

Etude de l'arc électrique sous vide : Cas de la refusion sous vide au four à électrode consommable

Pierre Chapelle

Laboratoire de Science et Génie des Matériaux et de Métallurgie, UMR 7584
Ecole des Mines de Nancy

chapelle@mines.inpl-nancy.fr

PLAN

- L'arc électrique sous vide : aspects fondamentaux

 - définitions*

 - applications de l'arc sous vide*

 - régimes de fonctionnement*

 - émission électronique*

 - mouvement des spot cathodiques*

 - plasma interélectrode*

 - macro-particules*

 - modélisation du spot cathodique*

- Un exemple d'utilisation en métallurgie : le procédé de refusion VAR

 - étude expérimentale dans un four industriel*

 - modélisation numérique*

ARC SOUS VIDE

- Arc électrique sous "vide" :

"Un arc dans le vide est un arc de vapeurs métalliques dans un environnement vide"

J.M. Lafferty, Handbook of Vacuum Arc Science and Technology (1995)

- Arc Cathodique :

plasma alimenté par la vaporisation de la cathode (spot cathodique)

- Arc Anodique :

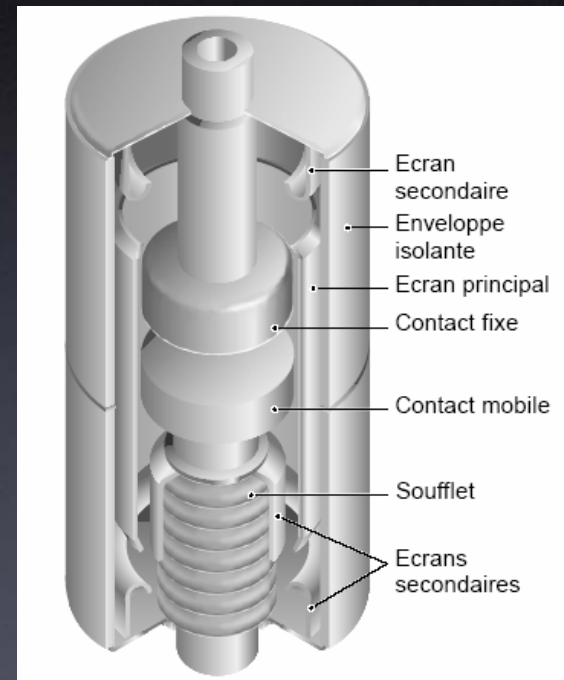
plasma alimenté par la vaporisation de l'anode

APPAREILS DE COUPURE

- Formation d'un arc électrique inévitable à l'ouverture des contacts
- Application principale en Moyenne Tension (disjoncteurs, contacteurs)



Ampoule à vide 17,5 kV
(d'après Schneider Electric)



METALLURGIE

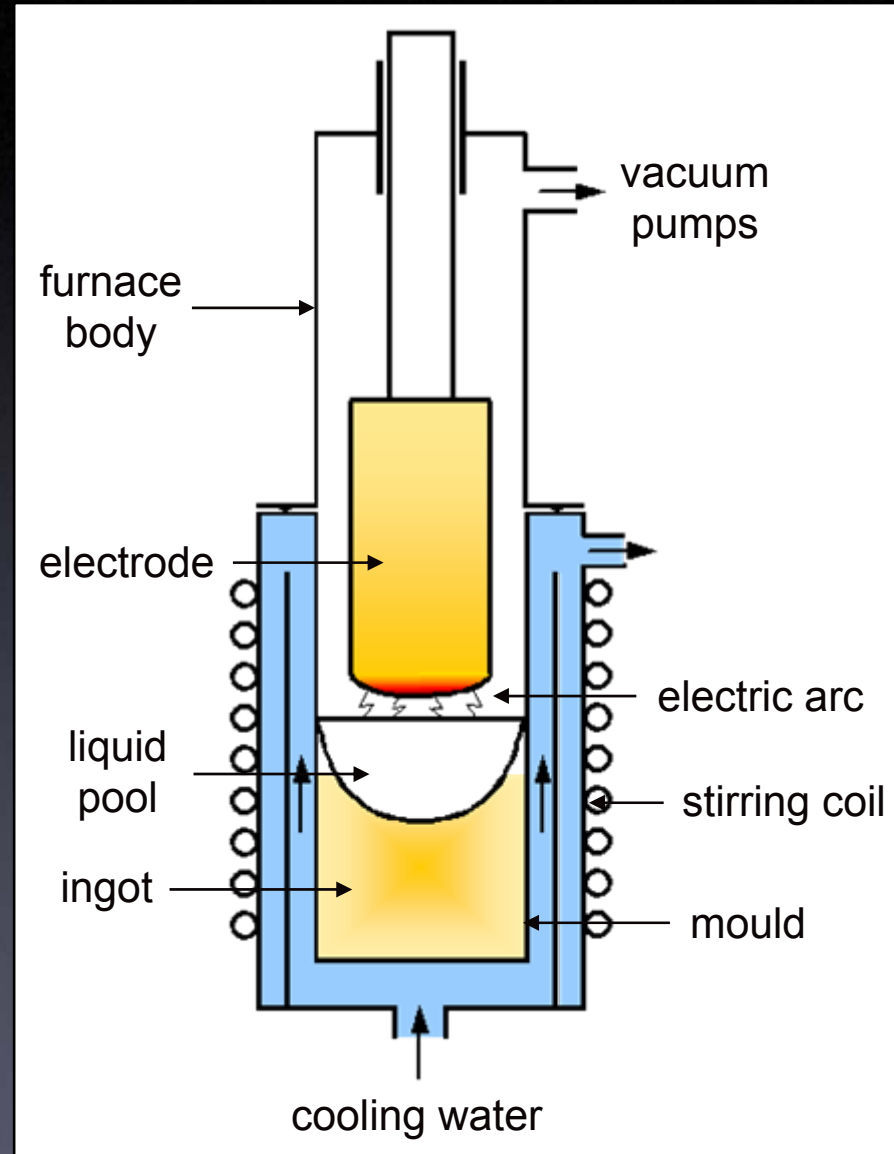
- Procédé de **refusion à l'arc sous vide**
(Vacuum Arc Remelting)

- Objectifs recherchés :

- *purification poussée du métal*
- *contrôle de la solidification du lingot (structure, homogénéité chimique)*

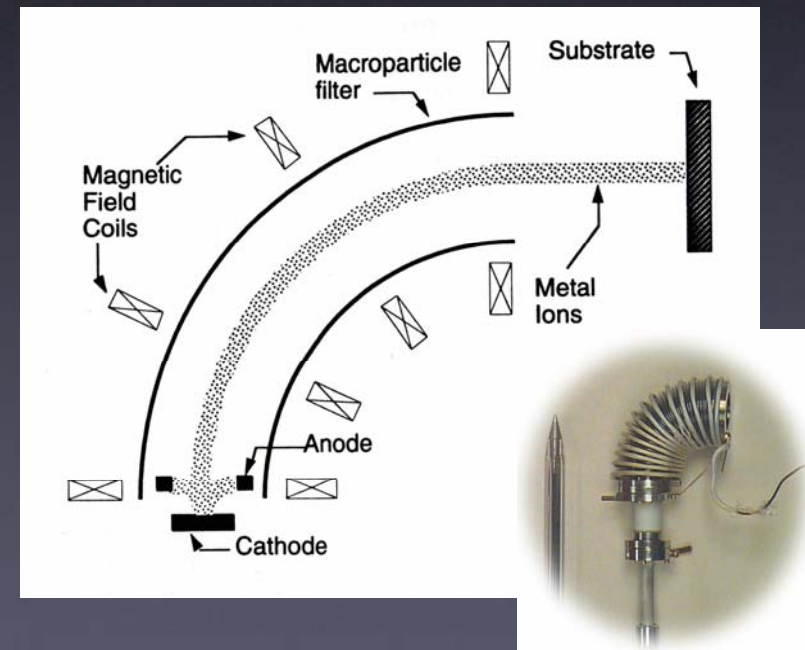
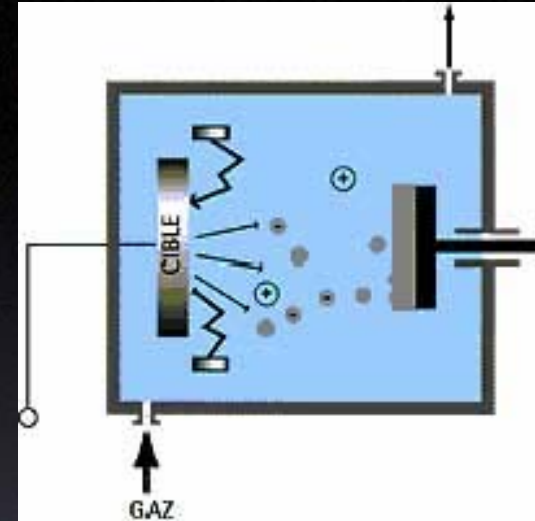
- Domaines d'utilisation :

- *métaux réactifs (Zr, Ti)*
- *superalliages base Ni*
- *aciers spéciaux*



DEPOTS DE COUCHES MINCES

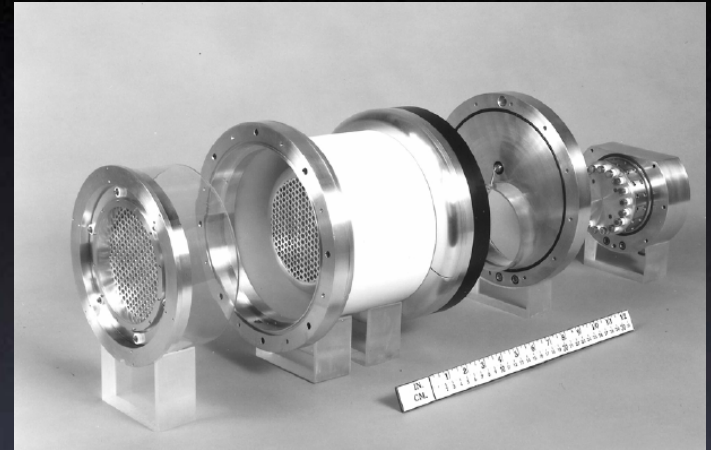
- Dépôt par **évaporation par arc**
plasma utilisé comme source de matière
- Avantages :
 - *plasma fortement ionisé*
 - *énergie des ions élevée*
 - *important flux de matière*
- Limitation : génération de gouttelettes
- Variantes du procédé :
 - *arc cathodique / anodique*
 - *arc continu / pulsé*
 - *dispositifs multi-cibles*



APPLICATIONS DIVERSES

- Obtention de sources de particules (ions, électrons) :

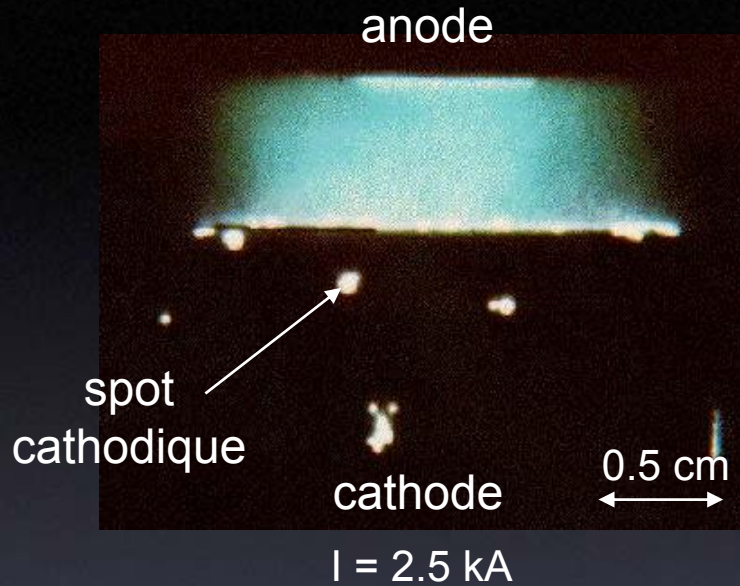
- *accélérateur de particules*
- *implantation ionique*



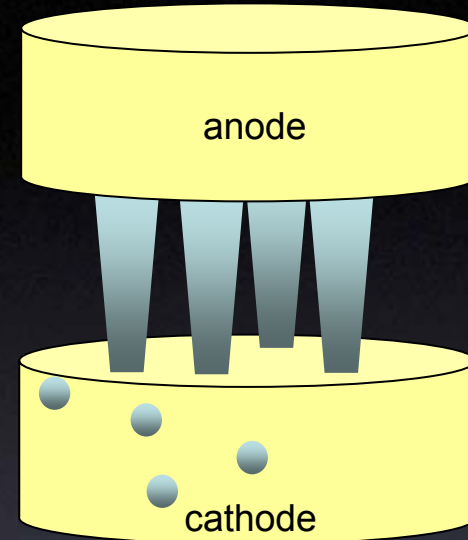
I. Brown (2005)

- Propulsion spatiale par plasma

ARC EN MODE DIFFUS

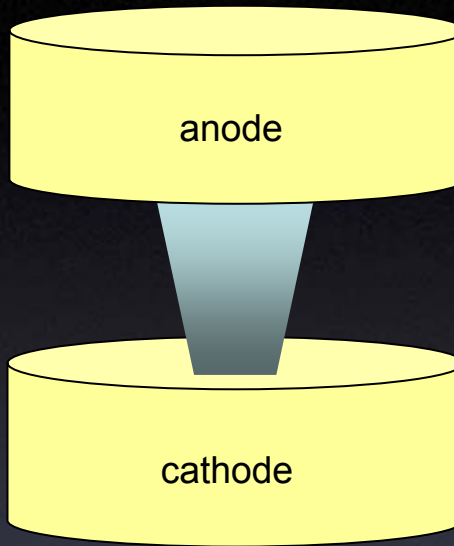


RL Boxman et al. (2006)



