

# Expérience de lévitation électromagnétique sous rayonnement synchrotron

C. COURTESSOLE<sup>a</sup>, M. DUMONT<sup>a</sup>, P. SCHETELAT<sup>a</sup>, D. PONTONI<sup>b</sup>, M. DI MICHIEL<sup>b</sup> et J. ETAY<sup>a</sup>

a. CNRS-SIMaP-EPM, 1340 rue de la Piscine, 38402 SAINT-MARTIN D'HERES

b. European Synchrotron Radiation Facilities (ESRF), 6 rue Jules Horowitz, BP 220, 38043 GRENOBLE

## Résumé :

*La lévitation électromagnétique est utilisée lors de l'élaboration à haut degré de pureté et de la mesure de propriétés thermophysiques d'alliages métalliques. La validation des modèles numériques existant est entravée par l'absence de données expérimentales relatives aux vitesses d'écoulement à l'intérieur de l'alliage fondu. A l'aide d'une technique d'imagerie rayons X (ESRF-faisceau ID 15, nous voulons mesurer les vitesses dans une goutte de métal en lévitation.*

## Abstract :

*Electromagnetic levitation is widely used to elaborate very high purity materials and to measure thermophysics properties of metallic alloy. The validation of numerical models is prevented by the absence of experimental data closed to the velocity of the flow inside the molten alloy. Using an X-ray imaging technique (ESRF – ID15 beam), we want to measure velocities in a levitated metallic droplet.*

**Mots clefs :** lévitation électromagnétique, écoulement, traceurs, rayons X.

## 1 Introduction

La lévitation électromagnétique d'alliage métallique a pour principales applications l'élaboration à haut degré de pureté [1] et la mesure de propriétés thermophysiques [2], notamment lorsque l'alliage est dans son état surfondu. Dans ce dernier cas, il est souvent intéressant de lui associer la microgravité.

La modélisation complète de tels dispositifs est compliquée par les couplages des différents phénomènes physiques mis en jeu. La validation des modèles numériques existants est entravée par l'absence de données expérimentales relatives aux vitesses d'écoulement à l'intérieur de l'alliage métallique fondu en lévitation ou charge. Jusqu'à présent, ces mesures n'étaient pas possibles car l'alliage est à haute température, empêchant tout contact physique avec une sonde, et n'est pas transparent à la lumière visible. Notre propos est de remédier à cette lacune en utilisant le rayonnement synchrotron.

A l'aide d'une technique d'imagerie rayons X (faisceau ID15A de l'ESRF), nous voulons mesurer les vitesses dans une goutte de métal en lévitation. A cette fin, des échantillons métalliques sphériques de 5 mm de diamètre ensemencés avec des particules de carbure de tungstène (WC) de 100 microns sont fondus et lévités. En raison du fort contraste d'absorption des rayons X entre le métal et le carbure de tungstène, les particules agissent comme des traceurs à l'intérieur de l'échantillon. Afin de permettre cette détection, nous avons utilisé un faisceau de très haute énergie, une forte résolution spatiale et un pas de temps très fin. Afin d'obtenir des vitesses, et en utilisant de façon positive le fait que l'échantillon lévité n'est ni stationnaire ni statique mais tourne sur lui-même, les films réalisés sont analysés par une technique adaptée de tomographie.

L'optimisation de l'installation et du post-traitement des films obtenus, ainsi que les vitesses analysées sont présentées.

## 2 Expérience

### 2.1 Cellule expérimentale

Le dispositif expérimental mis en œuvre est illustré par la figure 1. Elle comporte trois parties distinctes : une enceinte à vide, une partie électrotechnique et le système d'acquisition. L'enceinte à vide se compose d'un tube en quartz de 140 mm de diamètre fermé par deux flasques. Celle du bas est en Permalite<sup>®</sup> ; un isolant électrique ; elle permet le passage des connexions électriques de l'inducteur. La flasque supérieure, en acier inoxydable, est reliée à la pompe à vide et à l'arrivée d'argon pour permettre de travailler sous atmosphère inerte. Le générateur utilisé, d'une puissance maximale de 12 kW, autorise des fréquences de courant de l'ordre de 130 kHz et dispose d'une commande déportée indispensable pour l'ergonomie d'une expérience à l'ESRF.

