

Analyse du chauffage par induction du corium dans les essais VULCANO d'interaction corium-béton

Viviane BOUYER^{1*}, Frédéric NGUYEN¹, Jean-François HAQUET¹, Takayoshi KAMATA²

¹CEA, DEN, Cadarache
13108 St Paul lez Durance, France

²Waseda University
1-104 Totsukamachi, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8050, Japan
*(auteur correspondant : viviane.bouyer@cea.fr)

Résumé - Cet article traite en première partie de la connaissance de la conductivité électrique du corium, qui peut être déterminée à partir d'essais d'interaction corium-béton. Au cours d'un essai, on observe une diminution importante de la conductivité électrique avec la température (typiquement un facteur 4 à 5 entre le début et la fin de l'essai). Les valeurs rencontrées, qui varient également d'une composition de corium à l'autre, couvrent une gamme de 100 à 1500 S/m. En deuxième partie, nous présentons des calculs réalisés avec le logiciel COMSOL Multiphysics sur une géométrie simplifiée (2D axisymétrique) afin d'analyser les conditions expérimentales pouvant avoir une influence sur l'efficacité du chauffage électromagnétique du corium (hors aspect hydraulique). Ces calculs montrent que la puissance dissipée dans la charge de corium est divisée d'un facteur 6 en fin d'essai d'interaction corium-béton, en raison de la baisse de la conductivité électrique. D'autre part, ils soulignent l'influence de la disposition d'éléments métalliques à proximité de l'inducteur sur les valeurs de puissance.

Nomenclature

A section de chauffage, m^2
 I courant, A
 T température, K
 U tension, V
 P puissance induite, kW

Symboles grecs

ρ résistivité électrique, Ωm
 σ conductivité électrique, $S.m^{-1}$

1. Introduction

Lors d'un accident grave de réacteur nucléaire, le cœur peut fondre et conduire à la formation d'un matériau liquide complexe. Appelé corium, ce mélange de combustible, métal et matériaux de structure peut présenter des compositions variées, qui dépendent du déroulement de l'accident et de sa localisation.

Dans le cadre des recherches sur les accidents graves menées au CEA Cadarache, des essais avec du corium prototypique sont réalisés sur la plate-forme PLINIUS [1][2]. Ces expériences avec du corium contenant de l'uranium appauvri impliquent, d'une part, d'être en mesure de fondre des mélanges de matériaux à des températures de l'ordre de 1800 à 3000 K selon la composition et, d'autre part, de maintenir ce corium en température (environ 2000 K) pendant plusieurs heures afin de pouvoir simuler la puissance résiduelle du corium réel. Le chauffage inductif est le moyen utilisé au CEA/DEN Cadarache, qui permet de simuler cette puissance dans les essais d'interaction corium-béton VULCANO, qui consistent à étudier l'ablation d'une section d'essai en béton par un mélange de corium durant quelques heures [3]. Ce système de chauffage par induction est d'un grand intérêt [4] mais sa maîtrise et sa modélisation se heurtent à une difficulté majeure qui est la méconnaissance de la conductivité électrique du corium.

La conductivité électrique des matériaux utilisés dans les compositions de corium varie sur une plage étendue. On observe typiquement 3 à 4 ordres de grandeurs entre la conductivité d'un métal et celle d'un oxyde fondu. La capacité à chauffer ces mélanges avec un moyen de chauffage inductif dépend de ce paramètre caractéristique de la charge. En effet, pour une fréquence de l'inducteur donnée, la puissance transmise à la charge atteint un maximum pour une valeur donnée de la conductivité électrique et ce maximum augmente avec la fréquence (voir Figure 1).

