

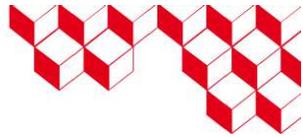
Journée de prospective sur la physicochimie
des liquides à Haute Températures
29 novembre 2024 - IPGP



Institut de Recherche Dupuy de Lôme



Société Française de Thermique
Groupe haute Température



Mesures et modélisation des propriétés thermophysiques ... à haute température

Mickael Courtois ¹

avec les contributions de Thomas Pierre, Coline Bourgès,
Philippe Le Masson, Muriel Carin, Elodie Courtois (IRDL)

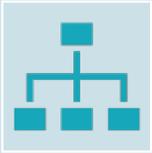
¹ IRDL UMR CNRS 6027

Jules Delacroix ²

avec les contributions de Pascal Piluso, Christophe
Journeau, Romain Le Tellier, Arthur Tourneix, Julien
Tranchida, Andrea Quaini *et al.* (CEA).

² CEA/DES/IRESNE/DTN/SMTA/LEAG

Avec citation des travaux de:     et plusieurs autres....



Organisation en deux parties



1 – Installation expérimentales

Prendre les mesures qui s'imposent ...



2 - Modélisation des grandeurs thermophysiques par approche Calphad et simulations atomistiques

... parce qu'on ne peut pas tout mesurer.

Continuous Improvement...



Source: Archives patrimoniales PSA

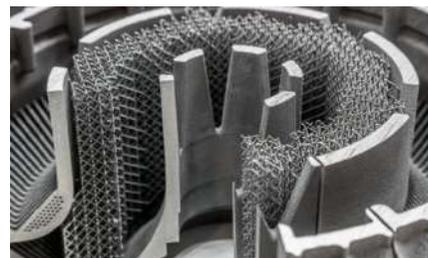


Source: Nissan

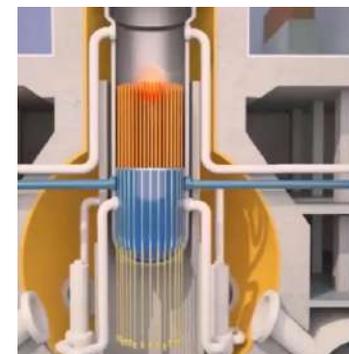
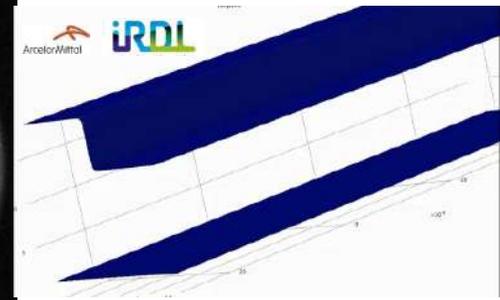
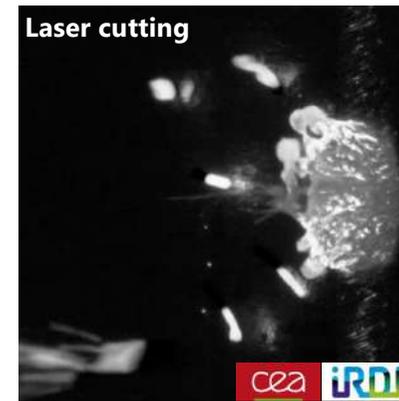
...new processes...



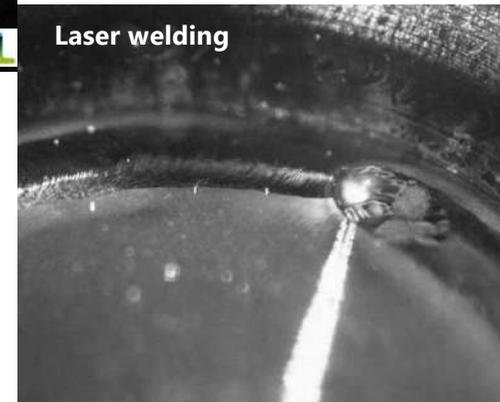
Source: 3Dnative

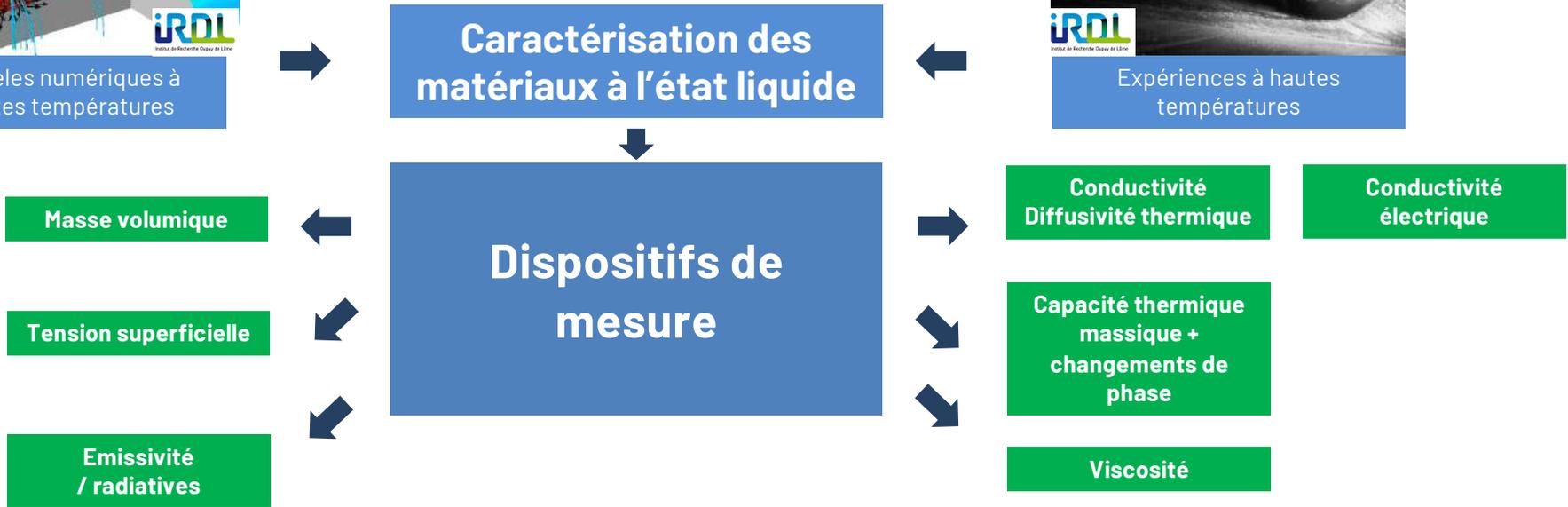
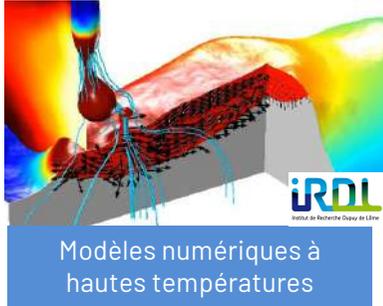


...and new issues



Source: IRSN





Températures comprises entre 1500°C et 3000°C

Multiplicité des propriétés = multiplicité des méthodes

Revue **non exhaustive** des possibilités

Benchmark **SFT** Haute Température

Pilotage: M. Courtois & J. Delacroix

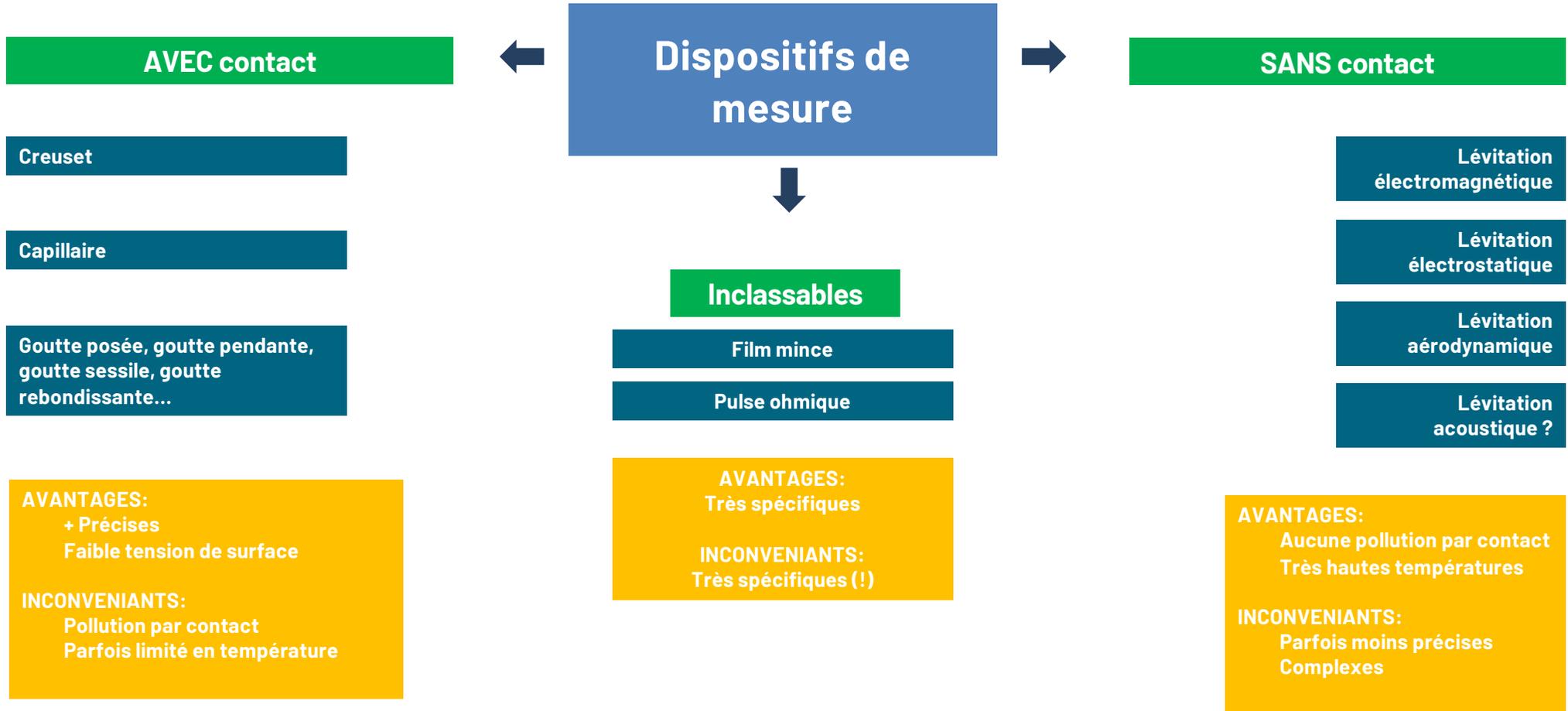
- ➔ Organisation de journées d'échanges régulières
- ➔ Sur la base du volontariat. Ouvert à tous !
 - Deux familles : ➔ Fer "pur" 99,8% pour les métaux (Mickael)
 - ➔ Alumine pour les oxydes (Jules)
- ➔ Objectif: comparaison des méthodes et moyens disponibles
- ➔ Favoriser les échanges, faire émerger de nouvelles collaborations et de nouvelles idées.



Journée de prospective sur la physicochimie
des liquides à Haute Températures
29 novembre 2024 - IPGP

1 Installations expérimentales

Prendre les mesures qui s'imposent...



AVEC contact

Creuset

Capillaire

Goutte posée, goutte pendante, goutte sessile, goutte rebondissante

Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux

Tension de surface

Masse vol.

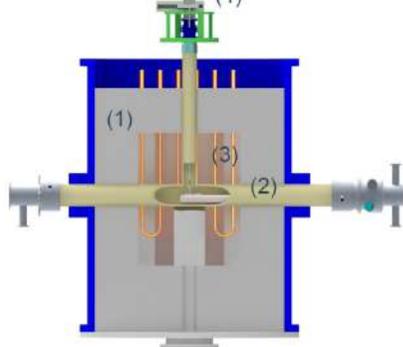
env. 3000°C

Métaux et céramiques

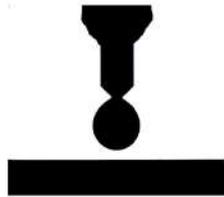
Goutte posée (Dal et al., 2019)

Thermo-optical dynamic wetting apparatus

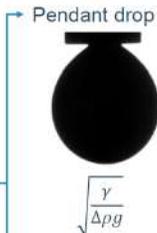
- (1) Split furnace
- (2) T-junction (Alumina or Quartz)
- (3) Heating elements (MoSi₂)
- (4) Injector



Liquid Al on Solid Ni
750°C < T < 1350°C

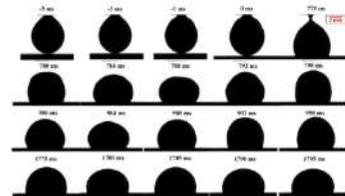
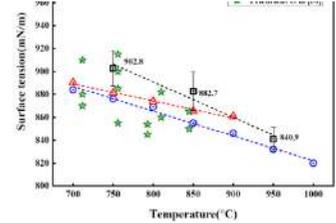


Surface tension



Droplet oscillations

$$\tau_{osc} = 1/f_{osc} \approx \sqrt{\rho D_0^3 / \sigma_v}$$



Courtesy of Pr. David Seveno

KU LEUVEN



Tension de surface

Mouillabilité

env. 1700°C

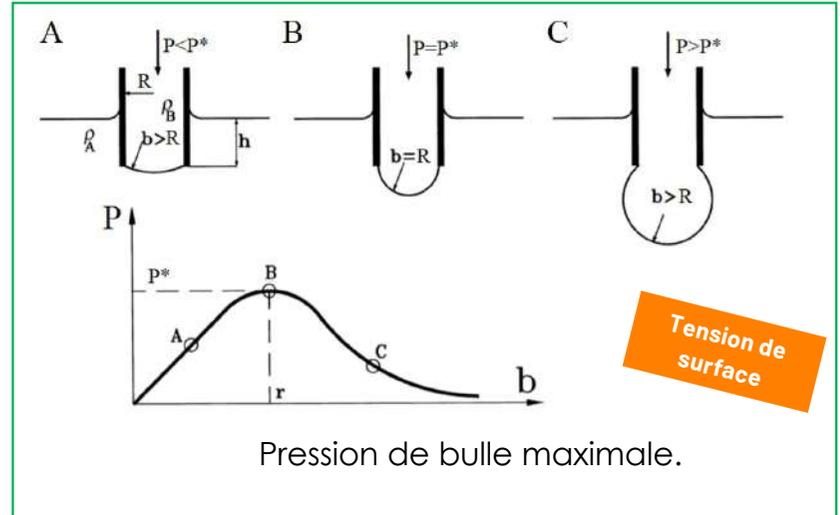
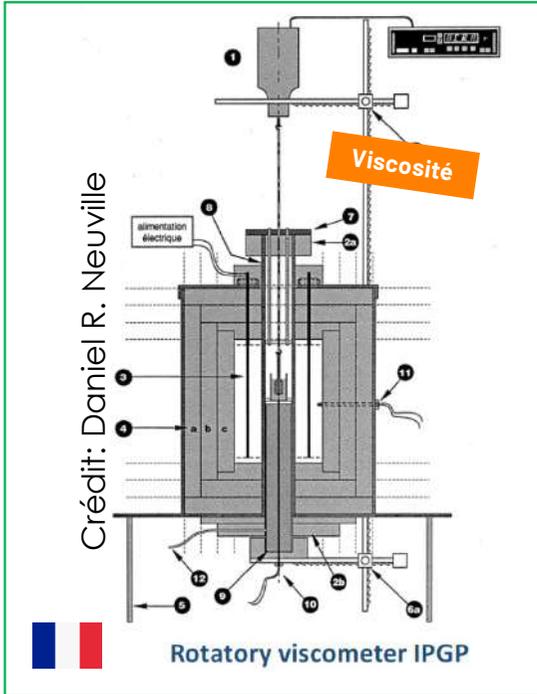
Métaux et céramiques

