

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Modèle enthalpique de Stefan pour l'étude du pied d'arc cathodique

M. Abbaoui, P. André, A. Augéard



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.18145/jitipee.v4i1.138

Modèle enthalpique de Stefan pour l'étude du pied d'arc

M'hammed Abbaoui ⁽¹⁾, Pascal André ⁽¹⁾, Amaury Augeard ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Université Clermont Auvergne, CNRS, LPC, UMR6533, F-63000 Clermont-Ferrand,
France
pascal.andre@uca.fr

Résumé – Lors de l'ouverture des contacts des appareillages de coupure électrique, un arc électrique se crée. La continuité du courant électrique s'effectue à la surface de la cathode par des sites émissifs de courant. Ces sites sont soumis à des flux thermiques surfaciques importants conduisant à la création de spots dont la durée de vie est faible. Le temps d'apparition de ces spots et l'usure de la surface qu'ils provoquent dépendent de la nature du matériau. Plusieurs modèles s'affrontent pour décrire ces spots (sites explosifs, ectons, régimes stationnaires). Ces modèles sont souvent complexes et dépendent de paramètres mal connus ou mal définis. Cependant, un modèle simple dit « enthalpique » (modèle thermique avec ablation) de type Stefan permet une étude comportementale du matériau de la cathode. Les résultats obtenus à une dimension, pour des flux variant de 1.10^{11} W/m² à 5.10^{12} W/m² à la cathode, permettent de montrer le comportement différent du spot cathodique en fonction du matériau de contact. Afin de mettre en exergue cette différence, nous avons choisi de présenter dans cet article deux matériaux de contact : l'argent et l'oxyde de cadmium.

Mots clés : pied d'arc, contacts électriques, spot cathodique, oxydes métalliques, propriétés thermophysiques, ablation, modèle de Stefan, argent, oxyde de cadmium

DOI : 10.18145/jitipee.v4i1.138

Introduction

Les contacts électriques des appareils de coupure (relais, contacteurs, disjoncteurs...) doivent, lorsqu'ils sont fermés, assurer le passage du courant sans élévation de température, et interrompre ce dernier par séparation, ces deux fonctions impliquent certaines qualités pour l'état de surface et pour la composition des matériaux qui les constituent [1]. Lors de la séparation des deux contacts parcourus par un courant électrique, il apparaît un arc électrique qui n'est pas sans conséquence sur leur état de surface pouvant aller jusqu'à leur détérioration entraînant un dysfonctionnement de l'appareil de coupure [2]. Pour expliquer ces phénomènes, Mesyats [3], à partir d'observations expérimentales, a mis en évidence de microexplosions à la surface de la cathode pour un arc créé dans le vide. Il a ensuite développé une théorie cyclique sur l'émission d'électrons à partir de ces sites explosifs. Ces sites d'émission sont appelés ecton [3]. En ayant une approche physique plus classique

différents auteurs ont tenté de faire un bilan de flux d'énergie à la surface de la cathode [4]. Plusieurs hypothèses doivent être alors posées, par exemple que la zone de charge d'espace produit un champ électrique élevé qui diminue le travail de sortie des électrons, que l'élévation de la température du spot est due uniquement à la densité de courant élevée,... [4]. Notre approche se veut simple afin d'isoler le phénomène des changements de phase lors de l'ablation [5].

Lors d'un fonctionnement normal de l'appareil de coupure, l'érosion des électrodes est un paramètre déterminant pour évaluer la durée de vie et le bon fonctionnement des appareils de coupure [6]. En effet, durant la présence de l'arc, on observe une élévation de la température au niveau des contacts, pouvant aller, dans le cas extrême, jusqu'à leur soudure. Cette élévation de température se traduit par une fusion locale et par la vaporisation du matériau. Si on considère chaque spot cathodique, le flux d'énergie est important au travers de celui-ci conduisant ainsi à la création de cratères observés post mortem [7]. Ces cratères sont une traduction visible de l'érosion des surfaces. Pour un flux d'énergie incident donné, le comportement du matériau est lié aux chaleurs latentes des changements de phase et à sa conductibilité thermique. Quelques matériaux réagissent en produisant une épaisseur de liquide importante et peu de vapeur, alors que d'autres produisent peu de liquide mais avec une large émission de vapeur. Le choix du matériau constituant l'électrode se révèle crucial et doit surtout être adapté à l'application envisagée.

Dans cet article nous justifierons le choix des deux matériaux étudiés (argent et oxyde de cadmium), puis le modèle et le schéma numérique employés. Dans un deuxième paragraphe, nous exposerons nos résultats relatifs aux épaisseurs de liquide, de solide et de vapeur ainsi que l'enthalpie et la température le long de l'axe pour l'argent et l'oxyde de cadmium et ce pour plusieurs flux thermiques surfaciques (1.10^{11} à 5.10^{12} W/m²).

1. Matériaux étudiés

En fonction de leur utilisation (valeur de courant, type de courant, gaz de coupure...), les matériaux de contact doivent être choisis en fonction de leurs propriétés physiques, thermodynamiques, de transport et en fonction de leurs températures de changement de phase élevées [2]. Ils doivent être suffisamment inertes vis-à-vis de l'atmosphère dans laquelle ils seront placés pour éviter la formation de films isolants et présenter des propriétés mécaniques suffisantes pour supporter les forces appliquées lors de la fermeture (écrasement) des contacts. Les changements d'état de surface conditionnent pour une bonne part les performances des contacts en présence de l'arc [2]. Les paramètres à prendre en compte sont les températures de fusion, de sublimation et de vaporisation du matériau ainsi que les chaleurs latentes correspondantes. Ces chaleurs latentes jouent le rôle de puits thermiques en absorbant une partie de l'énergie de l'arc électrique. Généralement, les oxydes présentent des températures basses de changement d'état, ils sont donc largement utilisés. A contrario, si le changement d'état s'effectue à des températures trop basses, des problèmes de stabilité de l'oxyde lors de l'élaboration des pastilles de contacts électriques apparaissent. De plus, durant l'ouverture ou la fermeture des contacts, si la couche de métal liquide apparaît à trop basse température, les contacts électriques s'érodent rapidement et risquent de se souder. Si l'énergie dissipée au travers des changements de phase s'effectue à trop haute température, les réamorçages de l'arc électrique sont favorisés. Les matériaux utilisés dans les appareils de coupure sont

essentiellement le cuivre pour le déplacement de l'arc et des matériaux à base d'argent ou de cuivre pour les contacts électriques en raison de leur faible résistance de contact. Si ces derniers sont utilisés purs, ils subissent une érosion conséquente et ont tendance à se souder sous l'effet de forts courants. Pour éviter cela les industriels utilisent des alliages composés d'un renfort réfractaire dispersé dans la matrice d'argent ou un alliage dans le cas du cuivre par exemple avec du tungstène. Le rôle du renfort est d'améliorer, entre autres, l'endurance mécanique et le pouvoir de non soudure. Le matériau composite AgCdO, utilisé depuis longtemps comme matériau de contact est à éviter. En effet, durant l'ouverture des contacts, il se vaporise et contamine ainsi le milieu environnant d'oxyde de cadmium qui est cancérigène de catégorie 2 (directive 67/548/CEE). Les fabricants de contacts électriques tentent de le remplacer progressivement par d'autres oxydes tels que l'oxyde de zinc ZnO et le dioxyde d'étain SnO₂ (exemple, AgZnO, AgSnO₂ ...). Dans cet article nous souhaitons mettre l'accent sur la différence de comportement entre l'argent pur et l'oxyde de cadmium (CdO) au niveau de la cathode ayant un taux d'érosion plus important. Quant à la tache anodique de surface plus importante, le flux thermique surfacique est par conséquent moindre.

Le choix du domaine de variation du flux thermique surfacique est une étape importante pour notre modélisation. Les travaux de S. Coulombe [8] utilisent des flux compris entre 10^{10} et 10^{11} W/m² en fonction de la pression du spot (de 1 à 60 atm.), la description du spot cathodique par E. Hantzsch [9] indique des valeurs comprises entre 7.10^9 W/m² et 4.10^{12} W/m², les travaux de J. Rossignol [10] montrent que pour obtenir une couche de liquide de quelques nanomètres (observable expérimentalement post-mortem) durant la vie du spot un flux de chaleur de 10^{12} W/m² à 10^{13} W/m² est nécessaire. Compte tenu des études précédentes, nous centrons la nôtre sur un flux thermique surfacique de l'ordre de 1.10^{11} à 5.10^{12} W/m².

