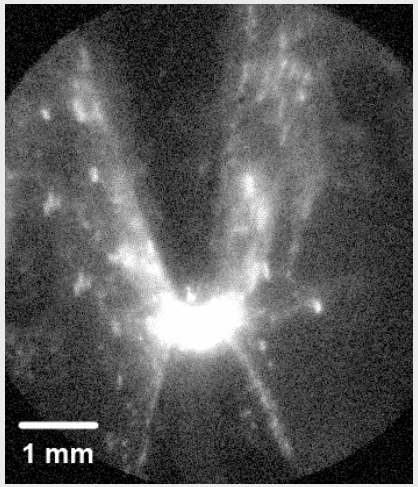
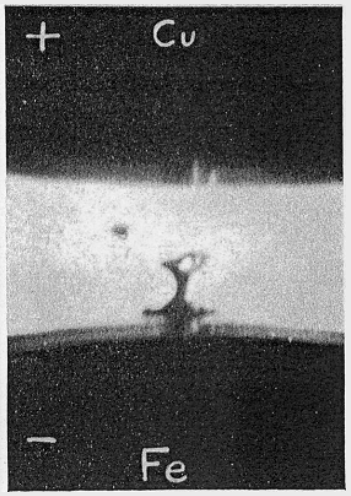
Exemples de Micro Plasmas à Haute Densité :

Électroérosion (EDM) et Ouverture de Contacts Électriques





Christoph HOLLENSTEIN, Antoine DESCOEUDRES,

Alan HOWLING, Jean-Luc DORIER

Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP)

École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Collaborations / support :

Références de ce travail :

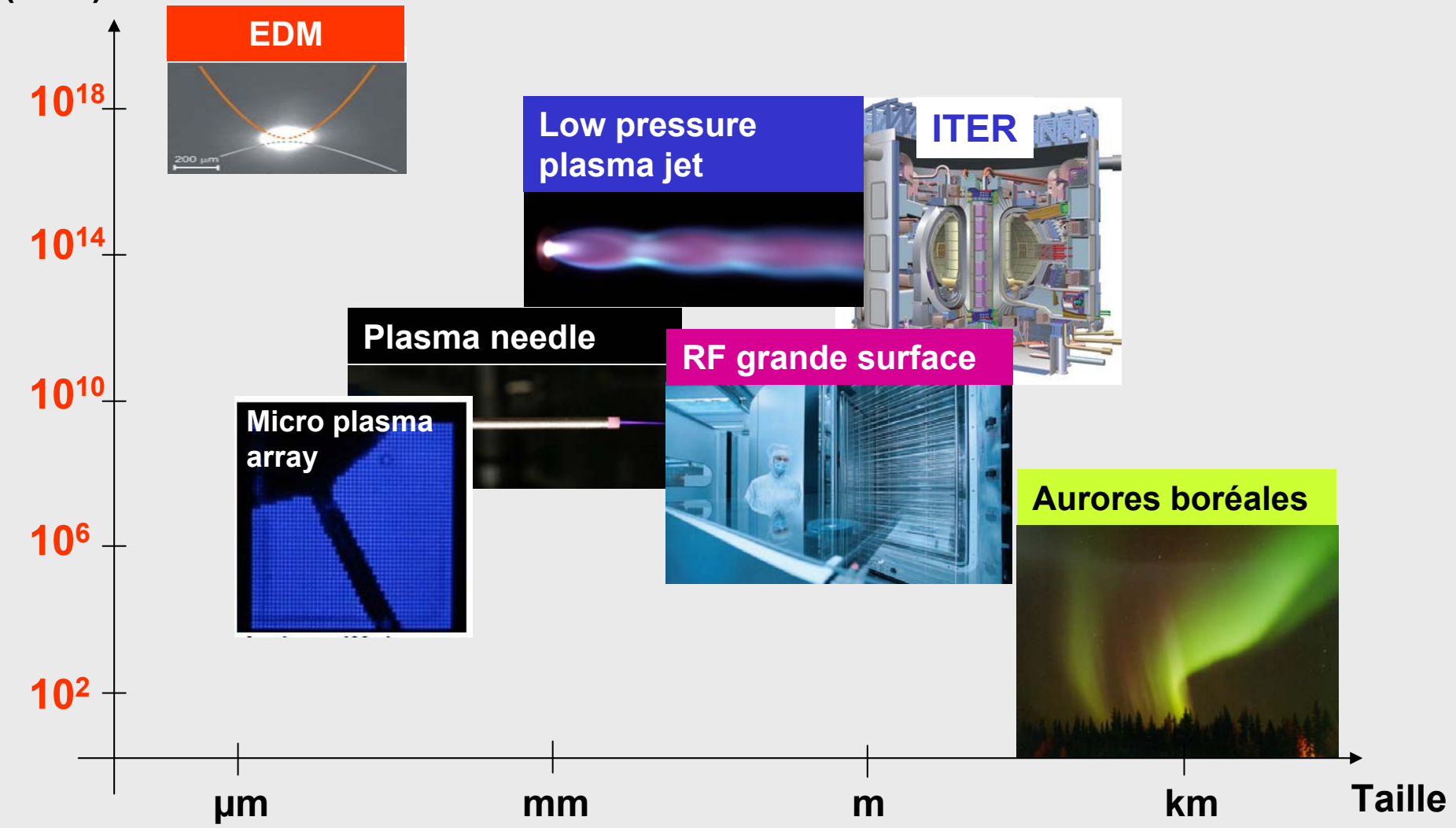
Electroérosion :

1) A. Descoeudres, *"Characterization of electrical discharge machining plasmas"*, Thèse EPFL No 3542, Lausanne, Suisse, 2006
2) A. Descoeudres, Ch.Hollenstein, R. Demellayer, G. Wälder, *"Optical emission spectroscopy of electrical discharge machining plasma",* J. Phys. D. : Applied Physics **37**(6), 875 – 882, (2004)
3) A. Descoeudres, Ch. Hollenstein, G. Walder, G, et al., *"Time-resolved imaging and spatially-resolved spectroscopy of electrical discharge machining plasma",* J. Phys. D :Applied Physics **38**(22) 4066-4073, (2005)

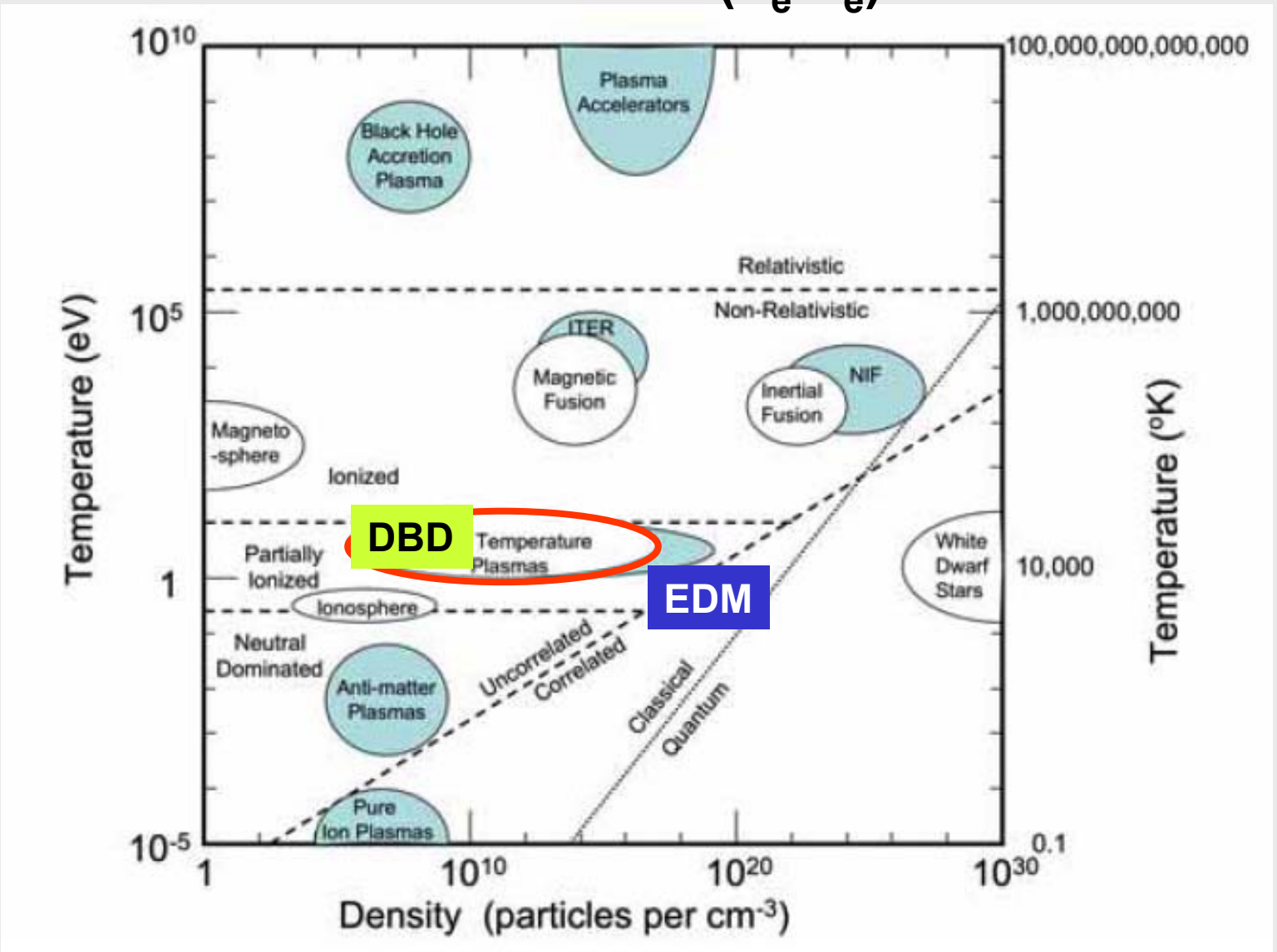
Ouverture de contacts :

1) J.-L. Dorier and Ch. Hollenstein, *"(Strongly coupled) micro-plasma formation during opening of a low current electrical contact",* Proc. of 18th International Symposium on Plasma Chemistry, August 2007, Kyoto, Japan
2) Ch. Hollenstein and J.-L. Dorier, *"Micro-plasma formation during opening of a low current electrical contact",* submitted to J. Phys. D : Applied Physics, Octobre 2007

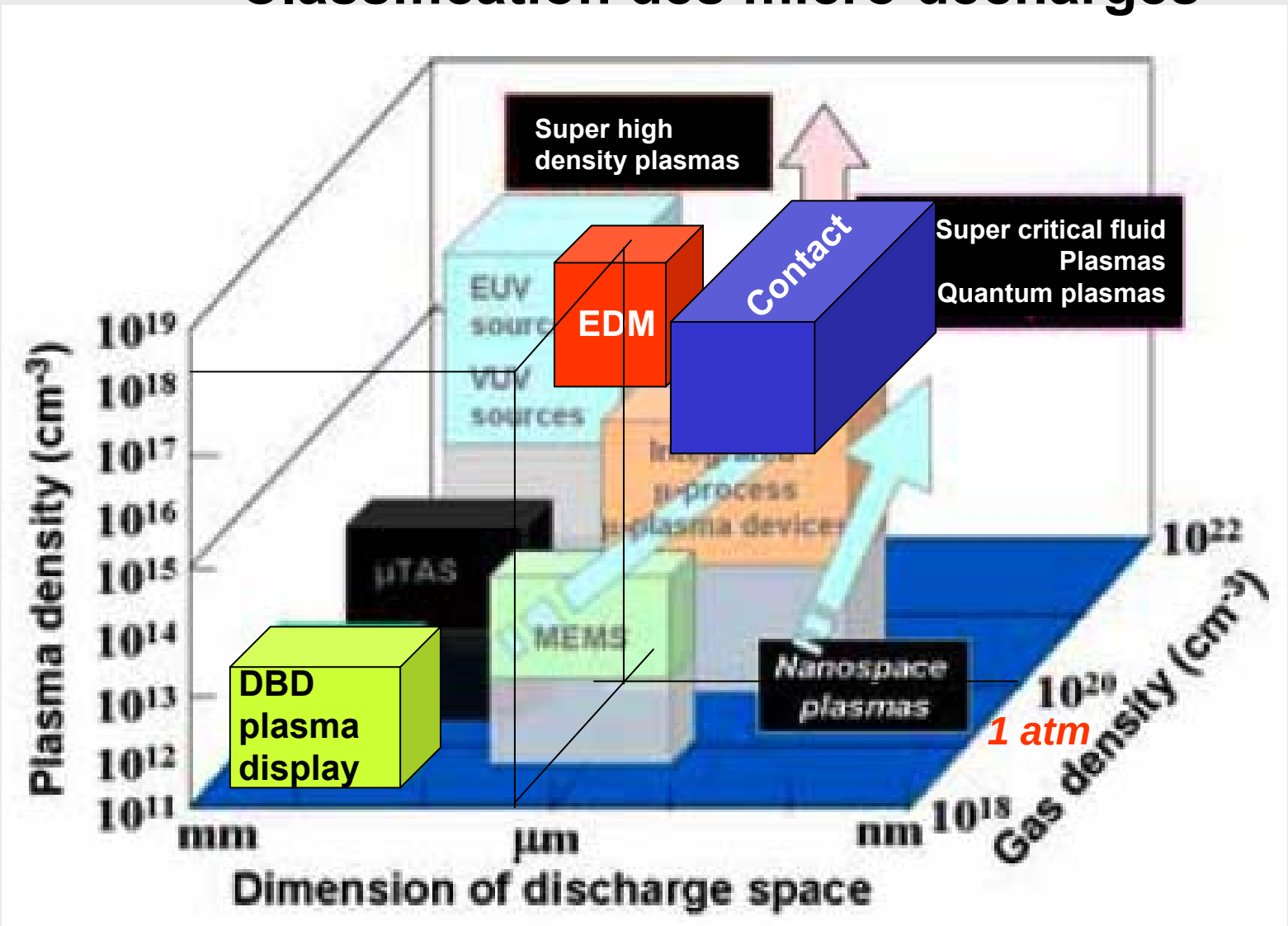
Pourquoi « MICRO » plasma ?