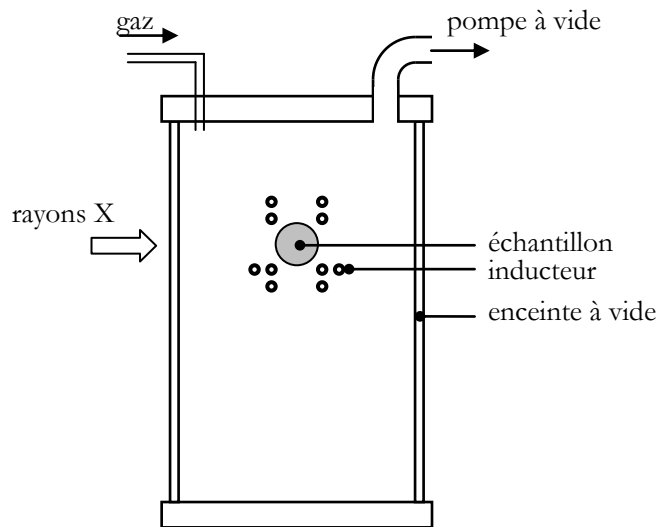


FIG. 1 – Schéma de l'installation expérimentale.

La taille du faisceau disponible est de 5 mm maximum. Nous avons donc choisi un échantillon du même diamètre ( $\varnothing = 5$  mm). La géométrie de l'inducteur a été choisie de sorte que la position d'équilibre de l'échantillon en lévitation soit entre les spires et les contre-spires de l'inducteur et pour que, dans cette configuration, les couples électromagnétiques exercés sur l'échantillon soient les plus faibles possibles (paragraphe 2.2).

Les expériences sont menées sur deux configurations. Pour deux charges différentes, l'une en aluminium (configuration 1) l'autre en nickel (configuration 2), deux inducteurs différents, adaptés à chaque échantillon, ont été réalisés. Les propriétés physiques attachées à chacun des matériaux sont reportées dans le tableau 1. Dans toutes les charges, des particules de carbure de tungstène d'environ 100 microns sont utilisées comme traceurs.

TAB. 1 – Propriétés physiques employées pour les simulations d'optimisation des inducteurs.

	masse volumique kg/m <sup>3</sup>	température de fusion K et (°C)	capacité calorifique à 20°C J/(kg·K)	chaleur latente de fusion kJ/mol	conductivité électrique S/m
aluminium	2700	933,47 (660)	900	10,79	$37,7 \times 10^6$
nickel	8908	1728 (1455)	440	17,47	$14,3 \times 10^6$

Les expériences ont été réalisées à l'ESRF, sur la ligne de lumière ID15A. Le faisceau est un faisceau blanc d'environ 200 keV. Le détecteur fluorescent est couplé à une caméra CCD de 500×500 pixels, pour 5mm×5mm réels, permettant une acquisition à 500 Hz. La cellule expérimentale a été disposée sur une table permettant une translation dans 3 directions afin de contrôler les positions respectives du faisceau et de l'échantillon levité.

## 2.2 Conception des inducteurs

Pour réaliser des films sous rayonnement X exploitables des échantillons en lévitation, la géométrie et les caractéristiques électriques (intensité, fréquence) des inducteurs doivent être optimisés pour répondre aux critères suivants :

1. la position d'équilibre de l'échantillon doit se situer entre les spires et les contre-spires de l'inducteur pour que le faisceau de rayons X n'ait à traverser que l'échantillon,
2. les oscillations et autres instabilités doivent être minimisées,
3. la rotation de l'échantillon doit être la plus lente possible.

Entant donnée la différence des propriétés physiques de l'aluminium et du nickel, la lévitation stable des échantillons nécessite un inducteur adapté. La conception de tels inducteurs est faite au moyen d'une modélisation 3D de l'inducteur basée sur la formulation des harmoniques sphériques proposée par Lohöfer [3].

La figure 2 représente les projections des densités de puissances Joule surfaciques sur les faces nord et sud pour les deux configurations choisies et pour une intensité de courant inducteur de  $500 A_{pic}$  et des fréquences de  $140 kHz$  pour la configuration 1 et  $115 kHz$  pour la configuration 2. Sur ces projections, il est clair que les densités de puissance ne sont pas axisymétriques. Ce défaut engendre des instabilités spatiotemporelles des échantillons.

