

# Étude expérimentale de l'apparition des taches cathodiques et anodiques lors de la création d'un arc électrique

ABBAOUI M'hammed

PERISSE Frédéric

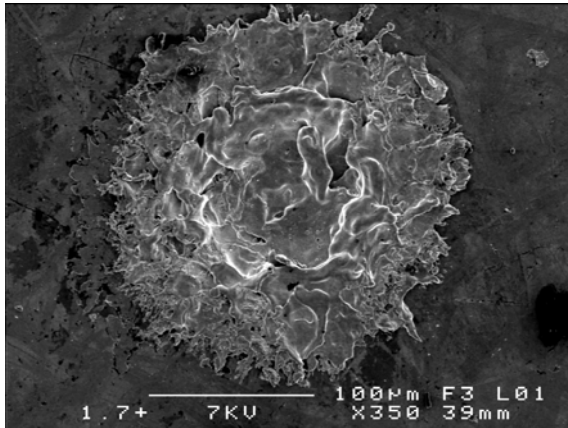
LEFORT André

17 novembre 2010

Demande AAE  
Laboratoire Arc Electrique et Plasmas Thermiques

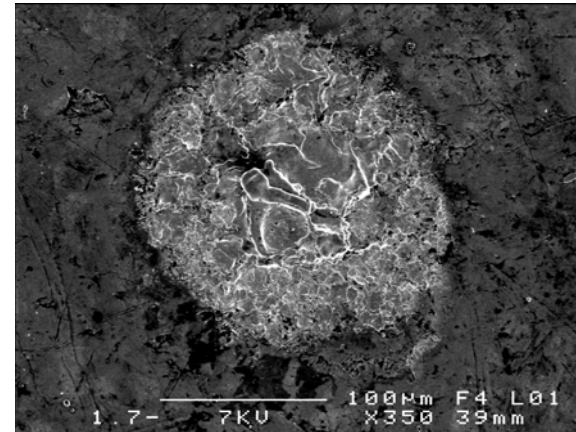


Spots anodiques et cathodiques pour un arc  
de longueur 1,7  $\mu\text{m}$  et un courant de 40 A



Anode

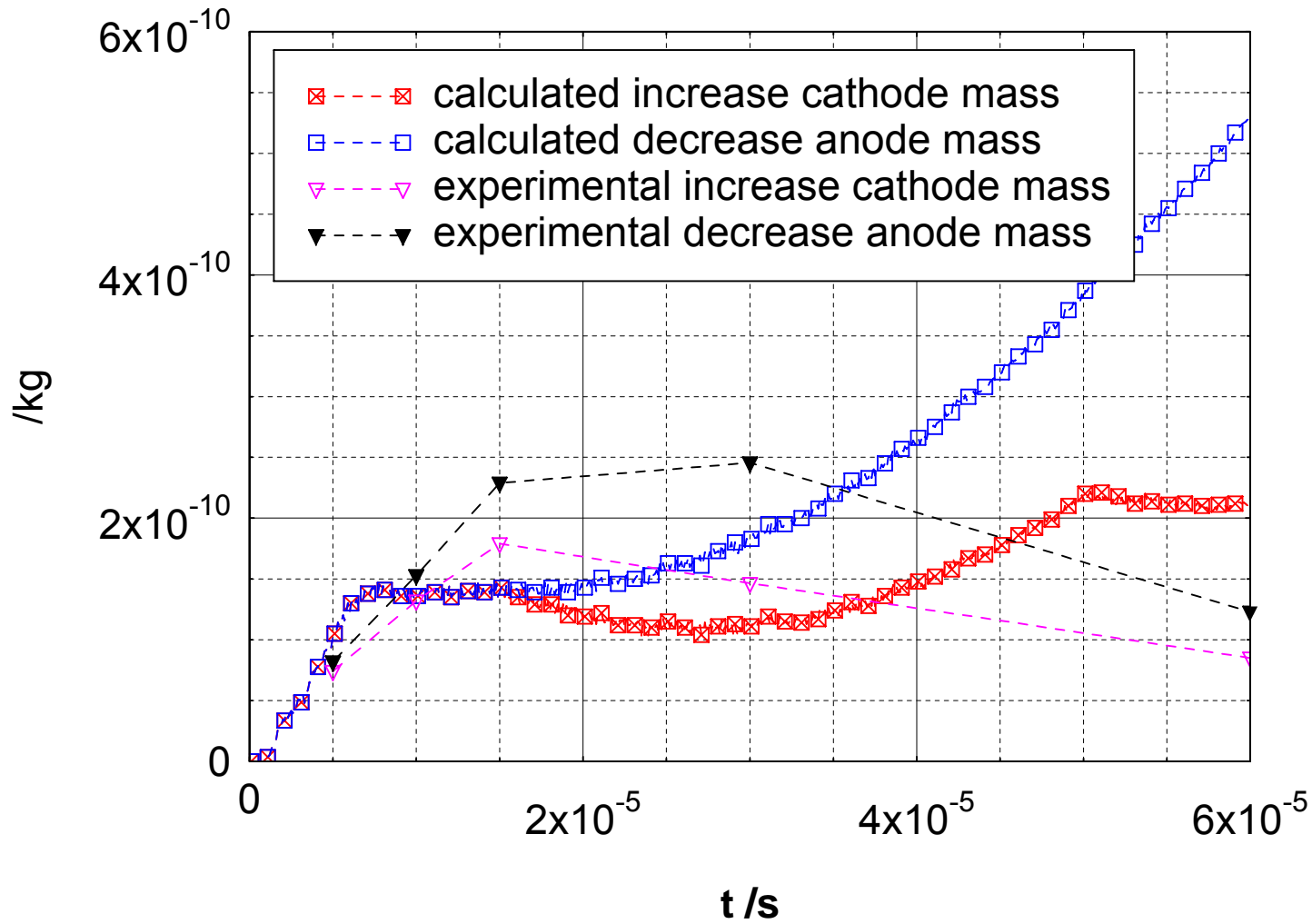
Diamètre de la zone érodée :  
110  $\mu\text{m}$



