Plasma froid / décharge électrique

Réseau plasma, A.Bourdon et J.Paillol

On peut communiquer de l'Energie à un gaz,
par exemple, en lui appliquant un champ électrique, E (f = q.E)

Si l'amplitude du champ électrique E est suffisante alors :

- Ionisation,
- Avalanche électronique
- Gaz ionisé

Pour appliquer un champ : système d'électrodes métalliques (d)

Pour obtenir le champ suffisant :

- Haute Tension (V)
- Distance inter-électrode réduite (E = V/d)

Plasma froid / décharge électrique

Pour augmenter le volume occupé par le plasma sans passer à l'arc :

Barrières diélectriques

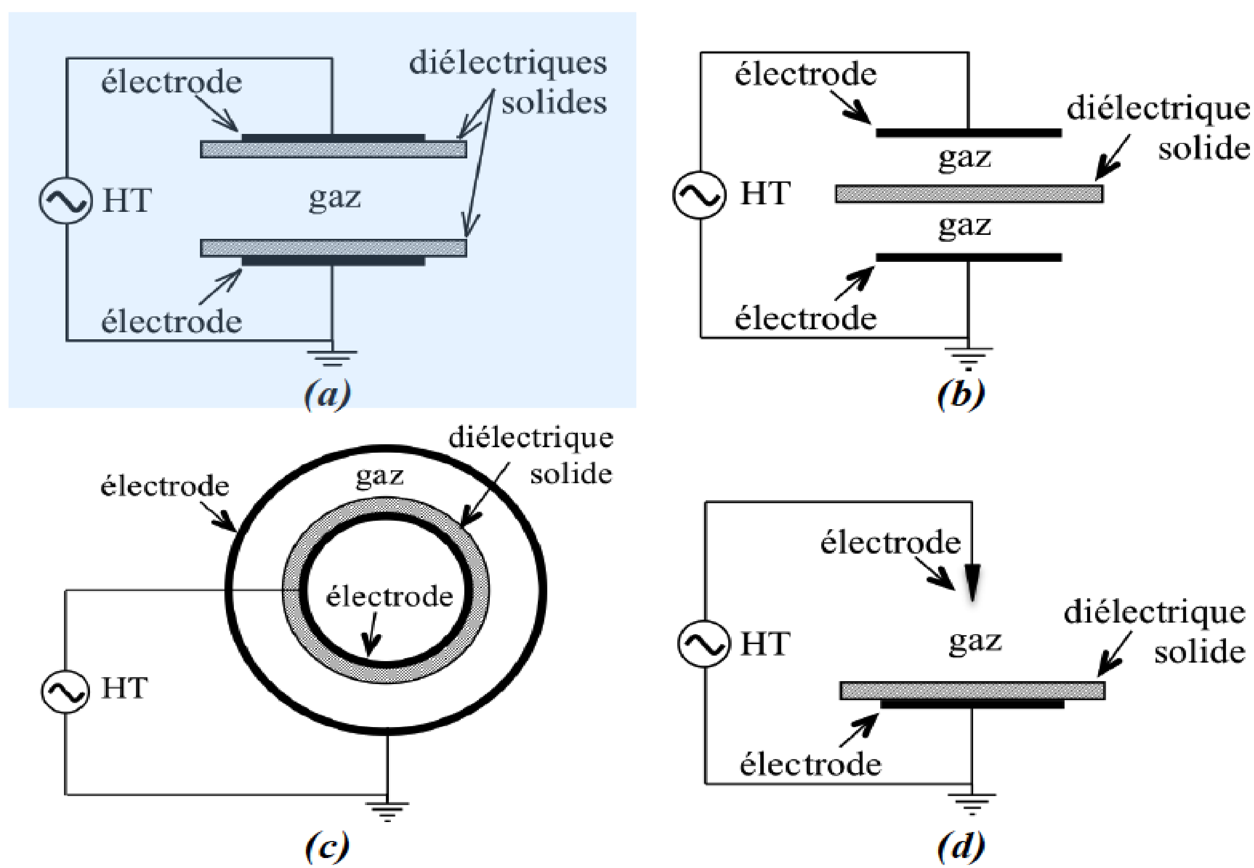
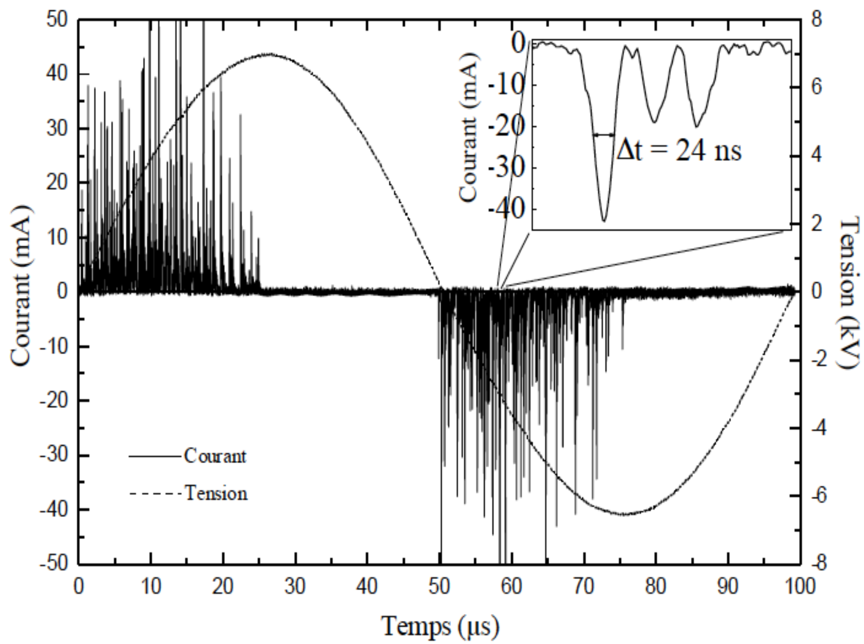
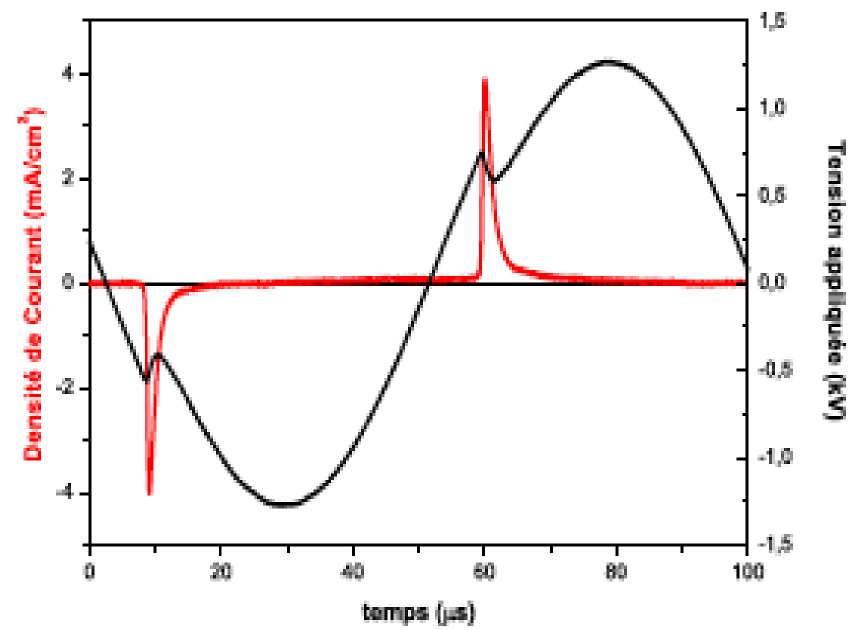


Figure 3 : Différentes configurations de Décharges à Barrières Diélectriques (DBD)

N.Naudé et al - Laplace

Décharges à barrières diélectriques - DBD





DLPA (Hélium)