2. Description du modèle

2.1. Méthode numérique 1D

Afin de comparer le comportement thermique et les phénomènes d'évaporation de la matière des oxydes considérés à la cathode, nous avons choisi d'appréhender ces phénomènes par le problème classique de Stefan avec ablation [5]. Dans cette étude, nous considérons que la masse volumique demeure constante dans chaque phase. Nous négligeons, en outre, l'effet de la dilatation thermique de l'électrode, ce qui implique l'invariance du volume du métal au cours du temps. Nous ne nous intéressons pas aux phénomènes mécaniques du pied d'arc et nous supposons qu'il n'y a aucun mouvement de convection dans le liquide ou dans le gaz. Bien que ces mouvements de convection et d'éjection de gouttelettes modifient de manière conséquente la répartition thermique, nous négligeons ces phénomènes complexes dans cette étude. Ce modèle décrit en fait le chauffage d'une bande de matériau homogène (Figure 1), d'épaisseur l (domaine $[0, l]$) selon l'axe z par un flux thermique surfacique de chaleur Φ situé à l'origine ($z = 0$). Ce flux Φ est apporté à la surface au travers du spot cathodique durant une durée équivalente à la durée de vie maximale t_{max} de ce spot. Le solide s'échauffe localement, se liquéfie puis se vaporise si son enthalpie est suffisante. Ainsi, il y a apparition d'une zone gazeuse que l'on considère comme ablatée (Z_{vap}). L'excédent d'énergie qui n'a

pas été consommé pour la vaporisation diffuse au travers de la couche liquide (Z_{liq}) vers la couche solide de l'électrode.

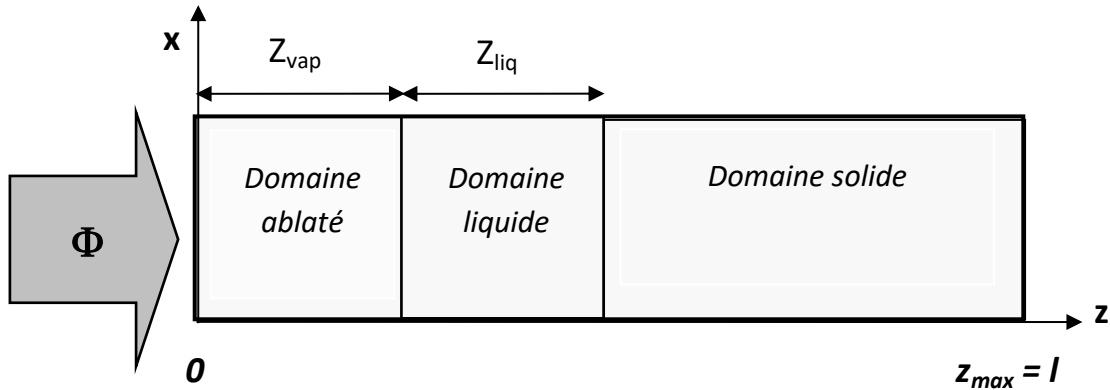


Figure 1. Modèle de l'électrode soumise à un flux thermique surfacique Φ .

Le domaine $[0, l]$ est divisé en M sous régions (Figure 2). Compte tenu des hypothèses simplificatrices, nous utilisons un modèle enthalpique couplé à une résolution numérique de type Godunov [11].

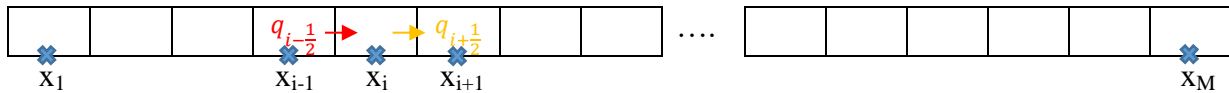


Figure 2. Discretisation du domaine considéré.

L'enthalpie contenue dans le volume i à la position x_i est donnée par:

$$H(x_i, t) = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} H(x, t) dx \quad (1)$$

Si on considère la cellule i , un flux thermique $q_{i-1/2}(x_{i-1/2}, t)$ rentre du côté gauche pendant qu'un autre flux $q_{i+1/2}(x_{i+1/2}, t)$ sort du côté droit. Entre les instants t et $t + \Delta t$ la variation d'enthalpie est donnée par :

$$\Delta x (H(x_i, t + \Delta t) - H(x_i, t)) = \int_t^{t+\Delta t} \left(q(x_{i-1/2}, t) - q(x_{i+1/2}, t) \right) dt \quad (2)$$

Le schéma numérique est obtenu simplement par :

$$H_i^{it+1} = H_i^{it} + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(q^{it}(x_{i-1/2}, t) - q^{it}(x_{i+1/2}, t) \right) \quad (3)$$

L'enthalpie de la cellule i est calculée à l'itération $it + 1$ en fonction de l'enthalpie et des flux thermiques entrant et sortant à l'itération précédente it . Nous devons déterminer les flux de

chaleur entrant et sortant en fonction des conductibilités thermiques des cellules adjacentes. Le flux thermique est donné par $q\left(x_{i-\frac{1}{2}}, t\right) = -\lambda_{s,l,g} \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x}$ où la conductivité thermique $\lambda_{s,l,g}$ prend successivement la valeur nécessaire en fonction de la phase considérée : solide, liquide et gaz. Il est à noter qu'une discontinuité d'enthalpie apparaît lors du changement de phase : solide-liquide et liquide-gaz pour l'argent et solide-gaz pour l'oxyde de cadmium. Un problème subsiste à l'interface entre deux phases différentes que nous appellerons pour l'exemple l et s . La résistance thermique de ces deux demi cellules est donc $R = R_l + R_s$ en introduisant les conductivités thermiques pour une surface de contact de 1 m^2 , on obtient ainsi $R = \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{1}{\lambda_l} + \frac{1}{\lambda_s} \right)$. Finalement on obtient pour le flux thermique $q\left(x_{i-\frac{1}{2}}, t\right) = -2 \frac{\lambda_s \lambda_l}{\lambda_s + \lambda_l} \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x}$. Nous pouvons donc noter que si les deux cellules adjacentes sont dans la même phase, on obtient la formule précédente du flux.

A l'instant $t = 0 \text{ s}$, le matériau contenu dans l'ensemble des cellules se trouve sous la forme solide fixé à la température de 300 K , le flux Φ est apporté à la première cellule à la position 0 (Figures 1 et 2). Lorsque l'énergie apportée à la première cellule est suffisante la matière, argent ou oxyde de cadmium, contenue dans cette cellule devient respectivement liquide ou gazeuse. A ce moment-là, la position de l'interface solide-liquide ou solide-gaz passe à la position Δx . Dans le cas de l'argent, lorsque l'énergie apportée à la première cellule est suffisante pour transformer le liquide en gaz la position de l'interface liquide-vapeur passe alors à la position Δx . Durant ce temps, l'interface solide liquide se décale vers les positions plus élevées. Les positions de ces interfaces seront données au cours du temps sur les Figures 8 et 11 au paragraphe §3. Le flux Φ est apporté à la surface au travers du spot cathodique à la cellule appelée *iflux*. Initialement *iflux* correspond à la première cellule *iflux* = 1 dès que l'enthalpie contenue dans la cellule *iflux* a atteint l'enthalpie de vaporisation, on considère que le flux est appliqué à la cellule suivante. Il est à noter que la taille de la cellule doit être suffisamment grande pour que durant le pas de temps Δt considéré, l'énergie apportée ait le temps de diffuser dans la cellule. Sinon la cellule est vaporisée immédiatement, ce qui n'a pas de sens physique. Sur la figure suivante (Figure 3), on observe des « escaliers » dans les résultats. En effet, il faut un certain temps pour que l'enthalpie apportée par les flux thermiques soit suffisante pour liquéfier totalement la cellule. On retient comme position le premier point de la cellule suivante lorsque la liquéfaction de la cellule précédente est totale.

