



- **100 participants**
- **38 présentations orales et une vingtaine de posters**
- **Plasmas thermiques et Energétique**
- **16 conférences invitées**



CIPE₂₀₁₄

2^{ème} Congrès International Francophone « Plasma & Energie »



T1 - Phénomènes aux électrodes

T2 - Propriétés des plasmas thermiques

T3 - Transfert d'énergie

T4 - Appareils de coupure

T5 - Contacts et arcs de court-circuit

T6 - Matériaux (Synthèse et traitements, nanomatériaux...)

T7 - Torches à plasma (projection, traitement, déchets...)

T8 - Métallurgie (soudage, découpe, four...)

T9 – Applications des plasmas hors d'équilibre: énergétique, matériaux, dépollution et médecine

T10 - Energie (fossile, habitat, environnement...)

T11 - Outils mathématiques et numériques appliqués à la physique des plasmas et à la physique énergétique

Contributions malgaches

- **Session « Mathématiques pour la Physique ». Méthode p-adique.**
- **Energétique: sujets appliqués au contexte économique malgache**
- **Très peu de moyens expérimentaux et numériques**
- **Sujets:**
 - Réseaux électriques à sources diffuses
 - Fonctionnement et mise en réseau d'éoliennes, d'hydroliennes et de systèmes photovoltaïques
 - Utilisation de la biomasse
 - Optimisation de combustion
 - Géothermie
 - Gestion de l'eau et érosion des sols
 - Thermique de l'habitat

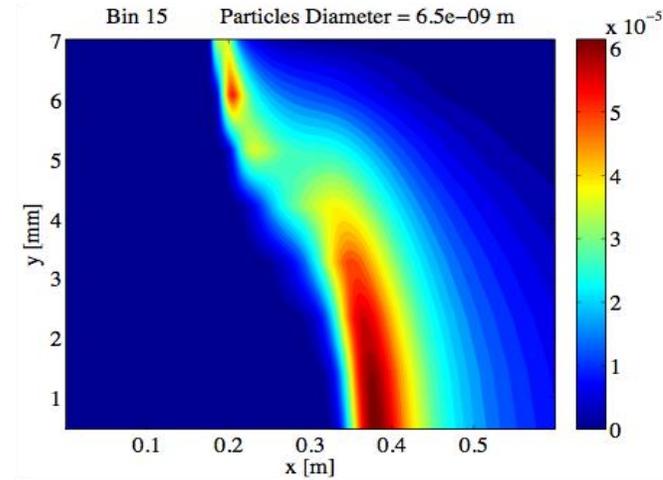
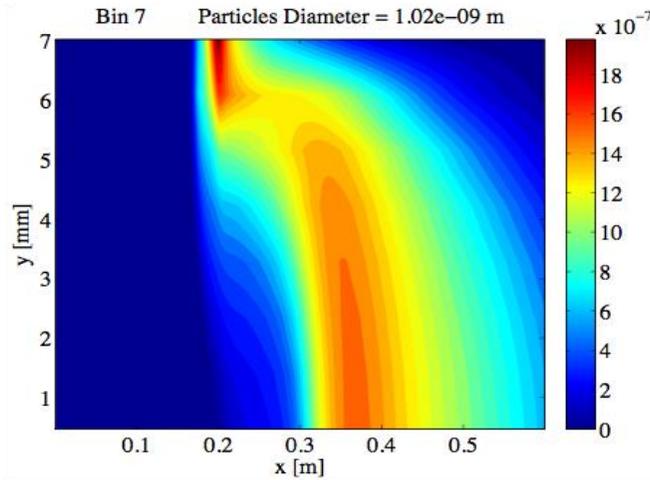
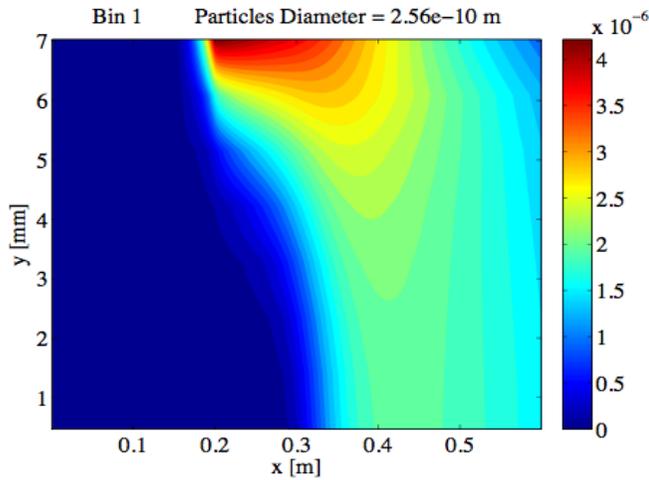
Matériaux

Production et utilisation de (nano)particules

- **NTC hétérogènes par arc: Vonjy + AEPPT-LALACE**
- **Modélisation de la nucléation/croissance de particules de noirs de carbone (V. Rohani)**
- **Apport des nanoparticules sur les propriétés des matériaux diélectriques (S. Diaham)**

Modélisation de la nucléation/croissance de particules de carbone

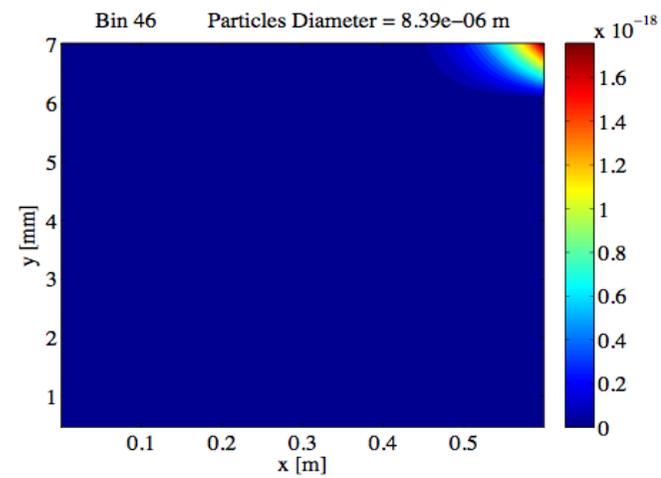
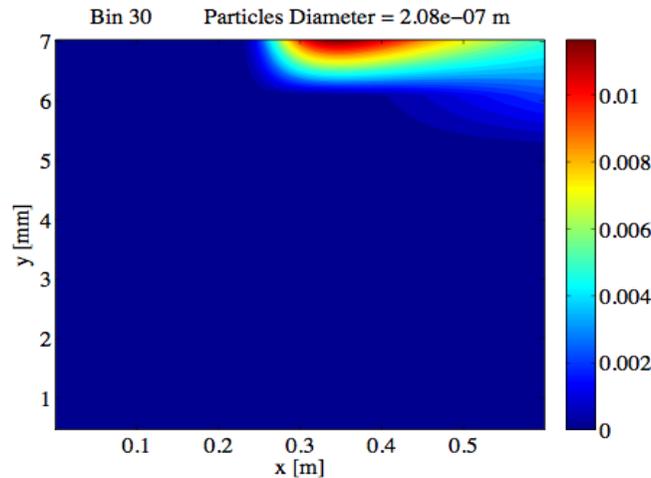
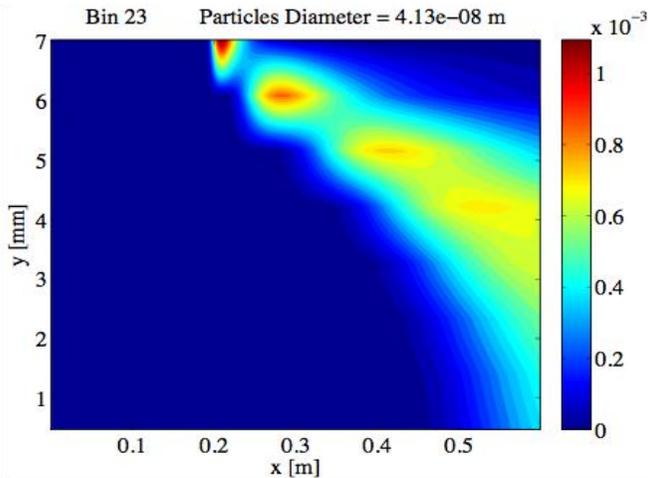
Concentration massique (kg/m^3) pour différentes classes de particules dans le réacteur



Classe : 1/46

7/46

15/46



Classe : 23/46

30/46

46/46

Modélisation de la nucléation/croissance de particules de carbone

▪ CONCLUSIONS

- ❑ Modèle qui donne des **tendances conformes aux rares expériences publiées !**

S.Abanes and G. Flamant, International Journal of Hydrogen Energy, 34 (2009) 7676-7685

S. Rodat, S. Abanes, J.L. Sans and G. Flamant, International Journal of Hydrogen Energy, 35 (2010) 7748-7758

- ❑ Outil extrêmement puissant pour l'optimisation du procédé :
 1. Contrôle de la taille des particules → BET
 2. Objectif : Mono-dispersion en sortie process (PSD étroite)

▪ PERSPECTIVES

- ❑ Passage en injection hétérogène (réacteur plasma) :
 1. Turbulence
 2. Millisecond-mixing
 3. Agrégation
 4. Modèle cinétique avancé du craquage

Apport des nanoparticules sur les propriétés des matériaux diélectriques (S. Diahham)

Polyimide : Avantages

➤ Stabilité thermique:

Température de transition vitreuse élevée ($T_g > 300 \text{ °C}$)

Température de décomposition élevée ($T_d > 500 \text{ °C}$)

Bonne durabilité des propriétés électriques ($>> 1000 \text{ h à } 300 \text{ °C}$)

➤ Propriétés électriques:

Fort champ de claquage ($> 2 \text{ MV cm}^{-1}$ à 25 °C)

Faible conductivité électrique ($< 10^{-16} \text{ } \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

Faibles pertes diélectriques ($< 10^{-2}$)

➤ Propriétés mécaniques:

Faible coefficient d'expansion thermique ($\text{CTE} = 2\text{-}40 \text{ ppm/°C}$)

Module d'Young élevé ($8,5 \text{ GPa}$)

➤ Mise en œuvre:

Précurseurs en solution / Recuit compatible

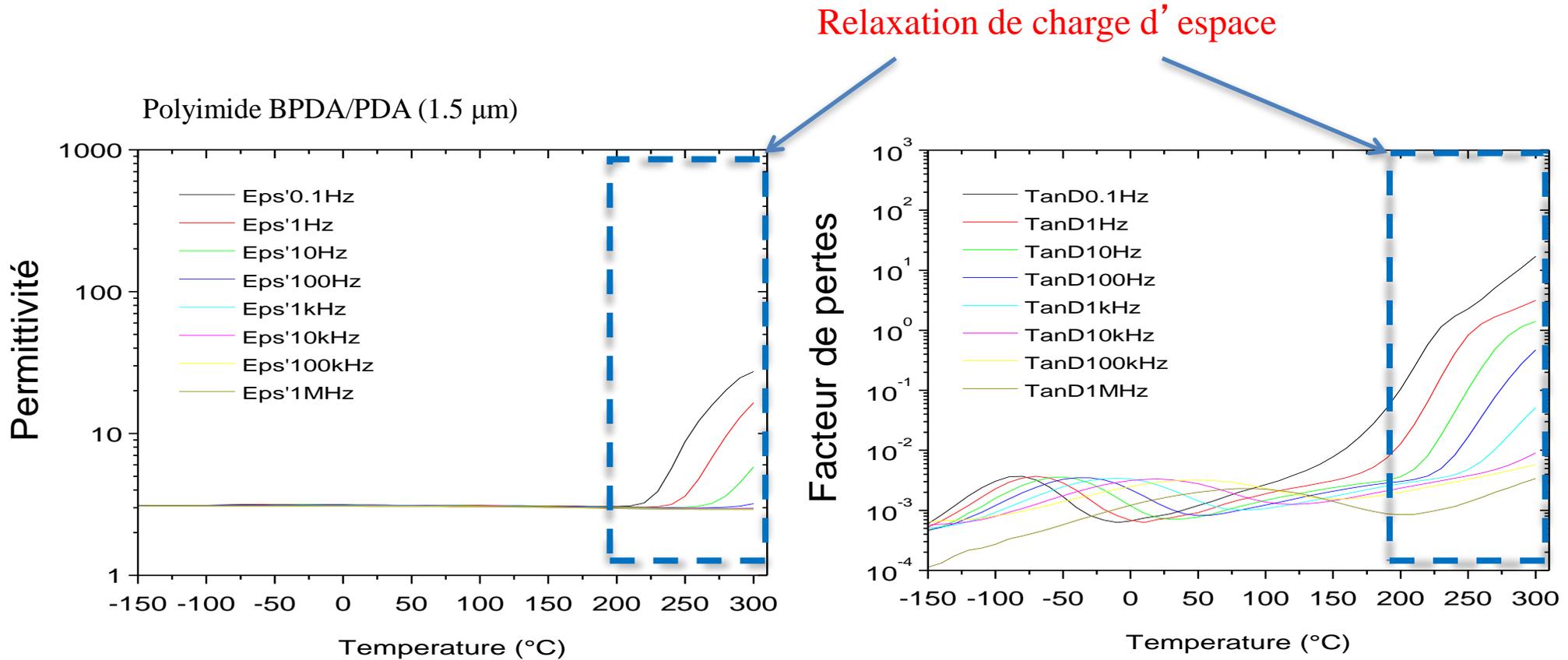
Faible viscosité (1000 cPs)

Polyimide : Inconvénients



Propriétés diélectriques vs. T° C

Diaham *et al*, Chapter in *Polyimide*, InTech, 2012.



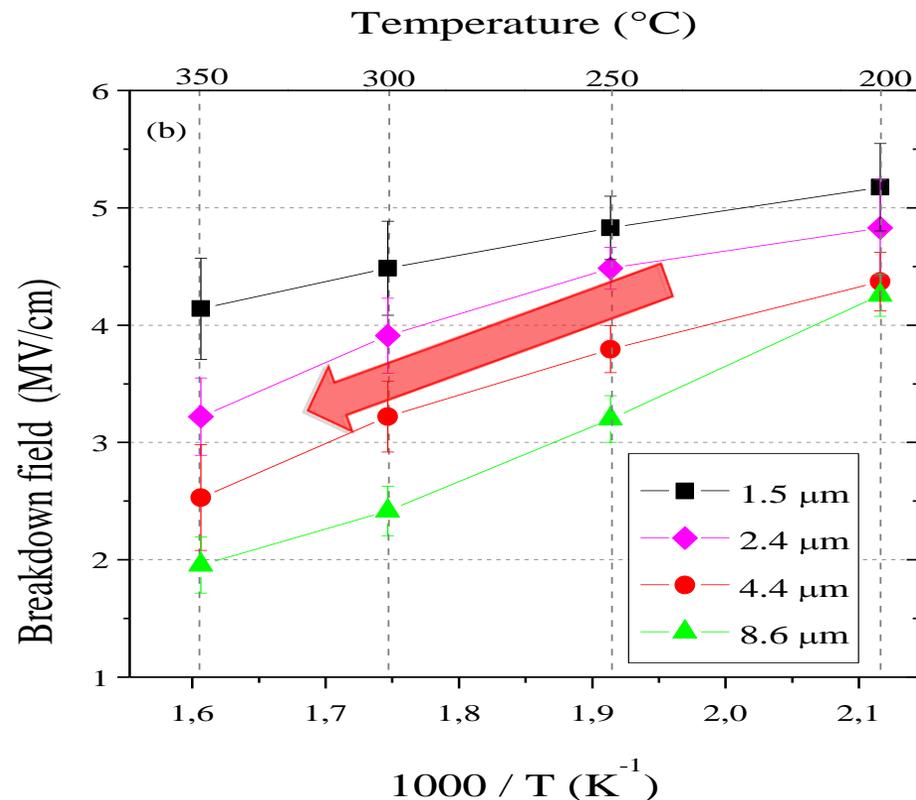
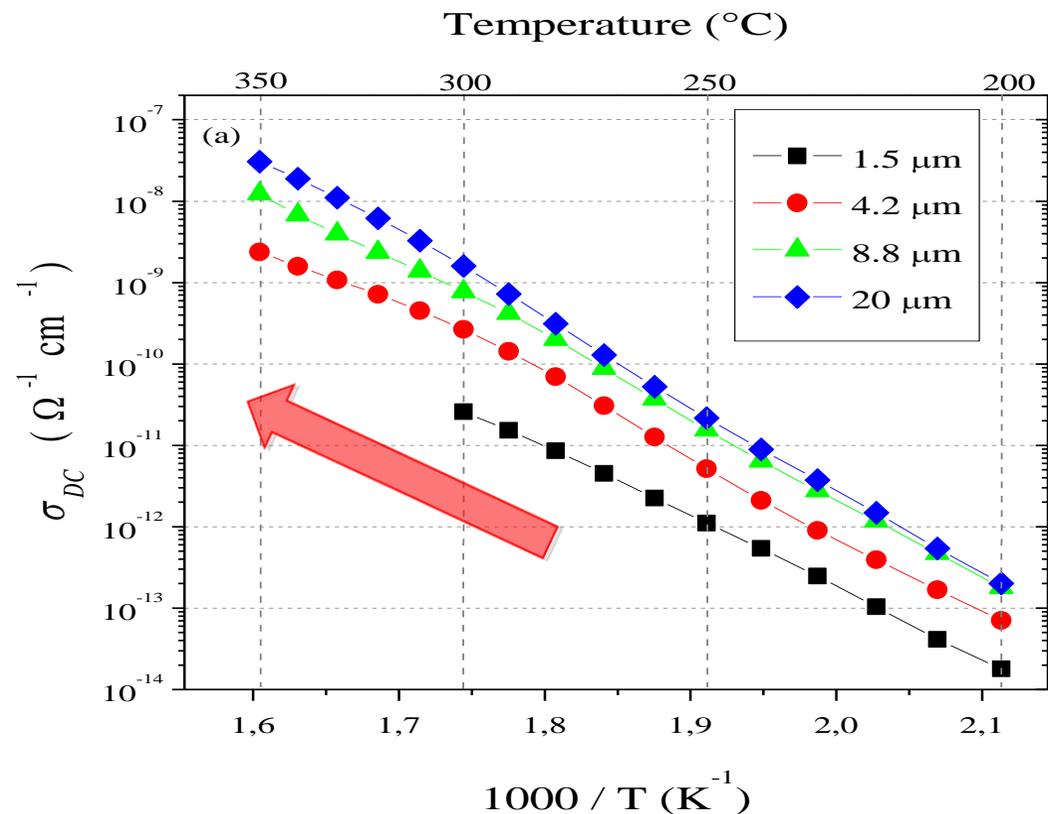
Augmentation de la permittivité et des pertes diélectriques à T > 200 ° C

Polyimide : Inconvénients



Propriétés diélectriques vs. T° C

Diaham *et al*, Chapter in *Polyimide*, InTech, 2012.



