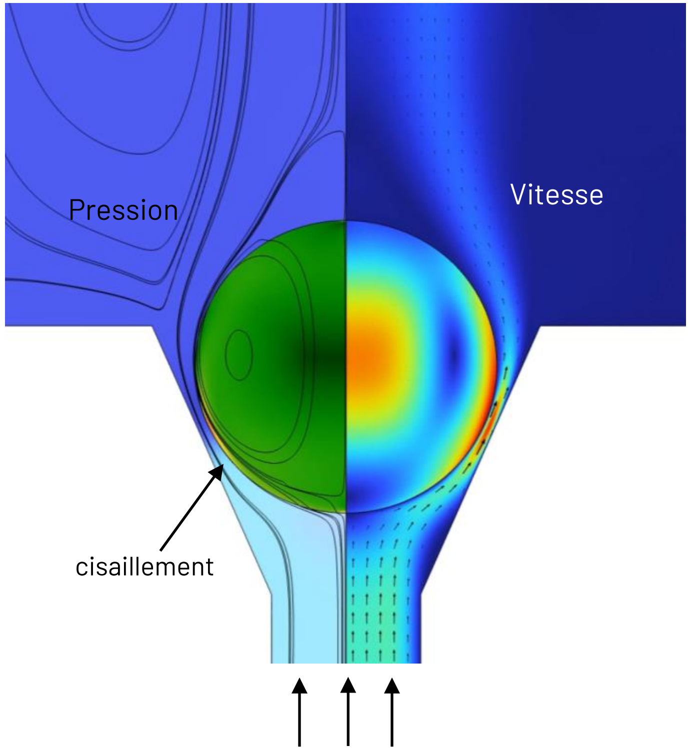
Estimation des paramètres :

$$R_{h/v}(t) = R_0 + A\exp(-\frac{t}{\tau_0})$$

La viscosité selon la formule de Lamb:

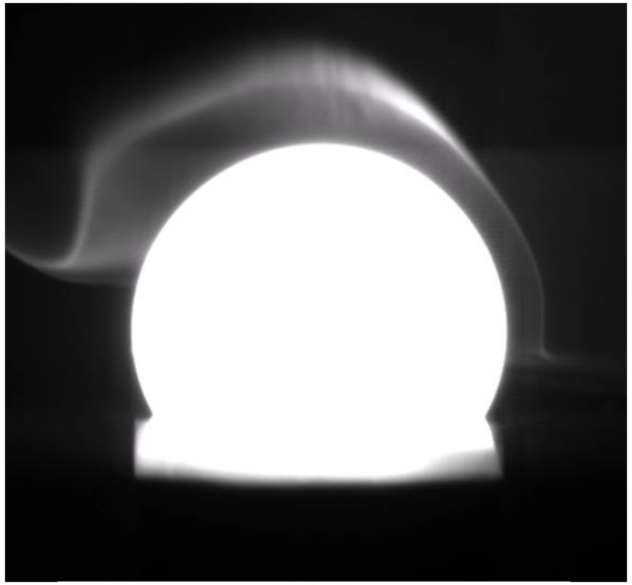
$$\eta = \frac{\rho R_0^2}{5\,\tau_0} \qquad [\boldsymbol{Pa.s}]$$

Modèle:



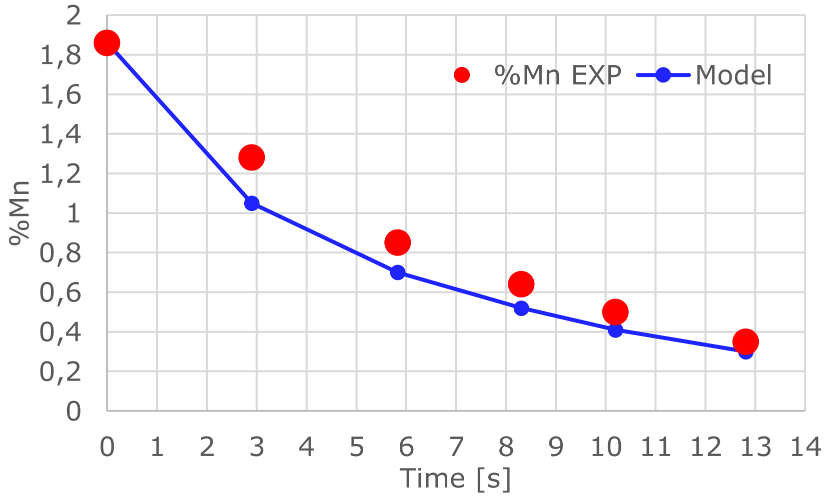
2023 IRDL - All rights reserved.