AVEC contact

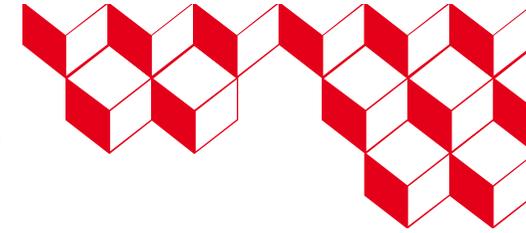
Creuset

Capillaire

**Goutte posée, goutte pendante,
goutte sessile, goutte rebondissante**



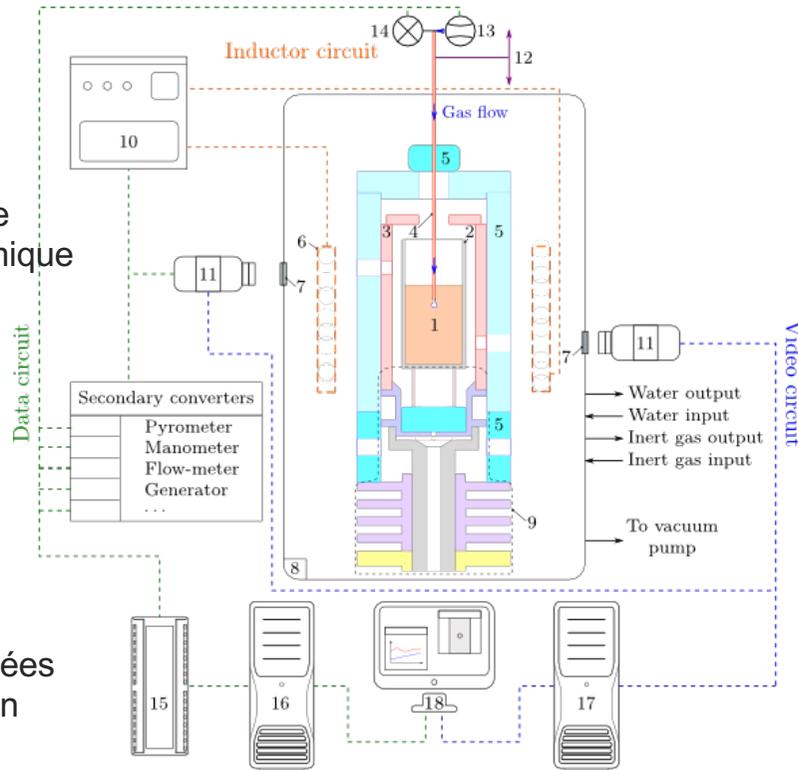
Expérience VITI-MBP, tension de surface



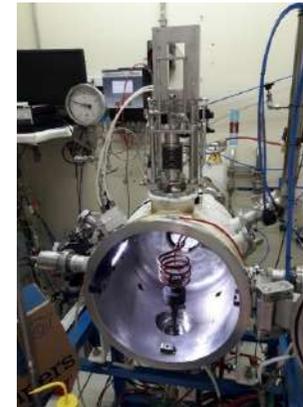
Configuration expérimentale

■ Légende

- 1: Echantillon
- 2: Creuset
- 3: Suscepteur
- 4: Tube capillaire
- 5: Bouclier thermique
- 6: Inducteur
- 7: Fenêtres
- 8: Cuve
- 9: Support
- 10: Générateur
- 11: Pyromètres
- 12: μ -translation
- 13: μ -débitmètre
- 14: μ -pression
- 15: Bus de données
- 16: PC acquisition
- 17: PC imagerie
- 18: Supervision

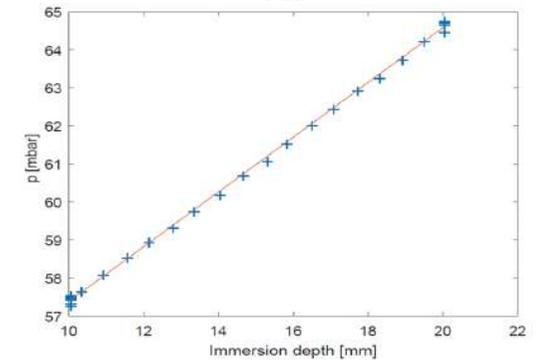
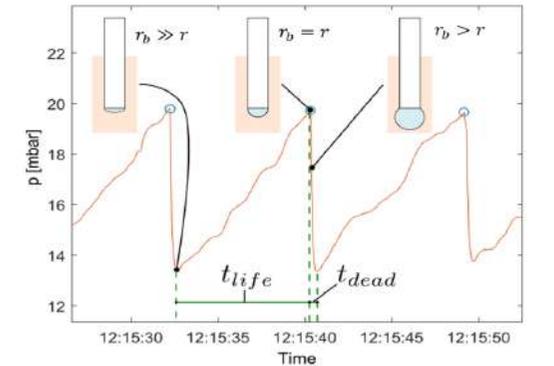


VITI-MBP: configuration.



env. 3000°C

■ Principe



Equilibre de Young-Laplace: $p = \frac{2\sigma}{r} + \rho gh$.



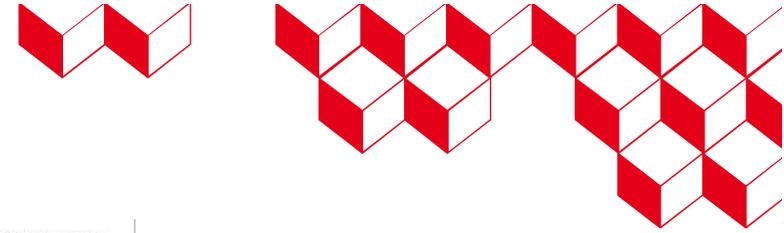
➤ Accès tension de surface & masse volumique

Journée de perspectives sur les liquides hautes températures - 29/11/24 - IGP

02/12/2024

10

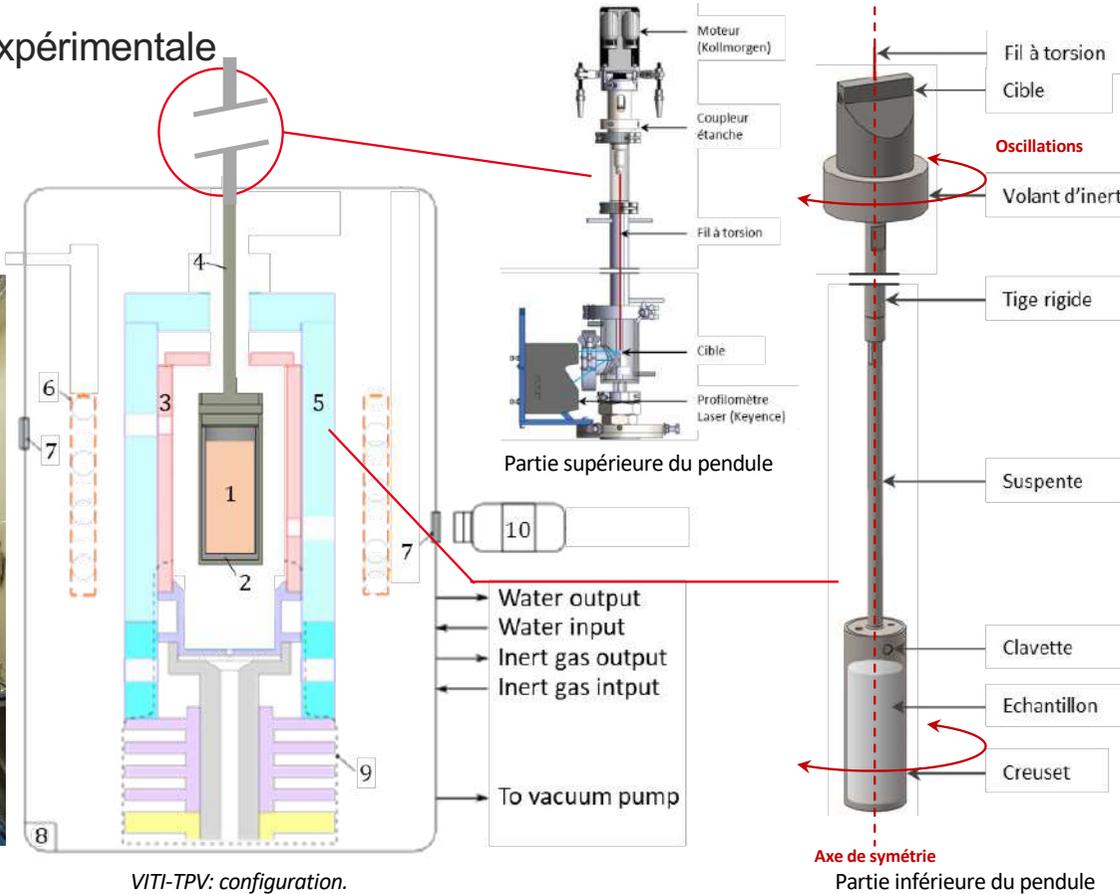
Expérience VITI-TPV, viscosité



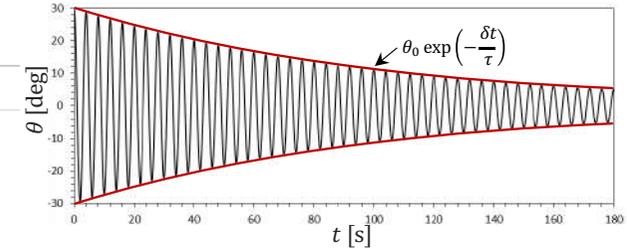
Configuration expérimentale

■ Légende

- 1: Echantillon
- 2: Liner céramique
- 4: Suspente



VITI-TPV: configuration.



Oscillations pseudo-périodiques en régime amorti.

Oscillations amorties du pendule

- Régime pseudo-périodique.
- Amortissement et frottement visqueux.
- Evolution temporelle des oscillations amorties :

$$\theta(t) = \theta_0 \exp\left(-\frac{\delta t}{\tau}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right)$$

- Période des oscillations : $\tau = 2\pi \sqrt{\frac{J}{C}}$
- Décrément logarithmique :

$$\delta = f(\eta, \rho, h, r_i, \tau, J)$$



➤ Accès à la viscosité dynamique.

Journée de perspectives sur les liquides hautes températures - 29/11/24 - IGP

env. 3000°C

02/12/2024

11

AVEC contact

Creuset

Capillaire

**Goutte posée, goutte pendante,
goutte sessile, goutte
rebondissante**

Calorimètre à chute

LNE

Pince motorisée

Capacité thermique
env. 3000°C
Métaux et céramiques

Chambre intermédiaire

Dispositif d'étalonnage in-situ

Calorimètre

Drop Thermogram

Crédit: LNE - Refat Razouk

The diagram illustrates a falling calorimeter setup. At the top, a motorized gripper (Pince motorisée) holds a sample within a crucible (Creuset) inside a furnace (Capacité thermique) maintained at approximately 3000°C. The sample falls through an intermediate chamber (Chambre intermédiaire) into a calorimeter (Calorimètre). An in-situ calibration device (Dispositif d'étalonnage in-situ) is also shown. A Drop Thermogram graph plots Energy (ENJ) on the y-axis (0.000 to 0.030) against Time (s) on the x-axis (0 to 6000), showing a characteristic peak that decays over time.

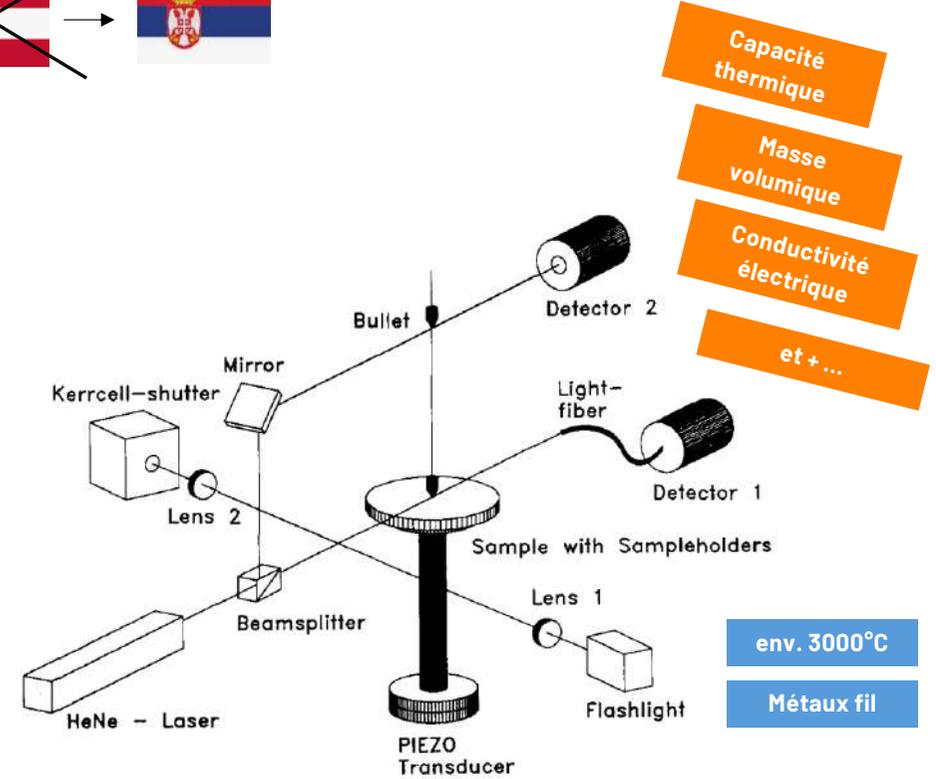
Inclassables

Pulse ohmique

Film mince

Ex manip de G. Pottlacher (TU Graz) → Nenad Milošević (institut VINCA - Serbia)