2.2. Les grandeurs thermodynamiques et de transport utilisées pour le modèle

Pour un pied d'arc cathodique, nous retenons des valeurs de flux thermique à la surface Φ apporté par le pied d'arc comprises entre 1.10^{11} W/m^2 et 5.10^{12} W/m^2 [12] pour un temps de chauffage t_{max} de l'ordre de 100 ns que nous assimilons à la durée de vie maximale d'un spot [13] ; l'épaisseur totale l de l'électrode est fixée à $20 \text{ }\mu\text{m}$. Compte tenu des contraintes numériques de la méthode de Godunov (§ 2.1), un bon compromis entre le pas de temps et la taille de la cellule doit être trouvé. Nous avons choisi 400 cellules et un pas de temps de 5.10^{-12} s . Les données de base, à savoir les températures des changements de phases, l'évolution de l'enthalpie et de la conductivité thermique en fonction de la température, sont

nécessaires pour alimenter le modèle. La connaissance de l'enthalpie est nécessaire pour le solide, le liquide et le gaz, alors que celle de la conductivité thermique est nécessaire uniquement pour le solide et le liquide. En effet, dès que la matière contenue dans une cellule est vaporisée, le flux thermique surfacique provenant du pied d'arc Φ est appliqué à la cellule suivante. Les grandeurs thermodynamiques (Tableau 1) ont été obtenues à partir des tables de données de [14] et de [15], nous représentons les enthalpies volumiques sur la Figure 4 en utilisant les masses volumiques de [16]. On observe (Figure 4) que les enthalpies de l'oxyde de cadmium et de l'argent sont du même ordre de grandeur à la différence des conductivités thermiques (Figure 5) où un rapport de l'ordre de cinquante les distingue ; l'argent étant bien plus conducteur thermiquement que l'oxyde de cadmium. Nous notons pour l'argent deux changements de phases : le premier étant la transition entre le liquide et le solide à 1234 K et le deuxième étant la transition entre le liquide et le gaz à 2433 K [16]. Pour ce corps pur, nous observons une faible enthalpie de liquéfaction comparée à celle de vaporisation. Pour l'oxyde de cadmium, nous notons que l'enthalpie nécessaire à la sublimation apparaissant à la température fixée à 1832 K [17] est du même ordre de grandeur que l'enthalpie de vaporisation de l'argent.

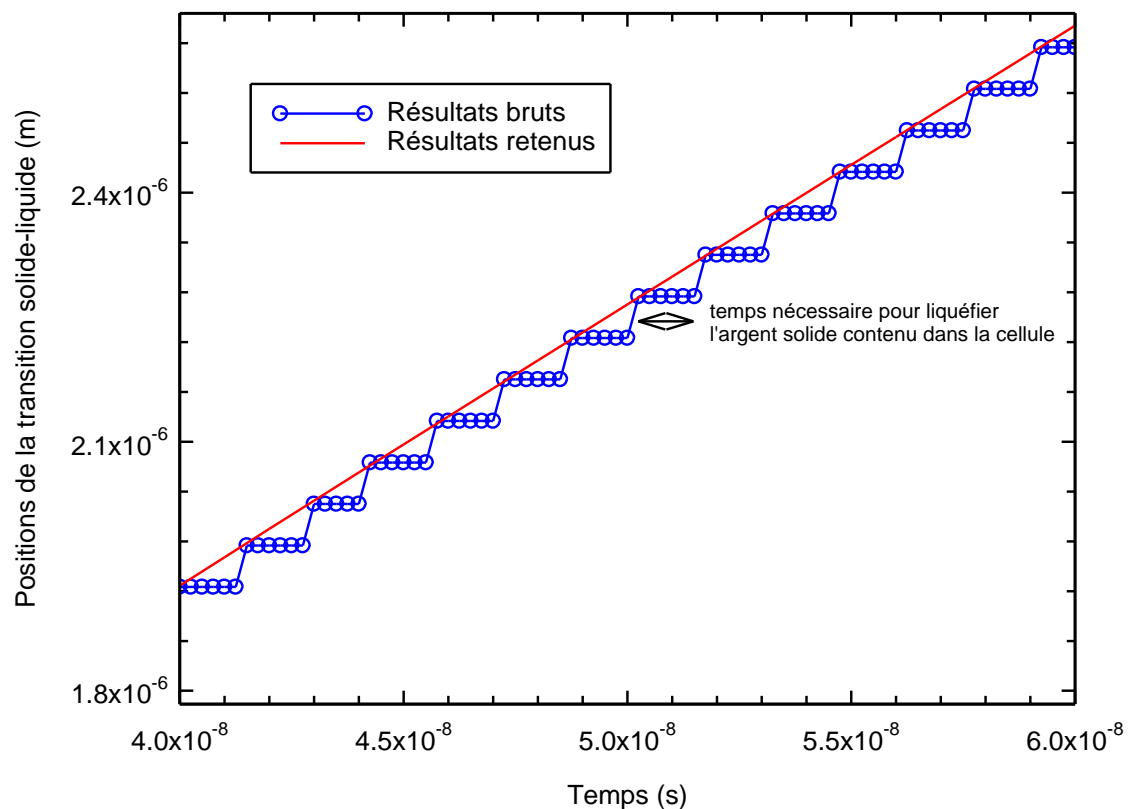


Figure 3. Position de la transition solide-liquide pour un flux thermique à la surface de l'argent de 10^{12} W/m^2 .

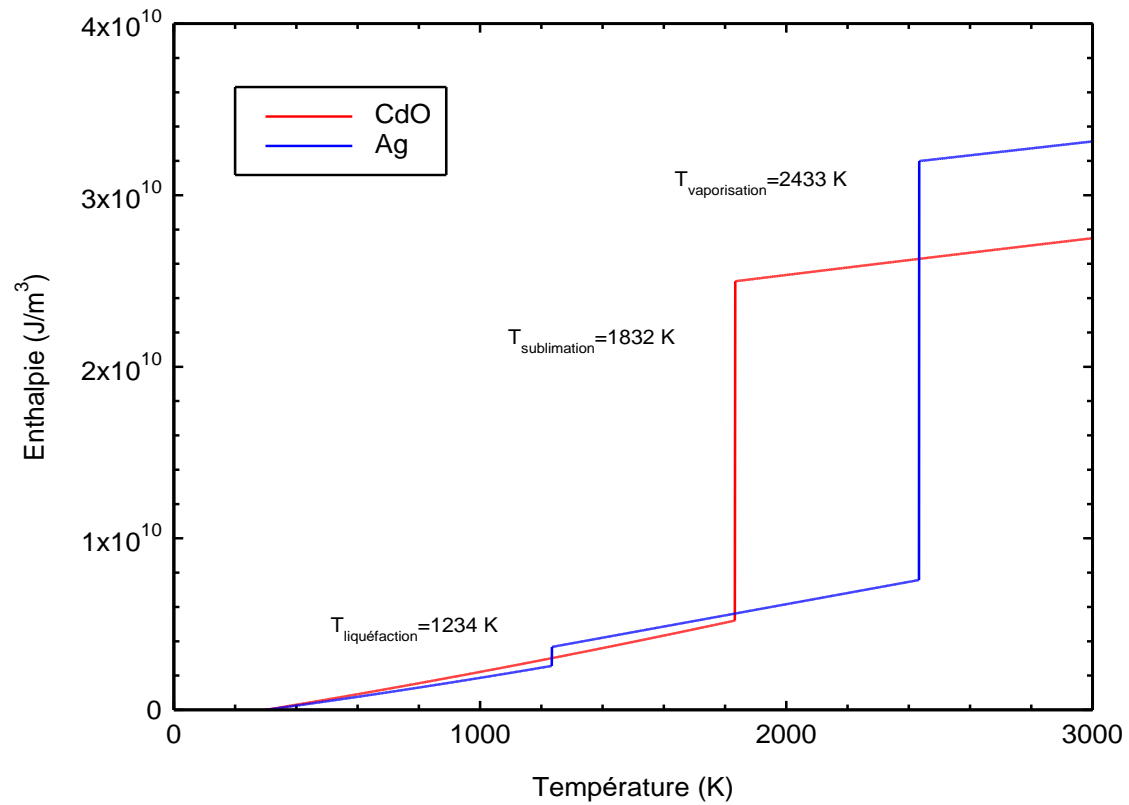


Figure 4. Evolution, en fonction de la température, de l'enthalpie volumique pour l'oxyde de cadmium et l'argent.