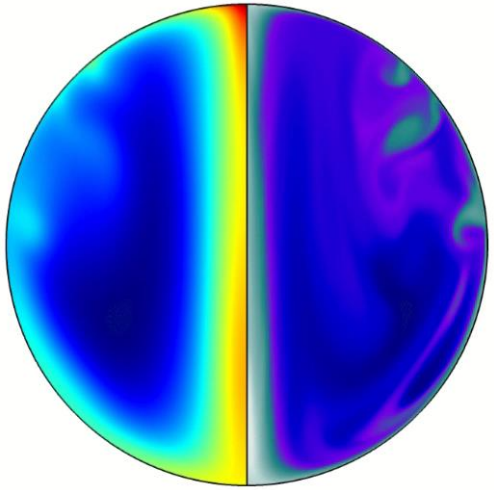
Etude de l'évaporation des éléments d'alliage
Application à un acier inoxydable 304L



Expérience
Evaporation importante des éléments volatiles

Phénomène rencontré sur certains procédés



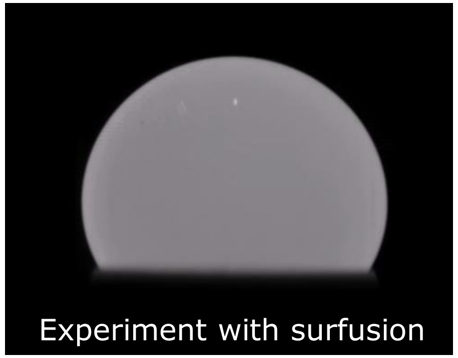


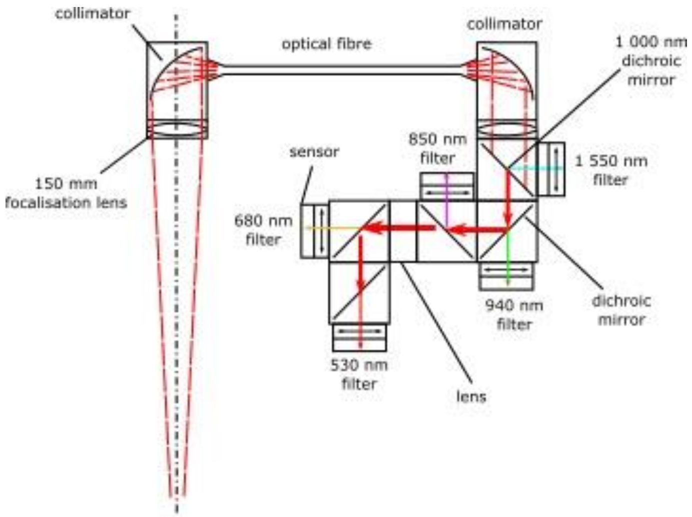
Modèle multiphysique

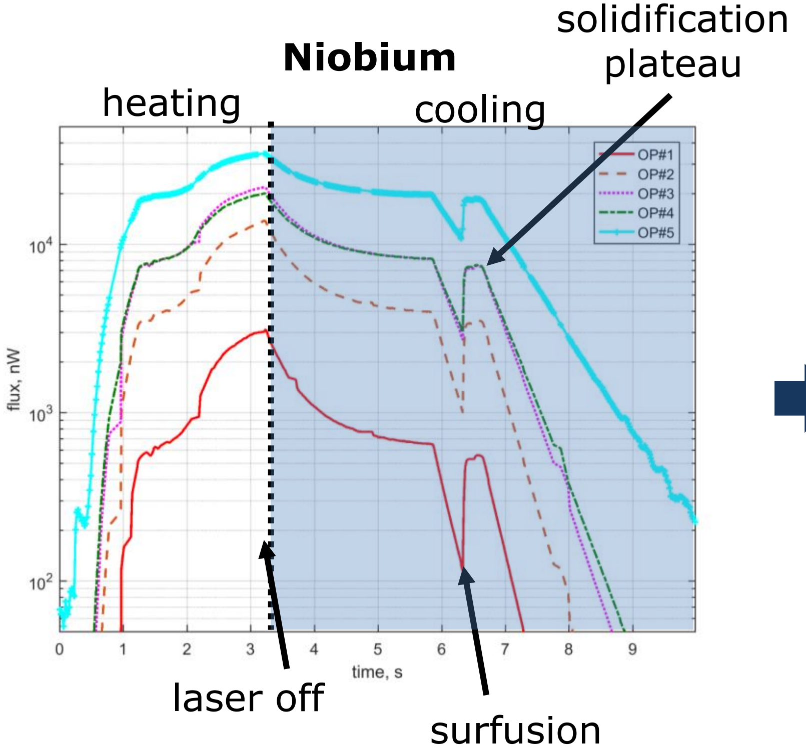
Transfert de chaleur, mécanique des fluides, transport d'espèces et diffusion
Etude des cinétiques d'évaporation

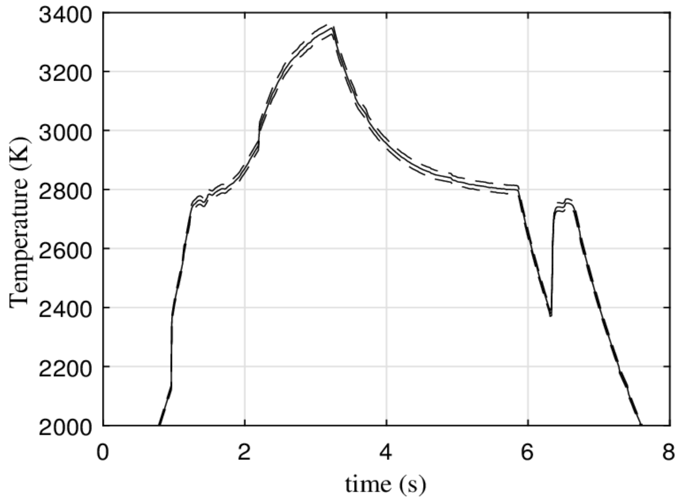
2023 IRDL - All rights reserved.

