



**Introduction :**

La température de la particule peut être considérée comme uniforme. Mais ceci n'est vrai que si la particule ne comporte qu'une phase. Si la particule est fondue superficiellement, il existe une grande différence de température entre la surface et le front de fusion. Le pourcentage de matière fondue de la particule dépend de sa taille, de sa diffusivité thermique, de la chaleur latente de fusion et du temps de résidence dans le plasma.

**I-Niveau de description de l'interaction plasma-particule :**

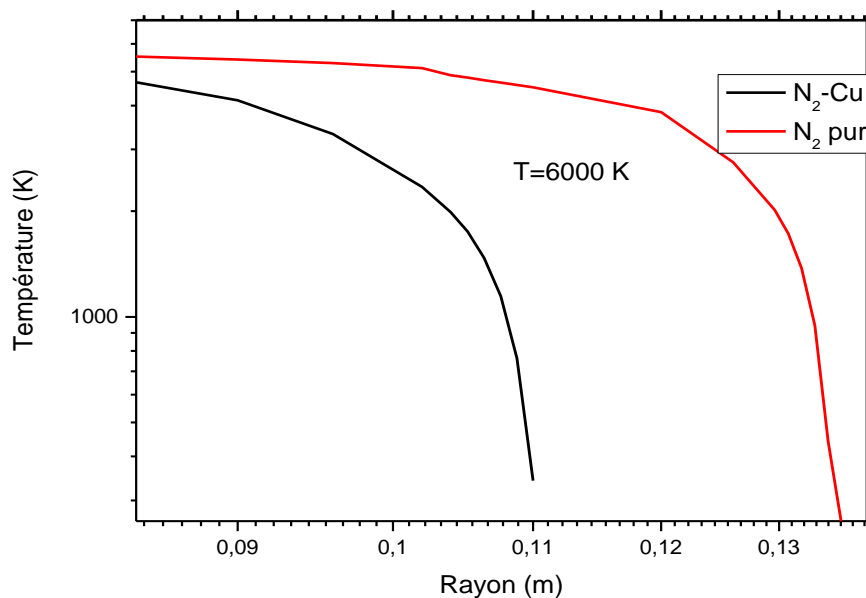
L'avalanche d'ionisation, provoqué par le champ électrique, va conduire à la création d'un plasma au dessus de la vapeur métallique ; du fait de l'augmentation rapide du degré d'ionisation du gaz environnant (argon ou azote); qui sera le siège de tous les transferts d'énergie et pour des températures comprises entre  $1357K$  et  $2840K$ , qui sont respectivement les températures de fusion et de vaporisation du cuivre, l'apparition d'une phase condensée (liquide ou solide) est possible et joue un rôle sur les valeurs des fractions massique et molaire du cuivre. En effet, ces grandeurs sont liées à la pression de vapeur saturante de cuivre.

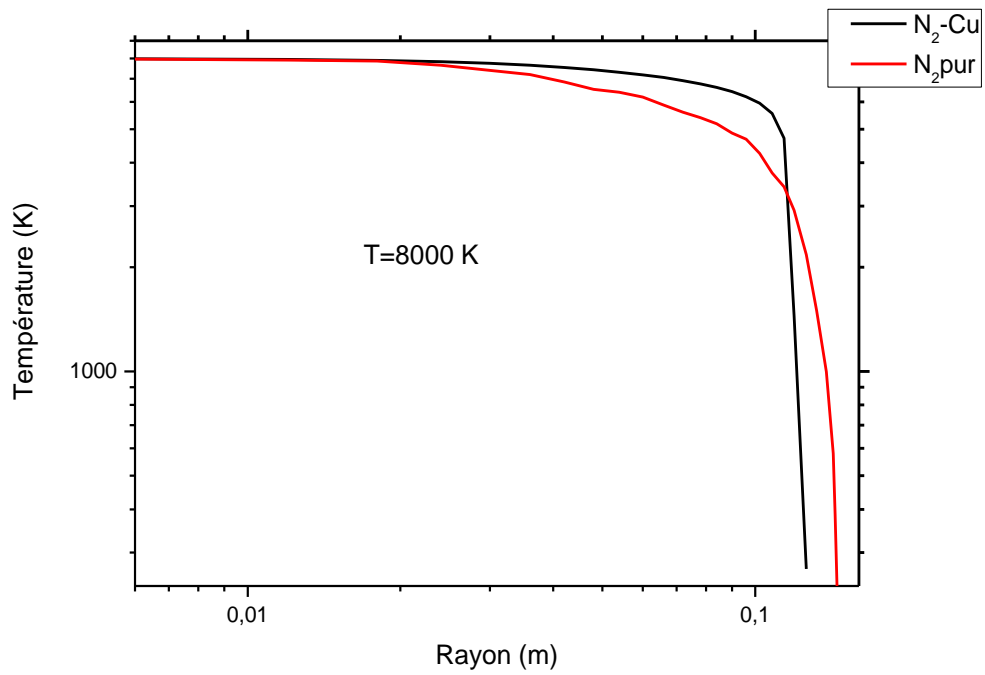
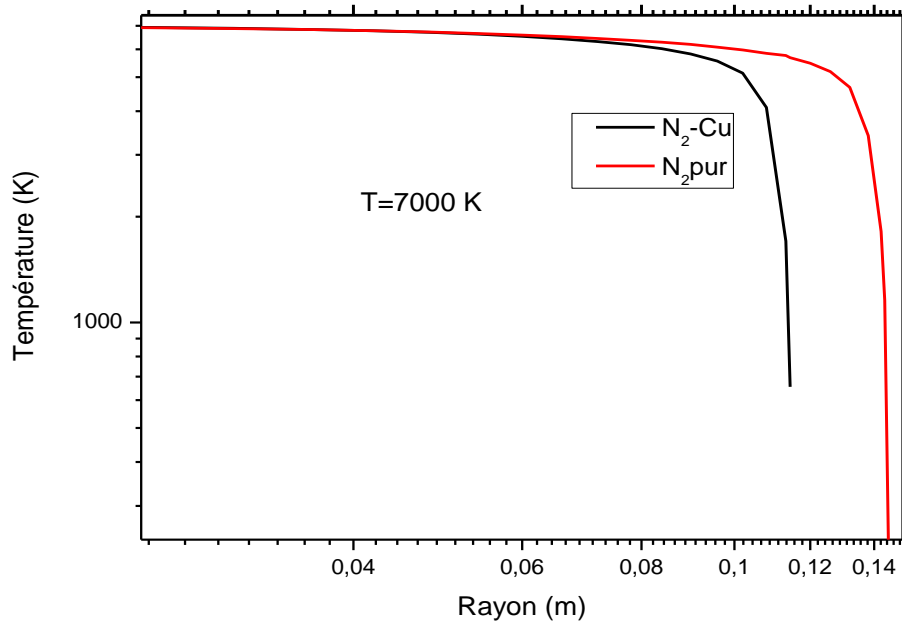
La vapeur ainsi créée interagit avec le plasma du gaz pur et il apparaît une excitation interne pouvant aller jusqu'à l'ionisation. En effet, les quelques électrons libres présents dans la vapeur éjectée sont rapidement chauffés dans l'arc jusqu'à ce que leur énergie soit suffisante pour provoquer une ionisation par collision, créant ainsi d'autres électrons. Ces collisions conduisent à une augmentation de la température et de la pression du gaz, et lorsque la densité électronique du gaz, partiellement ionisé, est suffisamment élevée, le chauffage de cette vapeur débute et le plasma devient alors le siège d'un ensemble de processus élémentaires extrêmement complexes et d'autant plus couplés entre eux. Et donc ; en fonction de la position (distance radiale) loin de l'axe de l'arc, et pour une hausse de température supérieure de celles de fusion et de vaporisation du cuivre, les différents modes de transfert communiqués à la surface de la particule sont à fort concurrence, et qu'ils durent jusqu'à la disparition de la particule, vu que :