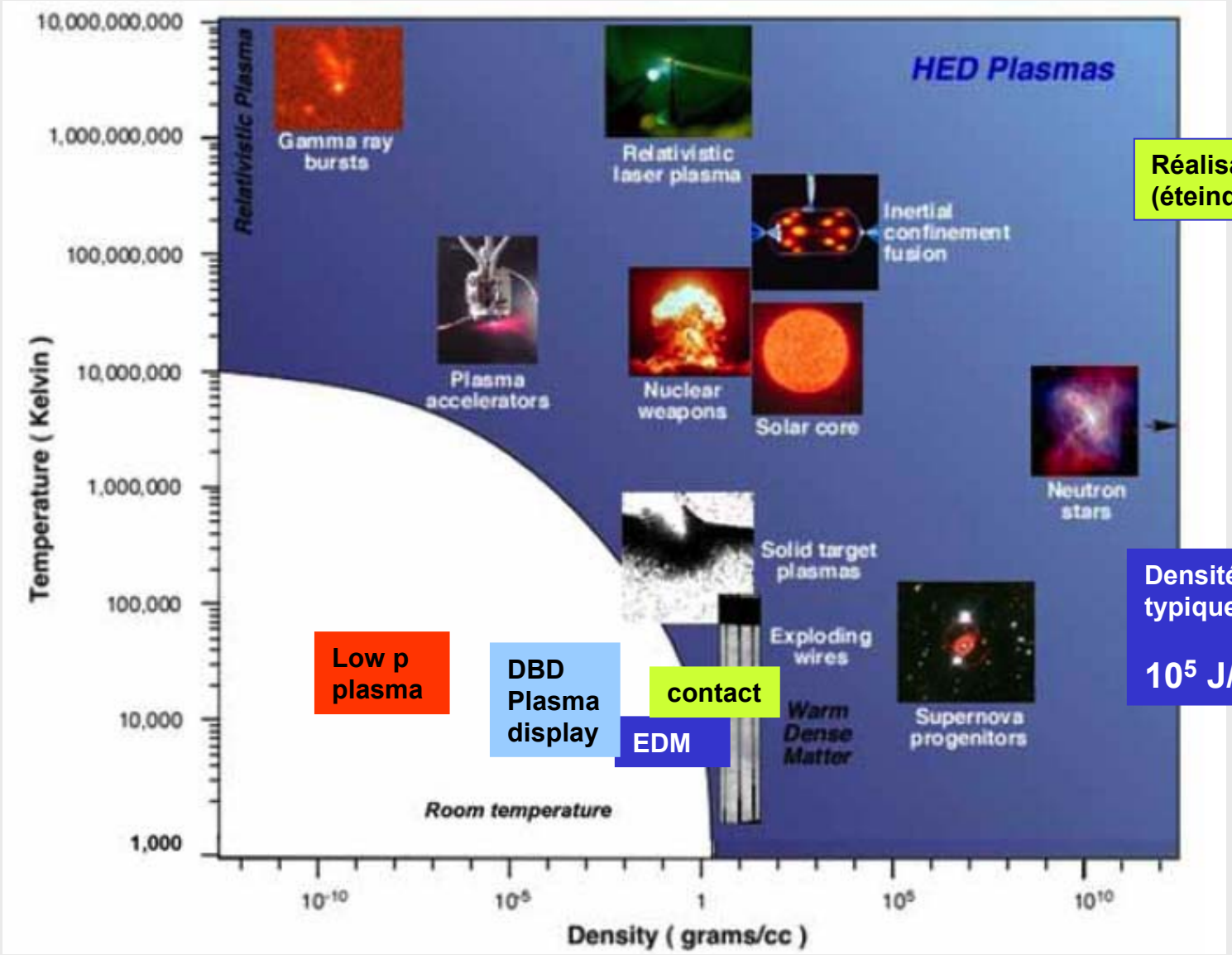
Classification (n_e/T_e)



Classification des micro décharges



Plasmas à haute densité d'énergie (HED)



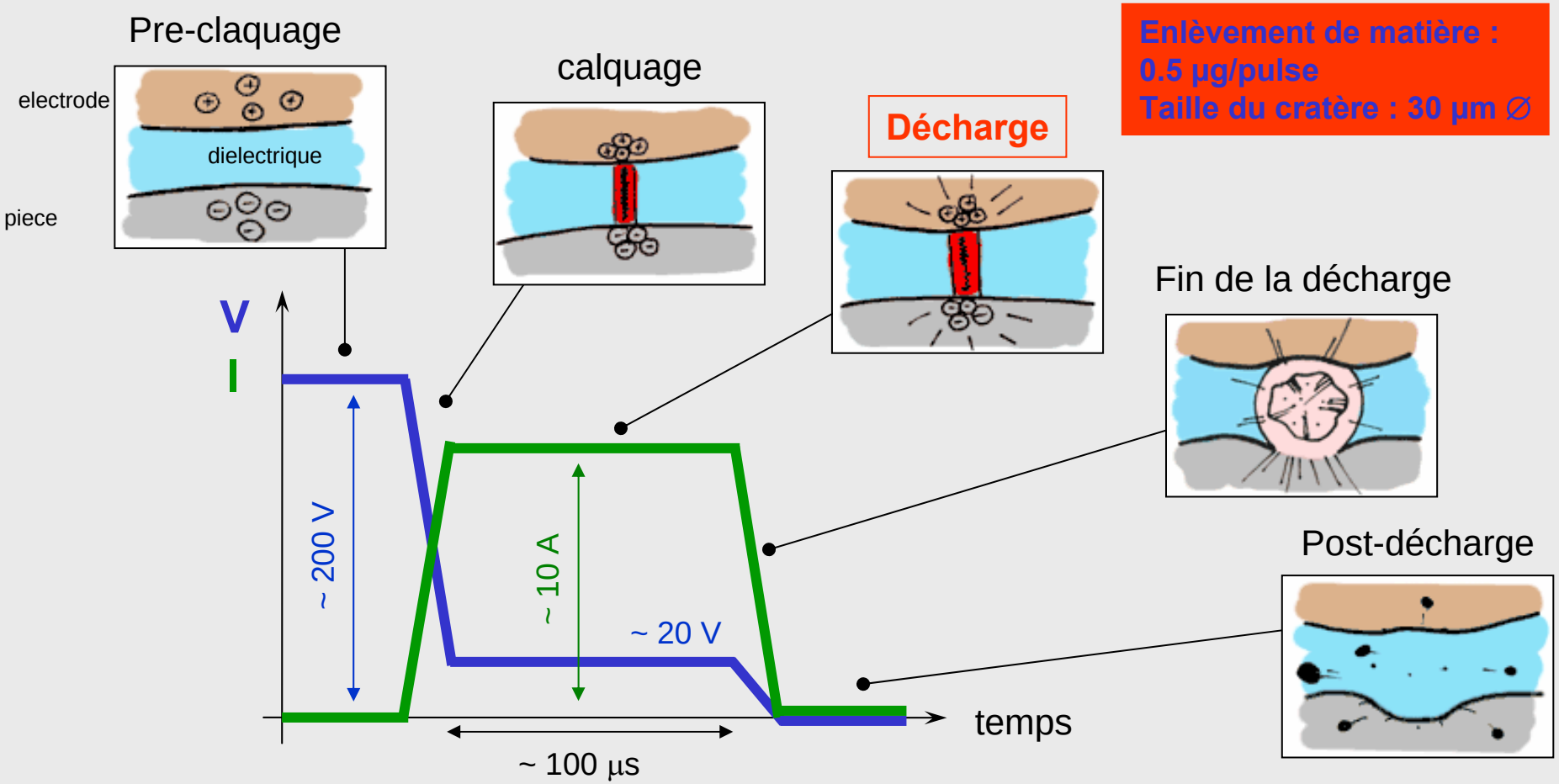
Réalisation bon marché : (éteindre la lumière !!!)

Densité d'énergie typique EDM :

10^5 J/cm^3 (!)

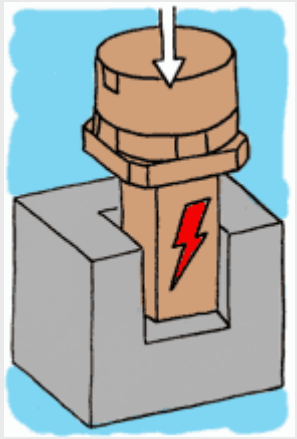
L'électroérosion qu'est-ce que c'est ?
(Electrical Discharge Machining, EDM)

EDM = enlèvement successif de petites quantités de matière d'une pièce, en utilisant l'effet d'érosion d'une décharge électrique



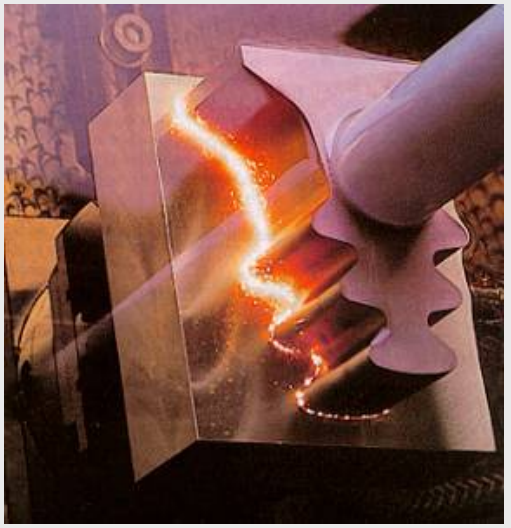
Deux types d'usinage EDM

- **die-sinking** (enfonçage)

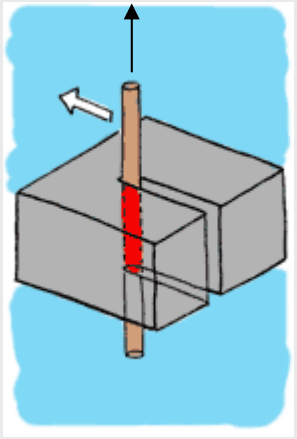


L'électrode garde sa forme
(**asymétrie** usure/érosion)

→ Production de moules pour l'injection



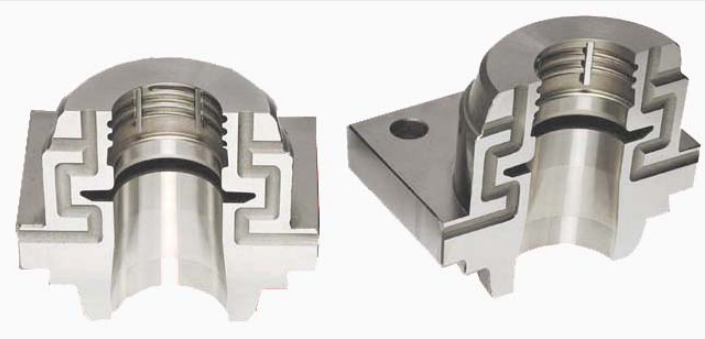
- **wire-cutting** (découpage)

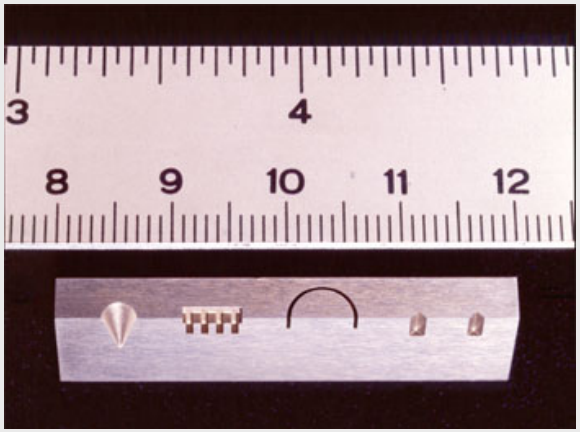


L'électrode est un fil mobile

→ Production de matrices de découpage
et de buses pour l'extrusion

Exemples de pièces usinées par EDM





Motivations pour l'étude des décharges EDM

Objectifs …

- Amélioration de la précision d'usinage (μ-machining) et de la rugosité
- Amélioration du taux d'enlèvement de matière avec moins d'usure d'électrode
- Développement de modèles numériques fiables pour l'optimisation des performances

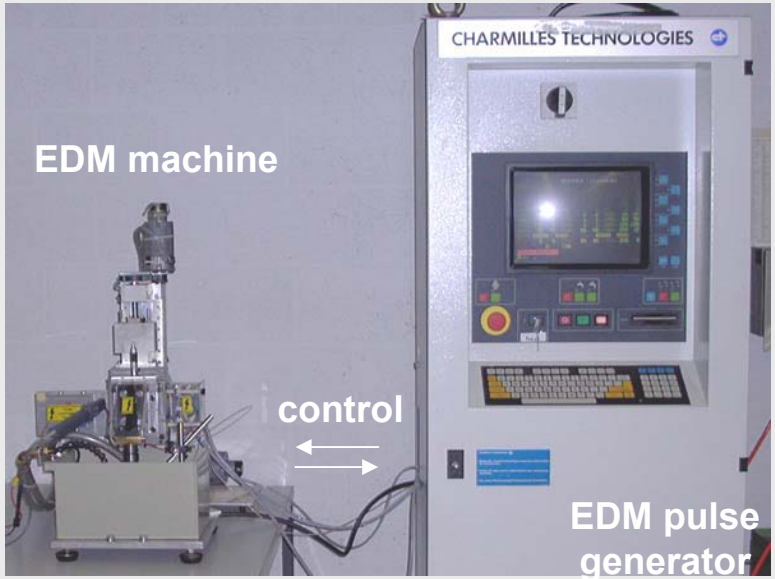
Mais …

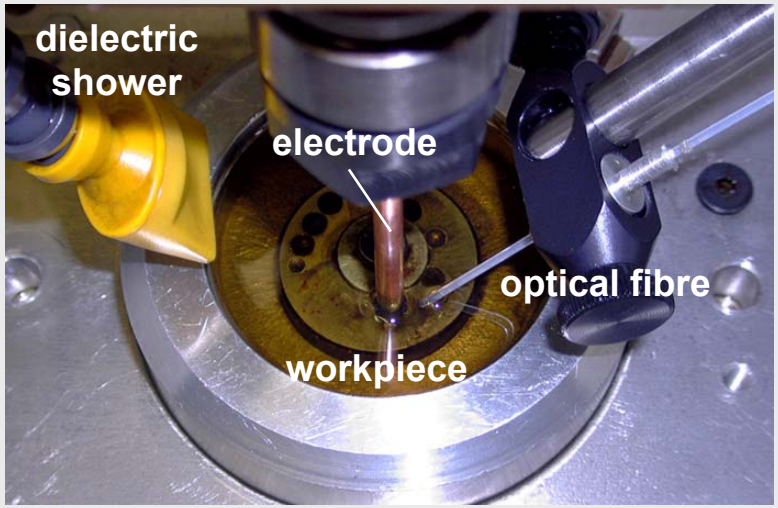
- Manque de connaissance des phénomènes de base de l'EDM
  - Phénomènes complexes
  - Difficultés expérimentales
  - Nature stochastique
- Optimisation empirique
- Modèle numériques avec paramètres empiriques

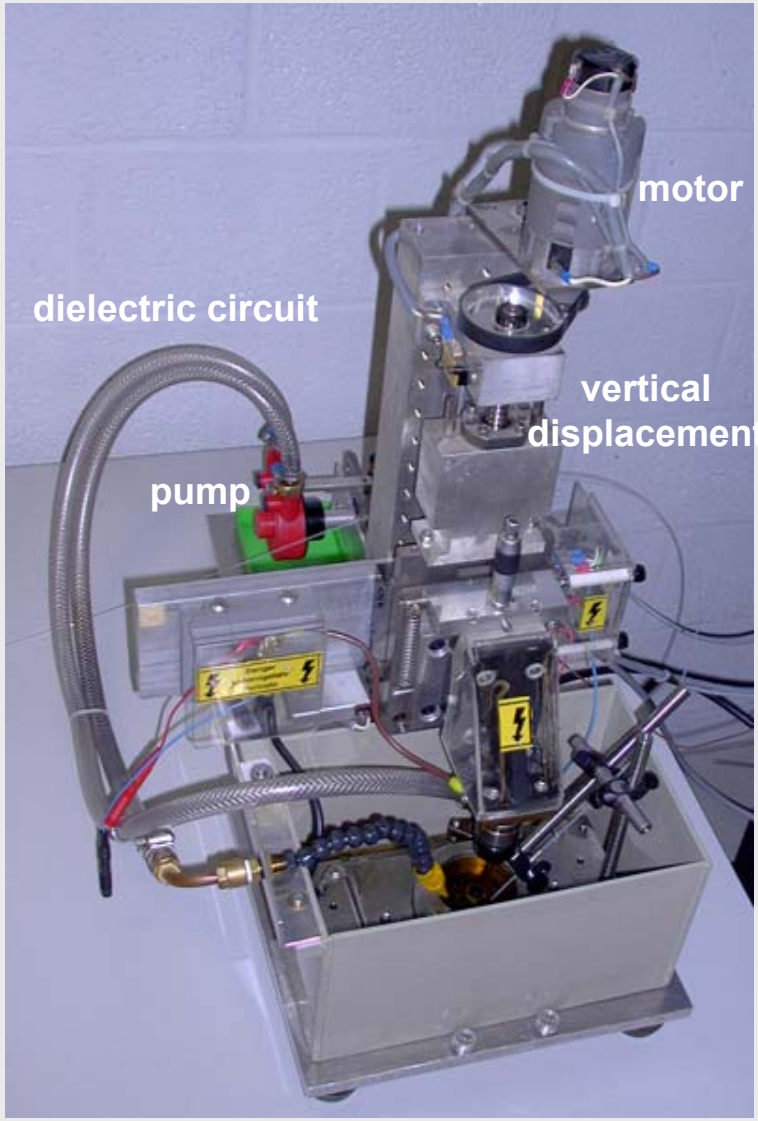
On a besoin d'une meilleure compréhension **fondamentale** des **décharges EDM** et de leur interaction avec les électrodes