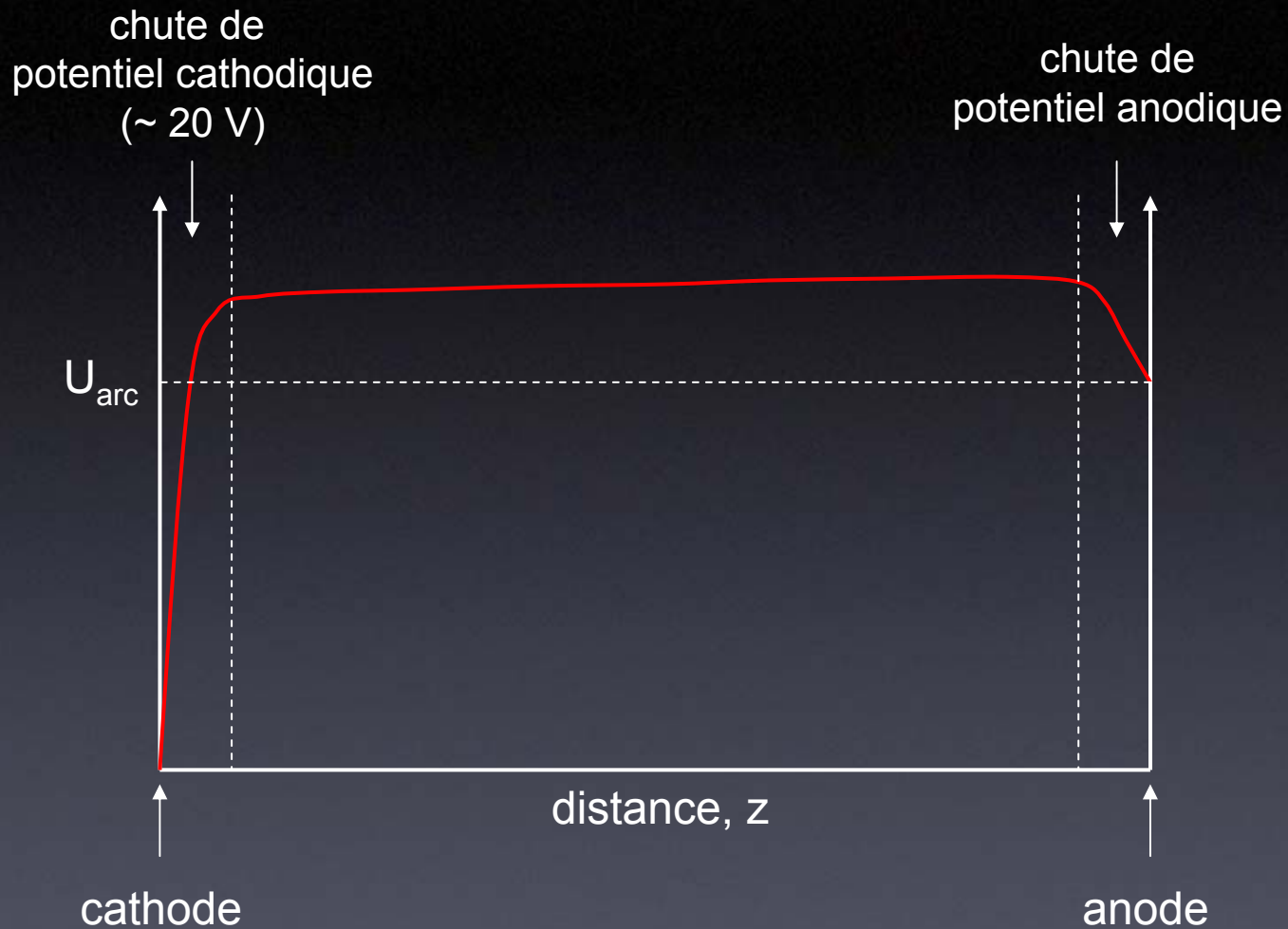
- Arc composé d'un ou plusieurs **spots cathodiques distincts**
- Spot cathodique = source d'électrons + plasma de vapeur métallique
- **Anode passive** collectant les particules provenant de la cathode
- Mode **spécifique au milieu "vide"** ($J \leq$ quelques centaines A/cm^2)

ARC EN MODE CONCENTRE



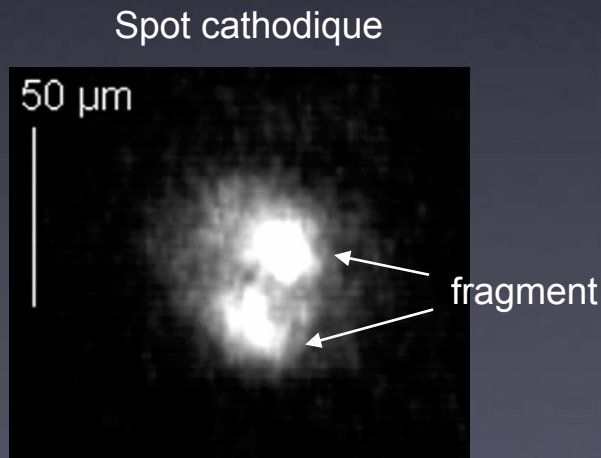
- Densité de courant supérieure à quelques centaines A/cm² d'électrode
- Mode analogue à celui de l'arc dans un milieu gazeux
- Apparition d'un **spot anodique** pour $I > I_{\text{crit}}$
- Contraction de la colonne de plasma reliant la cathode et l'anode

REPARTITION DU POTENTIEL ELECTRIQUE



PROPRIETES DU SPOT CATHODIQUE

- Faible dimension : $\sim 50\text{-}100\ \mu\text{m}$
- Intensité du courant limité ($\sim 100\ \text{A}$) \rightarrow division des spots aux forts courants
- Spot composé d'une **structure** et d'une **sous structure**, caractérisées par des échelles de temps variant entre 1 ns et 100 μs
- Spots se regroupent en "clusters" aux fortes intensités du courant



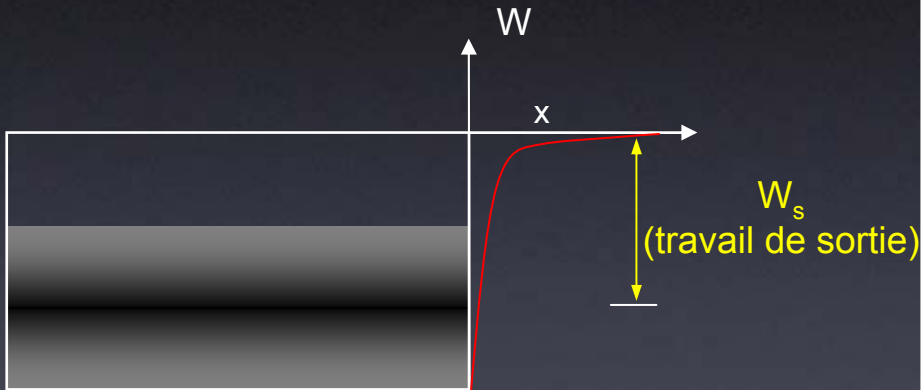
B. Jüttner et al., J. Phys. D: Appl. Phys, (2000)

		Diamètre (μm)	Intensité (A)
1.	Cluster	1000 - 3000	200 - 500
2.	Spot	50 - 100	50 - 70
3.	Fragment	10 - 20	10 - 15
4.	Cellule	< 5	< 10

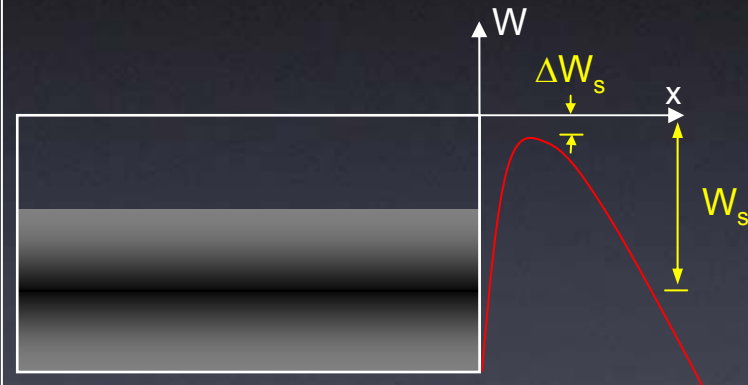
EMISSION ELECTRONIQUE

- Densité de courant très élevée : $10^8 - 10^{12} \text{ A/m}^2$ (*forte incertitude exp.*)
- Théories de l'émission électronique :

Emission thermoélectronique



Emission par effet de champ

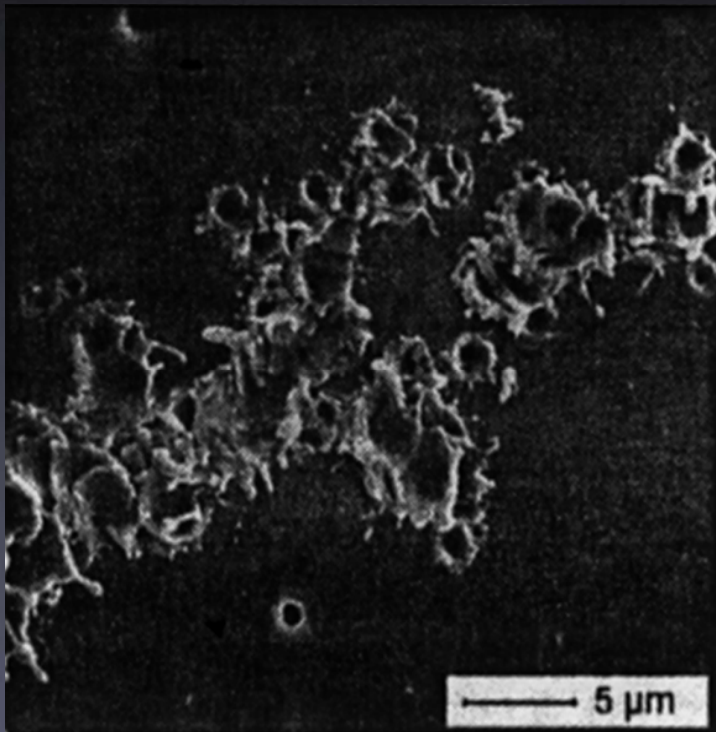


émission TF (**Thermo-Field**)

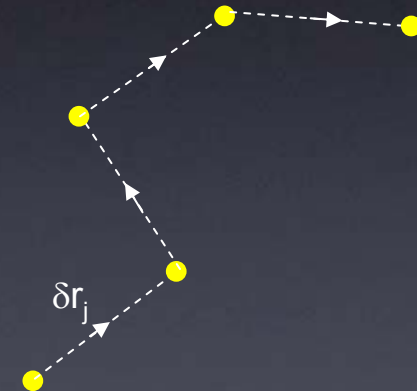
– émission par **explosion**

MOUVEMENT D'UN SPOT CATHODIQUE

- Vitesse d'un spot : 0,1 - 1000 m/s
- Mouvement apparent du spot : extinction et création d'un nouveau spot
- **Déplacement aléatoire** en l'absence de perturbation extérieure



RL Boxman et al., Handbook of Vacuum Arc Science and Technology (1995)



déplacement par saut

$$\text{marche aléatoire : } W(R) dR = \frac{2R}{\langle R^2 \rangle} \exp\left(-\frac{R^2}{\langle R^2 \rangle}\right) dR$$

MOUVEMENT D'UN SPOT CATHODIQUE

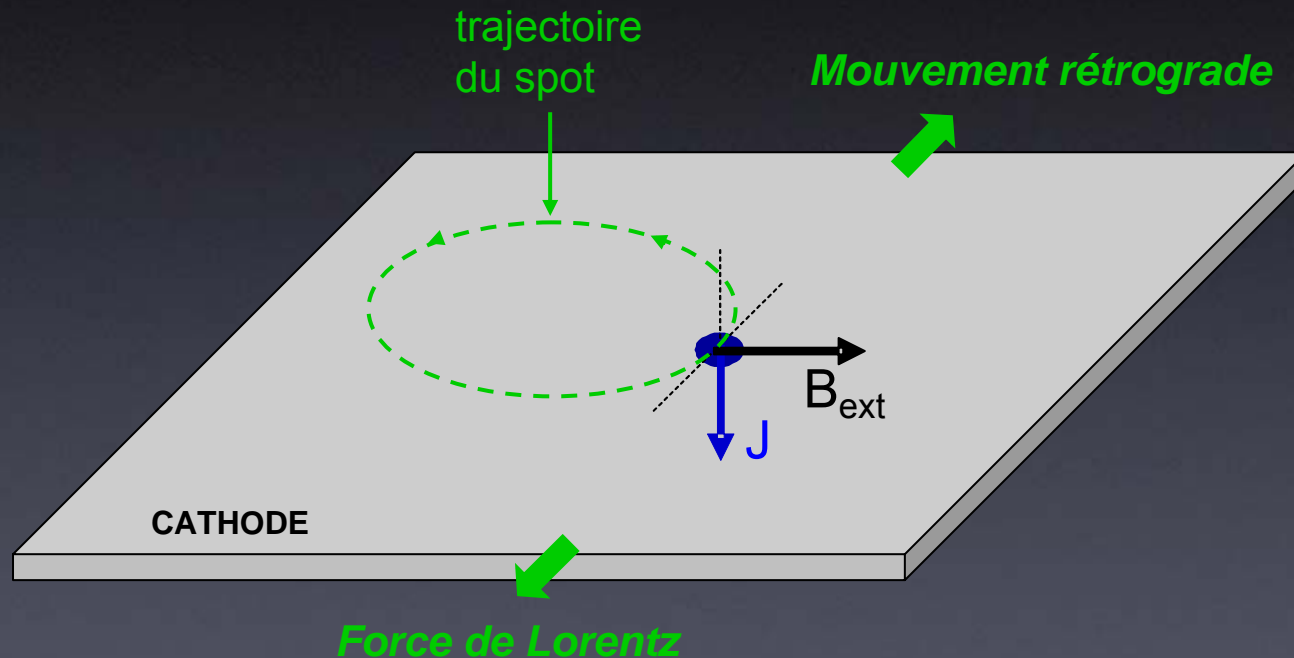
Influence d'un champ magnétique extérieur

- Champ magnétique transverse :
mouvement circulaire **rétrograde** (direction $-\mathbf{J} \times \mathbf{B}$)

MOUVEMENT D'UN SPOT CATHODIQUE

Influence d'un champ magnétique extérieur

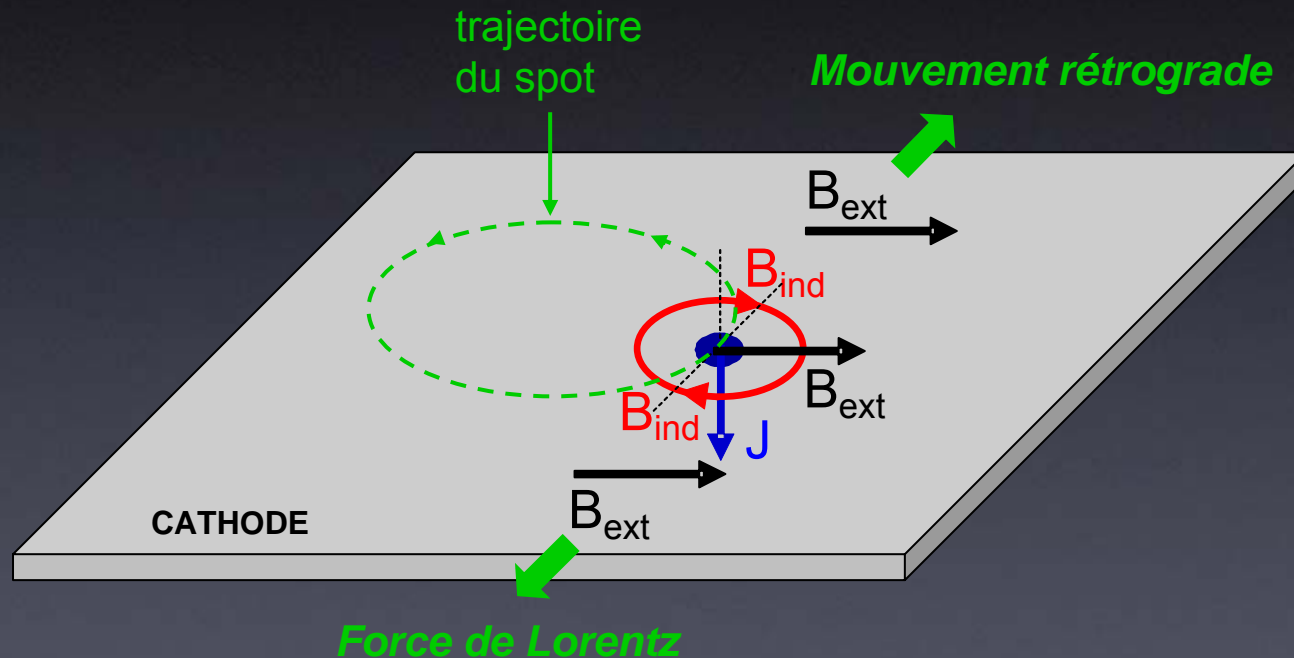
- Champ magnétique transverse :
mouvement circulaire **rétrograde** (direction $-\mathbf{J} \times \mathbf{B}$)