Conductivité



Champ de rupture



avec l'épaisseur et T° C

Dégradation des propriétés liée à la plus grande présence d'ions H⁺

Amélioration des **propriétés électriques** du PI à haute température ($>200^{\circ}\text{C}$)

✓ **Stratégie :**

Essayer de renforcer les faiblesses du PI par l'ajout de nanoparticules **conductrices thermiques** et **isolantes électriques**

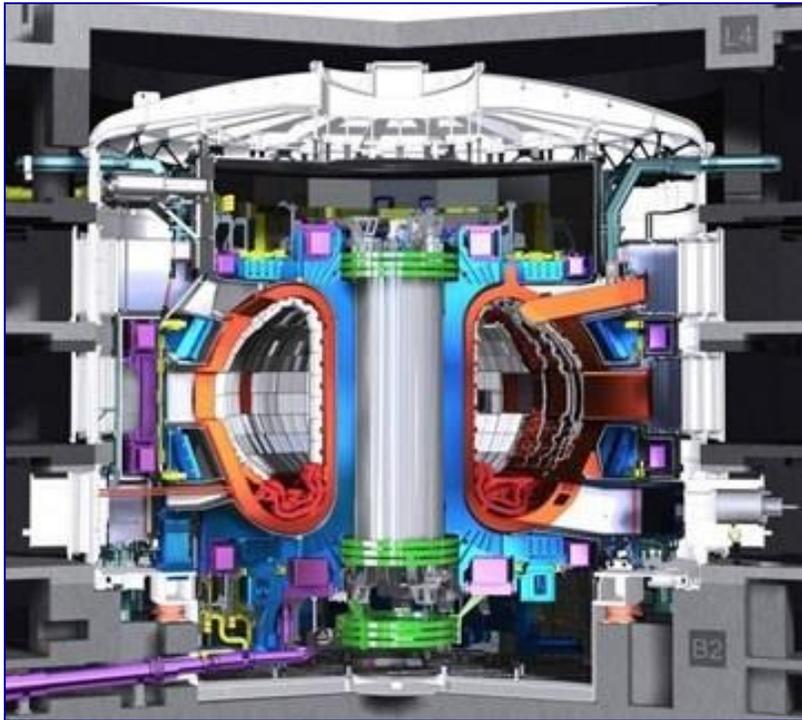
✓ **Choix des nanoparticules :**

Nitru de bore (BN), nitru de aluminium (AlN), nitru de silicium (Si_3N_4)

Plasmas non thermiques

Source d'ions négatifs pour ITER (JP Boeuf)

ITER – Quelques chiffres (www.iter.org)



30 m de diamètre

840 mètres cubes

23000 tonnes

80000 km de brins supraconducteurs (Nb, Sn)

360 tonnes: chacune des 18 bobines supraconductrices

360000 tonnes fosse d'isolation sismique

5000 personnes

13 Milliards d'Euros

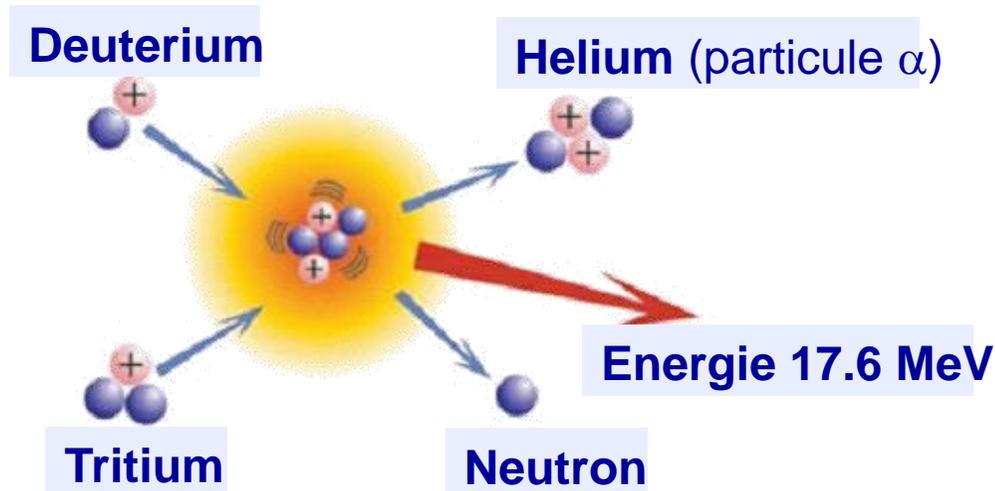
150 millions de degrés (10 fois la T du cœur du soleil)

Puissance de **500 MW** pour un apport externe de 50 MW

Source d'ions négatifs pour ITER (JP Boeuf)

Fusion magnétique et projet ITER

Principes de la fusion magnétique

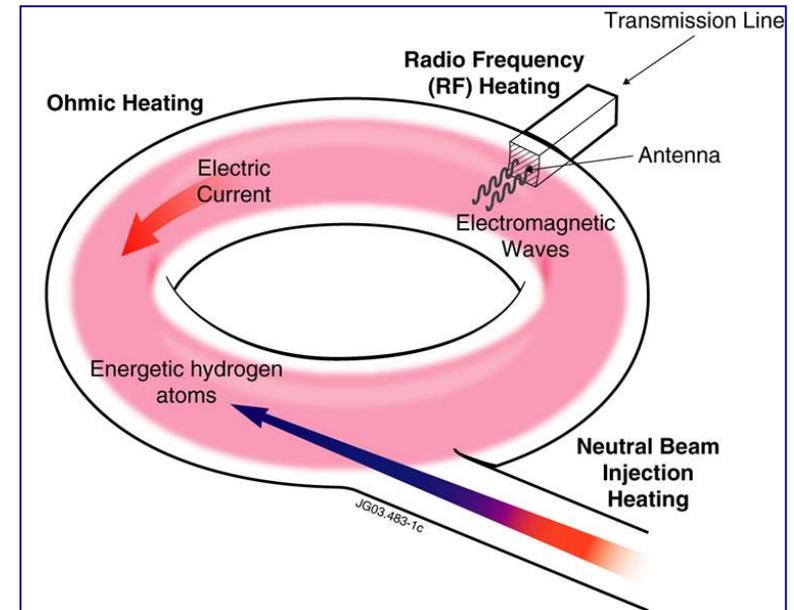


- Pour produire la réaction de fusion il faut surmonter la force de répulsion électrostatique entre noyaux
- Cette réaction devient suffisamment probable pour des énergies de D et T dépassant 10 keV soit **100 millions de K.** (1 eV $\sim 10^4$ K)
- A des températures si élevées le milieu est un plasma complètement ionisé (plasma chaud)
- Pour permettre les réactions de fusion il faut être capable de générer et de maintenir le plasma à ces températures – **Le plasma doit être bien « confiné » pour minimiser les pertes**

Source d'ions négatifs pour ITER (JP Boeuf)

→ 73 MW sont nécessaire à la première phase (chauffage extérieur) d'ITER

- **EC** **Electron Cyclotron**
Résonance Cyclotron Electronique
20 MW/CW, 170 GHz, 24 gyrotrons
- **IC** **Ion Cyclotron**
Résonance Cyclotron Ionique
20 MW/CW, 35-65 MHz
- **H-NB Heating-Neutral Beam**
Chauffage par injection de neutres
2 x 16.5 MW, 1 MeV, Deuterium
200 A/m² , 3600 s
- **LH** **Lower Hybrid**
Hybride Basse
20 MW/CW, 5 GHz



J. Jacquinot et al., Fusion Engineering and Design 84 (2009) 125

→ Le chauffage par injection de neutres rapides est essentiel au projet ITER

Source d'ions négatifs pour ITER (JP Boeuf)

Injecteur de neutres rapides

➤ Pourquoi des neutres rapides (et pas des ions) ?

Ions seraient fortement déviés par le champ magnétique du tokamak

➤ Pourquoi des ions négatifs (et pas positifs) ?

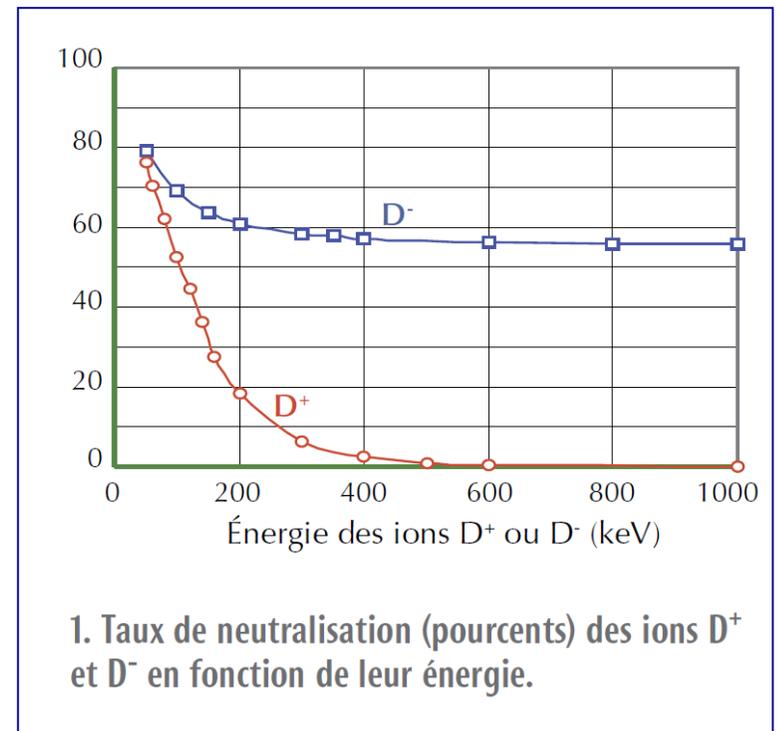
La neutralisation d'ions négatifs à haute énergie est beaucoup plus facile que la neutralisation d'ions positifs

➤ Pourquoi des énergies si grandes (1 MeV) ?

100 KeV étaient suffisants pour des tokamaks plus petits (JET) et des ions positifs étaient utilisés. ITER est beaucoup plus gros et des énergies plus grandes sont nécessaires pour que les neutres pénètrent au cœur du plasma

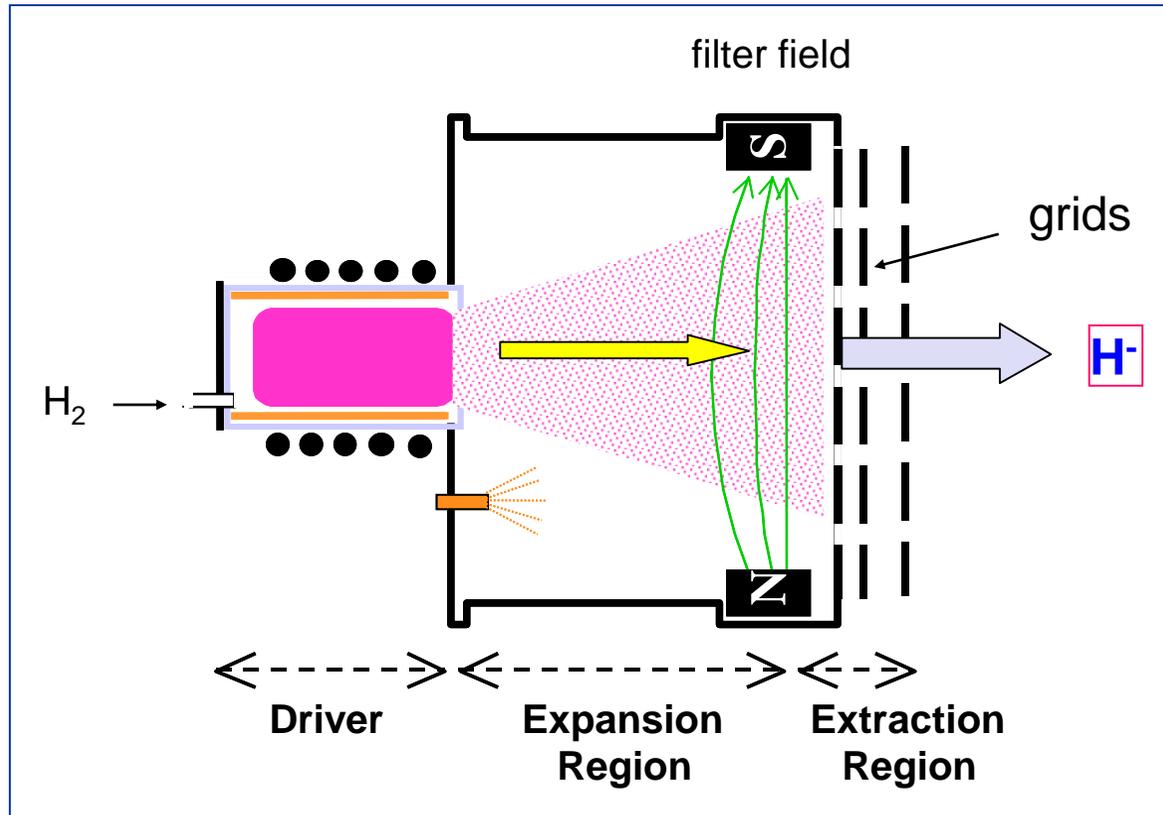
➤ Problème:

Les ions négatifs sont plus difficiles à produire et sont détruits plus facilement (eg par collisions avec des électrons rapides)



Source d'ions négatifs pour ITER (JP Boeuf)

Conditions de fonctionnement: Plasma couplé inductivement ~ H_2/D_2 0.3 Pa, 1 MHz, ~100 kW
Densité plasma $\sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ – $T_e \sim 15 \text{ eV}$ – Temp neutres $\text{H}_2 \sim 10^3 \text{ K}$, $\text{H} \sim 10^4 \text{ K}$



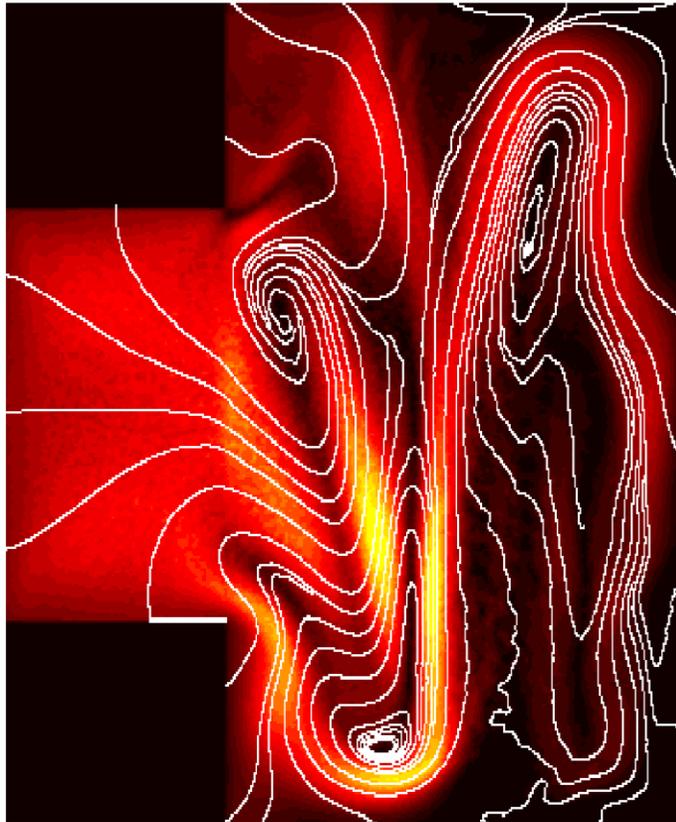
E. Speth et al, Nucl. Fusion 46 S220 (2006)