Pulse ohmique



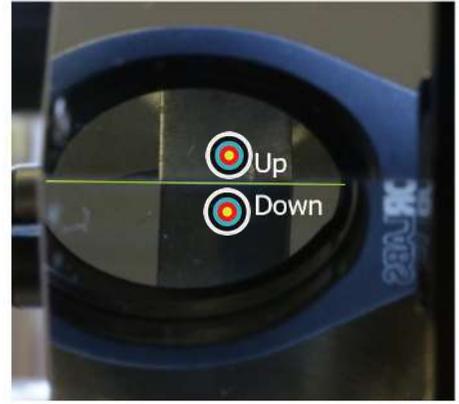
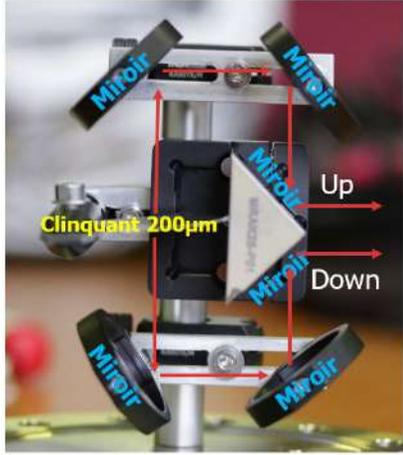
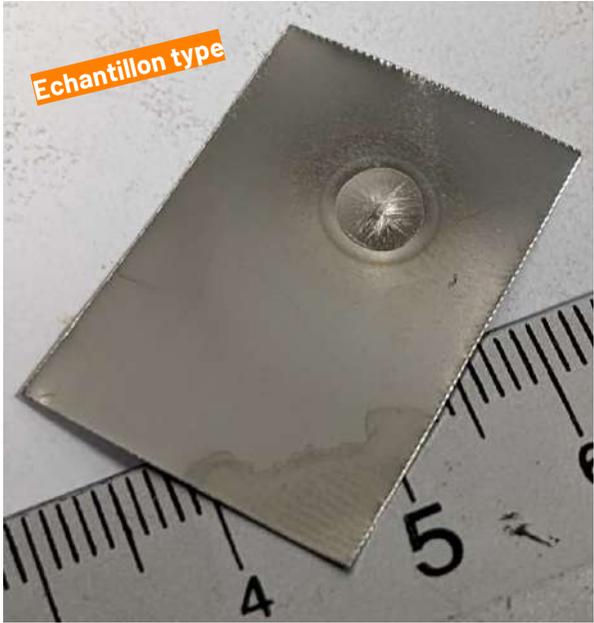
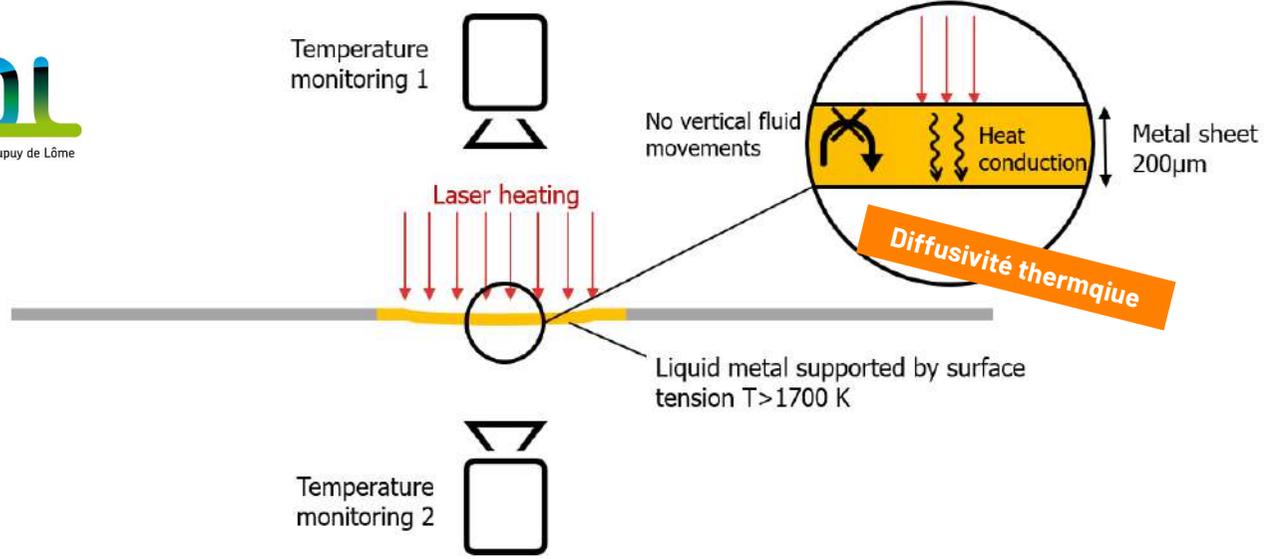
Inclassables

Pulse ohmique

Film mince

env. 3000°C

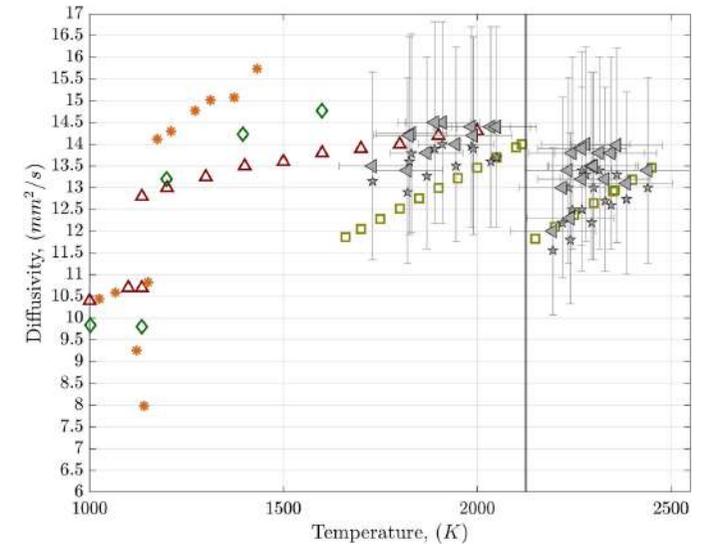
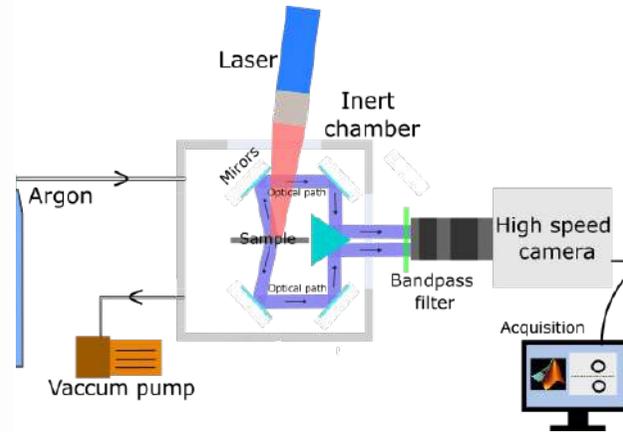
Métaux



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



Diffusivité thermique



- Mesure radiative température via caméra rapide
- Températures élevées possibles, non pollution par « creuset froid »
- Premières mesures sur du Zr liquide

Thermal Diffusivity of Solid and Liquid 304 Stainless Steel, Iron, and Zirconium
J Houssein, T Pierre, M Courtois, M Carin **International Journal of Thermophysics** 45 (9), 127 (2024)

A novel apparatus dedicated to the estimation of the thermal diffusivity of metals at high temperature
J Houssein, T Pierre, M Courtois, G Le Goic, M Carin **International Journal of Thermal Sciences** 191, 108359 (2023)

SANS contact

Léviton électromagnétique

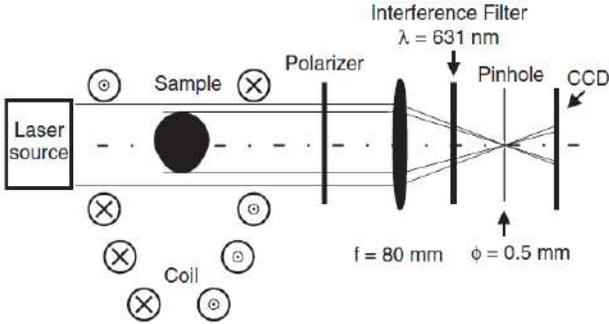
Léviton électrostatique

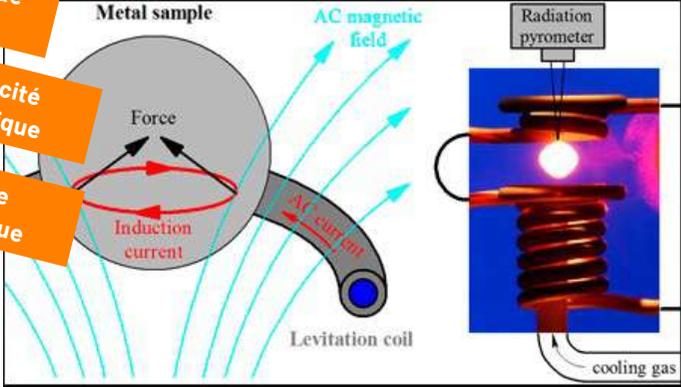
Léviton acoustique

Léviton aérodynamique

Léviton électromagnétique 

Léviton électromagnétique (Egry, 2002)





Source: DLR Space Administration

Tension de surface

Capacité thermique

Masse volumique



 **TU Graz**

env. 2500°C

Métaux uniquement



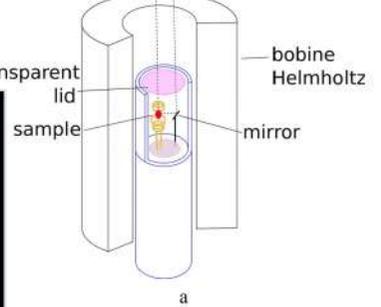
Tension de surface

Masse volumique

 **SIMaP** 







Capacité thermique ?

SANS contact

Lévitation électromagnétique

Lévitation électrostatique

Lévitation acoustique

Lévitation aérodynamique

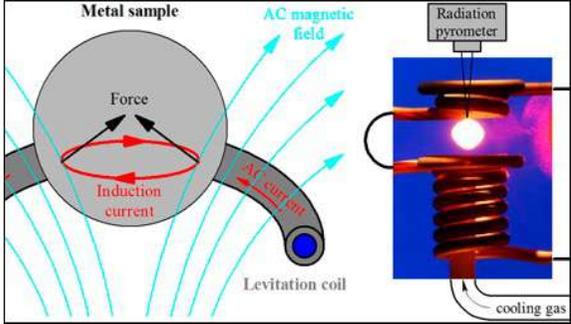
Lévitation électromagnétique



ISS



EML facility, source Airbus Defence and Space



Source: DLR Space Administration

Tension de surface

Diffusivité thermique

Capacité thermique

Masse volumique

Viscosité

env. 2500°C

Métaux uniquement

ZeroG

TEMPUS (plane) / MAXUS (rocket)

SANS contact

Léviton électrostatique



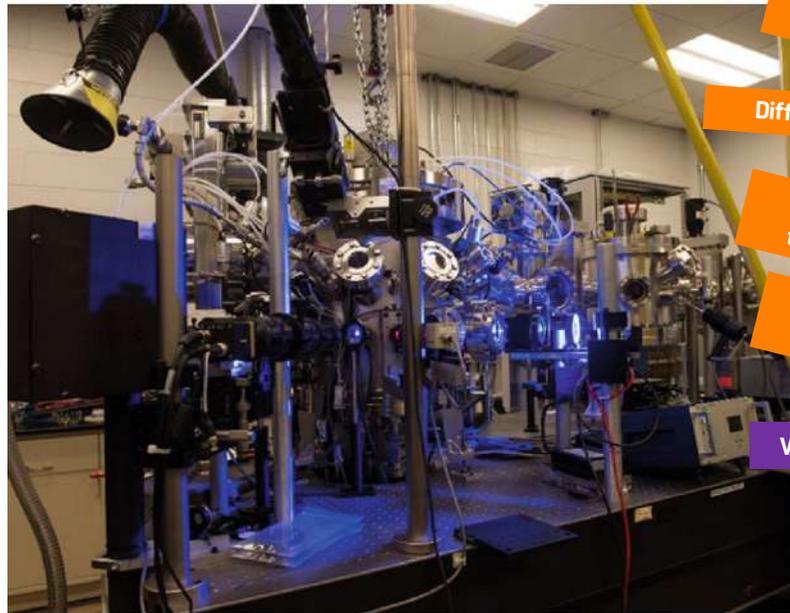
Watanabe 2019

Léviton électromagnétique

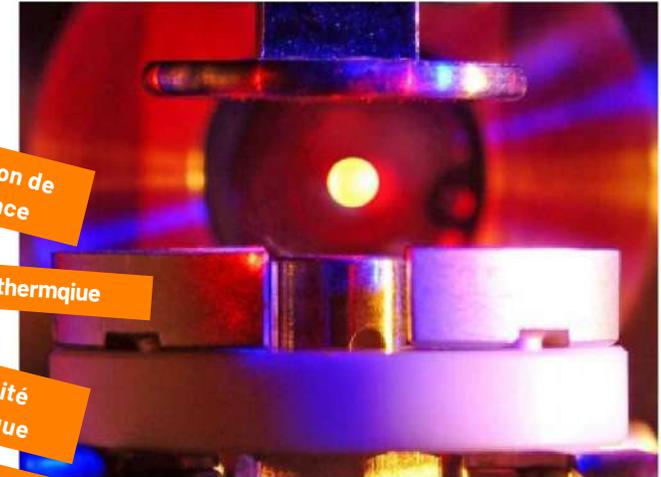
Léviton électrostatique

Léviton acoustique

Léviton aérodynamique



NASA MSFC ESL lab's main levitation chamber



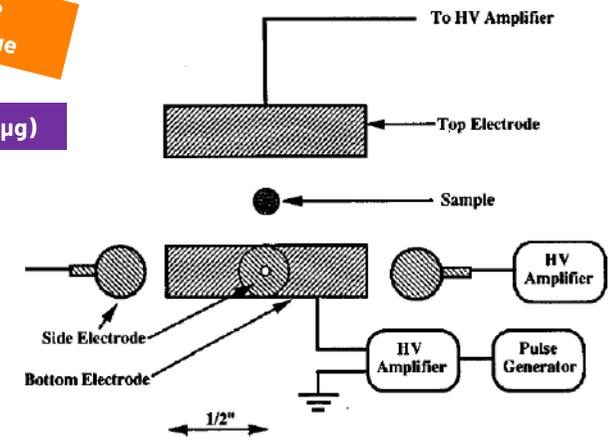
Tension de surface

Diffusivité thermique

Capacité thermique

Masse volumique

Viscosité (μg)



Léviton électrostatique (Rhim, 1999)

env. 2500°C

Métaux et céramiques

JAXA:



SANS contact

Lévitation aérodynamique

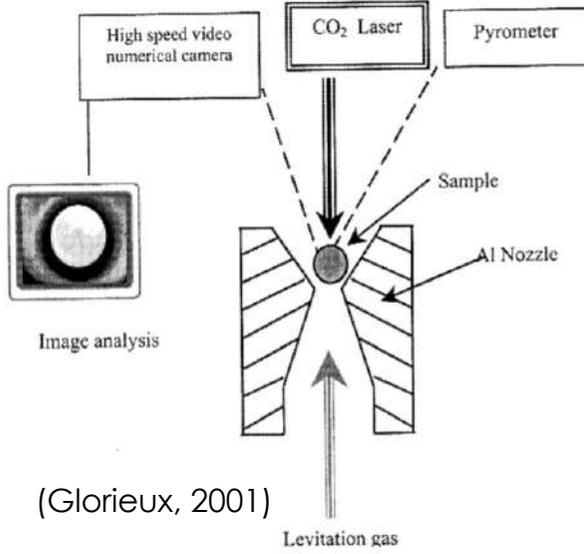


Lévitation électromagnétique

Lévitation électrostatique

Lévitation acoustique

Lévitation aérodynamique



(Glorieux, 2001)