→ **Investigation systématique des plasmas EDM**

Installation EDM expérimentale au CRPP

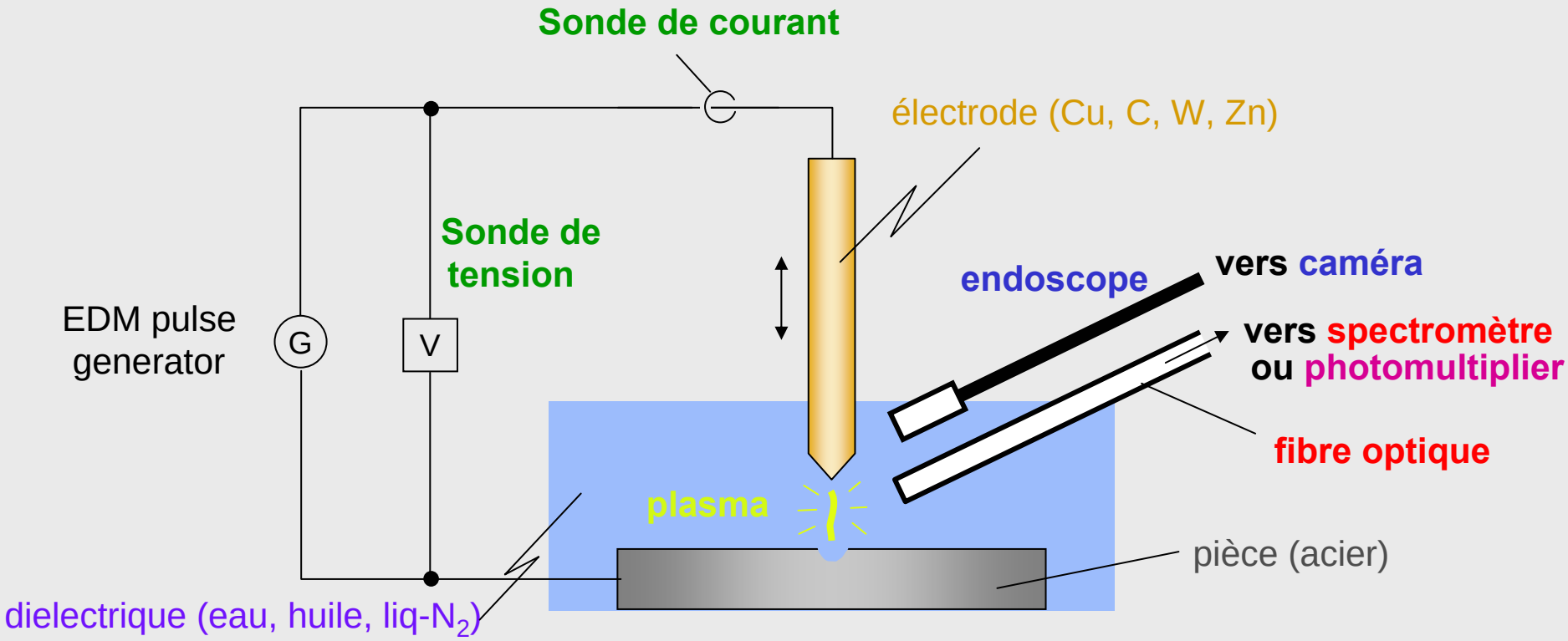






Diagnostics

- **Mesures électriques**
- **Imagerie**
- **Intensité totale de lumière**
- **Spectroscopie**

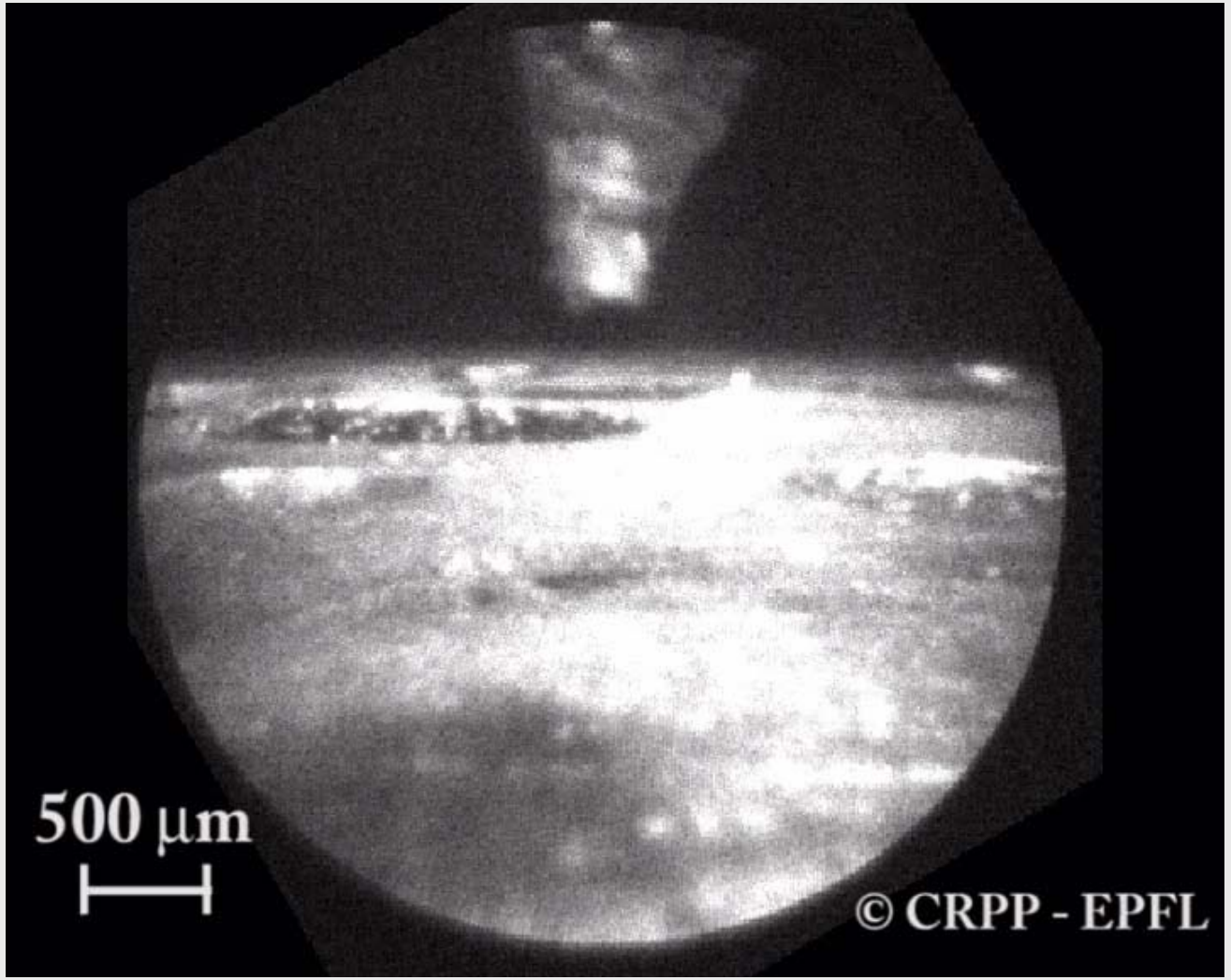


Difficultés expérimentales

- Petite taille (gap 10 – 100 μm)
- Environment liquide
- Faible émission de lumière
- Courte durée (~ μs, ~ ns pour les phénomènes de claquage)
- Interférences électromagnétiques
- **Mauvaise reproductibilité d'une décharge à l'autre**

Peu de diagnostics disponibles,
et difficiles à appliquer

Imagerie du procédé

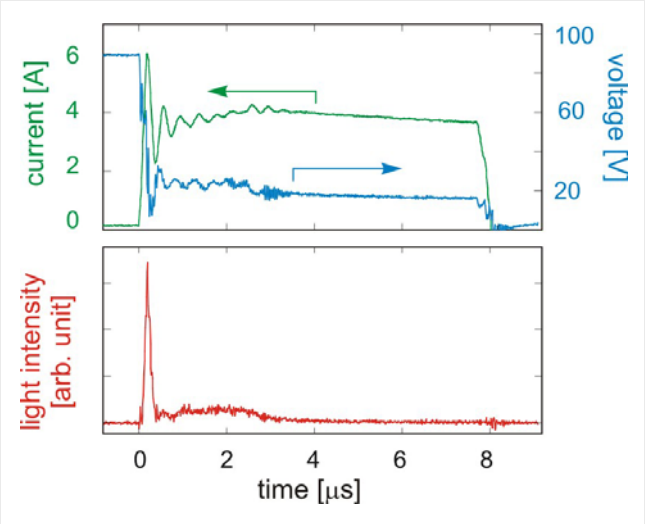


(Cu / acier, 50 µs, 8 A, eau)

Images du plasma

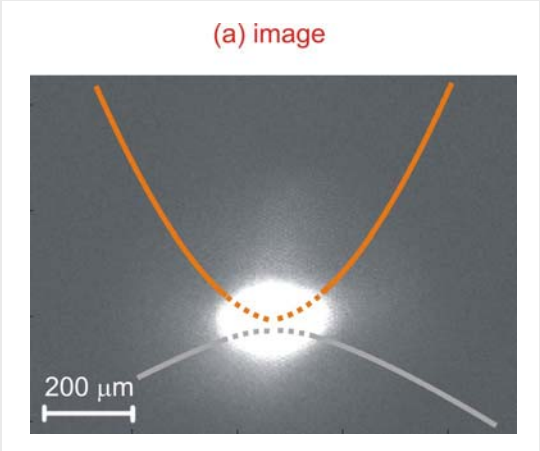
- Évolution de **l'intensité totale de lumière** (au cours d'une décharge)

Phase de claquage / phase de décharge

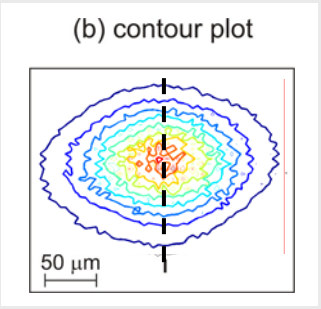


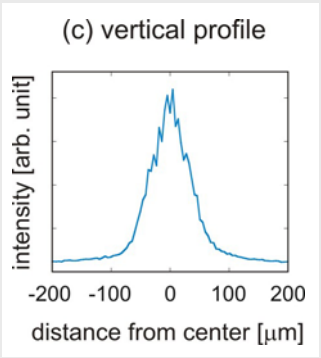
(8 μs, 4 A, eau)

- **Image** typique du plasma



(Cu / acier, 100 μs, 24 A, huile)

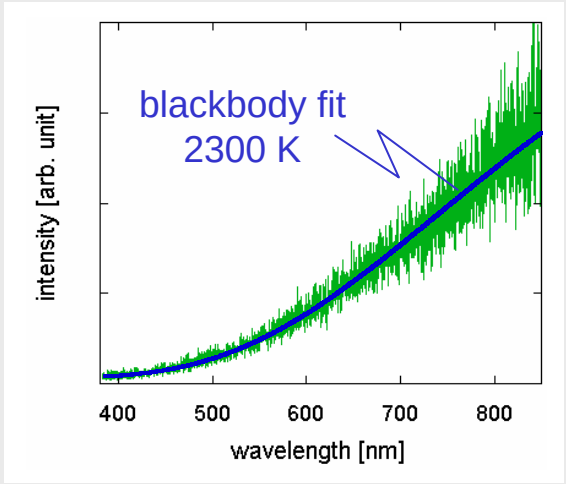




- **Région excitée plus large que le gap**
- **Légère augmentation avec le temps**
- **Dimension augmente avec le courant**

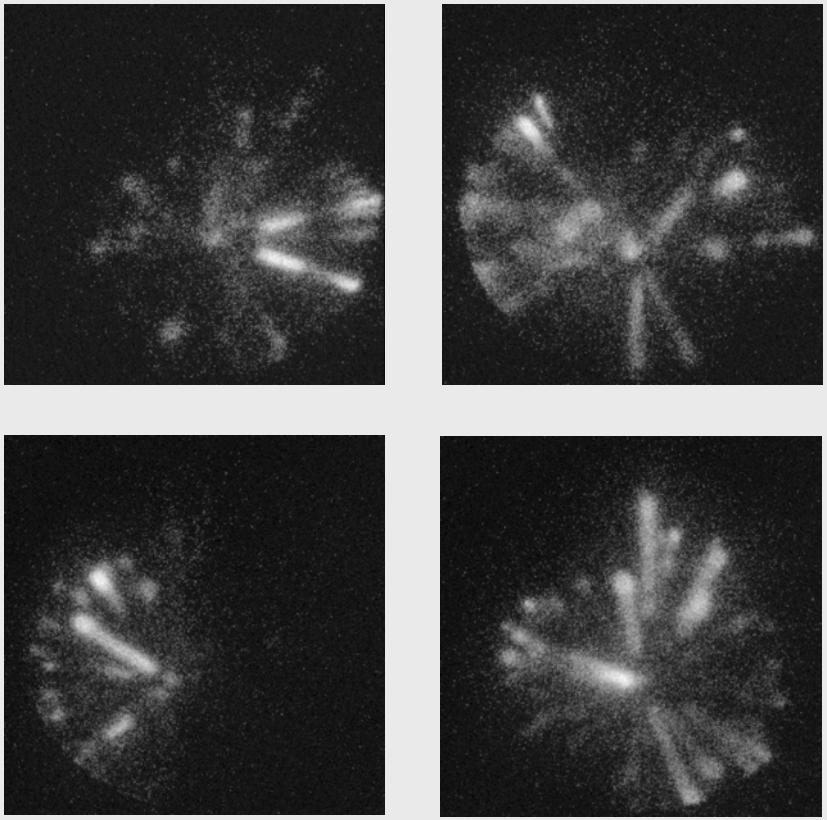
Fin de la décharge et post-décharge

- Le plasma “s’éteint” dès que le courant est coupé
- Faible émission durant la post-décharge
- Images prises juste **après** la fin de décharge :
- **Spectre** d’émission correspondant



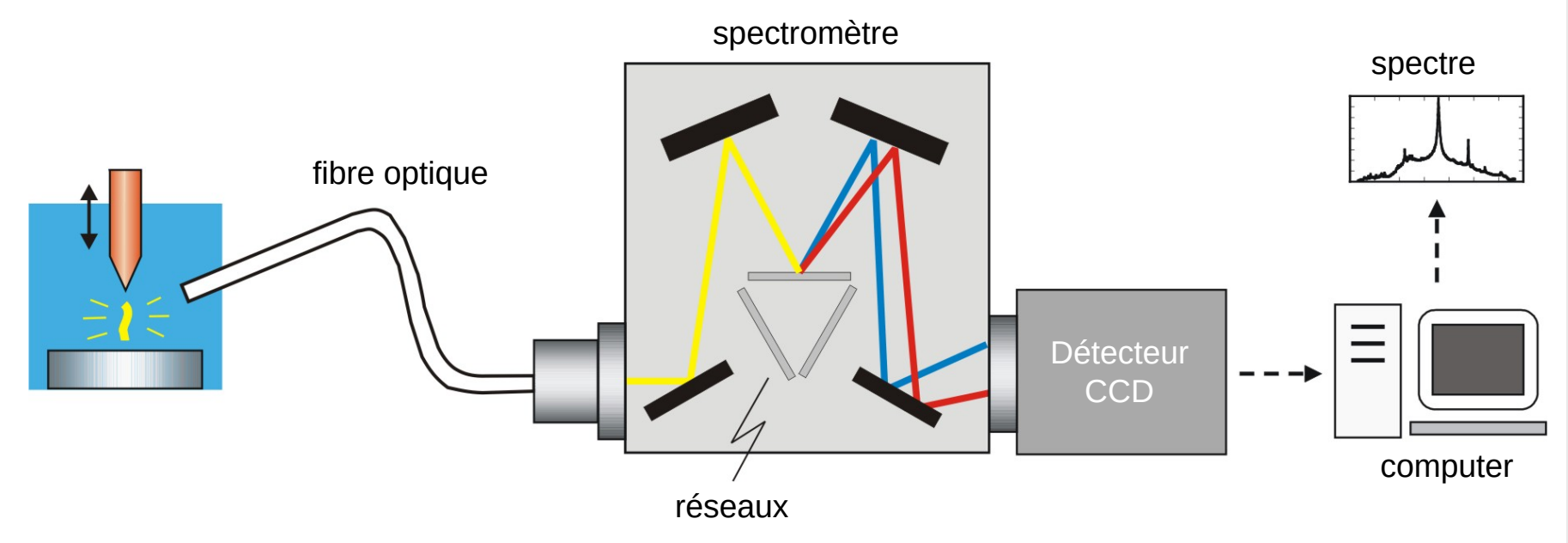
- Vitesse :