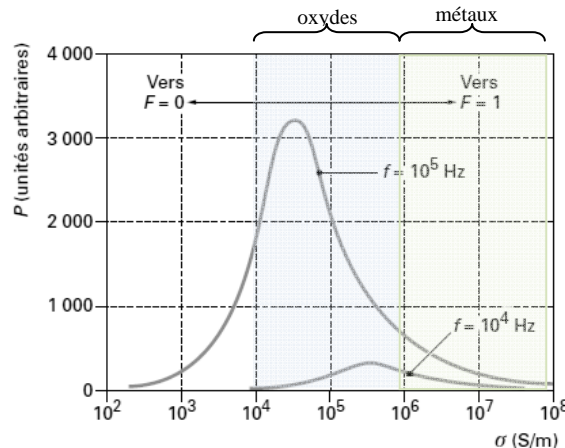


Figure 1. Variation de la puissance transmise à la charge en fonction de sa conductivité (cas d'une plaque) [5].

Dans cet article, nous présentons dans une première partie un état de la connaissance de la conductivité électrique du corium, qui peut être déterminée à partir d'essais d'interaction corium-béton menés à Argonne National Laboratory, utilisant un chauffage résistif.

Dans une deuxième partie, des calculs avec une géométrie 2D axisymétrique représentative d'un essai VULCANO ont été effectués à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics afin d'étudier l'influence des conditions expérimentales (plage de conductivité, proximité d'éléments métalliques) sur l'efficacité du chauffage inductif du corium.

2. Conductivité électrique du corium

2.1. Cadre général

2.1.1. Définition

La conductivité électrique σ est l'aptitude d'un matériau à laisser passer le courant. Elle ne dépend que de la nature du matériau. L'inverse de σ est la résistivité ρ . Il est possible de déterminer σ ou ρ à partir de la mesure de la tension et du courant aux bornes d'un conducteur de longueur L et de section A connues :

$$R = U/I = \rho L/A = L/\sigma A \quad (1)$$

2.1.2. Méthodes de détermination de la conductivité électrique des matériaux à haute température

Nous avons identifié trois types de méthodes (que nous ne détaillerons pas ici) pouvant être adaptées à la détermination de la résistivité des mélanges de corium en température :

- les méthodes avec contact dont le principe consiste en une mesure au moyen d'une ou plusieurs électrodes [6][7][8],

- les méthodes sans contact, qui utilisent le procédé de lévitation électromagnétique [9][10][11],

- les méthodes inverses dont l'approche repose sur la fusion de mélanges oxydes par la technologie du creuset froid et la résolution du problème inverse du champ électromagnétique pour déterminer la résistivité des mélanges jusqu'à près de 3000°C [12][13].

Les techniques de détermination de la conductivité sont nombreuses et présentent des niveaux de complexité variables. Elles sont plus ou moins adaptées à la caractérisation des mélanges oxydes (ou oxydes/métal) et à des hautes températures. Parmi les techniques avec contact, les mesures par un système à 2 ou 4 électrodes permettraient d'avoir une précision suffisante pour les applications corium (~10%). La mesure à 4 électrodes a été utilisée par Simonnet et al. [14] pour les mesures de conductivité dans les verres entre 400 et 1200°C. La limite en température est imposée par l'utilisation des sondes qui sont en platine mais des sondes en tungstène seraient a priori envisageables pour atteindre ~ 2000 - 2500K. Le principe de lévitation des techniques sans contact rend l'expérience plus difficile à mettre en place qu'une mesure directe avec contact. Quant aux méthodes inverses, elles nécessitent de disposer d'un système de chauffage par induction approprié, modélisé et calibré avec des matériaux de propriétés électriques connues afin d'être exploitables.

Quelle que soit la technique utilisée, elle nécessite d'être mise au point. C'est pourquoi nous avons d'abord exploité les travaux de l'Argonne National Laboratory.