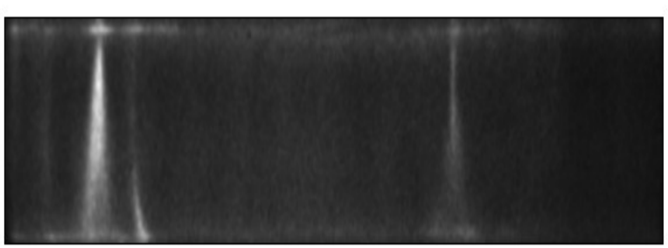
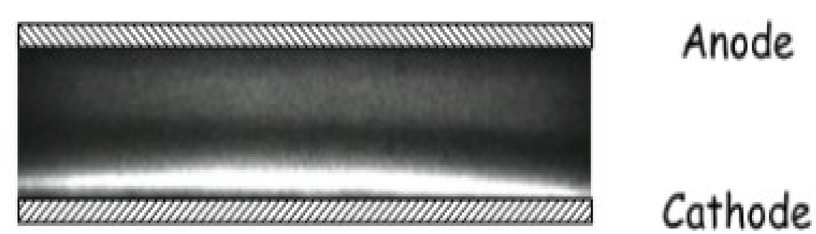


Figure 5 : Photographie rapide avec un temps de pause de 10 ns d'une décharge filamentaire



DLPA (Hélium)

N.Naudé et al - Laplace

Les équations de conservation des plasmas (fluide)

A pression atmosphérique : particules (e, ions) = fluide chargé

$$\frac{\partial N(\vec{r},t)}{\partial t} + \frac{\partial(\vec{V}(\vec{r},t)N(\vec{r},t))}{\partial \vec{r}} = S(\vec{r},t)$$

Attention : V et S sont fonction de E (NL) à chaque instant !

$$\boxed{div.(\vec{D}) = \rho}$$

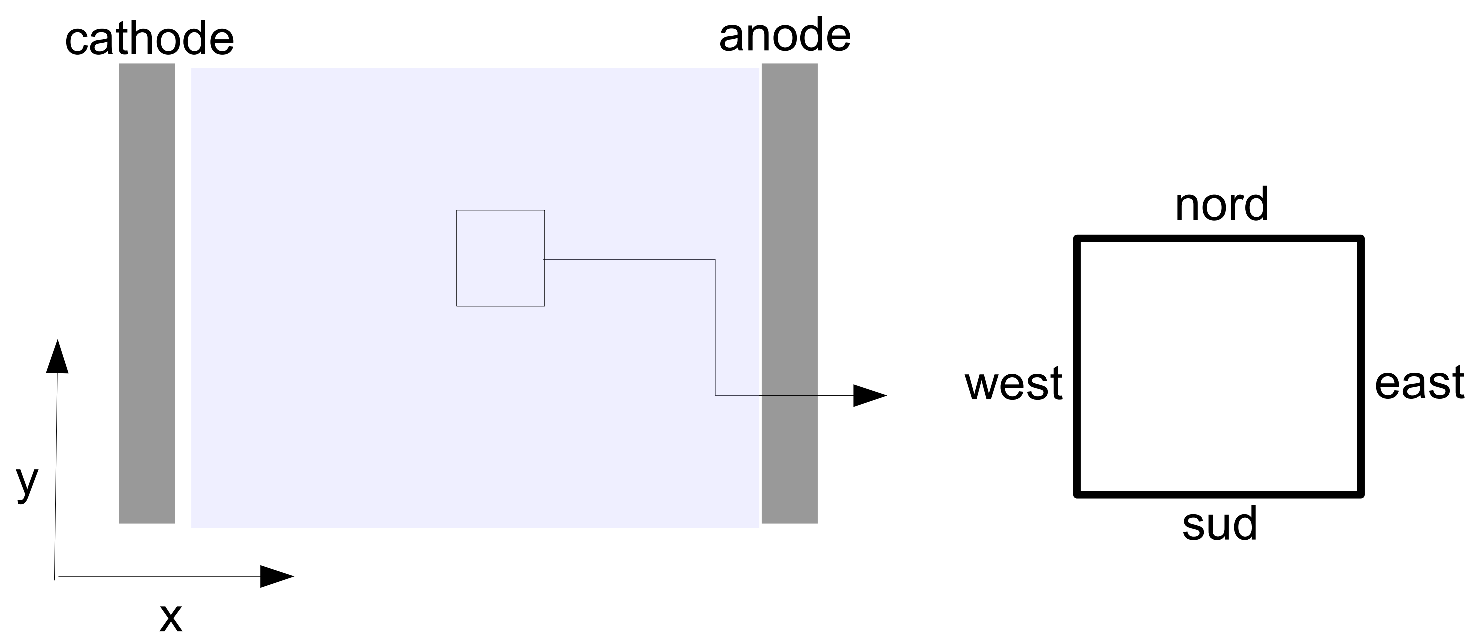
Equation de Poisson $\Delta V = \rho / \epsilon$ à résoudre à chaque instant