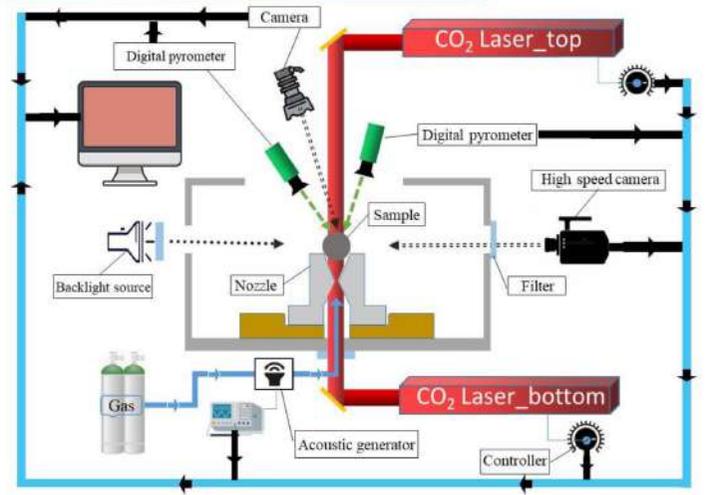
env. 3000°C

Métaux et céramiques

Viscosité
Masse volumique
Tension de surface



Lévitation aérodynamique

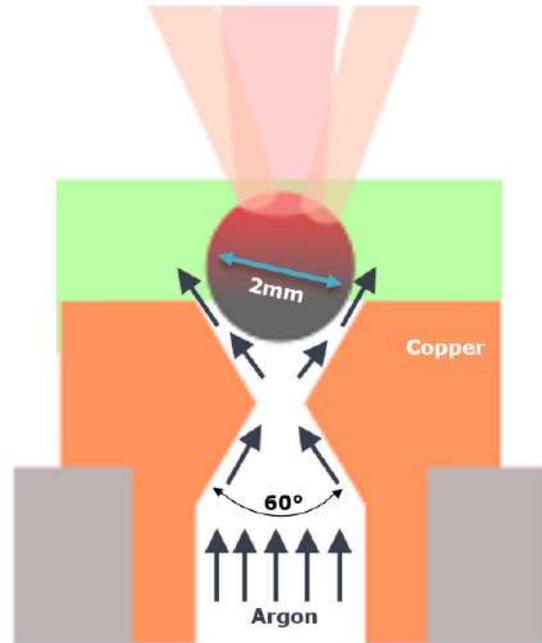
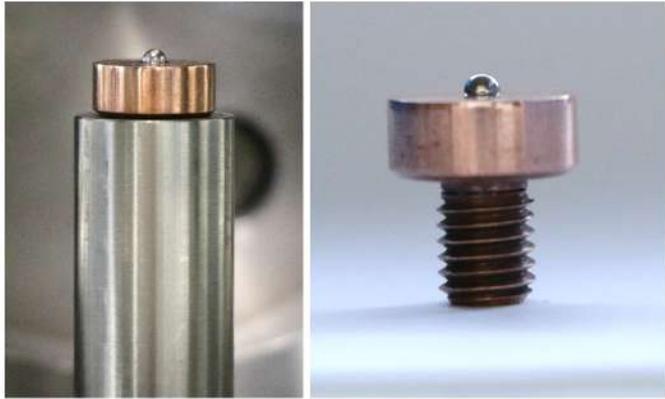


Lévitaiton
aérodynamique



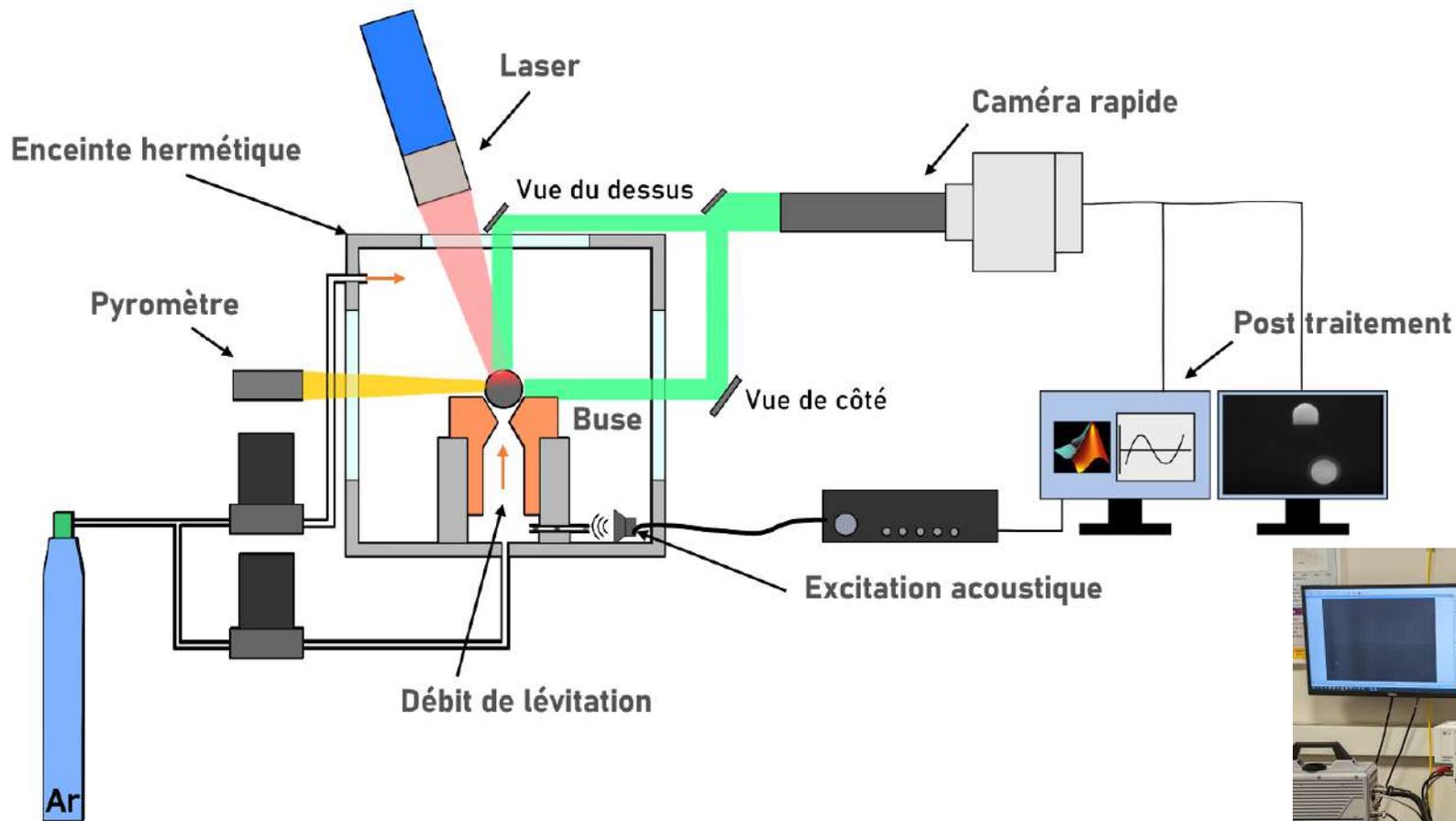
env. 3000°C

Métaux et
céramiques

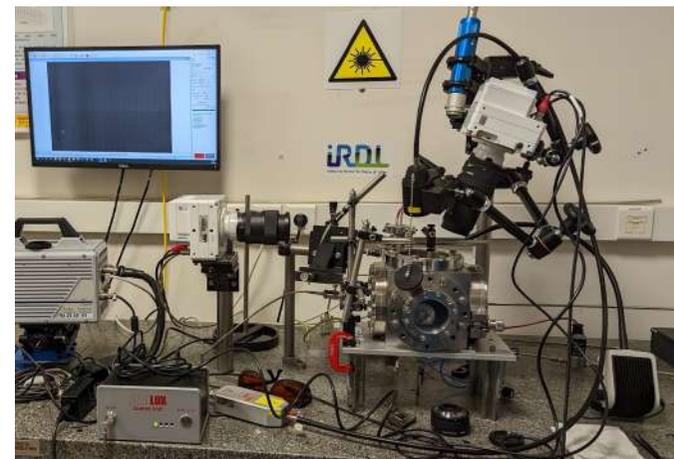


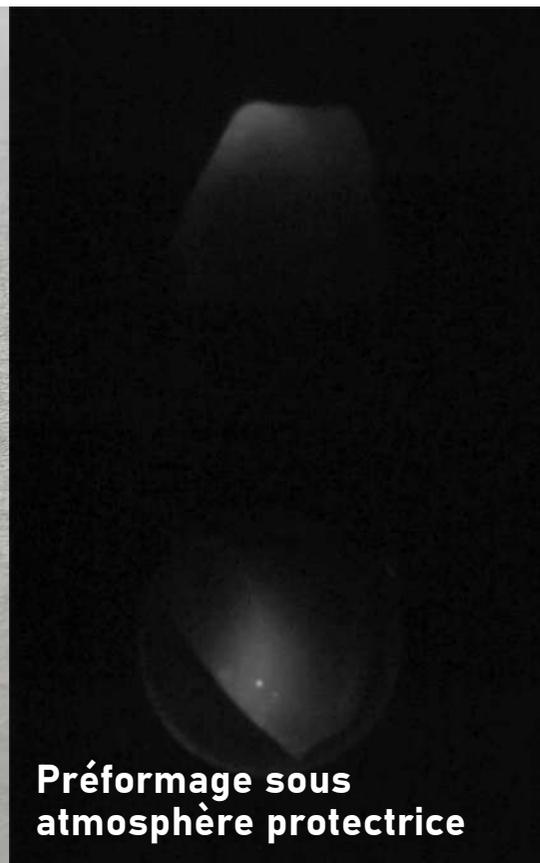
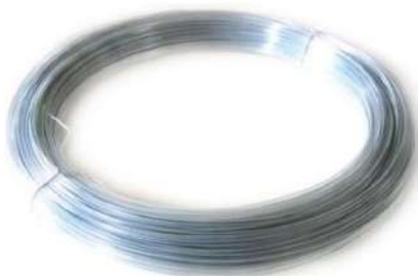
- No contact
- No pollution
- High temperatures
(+ 3000°C)
- Liquids with high surface tension

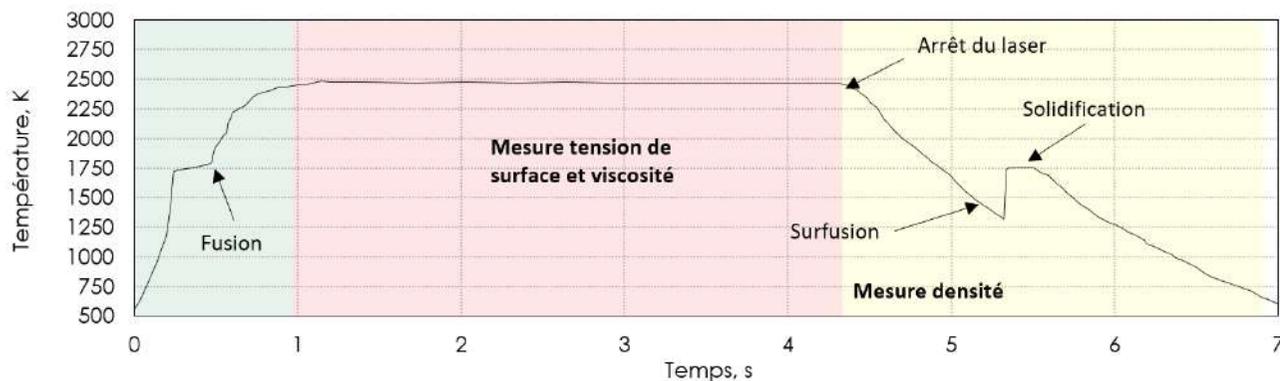
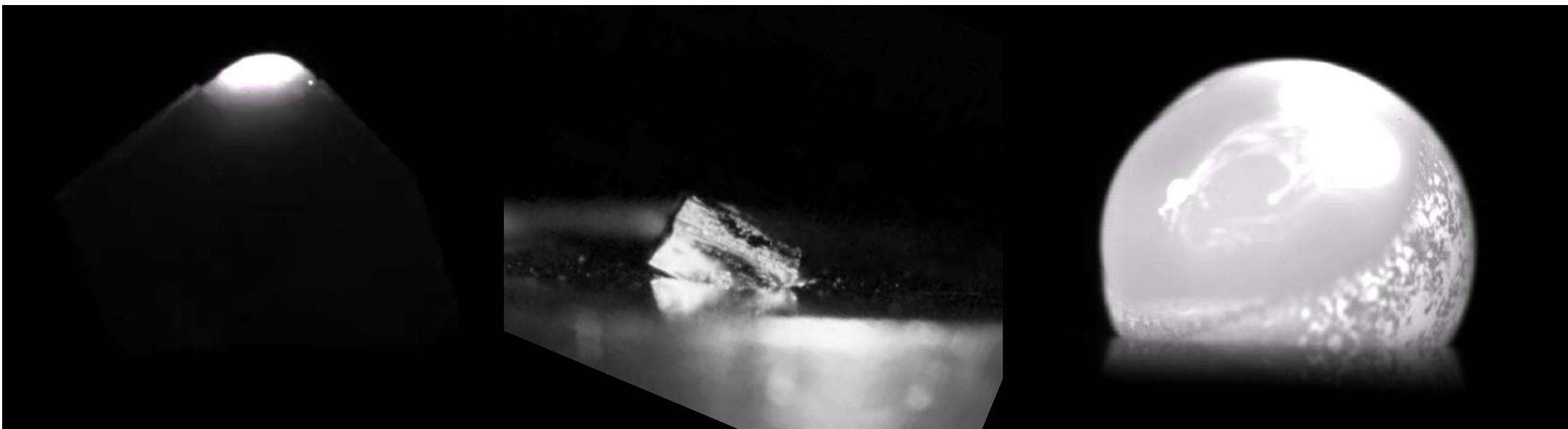
Advantages	Drawbacks
<ul style="list-style-type: none"> • Heating decoupled from the levitation • No sample deformations due to levitation forces • Short experiments (<10s) 	<ul style="list-style-type: none"> • No complete visualization of the sample • Hazardeous rotation of the sample • External force on the sample



- No contact
- No pollution
- High temperatures
(+ 3000°C)







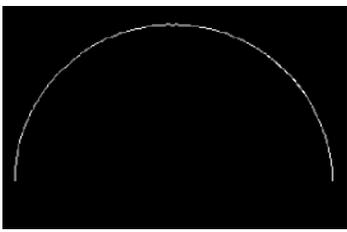
- Plage utile : 1000°C – 3000°C
- Matériaux métalliques ou oxydes
- Temps de mesure < 10s
- Nombreuses propriétés accessibles
- Perturbation possible par évaporation

Masse volumique

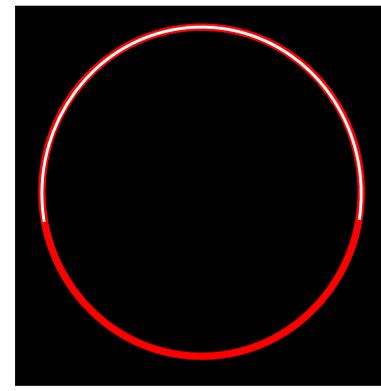
Méthodologie proche au :
Cemhti



Enregistrement à la caméra rapide à vitesse réelle (échantillon zirconium)



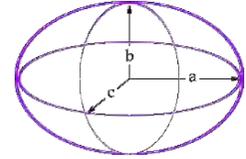
Contour visible de l'échantillon



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



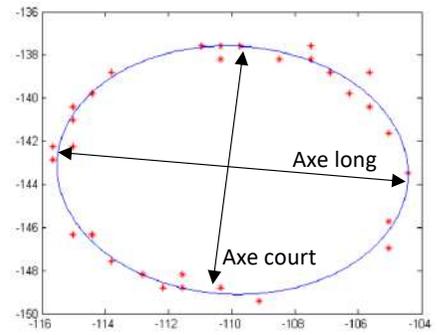
Détermination de la masse volumique



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

Hypothèse : axisymétrie, $a = c$

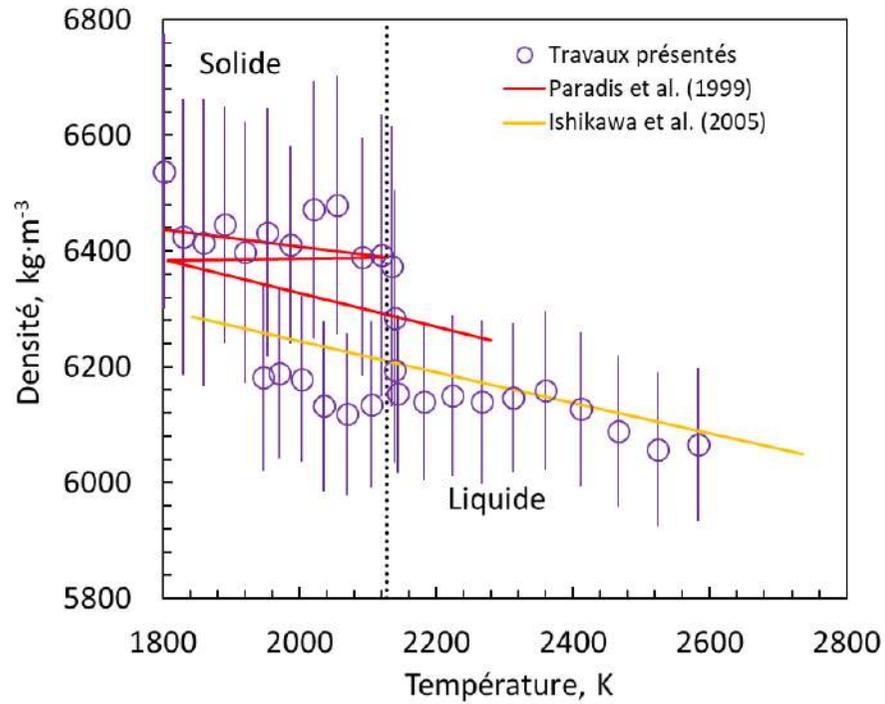
Masse volumique : $\rho = \frac{\text{masse}}{\text{volume}}$