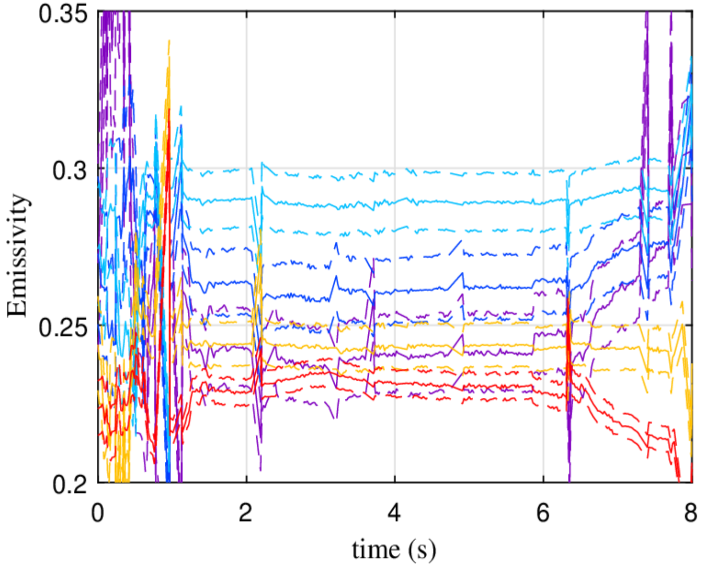
Mesure de température/émissivité par pyrométrie multispectrale







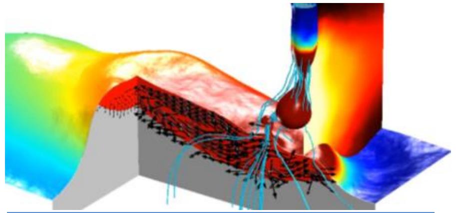




Estimation simultanée de la température et des émissivités. Plage [500-4000°C]

2023 IRDL - All rights reserved.

Caractérisation des métaux fondus



Modèles numériques à hautes températures

Caractérisation des métaux à l'état liquide

Expériences à hautes températures

Dispositifs de mesure

PhD Le Maux	Masse volumique
PhD Le Maux & Klapzcinski	Tension superficielle
Interne + stages	Viscosité
PhD Dejaeghere	Émissivité

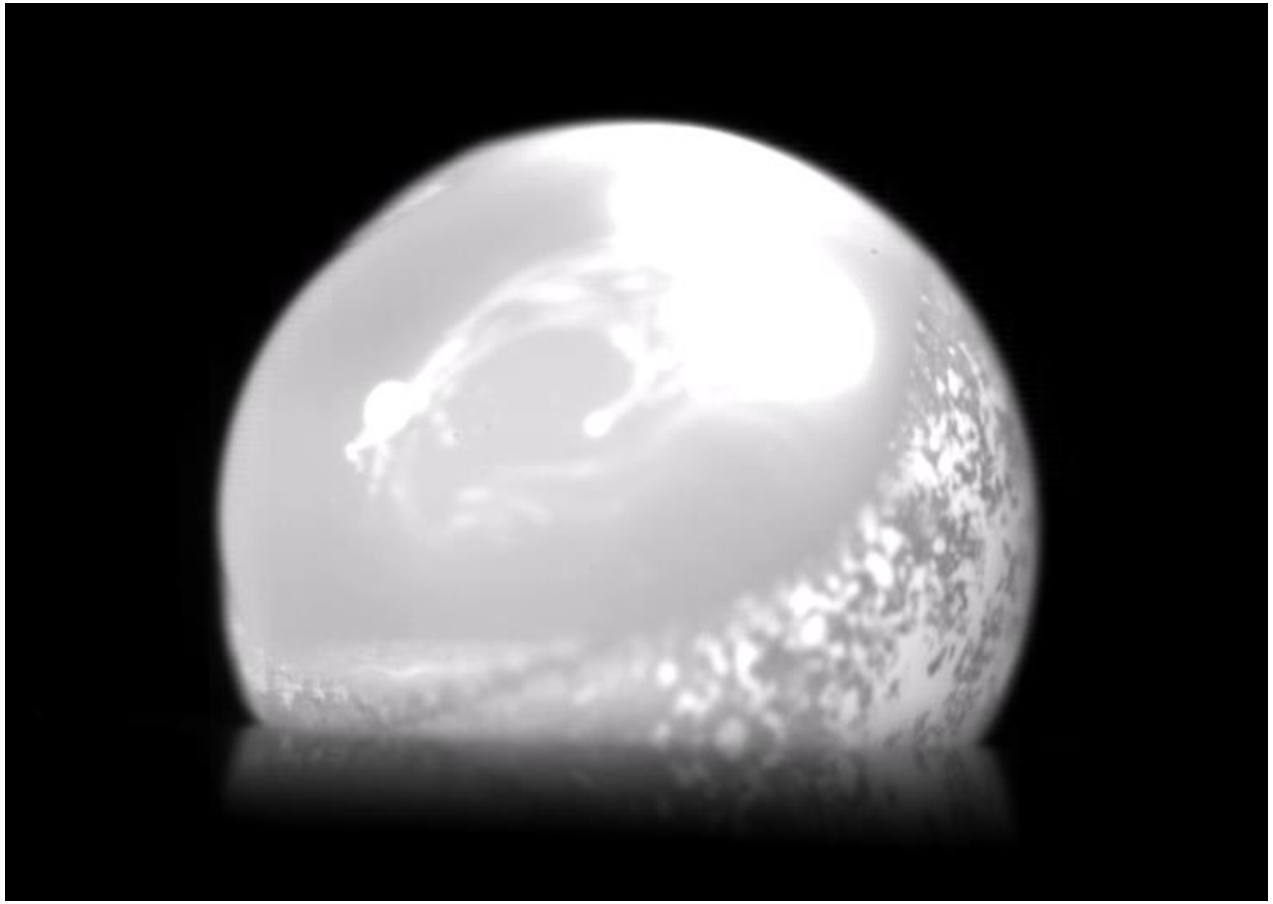
Diffusivité thermique	PhD Houssein
Capacité thermique massique	Bientôt (Phd + ANR)