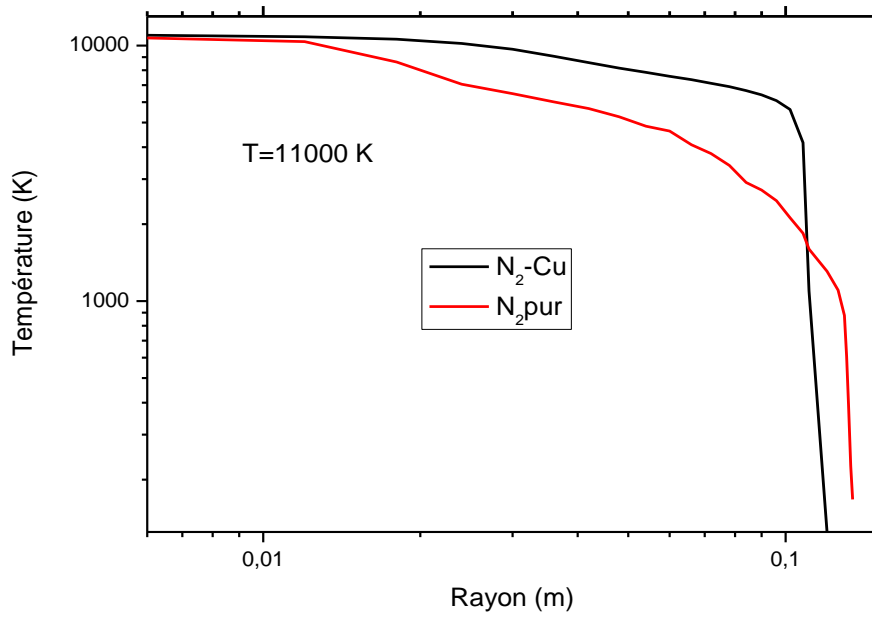
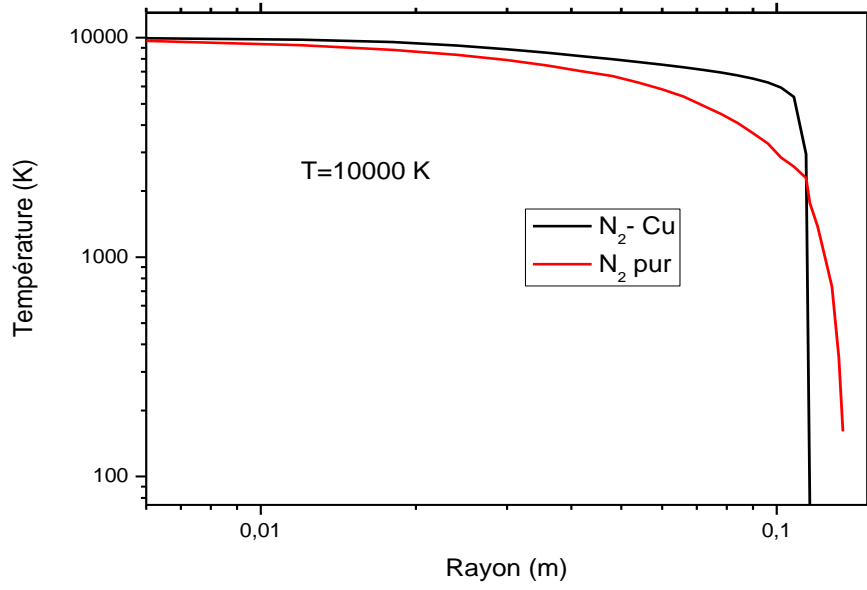
- La totalité de la matière de la particule est épuisée, et donc les transferts cessent (à cause des gradients de température très forts) ;
- Ou bien, suivant l'ordre croissant de rayon de la section modélisée de l'arc, la particule n'existe pas en raison du pourcentage très réduit de la poudre métallique injectée dans le plasma (Le modèle montre que la particule disparaît après une distance entre 0.15 m et 0.2 m selon le modèle utilisé.

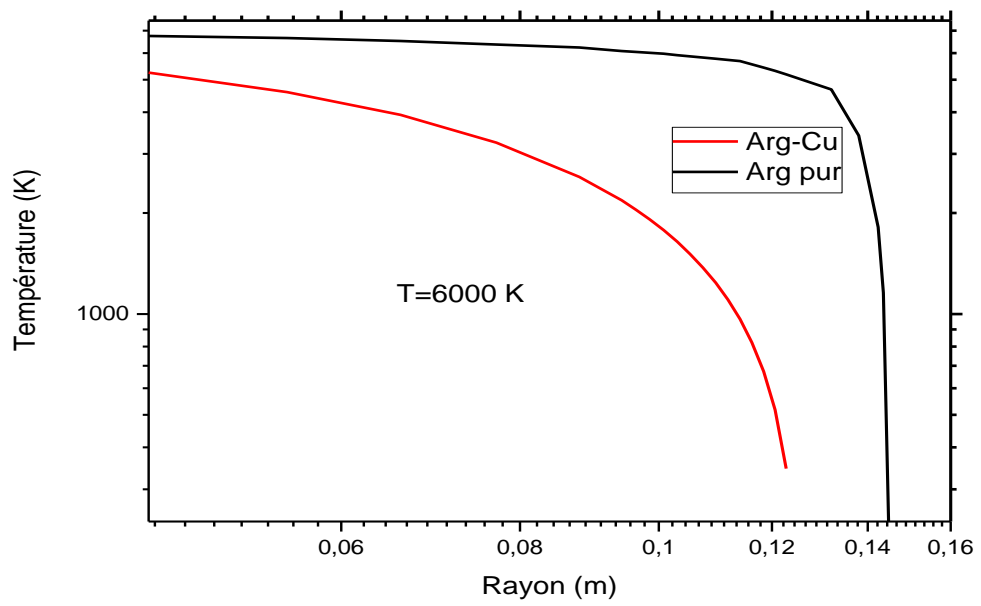
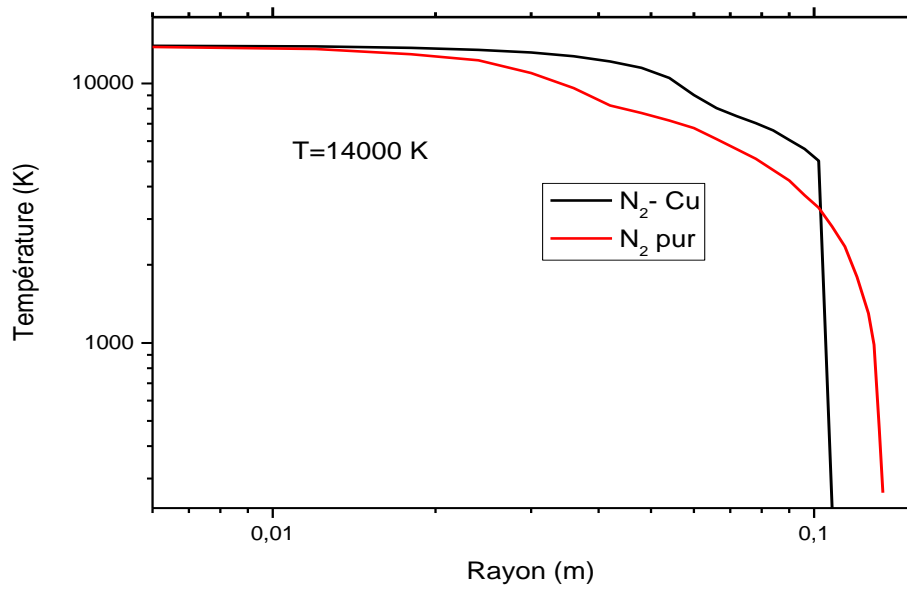
### II-Profils de température en régime stationnaire :