~ 3 m/s



- **Corps noir : incandescence des particules érodées**
- **2300 K : métal en fusion**

Spectroscopie d'émission optique



- Lignes caractéristiques → **identification** des atomes et ions émetteurs
- Intensités relatives des lignes de Cu → **température électronique**
- Stark broadening and shift de H_α → **densité électronique**

Spectre typique

Diélectrique

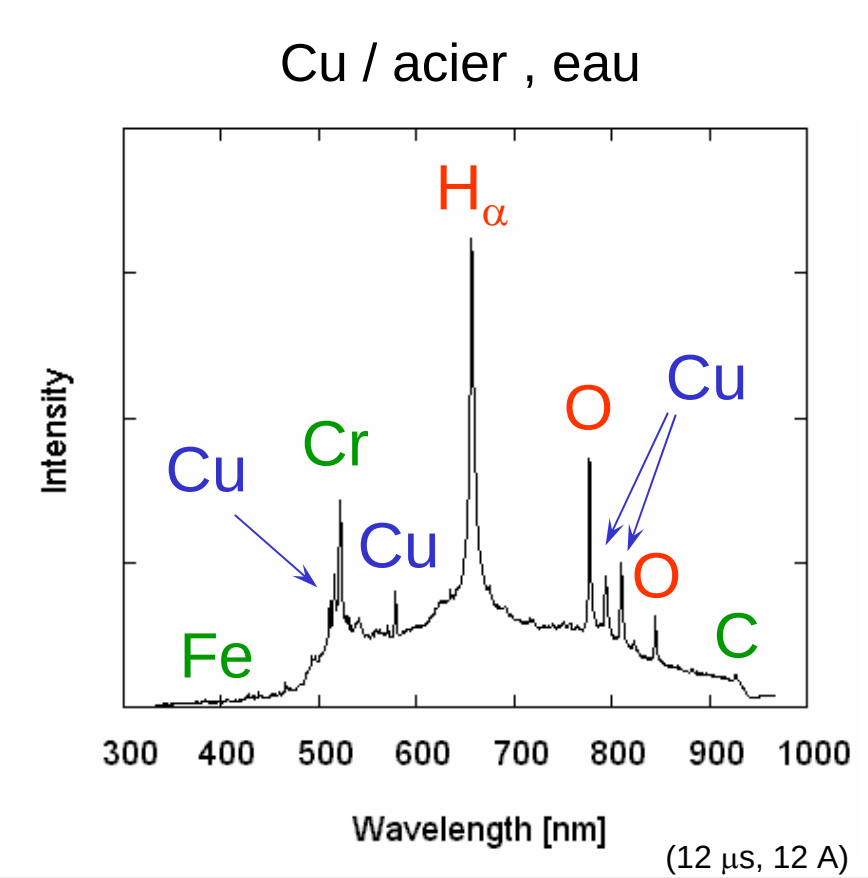
- eau : H , O
- huile : H , C , C_2
- Azote liquide : N

Electrode

- cuivre : Cu
- graphite : C , C_2
- tungstène : W
- zinc : Zn, Zn^+

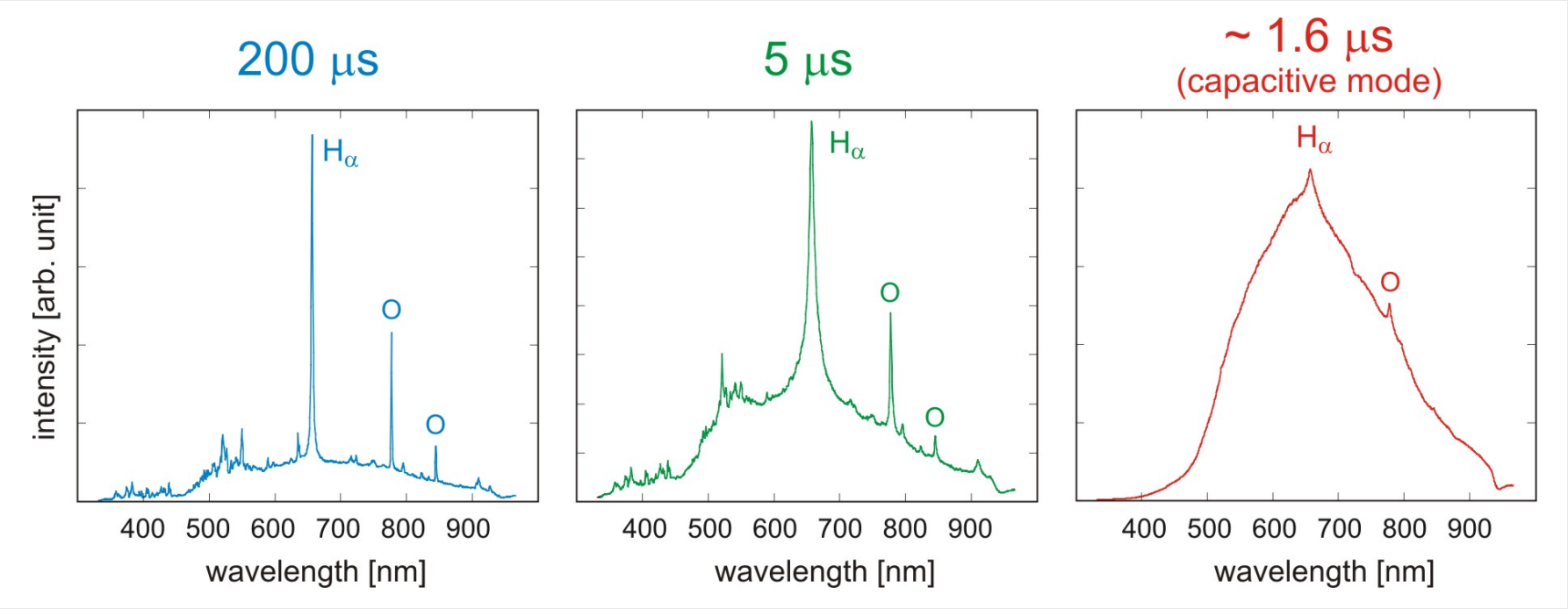
Pièce usinée

- acier : Fe, Cr, C



Lignes atomiques caractéristiques : fragmentation du diélectrique et contamination par les métaux érodés

Effet de la durée de la décharge

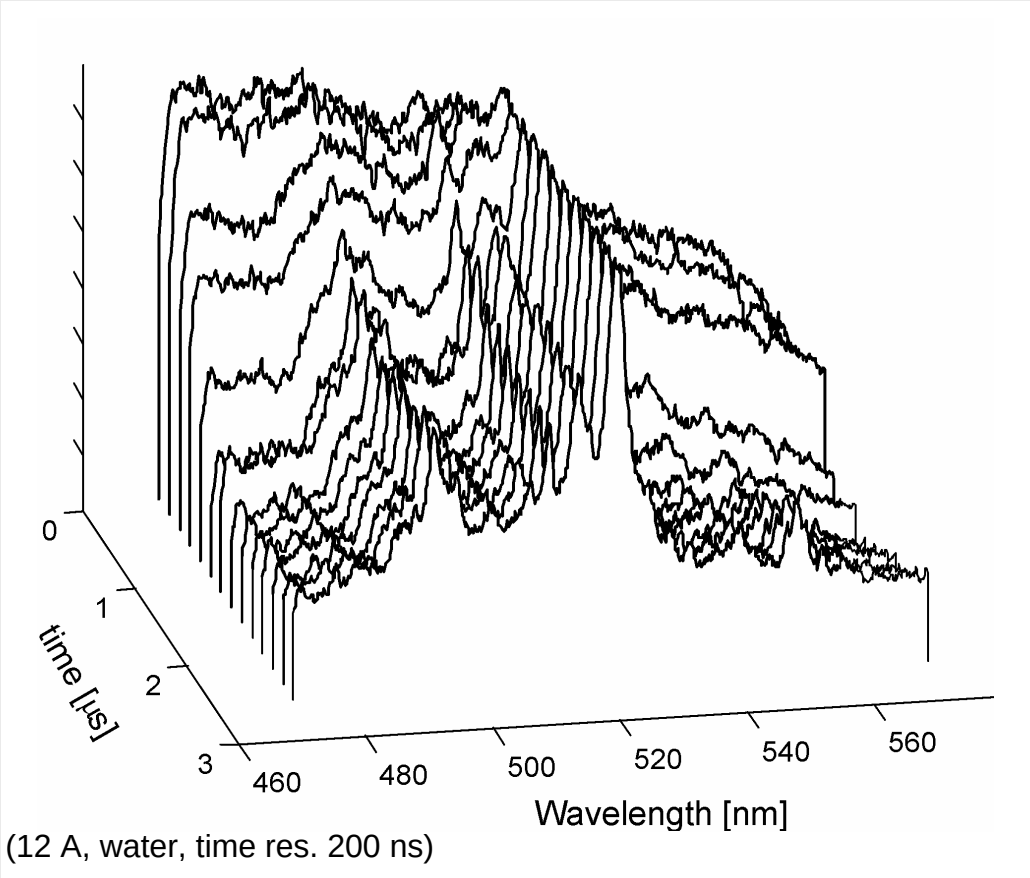


(Cu / acier, eau, 12 A)

- Augmentation la largeur et du shift de H_α
- Augmentation du continuum
- H_α seulement !

Densité électronique extrêmement élevée en début de décharge

Spectroscopie résolue en temps

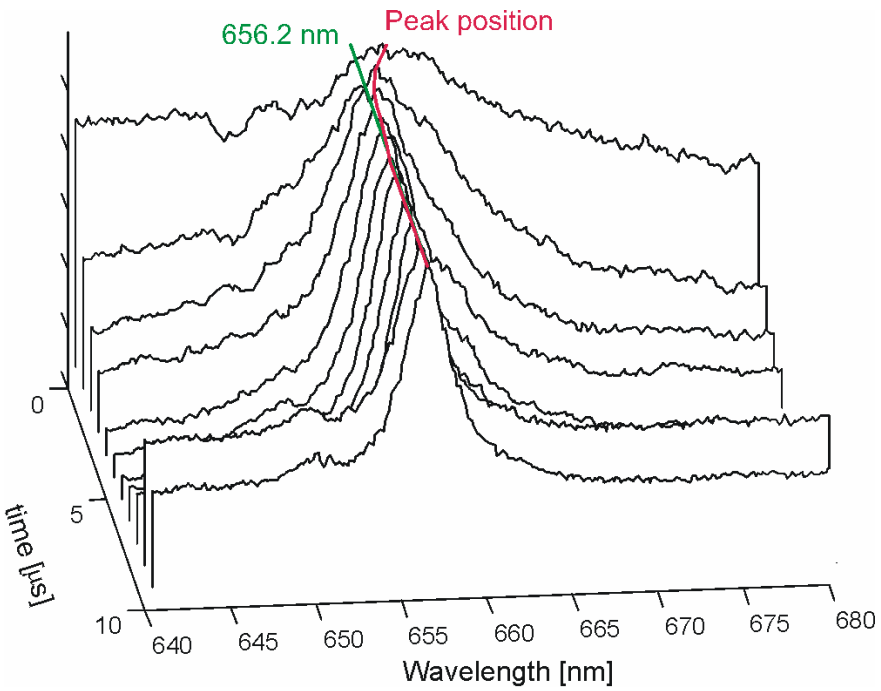


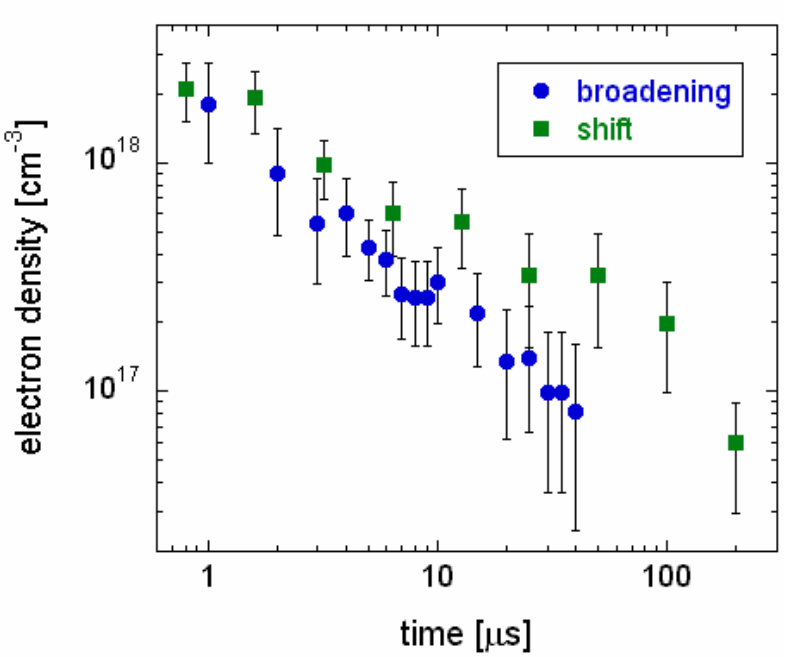
(12 A, water, time res. 200 ns)

- t = 0 : claquage
- Continuum dû au **fusionnement** des lignes spectrales

Plasma extrêmement DENSE durant la première µs

Résolution temporelle de H_α: densité électronique





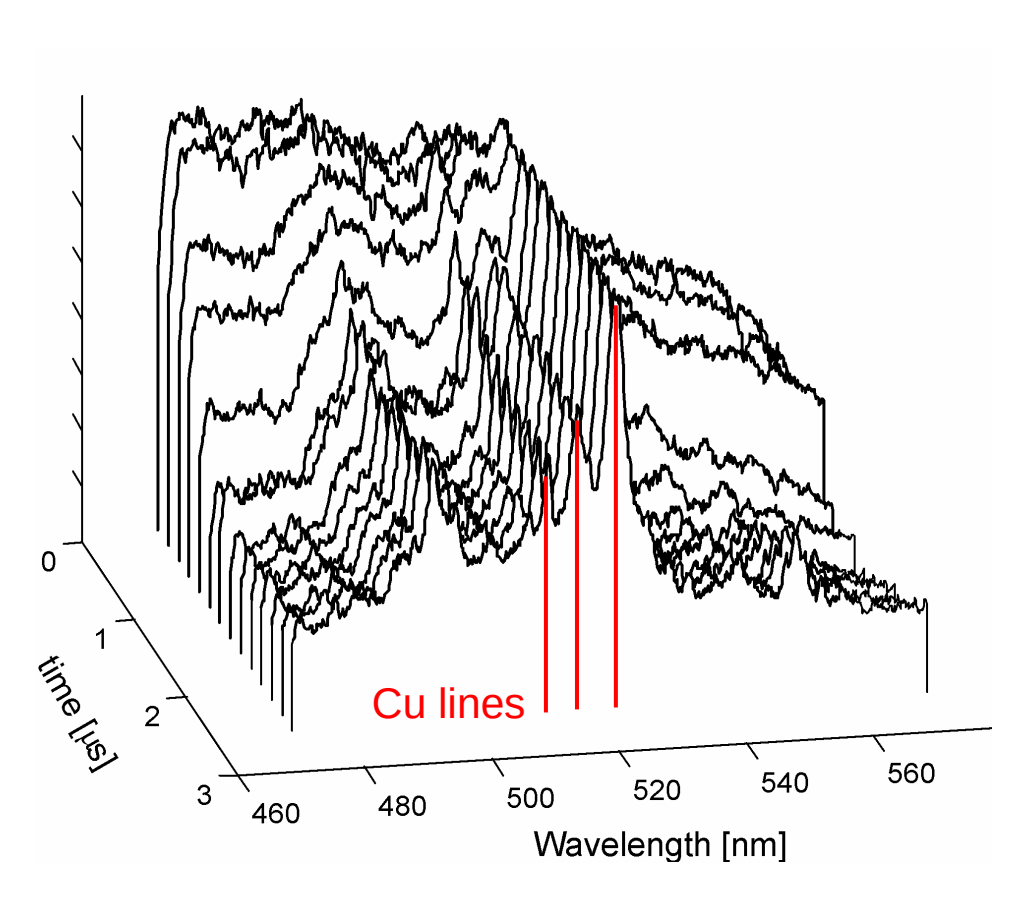
(16 A, water, time res. 1 µs)

n_e excède 2 • 10^{18} cm^{-3} au début de décharge

n_e décroît avec le temps (expansion)

Le plasma est créé à partir d'un LIQUIDE !