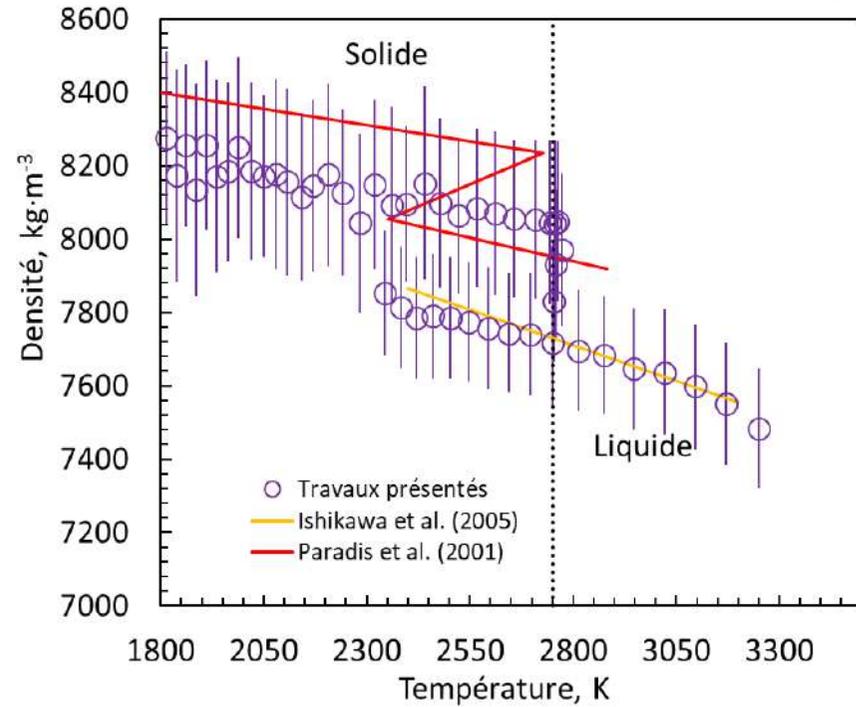
Exemple de fit ellipse à partir d'un nuage de points (Nikolai Chernov, 2009)

Exemples de résultats: **IRDIL**

Zirconium

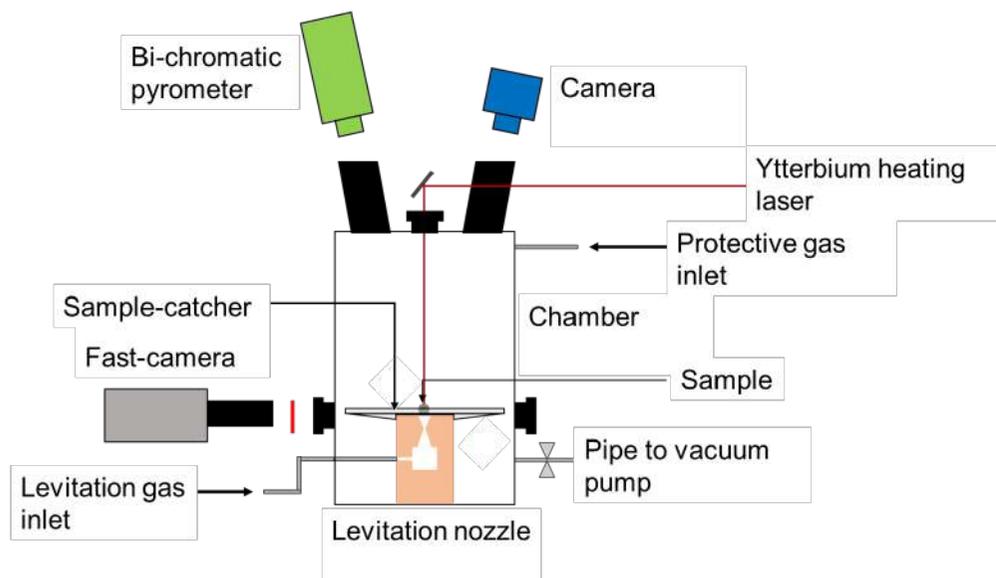
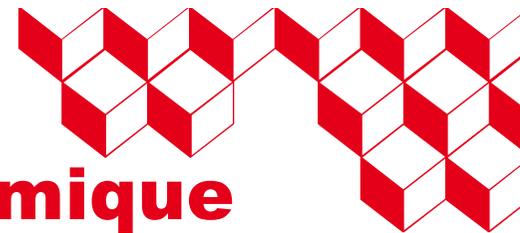


Niobium



Expérience ATTILHA

Lévitación aérodynamique et masse volumique

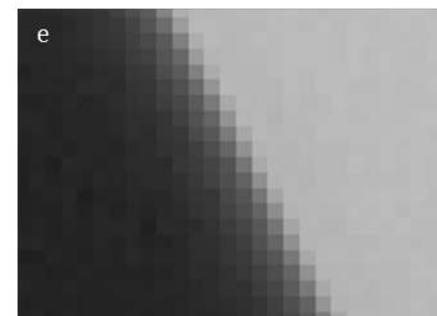


$a, b =$ radii of the ellipsoidal approximation

$$V_{droplet} = \frac{4\pi a^2 b}{3} \Rightarrow \rho_{droplet} = \frac{m_{droplet}}{V_{droplet}}$$

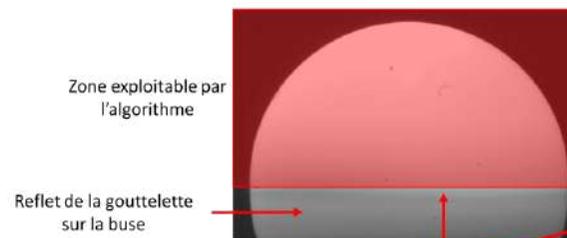


Droplet shadow



Backlighting Levitating liquid droplet

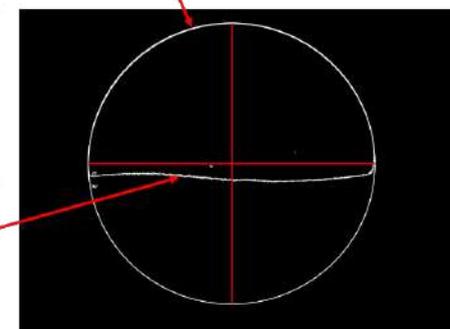
Ellipse associée au contour de la gouttelette



Zone exploitable par l'algorithme

Reflet de la gouttelette sur la buse

Front correspondant à la buse



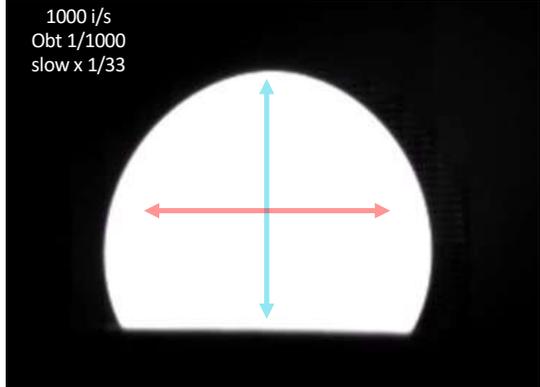
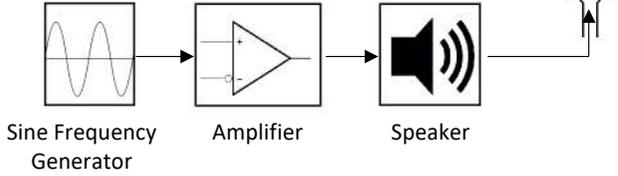
Courtoisie d'A. Quaini

➤ Accès solidus, liquidus, masse volumique.



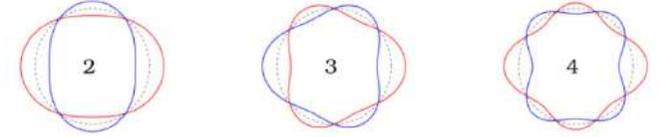
Tension de surface

Méthodologie proche au :

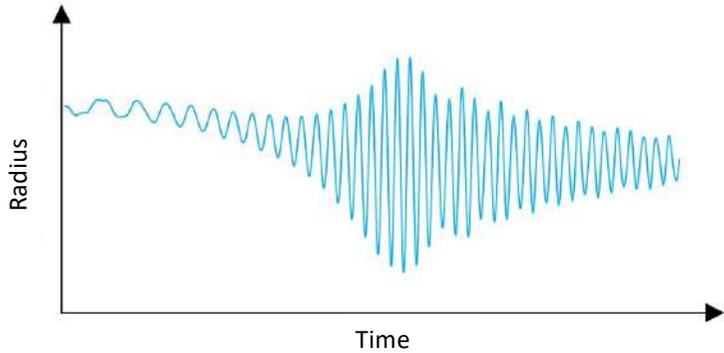


Goal: find the resonant frequency of the sample

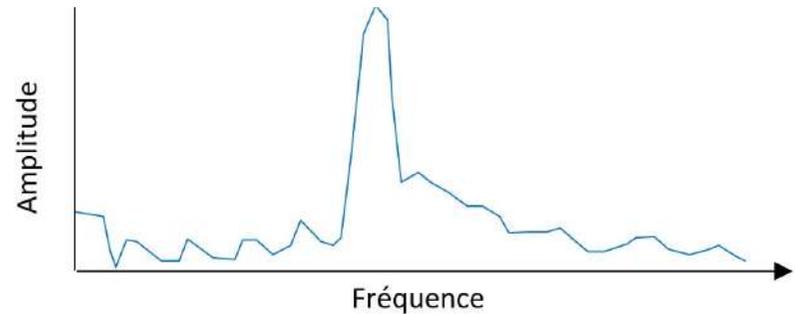
Modes d'oscillations :



Radius variation with resonance



FFT



Frequency identification ν_R

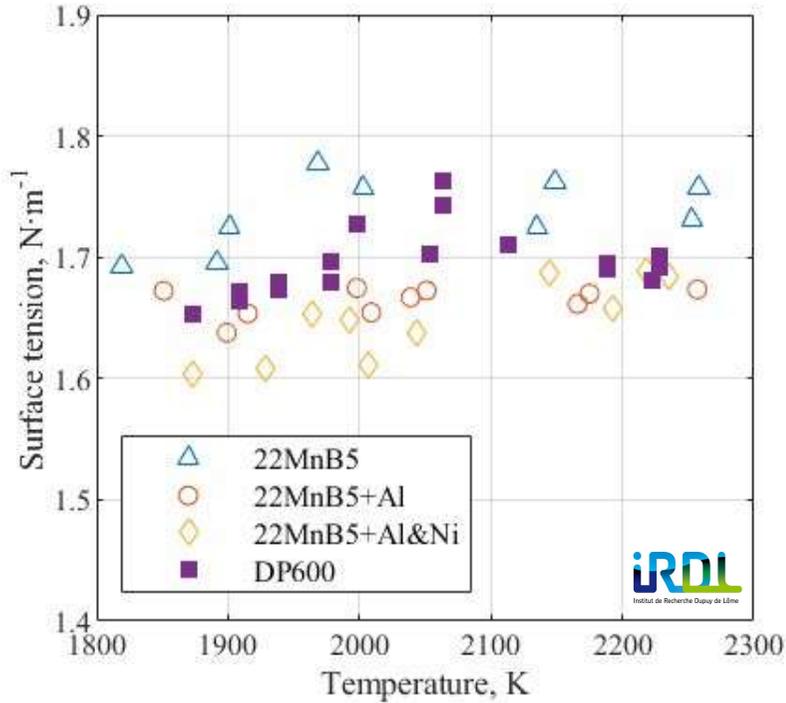
Rayleigh (1879) theory

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

γ : surface tension
 ν_R : Resonant frequency
 m : Sample mass

Tension de surface

Steels up to 2300 K



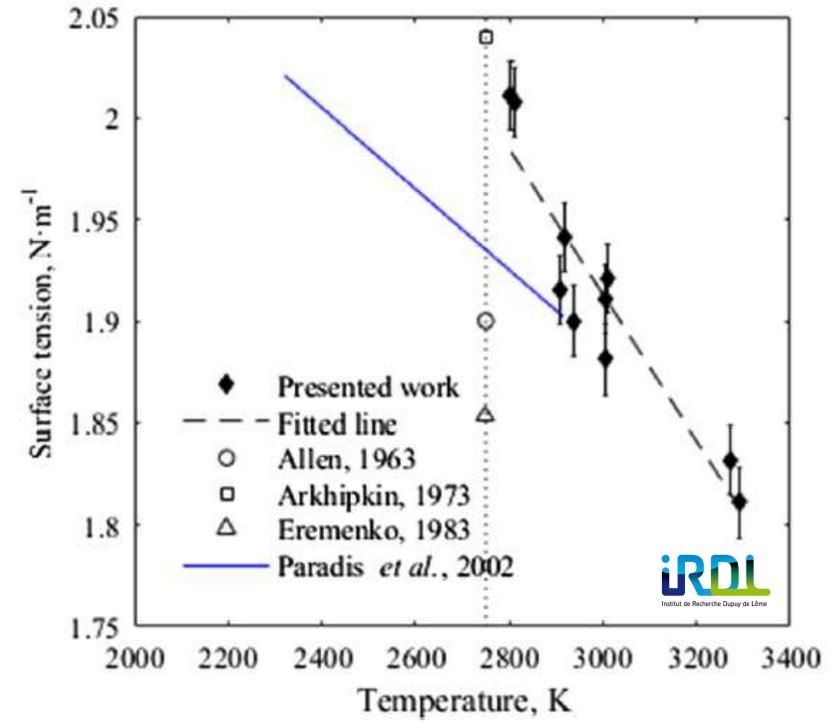
Surface tension measurements of liquid pure iron and 304L stainless steel under different gas mixtures
V Klaczynski, D Le Maux, M Courtois, E Bertrand, P Paillard **Journal of Molecular Liquids** 350, 118558 (2022)

Surface tension of liquid Fe, Nb and 304L SS and effect of drop mass in aerodynamic levitation
D Le Maux, V Klaczynski, M Courtois, T Pierre, P Le Masson **Journal of Materials Science** 57 (25), 12094-12106 (2022)

Sub-second Surface Tension Measurement of Steels Containing Manganese in Aerodynamic Levitation
Dylan Le Maux, Mickaël Courtois, Sadok Gaied & Thomas Pierre, **International Journal of Thermophysics** Volume 45, 162, (2024)