Intégration numérique des équations de conservation

$$\boxed{div.(\vec{D}) = \rho}$$

Méthode des volumes finis

Volume de la décharge = Σ de mailles élémentaires

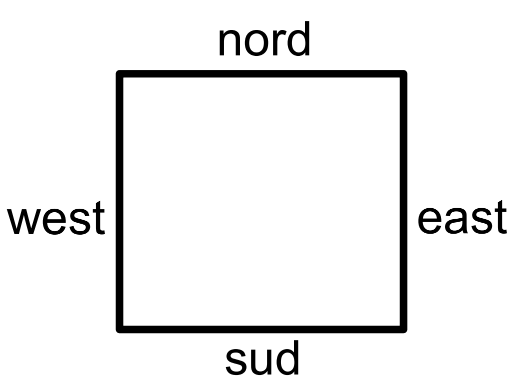


Intégration de l'équation de Maxwell – Gauss sur un volume de contrôle

$$div.(\vec{D}) = \rho$$

$$\iiint_{VC} div.\vec{D}\,dv = \iiint_{VC} \rho\,dv$$

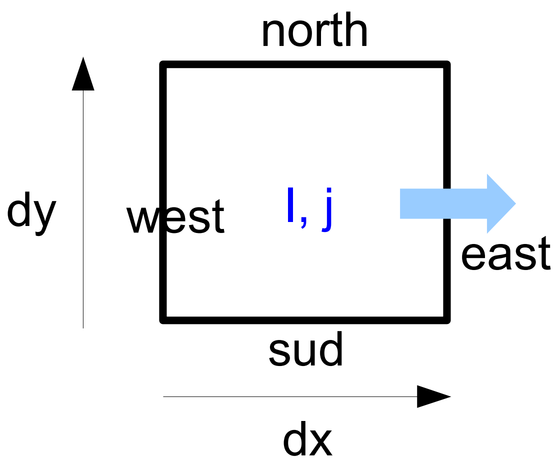
$$\oiint_{S} \vec{D}\,.\,\overrightarrow{dS} = \bar{\rho}\,.\,V_C$$



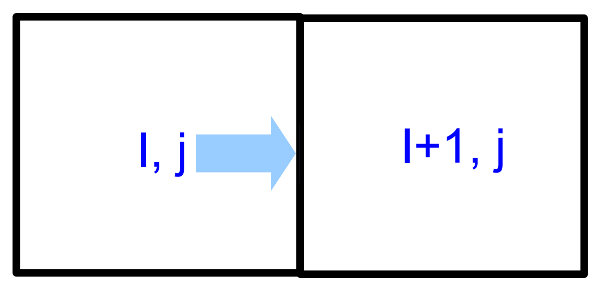
$$\frac{1}{V_C}\Sigma_f D_{N_f}\,.\,S_f = \bar{\rho}$$

