



Histoire de l'arc électrique

Phénomènes et applications

Serge Vacquié



Découverte de l'arc artificiel

- 1813 Humphrey DAVY





Les premières applications de l'arc

- 1844 Lampe à arc à haut flux par Léon Foucault
- 1862 Synthèse de l'acétylène par Marcellin Berthelot
- 1880 Soudage au plasma par Louis Clerc



Etude de l'arc électrique

Certaines équipes de recherche anglo-saxonnes [11] ont ainsi modélisé l'arc lorsque la distance entre les deux électrodes est fixe. La relation entre la tension U_a entre ses deux électrodes et le courant d'arc I_a s'exprime comme présenté dans l'équation 1.

$$U_a(I_a) = U_0 + k \cdot I_a \quad (1)$$

D'autres approches permettent une modélisation dynamique de l'arc [8]. En effet, lorsque la distance entre les électrodes e_a augmente, la tension d'arc croît plus rapidement que dans le cas d'arc statique. Le modèle le plus répandu est le modèle d'Ayrton à 4 paramètres (équation 2).

$$U_a(I_a, e_a) = U_0 + k \cdot I_a + C \cdot e_a + D \cdot e_a / I_a \quad (2)$$

Une équipe canadienne [7] a également montré que la tension d'arc lorsque le courant était supérieur à 2A pouvait se modéliser de façon intéressante par un modèle d'Ayrton simplifié ne contenant que deux coefficients comme présenté dans l'équation 3:

$$U_a(e_a) = U_0 + C \cdot e_a \quad (3)$$

Cette dernière relation introduit une dépendance linéaire de la tension d'arc et de la distance entre les électrodes.



Etude de l'arc électrique

- Formule de Mme AYRTON en 1933

- Du type $U_a = U_0 + k \cdot I_a$
- Impossibilité avec les connaissances de l'époque de dépasser ce stade

- Réticences

L'apparition de théories modernes s'est heurtée à une forte réticence des tenants de la physique traditionnelle.

Etude de la colonne d'arc

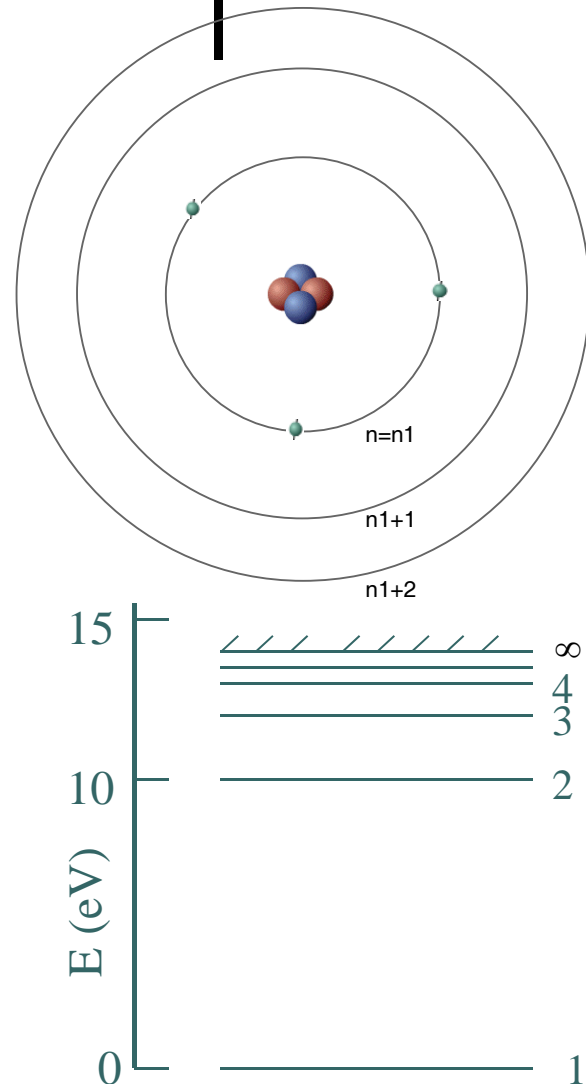


Diagramme simplifié de l'atome H

○ L'équilibre thermodynamique

- Loi de Maxwell
- Loi de Boltzmann
- Loi d'action de masse (Saha, Guldberg-Waage)
- Loi de Planck. Inapplicable