2.2. Estimation de la conductivité électrique des corium à partir d'essais existants

En utilisant les résultats d'essais utilisant du chauffage résistif, il est possible d'obtenir un ordre de grandeur de la conductivité électrique du corium. Les essais de chauffage du corium réalisés à Argonne National Laboratory (ANL) utilisent ce principe [15]. La section d'essai est généralement constituée de deux parois en béton, d'un fond en béton et de deux parois inertes équipées de deux électrodes en vis-à-vis, permettant d'assurer le chauffage du bain de corium situé entre les deux (voir détails Figure 2). La mesure de la tension U et du courant I aux bornes du générateur électrique permet de déterminer la résistance de la charge entre les deux électrodes (espacées d'une largeur L constante) et, par conséquent, d'obtenir la résistivité électrique d'après l'équation (1).

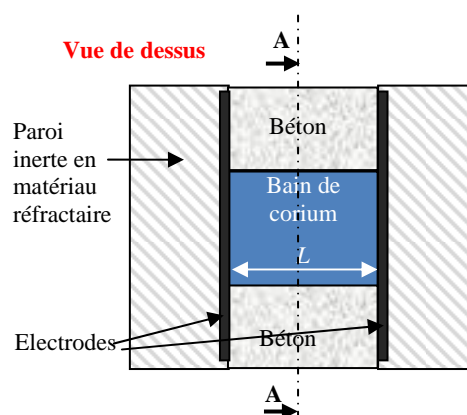


Figure 2. Vue de dessus de la section d'essai des essais d'interaction corium-béton réalisés à ANL.

Farmer a proposé une première exploitation d'essais sans ablation, c'est-à-dire avec une section de chauffage d'aire A constante [16][17]. Il a pu établir une corrélation entre la résistivité électrique, la température et le pourcentage initial de béton dans le bain de corium et ce, pour des bétons silico-calcaires. Le tracé de cette corrélation est représenté sur la Figure 3. Farmer montre que plus le corium est enrichi en béton, ou plus la température du

bain diminue, plus la conductivité électrique diminue. Au cours d'un essai d'interaction corium-béton, la composition du corium s'enrichit en béton au cours du temps et en même temps, la température du bain diminue. Prenons l'exemple d'un essai d'interaction corium-béton avec 9% de béton dans la composition initiale du bain de température 2500 K et 34% (limite du domaine de validité de la loi de corrélation de Farmer) dans le corium à 1750 K, ce qui correspond à une ablation radiale moyenne d'environ 4 cm atteinte au bout de 1h30 environ. La conductivité électrique diminue d'un facteur 20 en passant d'une valeur de l'ordre de 2100 S/m en début d'essai à 100 S/m à 1750 K.

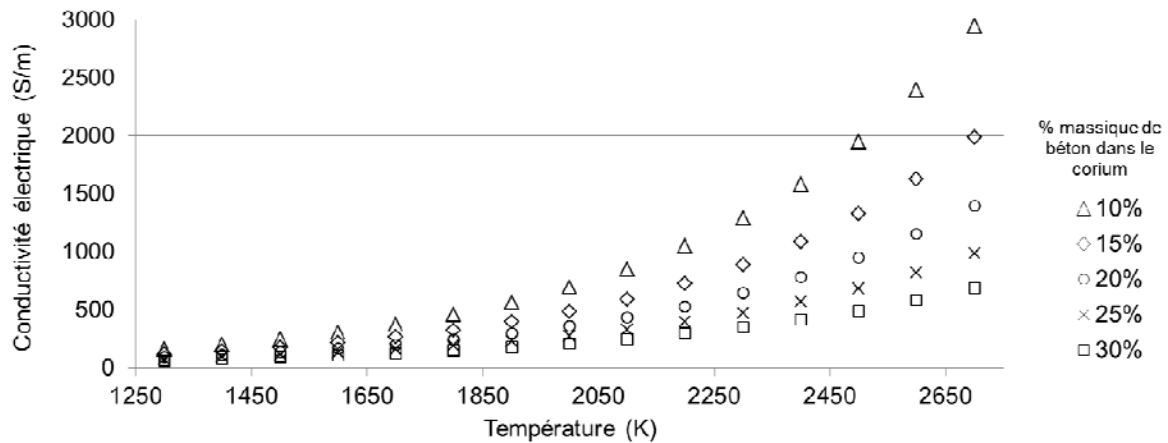


Figure 3. *Corrélation de Farmer (établie entre 8,5 et 34% en masse de béton) pour la conductivité électrique du corium en fonction de la température, pour différents pourcentages initiaux de béton dans le corium [17].*