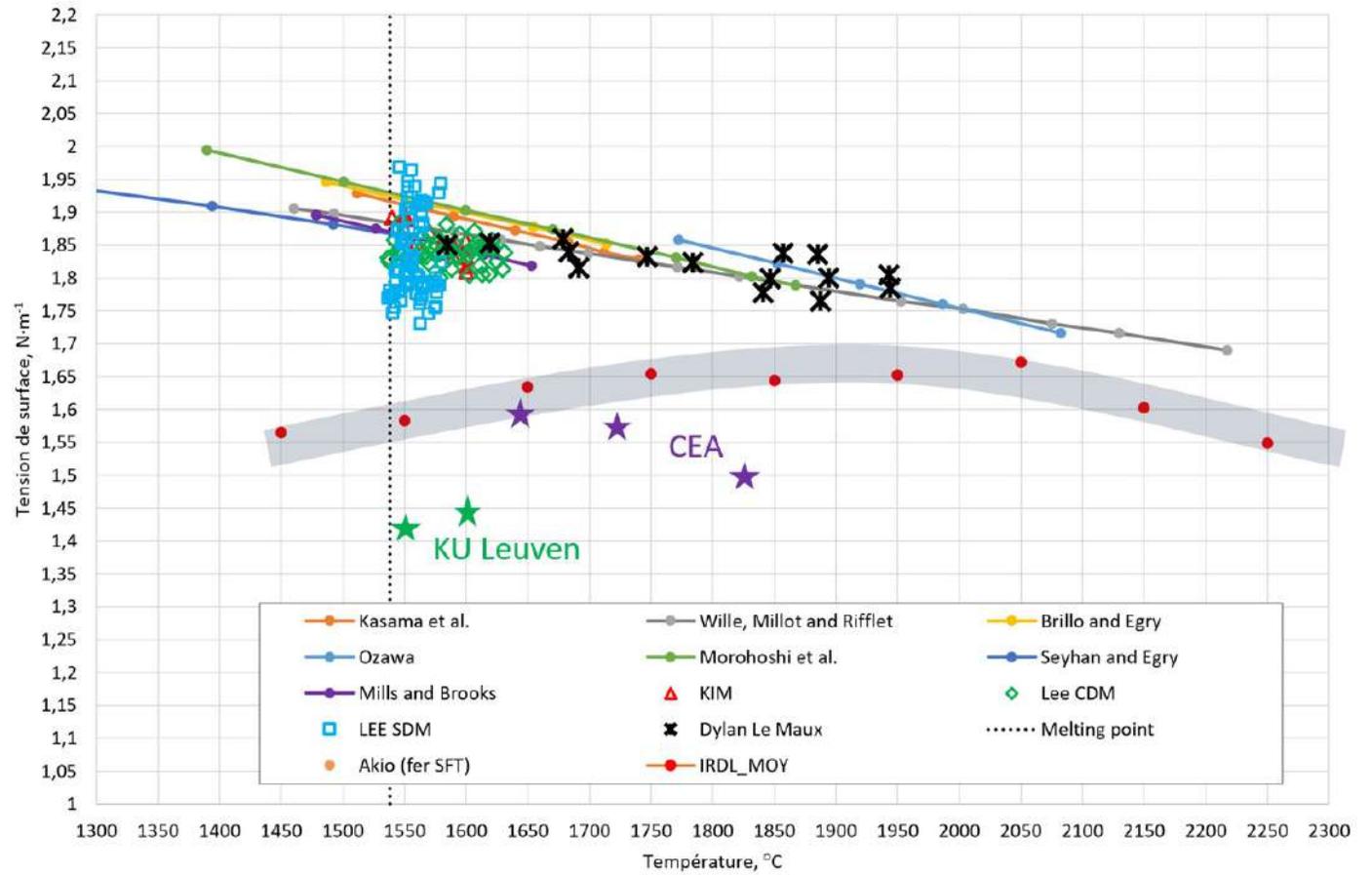
Niobium up to 3300 K



Tension de surface

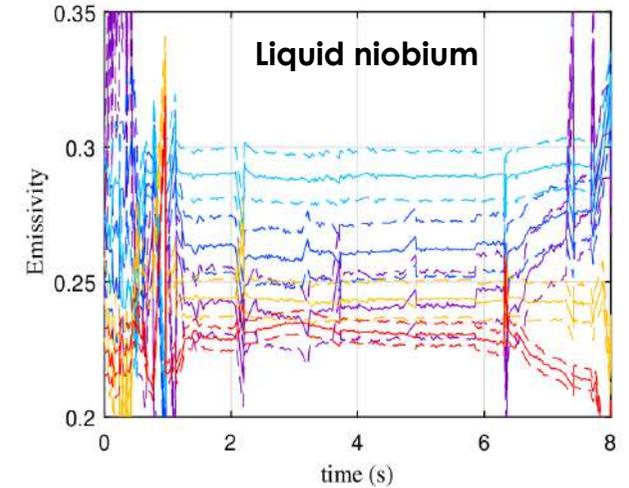
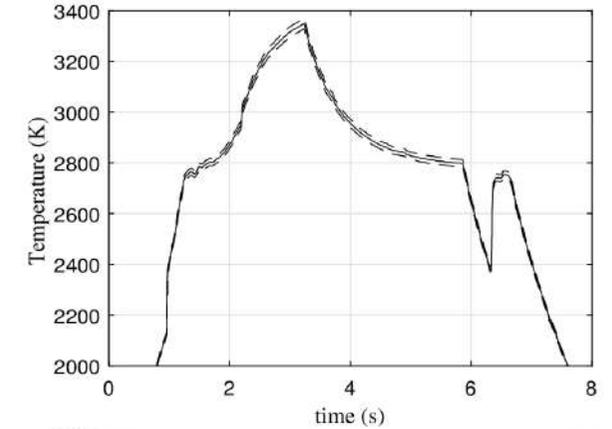
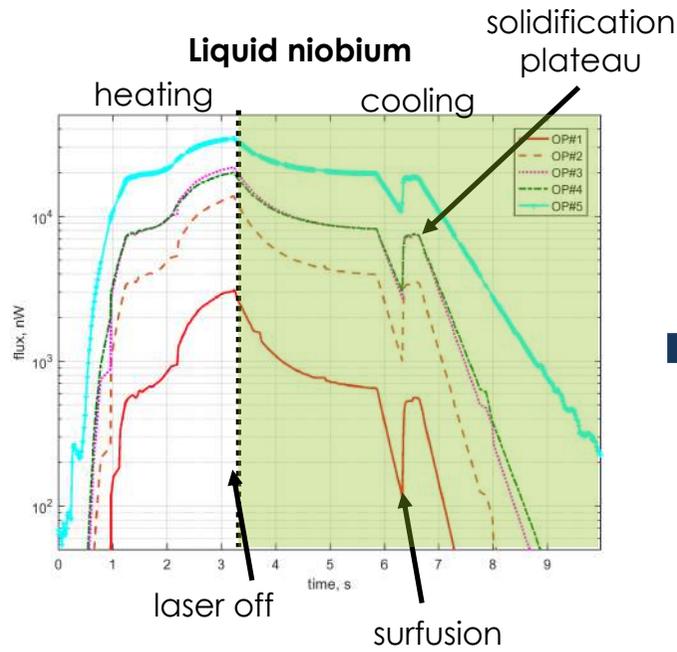
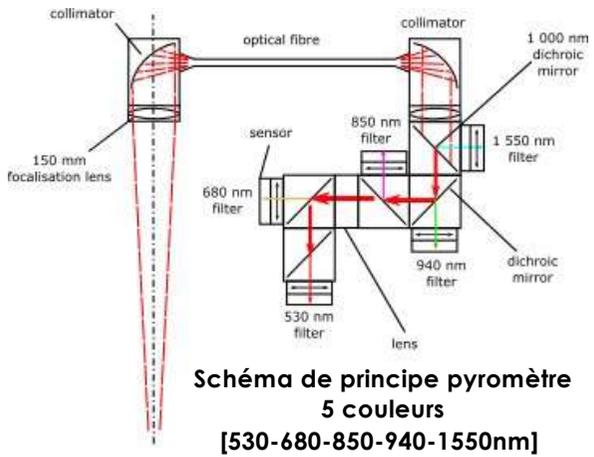


Fer 99,8% [1450 °C – 2300°C]



Assez grande disparité d'où l'intérêt du benchmark !

Emissivité



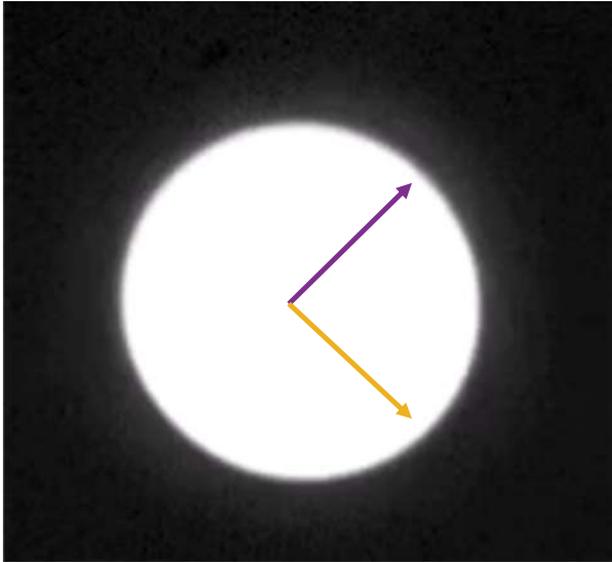
Estimation simultanée de la température et des émissivités. Plage [500-4000°C]

Viscosité

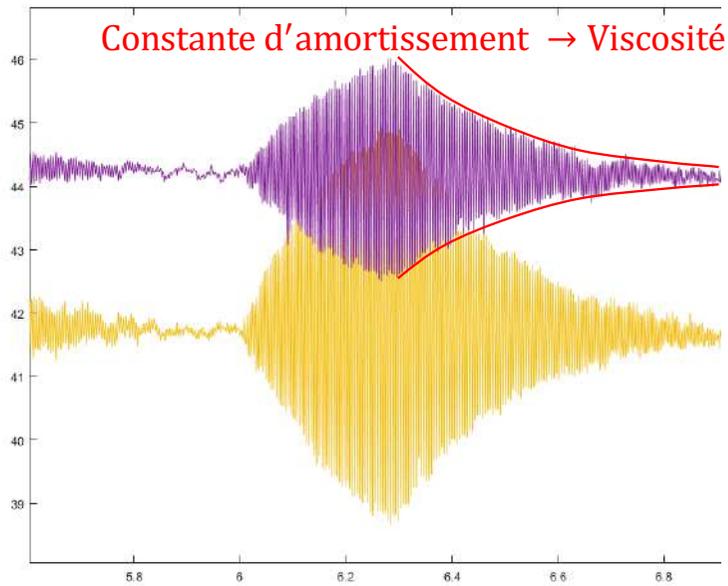
Méthodologie appliquée au :



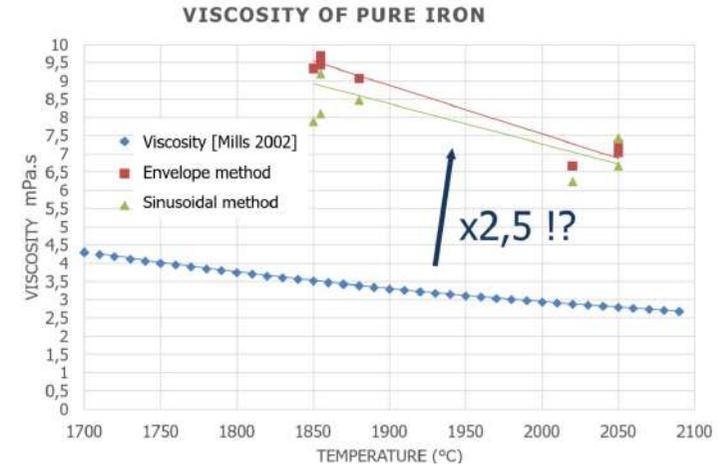
Expérience:



Estimation:



Ok sur liquides si $\mu > 30 \text{ Pa.s}$



La viscosité selon la formule de Lamb:

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

Ne fonctionne pas sur les métaux !!



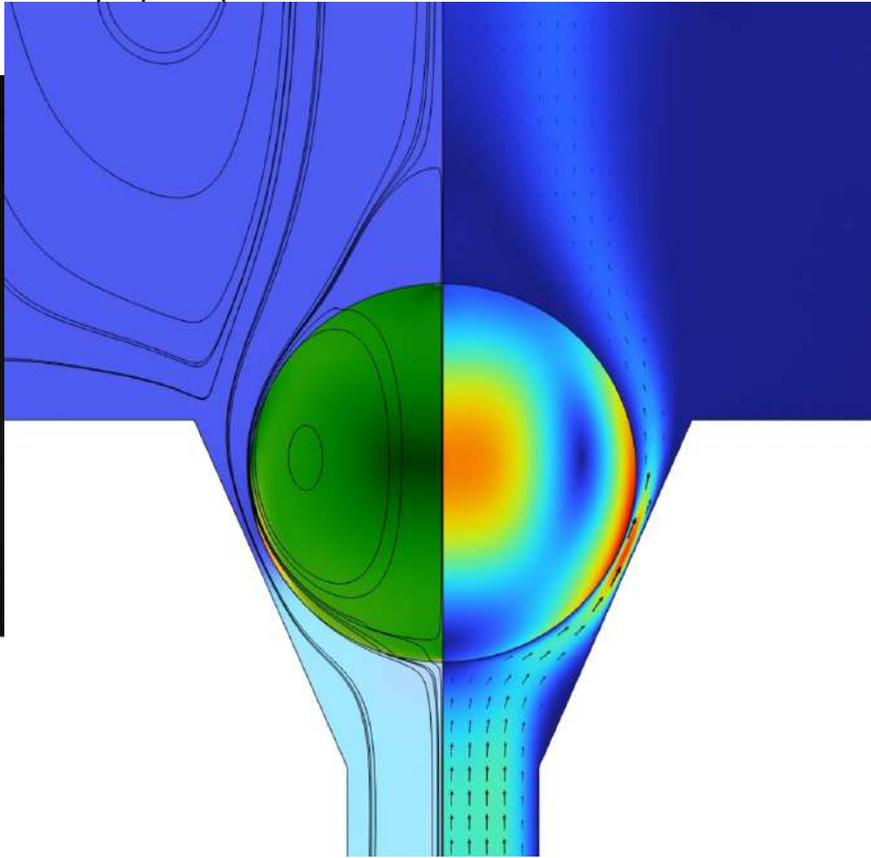
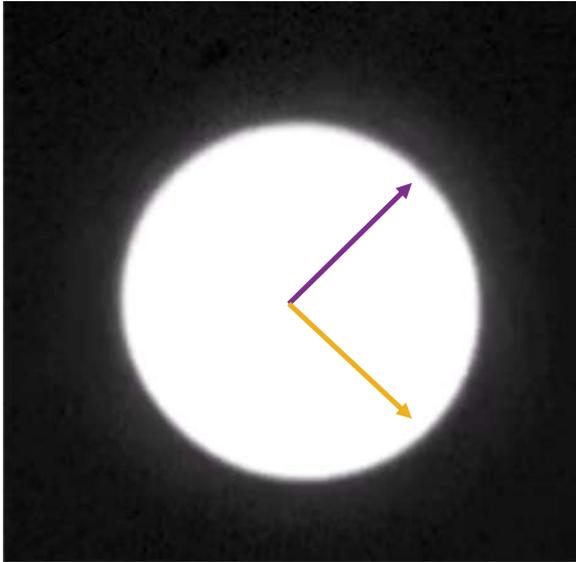
➡ Effet de la gravité

Viscosité

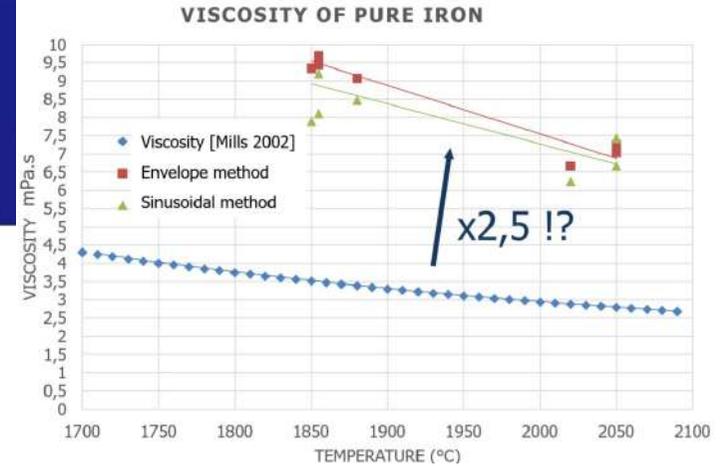
Méthodologie appliquée au :



Expérience:



Ok sur liquides si $\mu \gg 30 \text{ Pa.s}$



Ne fonctionne pas sur les métaux !!