○ Equilibre thermodynamique local

ETL total et ETL partiel



Etude de la colonne d'arc

- Coefficients de transport
 - Chapman-Enskog : années 1930
 - Hirschfelder et al: 1954
- Rayonnement
 - Rentrée atmosphérique (1960)
 - Lampes et arcs: à partir des années 70
- Cinétique chimique et 2T
- Turbulence et instabilités
- Transfert plasma-matériaux



Phénomènes aux électrodes

- Phénomènes très complexes
 - Espaces anodique et cathodique
 - Emission des électrons

Emission des électrons

- Emission discontinue
- Définition des sites émissifs et des spots

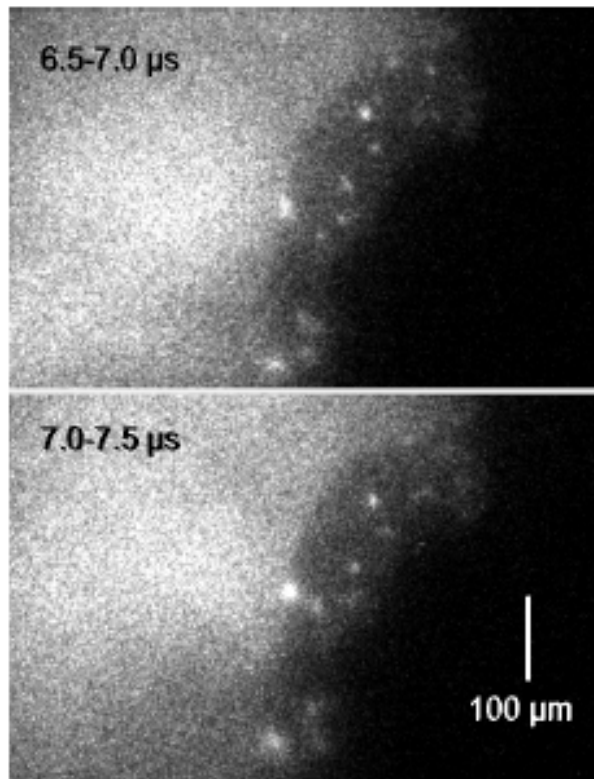


Figure 18. Spots at a Cu cathode in atmospheric air (Jüttner 1997b).