Résolution temporelle de lignes de Cu: température électronique



- Pas de lignes **ioniques**
  (excepté Zn^+)

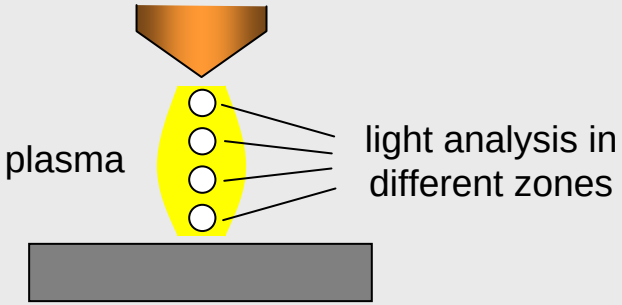
- Rapport de lignes de Cu:

  $T_e \cong 0.7$ eV (8'100 K)

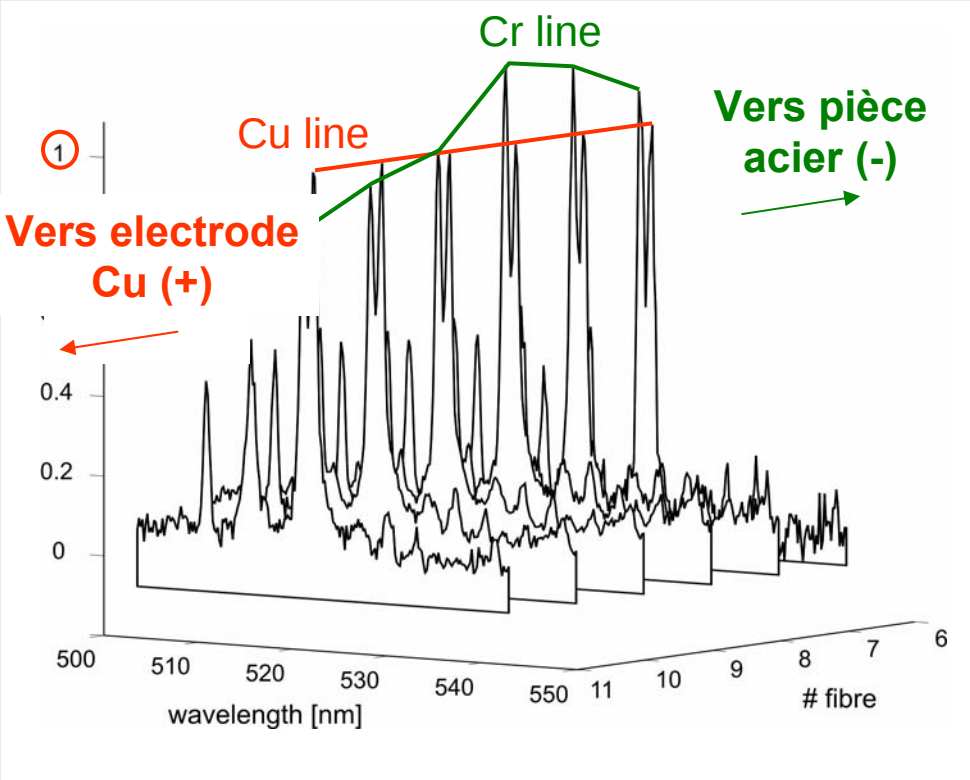
→ **plasma froid**

Spectroscopie résolue SPATIALEMENT

- Echantillonage avec endoscope + multifibre
- Résolution spatiale : ~ 20 μm (gap : ~ 100 μm)



- **Contamination :**
  Cu (electrode)
  Cr (pièce)

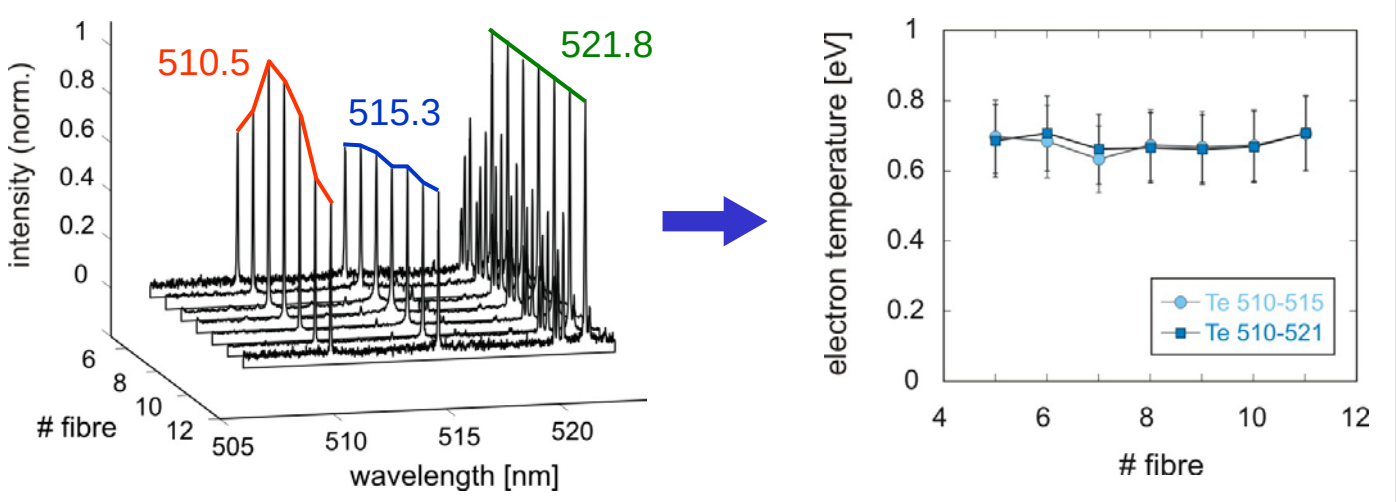


(100 μs, 6 A, water)

➡ **Asymétrie spatiale de la contamination**

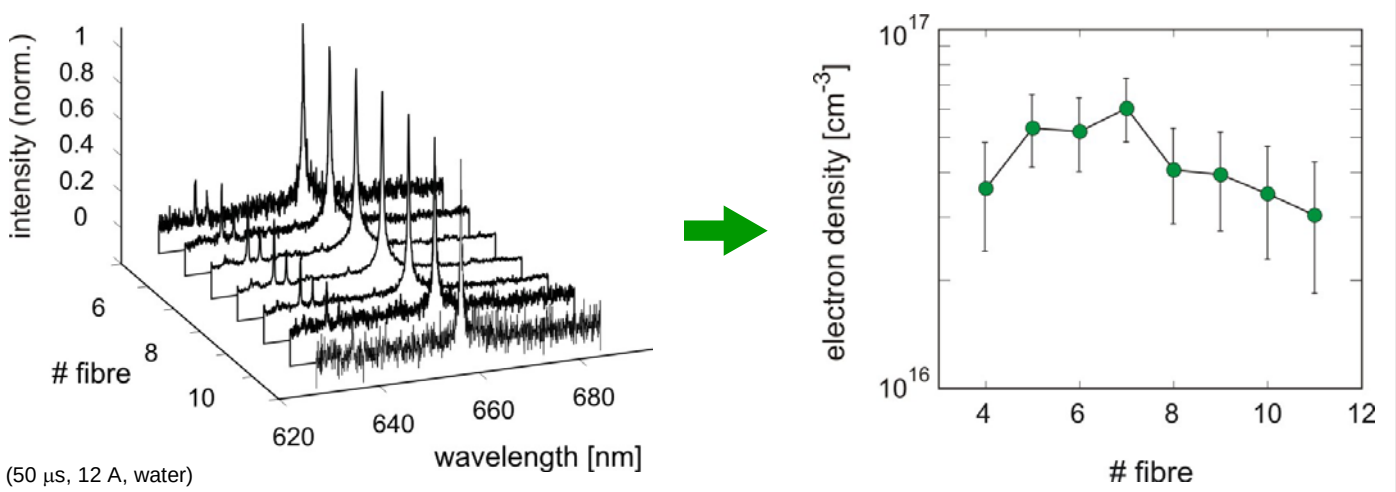
Spectroscopie résolue spatialement (suite)

- Profil de **température** électronique



T_e homogène

- Profil de **densité** électronique



(50 µs, 12 A, water)

n_e faiblement piqué au centre

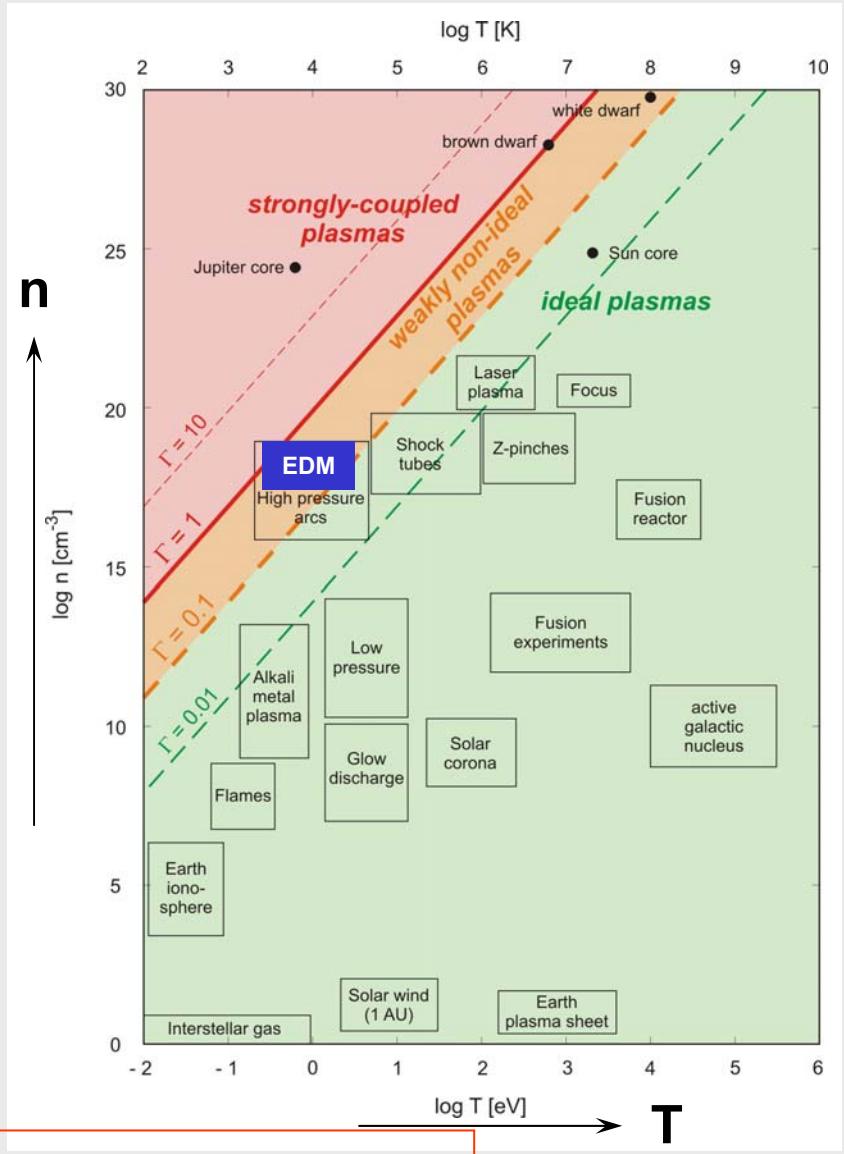
Paramètre de couplage Γ

$$\Gamma = \frac{Z^2 e^2}{4\pi\varepsilon_0 a k_B T} \propto \frac{n^{1/3}}{T}$$

$$\Gamma = \frac{\text{"Intéraction coulombienne"}}{\text{"énergie thermique"}}$$

Γ << 1 : plasma idéal
Γ ≤ 1 : plasma faiblement non-idéal
Γ > 1 : plasma fortement couplé

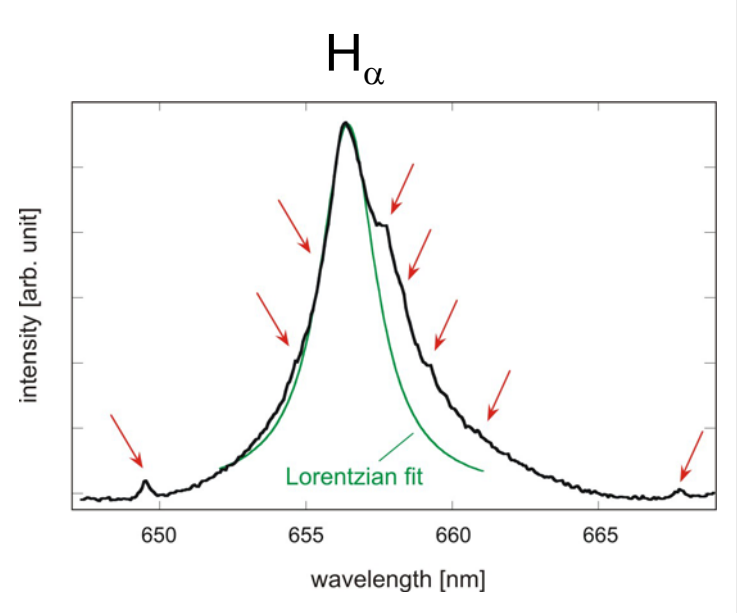
EDM : $n_e \cong 10^{18}$ cm^{-3}, $T_e \cong 0.7$ eV $\Rightarrow$ **Γ ≅ 0.33**



Plasma EDM : faiblement non-idéal (dense et froid)

Évidences spectroscopiques de non-idéalité

- Fort élargissement et shift Stark de $\mathbf{H_\alpha}$
- Structure de la ligne $\mathbf{H_\alpha}$ (satellites)
- Asymmetrie de la ligne $\mathbf{H_\alpha}$



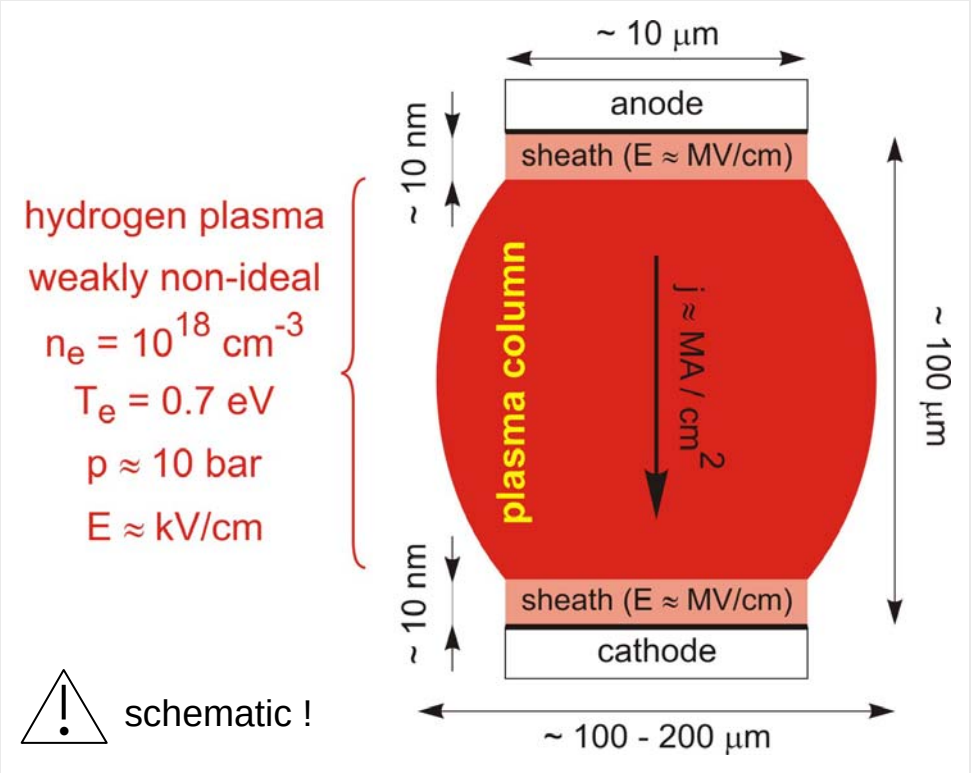
- Fusionnement des lignes et continuum
- Absence de H_β, H_γ , etc.