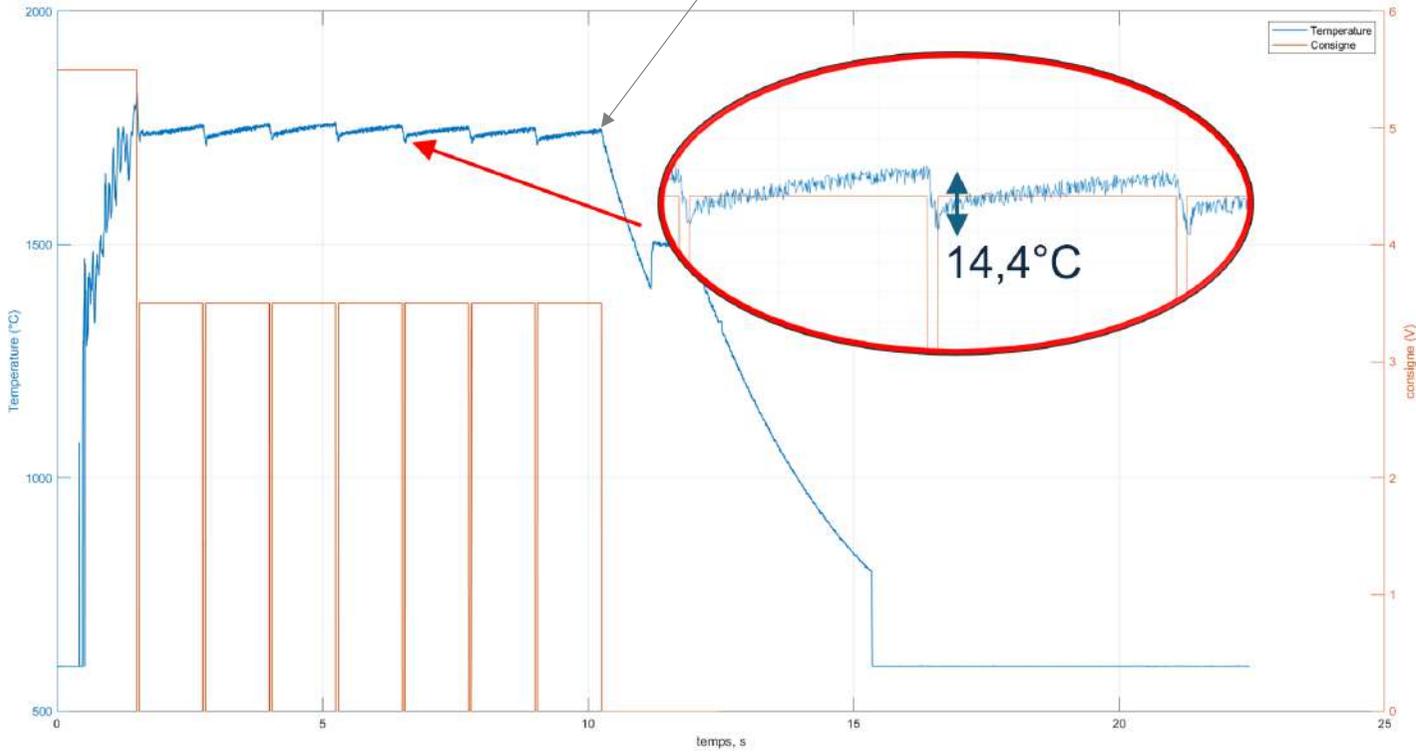


➡ Effet de la gravité

Capacité thermique

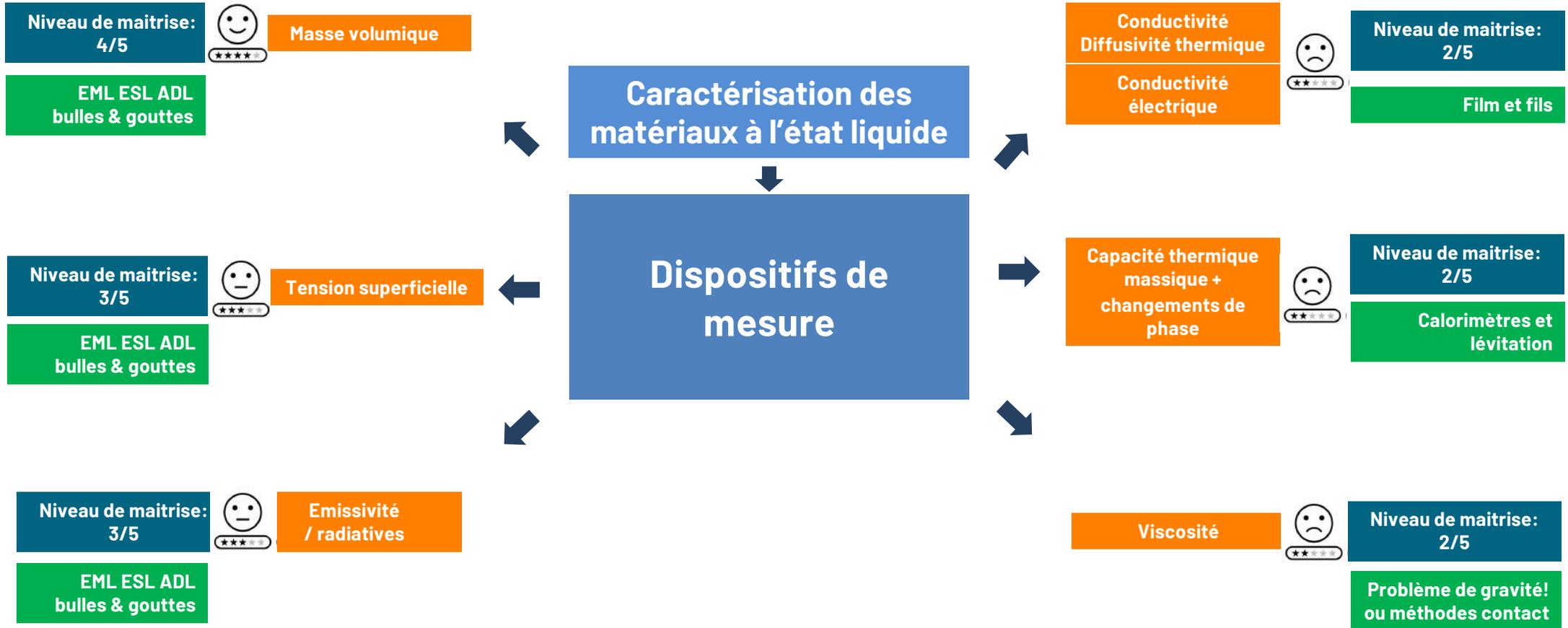
Maitrise de l'évaporation

Avec l'hypothèse de corps mince: $\rho c_p V \frac{dT}{dt} = \alpha k P_{laser} - P_{pertes}$



Dispositif haute pression:
(ANR-23-CE08-0004 - CaraMeLL)







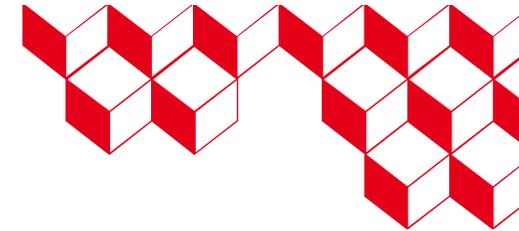
Journée de prospective sur la physicochimie
des liquides à Haute Température
29 novembre 2024 - IPGP

2

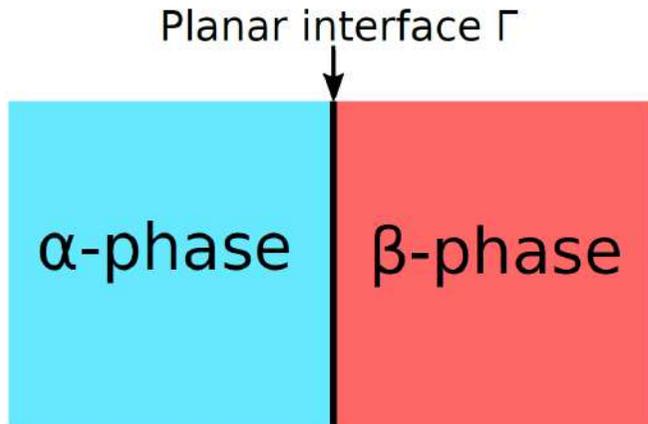
Modélisation des grandeurs thermophysiques par approche Calphad et simulations atomistiques

...parce qu'on ne peut pas tout mesurer.

Modélisation de la tension de surface par approche Calphad



Formalisme de Butler



Interface modelling in Gibbs approach.

- 1ère forme [1]:

- Système thermodynamique à pression p , température T , 2 phases volumiques stables α et β , et une phase planaire interfaciale Γ , compositions $\mathbf{x}_{(\alpha,\beta,\Gamma)}$.
 - Chaque phase est reliée à l'énergie libre de Gibbs $G_{(\alpha,\beta,\Gamma)}$. Equilibre: $G \rightarrow \min G$.
 - Phases α, β : potentiel chimique de n_i moles de i $\mu_{i,(\alpha,\beta)} = \frac{\partial G_{(\alpha,\beta)}}{\partial n_i}$.
 - Interface Γ : **tension de surface** $\sigma_{i,\Gamma}$ = énergie de surface en-excès liée la description planaire, potentiel chimique de $n_{i,\Gamma}$ moles de i : $\mu_{i,\Gamma} = \mu_{i,\Gamma}^* - \omega_{i,\Gamma}\sigma_{i,\Gamma}$, $\mu_{i,\Gamma}^* = \frac{\partial G_\Gamma}{\partial n_{i,\Gamma}}$ = potentiel chimique réduit et $\omega_{i,\Gamma}$ = surface molaire partielle de i dans Γ .
- **A l'équilibre**, $\mu_{i,(\alpha,\beta)} = \mu_{i,\Gamma} \rightarrow \sigma_{i,\Gamma} = (\mu_{i,\Gamma}^* - \mu_j)/\omega_{i,\Gamma}$ (**1ère forme**).

- 2ème forme [2]:

- Potentiels chimiques réécrits $\mu_{i,(\alpha,\beta,\Gamma)} = \mu_{i,(\alpha,\beta,\Gamma)}^0 + RT \ln(x_{i,(\alpha,\beta,\Gamma)}) + \Delta G_{i,(\alpha,\beta,\Gamma)}^E(\mathbf{x}_{(\alpha,\beta,\Gamma)})$ = corps pur + entropie + excès.
- Phase α = liquide, phase β = gaz. $\Delta G_{i,\Gamma}^E(\mathbf{x}_\Gamma) = k_\Gamma \Delta G_{i,\alpha}^E(\mathbf{x}_\Gamma)$, $k_\Gamma = \frac{Z_\Gamma}{Z_\alpha} \in [0; 1]$ est le ratio des nombres de coordinence (moins liaison à l'interface).
- **2ème équation de Butler**: $\sigma_{i,\Gamma} = (1/\omega_{i,\Gamma}) \cdot \left[k_\Gamma \mu_{i,\alpha}^*(\mathbf{x}_\Gamma) - \mu_{i,\alpha} + (1 - k_\Gamma) (\mu_{i,\alpha}^0 - RT \ln(x_{i,\Gamma})) + \omega_{i,\Gamma} \sigma_{i,\Gamma}^0 \right]$.
- **Minimisation : Calphad + BDD nucléaires pour résoudre \mathbf{x}_Γ tel que $\sigma_{i,\Gamma} = \sigma_{j,\Gamma} = \sigma$ pour chaque constituant.**

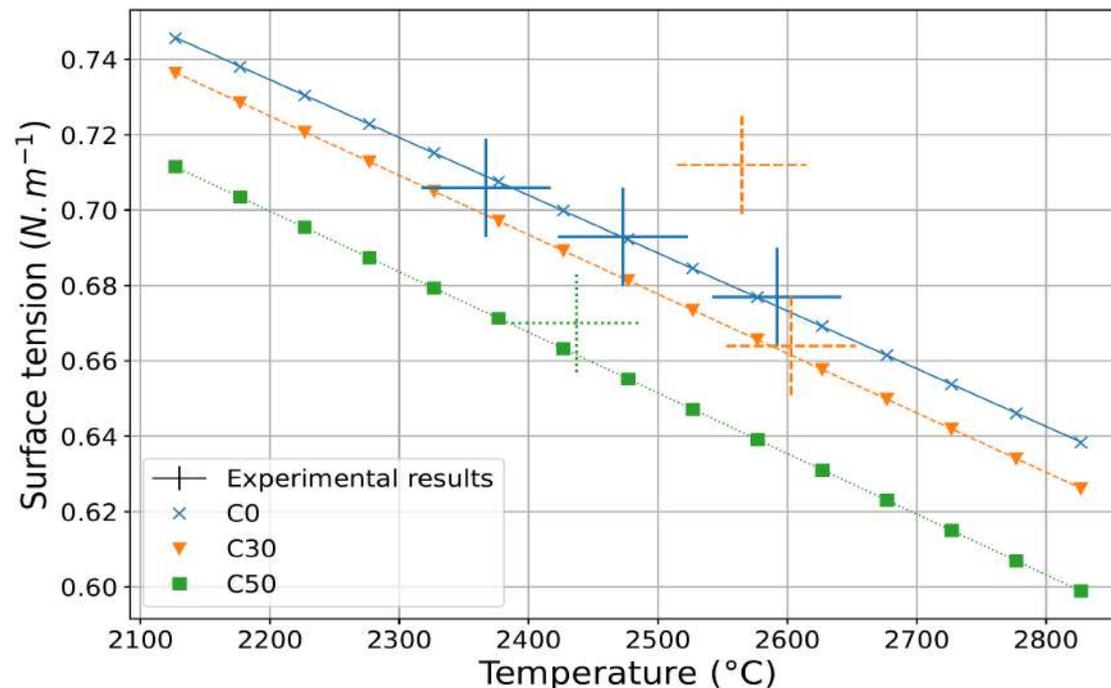


[1] J. Butler and J. Kendall. "The thermodynamics of the surfaces of solutions". *Proc. of the Royal Society of London, series A*, pp. 348–375, 1932.
 [2] G. Kaptay, "Improved Derivation of the Butler Equations for Surface Tension of Solutions, *Langmuir*, pp. 10987–10992, 2019.

Courtoisie de R. Le Tellier et A. Tourneix

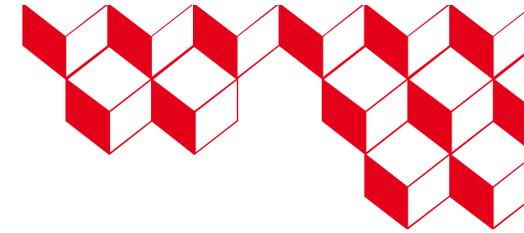
Modélisation de la tension de surface par approche Calphad

Premiers résultats



Surface tension of in-vessel corium compositions, as predicted with Butler formalism, compared to experimental results.