- Il faut minimiser le flux d'électrons extraits par la grille avec les ions négatifs et leur énergie, car les électrons rapides détruisent les ions négatifs
- **Le rôle du filtre magnétique est de réduire le flux d'électrons et l'énergie des électrons dans la région de production et d'extraction des ions négatifs**

Source d'ions négatifs pour ITER (JP Boeuf)

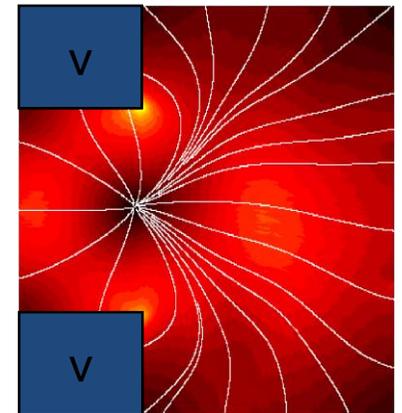
Transport à travers le filtre magnétique: Modèle particulaire PIC-MCC

➤ Distribution de la densité de courant électronique

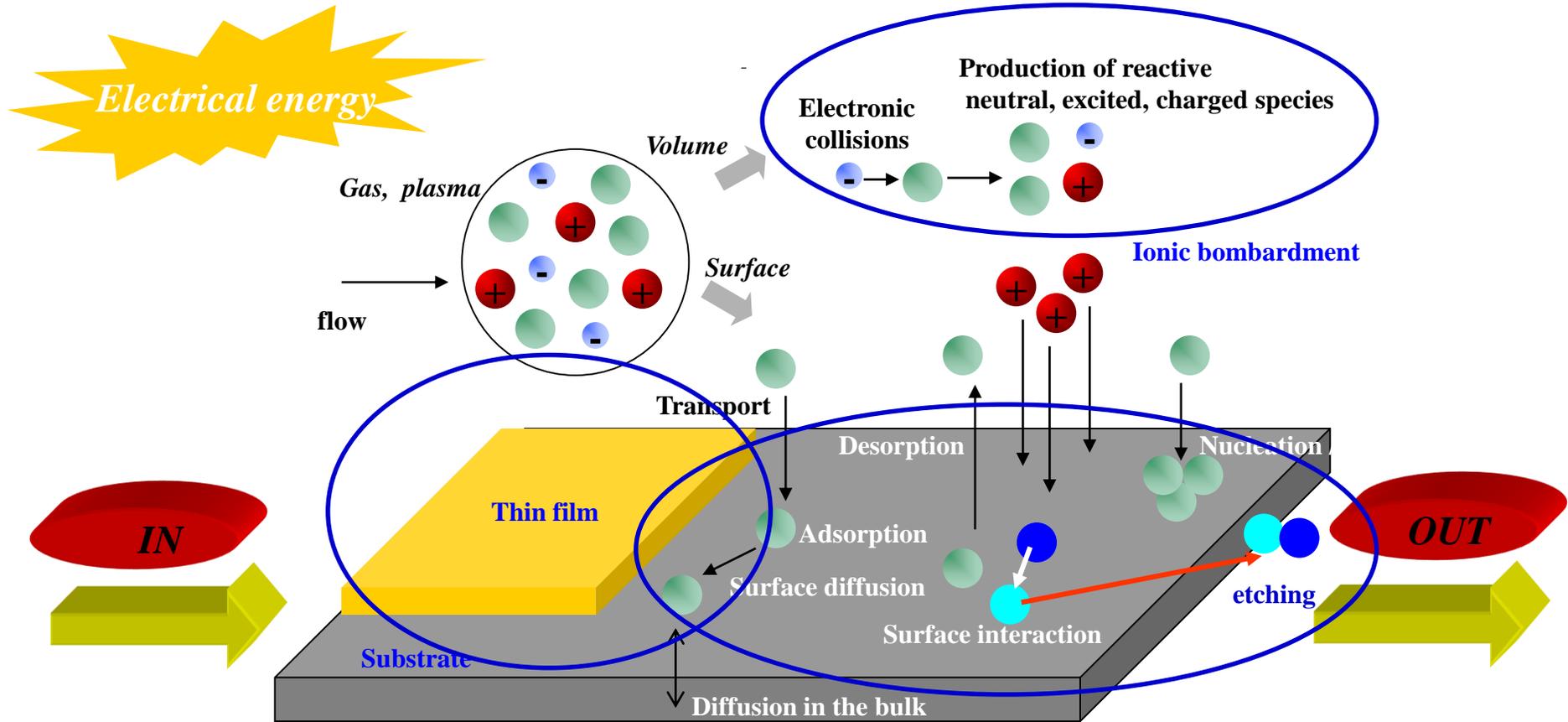


- Le gradient de pression électronique crée un courant diamagnétique perpendiculaire à la paroi
- Ceci est équivalent à un effet Hall et génère une dissymétrie du potentiel électrique de la densité de plasma
- Le transport électronique est très affecté par la présence des parois (flux en $1/B$ au lieu du flux classique collisionnel en $1/B^2$)

Les ions ne sont pratiquement pas magnétisés →

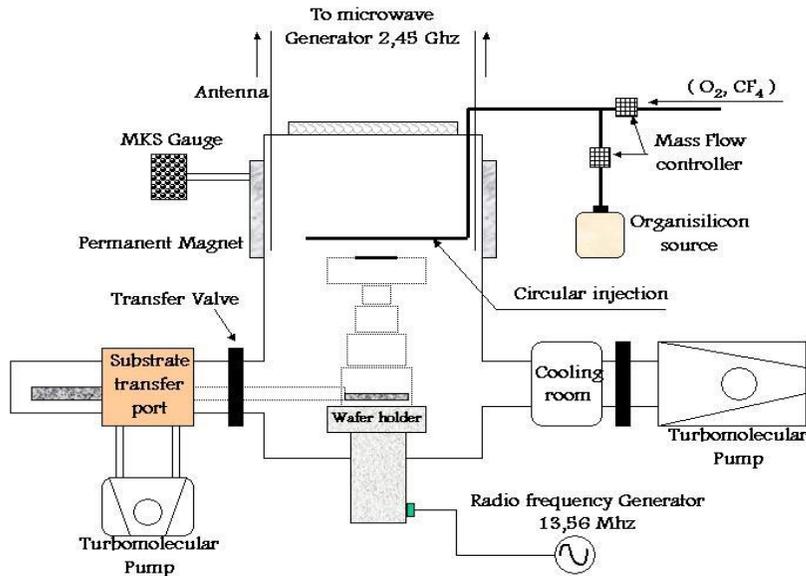


Croissance de couche mince (P. Raynaud)



Plasma tools: plasma phase and deposit

DECR Reactor for deposition (MS + OES)



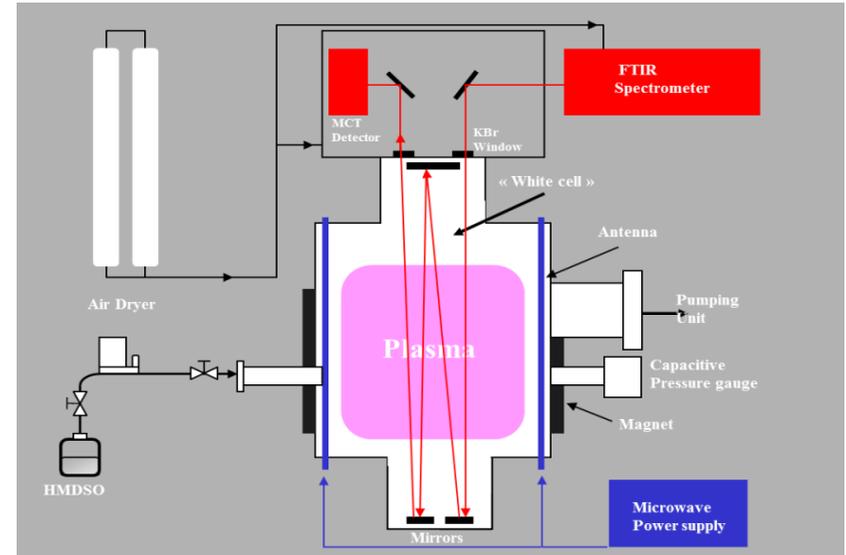
Power Input: 50 ~ 800 Watt

Pressure: 0.5 ~ 6.5 mTorr

Substrate polarization: F.P.

Ne : $10^{10} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

DECR Reactor for gas phase analysis



IR Diagnostic

Spectral range = 700 - 4000 cm^{-1} (mid -IR)

optical path = 40 m (number of path = 44)

Number of scan = 64

Resolution = 0.5 cm^{-1}

Detectivity = ppb / P° Atm. (or 10^{-3} mTorr or 10^{10} cm^{-3})

Power Input: 50 ~ 800 Watt

Pressure: 0.5 ~ 6.5 mTorr

FTIR Rappels

XY₂ Vibration modes

**étirement
symétrique**

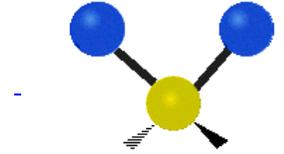
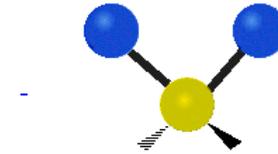
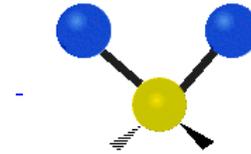
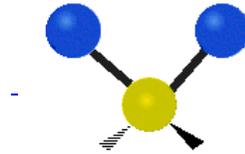
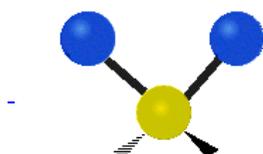
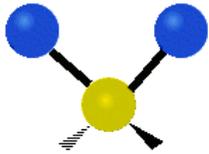
**étirement
antisymétrique**

Cisaillement

Bascule

Agitation

Torsion



symetric
Stretching

asymetric
Stretching

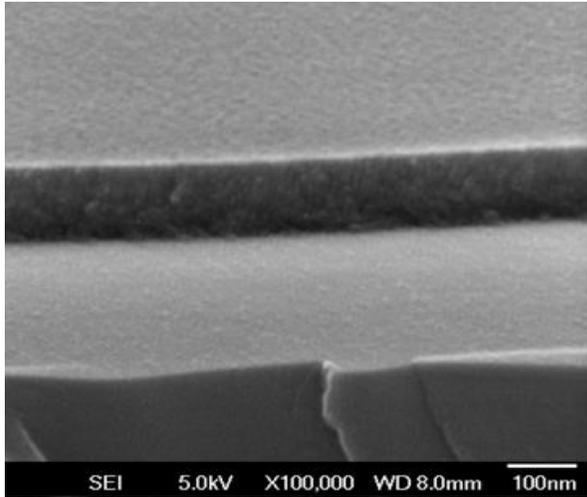
Déformation
Symétrique
dans le plan
(scissor)

Déformation
Asymétrique
dans le plan
(rocking)

Déformation
symétrique
hors du plan
(wagging)

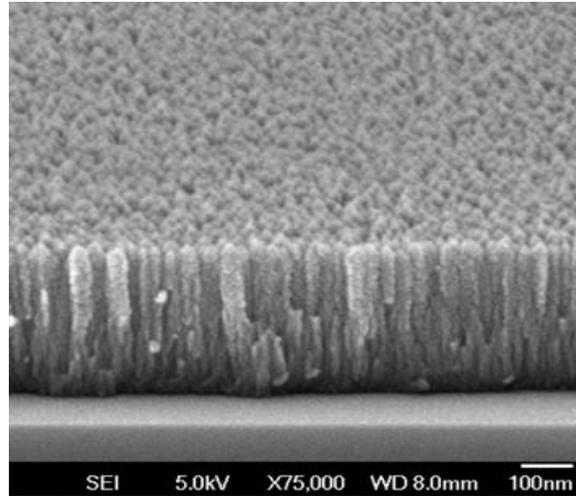
Déformation
Asymétrique
hors du plan
(twisting)

Micro – Meso - structure: SEM pictures



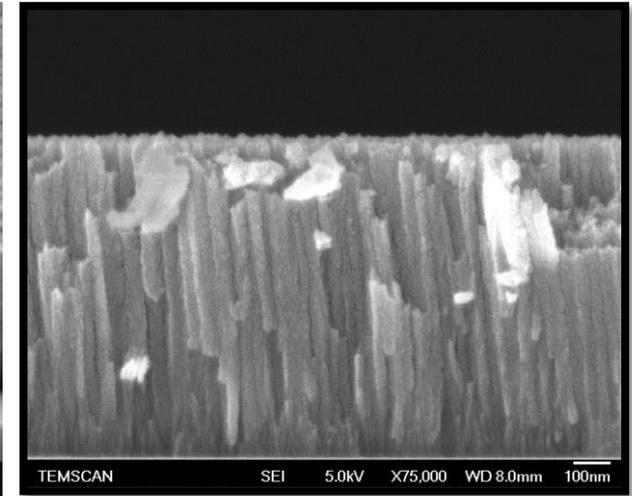
50% O₂ in ZTB / O₂ mixture

400 W - Uncontrolled T°
Floating Potential
Thickness = 322 nm



90% O₂ in ZTB / O₂ mixture

400 W - Uncontrolled T°
Floating Potential
Thickness = 390 nm



400 W - Uncontrolled T°
Floating Potential
Thickness = 860 nm

- Columns are clearly visible
- Diameter \approx 25 nm
- Coalescence ?
- 3D island Growth mode

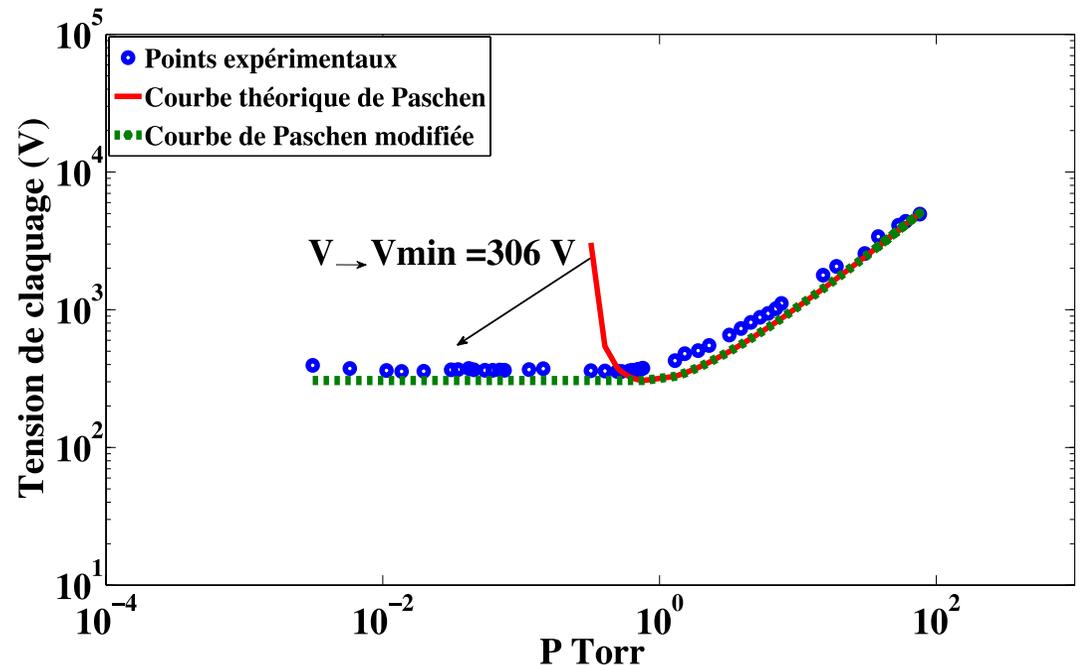
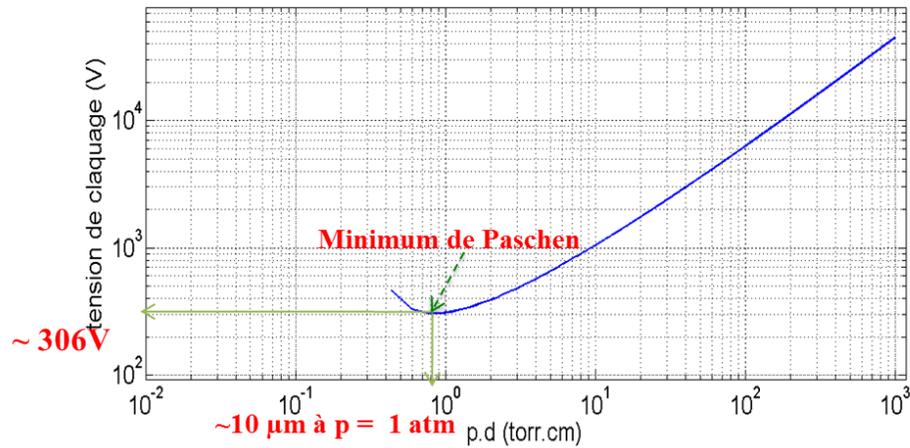