Inglis–Teller → $n_e \approx 6 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} ✓

plusieurs manifestations de la non-idéalité

Propriétés physiques des plasmas EDM

- Composition: fragmentation du diélectrique + contamination par électrodes
- $T_e \approx 0.7$ eV (froid)
- $n_e \approx 10^{18}$ cm^{-3} (dense)
- $p \approx 10$ bar
- Faiblement non-idéal
- Passablement ionisé
- Très petites dimensions
- Forts champs électriques
- Intense durant la 1ère μs



- Relativement insensible aux paramètres externes

Conclusions

- Important **manque de connaissances** des plasmas EDM
  - → Première immersion dans ce type de plasmas
  - → Résultats nouveau, riches et intéressants
  - → Utiles pour validation de modèles à venir
- Mais la physique sous-jacente est **complexe**…
  - → Plusieurs point demeurent inexpliqués
  - → De nouvelles questions se posent
- Perspectives
  - → Investigation de différents types de décharges
  - → Nouveaux diagnostics ?

Ceci est une étude fondamentale :
Pas d'application directe pour le procédé
Mais nécessaire pour améliorations futures

PLASMAS LORS DE LA SEPARATION DE CONTACTS ELECTRIQUES A BAS COURANT

MOTIVATIONS

→ ***Les contacts électriques sont très largement utilisées***

→ ***Une compréhension de base des phénomènes en jeu est requise pour améliorer les interrupteurs basse tension***

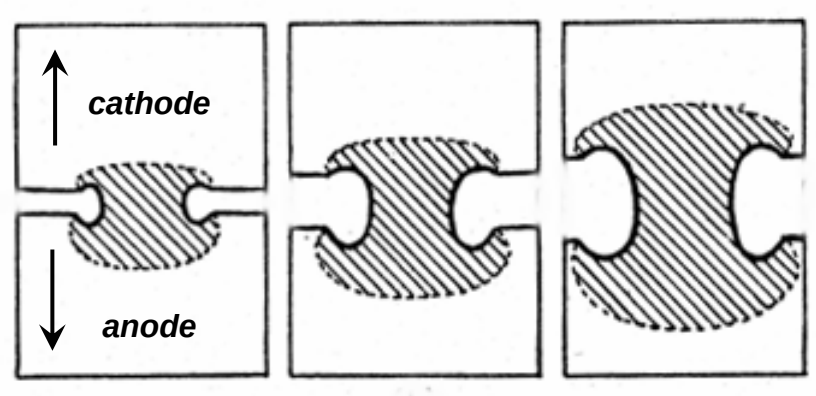
→ ***Renouveau d'activité de recherches de nos jours***

motivée par l'augmentation de puissance dans l'automobile et le spatial

PHENOMENOLOGIE

→ ***La recherche pionnière a montré l'existence d'un pont de métal liquide à l'ouverture de contacts à faible courant***

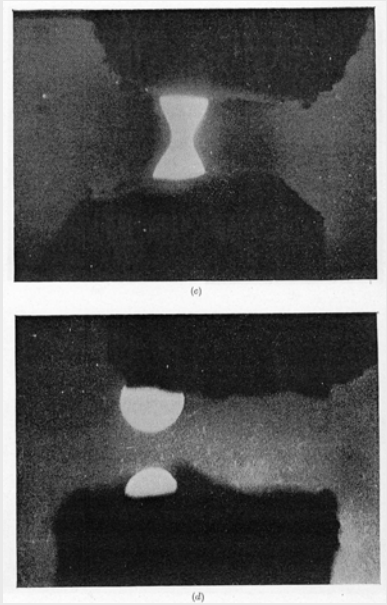
- Bain de métal en fusion au point de contact à cause de la constriction du canal de courant : formation d'un pont
- Stabilité du pont grâce à la tension superficielle (effet du matériau et impuretés)
- Forte asymétrie en température anode/cathode



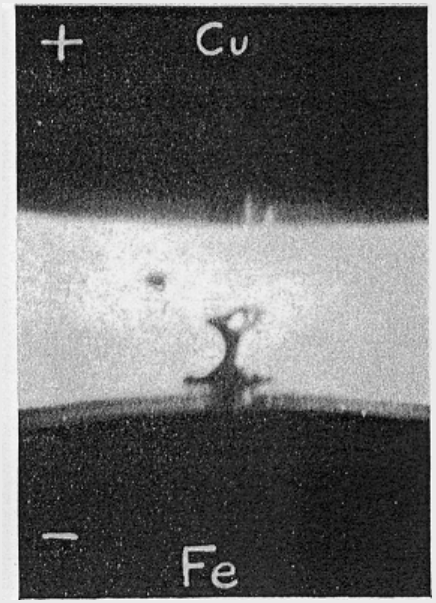
(Ref. : R. Holm, *Electrical Contacts, Theory and Application*, 1976, Springer Verlag, Berlin)

RUPTURE DU CONTACT : 2 situations

- *Avec transfert de matière*



- *Explosion avec formation de plasma*



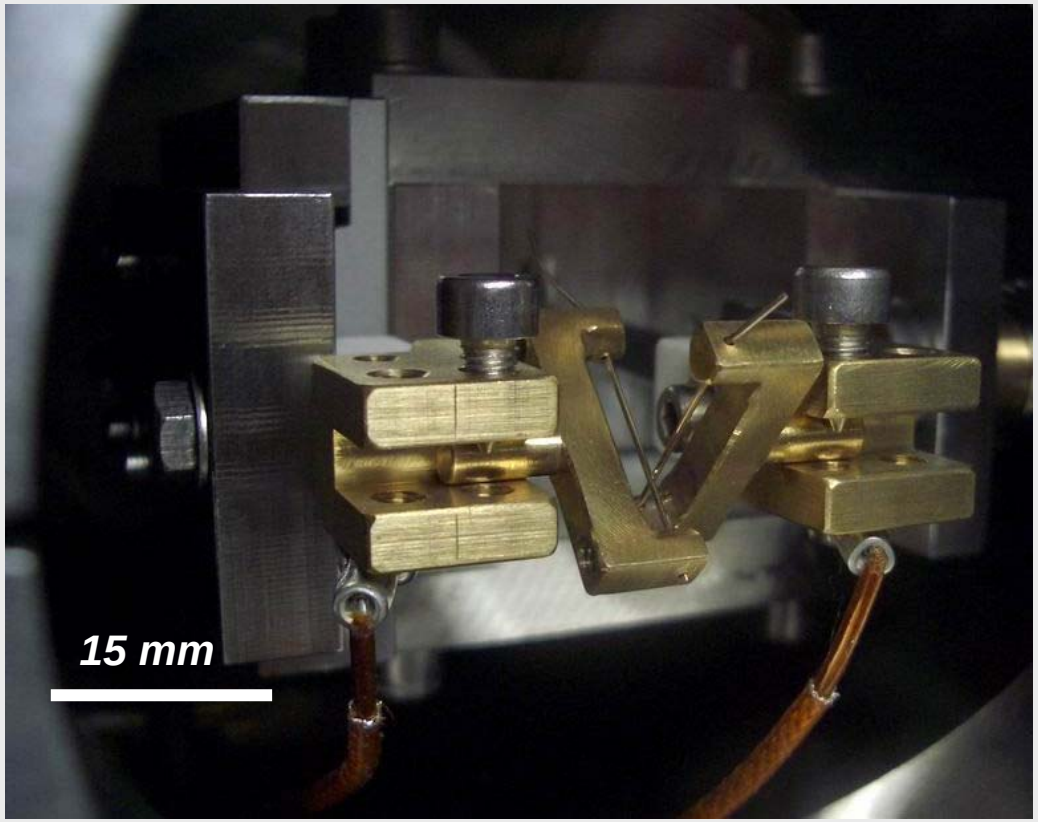
- courte durée
- forte intensité
- haute densité

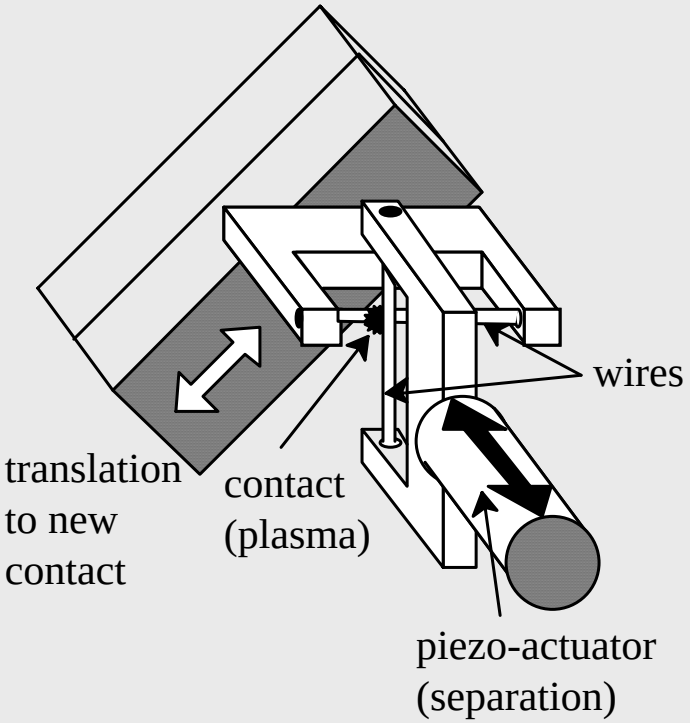
Ref. : F. Llewellyn Jones
Nature **207**, 255, (1965)

- ***Les plasma de vapeurs métalliques connus pour être non idéaux dans certaines conditions***
- ***Similarités avec les fils explosifs (« exploding wires »)***
- ***Propriétés particulières de ces plasmas à cause des très faibles dimensions (micro <-> Méga)***

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

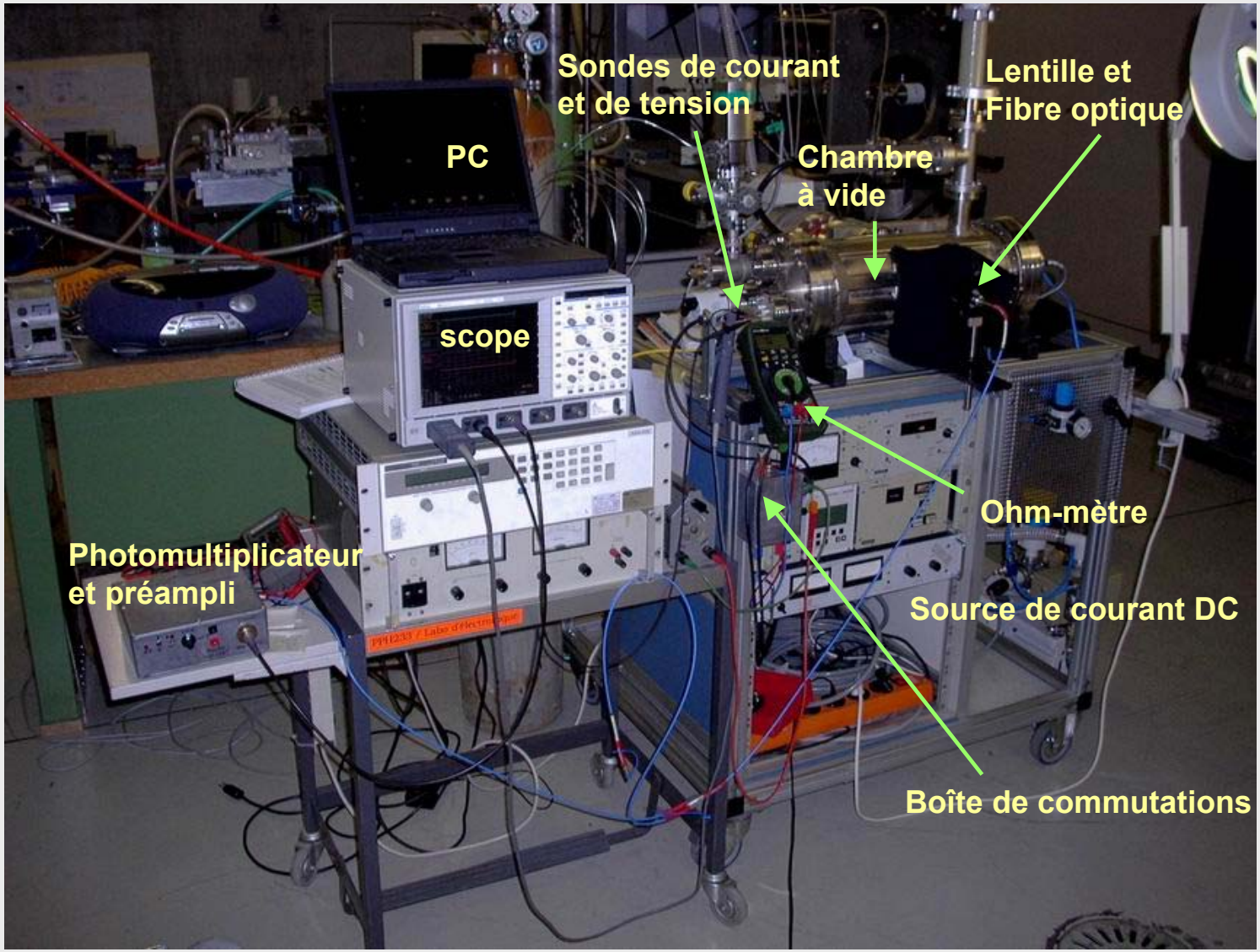
- Electrodes → fils ***croisés***
- Séparation avec piézo-actuateur (17 µm /s)
- Faibles séparations (max 10 µm)
- Atmosphère contrôlée (10^{-7} → 1000 mbar)



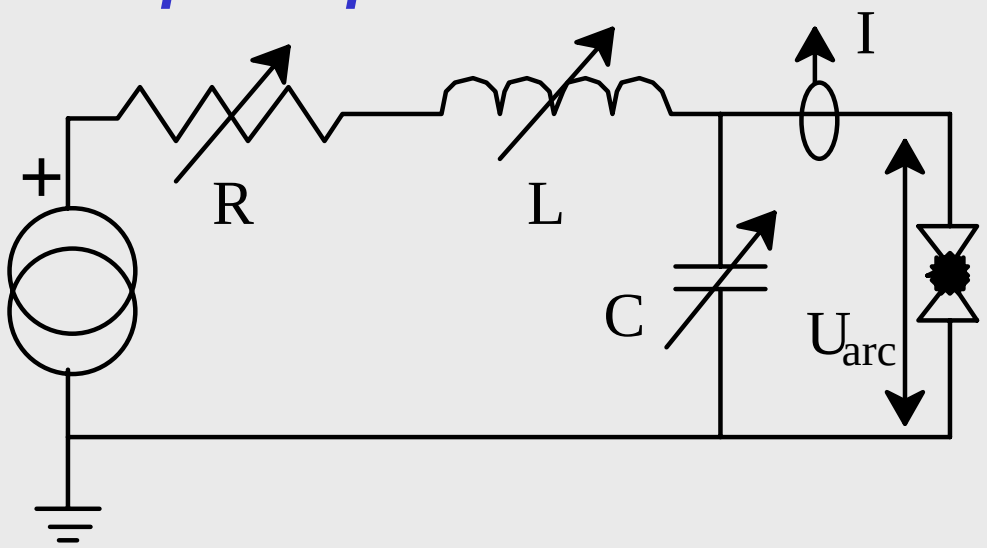


Aussi : translation latérale
→ nouvelle surface à chaque test
(> 30 tests par échantillon)

Mesures et diagnostics



Circuit électrique et paramètres :



Paramètre explorés :