MOUVEMENT D'UN SPOT CATHODIQUE

Influence d'un champ magnétique extérieur

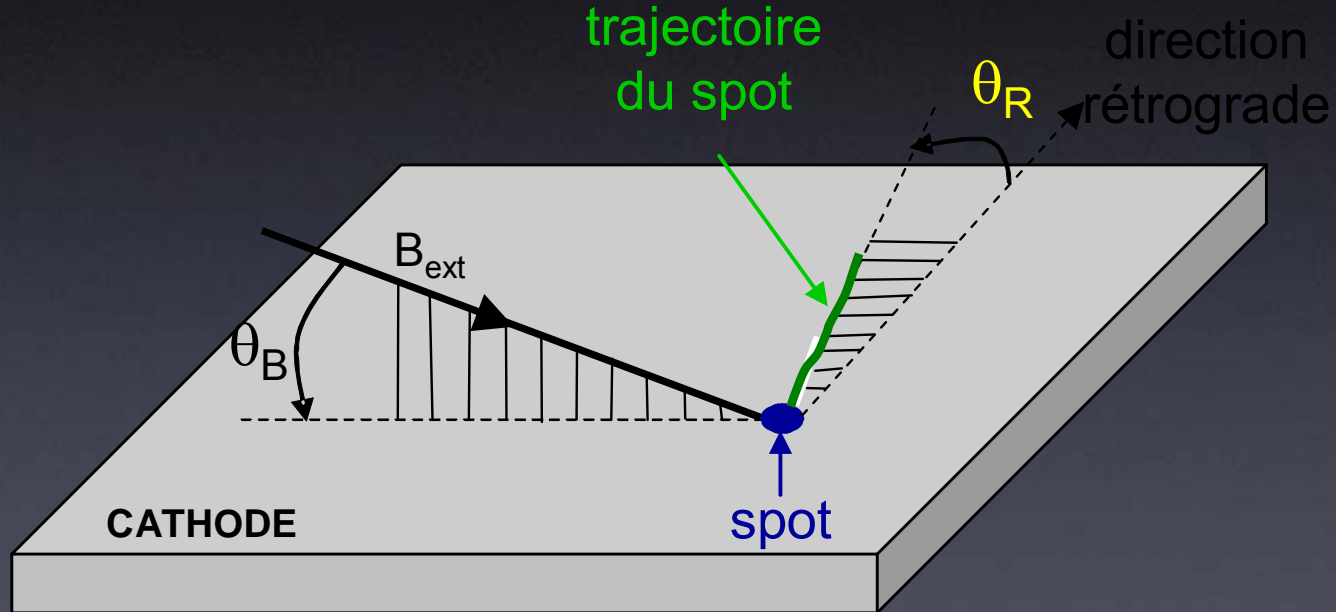
- Champ magnétique transverse :
mouvement circulaire **rétrograde** (direction $-\mathbf{J} \times \mathbf{B}$)



MOUVEMENT D'UN SPOT CATHODIQUE

Influence d'un champ magnétique extérieur

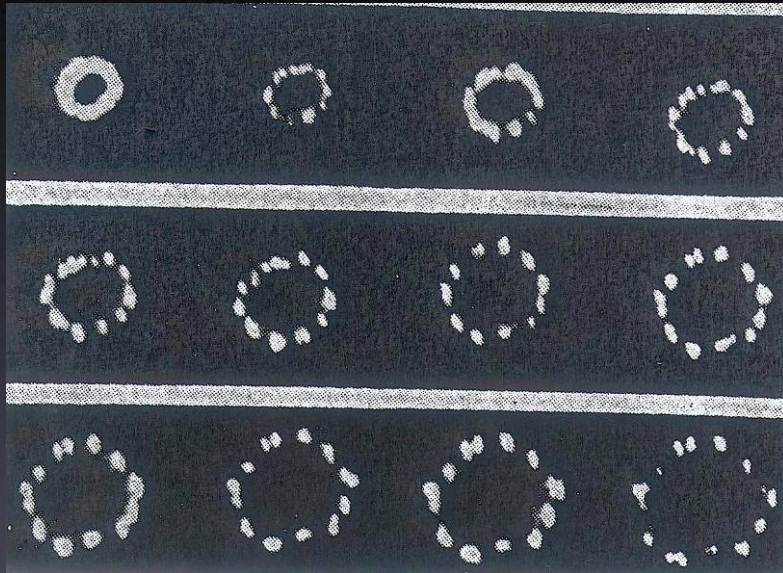
- Champ magnétique incliné par rapport à la surface de la cathode :
déviation de Robson



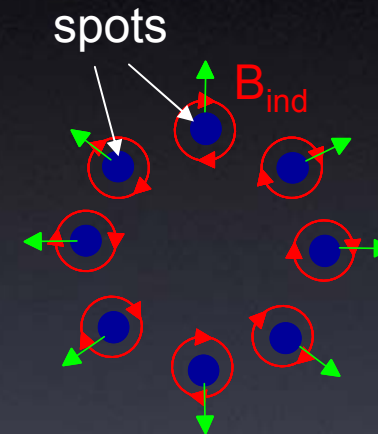
MOUVEMENT D'UN SPOT CATHODIQUE

Cas de l'arc multi-spots

- Sans perturbation extérieure : **mouvement répulsif**



Perskii et al., High Temperature, (1989)



- En présence d'un champ magnétique extérieur transverse :
(mouvement aléatoire) + **mouvement répulsif** + **mouvement circulaire rétrograde**

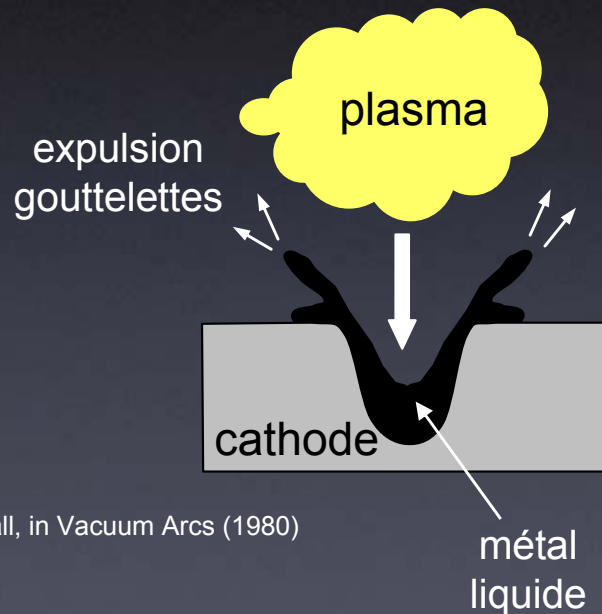
PROPRIETES DU PLASMA

- Plasma émanant du spot subit une détente sous vide
- Plasma très fortement ionisé
 - *degré d'ionisation proche de 100 %*
 - *production d'ions multi-chargés*
- Energie cinétique des ions très élevée (20 – 200 eV)
 - *énergie $\gg U_{arc} \rightarrow$ les ions atteignent l'anode*
 - *$v_{ions} \sim 10 \text{ km/s} \rightarrow$ régime d'écoulement supersonique*
- Courant ionique représente une fraction constante ($\sim 10 \%$) du courant d'arc
- Température électronique (3 à 9 eV)

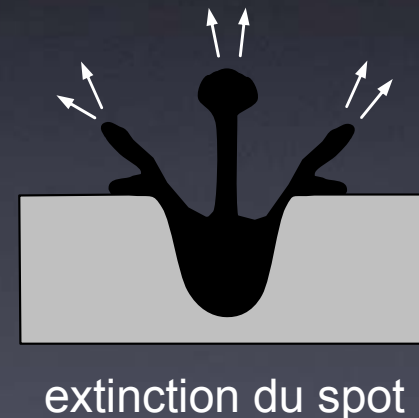
MACROPARTICULES

■ Ejection de gouttelettes de métal liquide

- *taille ($\sim 0,1-100 \mu m$)*
- *vitesse ($\sim 0,1-100 m/s$)*
- *faible angle d'inclinaison par rapport à la cathode ($\sim 10-30^\circ$)*



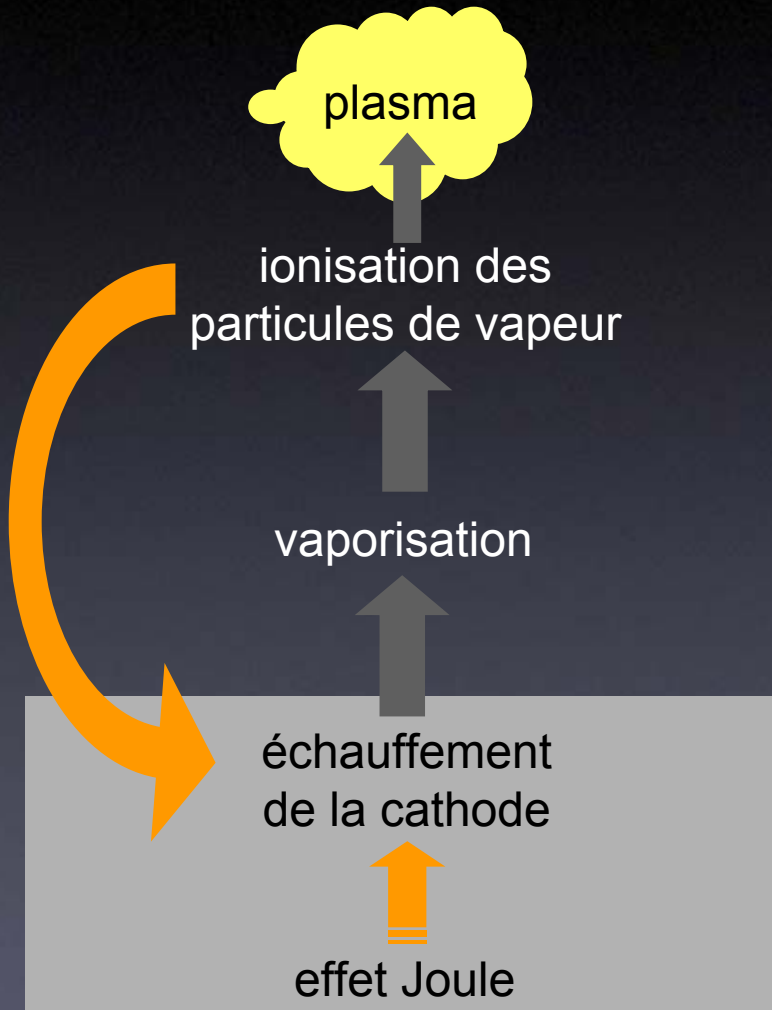
Farall, in Vacuum Arcs (1980)



■ Inconvénient dans la plupart des applications de l'arc sous vide

MODELE DU SPOT CATHODIQUE

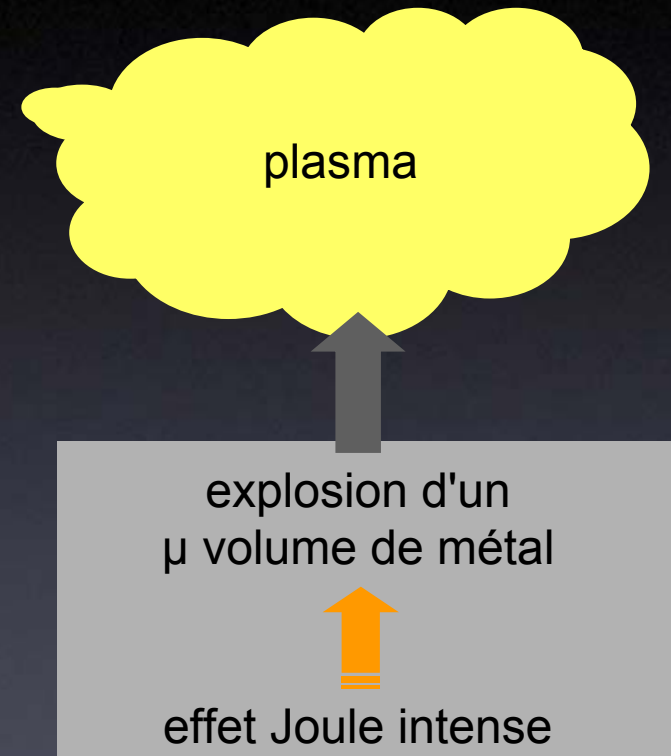
- Modèle quasi-stationnaire :
évaporation de la cathode



CATHODE

I.I. Beilis, in Handbook of Vacuum Arc
Science and Technology (1995)

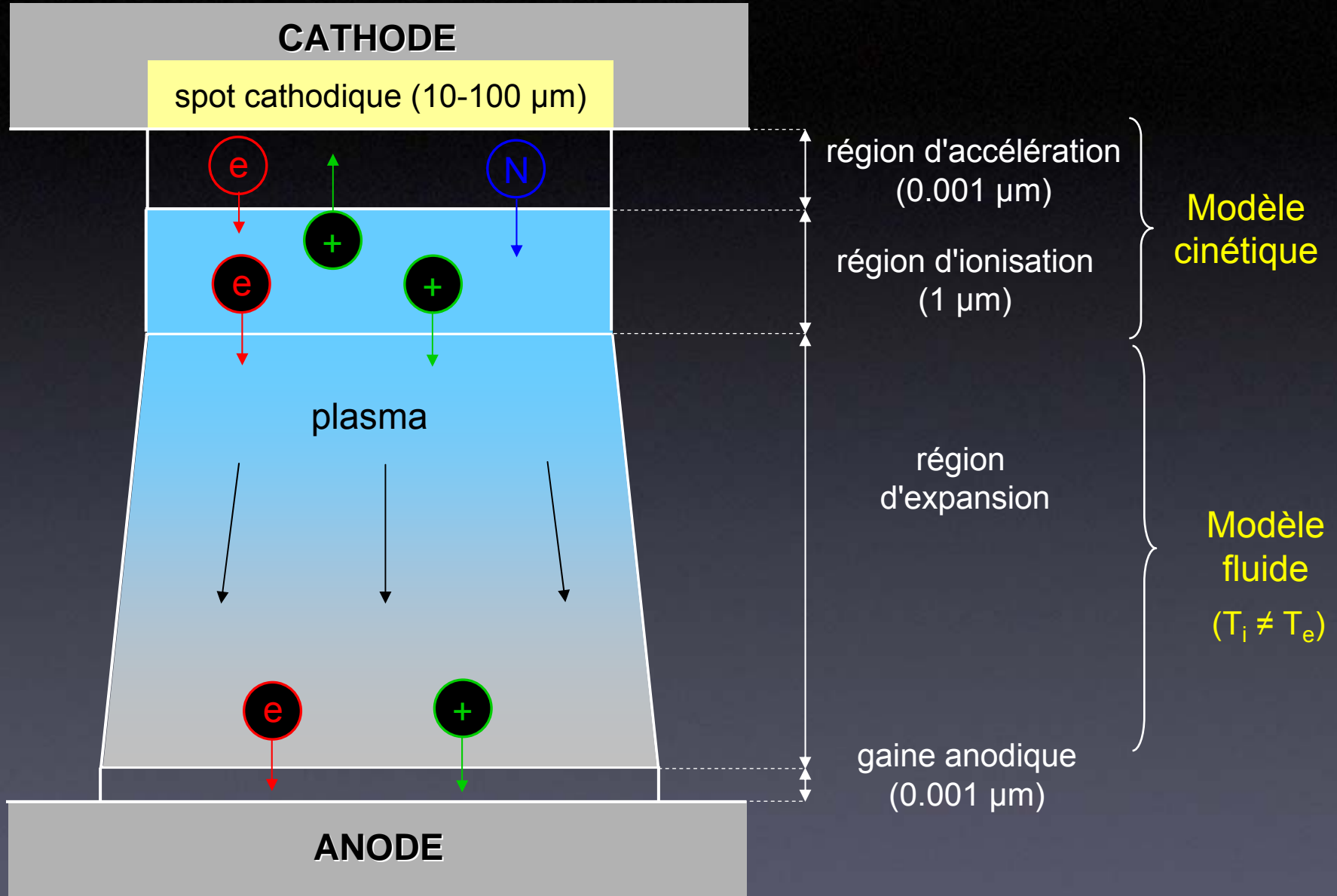
- Modèle d'émission **explosive**



CATHODE

G.A. Meysats, Cathode phenomena
in a vacuum discharge (2000)