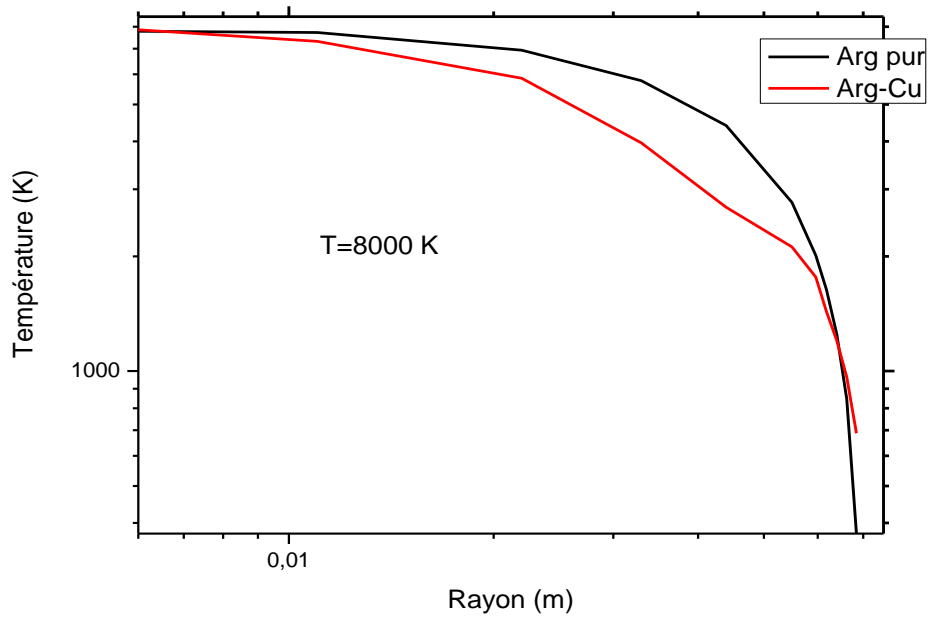
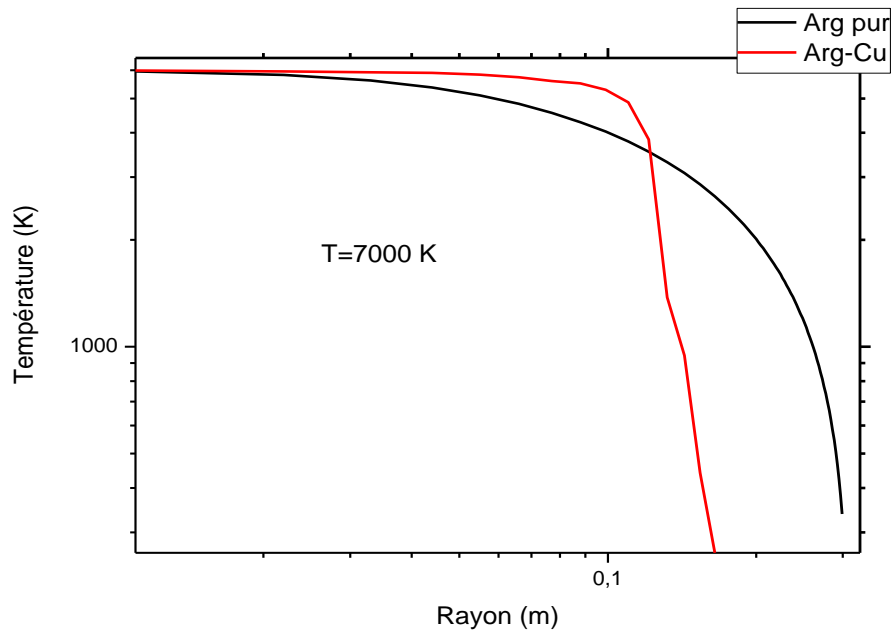
L'influence de la modification des propriétés de transfert du plasma par les vapeurs métalliques est mise en évidence sur les courbes de la figure (IV-1) donnant le profil radial de la température dans les plasmas d'argon et d'azote et en présence des vapeurs métalliques de cuivre pour un régime stationnaire.

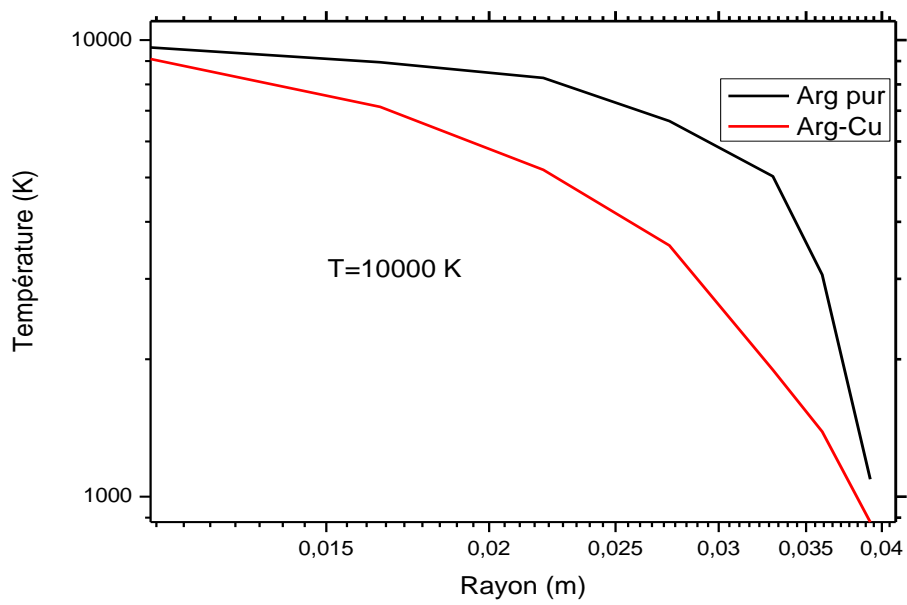
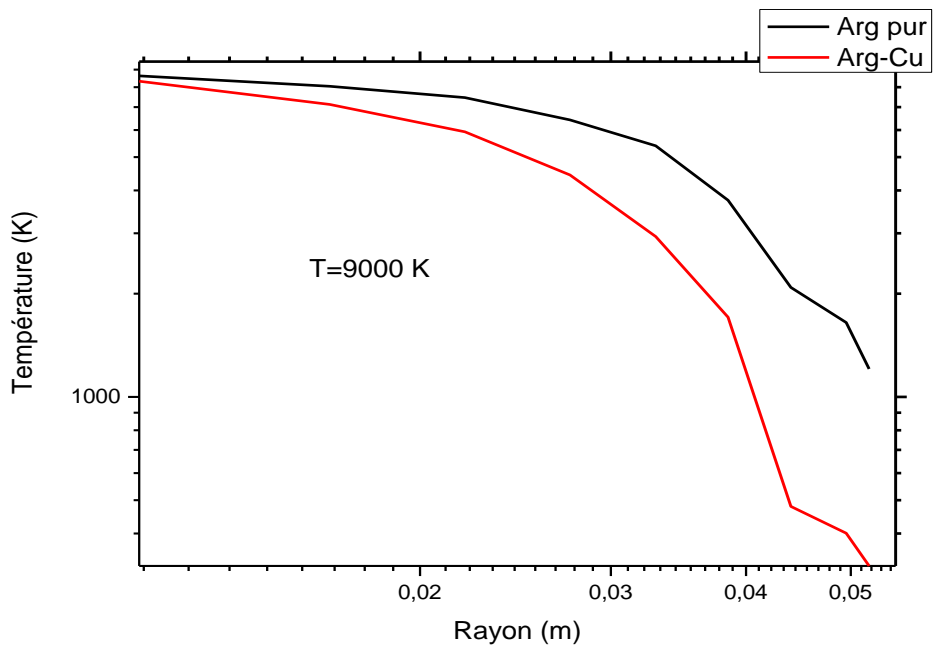




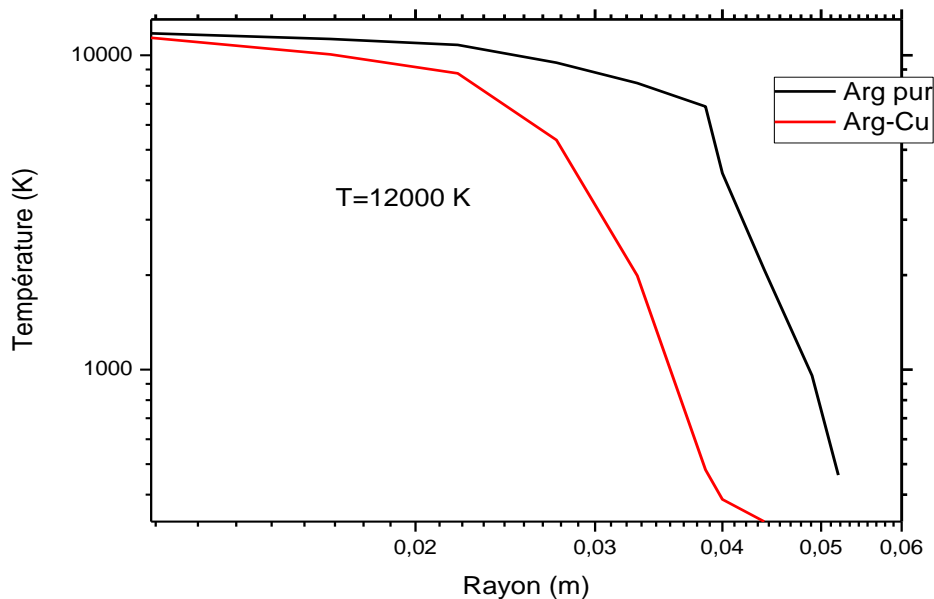












**Figure(IV-1) : Distribution radiale de la température pour plasmas d'argon et d'azote purs et en présence de vapeurs métalliques de cuivre**

Cette succession de courbes correspondant à la figure (IV-1) illustre la variation de la température en fonction de la position radiale pour différentes régions du rayon de l'arc électrique ; nous remarquons que la température est d'autant plus élevée sur l'axe et qu'elle est inversement proportionnelle au rayon de l'arc.