Maitrisé	En développement	Non maitrisé

2023 IRDL - All rights reserved.

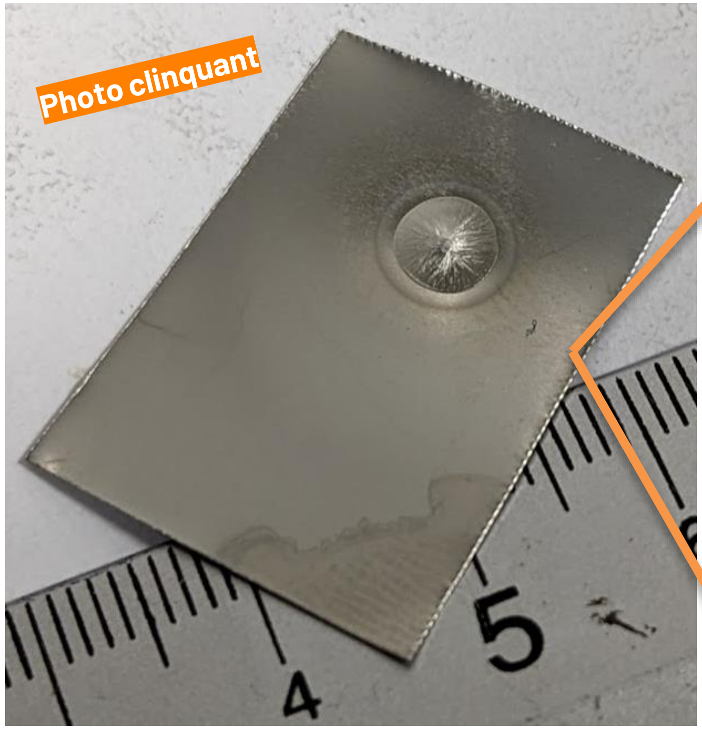
Mesure de diffusivité thermique - Problème