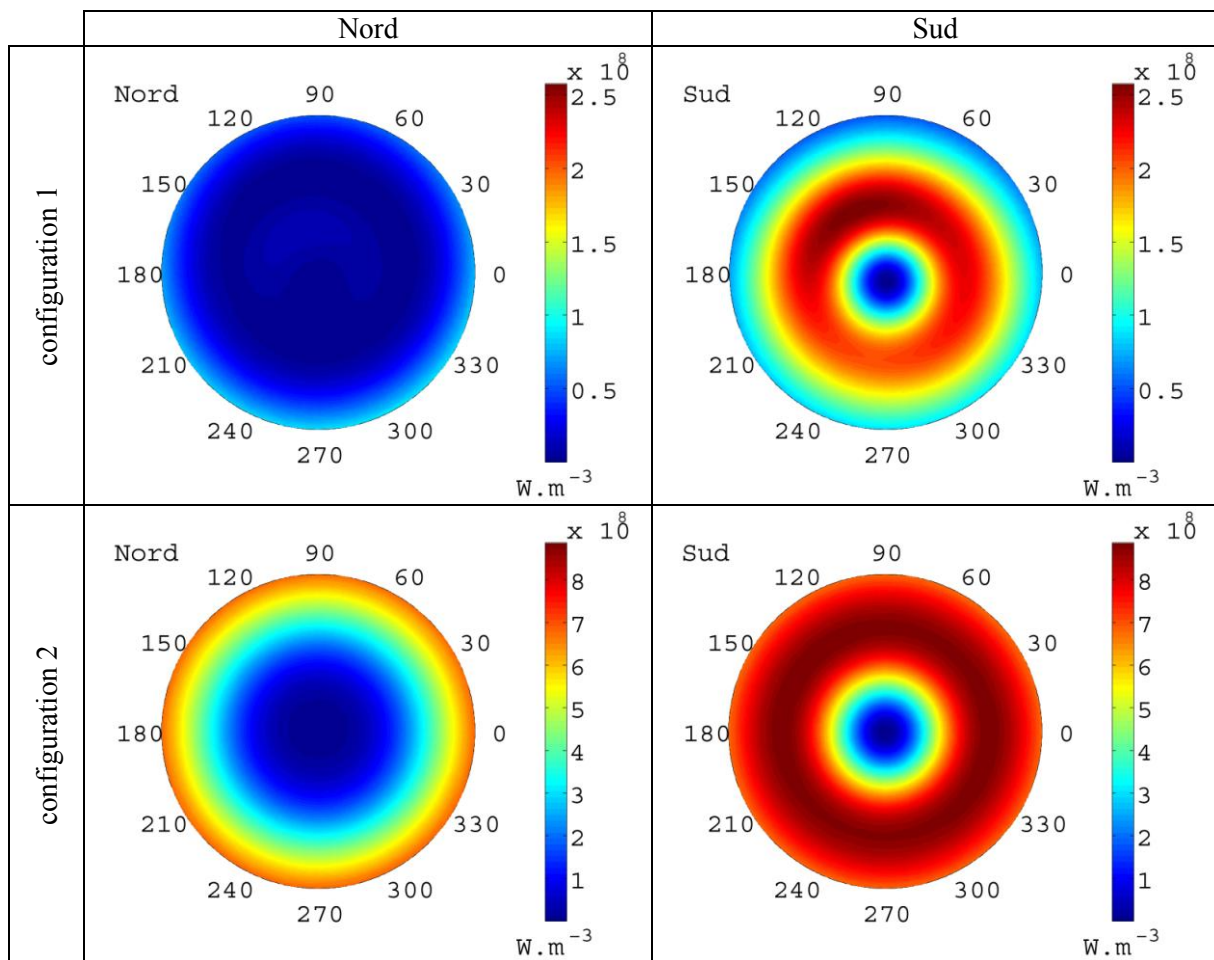


FIG. 2 – Projections géométriques des densités de puissance Joule surfaciques calculées pour une géométrie d'inducteur parcouru par un courant de  $500 A_{pic}$  – on observe les défauts d'axisymétrie de la densité de puissance.

Les instabilités potentielles sont quantifiées par les dérivées spatiales des forces électromagnétiques et par les couples générés par la répartition de ces forces. La figure 3 illustre les géométries optimales choisies pour chacune des configurations.