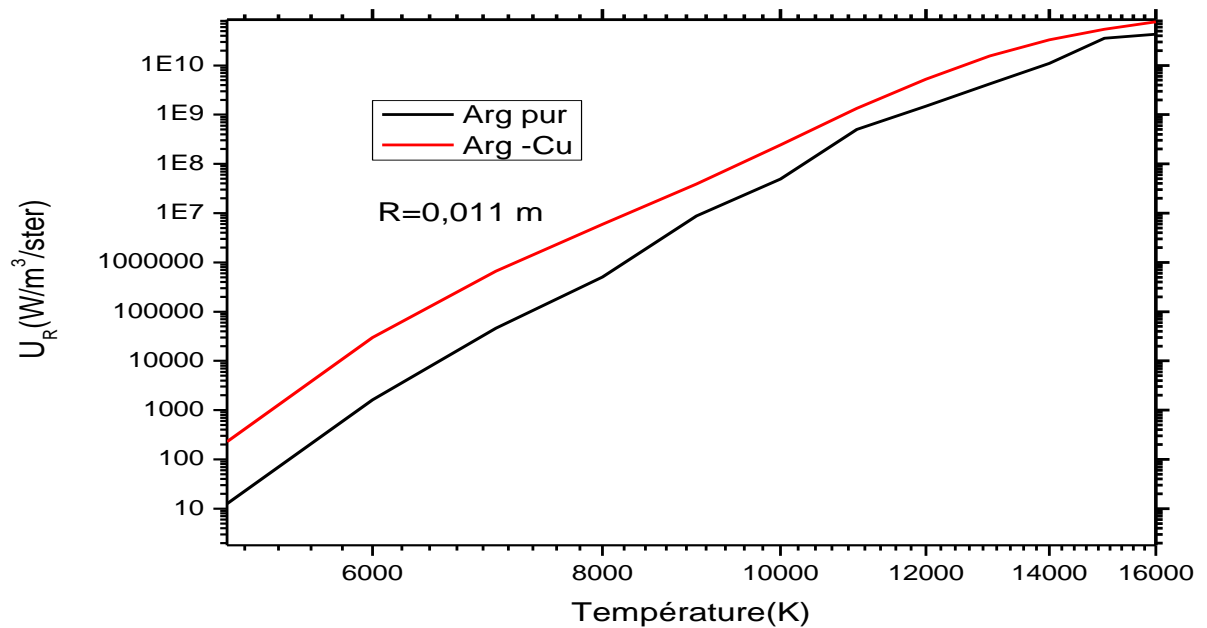
Pratiquement, et à titre de comparaison ; mettant en évidence l'influence des vapeurs métalliques de cuivre : pour chaque pair de courbes, et pour plusieurs températures allant de 6000 K à 14000 K la différence est notable entre les deux profils radiaux de température : celui du plasma pur et l'autre en présence des vapeurs métalliques de cuivre : La diminution et la décroissance de la température est plus rapide dans le mélange Arg-Cu ou N<sub>2</sub>-Cu par rapport au plasma pur.

En effet les quelques poudres fines de cuivre injectées dans le plasma entraînent l'augmentation de la conductivité électrique et la conductivité thermique et par conséquent croître de façon marquante la puissance radiative émise de faite que le rayonnement qui s'échappe du plasma comprend l'émission propre de la vapeur métallique de cuivre et celle du

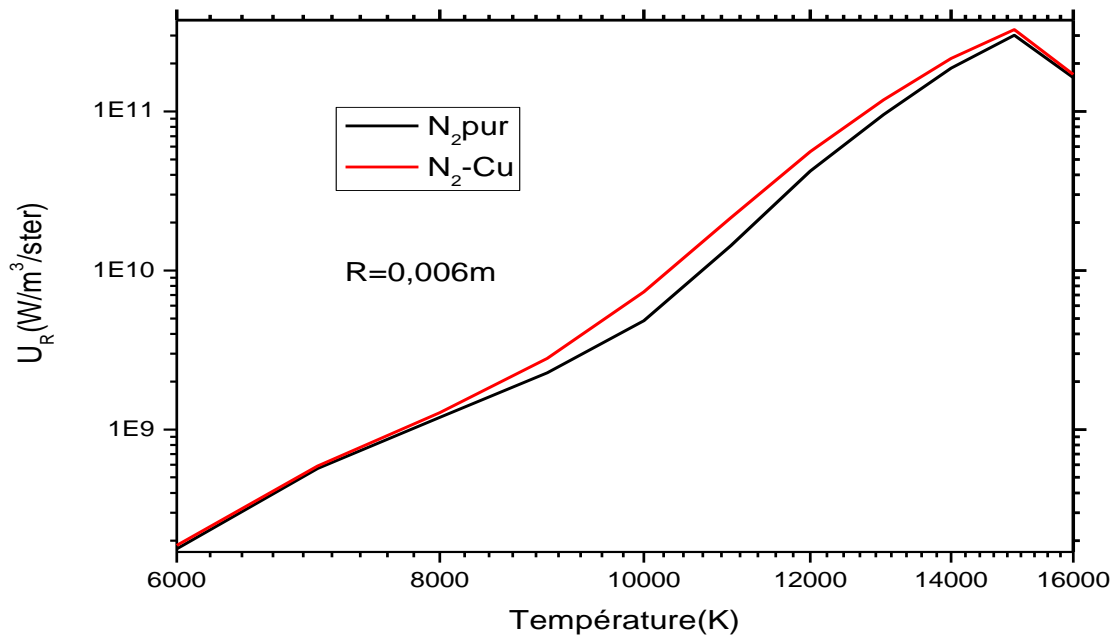
plasma pur ; cette quantité constitue un terme de perte important d'énergie engendrant l'écart relatif aux deux profils de température.

### **III -L'influence des pertes radiatives :**

L'essentiel de l'énergie dans le plasma sert à chauffer et à fondre la particule, par ailleurs les valeurs élevées des températures, les gradients rencontrés de concentrations des espèces, impliquent des transferts radiatifs importants. Le calcul de rayonnement permet d'évaluer l'importance relative de ce phénomène.



**Figure (IV-2) :L'influence des vapeurs métalliques sur le rayonnement du plasma d'argon**



**Figure (IV-3) :L'influence des vapeurs métalliques sur le rayonnement du plasma d'azote**

Le problème du rayonnement dans le plasma que l'on peut ressentir sur la figure (IV-2 et 3) comprend l'aspect du rayonnement du gaz environnant et l'émission propre de la particule en traitement.

La décroissance de la température est liée principalement aux pertes par rayonnement, à titre de quantifier l'énergie les figures (IV-4 et 5) présentent les termes de gain et de perte en énergie communiquée au cœur du plasma ; et ce fait, seulement pour la section modélisée.