Pour les essais ANL avec ablation du béton, le chauffage résistif du corium entraîne la formation d'un bain de corium liquide, qui conduit à la fusion du béton et on mesure alors l'ablation du béton au cours du temps (Figure 4). Le calcul de la conductivité électrique σ de la charge nécessite donc de connaître l'évolution de la section A du bain de corium (liquide) en face des électrodes. Ces valeurs peuvent être estimées à l'aide des thermocouples placés dans le béton, qui permettent d'obtenir la position du front d'ablation dans le béton. Il faut tenir compte du mieux possible de l'épaisseur des croûtes de corium (qui sont solides et donc non conductrices) dans cette estimation.

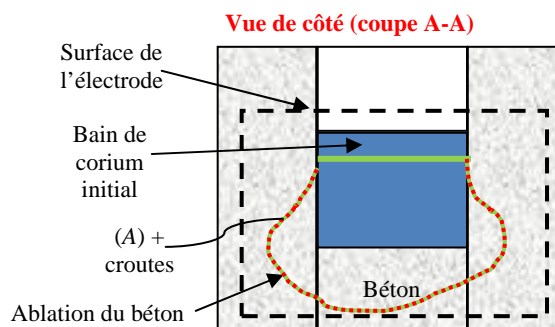


Figure 4. *Vue de côté de la section d'essai des essais d'interaction corium-béton réalisés à ANL avec ablation du béton.*

Nous avons complété les données des programmes d'interaction corium-béton de l'ANL ACE et MACE avec les résultats d'essais du programme plus récent CCI. Les valeurs de conductivités électriques ainsi obtenues sont indiquées sur la Figure 5 en fonction de la température du bain de corium et pour différents types de béton. Au-delà de la dispersion

importante des résultats qui peut s'expliquer par les incertitudes sur l'estimation de la section de chauffage au cours du temps et de la température du bain, les observations sont les suivantes : la conductivité électrique diminue avec la température du bain et peut être divisée par un facteur 4 à 5 entre le début de l'essai (température la plus élevée) et la fin de l'essai (température la plus basse). Pour des températures de bain équivalentes, les corium enrichis en béton siliceux sont moins conducteurs que ceux enrichis en béton silico-calcaire. L'analyse des essais ANL met donc en évidence la variation importante de la conductivité électrique du corium au cours d'un test d'interaction corium-béton et également d'une composition de corium à l'autre. Pour l'ensemble des essais, les conductivités s'étendent sur une gamme de 100 à 1500 S/m, dont l'étendue a des conséquences sur la puissance fournie à la charge.