Intégration de l'équation de Maxwell – Gauss sur un volume de contrôle

Exemple de calcul de flux sur une face : à l'EST



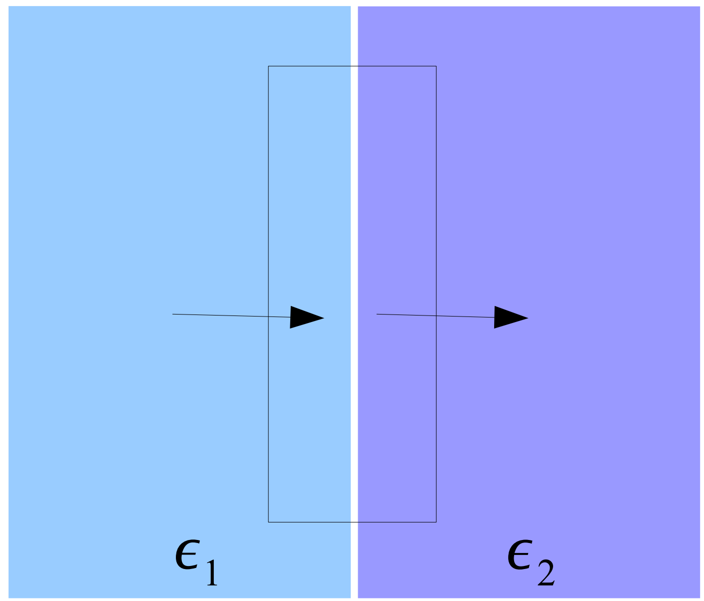
$$flux_e = \frac{1}{dx\,.\,dy}\,\epsilon_{i,j}\,.\,E_{Ne}\,.\,dy$$



$$E_{Ne} = \frac{V_{i+1/2} - V_i}{dx/2}$$

Relation de passage à l'interface de 2 milieux diélectriques

$$\vec{D}_1 = \epsilon_1 . \vec{E}_1$$



$$\vec{D}_2 = \epsilon_2 . \vec{E}_2$$

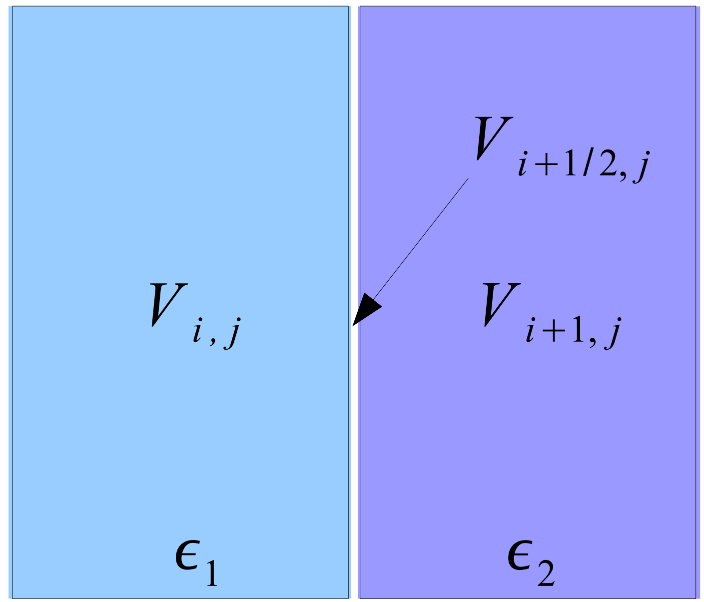
$$\iiint_V div.\vec{D}\, dv = \iiint_V \rho\, dv$$

$$\oiint_S \vec{D} . \overrightarrow{dS} = \bar{\rho} . V$$

$$D_{N1} = D_{N2}$$

Relation de passage à l'interface de 2 milieux diélectriques

$$\vec{D}_1 = \epsilon_1 . \vec{E}_1$$



$$\vec{D}_2 = \epsilon_2 . \vec{E}_2$$

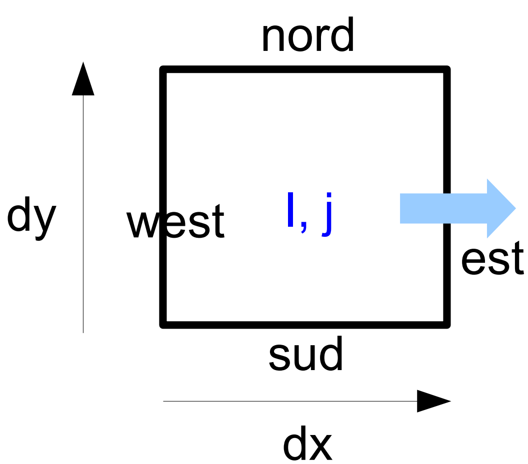
$$D_{N1} = D_{N2}$$

$$\epsilon_{i+1} . \frac{V_{i+1} - V_{i+1/2}}{dx/2} = \epsilon_i . \frac{V_{i+1/2} - V_i}{dx/2}$$