Cathode

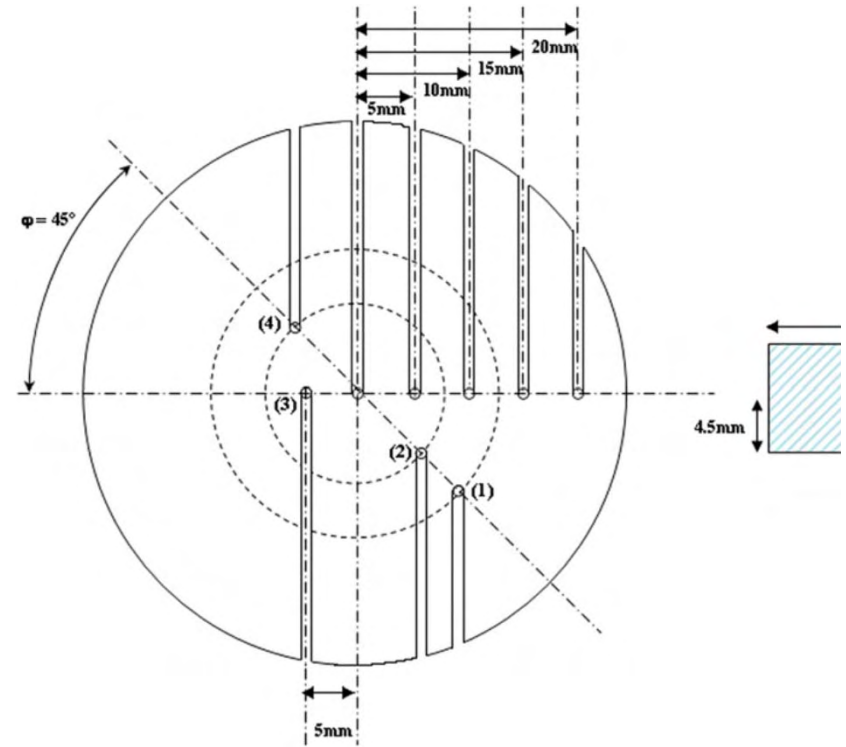
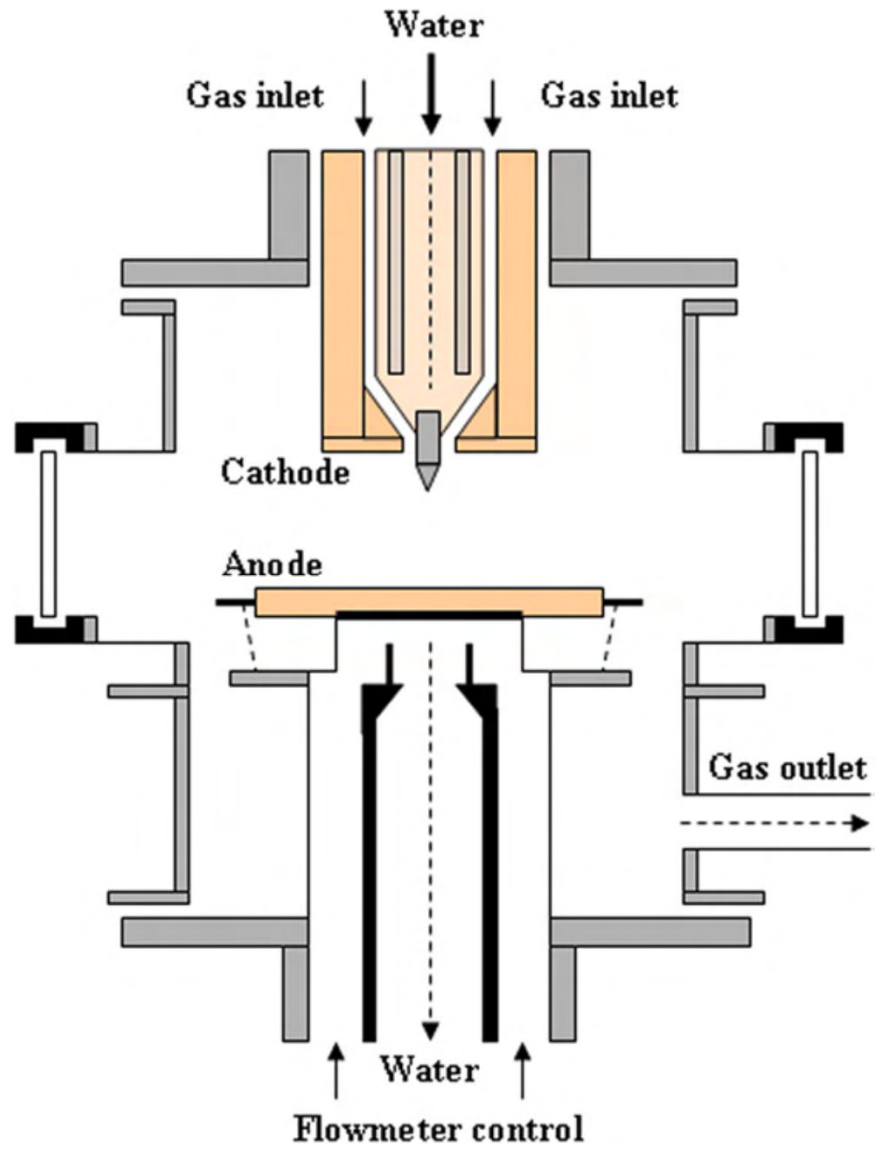
Diamètre de la zone érodée :  
90  $\mu\text{m}$