MODELE STATIONNAIRE D'UN SPOT CATHODIQUE



PLAN

- L'arc électrique sous vide : aspects fondamentaux

 - définitions*

 - applications de l'arc sous vide*

 - régimes de fonctionnement*

 - émission électronique*

 - mouvements des spot cathodiques*

 - plasma interélectrode*

 - macro-particules*

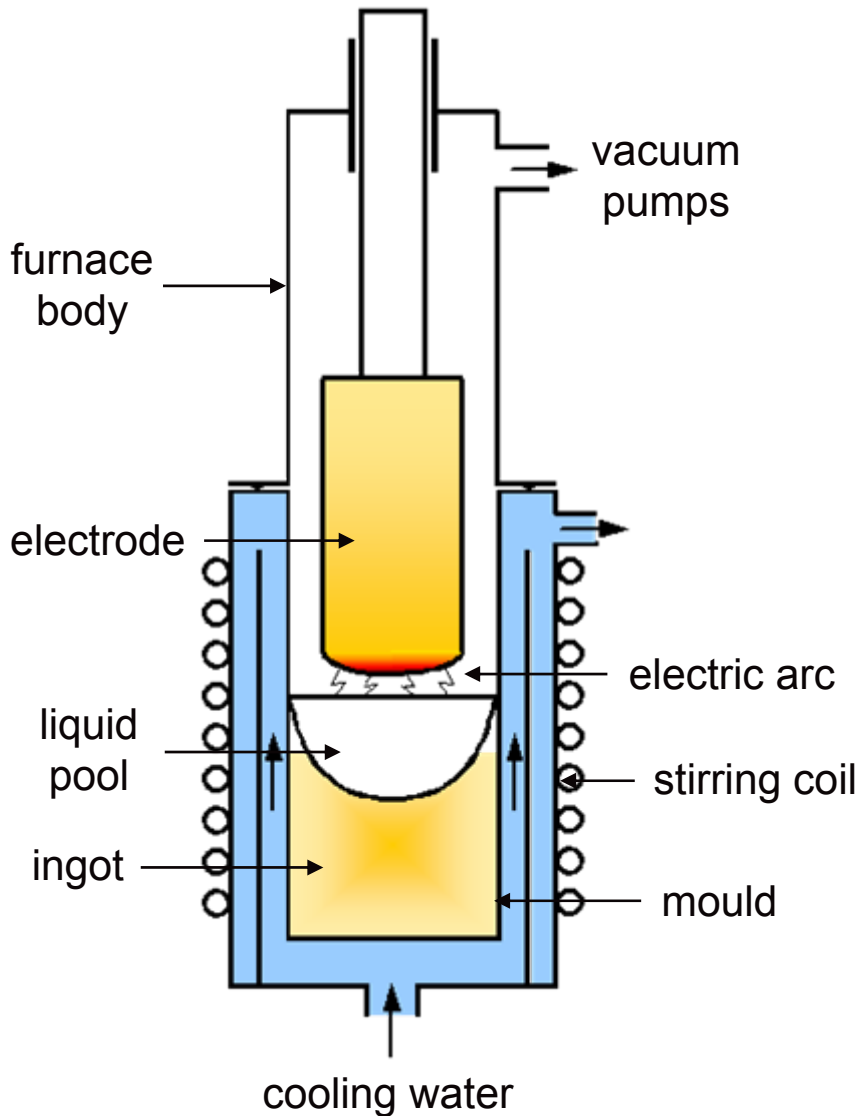
 - modélisation du spot cathodique*

- Un exemple d'utilisation en métallurgie : le procédé de refusion VAR

 - étude expérimentale dans un four industriel*

 - modélisation numérique*

PROCEDE VAR



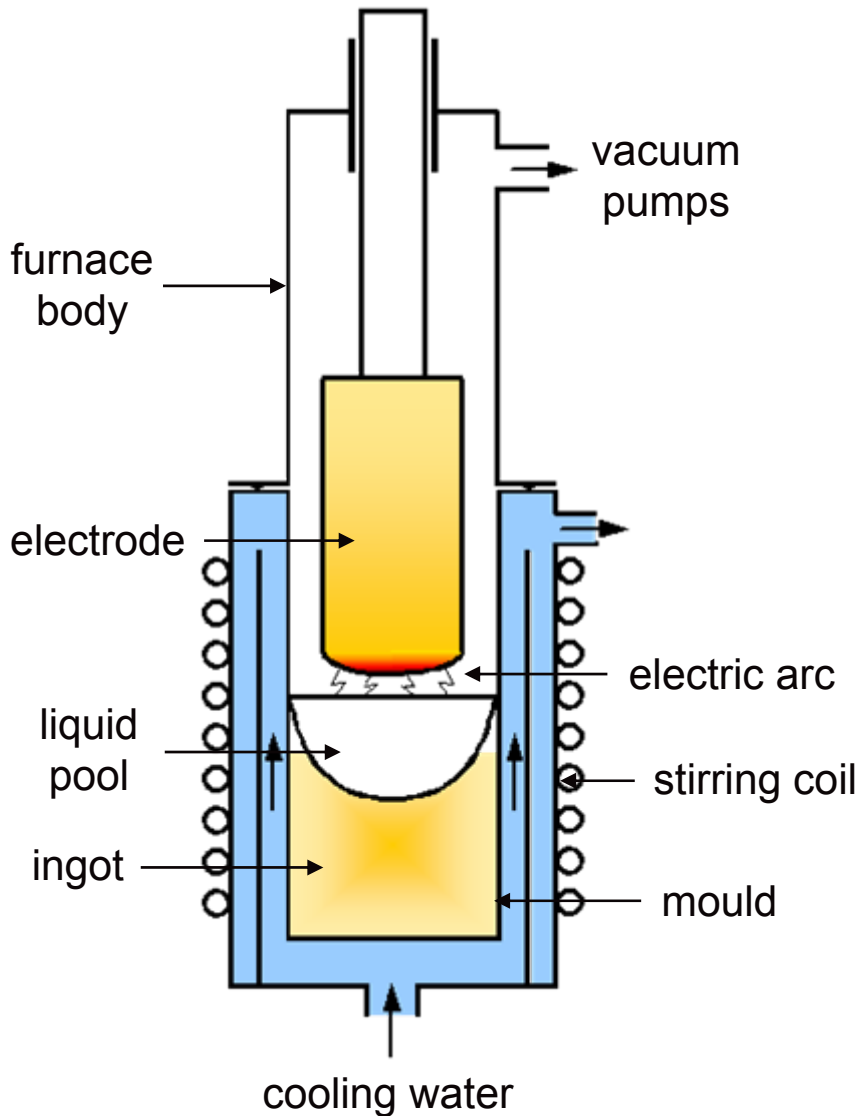
■ Paramètres opératoires de l'arc :

- *courant continu*
- *intensité (5 à 40 kA)*
- *tension (20 à 30 V)*

■ Importance du comportement de l'arc :

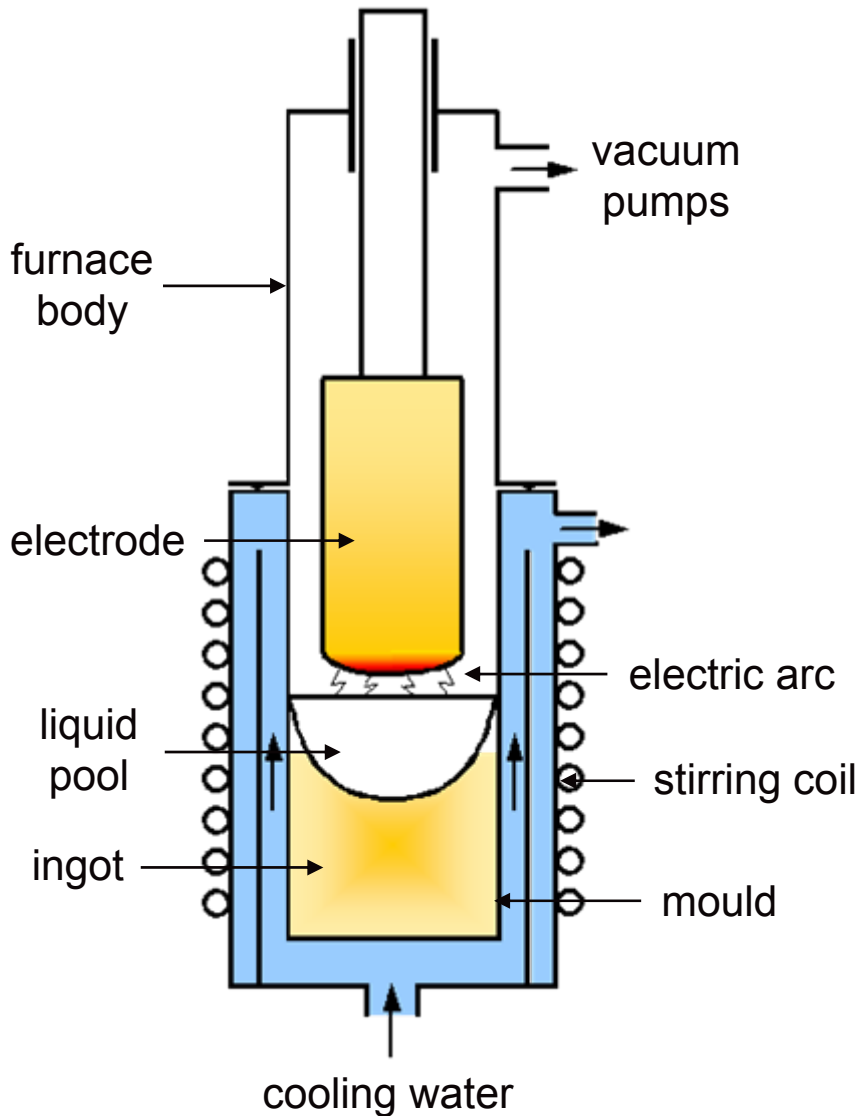
- *vitesse de fusion*
- *distributions du courant électrique et d'énergie en surface du bain*

PROCEDE VAR



- Code de simulation : SOLAR
- Modélisation de l'arc électrique
 - ⇒ Etude expérimentale
 - ⇒ Modèle numérique

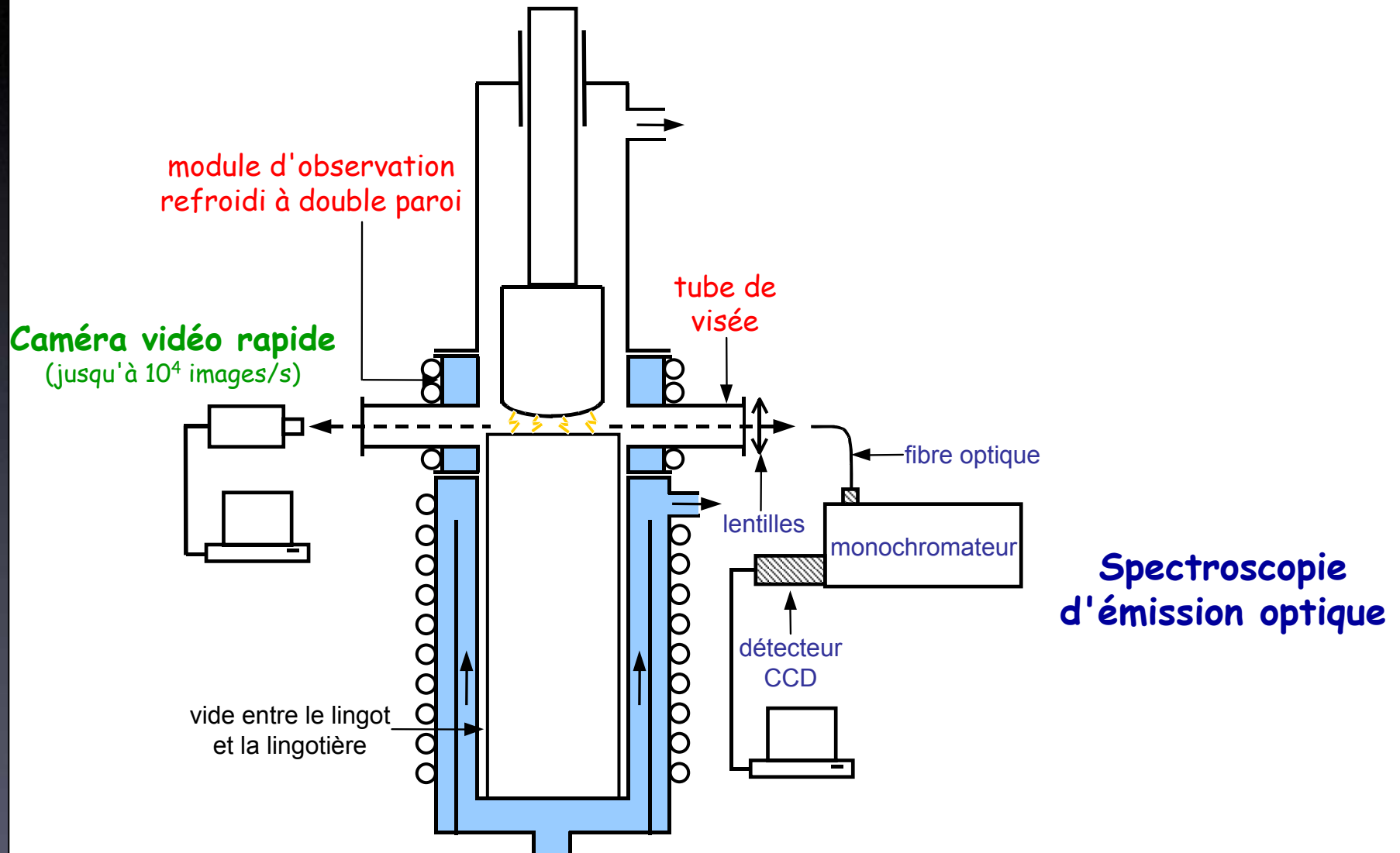
PROCEDE VAR



- Code de simulation : SOLAR
- Modélisation de l'arc électrique
 - ⇒ Etude expérimentale
 - ⇒ Modèle numérique