- How to avoid columns?
- Role of T°
- Role of Bias

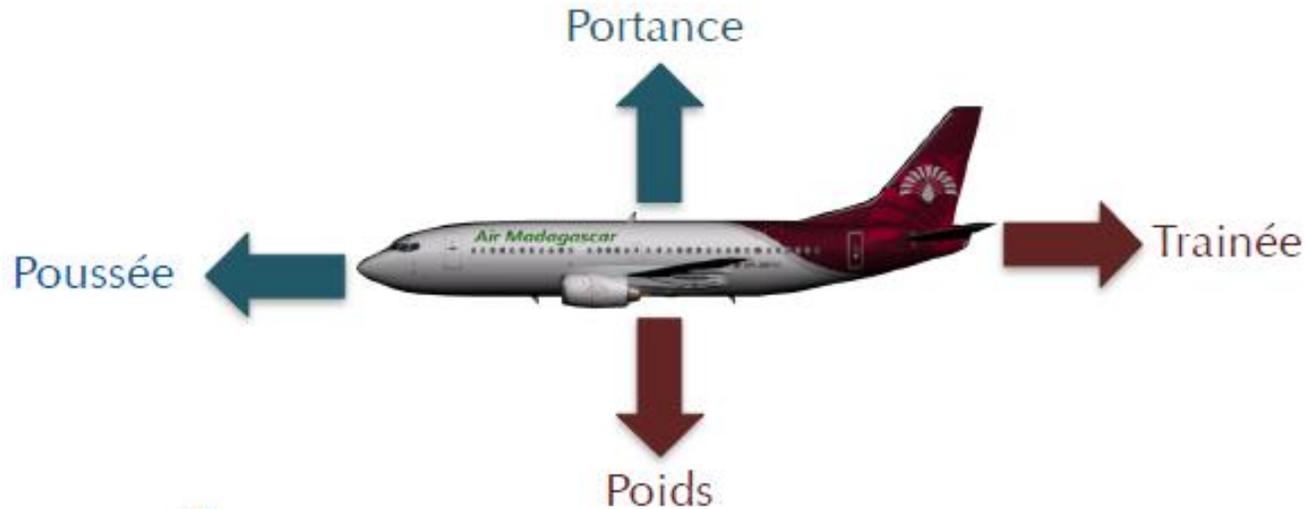
Change the mobility
Change the density of sites

Décharges partielles (J-P Cambronne)

- Applications aéronautiques (avion « plus électrique »)
- Travaux relativement fondamentaux sur les écarts à la loi de Paschen, au-delà du minimum, pour $T > 20^\circ\text{C}$



DBD pour la modification d'écoulement (H. Rabat)



$$F_x = \frac{1}{2} \rho V^2 C_x S$$

F_x : Force de trainée (en N)

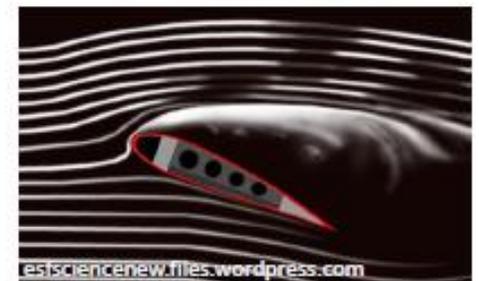
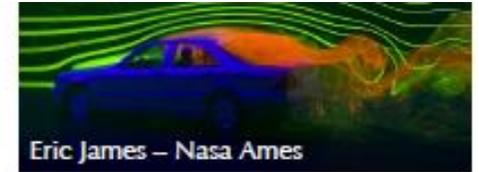
V : vitesse en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

C_x : coefficient de trainée

S : aire (en m^2)

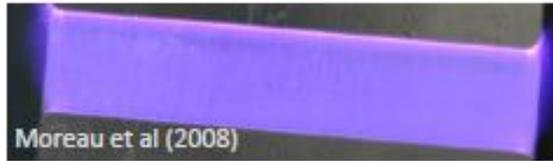
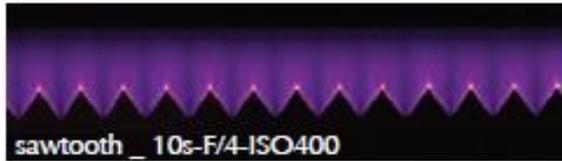
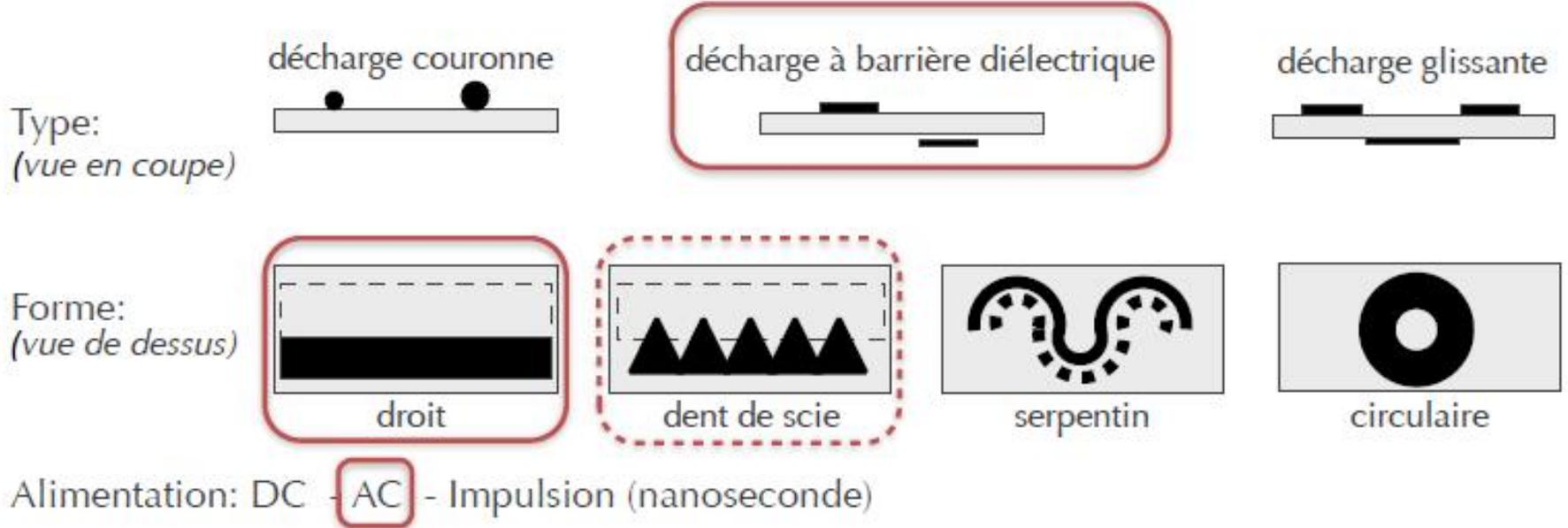
ρ : masse volumique de l'air (en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

C_x : fonction de la forme et de l'état de surface

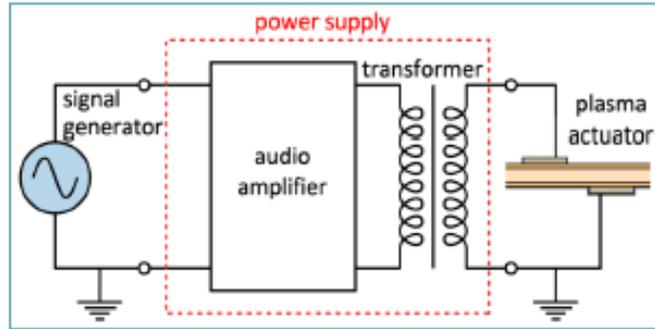


DBD pour la modification d'écoulement (H. Rabat)

Différents actionneurs plasma surfaciques:



DBD pour la modification d'écoulement (H. Rabat)

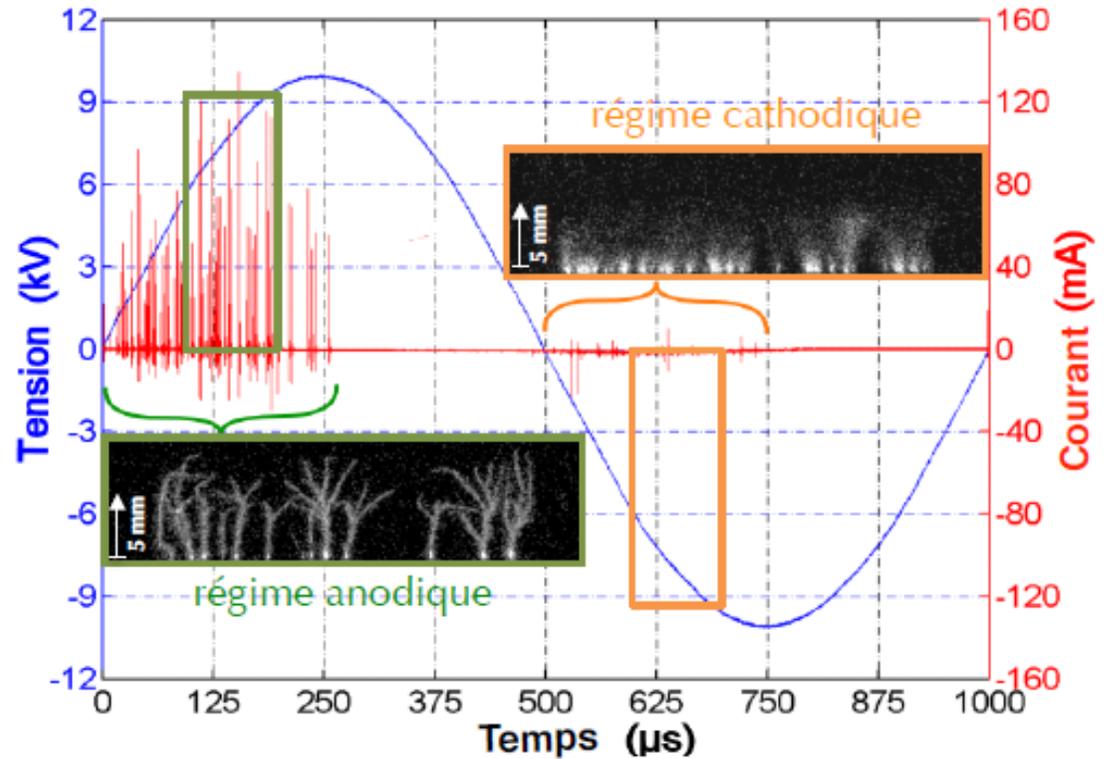
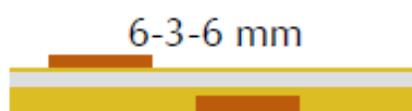


Fonctionnement:

- Tension: 5-30 kV
- Fréquence: 500 Hz - qqs kHz

vent ionique: de 2 à 8 m/s

Caractéristiques matériels:



Electrodes: cuivre

Diélectrique: (polyimide)

Kapton®

Mylar®

Kapton®

Projet Lxcat (L. Pitchford)

www.lxcat.net

At the heart of the Plasma Data Exchange Project is **LXcat** (pronounced "elecscat"), an open-access website for collecting, displaying, and downloading electron and ion scattering cross sections, swarm parameters (*mobility, diffusion coefficient, etc.*), reaction rates, energy distribution functions, etc. and other data required for modeling low temperature plasmas. The available data bases have been contributed by members of the community and are indicated by the contributor's chosen title.

This is a dynamic website, evolving as contributors add or upgrade data. Check back again frequently

Interaction plasma-vivant (O. Eichwald)

Plasma :

- Plasma Froid Hors Equilibre créé par décharges électriques
- Milieu faiblement ionisé (1 espèce active pour 10000 à 1 million d'espèces neutres).
- Température du plasma ~ Température ambiante

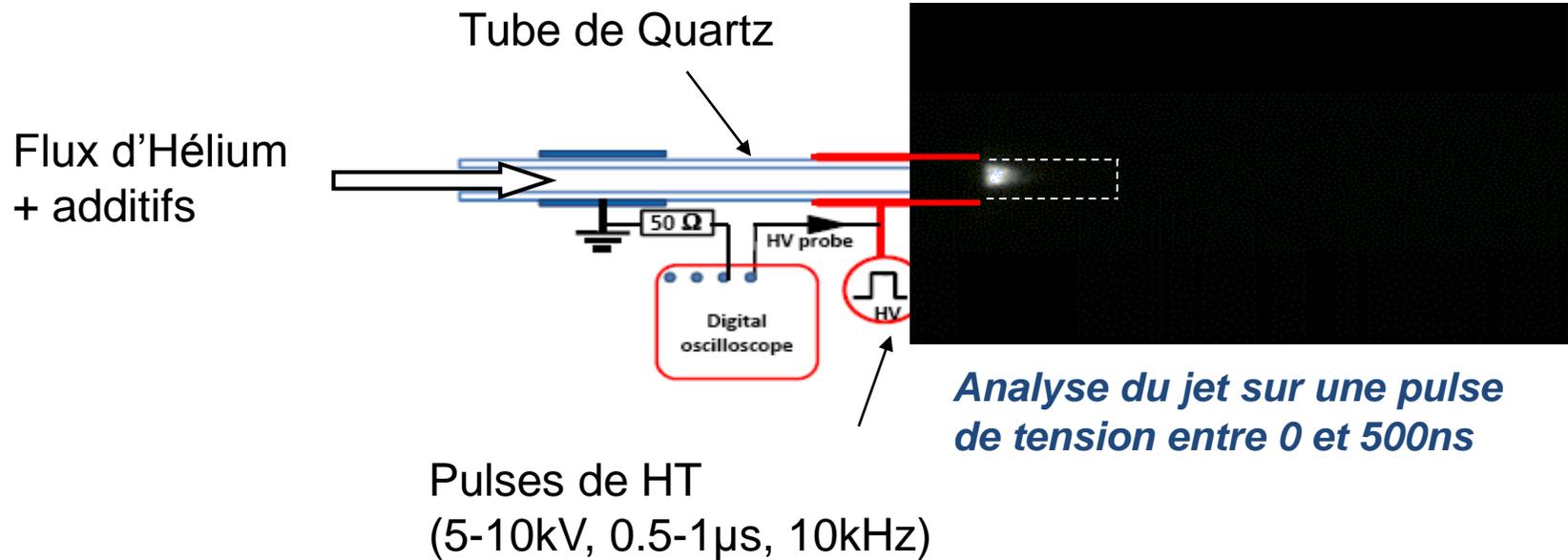
Médecine :

- Traitement des plaies chroniques et des ulcères
- Traitement antiseptiques des tissus, de la peau (dermatologie) et des dents
- Aide à la cicatrisation
- Catalyseur pour l'Hémostase et la Coagulation du sang
- Stérilisation d'instruments médicaux
- Traitement du cancer
- ...



Exemples de Plasmas Froids (PRHE)

Jet de plasma d'Hélium débouchant dans l'Air ambiant





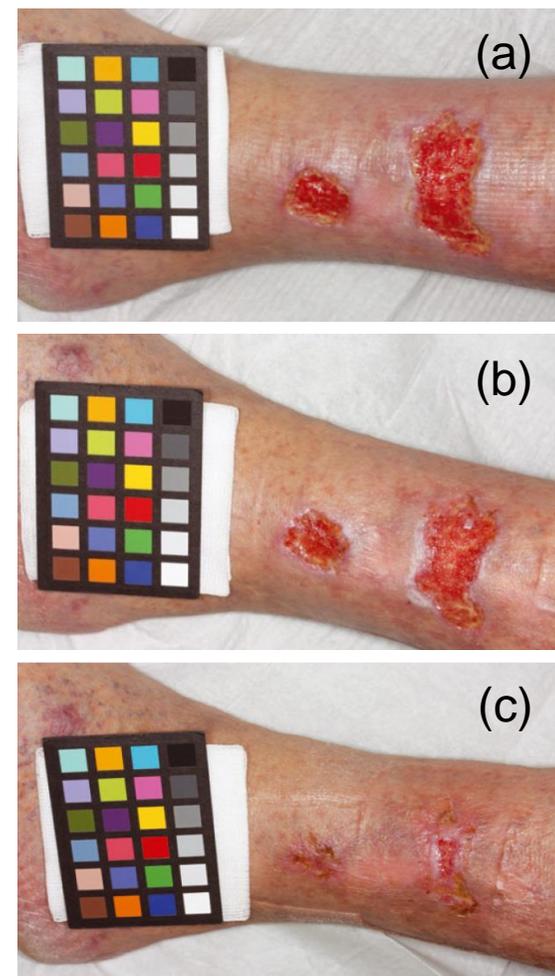
Traitement de la peau (plaies chroniques, exémas, infections, ...)



MicroPlaSter : Dispositif Torche à plasma refroidie : MicroPlaSter (2.45 GHz, 86 W, Ar 2.2 slm).

- (a) Avant traitement
- (b) Après 7 traitements
- (c) Après 11 traitements

Chaque traitement correspond à 2-5min d'application du plasma (11 traitements correspond à 23 jours au total)





Traitement de la peau (plaies chroniques, exémas, infections, ...)