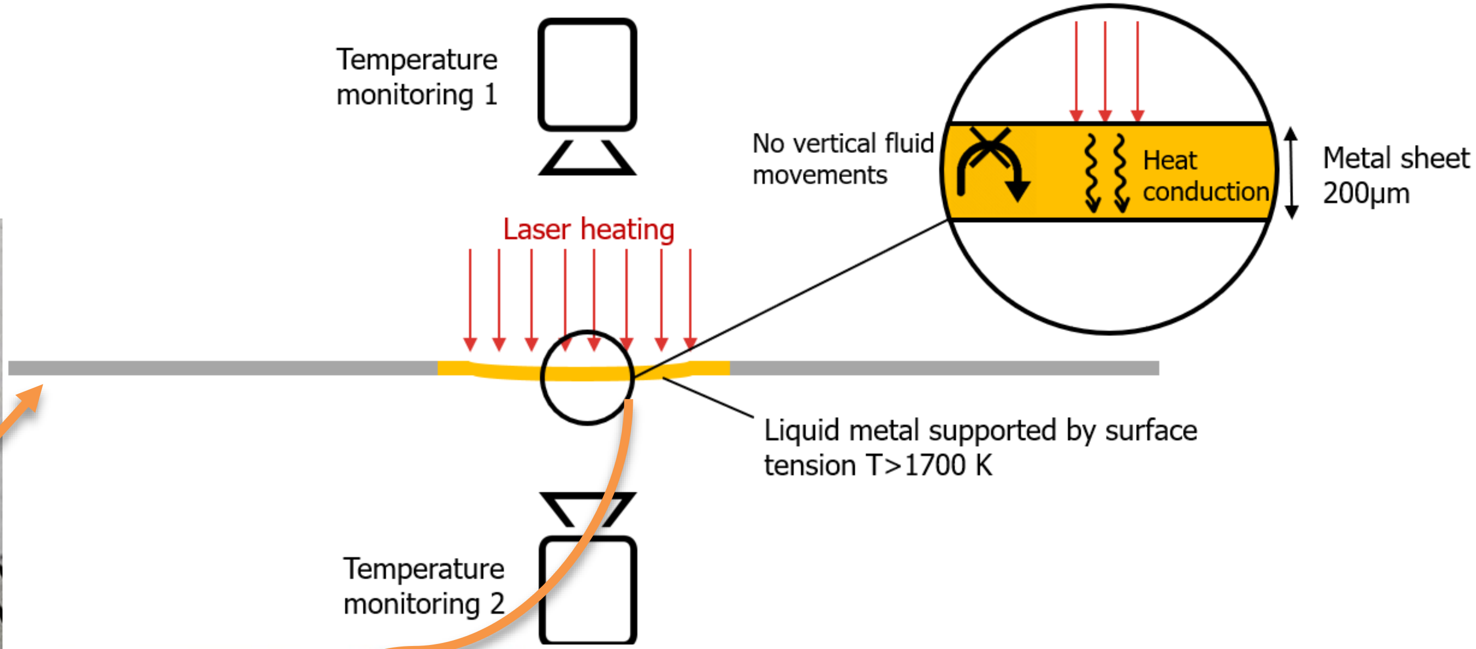
$$\rho\ c_p{}^* \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \boxed{\vec{u}.\nabla T}\right] = \nabla.(\lambda \nabla T) + I_{laser}$$

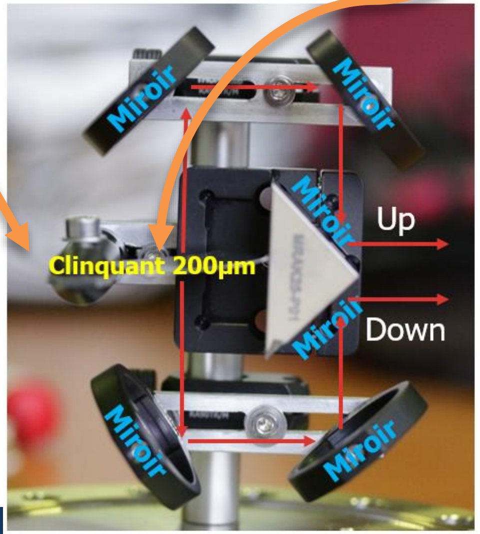


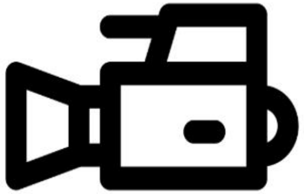
2023 IRDL - All rights reserved.