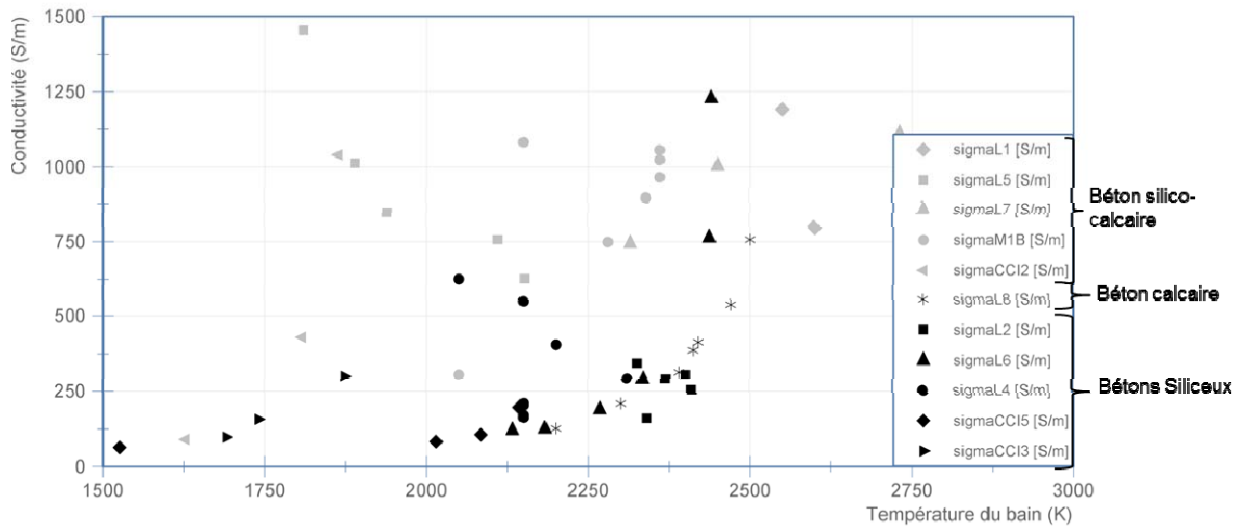


Figure 5. Valeurs de conductivités électriques en fonction de la température du bain de corium, pour différents types de béton, déterminées à partir de données d'essais d'interaction corium-béton de l'ANL.

3. Modélisation du chauffage inductif

3.1. Modèle

L'objet de cette simulation est d'obtenir des informations qualitatives sur le chauffage par induction du corium dont les propriétés varient (en particulier la conductivité), ainsi que sur l'influence de l'environnement (proximité de pièces métalliques) de l'inducteur. Pour cela, nous avons effectué les calculs avec le logiciel COMSOL Multiphysics avec le module électromagnétique AC/DC, pour une géométrie 2D axisymétrique (voir schéma Figure 6).

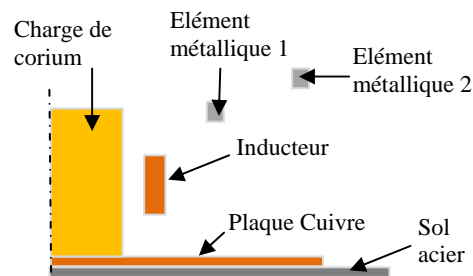


Figure 6. Géométrie 2D axisymétrique modélisée

L'inducteur présente une section carrée de 0,12 m x 0,025 m. Le courant le traversant est de 3500 A et la fréquence est de 40 kHz. La charge est cylindrique, de rayon 0,15 m et de

hauteur 0,25 cm. Elle repose sur une plaque de cuivre posée sur le sol en acier. La puissance induite par l'inducteur peut se coupler sur la charge, la plaque de cuivre et le sol, ainsi que sur différents éléments métalliques pouvant se trouver à proximité.

3.2. Résultats

Le premier calcul concerne le chauffage avec la charge seule. Le tableau 1 montre les valeurs de puissance obtenues pour des conductivités électriques de 2000, 1000 et 100 S/m. A 40 kHz et 3500 A, la puissance transmise à la charge est donc maximale pour des conductivités de l'ordre de 1000-2000 S/m. Si l'on se place dans le cas de l'interaction corium-béton, au cours de l'essai, la température de la charge diminue, donc la conductivité aussi (voir § 2.2). La Figure 7 représente la puissance induite dans la charge en fonction de la conductivité électrique du corium. Elle montre donc que la puissance dans la charge est divisée d'un facteur 6 en fin d'essai, lorsque σ atteint 100 S/m.

σ S.m ⁻¹	$P_{\text{inducteur}}$ kW	P_{charge} kW
2000	1,85	54,7
1000	1,84	55,5
100	1,83	9

Tableau 1 : Cas charge seule. Puissances dissipées dans l'inducteur et dans la charge de corium pour 3 valeurs de conductivité électrique.