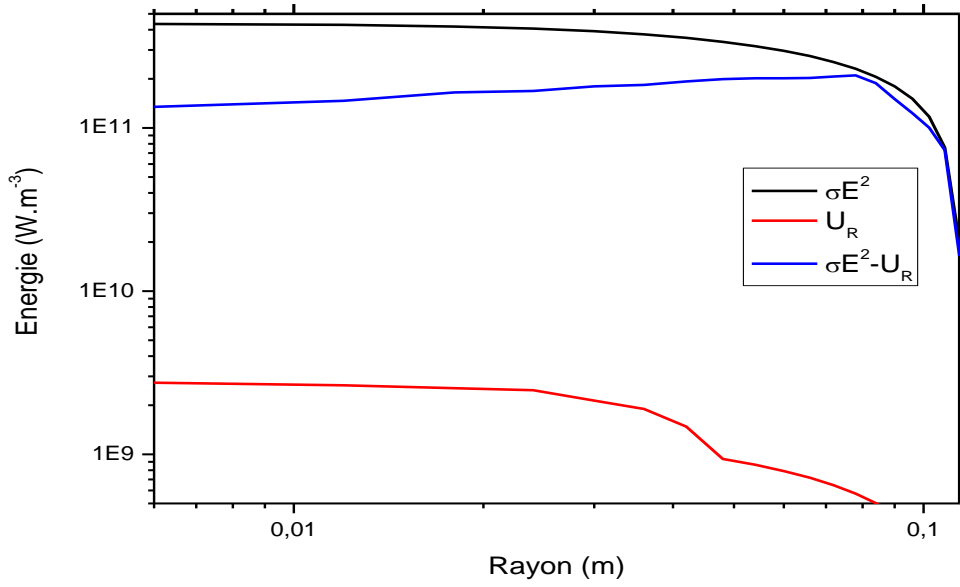


Figure (IV-4) :Les termes d'énergie pour le mélange N<sub>2</sub>-Cu

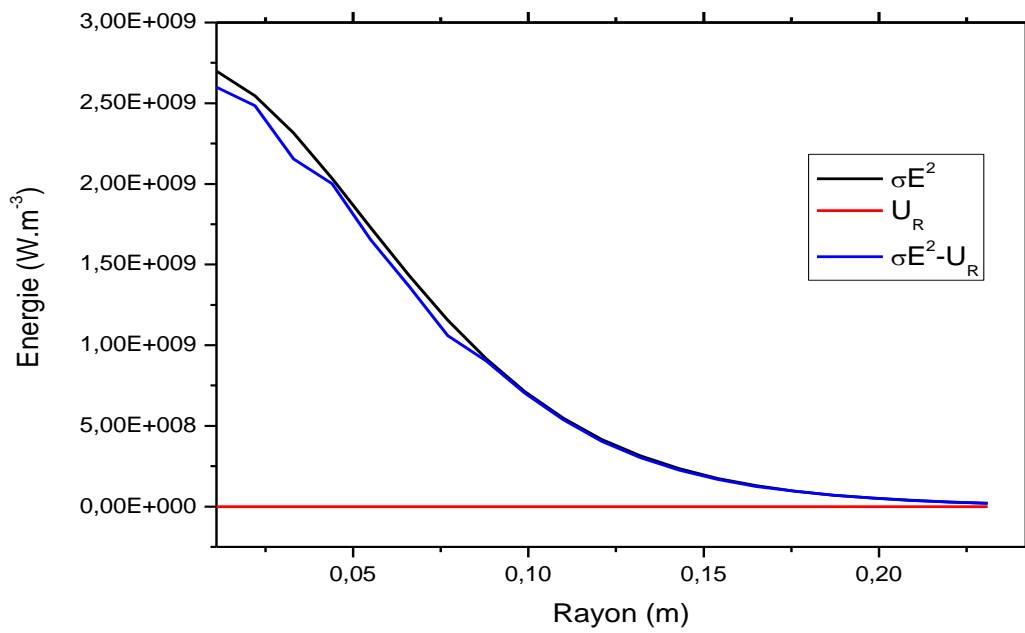


Figure (IV-5) :Les termes d'énergie pour le mélange Arg-Cu

A cause des fortes densités d'espèces excitées ou ionisées, le rayonnement émis par le plasma ou celui qui s'échappe de celui-ci est un terme d'énergie important. Cette dernière propriété si elle est qualitativement bien établie, est très difficile à quantifier. En effet les mesures diverses du rayonnement sortant du plasma ne peuvent pas donner une idée de la densité du rayonnement à l'intérieur du plasma, à cause du mécanisme d'auto-absorption.

La distribution de rayonnement émis par le plasma thermique n'est pas uniforme, on distingue :

- des régions plus chaudes de l'arc, la densité du rayonnement est très élevée. En dépit d'une forte auto-absorption, une part importante de perte d'énergie est constituée par le rayonnement. C'est l'équilibre entre la source d'énergie par effet joule et les pertes radiatives, qui déterminent la valeur de la température maximale.
- Lorsqu'on s'éloigne des régions chaudes, le mécanisme d'émission-absorption est équivalent à un transport de chaleur sur le bord de l'arc ; il existe des zones qui reçoivent plus d'énergie par absorption qu'elles n'en perdent par émission ; le rayonnement est donc considéré comme un terme de gain d'énergie, ce qui modifie partiellement la distribution de température.

#### **IV-Influence de l'intensité de courant :**

Nous avons tracé sur les figures (IV-6 et 7) les résultats expérimentaux obtenus par notre modèle pour un arc de 0.25 m pour N<sub>2</sub>-Cu et de 0.30 m pour Arg-Cu pour une température sur le bord égale à 300 K, la pression est fixée à 1 atm ; montrant l'influence de l'intensité du courant. L'augmentation de l'intensité se traduit par une plus grande quantité d'énergie à faire passer dans le plasma, il y a donc une hausse de la température axiale.

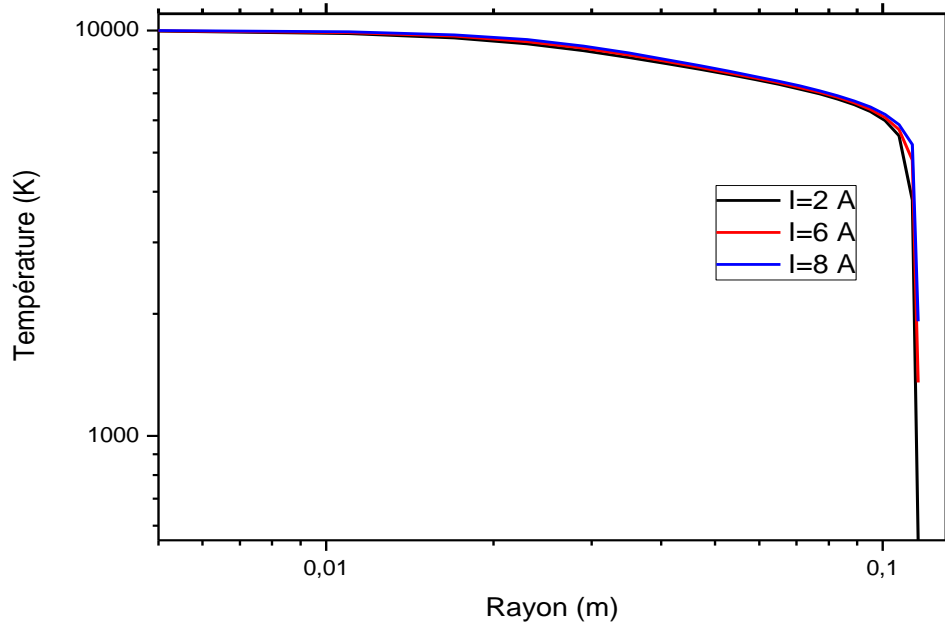


Figure (IV- 6) :L'influence de l'intensité de courant dans le mélange :N<sub>2</sub> - Cu