INSTRUMENTATION D'UN FOUR VAR

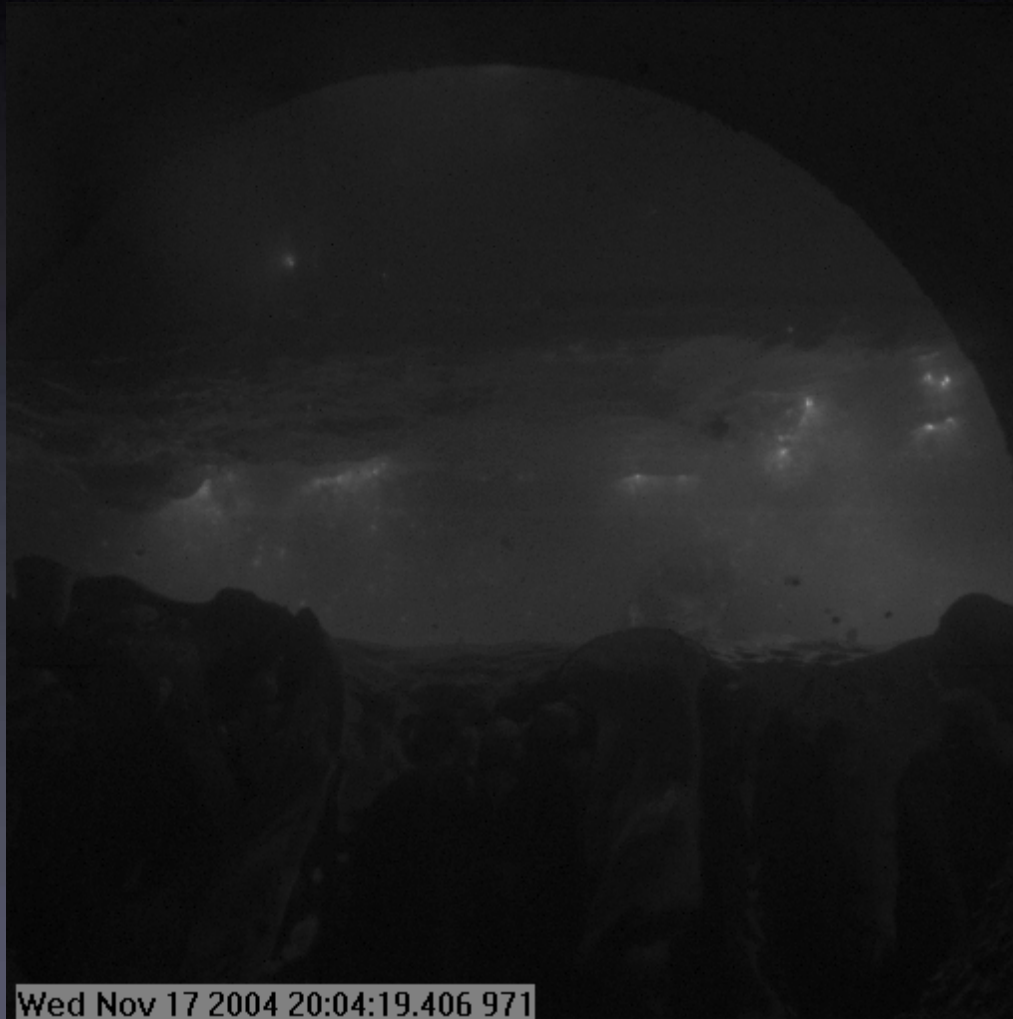
Four VAR industriel (CEZUS)



DESCRIPTION DE L'ARC ELECTRIQUE

Spécificités de l'arc du procédé VAR:

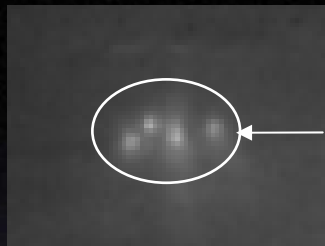
- *diamètre des électrodes et intensité du courant très élevés ($J \sim 10 \text{ A/cm}^2$)*
- *cathode et anode liquide*



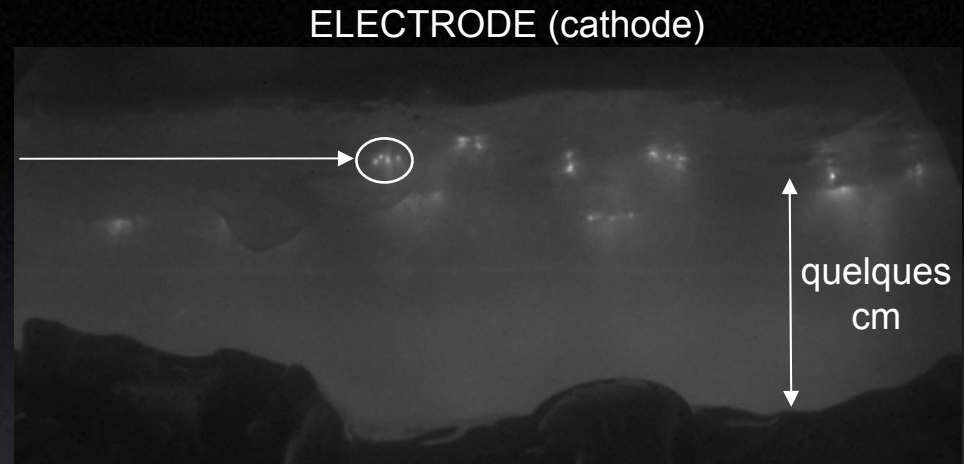
2500 images/s
ralenti x 500

Wed Nov 17 2004 20:04:19.406 971

DESCRIPTION DE L'ARC ELECTRIQUE



cluster
de spots
cathodiques



LINGOT (anode)

2500 images/s

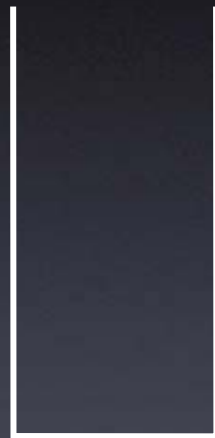
Propriétés des spots cathodiques

Durée de vie (ms)	0,3 – 4
Vitesse (m/s)	1 – 10
Intensité (A)	76 – 190
Nombre de spots dans un cluster	2 - 5

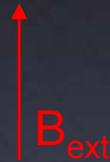
→ pour des conditions de refusion standards (10 A/cm^2), l'arc du procédé VAR est un **arc multi-spots de type diffus**

MOUVEMENT DES CLUSTERS

- Champ magnétique axial
- Forme de la base de l'électrode



base plane



base conique

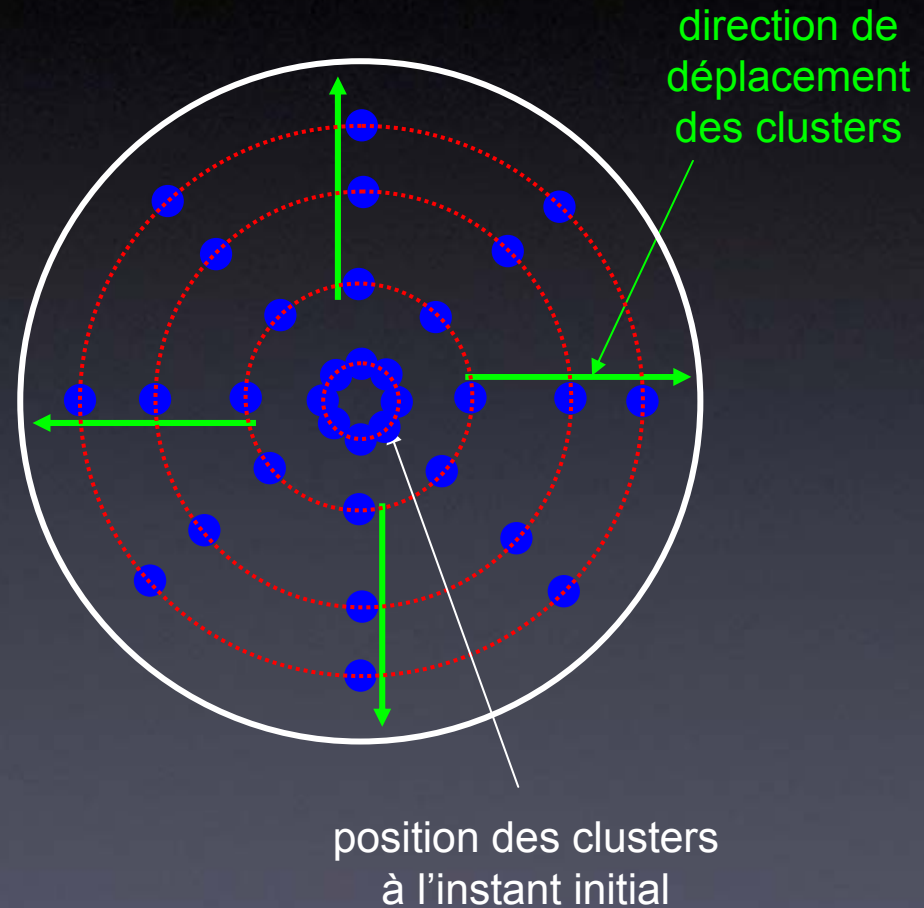
MOUVEMENT DES CLUSTERS

à la base d'une électrode plane



1000 images/s

base de l'électrode
(vue de dessous)