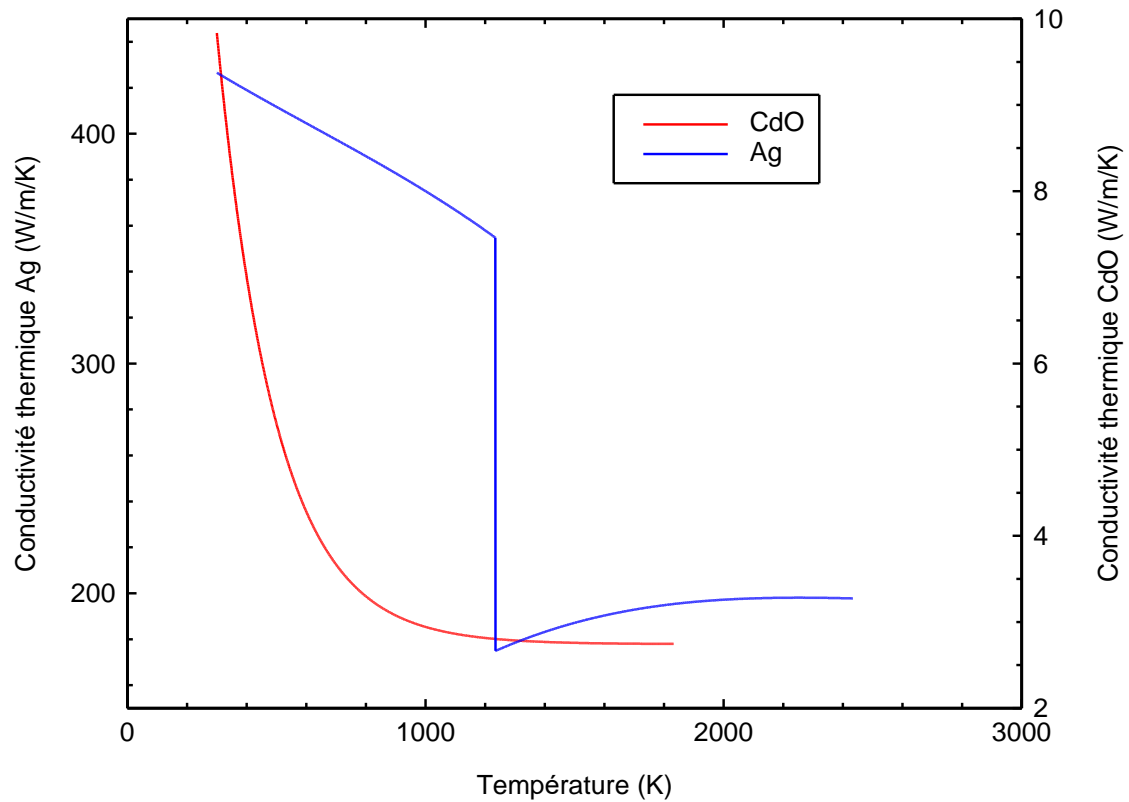


Figure 5. Evolution, en fonction de la température, de la conductibilité thermique pour l'oxyde de cadmium et l'argent.

Oxyde de Cadmium CdO		
Masse molaire 128,410 g/mol [16]		
Masse volumique 8,15 10 ⁶ g/m ³ [16]		
T (K)	H (J/m³) [15]	λ (W/m/K) [18]
300,00	1,460 10 ⁵	9,834
400,00	2,993 10 ⁸	7,003
500,00	6,041 10 ⁸	5,302
600,00	9,145 10 ⁸	4,281
700,00	1,231 10 ⁹	3,667
800,00	1,552 10 ⁹	3,298
900,00	1,880 10 ⁹	3,076
1000,00	2,213 10 ⁹	2,943
1100,00	2,552 10 ⁹	2,863
1200,00	2,897 10 ⁹	2,815
1300,00	3,247 10 ⁹	2,786
1400,00	3,603 10 ⁹	2,769
1500,00	3,964 10 ⁹	2,758
1600,00	4,331 10 ⁹	2,752
1700,00	4,704 10 ⁹	2,748
1800,00	5,083 10 ⁹	2,746
1832,00 [17]	5,205 10 ⁹	2,745
1832,00	2,498 10 ¹⁰	
1900,00	2,513 10 ¹⁰	
2000,00	2,535 10 ¹⁰	
2100,00	2,557 10 ¹⁰	
2200,00	2,579 10 ¹⁰	
2300,00	2,600 10 ¹⁰	
2400,00	2,622 10 ¹⁰	
2500,00	2,643 10 ¹⁰	
2600,00	2,665 10 ¹⁰	
2700,00	2,686 10 ¹⁰	
2800,00	2,707 10 ¹⁰	
2900,00	2,728 10 ¹⁰	
3000,00	2,749 10 ¹⁰	

Argent Ag		
Masse molaire 107,87 g/mol [16]		
Masse volumique 1,05 10 ⁷ g/m ³ [16]		
T (K)	H (J/m³) [14]	λ (W/m/K) [19]
300	3,086 10 ⁶	426,525
400	2,494 10 ⁸	418,973
500	5,023 10 ⁸	411,688
600	7,620 10 ⁸	404,547
700	1,028 10 ⁹	397,430
800	1,301 10 ⁹	390,214
900	1,581 10 ⁹	382,778
1000	1,867 10 ⁹	375,000
1100	2,160 10 ⁹	366,758
1200	2,460 10 ⁹	357,930
1234 [14]	2,563 10 ⁹	354,773
1234	2,956 10 ⁹	174,872
1300	3,881 10 ⁹	178,464
1400	4,207 10 ⁹	183,194
1500	4,532 10 ⁹	187,125
1600	4,858 10 ⁹	190,326
1700	5,183 10 ⁹	192,866
1800	5,509 10 ⁹	194,813
1900	5,834 10 ⁹	196,235
2000	6,160 10 ⁹	197,200
2100	6,485 10 ⁹	197,777
2200	6,811 10 ⁹	198,035
2300	7,136 10 ⁹	198,042
2400	7,462 10 ⁹	197,866
2433 [16]	7,569 10 ⁹	197,779
2433	3,199 10 ¹⁰	
2500	3,212 10 ¹⁰	
2600	3,232 10 ¹⁰	
2700	3,253 10 ¹⁰	
2800	3,273 10 ¹⁰	
2900	3,293 10 ¹⁰	
3000	3,313 10 ¹⁰	

Tableau 1 : Enthalpie, masse molaire, masse volumique et conductibilité thermique utilisées dans nos calculs ainsi que leurs sources.

La Figure 5 représente la conductivité thermique pour les matériaux étudiés [18] et [19] (Tableau 1). L'argent comportant deux changements de phase, nous observons deux comportements différents de la conductibilité thermique. Dans la phase solide, la conductivité

thermique décroît régulièrement jusqu'à la décroissance brutale ayant lieu au changement de phase à 1234 K. Dans la phase liquide, la conductivité thermique croît régulièrement jusqu'à atteindre un palier autour de 200 W/m/K. La conductivité thermique de l'oxyde de cadmium est fortement décroissante aux températures inférieures à 700 K et atteint un palier au-dessus de 1200 K autour de 2,75 W/m/K.

3. Résultats

Sur la Figure 6, nous avons représenté la variation de l'enthalpie le long de l'électrode au cours du temps lorsque la surface cathodique est soumise à un flux thermique surfacique Φ de 10^{12} W/m² dans le cas de l'argent. Au début du chauffage, l'énergie n'est pas suffisante pour liquéfier le solide : l'enthalpie est inférieure à $2,56 \cdot 10^9$ J/m³. Il faut atteindre environ 1 ns avant que le liquide apparaisse puis environ 5 ns pour que le premier gaz apparaisse. A 40 ns au point situé à 10^{-5} m, l'enthalpie commence à augmenter. Ainsi au cours du chauffage, l'enthalpie se répartit bien le long de l'électrode car la conductibilité de l'argent est élevée (Figure 5).