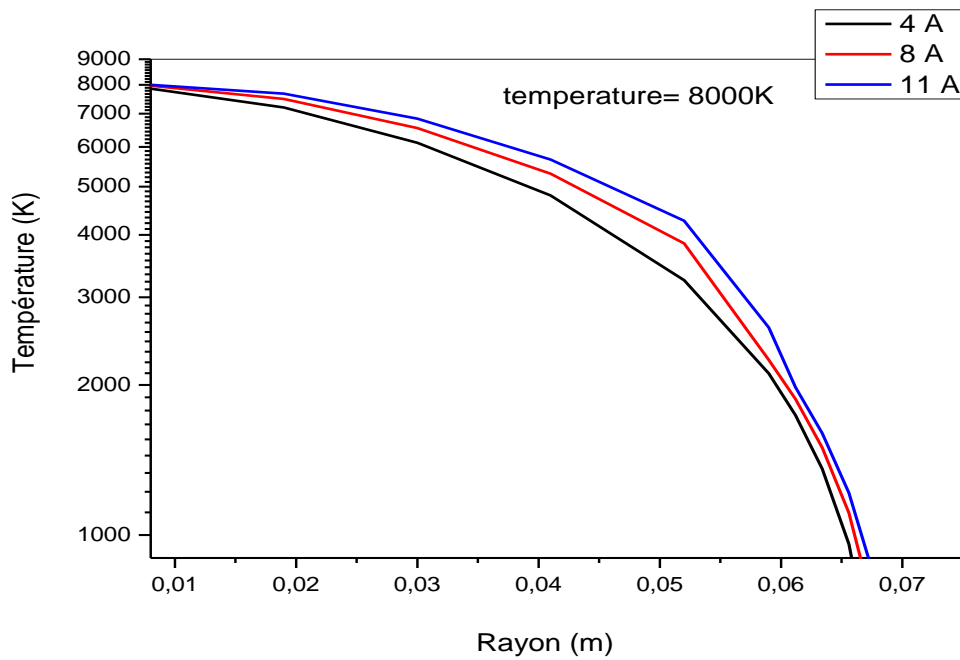
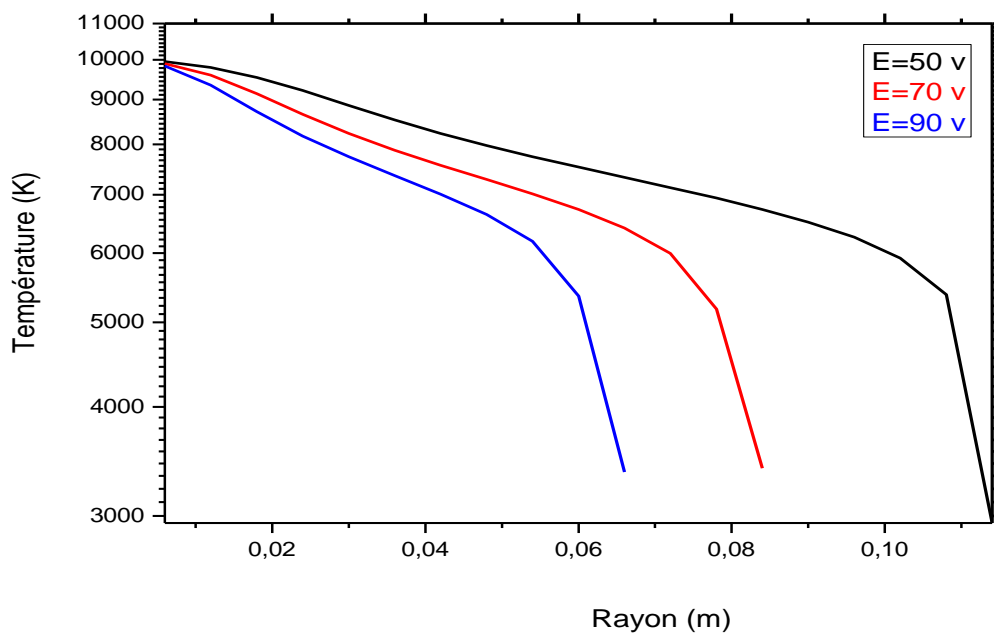
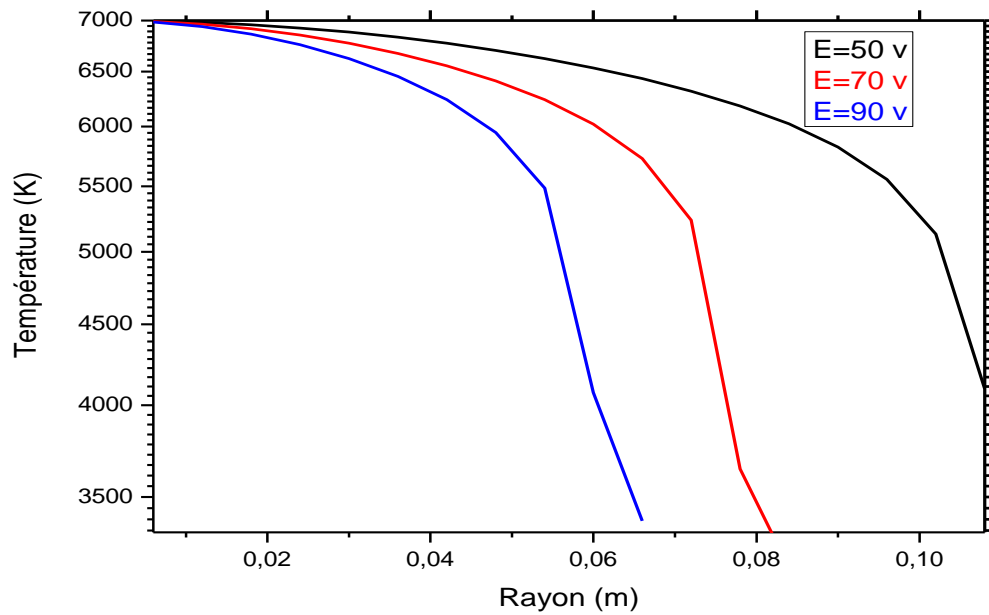


Figure (IV- 7) :L'influence de l'intensité de courant dans le mélange :Arg - Cu

**V- L'influence du champ électrique :**

Comme on peut le voir sur les figures (IV-8 et 9), pour des valeurs élevées de l'énergie électrique à faire passer dans l'arc, la température varie et elle est inversement proportionnelle au champ électrique.



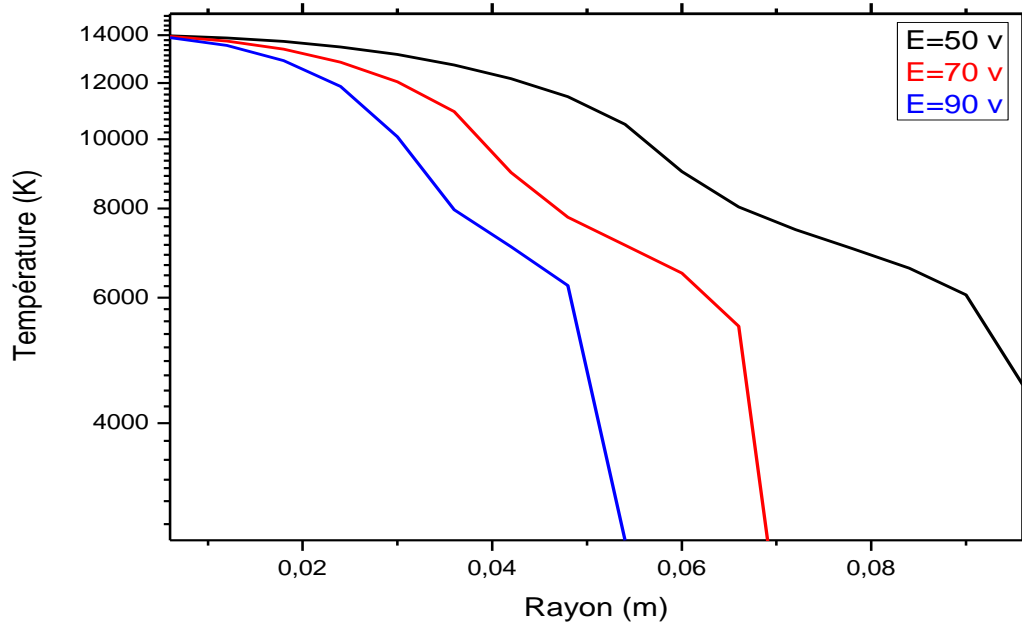
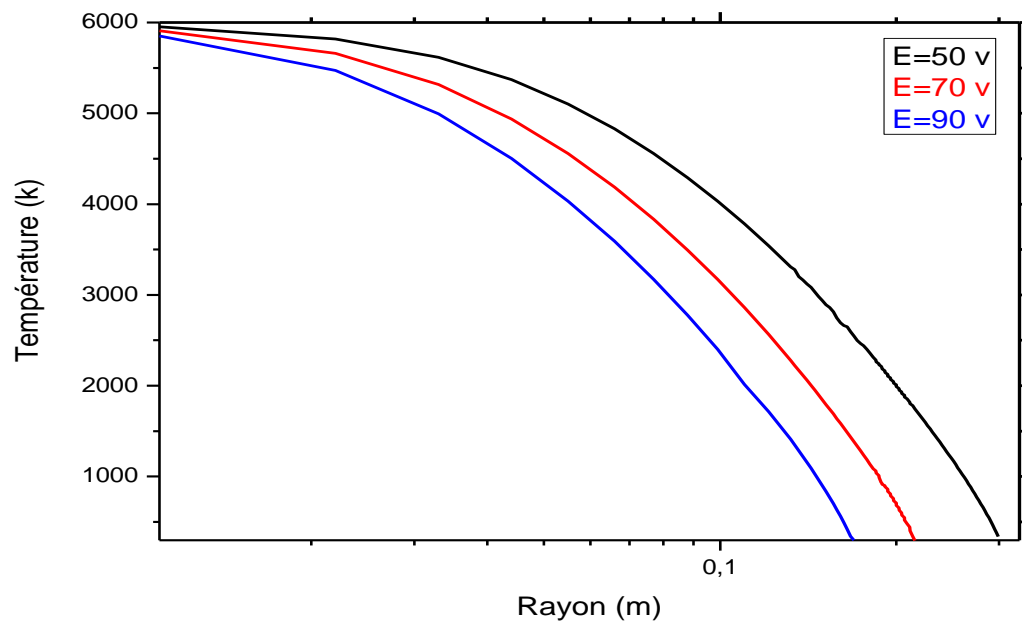
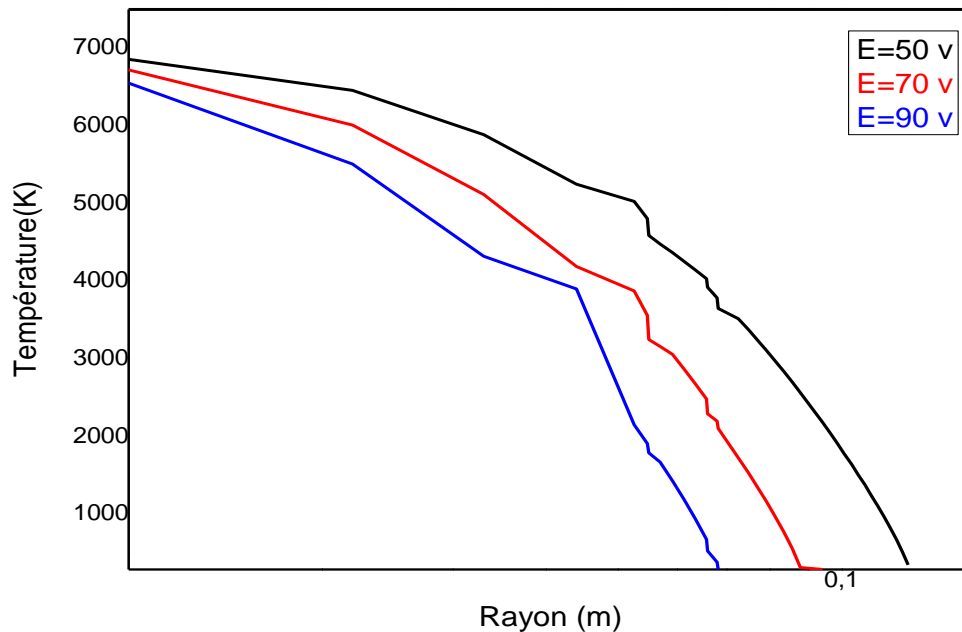