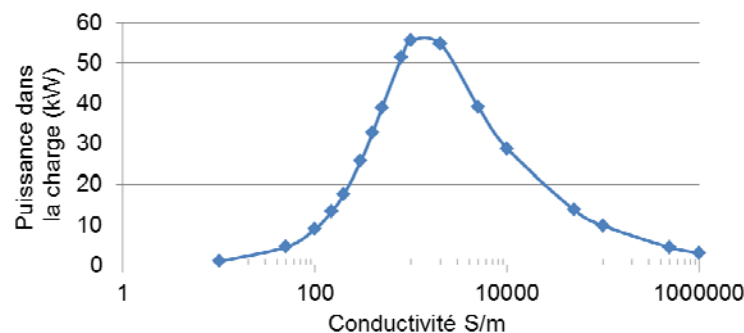


Figure 7. Puissance dissipée dans la charge de corium en fonction de la conductivité électrique du corium ($I=3500$ A, $f=40$ kHz).

Cette perte de puissance au cours de l'essai peut être aggravée par l'environnement. Le tableau 2 présente les résultats obtenus lorsqu'on ajoute un élément métallique en fer (élément 1 Figure 6) à proximité de la charge.

σ S.m ⁻¹	$P_{\text{inducteur}}$ kW	P_{charge} kW	$P_{\text{élément métallique 1}}$ kW
2000	1,81	50,3	5
1000	1,81	50,5	6,1
100	1,80	8,1	7,5

Tableau 2 : Cas charge+élément métallique 1. Puissances dissipées dans l'inducteur, dans l'élément métallique 1 en fer et dans la charge de corium pour 3 valeurs de conductivité électrique.

Quelle que soit la conductivité électrique, la puissance alors induite dans la charge est 10% inférieure à celle obtenue précédemment. On observe qu'à 100 S/m, la puissance dans l'élément métallique est du même ordre de grandeur que la puissance dans la charge. Cet effet doit être pris en compte dans l'interprétation des expériences, car la calibration du système de

chauffage est réalisée avec une boîte à eau métallique, donc à conductivité électrique constante.

L'exemple suivant illustre l'influence de l'utilisation d'un élément en cuivre pour annihiler les effets parasites de l'environnement. Dans un premier calcul, on place un seul élément métallique (en fer) en position 2 (voir Figure 6). Dans un second calcul, on dispose aussi un élément métallique (en cuivre) en position 1. Les valeurs de puissance obtenues sont indiquées dans le Tableau 3. Ces résultats montrent qu'utiliser du cuivre permet effectivement d'éviter que certains éléments en fer à proximité de l'expérience chauffent. Mais cela a une conséquence néfaste sur le niveau de puissance apportée à la charge, qui ici diminue de 10%.

	σ S.m ⁻¹	P_{charge} kW	$P_{\text{élt métallique 1}}$ kW	$P_{\text{élt métallique 2}}$ kW
Charge + élément métallique 2 en fer	2000	53,5	-	1,1
Charge + élément métallique 2 en fer + élément métallique 1 en Cu	2000	46,1	0,2	0,02

Tableau 3 : Valeurs de puissances dissipées dans la charge et les éléments métalliques 1 et 2 selon deux configurations de calculs.

Des calculs exploratoires pour voir l'influence d'une plaque de cuivre située entre la charge et le sol en acier (voir schéma Figure 6) ont été réalisés, dont les résultats doivent être confirmés.

4. Conclusions

Dans le cadre des programmes de recherche sur les accidents graves de réacteurs nucléaires, afin de mieux maîtriser le chauffage inductif pour les différentes compositions de corium utilisées dans les expériences, nous avons réalisé une étude de la conductivité électrique de ces mélanges et analysé l'influence de l'environnement sur le chauffage à l'aide de calculs électromagnétiques en utilisant le logiciel COMSOL.