- **Le formalisme de Butler couplé à l'approche Calphad peut reproduire les mesures.**
- **Capacités prédictives largement entravées par l'incertitude sur l'énergie libre à l'état liquide.**
- **L'état des BDD corium doit être amélioré.**

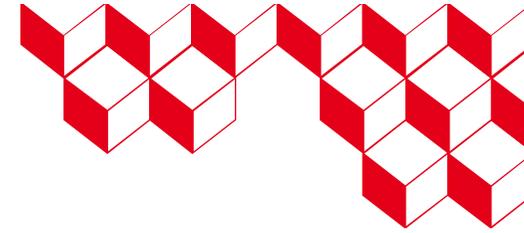


- Compositions RBNEW_C0, RBNEW_C30, RBNEW_C50 (corium en cuve).
- NUCLEA BDD [1].
- Accord satisfaisant: σ décroît quand T & taux d'oxydation s'élèvent.
- Valeur convergée $k_{\Gamma} = 0.999$, très proche de 1. En comparaison, Tanaka [2] considère $k_{\Gamma} = 0.94$. A investiguer.

[1] Bertrand Cheynet. "NUCLEA". July 2007. url: <https://hal.science/hal-00165418>.

[2] T. Tanaka et al. "Application of Thermodynamic Databases to the Evaluation of Surface Tensions of Molten Alloys, Salt Mixtures and Oxide Mixtures". In: International Journal of Materials Research 87.5 (May 1, 1996).

Courtoisie de R. Le Tellier et A. Tourneix

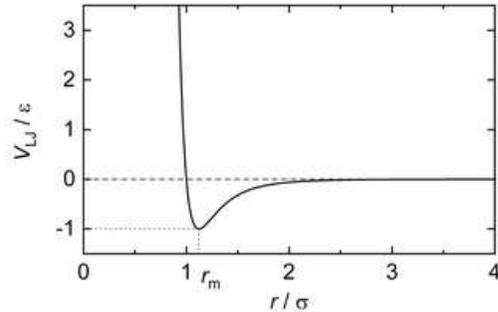
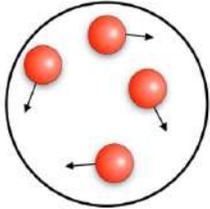


Modélisation des propriétés par DFT

Les outils

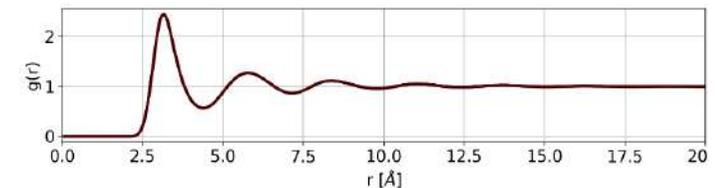
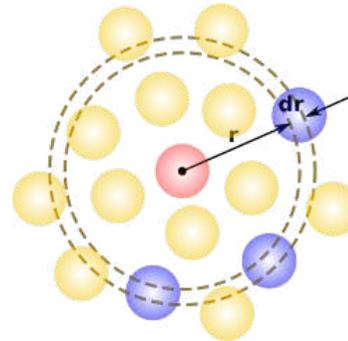
Classical molecular dynamics (MD)

Follows Newton's laws of motion from a energy potential.



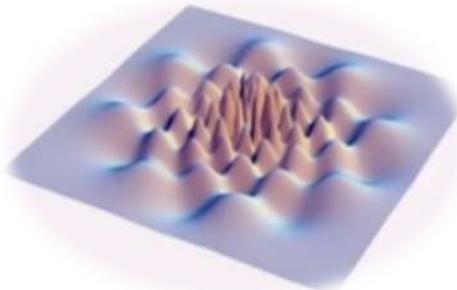
Radial distribution function g(r) (RDF)

Describes how density varies as a function of distance from a reference particle.



Density functional theory (DFT)

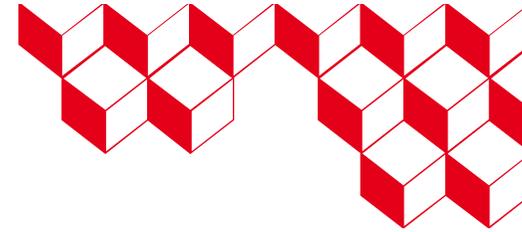
Solves Schrodinger's equation to find the wave function of the system, at its lowest energy point.



Structure factor S(Q)

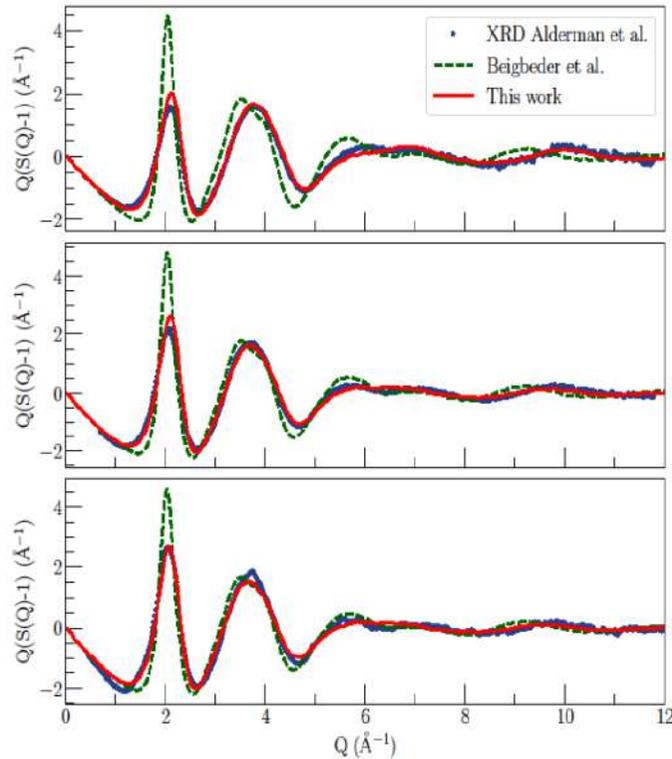
It is the Fourier transform of the RDF, comparable to XRD measurements.





Comparaison au facteur de structure

Les outils

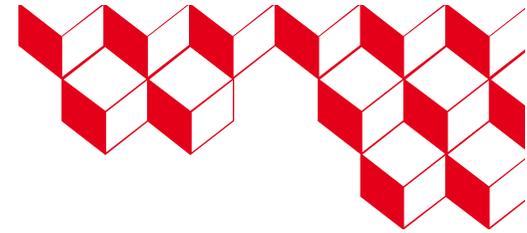


Validation du potentiel:

- Plusieurs calculs de validation effectués.
- Ici, comparaison avec des mesures XRD sur des mélanges $\text{UO}_2 - \text{ZrO}_2$.
- Trois compositions différentes à trois températures différentes: 4% d' UO_2 à 2782K, 20% d' UO_2 à 2885K, et 27% d' UO_2 à 3070K.
- Niveau de confiance suffisant, on va utiliser le potentiel en extrapolation pour calculer les propriétés thermophysiques souhaitées.

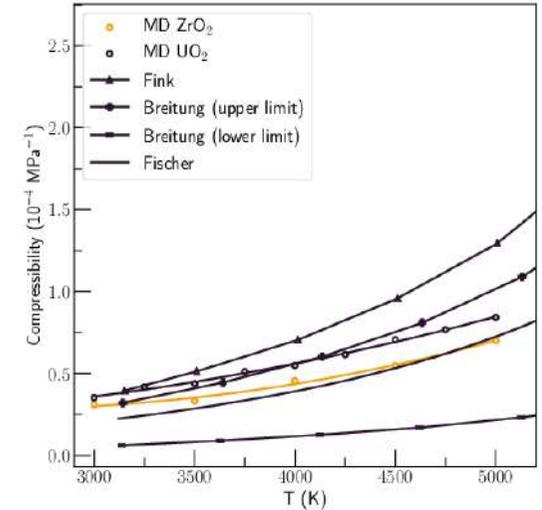
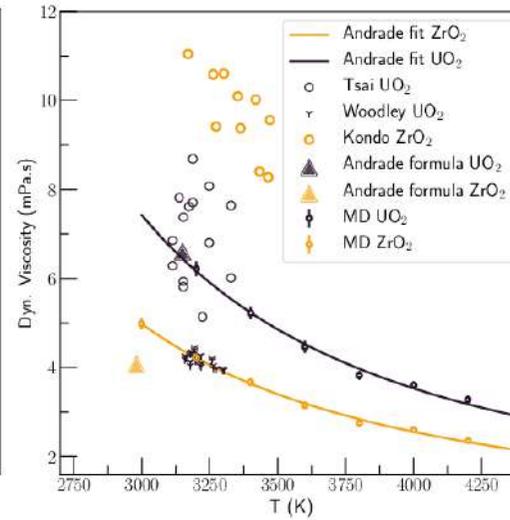
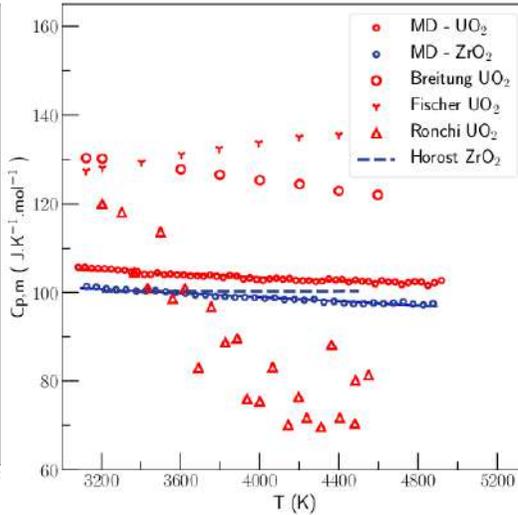
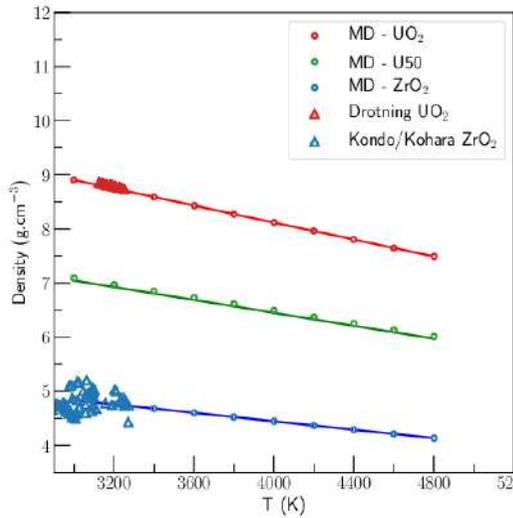
Alderman, O. L. G., Benmore, C. J., Weber, J. K. R., Skinner, L. B., Tamalonis, A. J., Sendelbach, S., ... & Williamson, M. A. (2018). Corium lavas: structure and properties of molten $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ under meltdown conditions. *Scientific reports*, 8(1), 1-10.





Premiers résultats

Calculs sur UO_2 , ZrO_2 liquide



- ▶ Excellent accord sur la densité (assez facile...).
- ▶ Des données expérimentales très incohérentes pour le Cp.

- ▶ Viscosité cohérente avec le modèle d'Andrade. Mais données expérimentales encore assez incohérentes.
- ▶ Accord satisfaisant pour la compressibilité.



Journée de prospective sur la physicochimie
des liquides à Haute Température
29 novembre 2024 - IPGP



Institut de Recherche Dupuy de Lôme

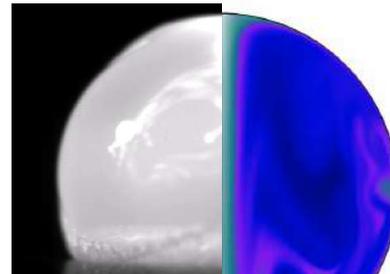


Société Française de Thermique

Groupe haute Température



Merci de votre attention



MICKAEL COURTOIS
IRDL UMR CNRS 6027
Lorient
courtois@univ-ubs.fr

JULES DELACROIX
CEA Cadarache, Bât. 219 D
13108 Saint-Paul-lez-Durance
France
jules.delacroix@cea.fr



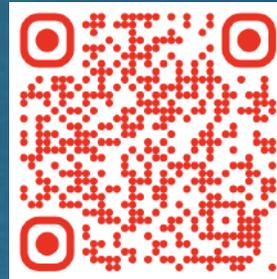
Lorient - France

June 24-26 2025

14th IWSSTP



International Workshop on SubSecond ThermoPhysics

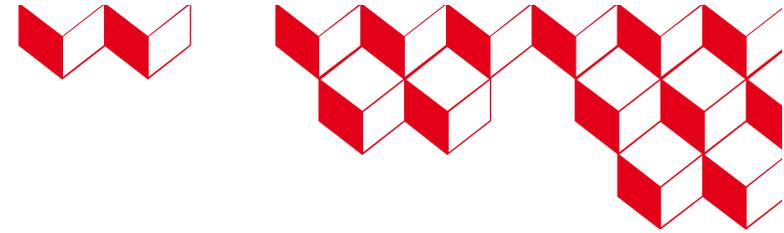


- Thermophysical properties
- Laser flash
- Levitation technics
- Modulated laser heating
- Rapid resistive or inductive heating
- ...

SAVE
THE
DATE



Quelques références



Quaini, A.; Hodaj FiqiriGuéneau, C. & Gossé, S., Étude thermodynamique du corium en cuve - Application à l'interaction corium/béton, 2015

J. Delacroix, N. Chikhi, P. Fouquart, C. Journeau, K. Tatsahura, T. Tsukamoto, T. Toda, and S. Kamohara. Solidus and liquidus temperatures of corium-sacrificial material mixtures: experimental results and thermodynamic calculations. In Proceedings of FDR2019, International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research, 2019.

N. Chikhi, P. Fouquart, J. Delacroix, and P. Piluso. Measurement of type 304l stainless steel and 16mnd5 ferritic steel density and surface tension: Possible impact for stratified molten pool. Nucl. Technol., 205(1-2):200–212, 2019.

J. Delacroix, C. Journeau, N.Chikhi, P. Fouquart, and D. Zhan. Measurements of in-vessel and ex-vessel liquid corium surface tension and density in the viti-mbp test bench within alisa euro-chinese project. Mechanical Engineering Journal, 7(3):19–00611–19–00611, 2020.

I. Korobeinikov, N. Chikhi, P. Fouquart, B. Turquais, J. Delacroix, S. Seetharaman, and O. Volkova. Surface tension and density of cr–mn–ni steels with transformation induced plasticity effect. Steel Res Int, 92(1):2000260, 2021.

N. Chikhi, J. Delacroix, P. Fouquart, and B. Turquais. Measurement of corium surface tension using the maximum bubble pressure. Nuclear Engineering and Design, 379:111266, 2021.

Problématique de la mesure de température

Benjamin Turquais, Jean-Louis Sans, Laurent Davoust, Jules Delacroix, Christophe Journeau, Pascal Piluso, and Nourdine Chikhi. Pyroreflectometry as a technique for the accurate measurement of very high temperatures in molten materials. Review of Scientific Instruments, 93(9):094901, 2022.

Jules Delacroix, Pascal Piluso, Nourdine Chikhi, Olivier Asserin, Damien Borel, Alexandre Brosse, and Stephen Cadiou. Measurements of liquid aisi 304l steel density and surface tension, and influence of surface-active elements at high temperatures. Steel Research International, 2100624, 2022.

K. Patouillet and J. Delacroix. Kévin Patouillet, Jules Delacroix, Development of an oscillating cup viscometer for viscosity measurement of liquid metals at very high temperatures, Measurement, Volume 220, 2023, 113370.

C. Denier, A. Tourneix, J. Delacroix, R. Le Tellier, P. Piluso, E. de Bilbao, Thermophysical properties of U1-xZrxO2-y: measurement and modelling at high temperature for nuclear severe accident applications, *To be submitted in Langmuir or JNM*, 2024.