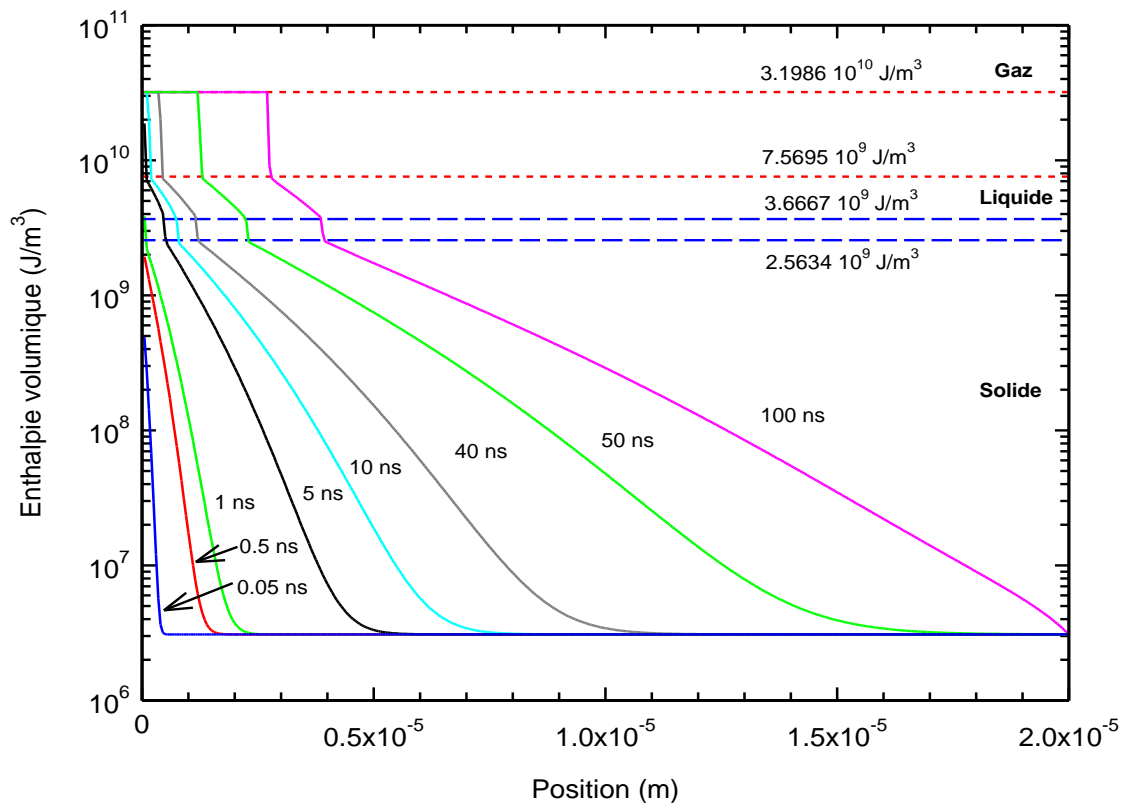


Figure 6. Evolution de l'enthalpie dans chaque phase au cours du temps en fonction de la position Z pour une électrode en argent soumise à un flux thermique à la surface de l'argent de 10^{12} W/m².

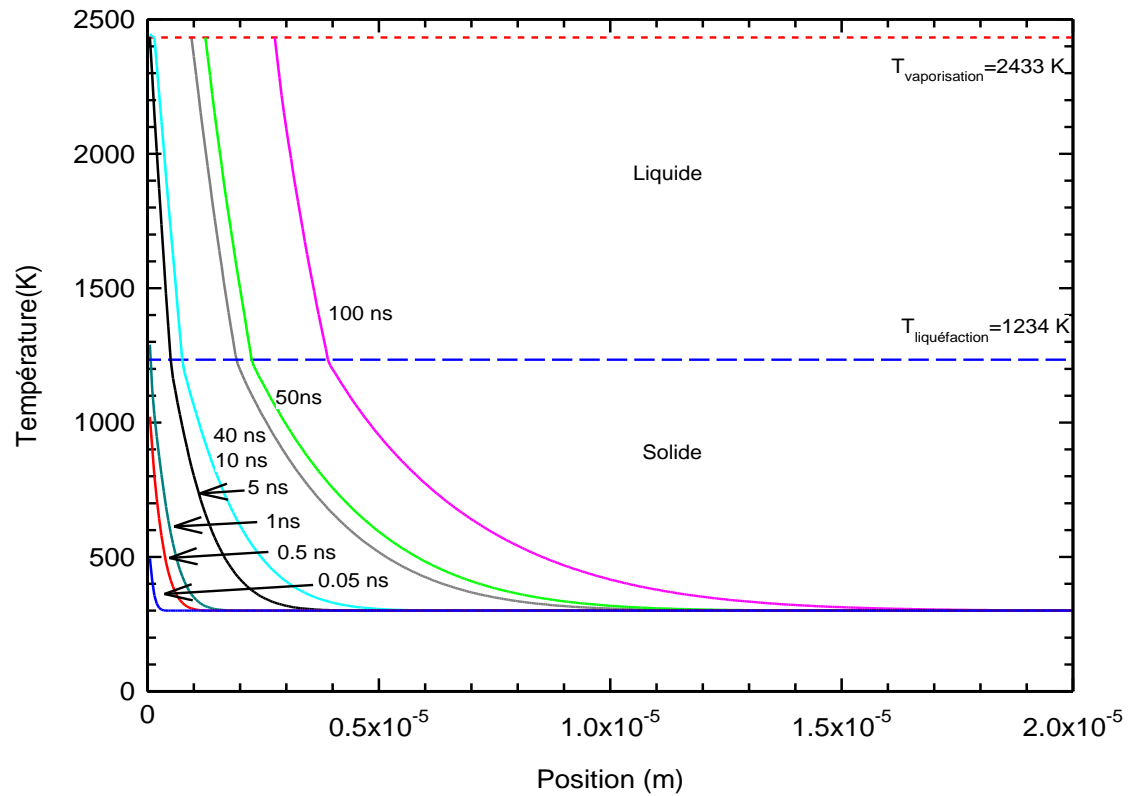


Figure 7 : Evolution de la température le long de l'axe Z, à différents instants pour une électrode en argent soumise à un flux thermique surfacique de 10^{12} W/m^2 .

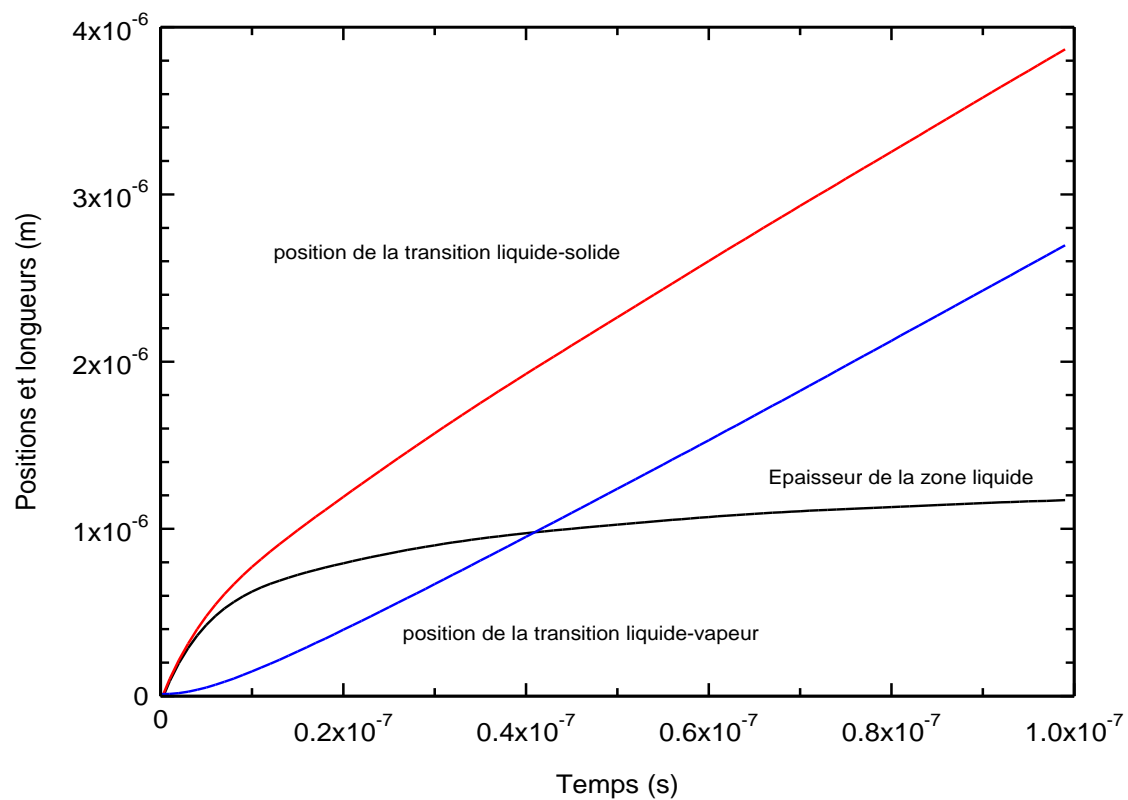


Figure 8. Position de la transition liquide-vapeur, de la transition liquide-solide et de l'épaisseur de la zone liquide en fonction du temps pour une électrode en argent soumise à un flux thermique surfacique de 10^{12} W/m^2 durant 100 ns.