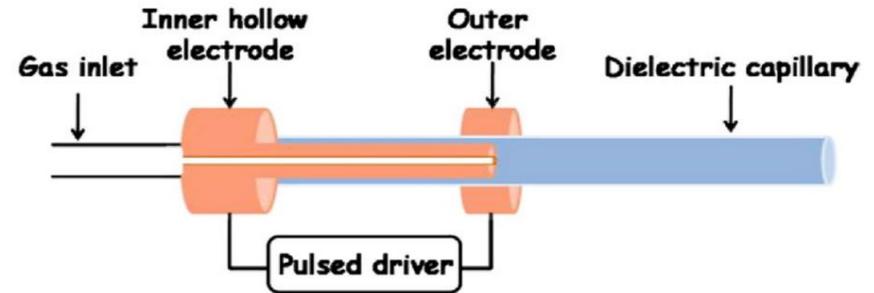
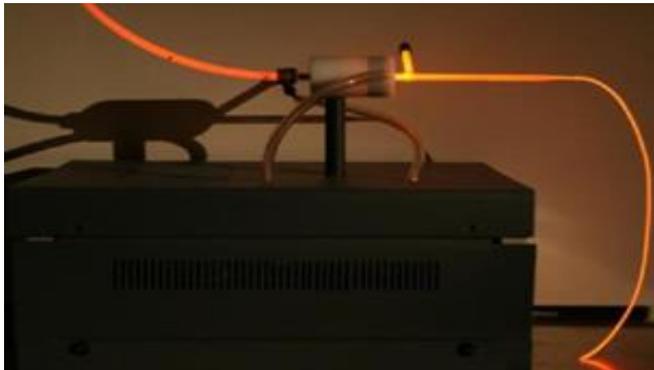
Agents actifs	FE-DBD (Air)	Torche indirecte (Air+Ar)	Effets connus
Photon UV	Faible émission (UVA > UVB)	Forte émission (UVA-B-C)	Anti-inflammatoire, anti-putréfaction, Effets germicides
Courant Electrique	~100µA rms dans la peau	Aucun	iontophorétique, Stimule les tissus, Favorise la résorption transdermique
ROS	Surtout O ₃	O ₃ , OH, H ₂ O ₂	Effets germicides, Stimule les tissus, Acidifiants, ...
RNS	NO et dérivé (NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻)		Stimule la prolifération cellulaire et la micro-circulation du sang, Acidifiant, ...





Traitement du Cancer

Etudes *in vivo* (exemple 2 GREMI)



Plasma Gun

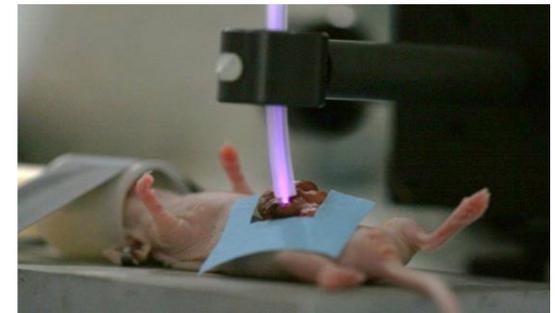
- Gaz : Hélium, Néon, Argon, Mélange
- Longueur du tube capillaire: Jusqu'à 1m
- Diamètre du tube capillaire : Du dixième de mm jusqu'à plusieurs mm
- Flux de gaz : Jusqu'à quelques litres par minute
- Alimentation Pulsée: fréquence 100Hz-10 KHz, Durée ns- μ s, Amplitude 2-20kV



Etudes *in vivo* (exemple 2 GREMI)

Protocole

- Transplantation orthotopique de cellules cancéreuses du colon par chirurgie sur 12 souris
- Attente de 7 jours d'incubation
- Traitement plasma de 10 minutes sur 50% de la population transplantée (accès à la tumeur par chirurgie)
- Suivi de l'évolution post-traitement des tumeurs par
- Bioluminescence





Traitement du Cancer (PRHE)

Nouvelle approche thérapeutique ?

Objectifs :

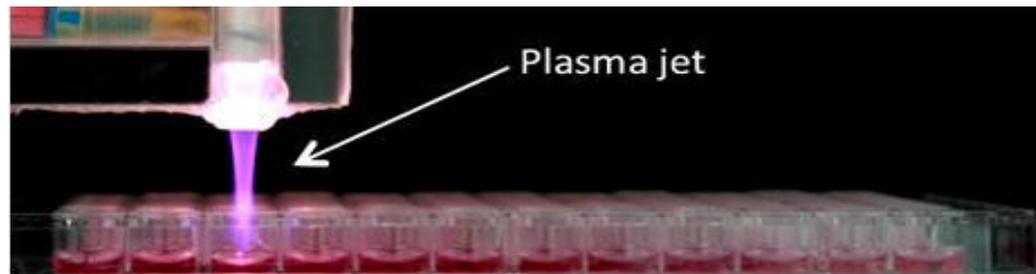
- Utiliser des plasmas pour générer des agents actifs en phase aqueuse ↔ Applications pharmaceutiques
- Associer l'ingénierie des plasmas, la biologie du cancer et la biochimie moléculaire pour identifier, quantifier et optimiser la production des espèces cytotoxiques et génotoxiques générées par plasmas en phase aqueuse.
- Etudes entre (*in-vitro* / *in-vivo*) vers *l'in-vivo*



Traitement du Cancer (PRHE)

Protocole:

- Réalisation de micro-tumeurs à l'ITAV : Sphéroïdes 3D de 400-500 μ m de diamètre, amas de cellules cancéreuses du colon (HTC 116)
- Mise en culture dans un milieu nutritif pour favoriser la croissance des sphéroïdes (comportement volumique et collectif et non surfacique et individuel comme sur des boites de pétri)
- Activation du milieu nutritif par plasma après extraction des sphéroïdes
- Etude du comportement des micro-tumeurs après leur réinjection dans le milieu (0h à 24h) après son activation



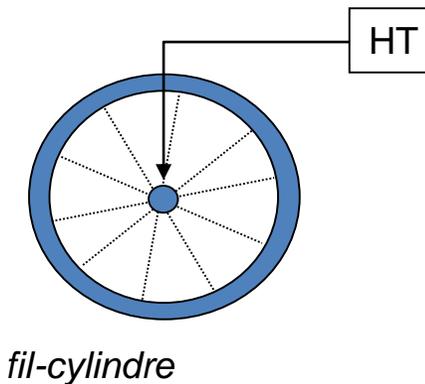
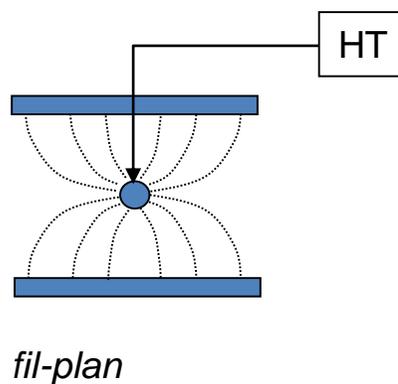
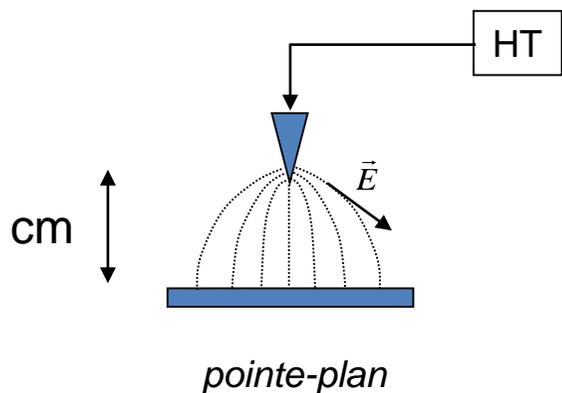
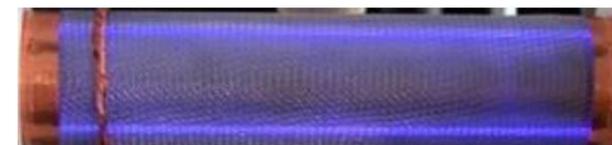
Traitement des effluents gazeux par plasma (O. Eichwald)



Traitement par décharges couronne



Les décharges couronne apparaissent entre 2 électrodes assymétriques. La haute tension est généralement appliquée sur l'électrode présentant le plus faible rayon de courbure (effet de pointe).

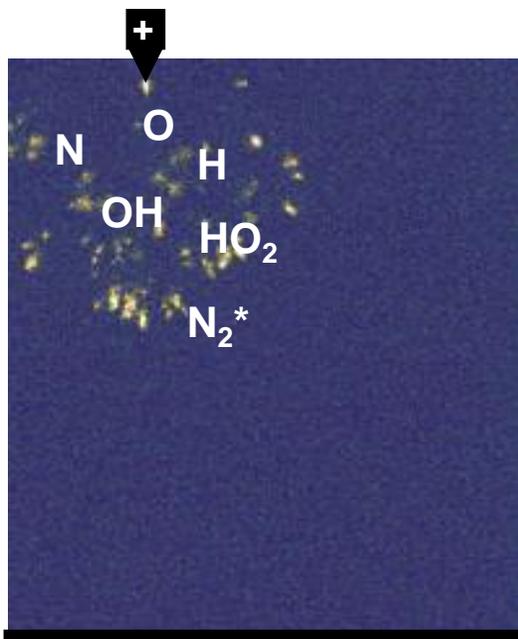


Haute tension (~10kV) : Continue / Pulsée (durée <math><1\mu\text{s}</math>) / Alternative
Courant (10-100mA / décharge) : toujours pulsée (durée ~ 100ns)



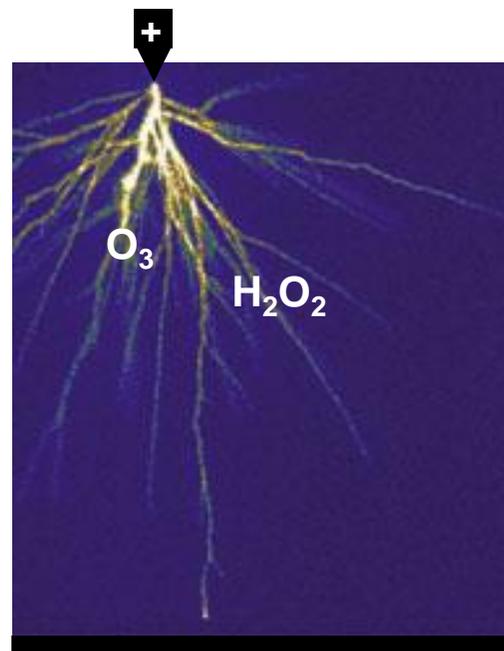
Principes & phénomènes de base

Photographie avec un temps d'ouverture \sim ns



Propagation de paquets d'électrons très énergétiques qui ensemencent le gaz en espèces actives (radicaux primaires et espèces excitées)

Photographie avec un temps d'ouverture \sim μ s



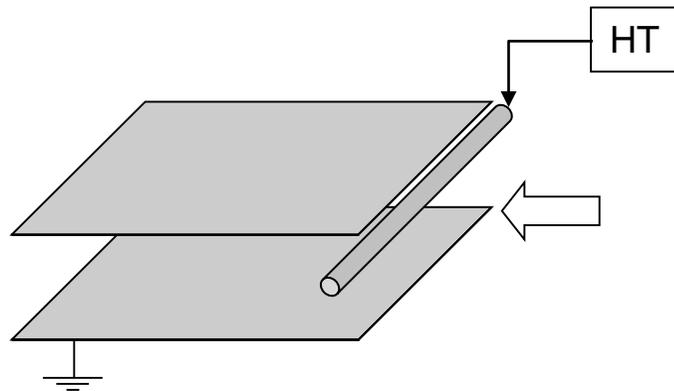
Chimie d'abord localisée dans les canaux ionisés puis qui s'étend à tout le volume du réacteur



Principes & phénomènes de base

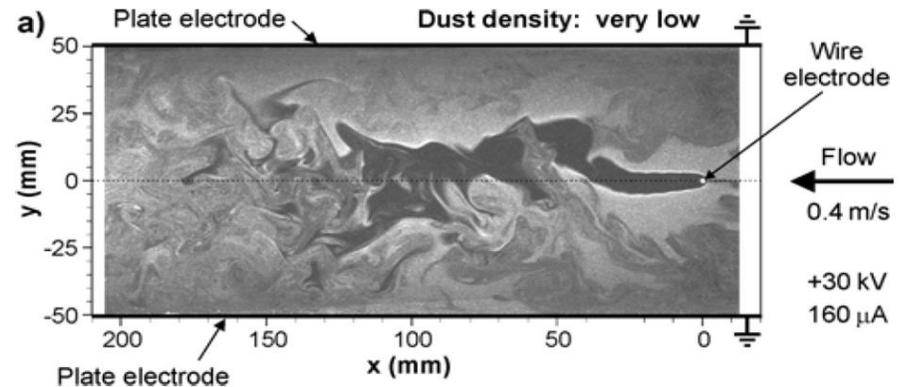
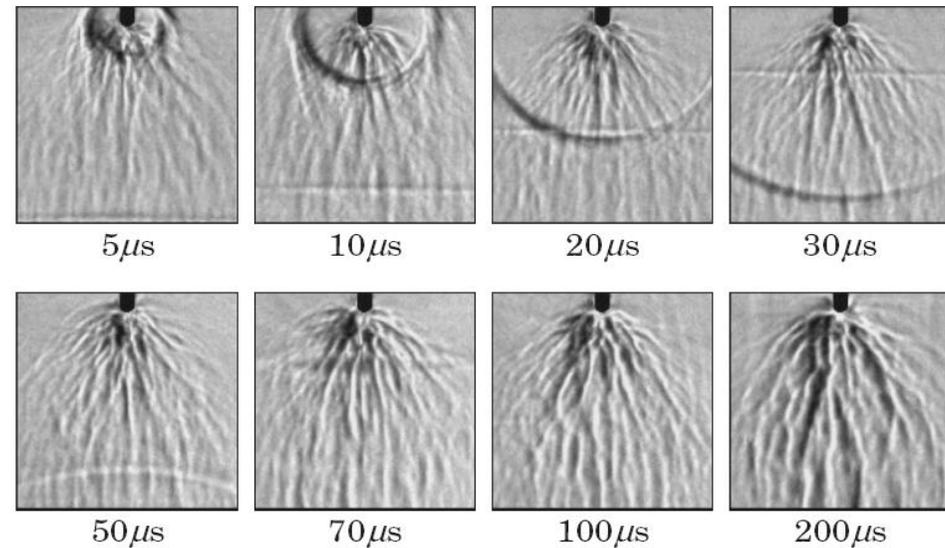
En plus de l'activation chimique du milieu, on observe ...

- Des ondes de choc thermique
- Des échauffement par relaxation des états excités vibrationnels
- Des effets hydrodynamiques



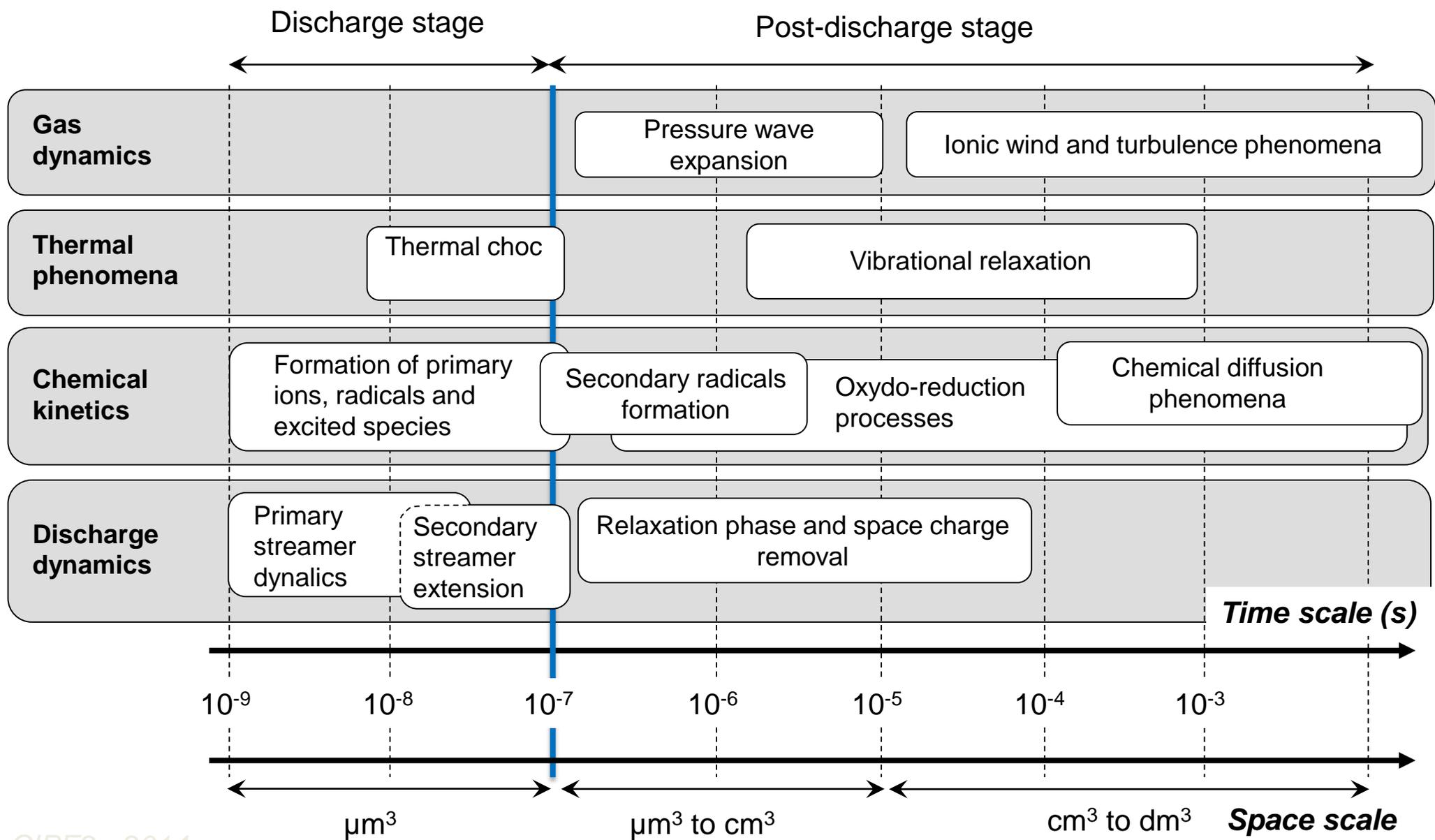
Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43, No. 1 (2004)