Figure (IV-8) :L'influence du champ électrique sur les profils de température dans le plasma N<sub>2</sub>-Cu







**Figure(IV-9) :L'influence de champ électrique sur les profils de température dans le plasma Arg -Cu**

Encore, le plasma présente des hétérogénéités importantes liées en particulier à de fortes tensions, il convient de souligner qu'une non-linéarité apparaît des propriétés thermodynamiques avec la température élevée suite à l'augmentation de la tension dans l'arc, à savoir, la chaleur massique à pression constante du plasma, elle peut fluctuer de manière significative du fait des différentes réactions chimiques telles que la dissociation des molécules et aux ionisations successives des atomes. Ces fluctuations correspondent à des variations brutales de l'enthalpie dans les domaines de température où elles apparaissent. Pour une même température, l'enthalpie massique varie de 1 à 2 ordres de grandeur en fonction de la nature des gaz utilisés : argon, azote,

La conductivité électrique augmente brutalement vers 5 000 K, elle est de l'ordre de  $10^{-3} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , et ce n'est que pour des températures supérieures que l'on devrait parler de plasma. Elle atteint une valeur maximum de l'ordre de  $0,1 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  pour une température de 15 000 K.

Egalement pour la conductivité thermique : L'apport de cuivre dans le mélange permet d'accroître la conductivité thermique du plasma à  $T < 10000K$ , en effet des pics de dissociation puis d'ionisation entraînent une forte augmentation de celle-ci et donc, améliorer le transfert de chaleur plasma-particules, et augmente la viscosité (10 fois plus importante) au-delà de  $10000K$  que celle du gaz à la température ambiante ce qui retarde le refroidissement du plasma.

### VI-Résultats en régime transitoire :

Quand on annule le champ électrique entre les électrodes, le courant disparaît, mais le plasma subsiste encore quelque temps. Le temps de subsistance dépend de la vitesse de recombinaison électrons - ions et du refroidissement du gaz.

Nous présentons sur les figures (IV-10) à (IV-13) deux séries de résultats dans un plasma d'azote-cuivre pour les 100 premières micro-secondes, le pas d'avancement étant de  $2 \cdot 10^{-6}$  s, le rayon de la décharge est fixé à 0.3 m et l'intensité initiale est de 10 A. La première série de résultats concerne un calcul dont le profil de température initial est caractérisé par celui obtenu en régime stationnaire pour une température à la frontière de 300 K et un nombre de 61 points. Sur les figures (IV-10) et (IV-11) nous avons représenté respectivement l'évolution des profils radiaux de la température et de la vitesse toutes les 2 ms. On observe sur toutes les courbes  $T(r,t)$  une atténuation du gradient pour des températures voisines de 3000 K et 4000 K. Ce phénomène se produit pour les valeurs élevées relatives à l'augmentation de la conductivité électrique et thermique correspondant à l'apport de cuivre, puis la décroissance est rapide inversement proportionnelle au rayon de l'arc.

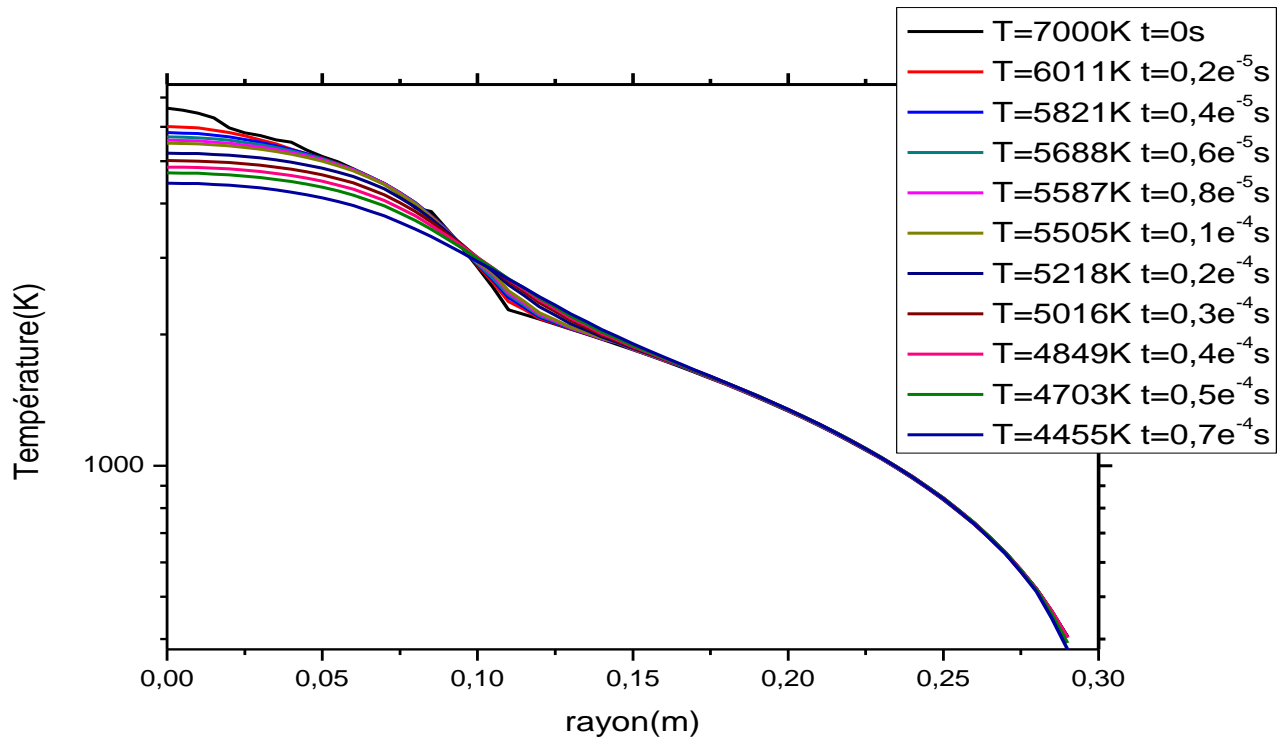
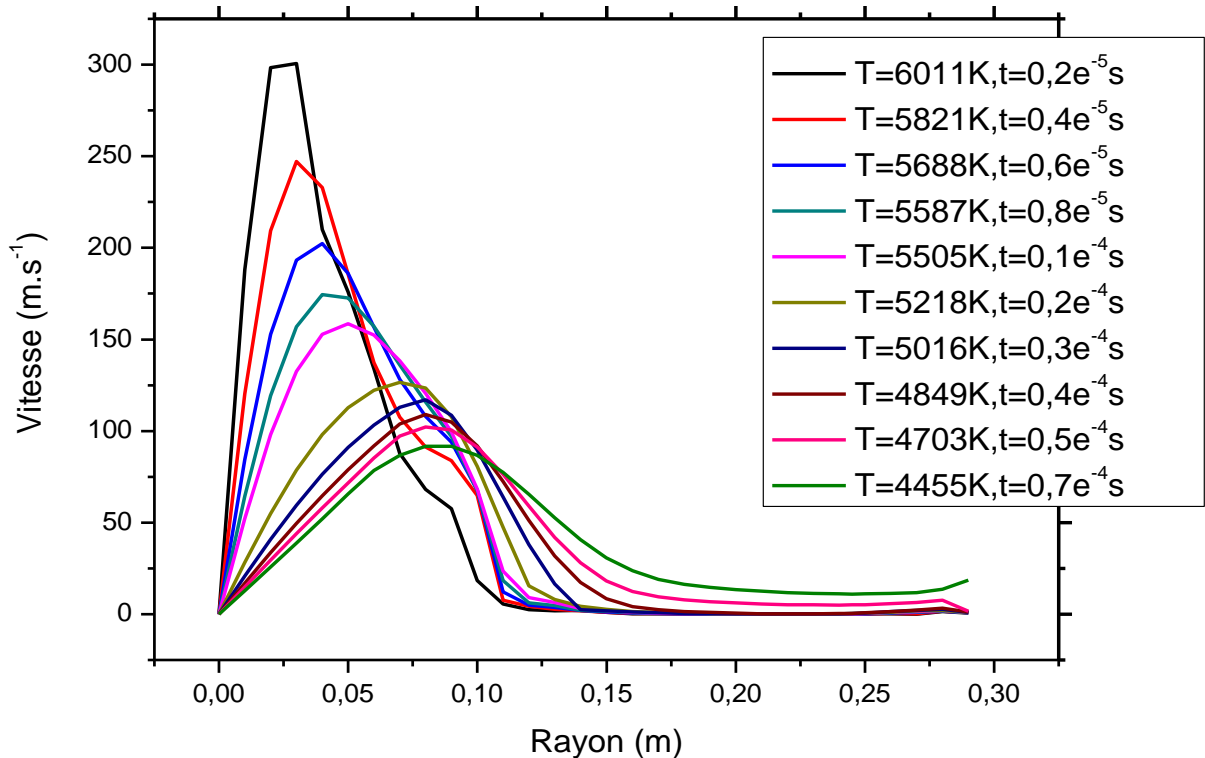