Sur la Figure 7, nous avons représenté l'évolution de la température le long de l'axe Z, à différents instants pour une électrode en argent soumise un flux thermique surfacique Φ de 10^{12} W/m². La température initiale étant fixée à 300 K, on observe que cette température est uniformément répartie au début du chauffage. Puis au cours du temps, cette température augmente. Les températures entre les instants 40 et 50 ns sont très proches bien que les courbes d'enthalpie correspondantes soient éloignées (Figure 6). En prenant en compte l'enthalpie volumique spécifique de la Figure 4, la pente de la courbe de l'enthalpie spécifique étant forte pour le solide, une variation faible de la température provoque une forte variation de l'enthalpie. Les mêmes remarques pour les temps d'apparition du liquide et du gaz peuvent être faites comme précédemment. La température décroît de façon presque rectiligne dans la partie liquide alors que dans le solide elle décroît rapidement puis plus lentement. Cette décroissance est similaire aux processus classiques de diffusion thermique dans les solides. Au début du chauffage, seules les premières cellules voient leur température augmenter puis toutes les autres cellules sont touchées. Ainsi, au cours du chauffage, la température augmente le long de l'axe.

Le spot cathodique ayant tendance à bouger, une évaluation de l'épaisseur de matière vaporisée ainsi que l'épaisseur de liquide pouvant être éjecté est primordiale pour évaluer le taux d'érosion. La Figure 8, représente l'épaisseur de liquide ainsi que les positions des transitions solide-liquide et liquide-gaz en fonction du temps. Cette dernière position pouvant être assimilée à l'épaisseur de matière vaporisée. La figure montre que la phase liquide apparaît avant la phase gazeuse. L'augmentation de l'épaisseur de liquide se fait très rapidement durant les premiers instants compris entre 0 et 10 ns puis l'augmentation de l'épaisseur de liquide est moins rapide. Après le début de la vaporisation, l'augmentation de l'épaisseur de matière vaporisée est très faible au début puis augmente de façon linéaire.

Sur la Figure 9 nous avons représenté la variation de l'enthalpie le long de l'électrode au cours du temps dans le cas de l'oxyde de cadmium. L'oxyde de cadmium ne se liquéfiant pas, il passe de l'état solide à l'état gazeux si l'enthalpie est supérieure à $2,49 \cdot 10^9$ J/m³. Au début du chauffage, l'énergie n'est pas suffisante pour sublimer le solide. Nous rappelons que la conductibilité thermique de l'oxyde de cadmium est très faible alors que celle de l'argent est élevée (Figure 5). A 40 ns au point situé à 10^{-5} m, l'enthalpie n'a pas augmenté. Ainsi au cours du chauffage, qui est limité en temps à 100 ns, l'enthalpie ne se répartit pas le long de l'électrode.

Sur la Figure 10, nous avons représenté l'évolution de la température le long de l'axe Z, à différents instants pour l'oxyde de cadmium. La température initiale étant fixée à 300 K, on observe que cette température est uniformément répartie au début du chauffage. La température augmente uniquement dans les premières cellules comprises entre 0 et 4 μ m. Les autres cellules restent à la température de 300 K. La transition entre la zone chaude et la zone froide est abrupte bien plus que dans le cas de l'enthalpie où l'on peut observer une augmentation de l'enthalpie dans des zones plus éloignées jusqu'à 5 μ m (Figure 9). On explique cette différence en prenant en compte l'enthalpie volumique spécifique de la Figure 4. En effet, la température considérée se situe dans la zone de la pente de la courbe d'enthalpie spécifique la plus forte. La conductibilité thermique de l'oxyde de cadmium étant faible par rapport à celle de l'argent (Figure 5), la température n'augmente pas le long de l'axe à la différence de l'argent.

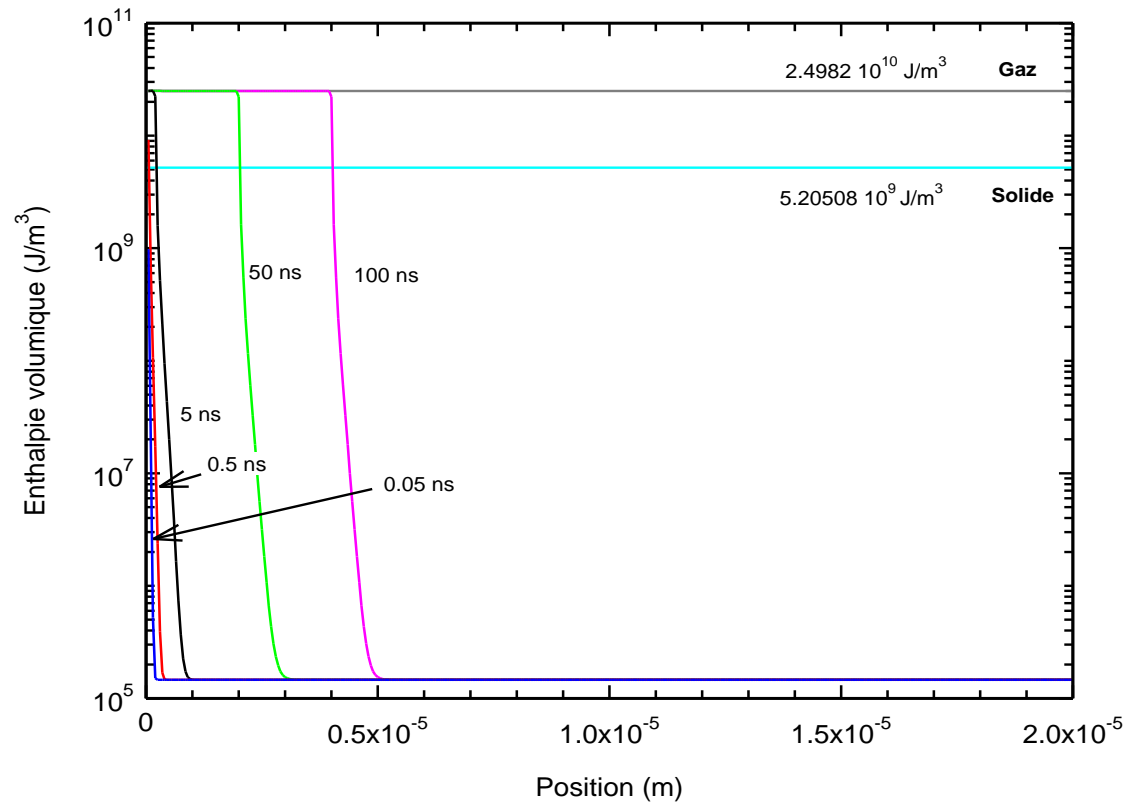


Figure 9. Evolution de l'enthalpie dans chaque phase au cours du temps en fonction de la position Z à différents instants pour l'oxyde de cadmium soumis à un flux thermique de 10^{12} W/m² durant 100 ns.