R. ONO and T. ODA





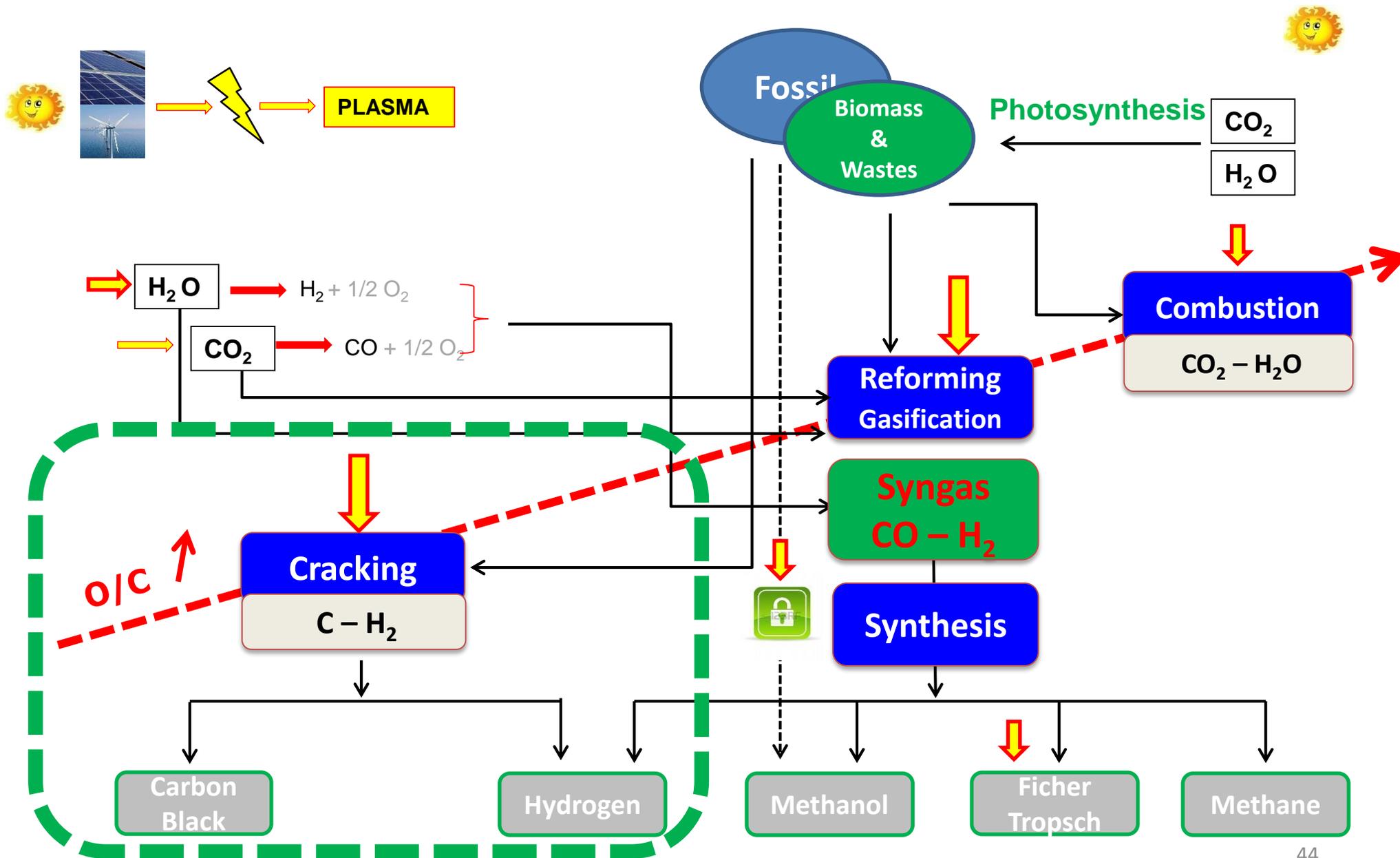
Principes & phénomènes de base



Arcs et Plasmas thermiques

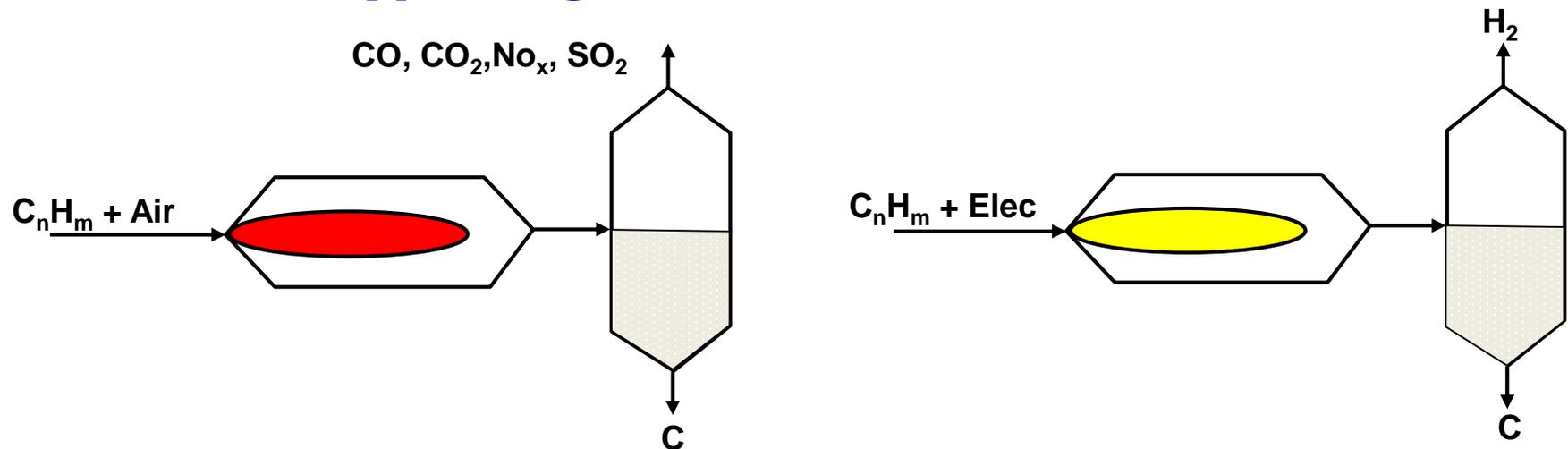
Conversion d'hydrocarbures (L. Fulchéri)

Decarbonation Directe du Méthane
pour la co-production
de Noirs de Carbone & H₂



Principe – Enjeux

- $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$
- Remplacement d'une combustion incomplète par la décomposition thermique du Méthane en CB & H_2
- **Zéro CO_2**
- **100% conversion**
- **Co synthèse de 2 produits valorisables**
- **Nouveaux types / grades de CB**



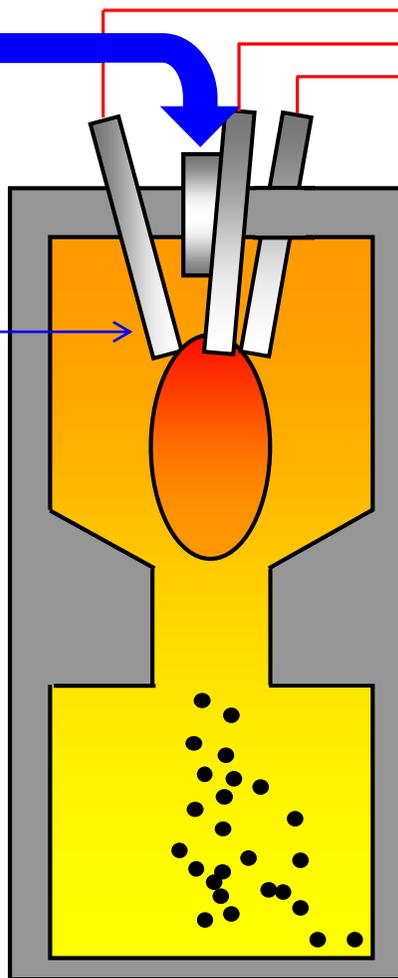
3-phase AC arcs

Gaz Plasma : H_2

AC - electric
power source

Electrodes chaudes
graphite consommable

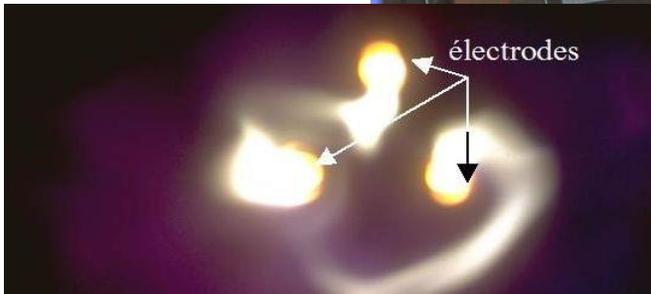
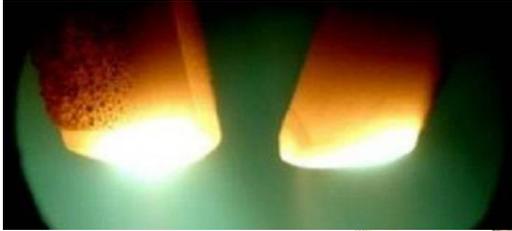
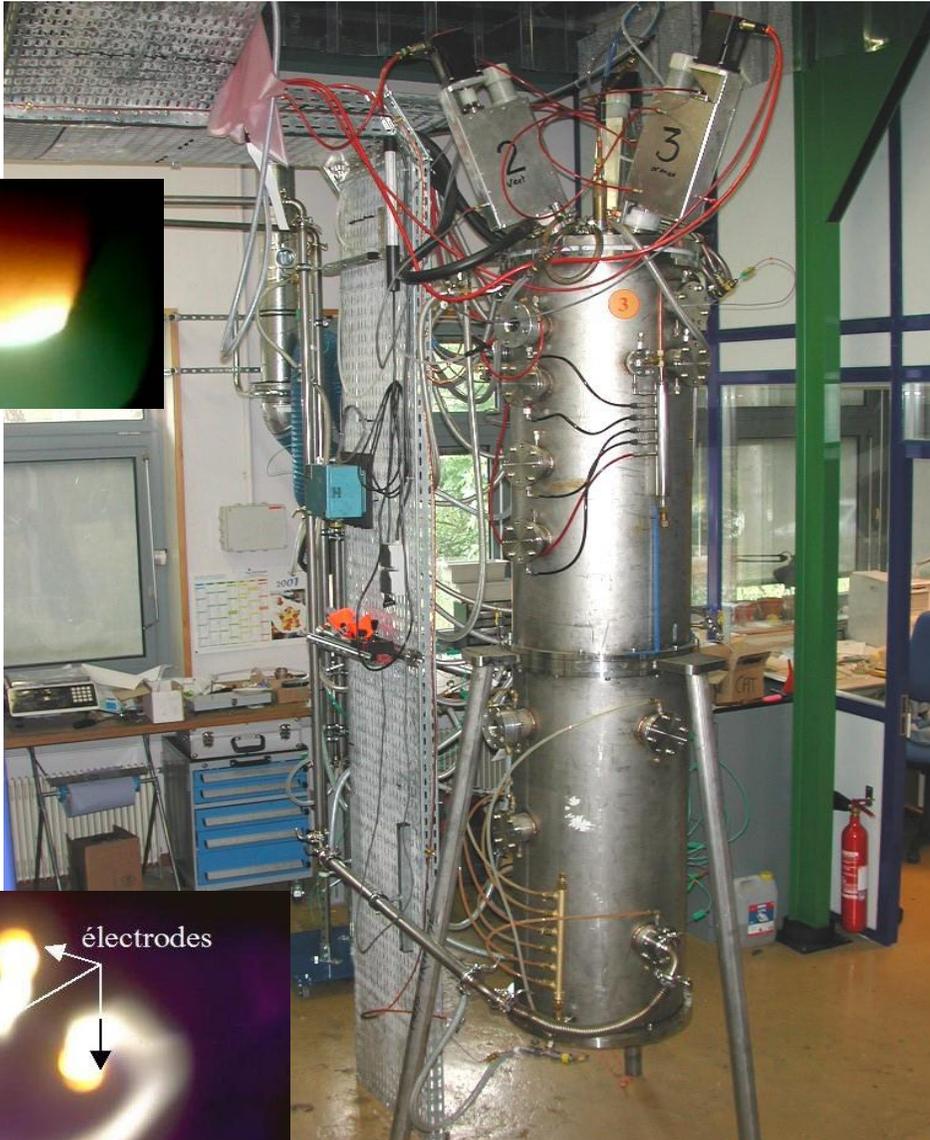
CH_4



Ralenti x 500

Filtre

Réacteur Plasma



Puissance : 250 kW

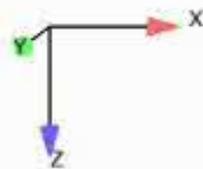
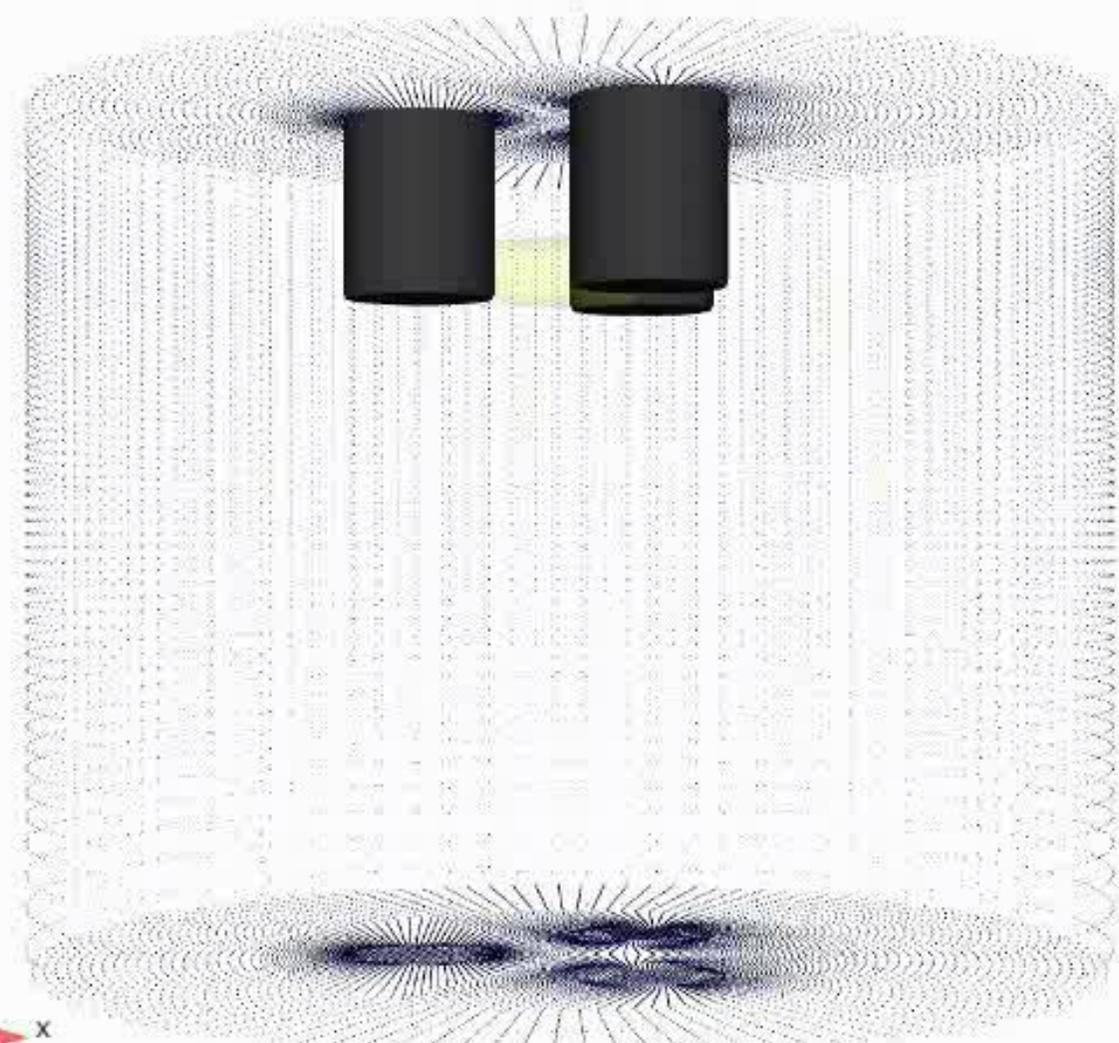
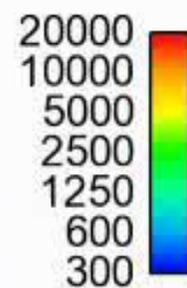
Capacité : 20 kg/h