### Contact mass evolution



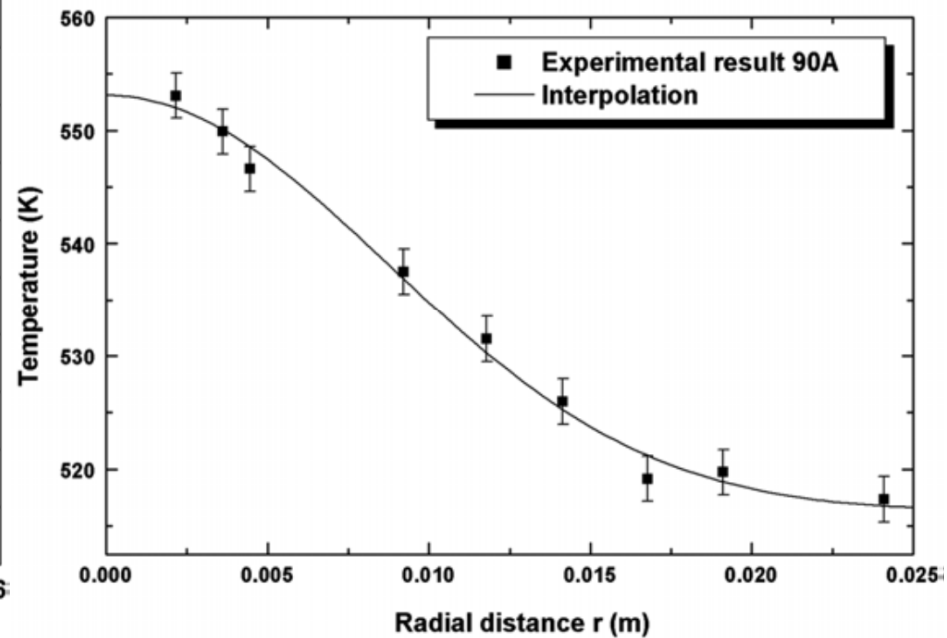
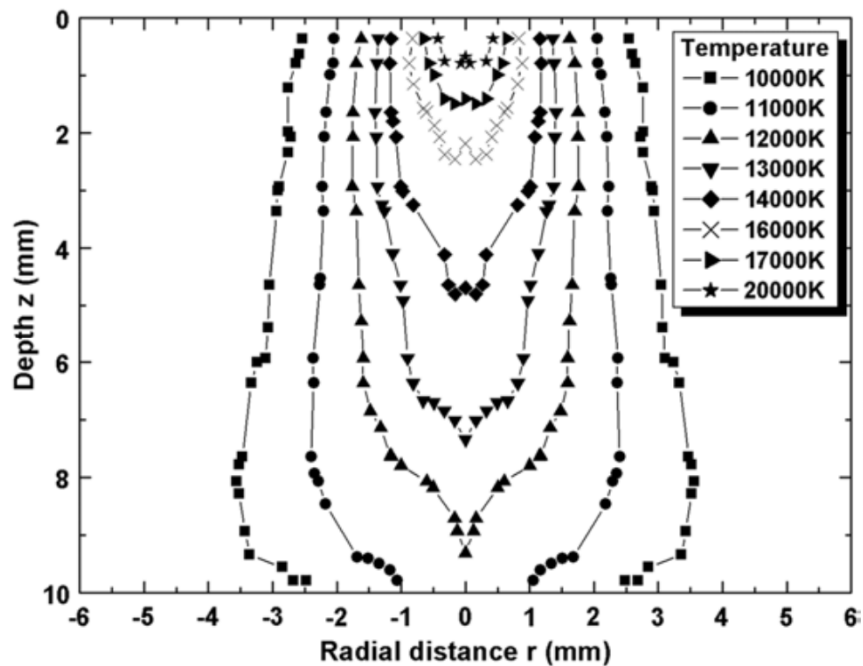
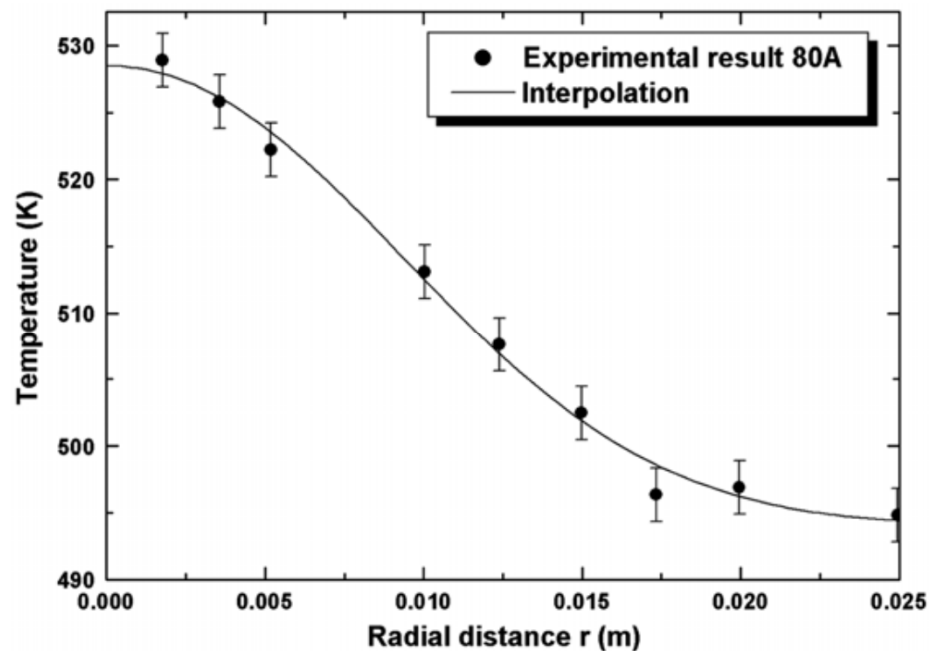
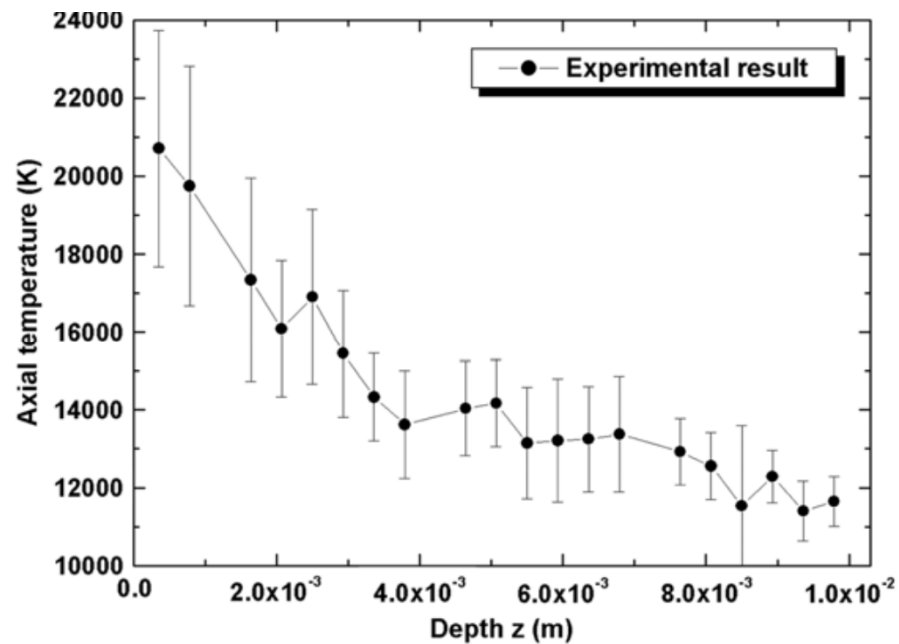
17 novembre 2010