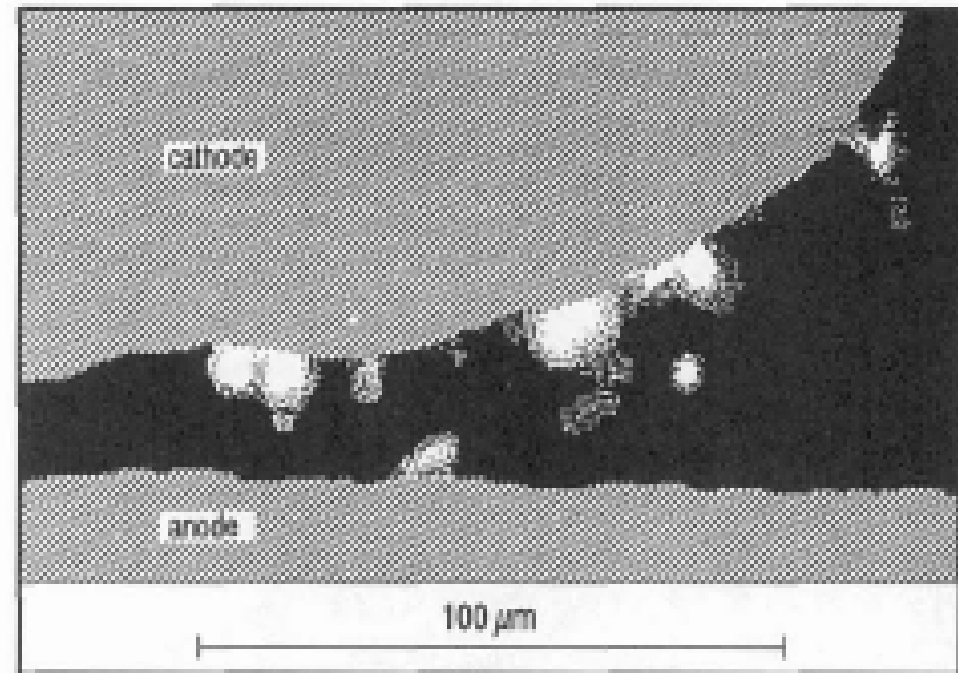


Fig. 10: Absorption picture of Cu-spots, 90 A, taken 232 ns after ignition with 0.4 ns exposure time [19]



Emission des électrons

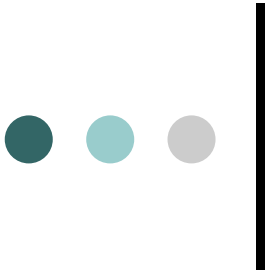
- Emission thermoélectronique

- Formule de Richardson et Dushman. Bon accord avec tungstène et graphite. Densité de courant de l'ordre de $6 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$

- Expériences avec métaux à bas point de fusion

Total désaccord avec Richardson-Dushman car valeurs d'émission de l'ordre de 10^{12} A/m^2

Tentatives d'explication basées sur un possible abaissement du travail de sortie des électrons. Très nombreuses théories.



Propriétés des spots des arcs dans le vide

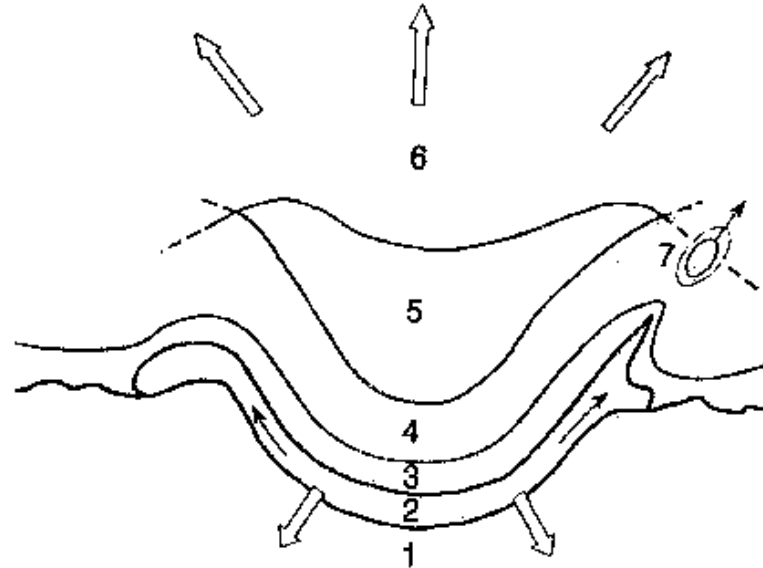
- Propriétés bien établies

- Chute de potentiel cathodique: 10-20V
- Courant par spot: 20-50 A
- Taux d'érosion: 10-100 $\mu\text{g/C}$
- Vitesse d'expansion du plasma: 10-20 km/s

- Propriétés très incertaines

- Durée de vie: 1 ns - 1 ms
- Diamètre: 1 μm – 1 mm
- Densité de courant: 10^8 – 10^{12} A/m²
- Densité de particules: 10^{22} – 10^{27} m⁻³
- Vitesse du spot: 0.1 – 1000 m/s

Emission des électrons par effet de champ



- (1) Métal solide sous le spot (conduction de la chaleur)
- (2) Couche de métal fondu (épaisseur 0,2 à 0,5 Mm)
- (3) Couche de charge d'espace (épaisseur 0,005 à 0,01 μm dans le cratère)
- (4) Couche d'ionisation et de thermalisation du plasma du spot (0,1 à 0,5 mm)
- (5) Plasma dense au centre du spot
- (6) Région d'expansion du plasma
- (7) Ejection de gouttelettes fondues