MOUVEMENT DES CLUSTERS

à la base d'une électrode conique

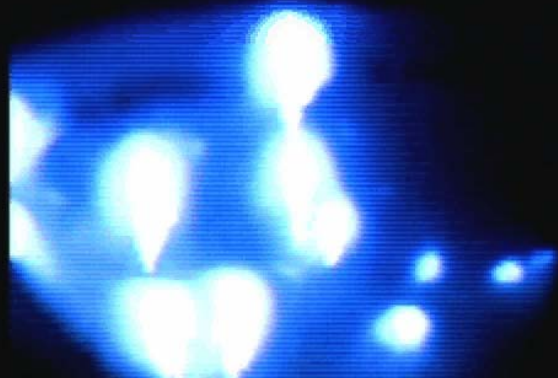
Géométrie de la base
de l'électrode



$$\alpha = 20^\circ$$

B dirigé vers le bas

03 17:47:28 PLAY-002928
FWD10 -0002.9280sec

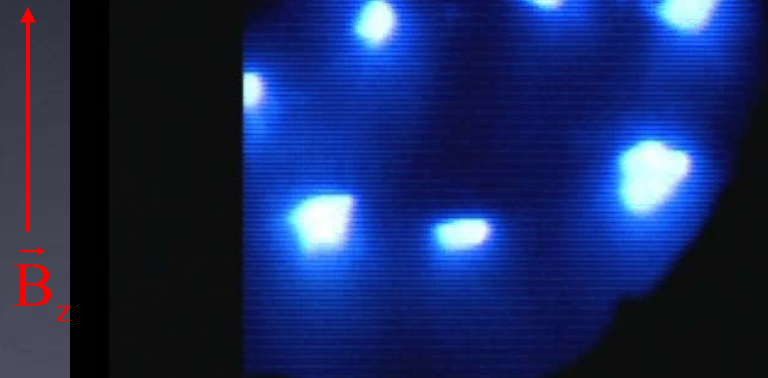


1/2000 END 1000FPS

1000 images/s

B dirigé vers le haut

06 18:59:11 PLAY-005851
FWD10 -0005.8510sec

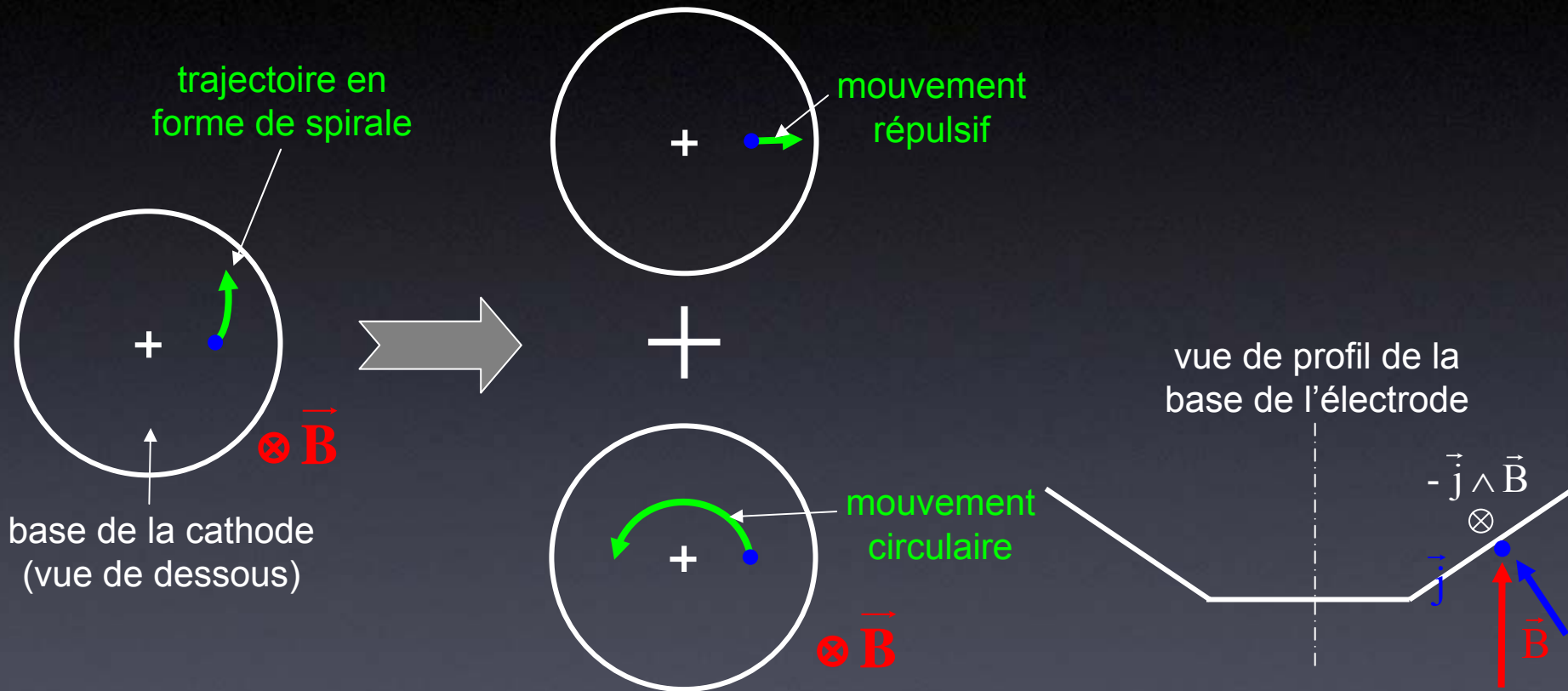


1/2000 END 1000FPS

1000 images/s

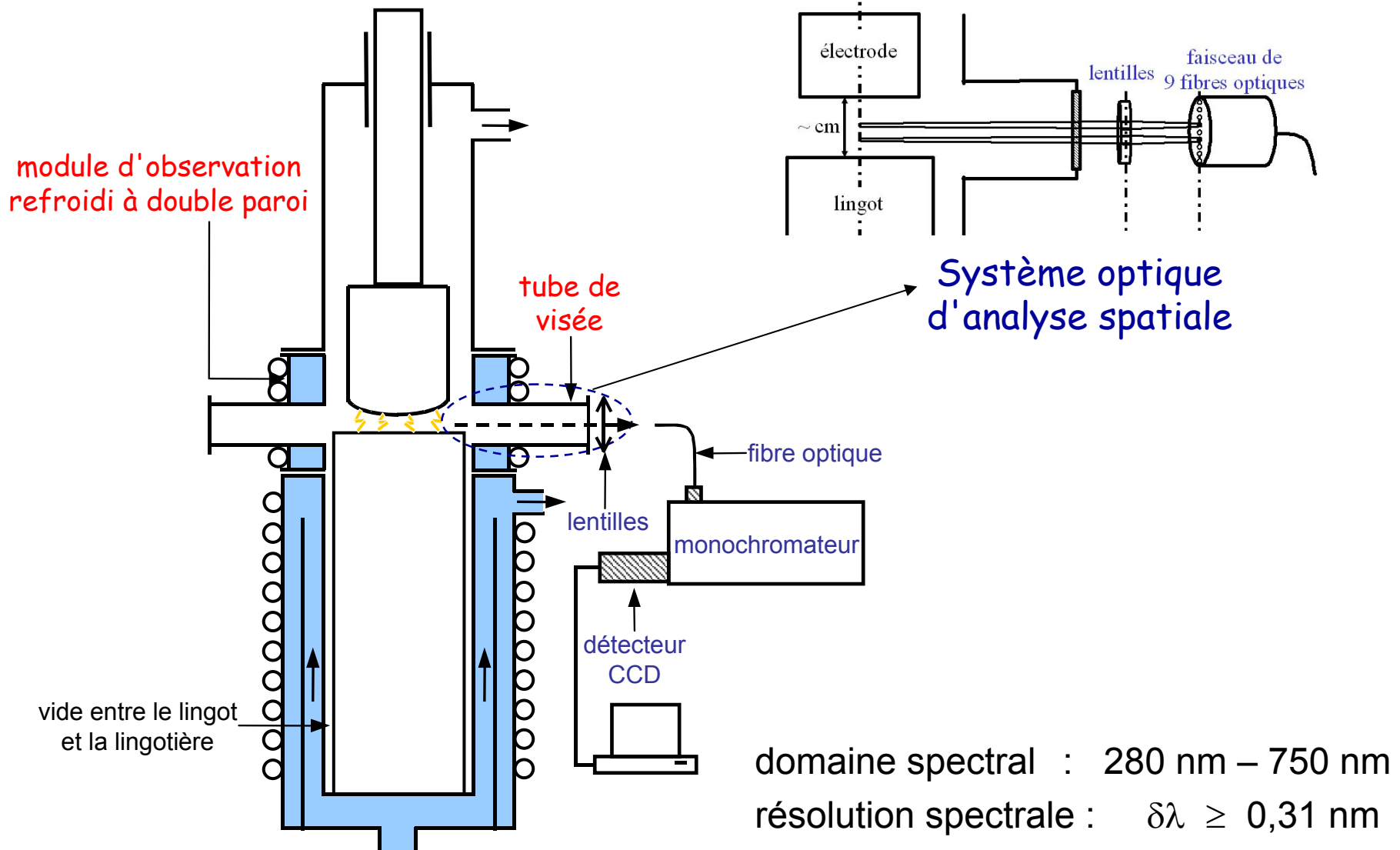
MOUVEMENT DES CLUSTERS

à la base d'une électrode conique

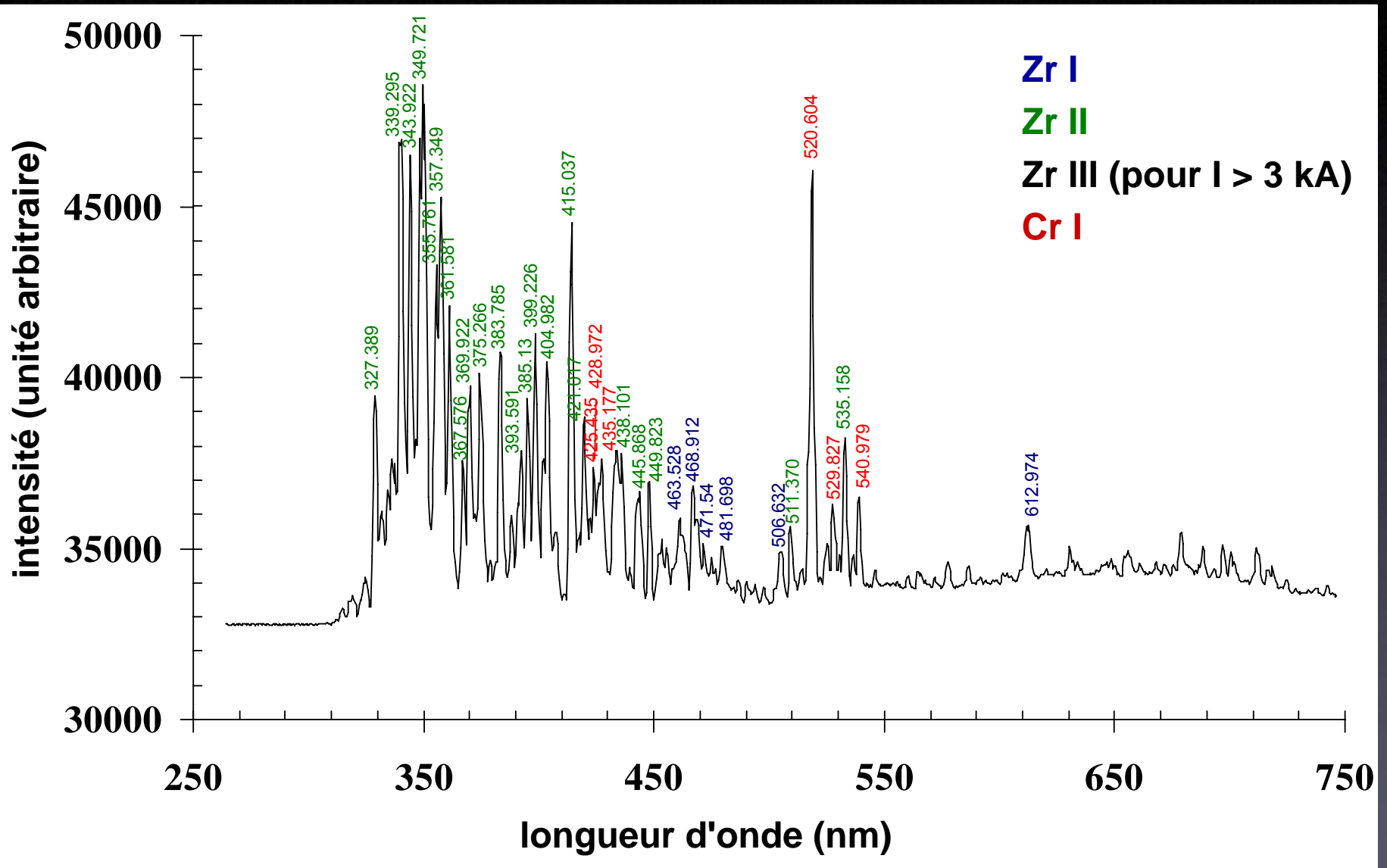


mouvement répulsif + mouvement circulaire rétrograde

DIAGNOSTIC SPECTROSCOPIQUE DU PLASMA



SPECTRE D'EMISSION

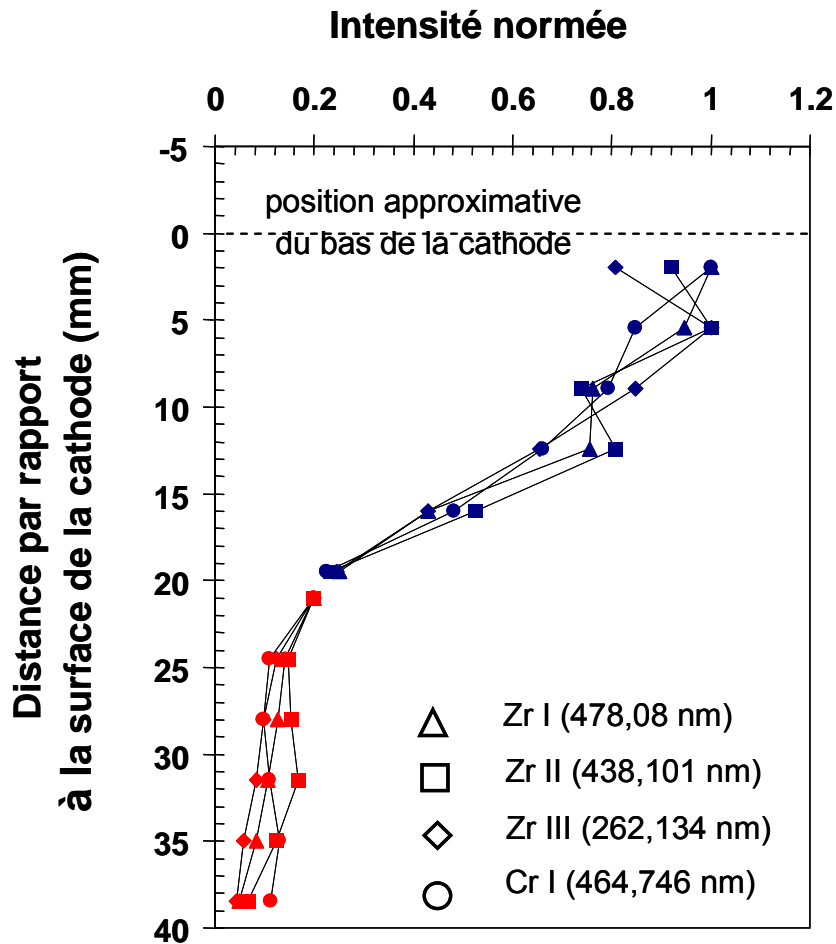


PARAMETRES DU PLASMA

T_{exc} (eV)	Zr I	$1,1 \pm 0,2$
	Zr II	$1,3 \pm 0,2$
	Cr I	$1,0 \pm 0,2$
Taux d'ionisation (%)		≥ 80

- Températures d'excitation des différentes espèces comparables (~ 1 eV)
- Plasma très fortement ionisé

VARIATIONS SPATIALES



- Décroissance des intensités conforme aux effets attendus de la détente du plasma

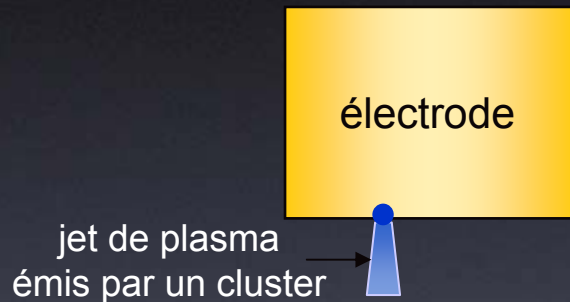
$$I_{ij} = K_{ij} N_0 N_e \langle \sigma_0^i u_e \rangle_{app} h \nu_{ij} (A_{ij} / \sum_{j < i} A_{ij})$$

- Composition du plasma peu modifiée dans la majeure partie de l'espace interélectrode