- →**Courant :** 0.3 – 1.5 A
- →**R :** 0 – 80 Ω (typically 10 – 20 – 30)
- →**L :** 0 – 0.78 mH
- →**C :** 0 – 100 µF
- →**p :** 10^{-6} to 1000 mbar (dry air)
- →**Matériaux :** Neyoro, Paliney, Tungstène

Paramètres constants :

- →**Vitesse de séparation : 17 µm/s**
- →**Diamètre des fils : 0.5 mm**

Résultat typique :

Série de micro-décharges

- Très courts événements (< 20 ns)
- Lumière émise
- Augmentation de tension
- Chute de courant

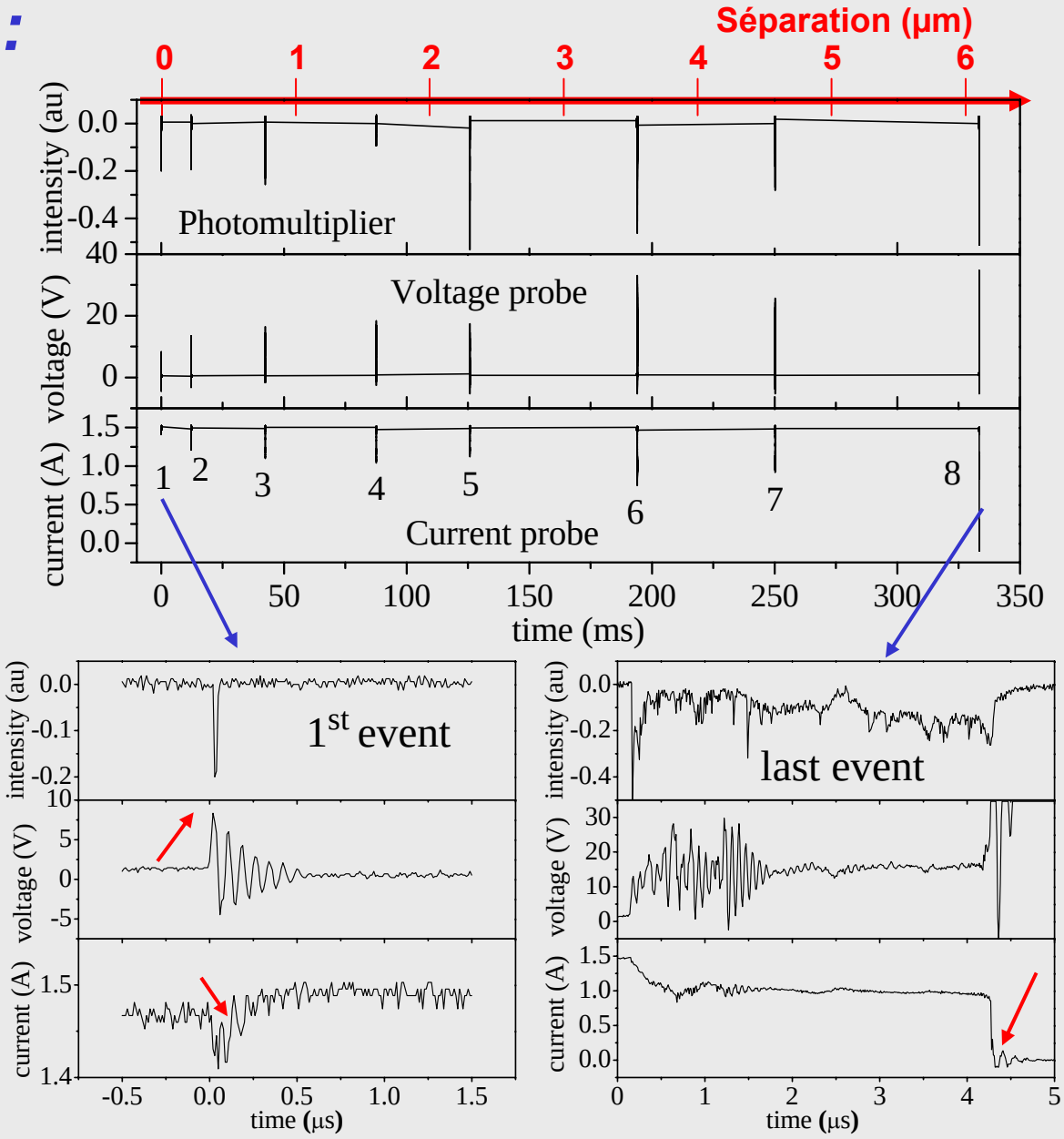
⇩

- Re-fermeture du contact

⇩

- Ouverture finale (5 – 6 µm)

Reproductible!



Mesures à haute résolution temporelle :

A faibles séparations

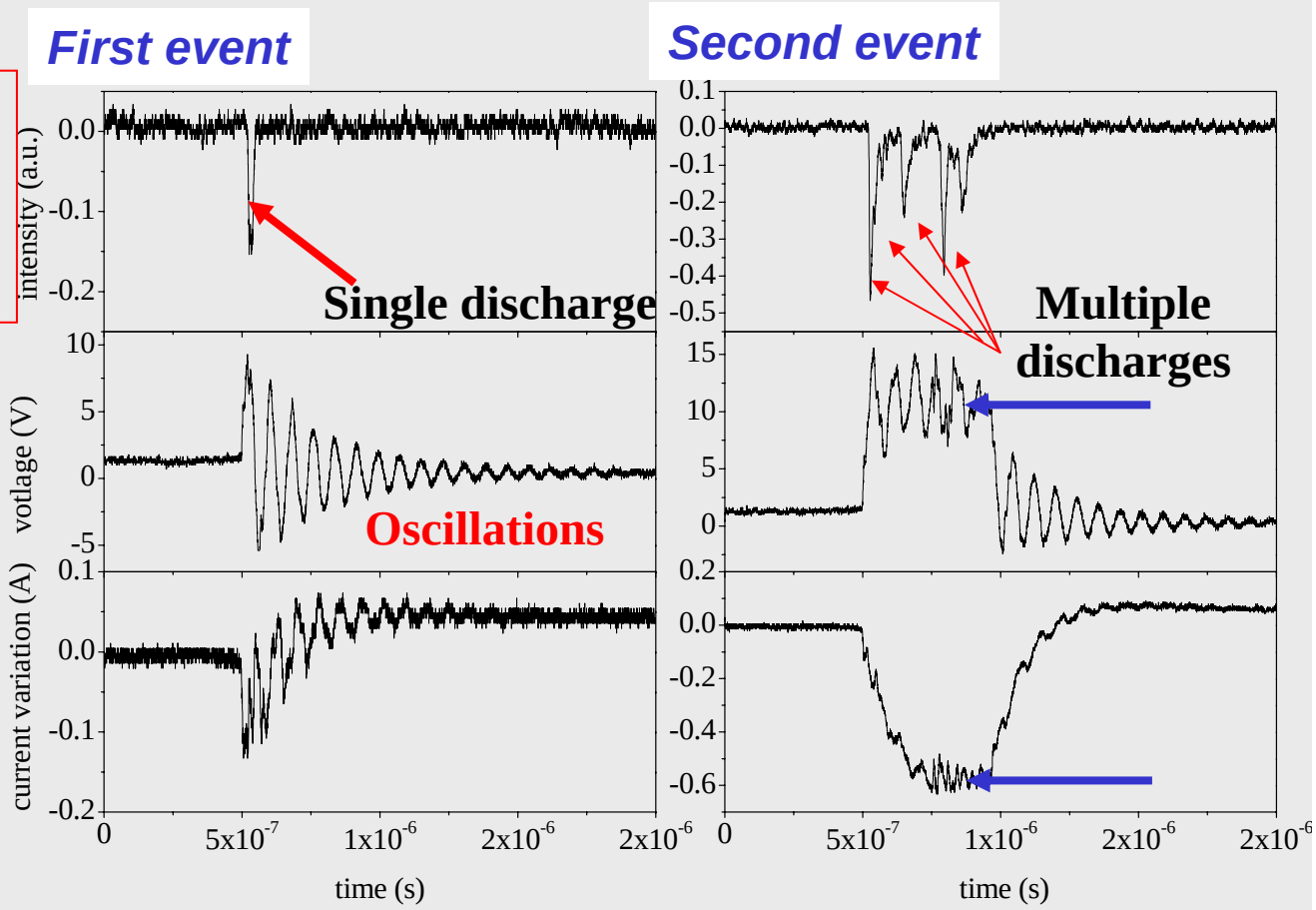
Suite de courtes décharges
10-20 ns

⇩

Oscillations

⇧

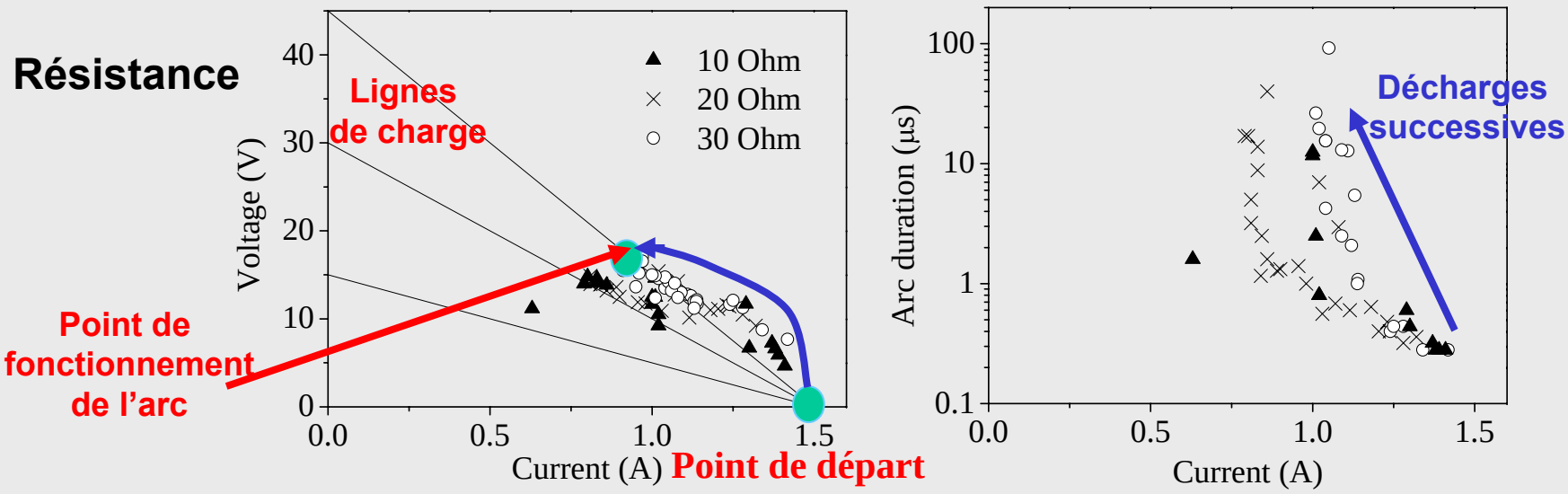
Perturbations
du circuit externe



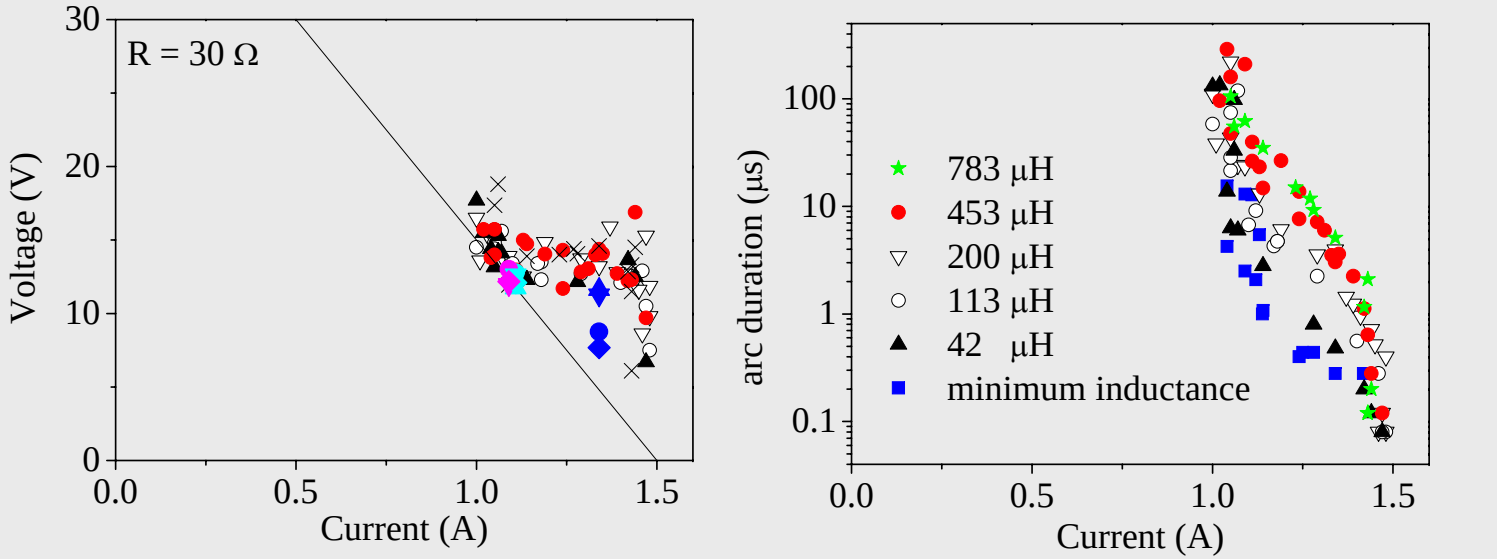
Observation de la lumière → essentielle comme indication sur le plasma

Effets des paramètres du circuit externe :

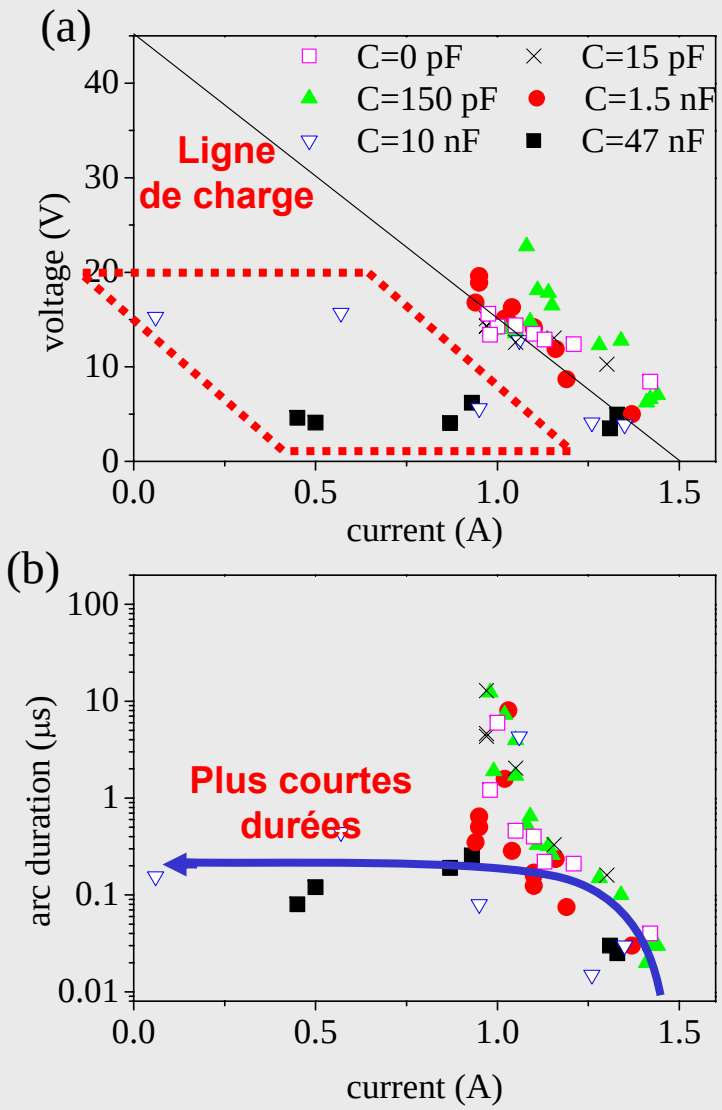
Résistance



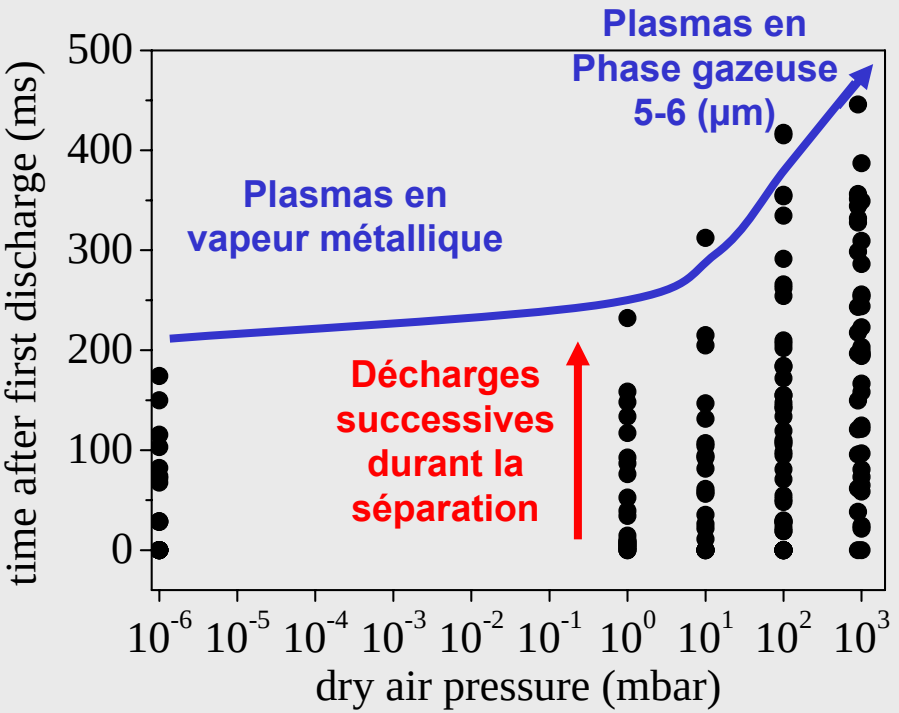
Inductance



Effet de la capacité :