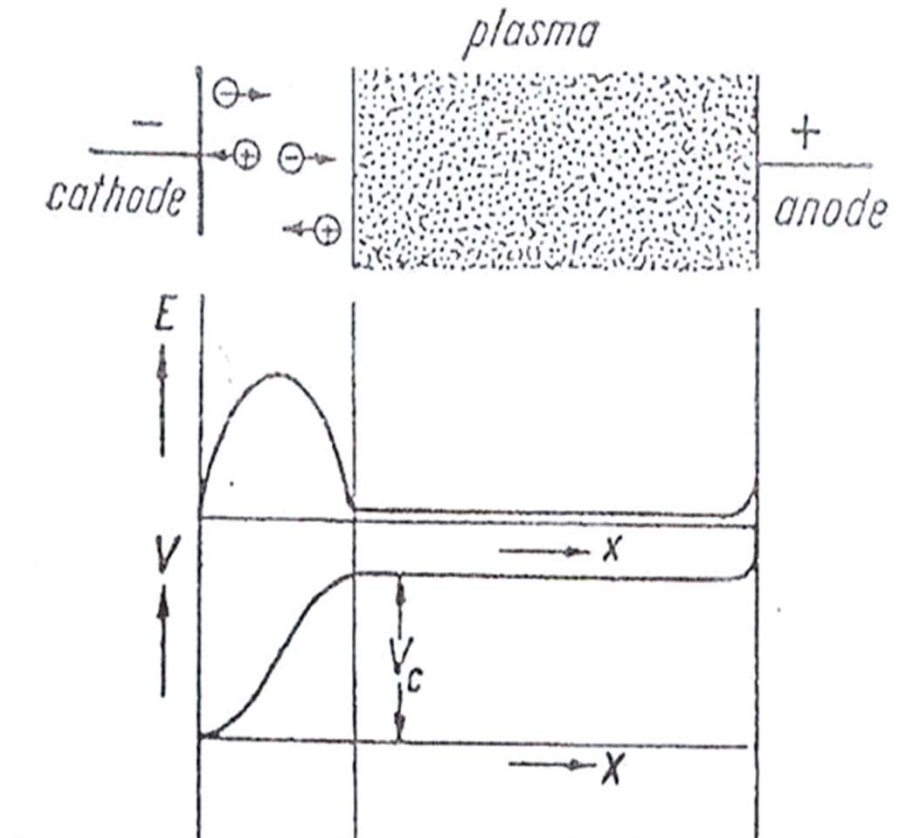


Emission des électrons par effet de champ

- En 1929, Fowler et Nordheim établissent une formule relative à un type d'émission nouveau, l'émission par effet de champ (effet quantique). Elle nécessite des valeurs du champ électrique E supérieures à 10^{10} V/m.
- Etude nécessaire des sites émissifs (ou spots)
- Uniquement possible dans les arcs dans le vide où les sites se repoussent, isolant chaque site (mouvement rétrograde).
- E est considérablement augmenté par effet de pointe sur les aspérités des bords du cratère.
- En 1956, Murphy et Good proposent une formule générale mais complexe de donnant pas a priori le type d'émission.
- D'autres théories ont été proposées (ectons, Mesyats, 1994)