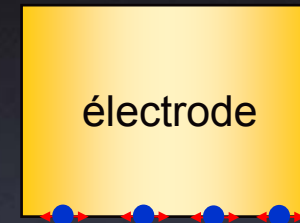
MODELISATION DE L'ARC ELECTRIQUE

Arc électrique \approx ensemble de clusters identiques et indépendants

Modélisation
d'un cluster unique



Modélisation
du mouvement des clusters
à la surface de la cathode



Modèle complet
de l'arc électrique

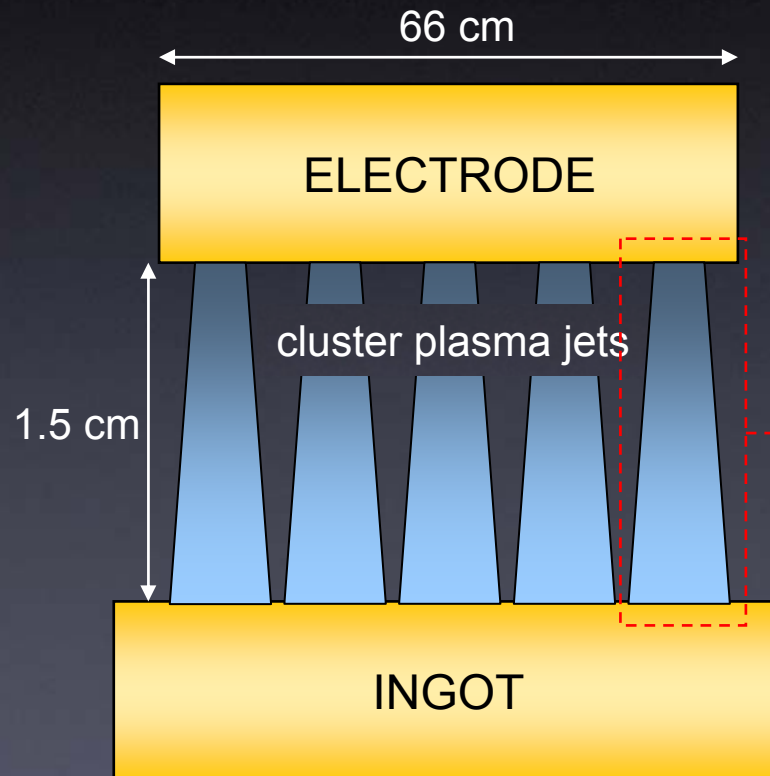
APPLICATION A LA REFUSION DE Zy4

Electric arc

zirconium alloy electrodes

current : 21kA

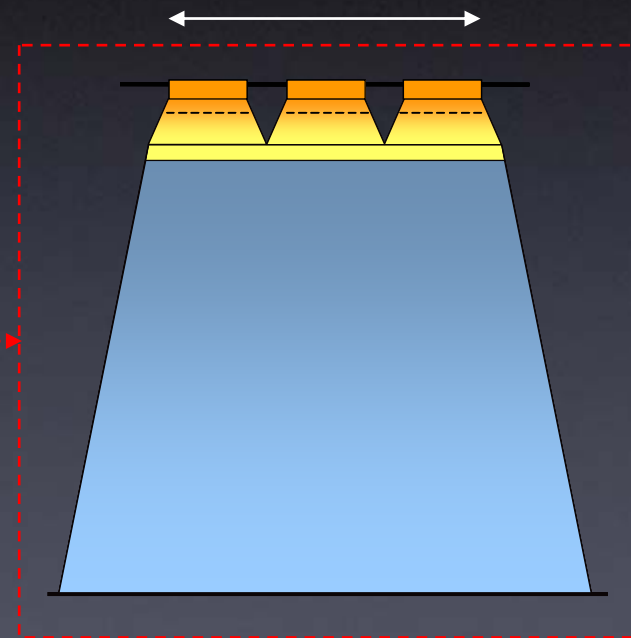
voltage : 27 V



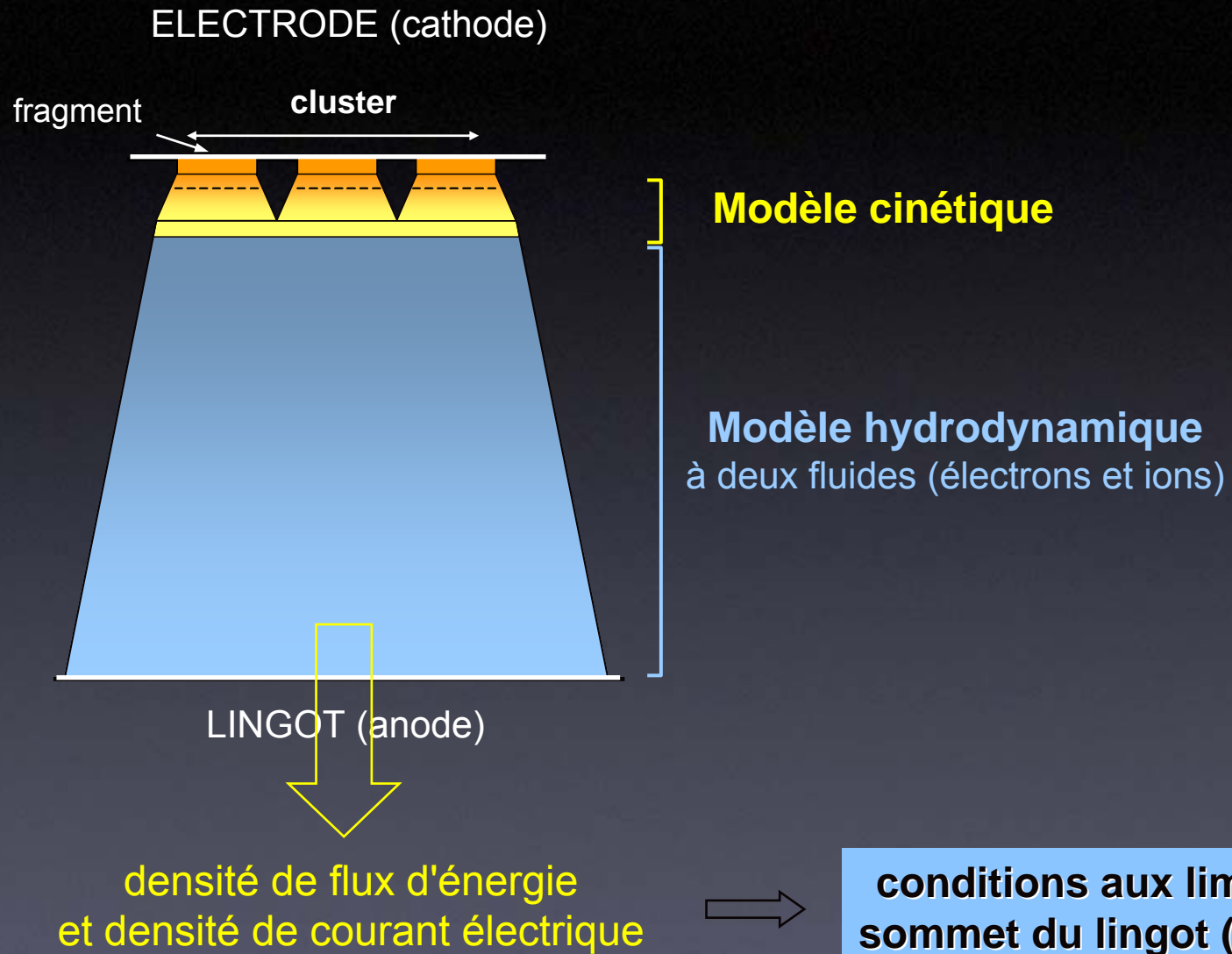
Cluster

diameter : 3 mm

current : 380 A



MODELISATION D'UN CLUSTER UNIQUE



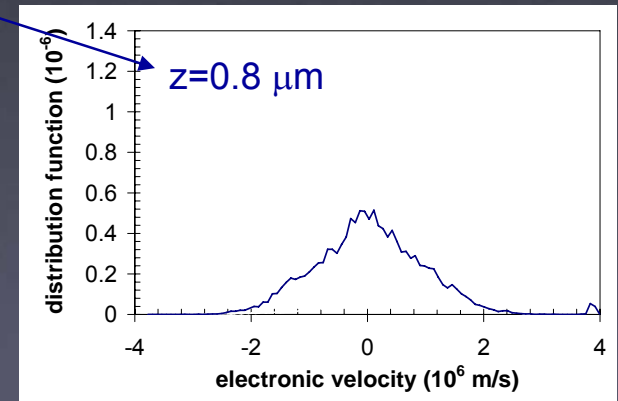
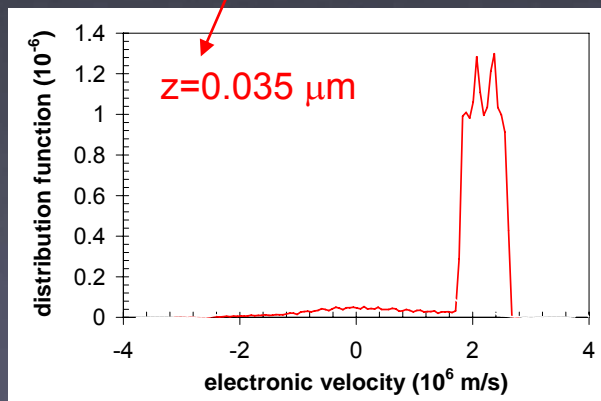
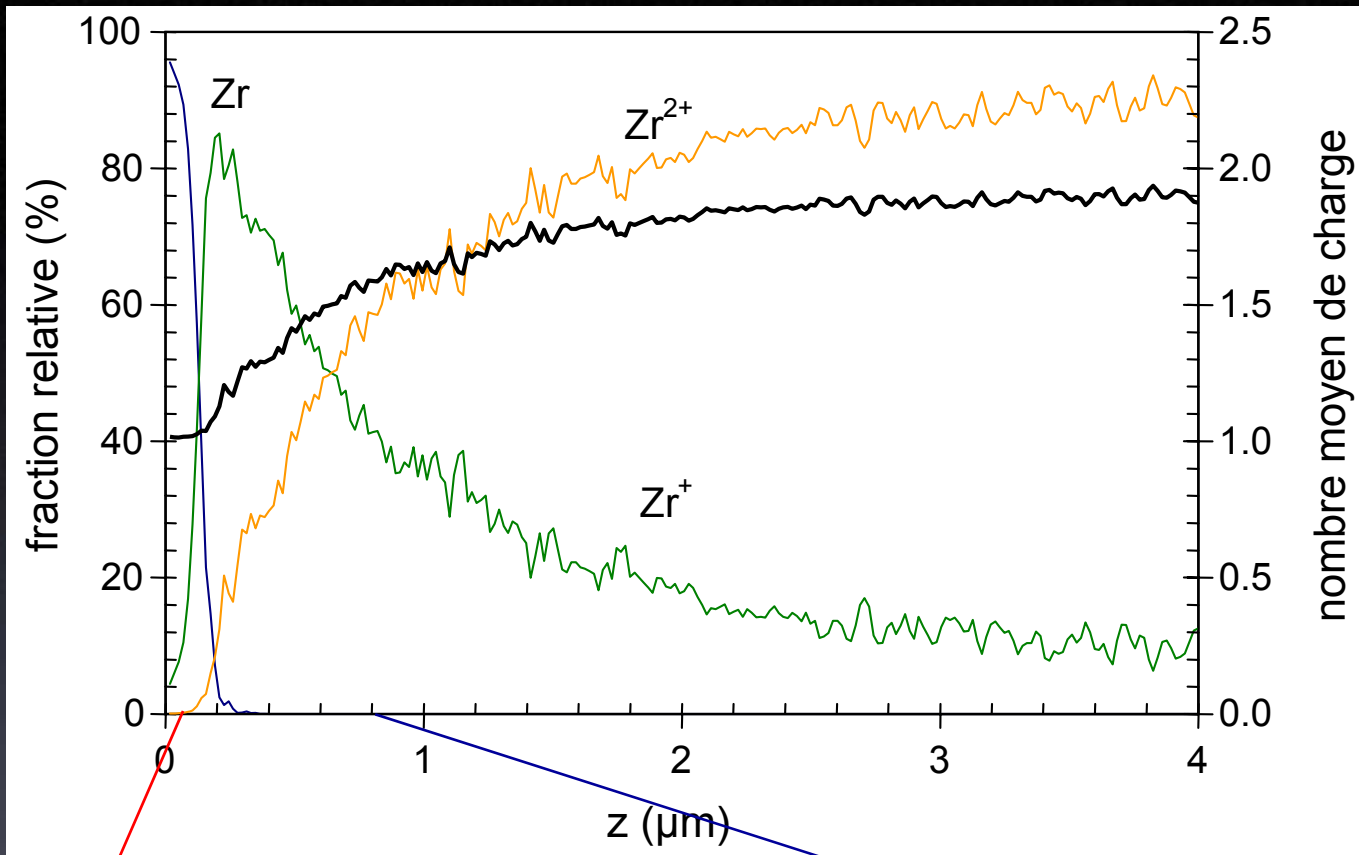
MODELE CINETIQUE

- Principaux phénomènes pris en compte :
 - *émission d'atomes par vaporisation (loi de Langmuir)*
 - *émission d'électrons*
 - *ionisation et recombinaison des particules de vapeur par collisions électroniques*

- Equations :
 - *équation de Vlasov*
 - *équation de Poisson*
 - *opérateur de collisions de Boltzmann*

- Simulation numérique : *méthode particulière (PIC - MCC)*

REGION CATHODIQUE



MODELE HYDRODYNAMIQUE

■ Principales hypothèses :

- *symétrie cylindrique*
- *plasma totalement ionisé et électriquement neutre (électrons + ions)*
- *composition constante*
- *électrons et ions traités comme 2 fluides distincts*
- *vitesse ionique et électronique proportionnelles*

■ Equations :

- *équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie relatives aux ions et aux électrons*
- *équations de Poisson et d'Ampère*
- *relations de couplage (termes d'échange électrons-ions)*

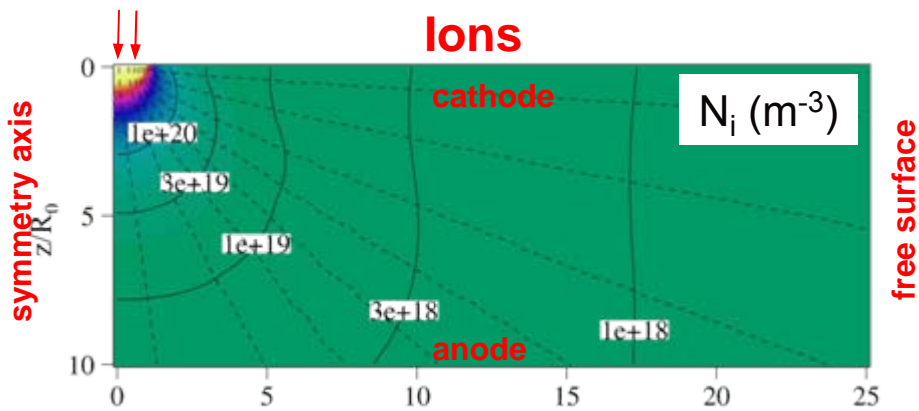
■ Conditions aux limites : *résultats du modèle cinétique amont*

■ Simulation numérique : *méthode de type volumes finis*

EXPANSION DU PLASMA

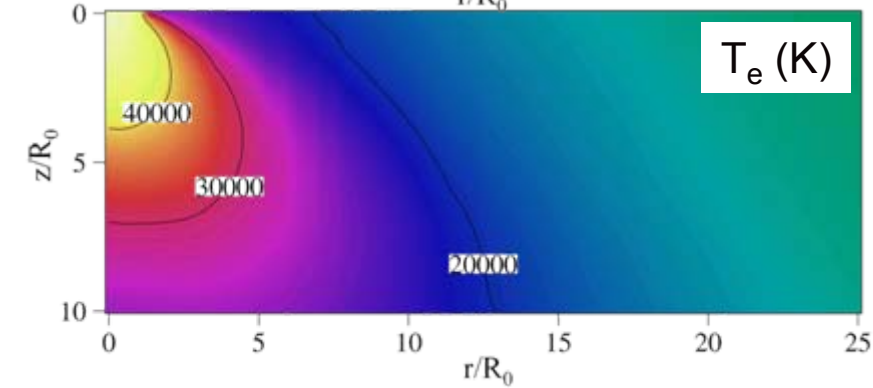
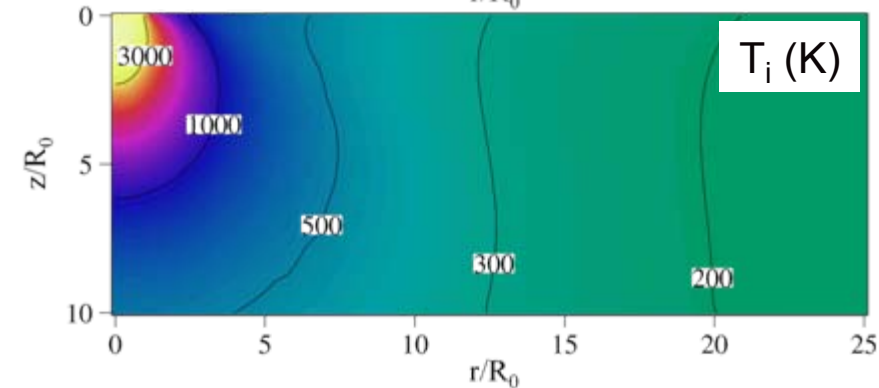
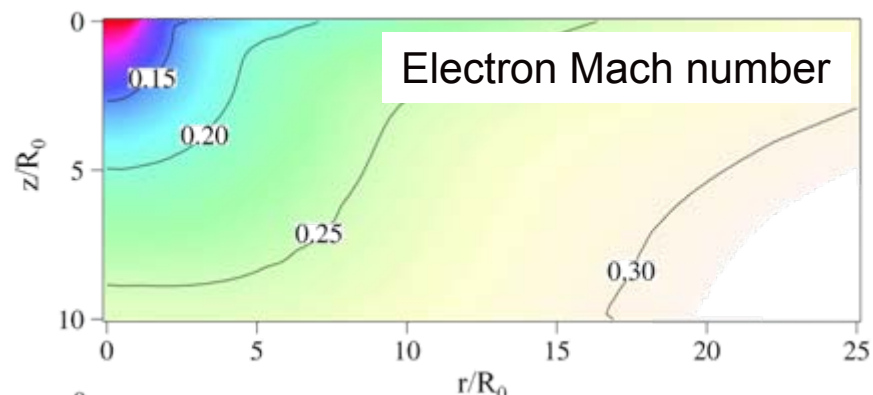
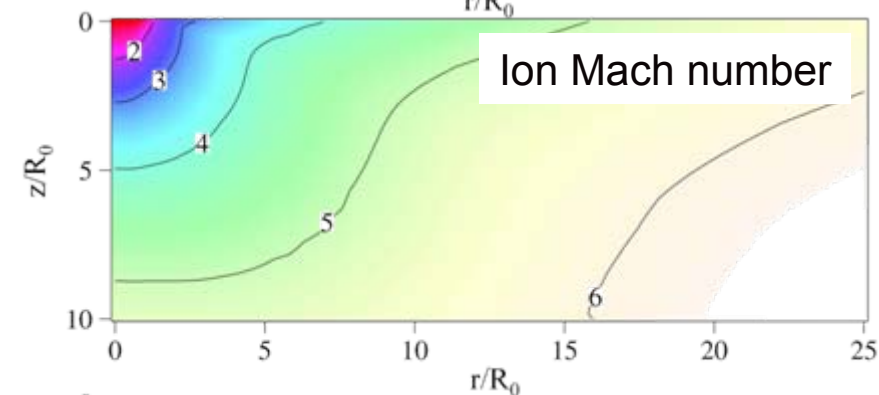
Ions