Figure (IV-10) : Evolution du profil radial de la température dans le mélange  $N_2$ -Cu en régime transitoire

Intéressons nous maintenant à l'évolution des profils de vitesse. A l'instant initial nous initialisons le calcul avec un profil de vitesse radiale nulle, on constate que dans la région où existe le fort gradient de température la vitesse est maximale, ce maximum se déplace vers le centre de la décharge à mesure que le temps augmente.



**Figure (IV-11) : Evolution du profil radial de la vitesse dans le mélange  $N_2-Cu$  en régime transitoire**

Pour la série de résultats ci-dessous nous donnons les évolutions de la température axiale et de la conductance en fonction du temps. Sur la figure (IV-12), nous avons tracé l'évolution de la température axiale en fonction du temps, cette dernière est représentative de la vitesse de refroidissement du plasma. Durant les 10 premières micro-secondes, la décroissance est rapide, la variation de la température axiale est pratiquement linéaire, la température sur l'axe décroît jusqu'à 4000 K environ. A partir de cet instant la

décroissance est plus lente. L'énergie de la décharge à du mal à s'évacuer se qui se traduit par une vitesse de refroidissement plus lente.

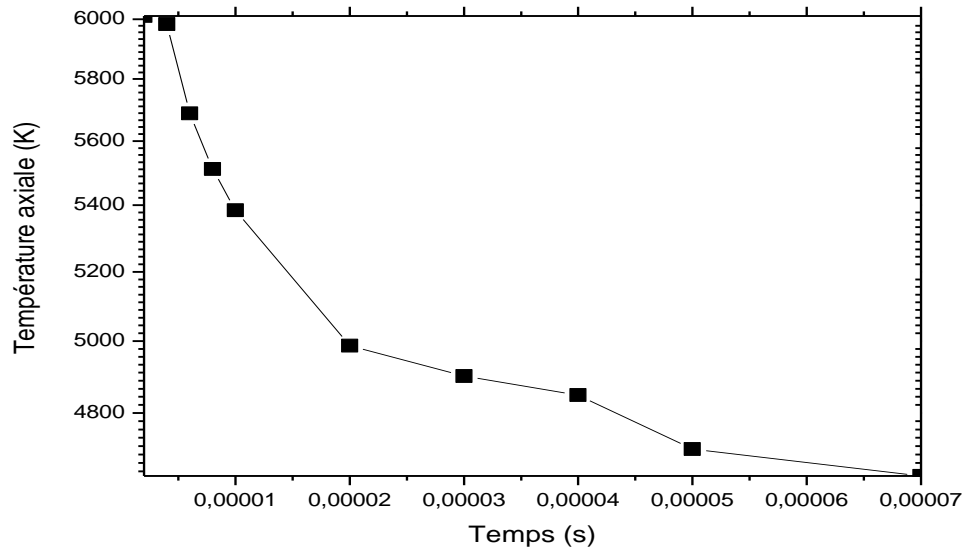


Figure (IV-12) :Evolution de la température axiale

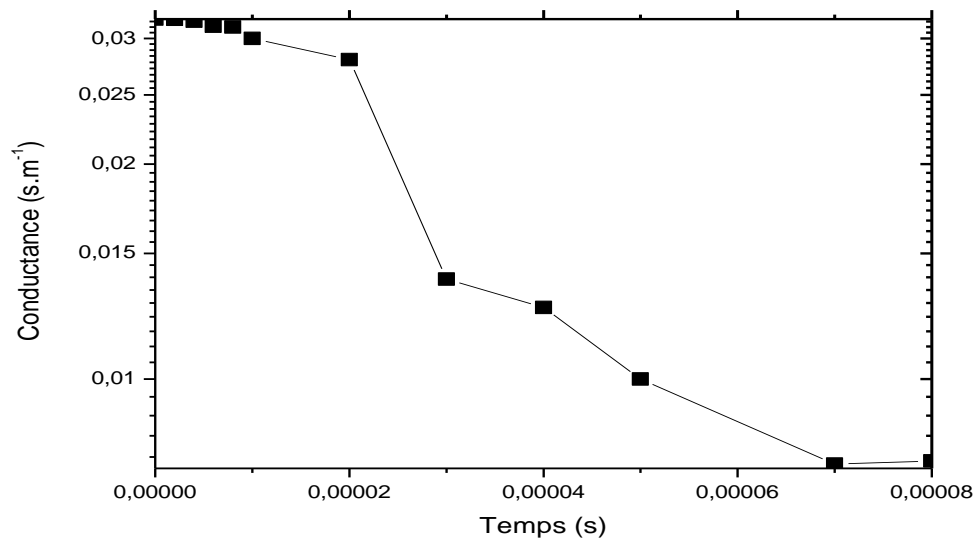


Figure (IV-13) :Evolution de la conductance

La figure (IV-13) montre les évolutions de la conductance en fonction du temps. Cette grandeur est le reflet du rayon d'arc (équation IV-15) et permet de préjuger la capacité du gaz à retrouver sa rigidité diélectrique dans un laps de temps donné. Durant les 70 premières micro-secondes, la courbe présente une décroissance rapide, période dans laquelle la vitesse de refroidissement présente ses plus grandes valeurs ; la conductance chute d'un facteur de 300. A partir de 75 ms la pente diminue, l'évolution de la conductance devenant linéaire. L'influence de la présence de cuivre, même avec une proportion de 1%, se fait sentir sur la conductance globale. La vapeur métallique s'ionise plus facilement que les autres éléments, la conductance d'un plasma contenant du cuivre est supérieure à celle du gaz pur.

### **VII -Le refroidissement du plasma :**

Le régime de refroidissement du plasma influe directement sur les évolutions de température que nous obtenons, nous pouvons le remarquer surtout sur la courbe de la figure (IV-10) qui se traduit par le fait que la température diminue beaucoup plus rapidement au début de l'extinction de l'arc qu'à la fin ,et on peut qualifier cet effet aussi à l'influence de la nature de gaz environnant sur le comportement général du plasma et donc des températures.

Le refroidissement est caractérisé par une importante dissipation d'énergie due aux effets radiatifs dont les pertes radiatives jouent un rôle déterminant dans les premiers instants de l'extinction de l'arc : 90%des pertes sont dues au rayonnement qui, bien qu'une partie soit réabsorbée, reste le phénomène prépondérant.

En effet ,le plasma est essentiellement composé de vapeur métallique(le cuivre dans notre cas)à faible potentiel d'ionisation, ce qui explique l'importance du transfert radiatif pendant les premiers instants et ce jusqu'à une température pour laquelle l'influence du gaz environnant, qui se mêle au plasma métallique, devient notable puis prépondérante. Ainsi ce phénomène de dissipation de l'énergie par rayonnement n'est prépondérant que pendant les premières dizaines de nanosecondes, puis son importance diminue avec la

thermalisation du plasma pour des températures inférieures à la température initiale, et à ce moment là les phénomènes thermiques qui dominant et le refroidissement sont liés directement à la conduction et la convection.

**Conclusion :**

Cette étude nous a permis de déterminer le champ de température dans deux mode d'extinction de l'arc électrique stationnaire et transitoire pour plasma pur et pour mélange plasmagène , mettant en évidence l'influence en échelle des poudres métalliques depuis l'injection, l'échauffement, changement de phases et par suite le transfert d'énergie thermique et radiatif.