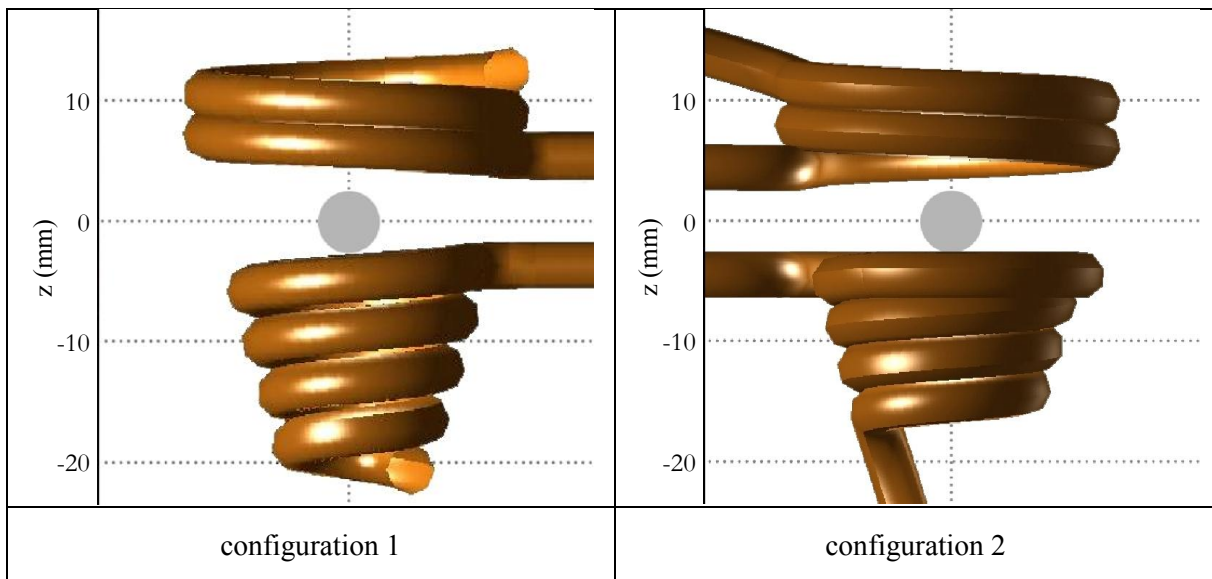


FIG. 3 – Géométrie des inducteurs optimisés pour chacune des configurations.

Pour chacune des configurations, les variations de position d'équilibre, de la puissance Joule totale, de la fréquence d'oscillation verticale, et du couple exercé sur l'échantillon en fonction de l'intensité du courant inducteur sont illustrées sur la figure 4.