Electrons

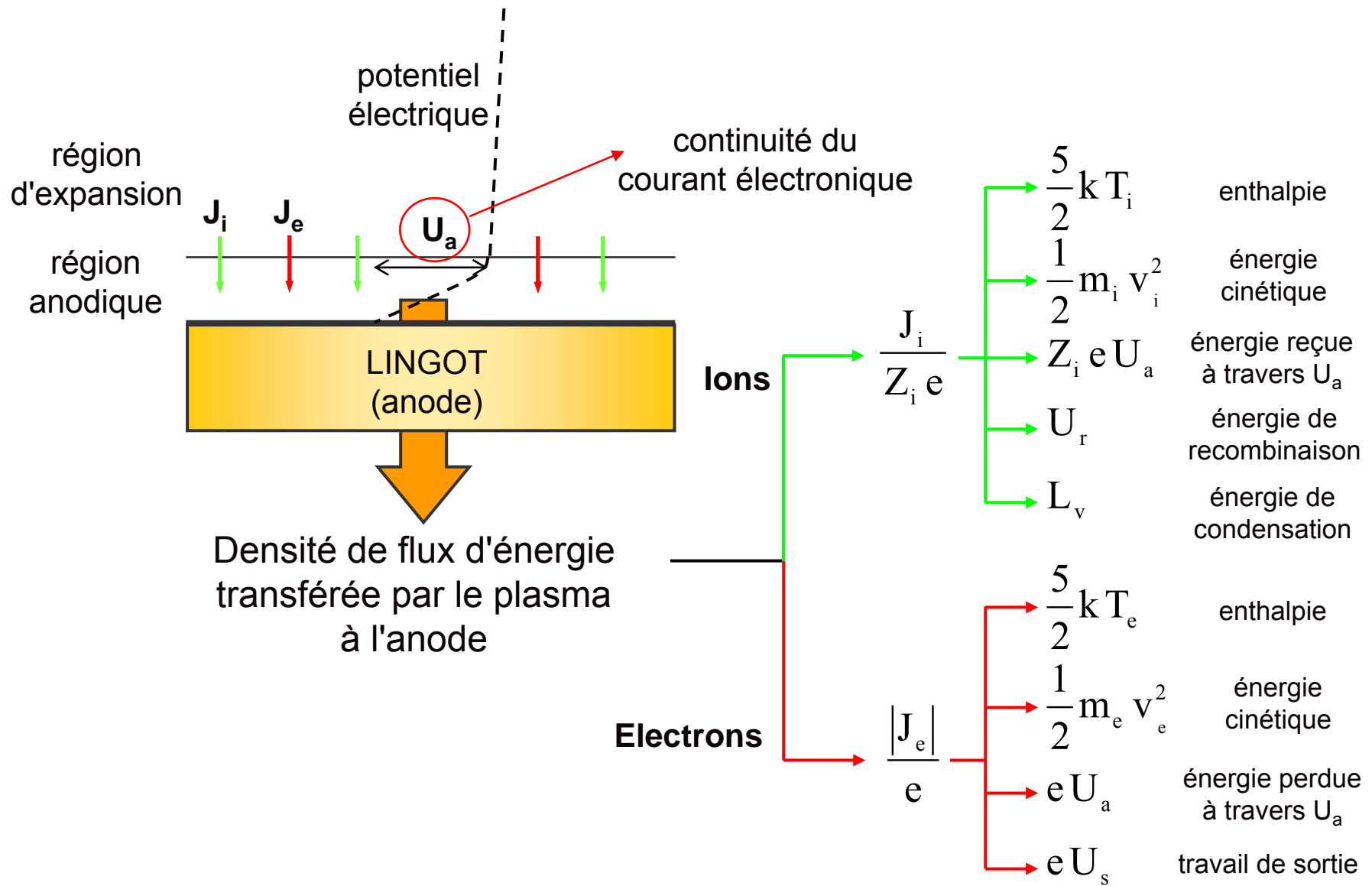


electroneutrality

$$N_e = Z_i N_i$$

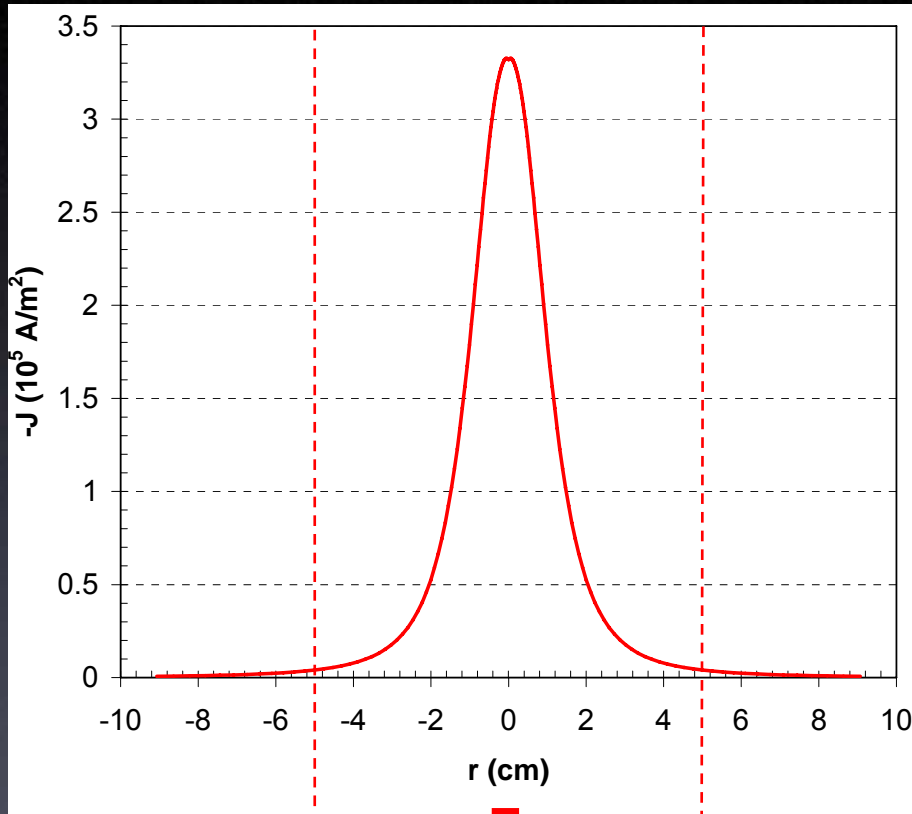


DENSITE DE FLUX D'ENERGIE A L'ANODE



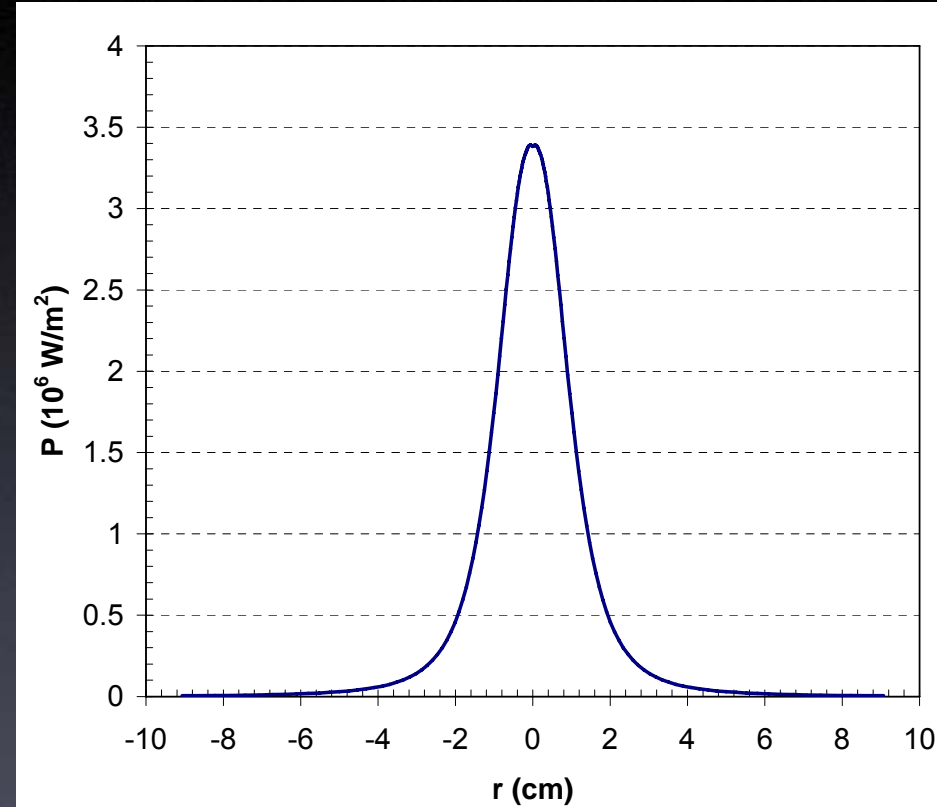
COURANT ET PUISSANCE TRANSMIS A L'ANODE

Densité de courant électrique (A/m^2)



80 % du courant émis
par le cluster

Densité de flux d'énergie (W/m^2)



MODELISATION DU DEPLACEMENT DES CLUSTERS

sans champ
magnétique extérieur

(mouvement répulsif)



en présence d'un champ
magnétique extérieur

$$\vec{j} \wedge \vec{B} \neq 0$$



mouvement répulsif

$$\vec{V}_i = K_R \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_c} \frac{1}{d_{j-i}} \vec{u}_{j-i}$$

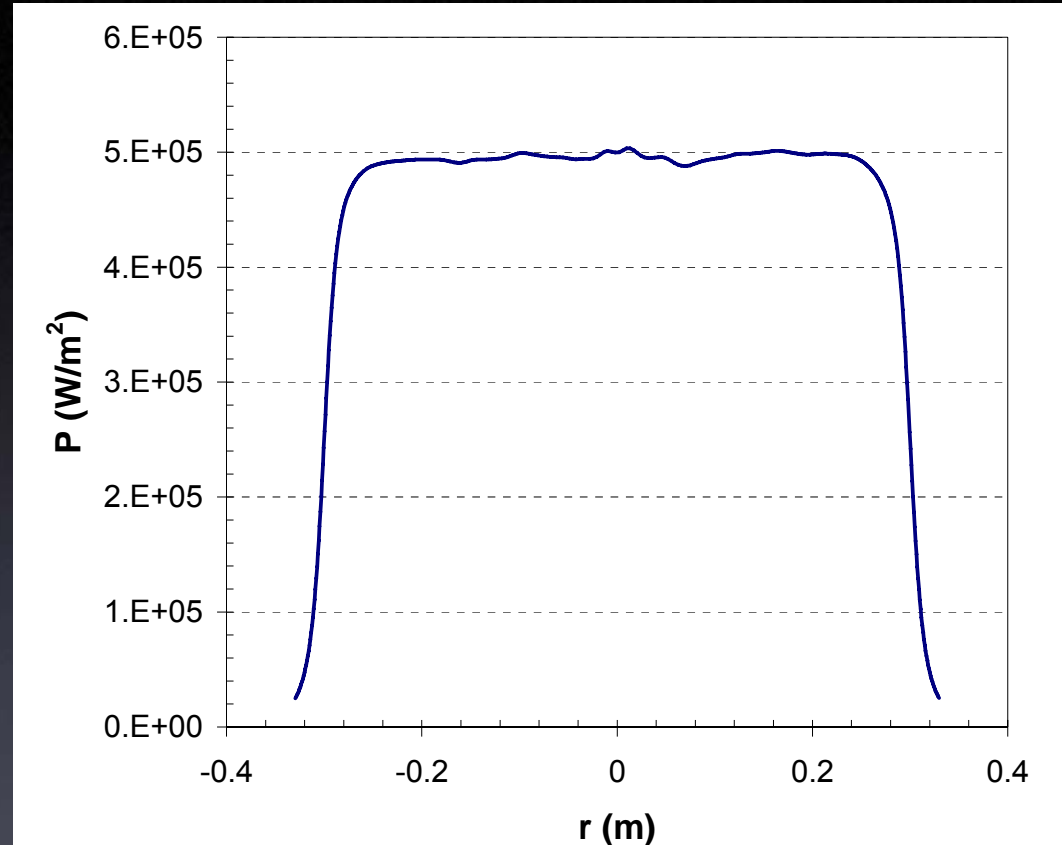
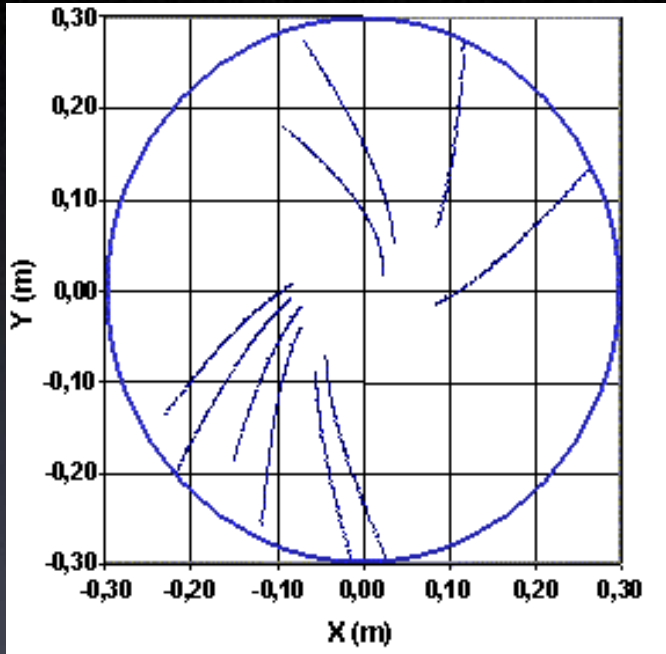
mouvement circulaire

$$\vec{V} = -K_M B \sin \alpha I_c \vec{u}_\theta$$

→ simulation directe des trajectoires d'un ensemble de clusters

DENSITE DE FLUX TOTALE D'ENERGIE A L'ANODE

trajectoires de clusters simulées



→ Puissance transmise par l'arc à l'anode : 137,5 kW
Puissance électrique de l'arc : $27 \times 21 \approx 567$ kW

$$\Rightarrow P_{\text{anode}} / P_{\text{cluster}} \sim 24 \%$$

CONCLUSIONS

- Principales propriétés et théories de base concernant l'arc sous vide
- Avantages principaux et applications
- **Champ de recherche ouvert :**
 - Fonctionnement des spots cathodiques
 - Interactions arc / électrodes
 - Déplacement de l'arc, mouvement des spots cathodiques
- **Références :**
 - Vacquié S, *L'arc électrique*, Sciences et Techniques de l'ingénieur, CNRS Ed. (2000)
 - Boxman RL et al., *Handbook of vacuum arc science and technology*, Noyes Publications Park Ridge, NJ (1995)