Mesure de diffusivité thermique - idée

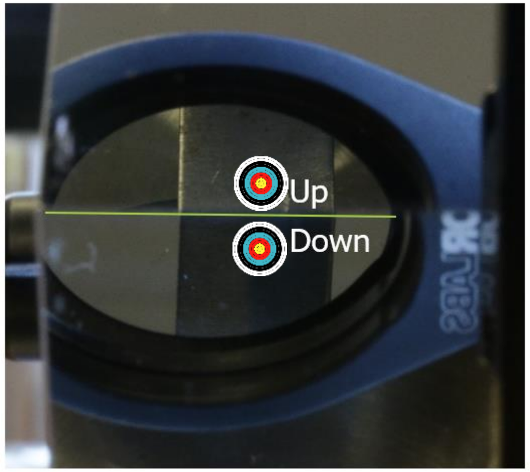








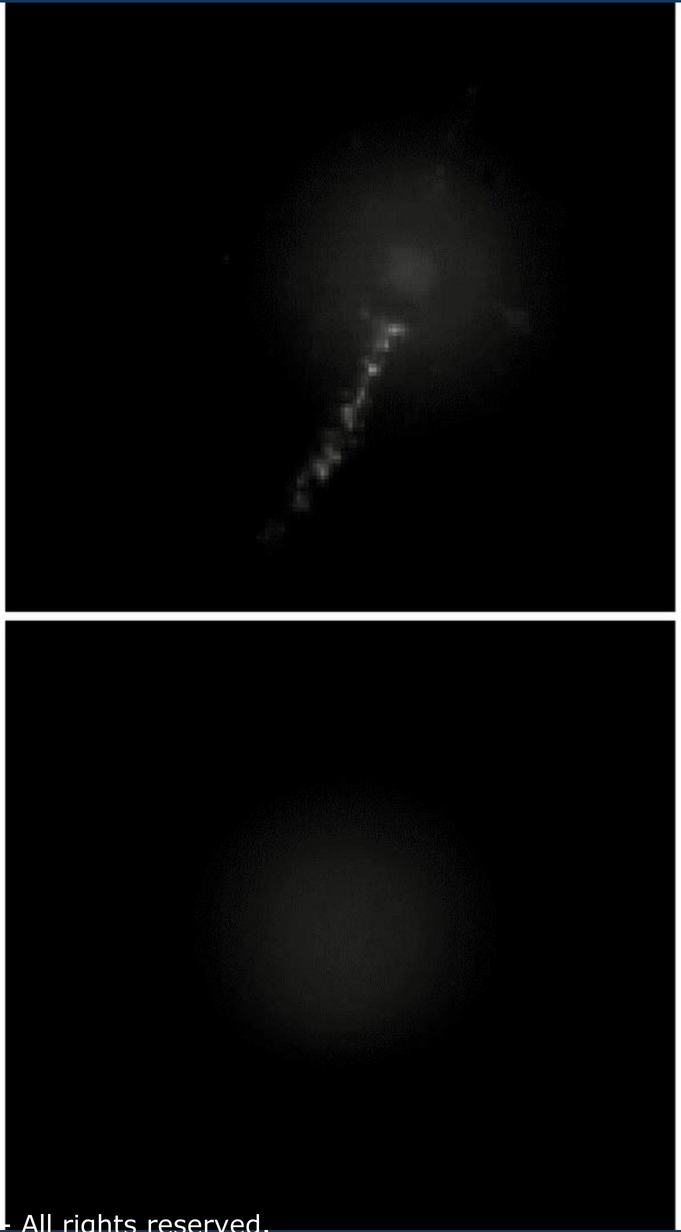
Caméra haute vitesse

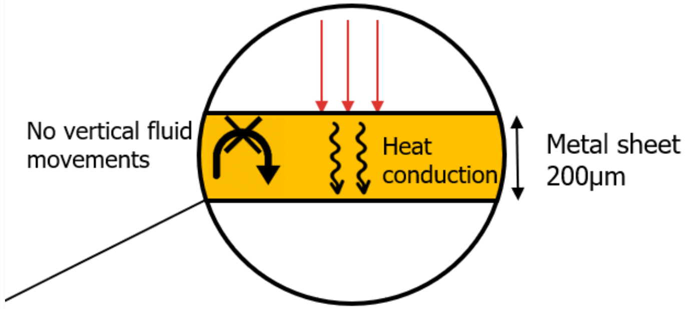


Vue dans le visible d'un perçage à travers le jeu de miroirs (6)

2023 IRDL - All rights reserved.

Mesure de diffusivité thermique - réalisation





estimé

$$\rho\ c_p^{*}\left[\frac{\partial T}{\partial t}+\vec{u}.\nabla T\right]=\nabla.(\lambda\nabla T)+I_{laser}$$

mesurés

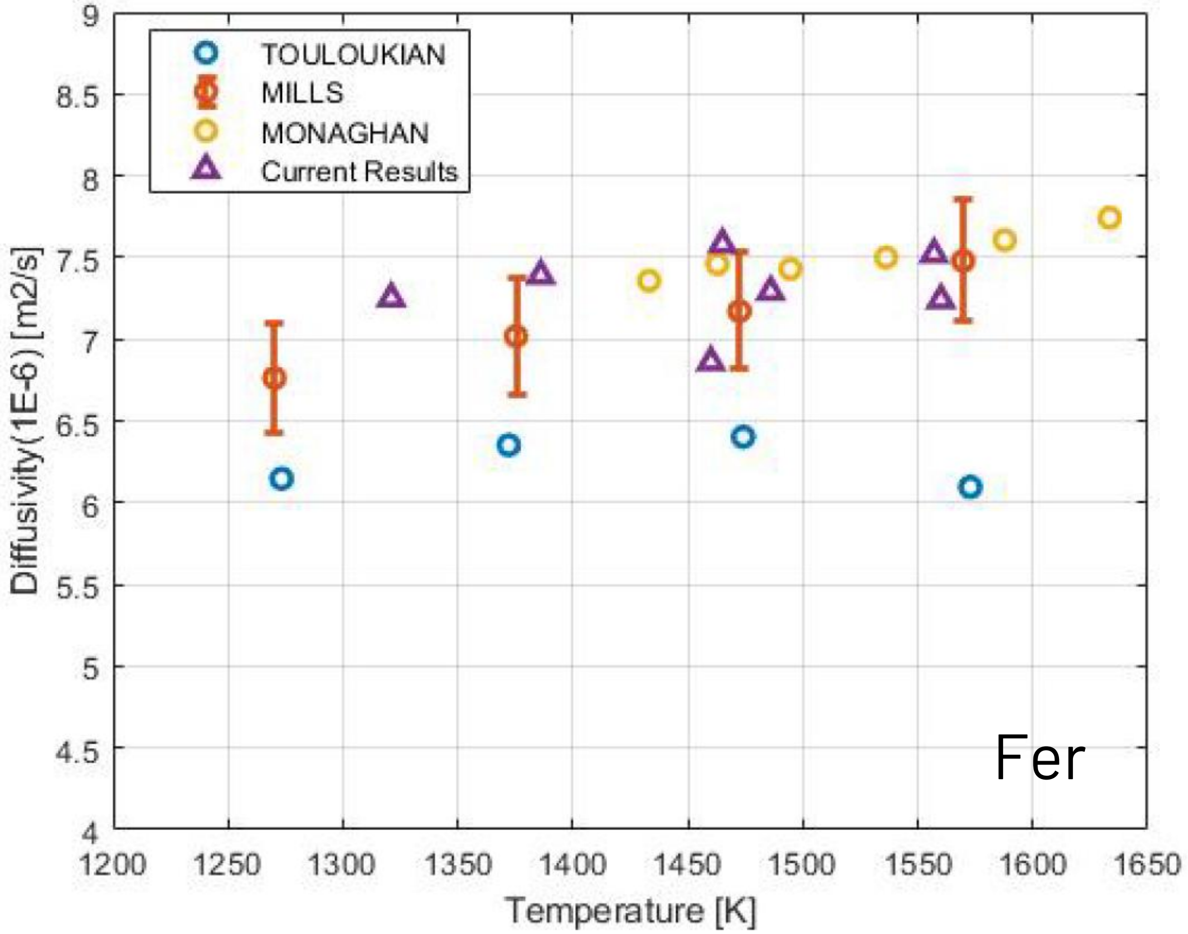
- Mesure radiative température via caméra rapide