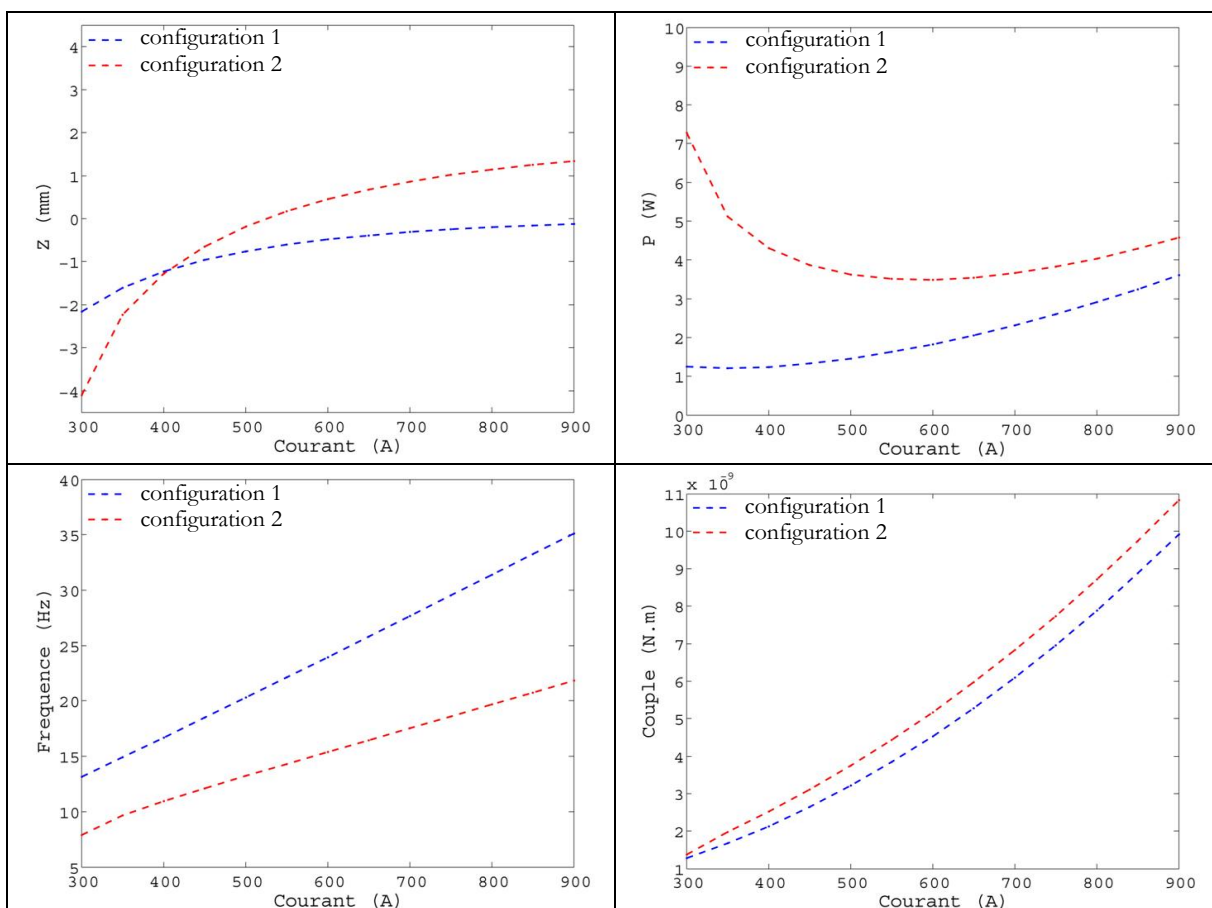


FIG. 4 – Variation de la position d'équilibre, de la puissance Joule totale dissipée dans la charge, de la fréquence d'oscillation verticale et du couple d'axe Z s'exerçant sur la charge en fonction de l'intensité (pic) de courant dans l'inducteur.

A chaque intensité de courant inducteur correspond une position d'équilibre plus ou moins stable. La stabilité est d'autant meilleure que « z », la différence entre la cote du centre de gravité de l'échantillon et

celle du point où le champ magnétique est nul, est proche de zéro. On remarque que la puissance Joule dissipée dans l'échantillon est d'autant plus faible que « z » est proche de zéro. La puissance dissipée dans l'aluminium est inférieure à celle dissipée dans le nickel. Ceci est dû à la valeur du rapport conductivité électrique sur masse volumique favorable à la lévitation de l'aluminium par rapport à celle du nickel. Il est aussi plus difficile de léviter de façon stable l'échantillon de nickel que celui d'aluminium comme on peut le voir sur les graphes :

- des fréquences : les fréquences d'oscillation verticales sont plus faibles pour le nickel que pour l'aluminium, les oscillations apparaissent donc plus facilement pour le nickel et sont plus difficiles à amortir,
- des couples : pour une position d'équilibre donnée, le couple d'axe vertical est plus élevé pour la configuration 2 que pour la configuration 1.

### 2.3 Post-traitement des images

Pour déterminer le mouvement des traceurs à l'intérieur de l'échantillon la vitesse globale de rotation de l'échantillon est dans un premier temps déterminée. Les particules de carbure de tungstène sont détectées dans le plan X-Y et suivies image par image. Les vitesses, liées à la vibration solide de l'échantillon, sont analysées grâce aux mouvements de la surface, puis soustraites à la vitesse des particules. L'analyse statistique du champ de vitesse des traceurs nous permet ensuite de déterminer la vitesse de rotation globale. Enfin un algorithme discret de rétroprojection est appliqué pour calculer la troisième composante de la position des traceurs [4]. Ceci nous permet de séparer les particules libres de celles piégées à la surface de l'échantillon.

## 3 Résultats

Malgré l'optimisation des inducteurs, réaliser une lévitation stable s'est avérée difficile. En effet, lors de nos essais nous avons souvent été témoins du scénario suivant :

1. L'échantillon sphérique tourne sur son axe horizontal.
2. Une fois fondue, la goutte formée se met sous forme d'un disque qui tourne autour de l'axe horizontal.
3. Sa vitesse de rotation augmente en même temps que le disque s'aplatit.

Il y a alors trois scénarii possibles :

- le disque est si étiré que de petites gouttes s'en détachent,
- le disque se déstabilise,
- pour une vitesse donnée, et un diamètre de disque correspondant, le disque bascule très brusquement (durée inférieure à 1/10 s) : l'axe horizontal du disque se met en axe vertical.
  - puis, le disque tourne suivant l'axe vertical,
  - l'alliage fondu reprend sa forme sphérique, la lévitation est alors à peu près stable.