Demande AAE  
Laboratoire Arc Electrique et Plasmas Thermiques



17 novembre 2010

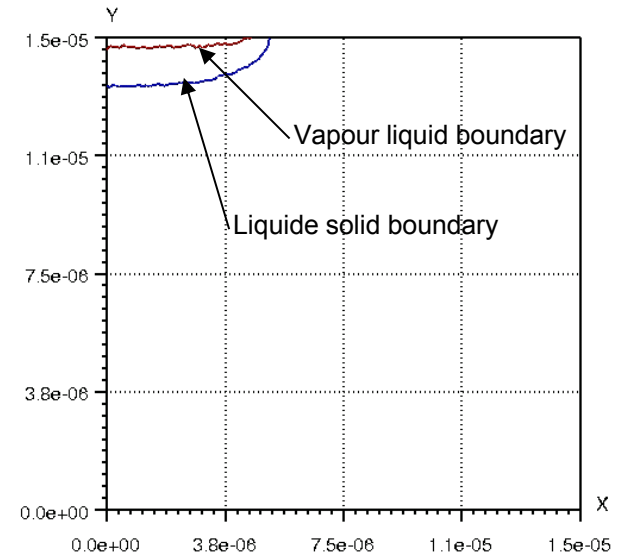
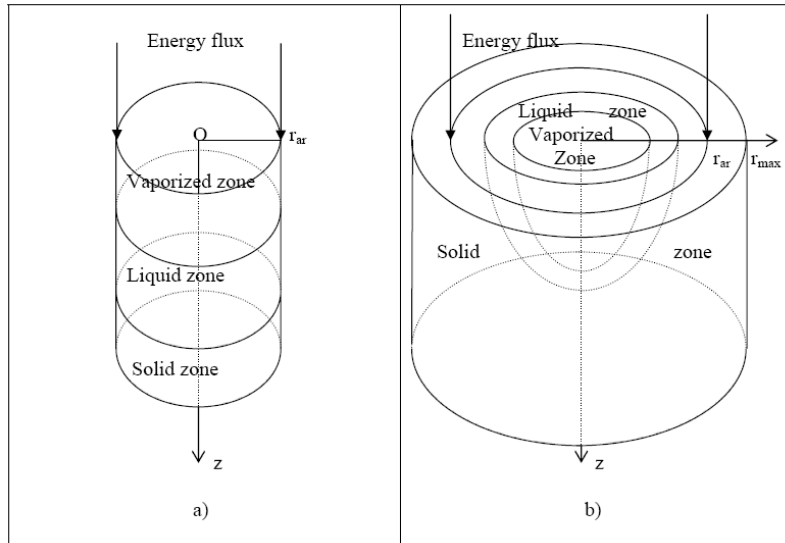
Demande AAE  
 Laboratoire Arc Electrique et Plasmas Thermiques



17 novembre 2010

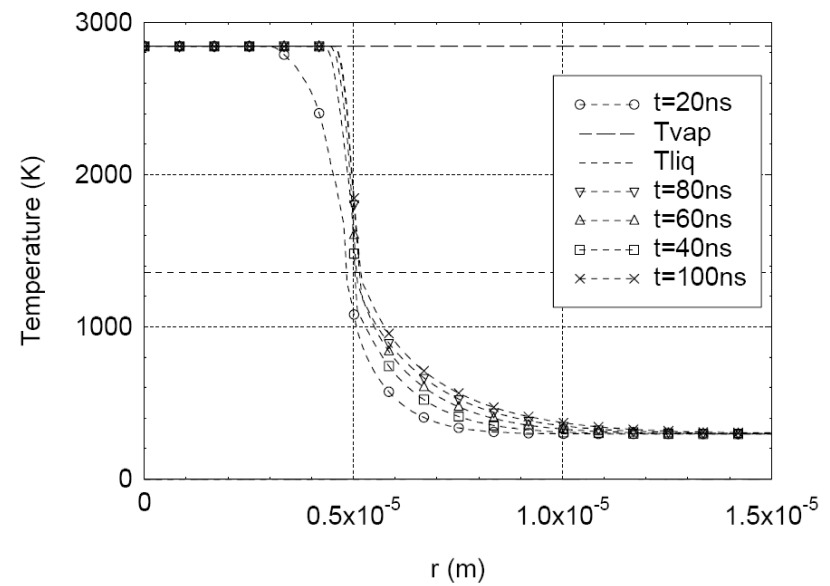
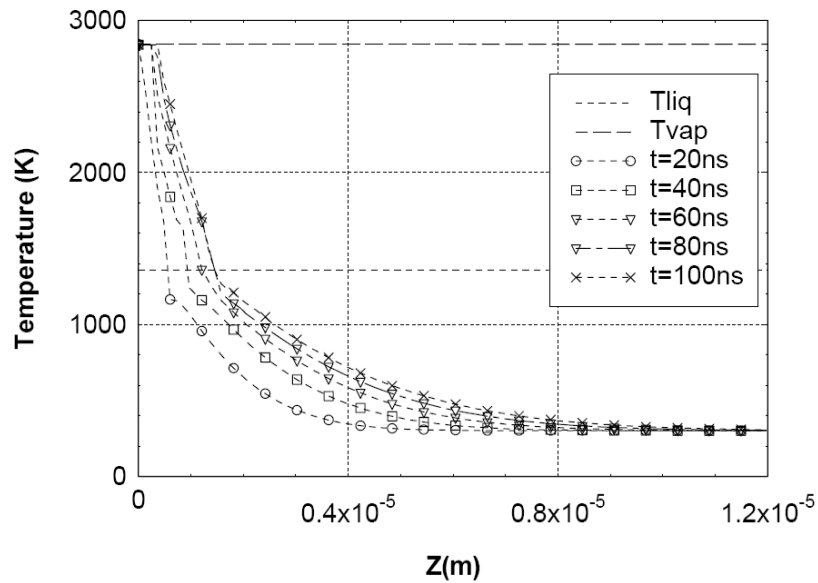
Demande AAE

Laboratoire Arc Electrique et Plasmas Thermiques



Copper  $W=5e11Wm^{-2}$

Copper  $W=5e11Wm^{-2}$



17 novembre 2010

Demande AAE

Laboratoire Arc Electric et Plasmas Thermiques

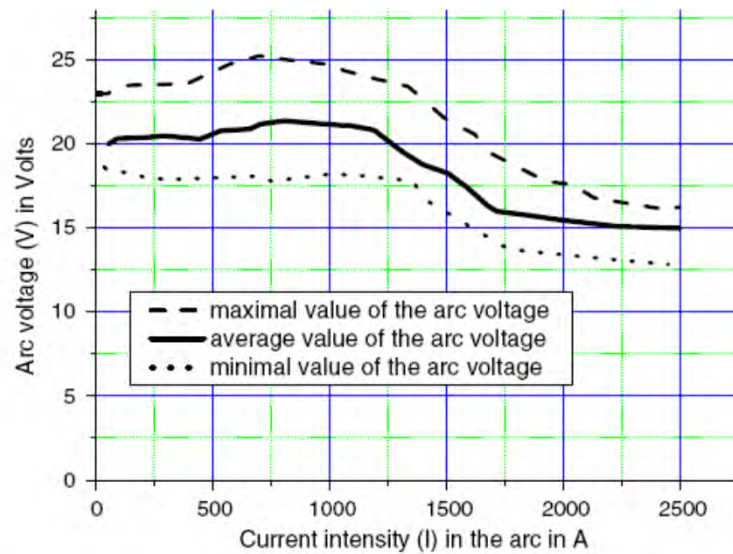


Figure 2. Maximal, average and minimal values of the measured arc voltage versus the current intensity in the arc—the electrode gap  $d$  is equal to 0.1 mm.