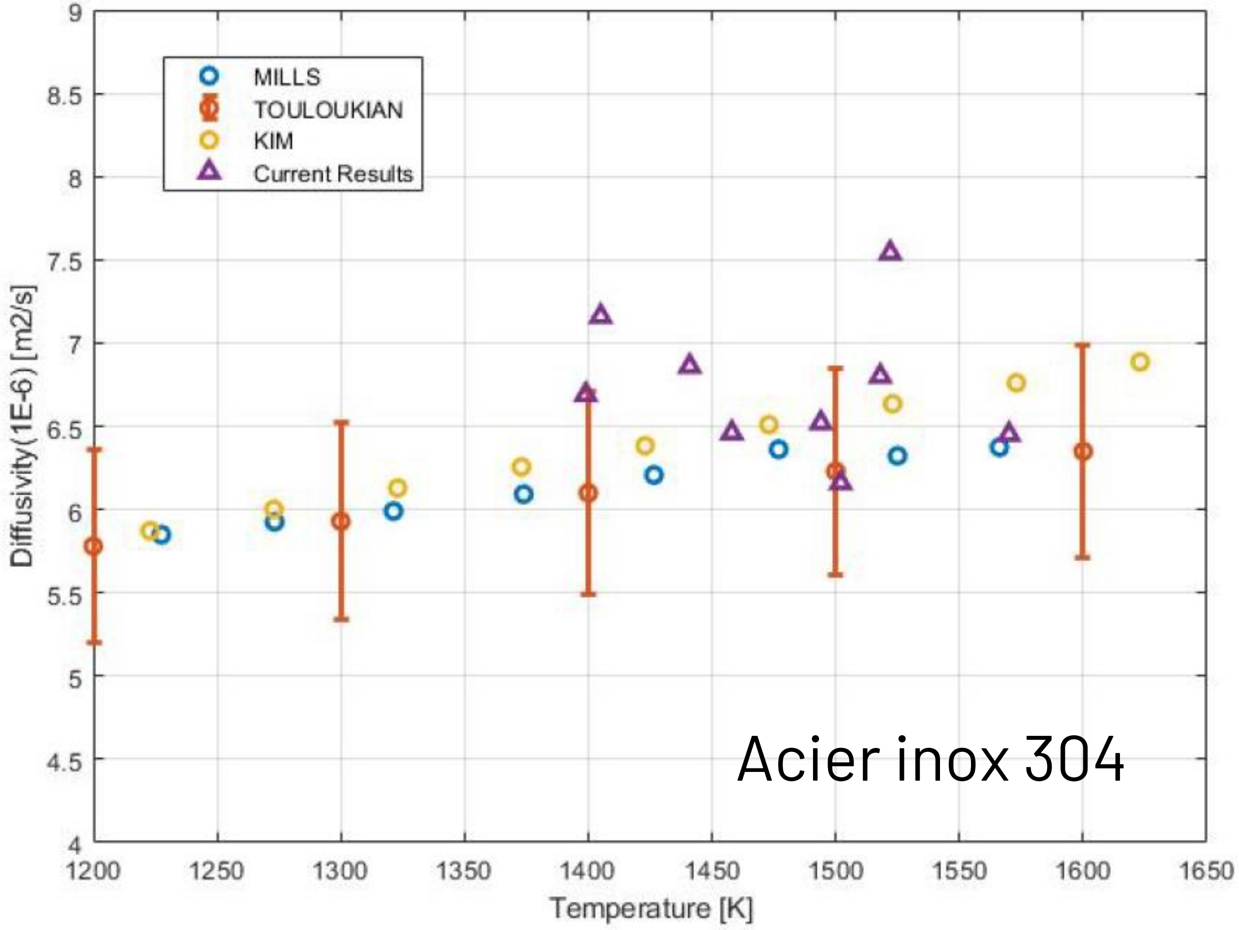
- Modèle température – température & méthodes inverses