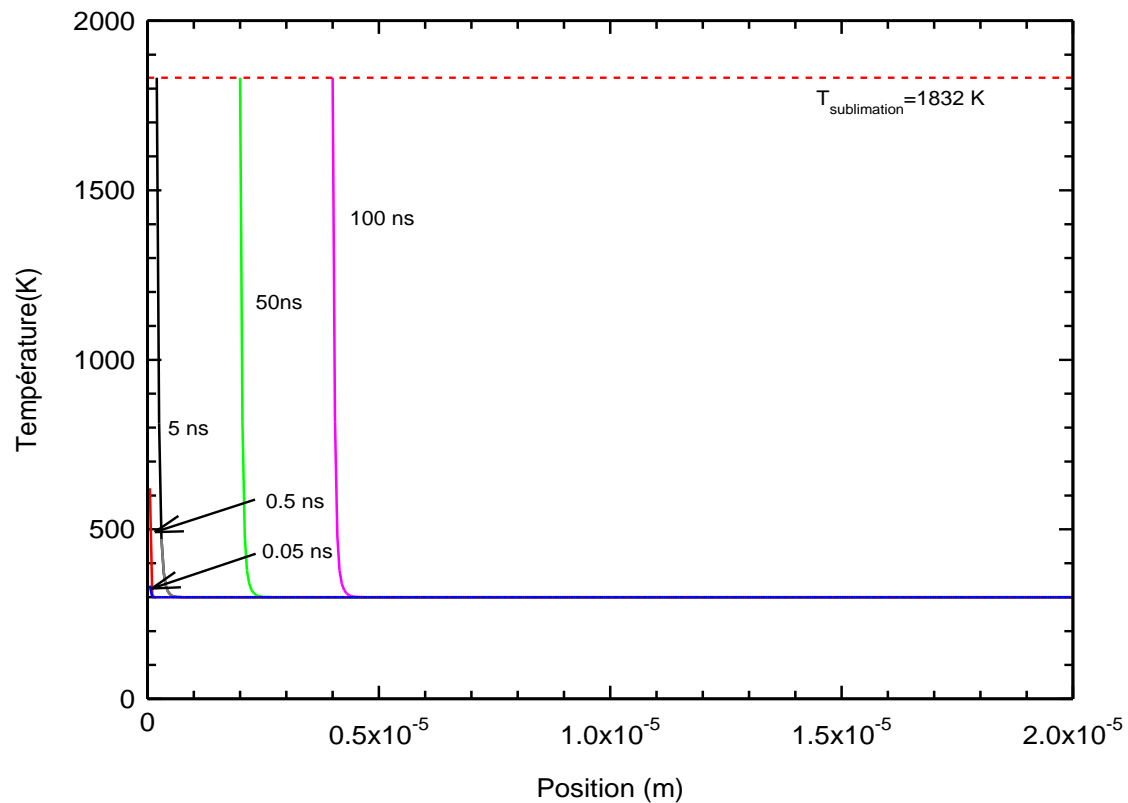


Figure 10 : Evolution de la température le long de l'axe Z, à différents instants pour l'oxyde de cadmium soumis à un flux thermique surfacique de 10^{12} W/m² durant 100 ns.

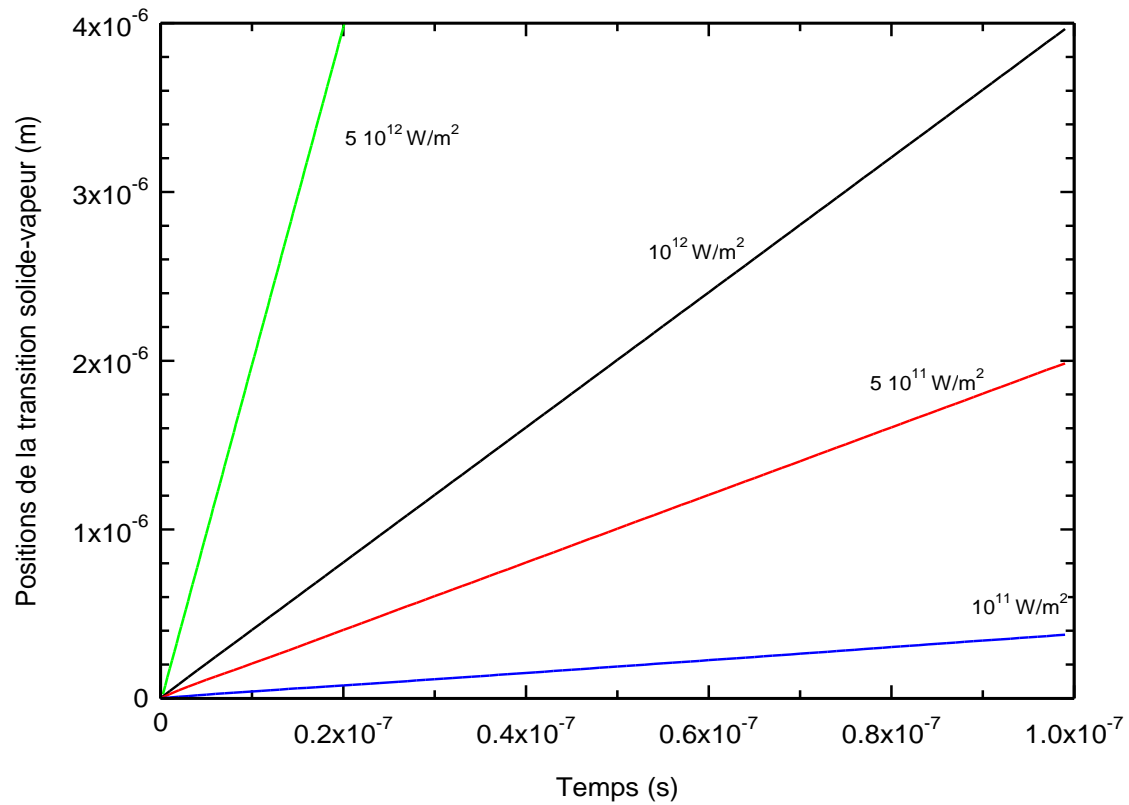


Figure 11 : Positions de la transition entre le liquide et la vapeur pour l'oxyde de cadmium et pour plusieurs flux thermiques surfaciques ($1 \cdot 10^{11}$ à $5 \cdot 10^{12} \text{ W/m}^2$).

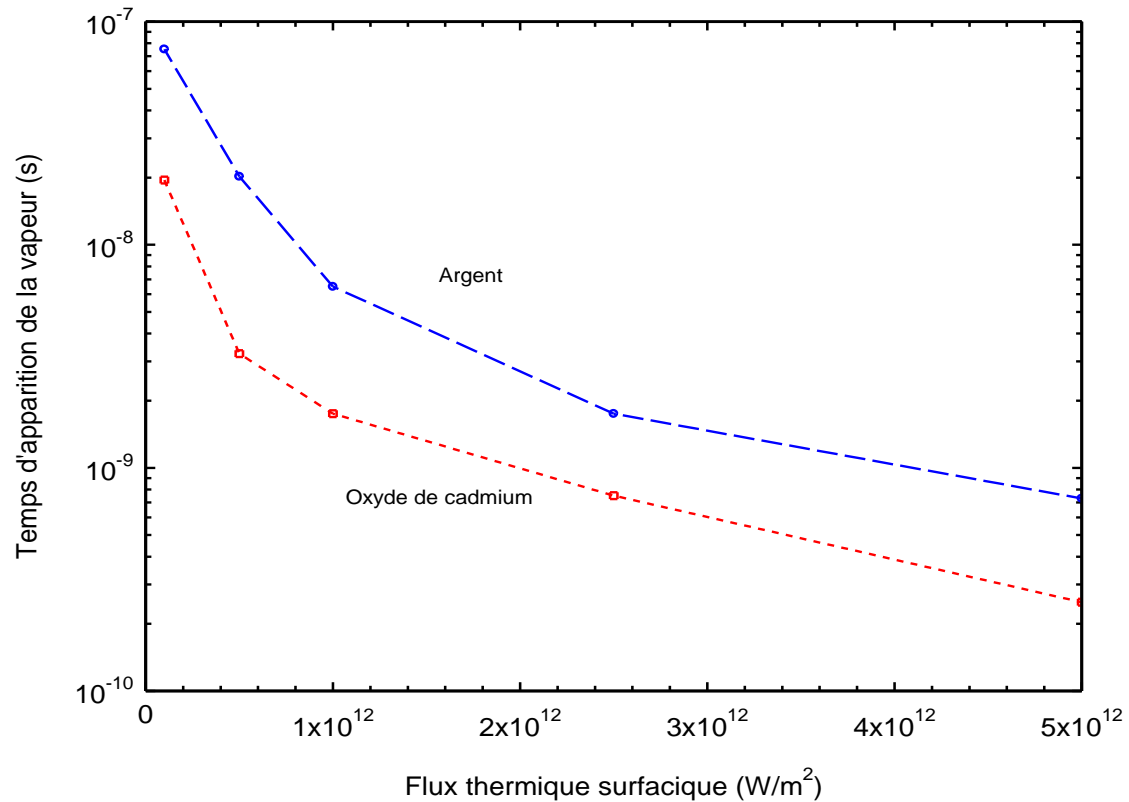


Figure 12 : Temps d'apparition de la première cellule vaporisée en fonction du flux thermique surfacique pour l'argent et l'oxyde de cadmium.