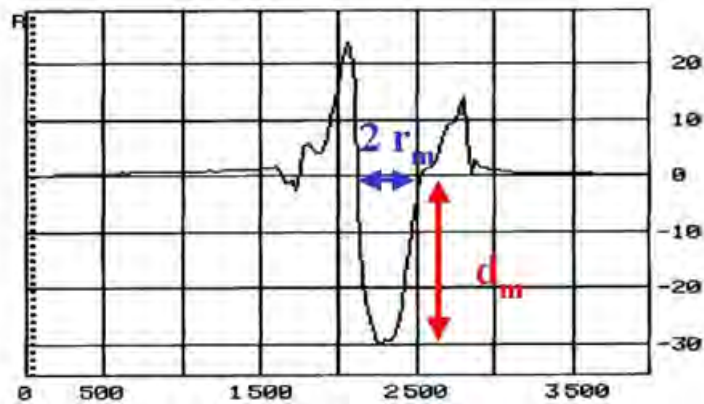


Figure 10. Example of a 2D measured profile along a crater diameter in the considered case.

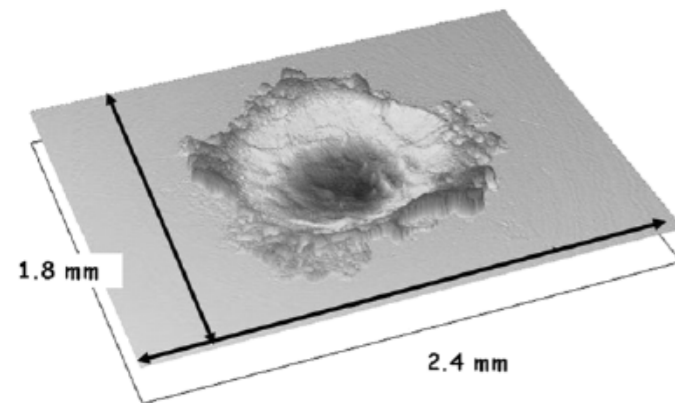


Figure 3. Typical example of observed crater on a copper electrode.

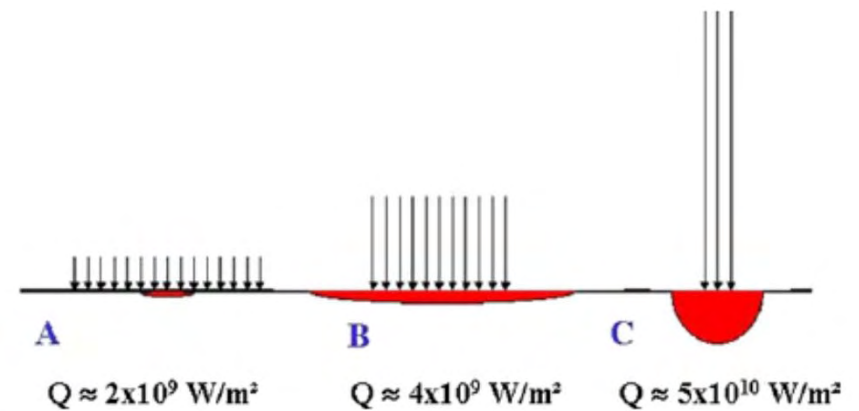


Figure 16. Schematic representation of the molten pool for three different values of the surface power density.



# Understanding and modelling plasma–electrode interaction in high-pressure arc discharges: a review

M S Benilov

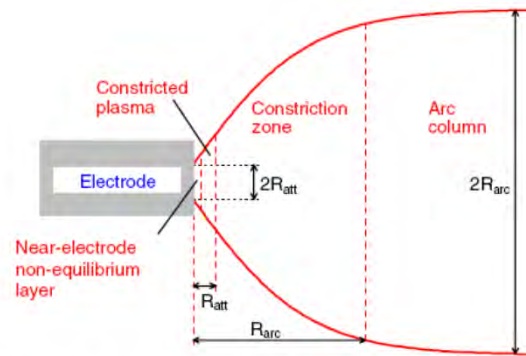
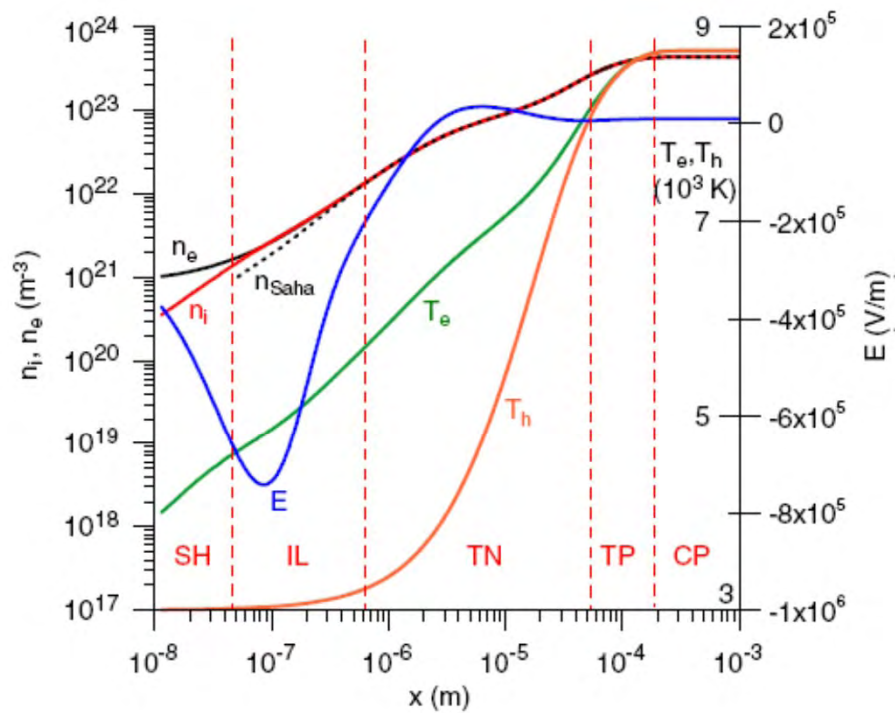