Espace au voisinage des électrodes

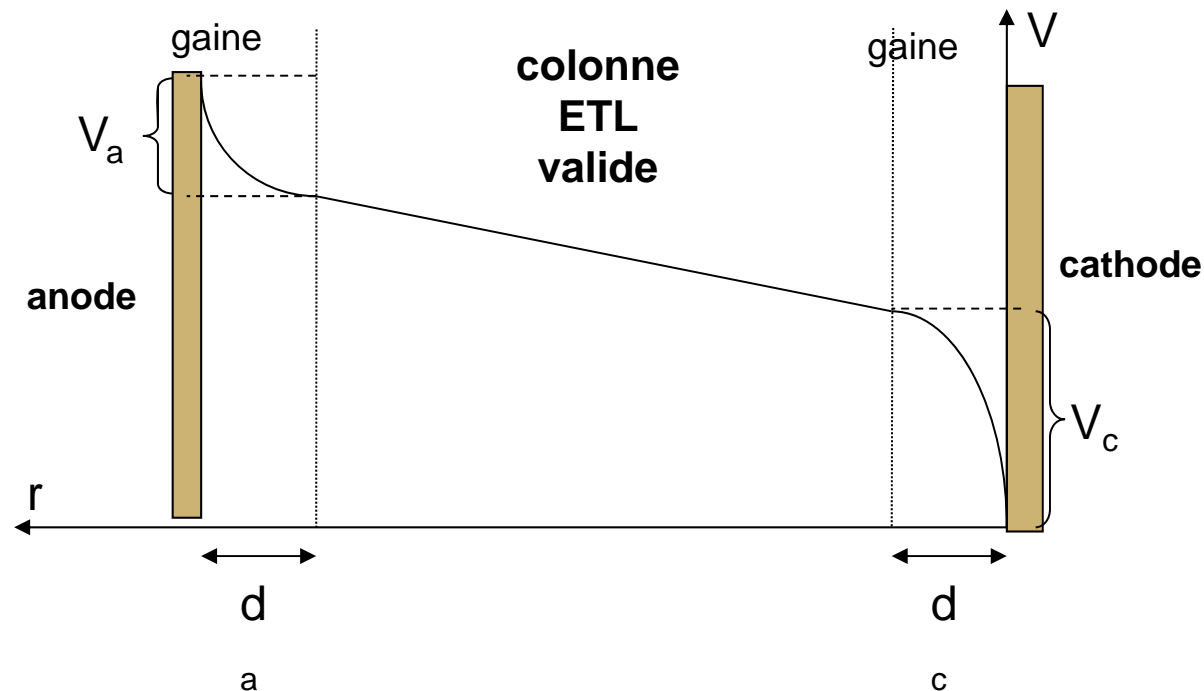
- **Espace cathodique**
 - Apparemment le plus complexe
 - La cathode émet des électrons et recueille des ions
 - Répartition très schématique de Langmuir. Modèle de la couche double
 - Modèle plus réaliste de MacKeown à partir de celui de Langmuir



Espace au voisinage des électrodes

Espace anodique

Difficulté pour définir les valeurs des chutes de tension dans les divers espaces définis par chaque modèle





Applications actuelles de l'arc électrique

- **Métallurgie lourde**
 - Fours à arc. Production de ferro-alliages.
 - Chauffage de répartiteur de coulée des poches d'aciérie
 - Fusion des ferrailles
- **Autre métallurgie**
 - Soudage: par électrodes fusibles; par électrodes réfractaires
 - Découpage
 - Production de poudres fines
- **Projection plasma** : vers les nanostructures



Applications actuelles de l'arc électrique

○ Lampes

- Très gros progrès par rapport aux lampes à incandescence (rendement pouvant être multiplié par 10 en lumen/W).
- Concurrence récente des LEDs

○ Divers.

- Destruction des déchets. Vitrification.
- Procédés: valorisation biomasse, production de nanomatériaux, ...
- Propulsion (Arcjets), ...



Appareillage de coupure HT

- **Progrès considérables avec l'apparition de l'utilisation du SF₆**
 - 1938: brevet pour l'interruption d'un courant par Franklin Cooper
 - 1953: première application industrielle par Westinghouse (V de 15 kV à 161 kV avec un pouvoir de coupure de 600 A)
- **Puis progrès constants**
 - 1959: premier disjoncteur SF₆ à grand pouvoir de coupure (37,6 kA sous 230kV)
 - Les disjoncteurs de nouvelle génération depuis 1970 ont confirmé la suprématie du SF₆.
 - Depuis ils couvrent toute la gamme de la HT



Conclusions

- L'arc est un phénomène ancien qui suscite encore beaucoup d'intérêt par l'incroyable difficulté pour expliquer le fonctionnement de la décharge au niveau des électrodes et par ses nombreuses applications.
- La modélisation a permis d'apporter des résultats marquants et de faire des avancées décisives appuyées par les progrès de l'expérimentation dus aux méthodes modernes d'analyse.