Sur la Figure 11, nous représentons l'épaisseur de matière vaporisée pour différents flux thermiques appliqués à la surface. Pour tous les flux, l'ablation est linéaire dans le temps. L'ablation est d'autant plus rapide que le flux est important. Pour le flux de 10^{12} W/m², toute la matière considérée est vaporisée en moins de 100 ns.

Pour une durée de chauffage t_{arc} de 100 ns, les temps d'apparition de la phase vapeur dépendent de la nature du matériau et du flux thermique surfacique Φ comme le montre la Figure 12. Les valeurs des temps d'apparition de la vapeur sont d'autant plus petites que celle du flux thermique surfacique est grande. Le temps d'apparition de la vapeur de l'oxyde de cadmium est inférieur à celui de l'argent.

Conclusion et perspectives

Les travaux de recherche sur les oxydes destinés aux contacts électriques sont rares ; compte tenu de la complexité des phénomènes mis en jeu, les résultats publiés sont partiels. De plus, ces derniers dépendent de nombreux paramètres tels que la nature du circuit (résistif ou inductif), le type d'arc (d'ouverture ou de fermeture), le type de courant (DC ou AC) et son intensité (faible ou forte) ... Les résultats de la simulation dépendent de la valeur de la densité du flux thermique arrivant sur la surface de l'électrode et de la nature du matériau (dont la connaissance des propriétés thermo-physiques sont primordiales pour mener à bien l'étude).

Les résultats obtenus montrent une nette différence de comportement entre les deux matériaux choisis. Les épaisseurs ablatées croissent linéairement en fonctions du flux quel que soit le matériau. L'apparition de la vapeur dépend de la conductivité thermique, l'argent étant bon conducteur thermique, il diffuse la chaleur plus facilement alors que pour l'oxyde de cadmium qui est un mauvais conducteur thermique, la chaleur est moins diffusée. Ainsi pour un même flux surfacique, on dépasse plus facilement l'enthalpie de vaporisation pour l'oxyde de cadmium que pour l'argent dans les premières cellules.

Le travail présenté constitue une étape essentielle à la compréhension des phénomènes thermiques ayant lieu dans les contacts électriques des appareils d'interruption de courant. Pour compléter ce travail, il sera nécessaire de prendre en compte les variations des données thermodynamiques en fonction des contraintes thermodynamiques, les réactions chimiques en fonction de l'atmosphère ambiante, la prise en compte de la pureté de l'oxyde (naturel ou synthétique)...

Cependant, des précautions doivent être prises quant à l'interprétation des résultats. En effet nous supposons que l'érosion n'a lieu uniquement que par évaporation ou par sublimation. Ceci peut être vrai que pour des arcs courts et ayant des courants faibles. Dans de nombreux cas des explosions de surface et des départs de gouttelettes peuvent avoir lieu. Nous n'avons pas pris en compte la variation de la température d'évaporation en fonction du champ électrique [20] ni en fonction de la pression [21]. Le champ électrique étant créé par la zone de charge d'espace au-devant de la surface de l'électrode, la pression étant produite par une densité de courant importante et par les forces de Laplace ainsi générées [9]. Nous supposons aussi que la durée des phénomènes liés à l'arc est suffisamment grande par rapport au temps

de relaxation des processus d'échange thermique mais que la diffusivité dans le gaz environnant est lente en raison de la différence de viscosité du plasma en interaction avec la surface et celle du gaz environnant. Un modèle plus complet doit être développé afin de conforter ces hypothèses.

De plus, puisque dans la majorité des cas, les oxydes sont noyés dans une matrice d'argent, un modèle de conductibilité thermique basé sur les phonons et le gaz électronique devra être développé. Une fois ce travail achevé, une comparaison fine entre les oxydes (AgSnO_2 , AgZnO ,...) pourra être entreprise.

In memoriam

Les auteurs de cet article souhaitent avoir une pensée pour le Professeur André Lefort spécialiste des pieds d'arc électrique trop tôt disparu.

Références

- [1] L. Féchant, (1996) Le contact électrique (ouvrage collectif), Hermès éd., Paris.
- [2] P. G. Slade, (2014) Electrical Contacts (ouvrage collectif), CRC Press Taylor and Francis Group
- [3] G. A. Mesyats, (2013), «Ecton Mechanism of the Cathode Spot Phenomena,» IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, vol. 41, n°14, pp. 676-694, Doi : 10.1109/TPS.2013.2247064
- [4] A. Lefort et M. Abbaoui, (2012), «Theory about cathode arc root: a review,» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 29, pp. 1-16. Doi : 10.1088/1757-899X/29/1/012006
- [5] J. Rossignol, M. Abbaoui et S. Clain, (2000), «Numerical modelling of thermal ablation phenomena due to a cathodic spot,» J. Phys. D: Appl. Phys., n° 133, p. 2079–2086. Doi : 10.1088/0022-3727/33/16/322
- [6] R. Holm, (2010), Electric Contacts, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [7] M. Akbi et A. Lefort, (1998), «Work function measurements of contact materials for industrial use,» J. Phys. D: Appl. Phys., n°1 31, p. 1301–1308. Doi : 10.1088/0022-3727/31/11/003
- [8] S. Coulombe et J.-L. Meunier, (2000), «Theoretical prediction of non-thermionic arc cathode erosion rate including both vaporization,» vol. 9, p. 239–247. Doi : 10.1088/0963-0252/9/3/301
- [9] R. L. Boxman, D. M. Sanders, P. J. Martin et J. M. Lafferty, (1995), Handbook of vacuum arc science and technology, New Jersey, USA: Noyes Publications.
- [10] J. Rossignol, (2001), Théorie et simulation des phénomènes physique de pied d'arc cathodique, Thèse de Doctorat d'Université, Université Blaise Pascal, D.U. 1288.
- [11] D. Tarwidi et S. Pudjaprasetya, (2013), «Godunov method for Stefan problems with enthalpy formulations,» East Asian Journal on Applied Mathematics, vol. 3, n°12, pp. 107-119. Doi : 10.4208/eajam.030513.200513a

- [12] M. Messaad, A. W. Belarbi, M. Abbaoui et A. Lefort, (2006), «Model for a low current vacuum arc cathode region. Effect of the electronic temperature,» Acta Electrotechnica et Informatica, vol. 6, n°13, pp. 1-8.
- [13] B. Jüttner, (2001), «Cathode spots of electric arcs,» J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 34, n°1103-123. Doi : 10.1088/0022-3727/34/17/202
- [14] O. Knacke, O. Kubaschewski et K. Hesselmann, (1991), Thermochemical Properties of inorganic substances, Springer-Verlag.
- [15] I. Barin, (1993), Thermochemical Data of Pure Substances, VCH.
- [16] E. Microware, (1994), «TAPP,» ES Microware.
- [17] INCHEM, «Cadmium Oxide,» [En ligne].
Disponible : <http://www.inchem.org/documents/icsc/icsc/eics0117.htm>.
- [18] A. Lindsay et D. Parker, (2015), «Calculated transport properties of CdO: Thermal conductivity and thermoelectric power factor,» Physical Review B, vol. 92, p. 144301. Doi : 10.1103/PhysRevB.92.144301
- [19] Y. Touloukian, R. Powell, C. Ho et P. Klemens, Thermal Conductivity (Metallic Element and Alloys), Plenum, 1970.
- [20] P. André et M. Abbaoui, (2017), «Déséquilibre thermique dans un plasma d'airensemencé d'aluminium,» JITIPEE, vol. 3, n°12, pp. 1-10.
Doi : 10.18145/jitipee.v3i2.144
- [21] P. André, M. Abbaoui, A. Augéard, P. Desprez et T. Singo, (2016), «Study of Condensed Phases, of Vaporization Temperatures of Aluminum Oxide and Aluminum, of Sublimation Temperature of Aluminum Nitride and Composition in an Air Aluminum Plasma,» PCPP, vol. 36, n°14, pp. 1161-1175. Doi : 10.1007/s11090-016-9704-7