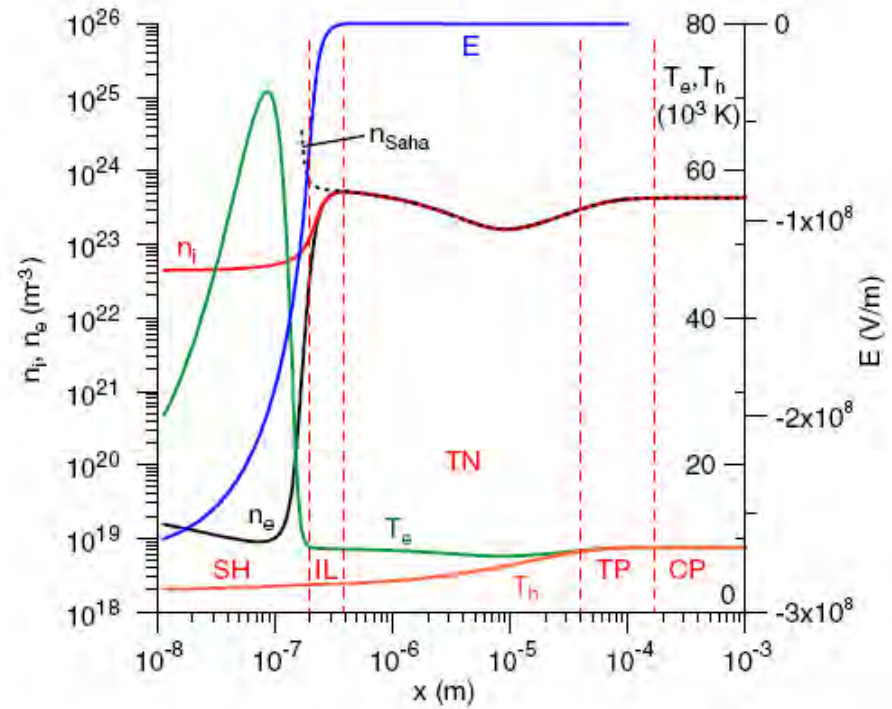
Figure 1. Structure of the near-electrode perturbation region.

Table 1. Fine structure of the near-electrode non-equilibrium layer.

	$n_e = n_i$	$n_e = n_{\text{Saha}}$	$T_e = T_h$	$jE = w_{\text{rad}}$
Constricted plasma	Yes	Yes	Yes	Yes
Layer of thermal perturbation	Yes	Yes	Yes	No
Layer of thermal non-equilibrium	Yes	Yes	No	No
Ionization layer	Yes	No	No	No
Space-charge sheath	No	No	No	No



**Figure 2.** Distribution of parameters in the near-anode non-equilibrium layer. Hg plasma, W anode,  $p = 30$  bar,  $j = 10^7$  A m<sup>-2</sup>,  $T_w = 3000$  K.



**Figure 3.** Distribution of parameters in the near-cathode non-equilibrium layer. Hg plasma, W cathode,  $p = 30$  bar,  $j = 10^7$  A m<sup>-2</sup>,  $T_w = 3000$  K.

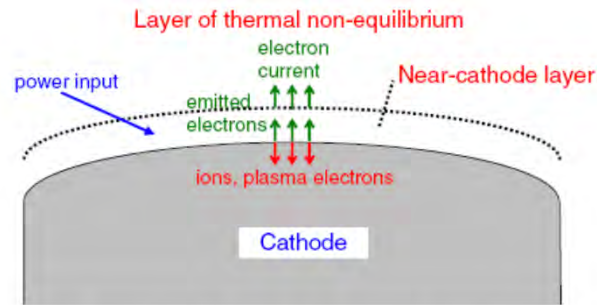


Figure 4. Schematic of the near-cathode layer.

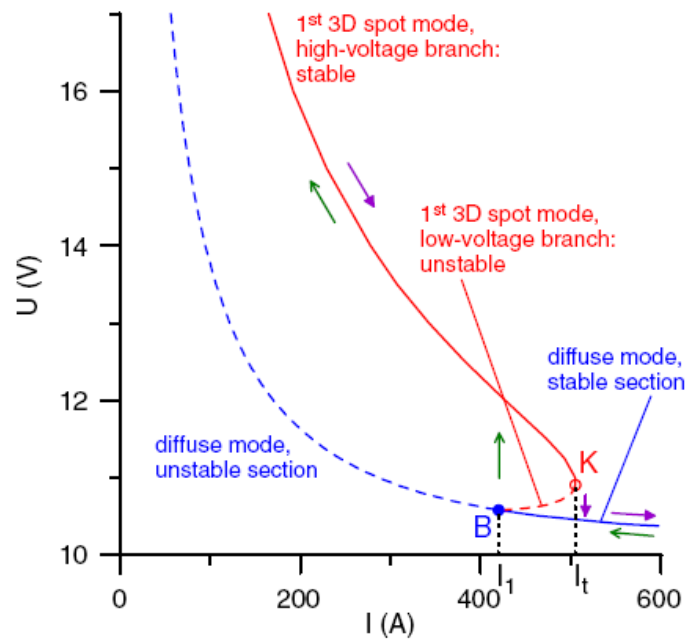


Figure 10. Stable modes of current transfer to a cylindrical cathode of a current-controlled arc discharge and transitions between them. *B*: the first bifurcation point. *K*: turning point of the first 3D spot mode. Rod W cathode,  $R = 2$  mm,  $h = 10$  mm,  $T_c = 300$  K, Ar plasma,  $p = 1$  bar.

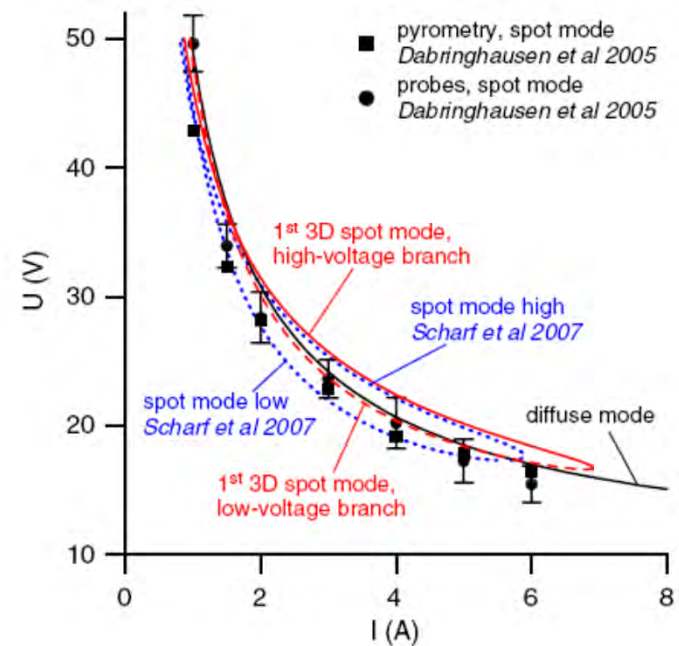


Figure 9. Current–voltage characteristics. Rod W cathode,  $R = 0.75$  mm,  $h = 20$  mm, rounding  $100 \mu\text{m}$ ,  $T_c = 300$  K, Ar plasma,  $p = 2.6$  bar.