L'exploitation des données des essais de chauffage résistif du corium conduits à ANL (Etats-Unis) a permis d'estimer la plage des valeurs de conductivités électriques pour des corium enrichis avec différents types de béton représentatifs des parcs nucléaires américains et français, en fonction de la température. La gamme va de 100 à 1500 S/m environ.

En utilisant une géométrie 2D-axisymétrique, les calculs COMSOL mettent en évidence l'importance de la conductivité électrique sur la puissance injectée au bain de corium. D'autre part, ils permettent de quantifier l'influence des éléments métalliques présents dans l'environnement de la charge de corium à chauffer.

Les travaux futurs auront pour objectif l'étude du couplage entre la thermohydraulique et l'induction électromagnétique dans un bain de corium multiphasique afin d'optimiser le dispositif de chauffage par induction. Pour cela, il est indispensable de disposer d'une technique de mesure de la conductivité électrique des mélanges de corium à haute température.

Références

- [1] C. Journeau, Contribution des essais en matériaux prototypiques sur la plate-forme PLINIUS à l'étude des accidents graves de réacteurs nucléaires, mémoire HDR, université d'Orléans, 2008.
- [2] V. Bouyer et al., High temperature measurements in severe accident experiments on the PLINIUS Platform, *Proc. International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA) (to be published)*, Marseille, 2013.

- [3] C. Journeau *et al.*, Contribution to the VULCANO experimental program of the understanding of MCCI phenomena , *Nucl. Eng. Tech.* 44(3) (2012) 261- 272.
- [4] C.Journeau et al., Méthodes de fusion de bains d'oxydes et de métaux ayant un liquidus entre 1800 et 3000 K. Application à la recherche sur les accidents graves de réacteurs nucléaires, *Proc. Congrès français de thermique*, Lyon, 2014.
- [5] G. Develey, Chauffage par induction électromagnétique : Principes, *Techniques de l'ingénieur*, D5935.
- [6] S. Schiefelbein, A new technique to measure the properties of molten oxides, Ph. D report, MIT, 1996.
- [7] S. Schiefelbein *et al.*, A high accuracy calibration free technique for measuring the electrical conductivity of liquids, *Rev. Sci. Instr.* 69 (9) (1998) 3308-3313.
- [8] S. Schiefelbein *et al.*, A high accuracy calibration free technique for measuring the electrical conductivity of molten oxides, *Metallurgical and materials transactions B* 28 (1987) 1141-1149.
- [9] W.K Rhim, Noncontact electrical resistivity measurement technique for molten metals, *Rev. Sci. Instr* 69(10) (1998) 3628-3633.
- [10] G. Lohöfer, Electrical resistivity measurement of liquid metals, *Meas. Sci. Technol.* 16 (2005) 417-425.
- [11] T. Richardsen *et al.*, Electrical resistivity of undercooled liquid Cu-Ni alloys, *Int. J. Thermophys.* 23 (5) (2002) 1207-1216.
- [12] I. Poznyak *et al.*, Electrical conductivity measurement of oxides melts, *Modelling for material processing*, Riga, June 8-9, 2006.
- [13] A.N. Shatunov *et al.*, Method of electrical resistivity measurement for high temperature melt, *Inorganic Materials* 47(14) (2011) 1579-1583.
- [14] C. Simonnet *et al.*, Electrical conductivity measurement of oxides from molten state to glassy state, *Rev. Sci. Instr.* 74(5) (2003) 2805-2810.
- [15] M.T. Farmer *et al.*, OECD MCCI Project, 2-D Core Concrete Interaction (CCI) Tests: Final Report, OECD/MCCI-2005-TR05, 2006.
- [16] M.T. Farmer, Melt resistivity analysis and operational implications for MACE tests, Technical advisory committee meeting, Palo Alto, 1992.
- [17] M.T. Farmer, Resistivity correlation for M3, Review meeting ANL, 1994.

Remerciements

Les auteurs remercient M.T. Farmer pour la fourniture des données nécessaires au calcul de conductivité électrique, ainsi que C. Journeau pour ses conseils avisés.