Le basculement n'est pas expliqué de façon claire. Mais, le dernier point peut être expliqué de la façon suivante. En augmentant le rapport surface sur volume, la forme de disque favorise l'oxydation de l'alliage. Or la présence d'oxydes augmente la tension superficielle apparente et, par là, la stabilité de l'échantillon.

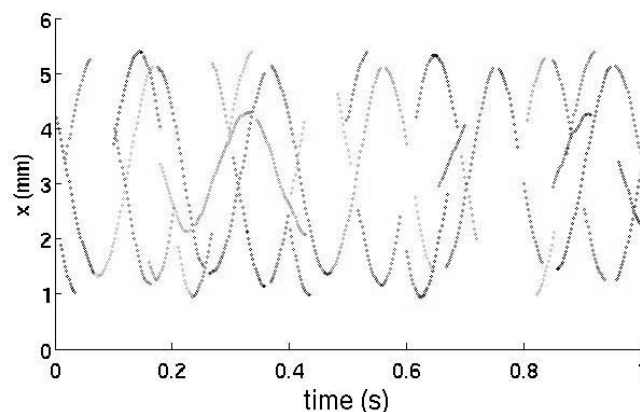


FIG. 5 – Position horizontale de 4 traceurs au cours du temps – configuration 1 –  $I = 550 A_{pic}$  environ.

Certains essais ont été fructueux. La figure 5 est un exemple d'essai effectué avec la configuration 1. Quatre traceurs ont été suivis. Leur position en fonction du temps évolue de façon identique. Nous en déduisons qu'ils sont tous piégés à la surface de l'échantillon dont la vitesse de rotation est égale 4.9 Hz.

## 4 Conclusion

Cinq échantillons d'aluminium et six de nickel ont été lévités dans un faisceau de rayons X. Pour chacun de ces essais, des vidéos ont été enregistrées et pour certains un traitement d'images a eu lieu. Sur les échantillons aluminium, il apparaît que tous les traceurs ont été piégés par la surface. Ce fait peut avoir deux explications :

- les particules de carbure de tungstène sont isolantes par rapport au métal liquide et lorsqu'elles passent dans la peau électromagnétique elles subissent une force de séparation électromagnétique,
- les particules de carbure de silicium mouillent peu l'aluminium et bien le nickel, c'est pourquoi, dans les échantillons d'aluminium, ces particules migrent vers la surface : là où, malgré les précautions prises, le taux d'oxygène est le plus fort.

Une lévitation stable des échantillons de nickel est plus difficile à réaliser. De plus, le contraste entre les particules et le métal fondu est plus faible, ce qui rend les vidéos plus difficiles à exploiter. Des efforts sont en cours dans cette direction.

Des essais complémentaires pourront avoir lieu quand la stabilité de l'échantillon sera assurée de façon certaine. Ceci nécessite le développement d'un modèle qui prend en compte :

- la géométrie de l'inducteur qui est un tube et non un fil,
- l'effet de mutuelle inductance entre l'inducteur et l'échantillon.

Enfin s'il s'avère qu'une séparation électromagnétique a effectivement lieu, il faudra attendre, avant de répéter les expériences, une augmentation de la résolution spatiale du faisceau disponible pour utiliser des particules de grandeurs caractéristiques inférieures à 10 microns.

## Remerciements

Ce travail est réalisé grâce au soutien financier de l'ESA [MAP-Thermolab], du CNES [Maglev] et de l'EC [PI-IMPRESS - Contract Number: NMP3-CT-2004-500635].

## Références

- [1] Okress E.C., Wroughton D.M., Comenetz G., Brace P.H. and Kelly J.C.R., Electromagnetic Levitation of Solid and Molten Metals, *J. Appl. Phys.*, **23**, 545-552, 1957.
- [2] Egry I., Thermophysical Property Measurements of Liquid Metals in Microgravity, *AIP Conference Proceedings*, **552**, 323-331, 2001.
- [3] Lohöfer G., An Electrically Conducting Sphere in Three-dimensional, Alternating Magnetic Field, *IMA J. Appl. Math.*, **68**, 1-21, 2003.
- [4] Herman G.T., Image Reconstruction from Projections: The Fundamentals of Computerized Tomography, Academic Press, New-York, 1980.