**Table 2.** Near-cathode voltage drop, average temperature of the cathode tip, power losses and average electron temperature in the near-cathode layer. Rod W cathode,  $R = 0.75$  mm,  $h = 20$  mm, rounding  $100 \mu\text{m}$ ,  $T_c = 300$  K, Ar plasma,  $p = 2.6$  bar,  $I = 4$  A.

	$U$ (V)	$T_{\text{tip}}$ (K)	$Q_c$ (W)	$Q_r$ (W)	$Q_p$ (W)	$T_e^*$ (K)
Diffuse	20.7	3072	25.5	26.3	51.8	11 532
Low-voltage spot	20.4	3010	24.8	22.8	47.6	14 324
High-voltage spot	22.4	2615	22.2	12.4	34.6	33 363

**Table 3.** Near-cathode voltage drop, average temperature of the cathode tip, power losses and average electron temperature in the near-cathode layer. Rod W cathode,  $R = 0.25$  mm,  $h = 10$  mm,  $T_c = 1000$  K, Hg plasma,  $p = 17$  bar,  $I = 0.7$  A.

	$U$ (V)	$T_{\text{tip}}$ (K)	$Q_c$ (W)	$Q_r$ (W)	$Q_p$ (W)	$T_e^*$ (K)
Diffuse	18.9	3000	3.3	5.4	8.7	6 935
Low-voltage spot	19.4	2923	3.2	4.5	7.7	14 023
High-voltage spot	19.8	2739	2.9	3.5	6.4	22 223

**Table 4.** Near-cathode voltage drop, average temperature of the cathode tip, power losses and average electron temperature in the near-cathode layer. Rod W cathode,  $R = 0.25$  mm,  $h = 10$  mm,  $T_c = 1000$  K, Hg plasma,  $p = 17$  bar,  $I = 0.5$  A.

	$U$ (V)	$T_{\text{tip}}$ (K)	$Q_c$ (W)	$Q_r$ (W)	$Q_p$ (W)	$T_e^*$ (K)
Diffuse	22.8	2927	3.3	4.9	8.2	6 745
Low-voltage spot	23.1	2881	3.1	4.4	7.5	12 961
High-voltage spot	23.1	2617	2.7	2.9	5.6	26 803

TABLE VI

El.	Cathode drop $U_c$ [V]						
	/112/	/136/	/137/	/58/	/138/	/24/	/28/
Li	11.1-						
Na	8.7-						
K	9.0				4-5	11.0	16.0
Cs	6.7-						6.2
	7.4						
Cu	6.2						
	14.7-				8.0-		
Ag	15.4	12.6	8.5	13.0	9.0	21.0	16.0
	12.1-						
	13.6	12.3	8.0	12.0		16.5	13.0
Be	18.6-						
	19.2	12.5				12.0	17.0
Mg	11.6-						
	13			10.0			12.5
Ca	10.8-						
	11.4						
Sr	8.4-						
	9.2						
Zn	9.8-						
	11.1	10.9	9.0	10.5		11.0	10.0
Cd	8.6-						
	10.2	9.8		11.0	9.0	10.0	11.0
Hg	8.0-				7.0-		
	9.5				10.0	8.0	8.0
Al	17.2-						
	18.6	18.3		14.0		16.5	15.5
Ga	15.0						15.0
In	9.5-						
	11.9						13.0
Tl	10.5-						
	11.5						10.5
Pb	16.8-						
	17.6			20.0			
Bi	17.7-						
	18.5						

C	15.2-						
	18.9					13.5	12.0
Sn	10.6-						
	13.0					9.6	9.6
Pb	8.8-						
	10.2	9.1			7.5		10.0
V	17.3-						
	18.0						
Nb	19.9-						
	21.6						
Ta	16.8-						
	21.4						
Bi	8.4-						
	8.7						9.0
Sb							8.1
Cr	16.7-						
	17.4					16.0	
Mo	16.6-						
	17.2					17.0	15.0
W	16.2-						
	22.6	15.2	10.0	15.0			50.0
Te	11.0-						
	12.4	3.0					
Fe	17.1-						8.0-
	18.0				8.0	13.0	12.0
Co	16.8-						53.0
	17.7					15.0	
Ni	16.3-						
	17.3				8.0	14.0	15.0
Pt		15.3	13.5	17.5			16.0
							18.0

Rakhovskii V.I. 1976

Experimental study of the dynamics of cathode spots development,  
*IEEE Trans. On Plas. Sci.*, vol. PS-4, 2, 81-102

17 novembre 2010

Demande AAE

Laboratoire Arc Electrique et Plasmas Thermiques

# Analyse bibliographique : les mesures effectuées

- Difficulté pour effectuer des mesures directes sur les pieds d'arc : zone très petite, densité des paramètres très importante, capteurs très perturbés...
- Difficulté pour interpréter les résultats obtenus : intégration dans le temps, déconvolution, reproductibilité...

# Analyse bibliographique : les modélisations

- Elles ne décrivent qu'une petite partie de l'évolution des pieds d'arc dans le temps.
- Elles sont très rarement consacrées à l'initiation de l'arc (1<sup>ères</sup> nanosecondes).
- Elles souffrent d'un manque de données fiables, en temps et en valeurs : exemple les chutes de tension anodiques et cathodiques.

# Objectifs du projet proposé

- Déterminer lors de la création de l'arc électrique, avec une résolution de l'ordre de la nanoseconde :
  - l'évolution de la tension inter électrodes,
  - l'évolution du courant,
  - le déplacement des contacts.
- Vitesses de déplacement élevées ( $\leq 8$  m/s)
- Mesurer avec précision les valeurs des chutes cathodiques et anodiques



# Intérêt scientifique

- Mise en évidence des différentes phases d'initiation de la création des pieds d'arc et de l'arc.
- Confronter les valeurs des tensions obtenues avec les caractéristiques intrinsèques du métal : potentiel d'ionisation, travail de sortie...
- Nature du contact : métal, pseudo-alliage, alliage.