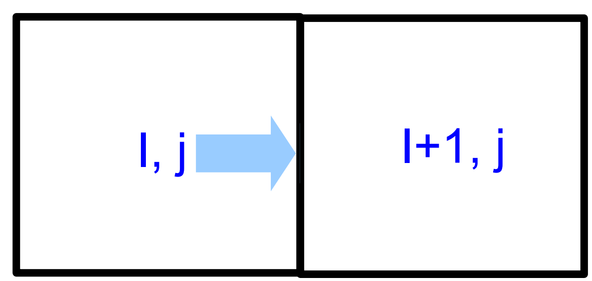
$$V_{i+1/2} = \frac{\epsilon_{i+1}}{\epsilon_i + \epsilon_{i+1}} V_{i+1} + \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + \epsilon_{i+1}} V_i$$

Intégration de l'équation de Maxwell – Gauss sur un volume de contrôle

Exemple de calcul de flux sur une face : à l'EST



$$flux_e = \frac{1}{dx\,.\,dy}\epsilon_{i,j}\,.\,E_{Ne}\,.\,dy$$



$$flux_e = \underbrace{\frac{2.\epsilon_i\,.\epsilon_{i+1}}{dx^{2.}(\epsilon_i+\epsilon_{i+1})}}_{V_{e_{i,j}}}.(V_{i+1}-V_i)$$

Intégration de l'équation de Maxwell – Gauss sur un volume de contrôle

En sommant sur toutes les faces : EST – WEST – NORD - SUD

$$Ve_{i,j}.V_{i+1,j}+Vw_{i,j}.V_{i-1,j}+Vn_{i,j}.V_{i,j+1}+Vs_{i,j}.V_{i,j-1}$$
$$-(Ve_{i,j}+Vw_{i,j}+Vn_{i,j}+Vs_{i,j}).V_{i,j}=\rho_{i,j}$$

Les coefficients Ve, Vw, Vn et Vs sont connus : trouver Vi,j ?

Avant, conditions aux limites :

- Neuman en j=1, et j=ny : $V_N=0$ et $V_S=0$
- Dirichlet en i=1, et i=nx : $E_{Ne}(i,j)=-\dfrac{U_A-V_{i,j}}{dx/2}$

En i = nx, à l'anode, V = U_A et $\rho_{i,j}=-Ve_{i,j}.U_A$

Résolution numérique de l'équation de Laplace

$$Ve_{i,j}.V_{i+1,j}+Vw_{i,j}.V_{i-1,j}+Vn_{i,j}.V_{i,j+1}+Vs_{i,j}.V_{i,j-1}$$

$$-\underbrace{\left(Ve_{i,j}+Vw_{i,j}+Vn_{i,j}+Vs_{i,j}\right)}_{\Sigma_{i,j}}.V_{i,j}=\rho_{i,j}$$

Méthode de relaxation :

Algorithme 16 Sur-relaxation successive (SOR)

Donner un point de départ $x^{(0)} \in \mathbb{R}^n$
for $k = 0, 1, 2, \ldots$ `until` convergence **do**
  for $i = 1 : n$ **do**
    $x_i^{(k+1)} = \omega\, x_{GS,i}^{(k+1)} + (1-\omega) x_i^{(k)}$
  end for
end for

$$V_{i,j}=(1-\omega).V_{i,j}^{old} +$$

$$\left(Ve_{i,j}.V_{i+1,j}+Vw_{i,j}.V_{i-1,j}+Vn_{i,j}.V_{i,j+1}+Vs_{i,j}.V_{i,j-1}-\rho_{i,j}\right).\overbrace{\omega/\Sigma_{i,j}}^{Vc_{i,j}}$$