Lining : graphite

Diagnostics

- U, I, P
- Pyrométrie IR
- Spectroscopie EOS
- Calorimétrie
- Capteurs mobiles T
- GC, GC-MS, IR
- Camera Ultra Rapide

Temperature (K)



Time = 2.000e-005 s

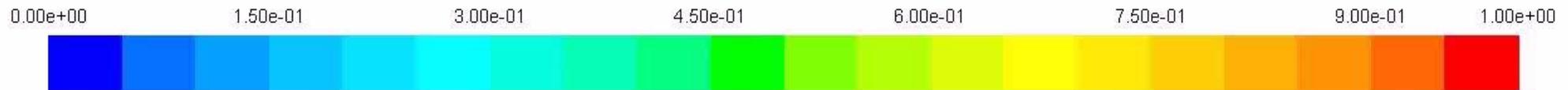
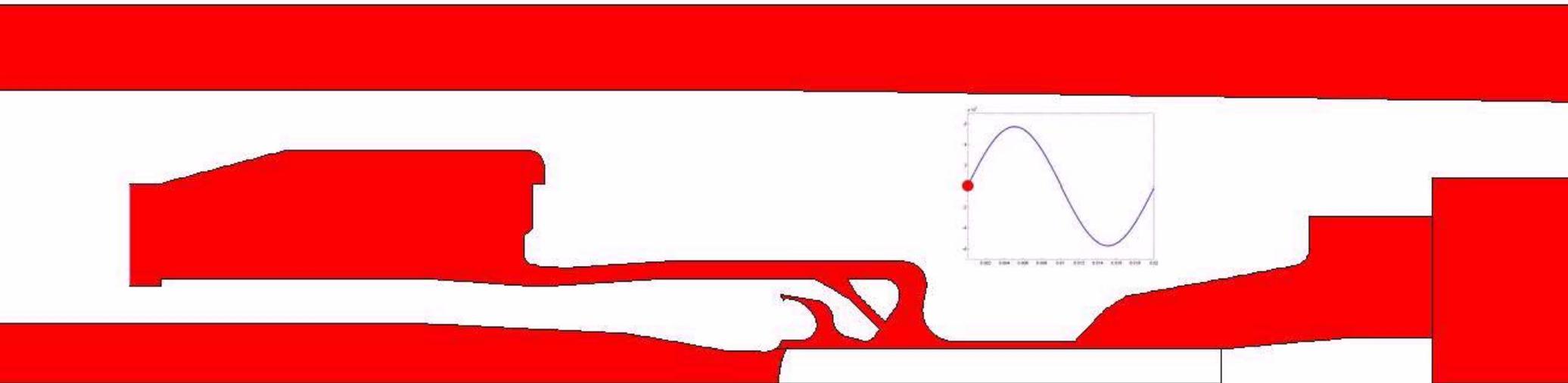
Résultats

- Démonstration de la faisabilité de produire une large gamme grades CB commerciaux a partir du Gaz Nat
 - 100% conversion
 - $50 < \text{BET} < 120$
 - $90 < \text{DBP} < 250$
- Covering a wide range of industrial CB grades
- La technologie plasma 3-phase AC est particulièrement adaptée vs (DC, ICP, MW) en termes de robustesse CAPEX and OPEX

Disjoncteurs

- **Apport des disjoncteurs Fluarc à SF₆ dans l'élimination des arcs électriques lors des coupures des courants de défaut (L. Rafanotsimiva)**
- **Données radiatives pour la modélisation des disjoncteurs haute tension (L. Hermette, AEPPT-LAPLACE)**
- **Modélisation des écoulements dans un disjoncteur haute tension (D. Randrianarivao, AEPPT-LAPLACE)**
 - Modèle 2D
 - Turbulence: modèle « realizable »
 - Rayonnement: modèle hybride P1-DOM
 - Ablation de la buse

Evolution de la fraction de SF₆/C₂F₄

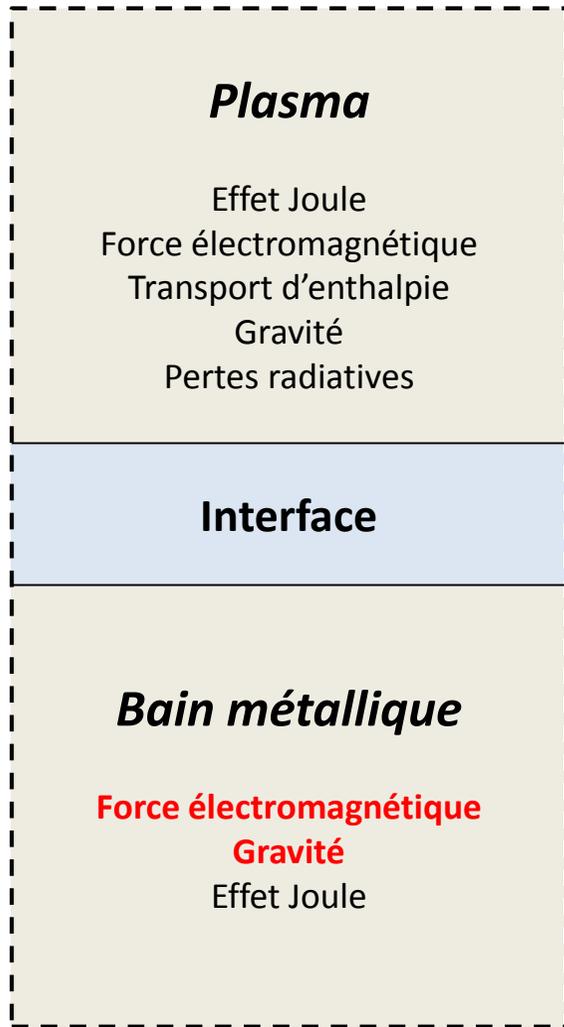


Contours of Mass fraction of sf6 (Time=8.3333e-05)

ANSYS FLUENT 13.0 (axi, dp, pbns, dynamesh, spe, rke, transient)

Autres procédés en plasmas thermiques

- **Projection par voie liquide** (V. Rat)
- **Soudage TIG: modélisation du bain métallique** (J. Mougnot)

Modèle couplé

Plasma : Fluide newtonien/laminaire ETL

Liquide : Fluide newtonien/laminaire

Surface indéformable

3D
Instationnaire

Forces surfaciques

Force de trainée

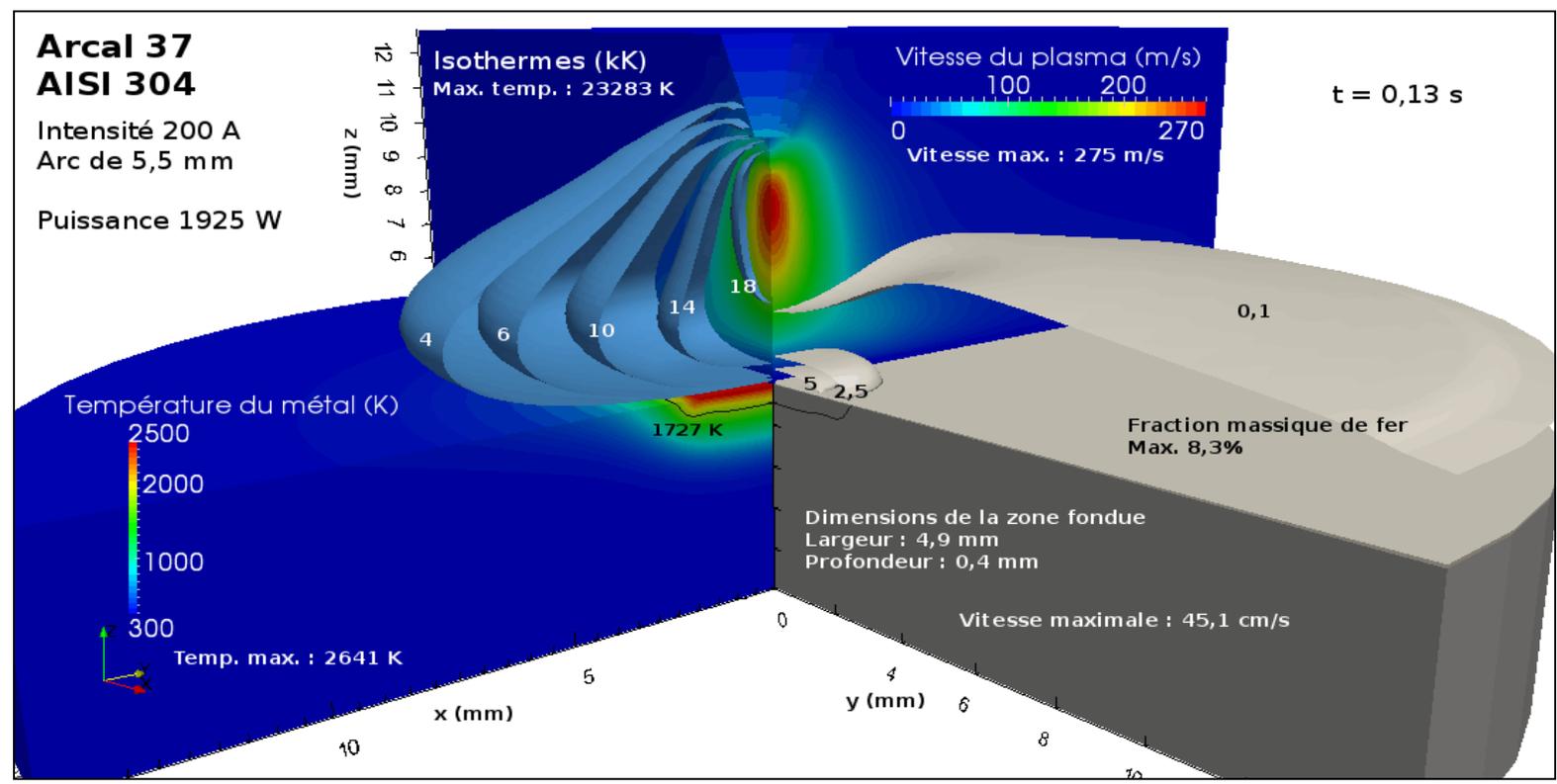
Force de Marangoni

Vapeurs métalliques

$$Y_m = \frac{P_v M_m}{P_v M_m + (P_0 - P_v) M_p}$$

Transfert thermique

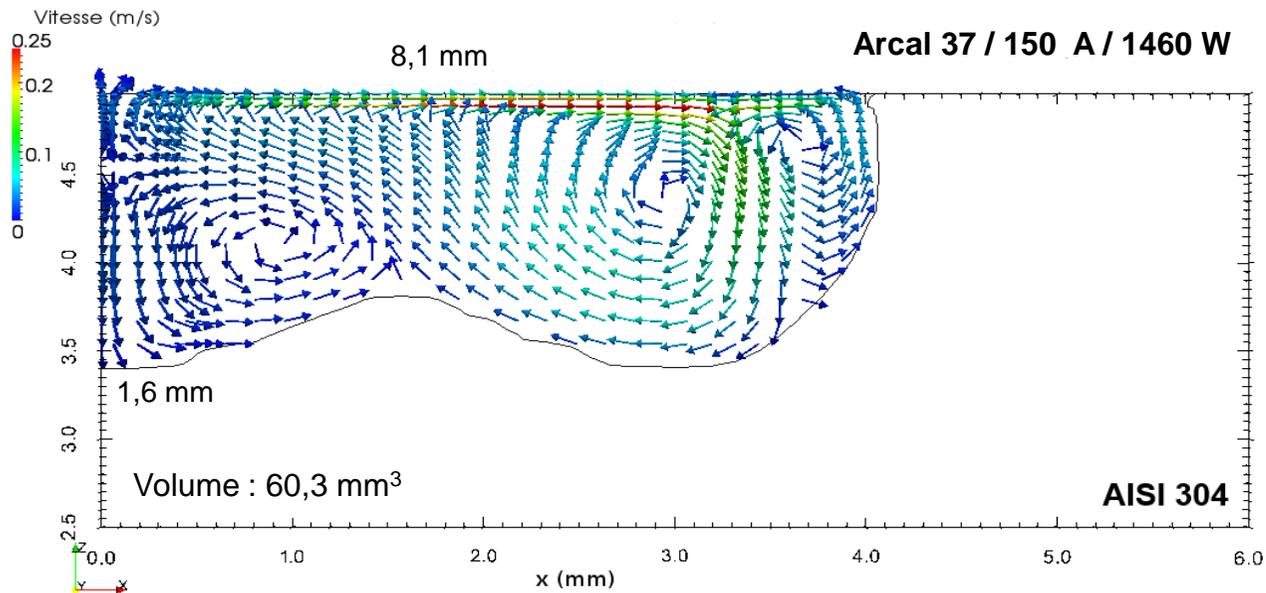
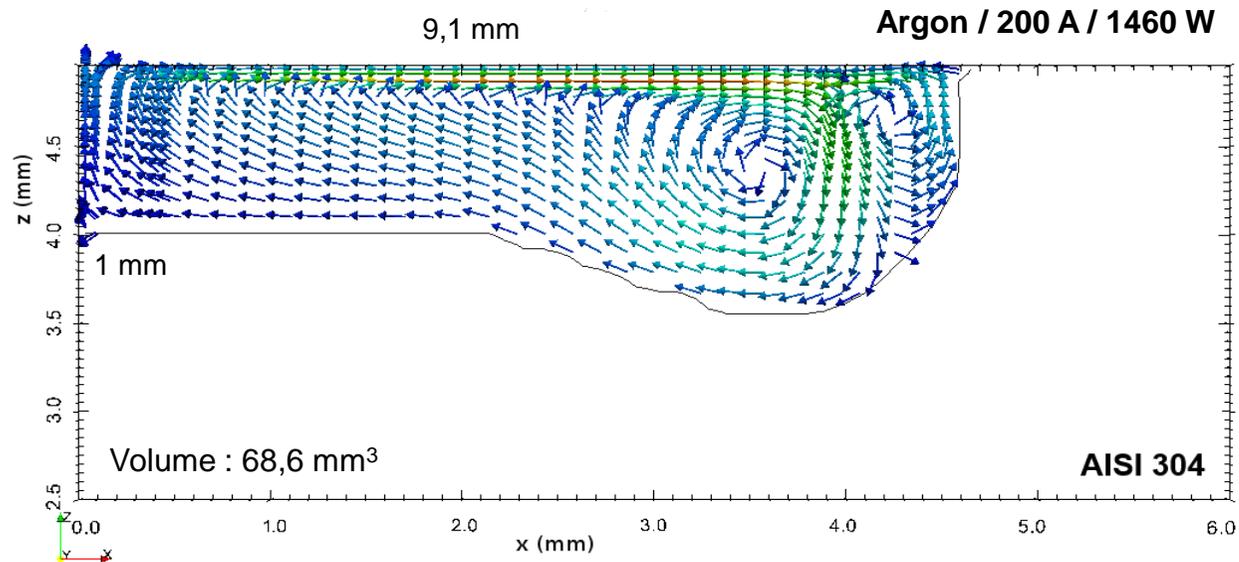
$$q_a = q_{\text{cond.}} + |j_z| \left(\frac{\Phi_a}{e} \right) - L_{\text{mat}} \Phi_v$$