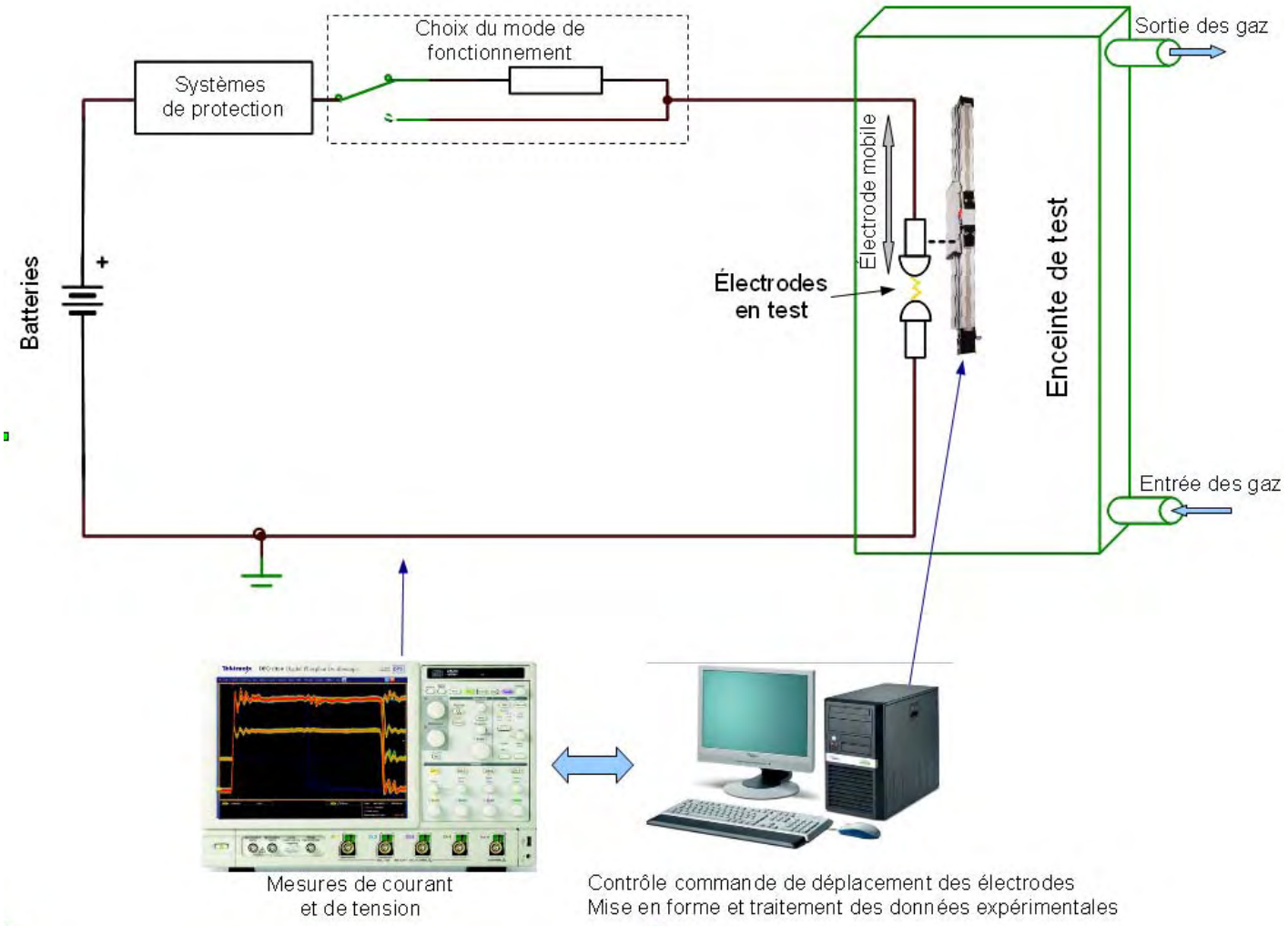
# Intérêt scientifique

- Analyse de la stabilité des chutes cathodiques et anodiques en fonction :
  - du courant d'arc,
  - de la nature de l'atmosphère environnante,
  - du matériau de contact : cas des alliages...
  - du mode de création de l'arc : ouverture des contacts, fermeture, rebond.

# Intérêt pour l'AAE

- Création d'une banque de données où tous ces résultats seront accessibles :
  - initiation de l'arc,
  - valeurs des chutes anodiques et cathodiques,
  - influence de la nature du matériau (pur, composite),
  - influence de la nature du gaz environnant,
  - influence de la vitesse de déplacement des contacts.

# Mise en œuvre expérimentale



17 novembre 2010

Demande AAE  
Laboratoire Arc Electrique et Plasmas Thermiques

# Mise en œuvre expérimentale

- Définition d'un protocole de mesure :
  - forme des électrodes,
  - conditionnement de la surface des électrodes,
  - choix des vitesses d'ouverture ou de fermeture des contacts,
  - gaz environnants : air sec, argon.

**Tâche 1 : Achat de matériel(s) et mise en œuvre de l'expérimentation.**

**Tâche 2 : Validation des protocoles de mesures sur le cuivre dans l'air.**

**Tâche 3 : Campagne de mesures sur différents métaux dans l'air.**

**Tâche 4 : Campagne de mesures sur différents métaux dans l'Argon.**

**Tâche 5 : Création de la base de données expérimentale.**

**Tâche 6 : Campagne de mesures pour des alliages et pseudo-alliages.**

**Tâche 7 : Présentation de l'avancement des travaux et des résultats à la communauté AAE.**

Tâche	Mois																								Intervenants
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	■	■	■	■	■	■																			LAEPT
2					■	■	■																		LAEPT, stagiaires IUT
3							■	■	■	■	■	■													LAEPT, stagiaires IUT
4												■	■	■	■	■	■	■	■	■					LAEPT
5											■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	LAEPT, stagiaires Master, stagiaires IUT
6																			■	■	■	■	■	■	LAEPT, stagiaires Master, stagiaires IUT
7												■						■						■	LAEPT

Matériaux pour l'enceinte de test et la régulation de gaz	2 000,00 €
Gaz neutre (Argon)	146,15 €
Système de déplacement linéaire avec régulation	3 000,00 €
Conception et réalisation des supports d'électrodes	500,00 €
Matériaux constituant la partie active des électrodes	1 871,00 €
Batteries de puissance avec chargeur	1 564,19 €
Systèmes de protection, contacteur, résistance...	1 149,19 €
Oscilloscope et sondes	16 085,00 €
Carte analogique numérique contrôle - commande	1 741,00 €
<b>Total matériel</b>	<b>28 056,53 €</b>
Stagiaire Master:417.09€*5:2	1 042,73 €
<b>Coût global</b>	<b>29 099,26 €</b>

17 novembre 2010

Demande AAE  
Laboratoire Arc Electrique et Plasmas Thermiques

# Merci de votre attention

- Tensions et courants à l'initiation de l'arc.
- Chutes de tension cathodique et anodique.
- Métaux purs, alliages, pseudo-alliages.
- Atmosphère environnante.
- Base de données.
- Précision en temps : ns.