- Températures élevées possibles, non pollution par « creuset froid »

2023 IRDL - All rights reserved.

Mesure de diffusivité thermique - résultats

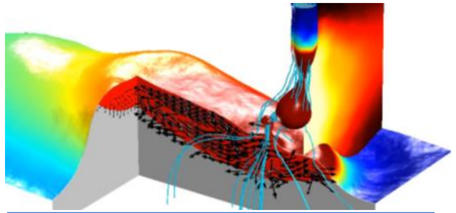




Méthode très prometteuse, à poursuivre!

2023 IRDL - All rights reserved.

Caractérisation des métaux fondus



Modèles numériques à hautes températures

Expériences à hautes températures

Caractérisation des métaux à l'état liquide

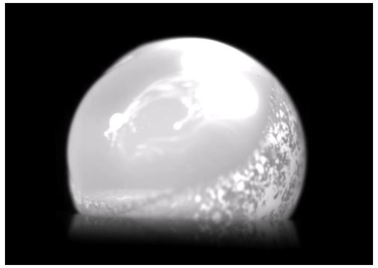
Dispositifs de mesure

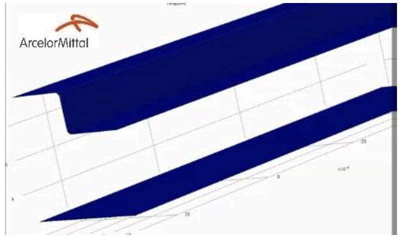
- **Masse volumique**
- **Tension superficielle**
- **Viscosité**
- **Diffusivité thermique**
- **Capacité thermique massique**
- **Émissivité**

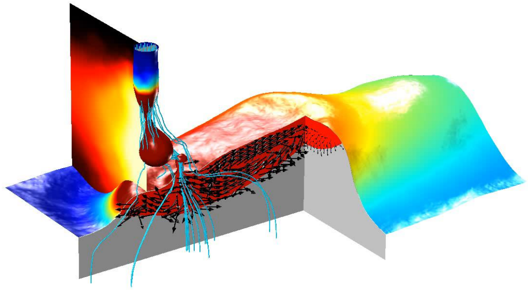
- Températures atteignables : + de 3000°C
- Certaines propriétés mesurables (encore du travail 😅)
- Pas (trop) de pollution
- Moins cher et plus rapide que l'ISS !
- Pas encore appliqué aux aluminiums et aux cuivres
- ...

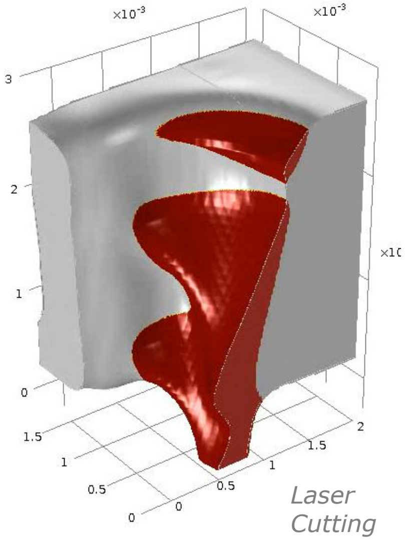
Maitrisé | **En développement** | **Non maitrisé**

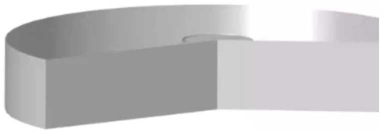
2023 IRDL - All rights reserved.

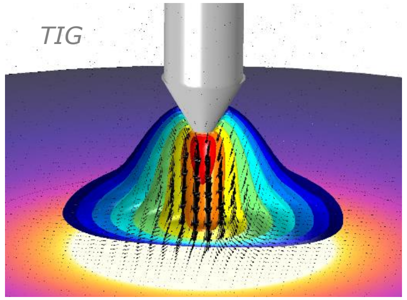


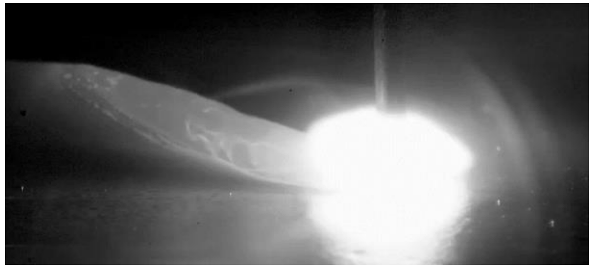












Merci pour votre attention !

Institut de Recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027

mickael.courtois@univ-ubs.fr

2023 IRDL - All rights reserved.