Effet de la pression ambiante :



Transition vers décharges gazeuses :

Lpm électron – neutre <-> taille du gap (10 mbar pour quelques microns)

Spectroscopie d'émission optique

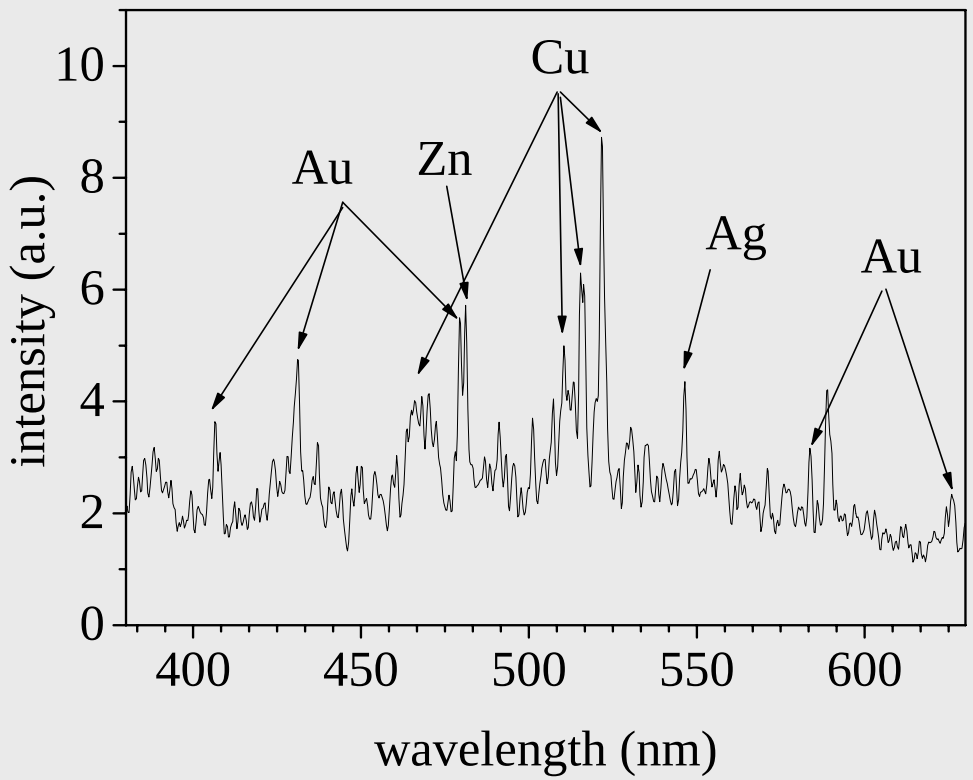
Spectre d'émission optique intégré dans le temps
(sur plusieurs événements d'une même ouverture)

⇩

Lignes métalliques
(matériaux des électrodes)

⇩

Plasma dense
en vapeurs métalliques

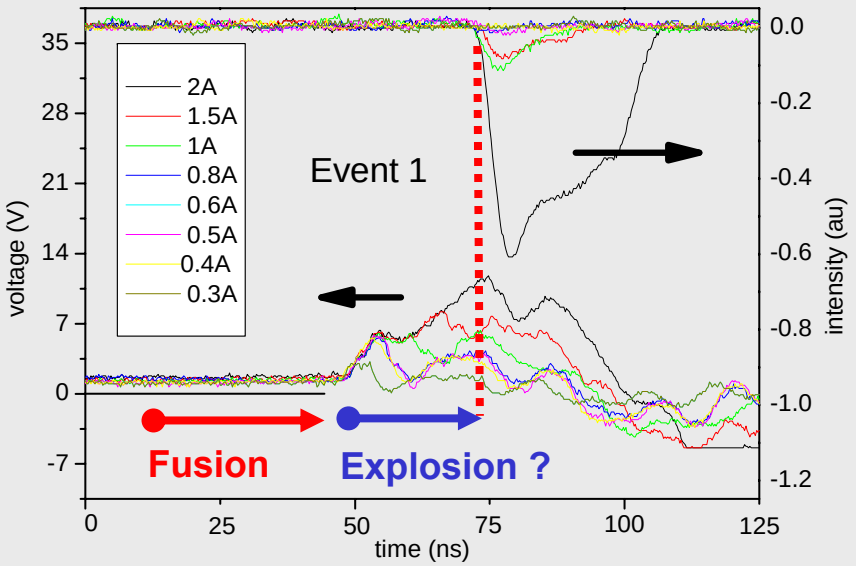


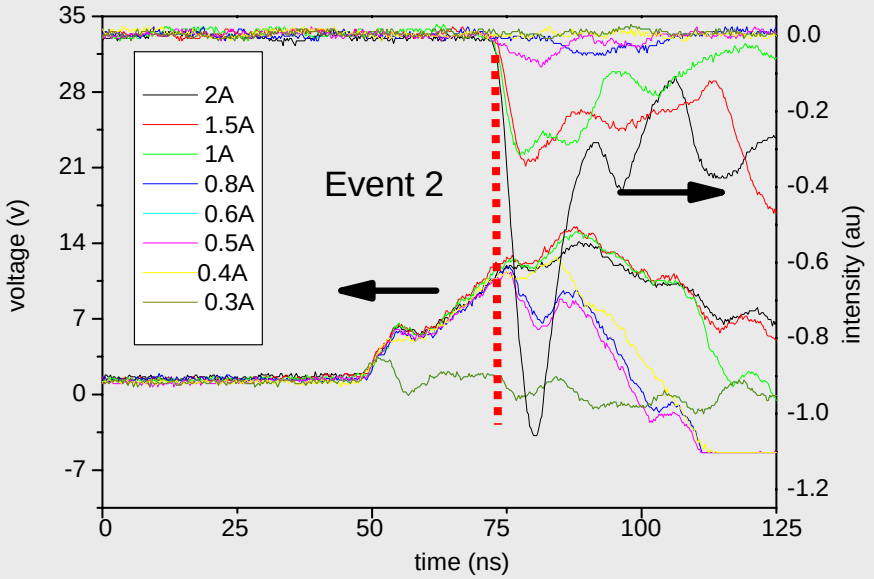
Indications de la présence d'un plasma non idéal

1.- Tension/courant → Conductivité de plasma très dense (non ideal) 10^4-10^5 (Ω m) $^{-1}$

(à partir de la résistance mesurée (5 - 10 Ω) et admettant un volume de plasma de 10µm ∅, 2-3 µm long)

2.- Développement temporel





- Évolution très reproductible de la tension (phase initiale)
- Délai tension → émission

Analogies avec « exploding wires »

Transition Liquide - plasma

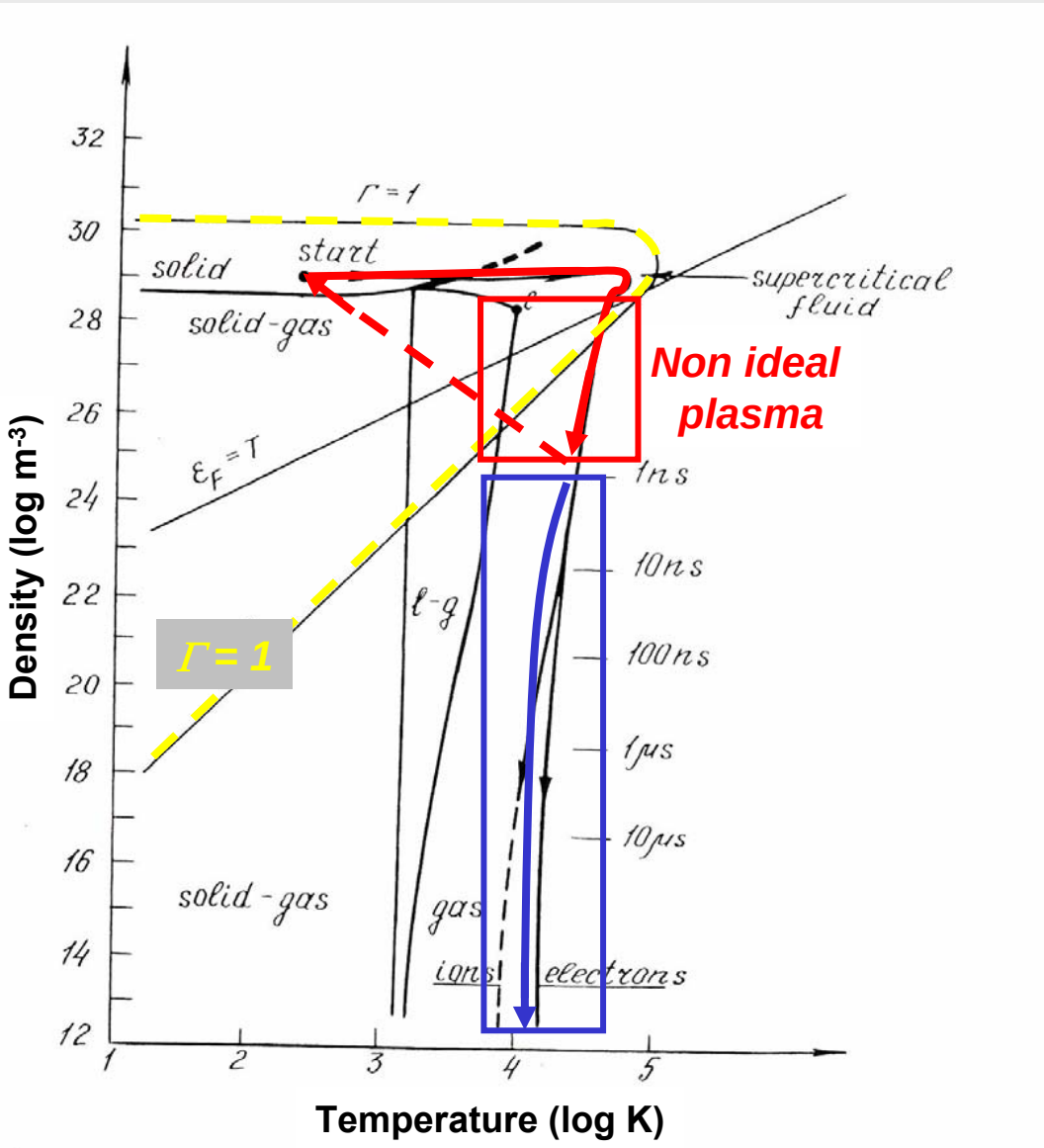
Décharges à faible gap (<1-3 µm)

- Transition solide – liquide (supercritique)
- Explosion
- Très courtes décharges (ns)
- Plasma non idéal

Re-fermeture du contact

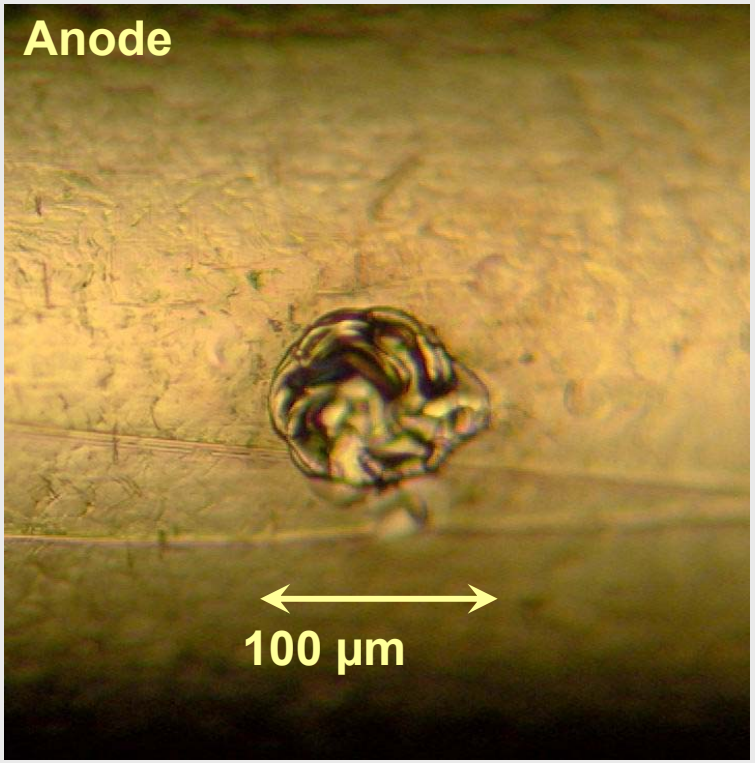
Décharges à plus grand gap (qques µm)

- Décharges (classiques)
- Arc en vapeur métalliques
- Décharges gazeuses
- Plus longue durée (stable)



G.A Kobzevb, I.T. Iakubov, and M.M. Popovich, eds. *Transport and Optical Properties of Non ideal Plasmas*. 1995, Plenum Press: New York and London.

Microscopie des cratères d'érosion :



Métal fondu
(restes du pont de métal liquide)

Taches cathodiques
(évaporation, gravure)

Asymétrie de l'érosion
(typique des arcs électriques)

CONCLUSIONS (contacts électriques) :

- Existence de décharges à très petites séparations (< 1µm)
- Succession d'arcs avec re-fermeture du contact
- Forte influence des paramètres externes
- Plasma métalliques (vapeur) de *très petites dimensions*
- Phase plasma constituée de très courtes (< 10-20 ns) décharges instables
- Évidence de l'existence de plasmas très denses et non idéaux proches de la transition liquide/vapeur

CONCLUSIONS GENERALES SUR LES MICRO PLASMAS

- **Effets de petite taille → : *μ vs M***
  - **très haute densité d'énergie (MJ/cm^3)**
  - **très forts gradients (E, λ_D -> gaines ?)**
  - **plasmas instables (~ ns)**
  - **plasmas non idéaux (Γ ~ 0.5)**

- **Effet du matériel de base (liquide/solide) → :**
  - **très haute densité**
  - **"basse" température**
  - **couche limite solide/liquide/plasma indistincte (quantum plasmas)**
  - **Transition de phase**

Domaine de recherches fondamentales relativement nouveau
Applications existent (EDM, contacts électriques, laser-matéraux, Lab-on-Chip, ...)

Grandes difficultés expérimentales
Nombreuses questions ouvertes