Modélisation des forces

Importance d'une modélisation couplée

Confrontations expérimentales



Dimensions

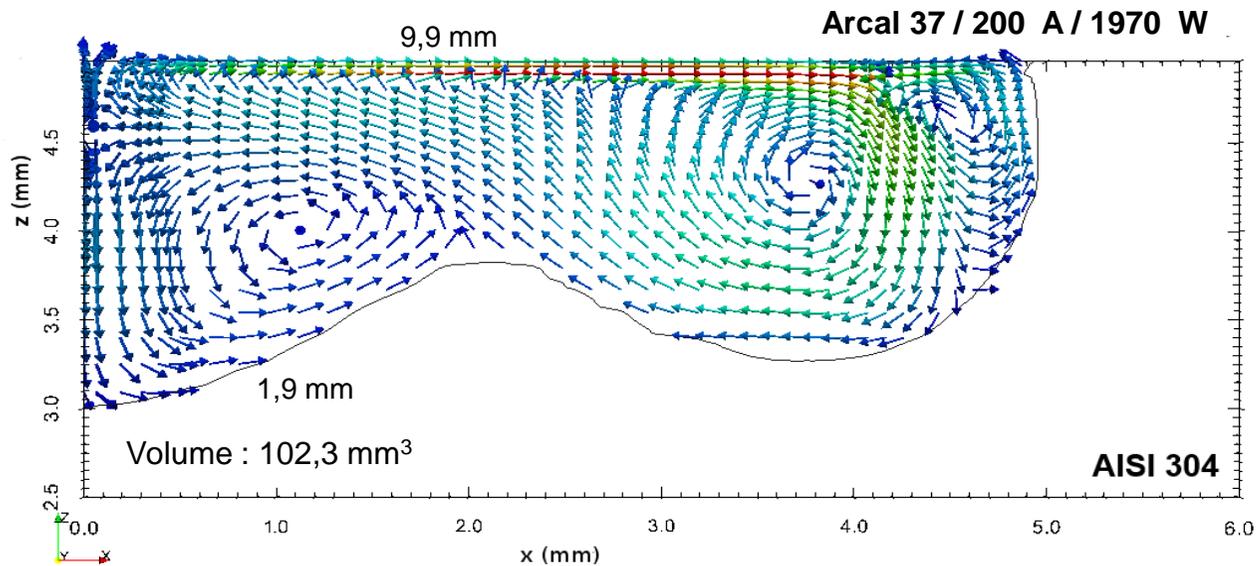
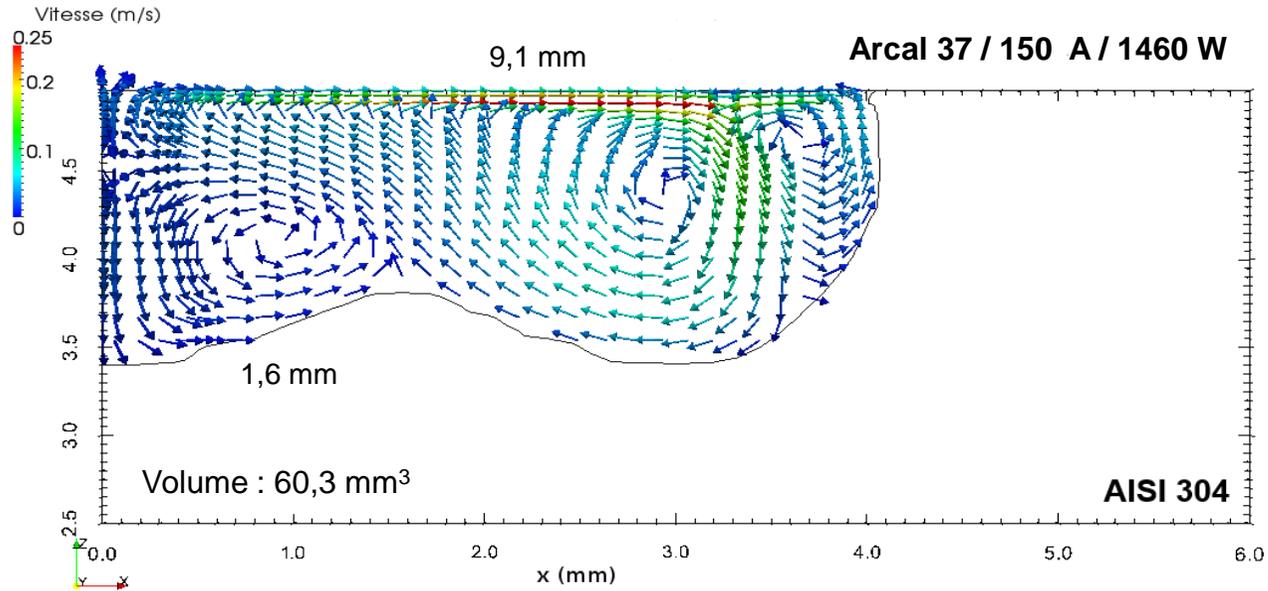
Largeur	-11 %
Profondeur au centre	+60 %
Volume	-12 %

Puissance

Transfert du plasma	-11 %
Effet Joule	Négligeable (0,2 %)

Puissance des forces

Marangoni	+176 %
Gravité	+41 %
Trainée	-66 %
Laplace	+67 %



Dimensions

Largeur	+9 %
Profondeur au centre	+19 %
Volume	+70 %

Puissance

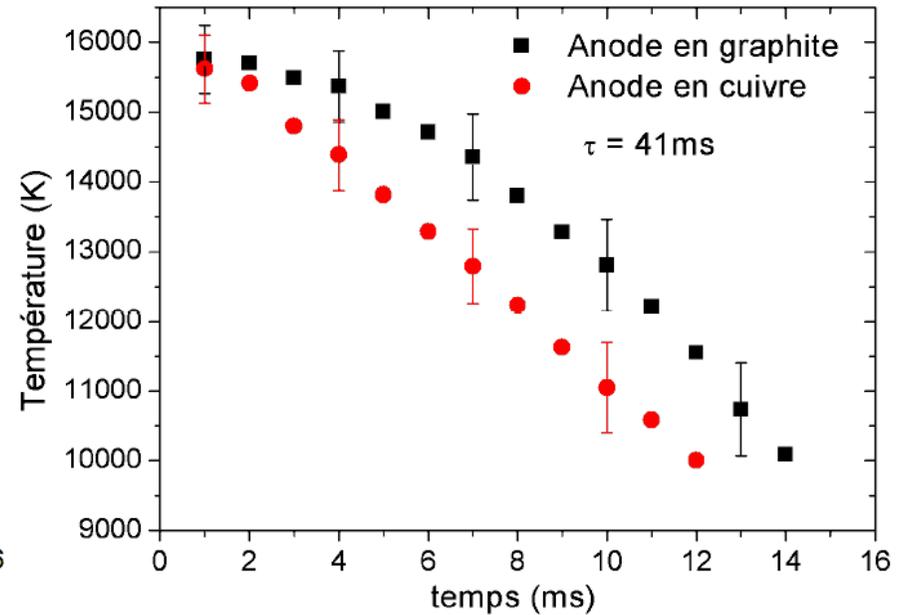
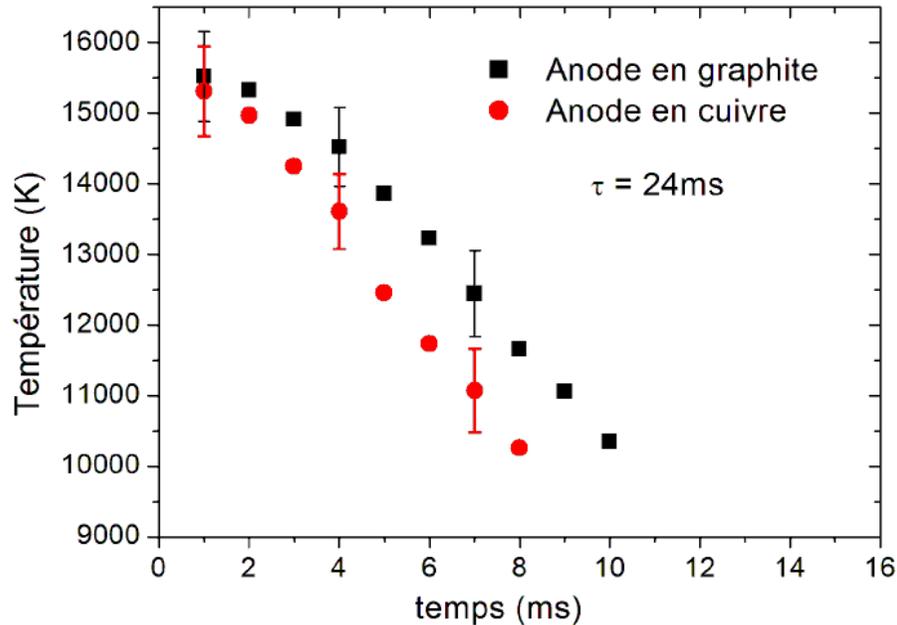
Transfert du plasma	+32 %
Effet Joule	Négligeable (0,2 %)

Puissance des forces

Laplace	+71 %
Gravité	-16 %
Marangoni	+47 %
Trainée	+63 %

Diagnostics des plasmas thermiques

- Spectroscopie et imagerie d'un arc impulsif (F. Valensi)
- Interférométrie, ombroscopie et franges de Moiré (C. de Izarra)



Ecart pour $t > 2\text{ms}$

Autre effet: non-stationnarité de l'arc

La réfractivité des plasmas

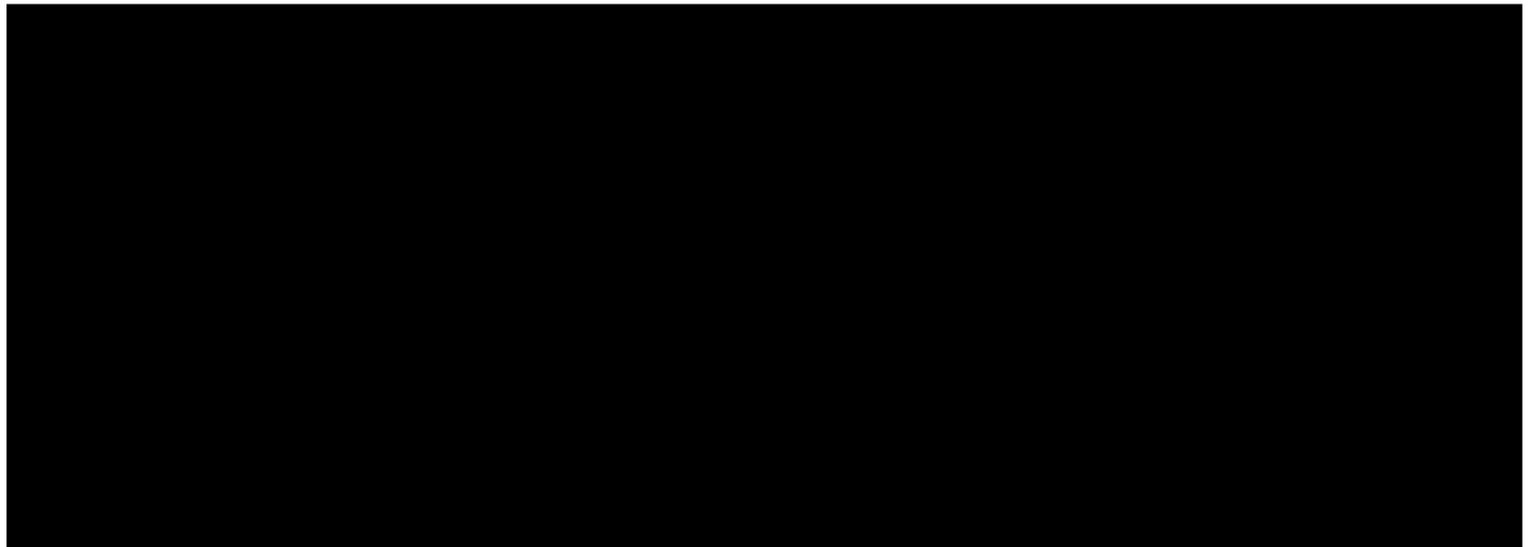
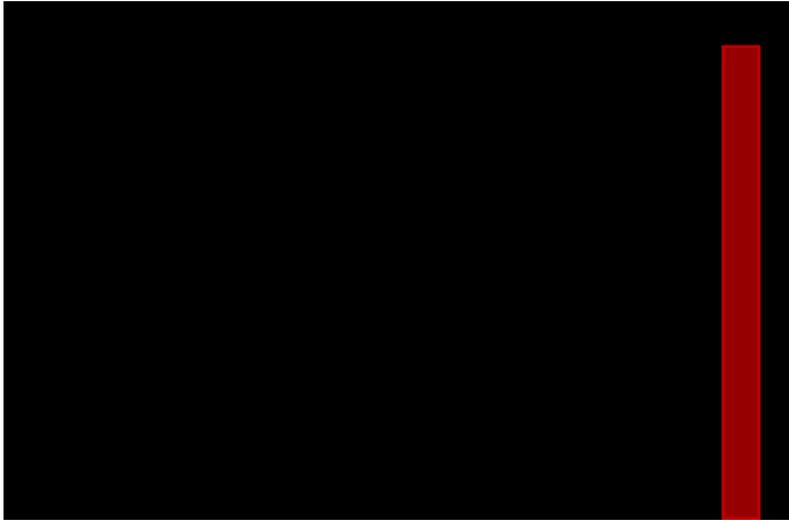
$$(n - 1)_{\text{Plasma}} = \underbrace{(n - 1)_{\text{Neutres}} + (n - 1)_{\text{Ions}}}_{\text{Lourds}} + (n - 1)_{\text{Electrons}}$$

$$(n - 1)_{\text{Lourds}} = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

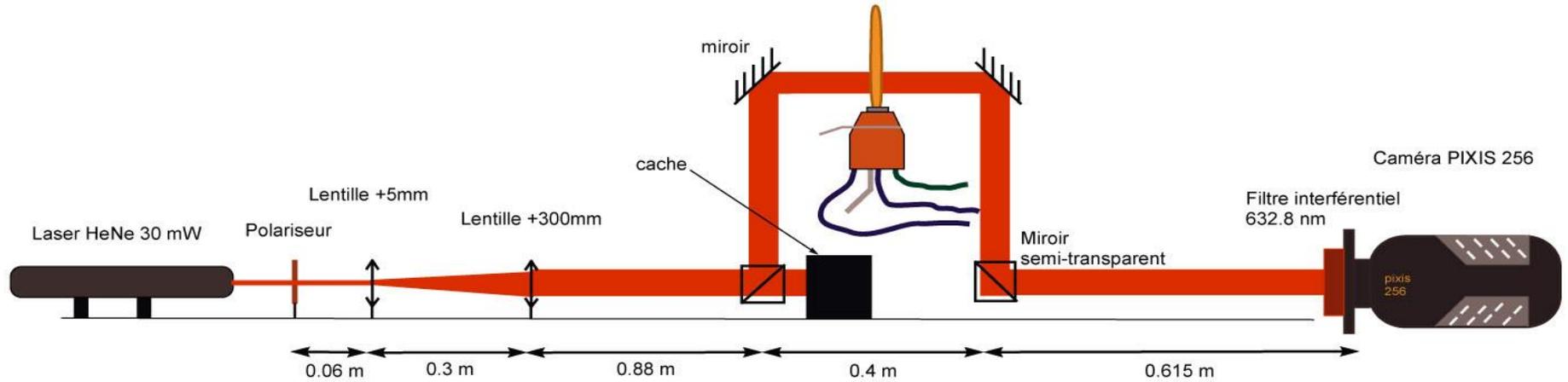
$$(n - 1)_{\text{Lourds}} \propto N$$

$$(n - 1)_{\text{Electrons}} \propto -CN_e \lambda^2$$

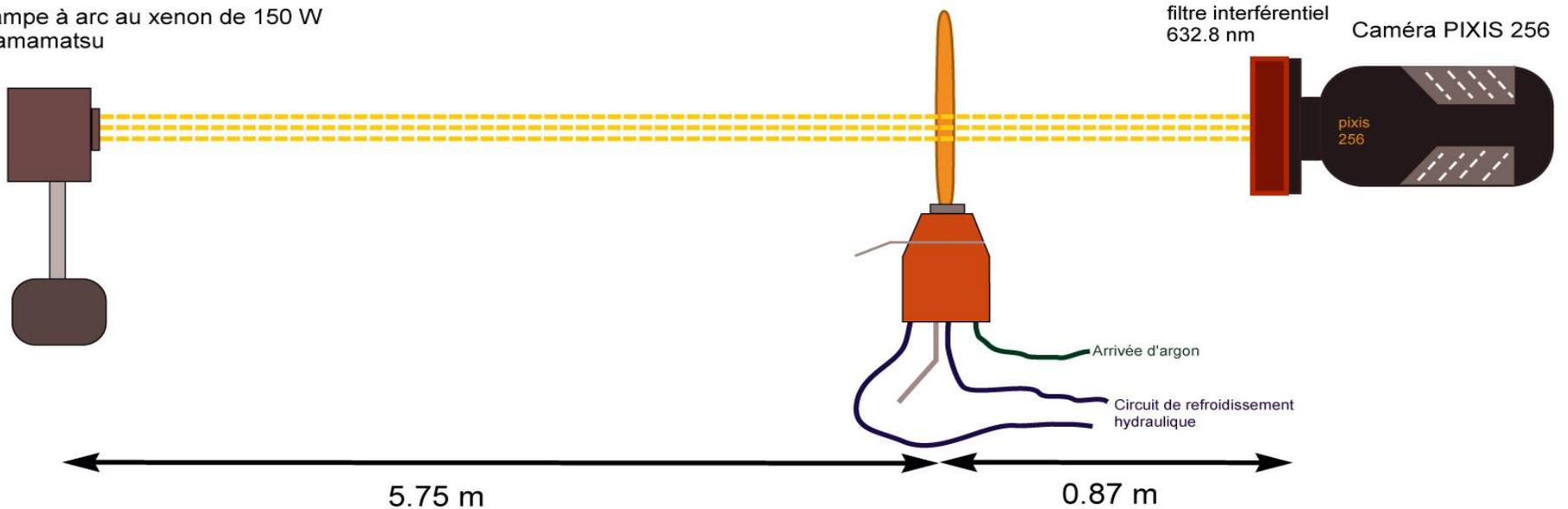
Ombroscopie



Montage



Lampe à arc au xénon de 150 W
Hamamatsu



Température obtenue

