



HAL
open science

Modèle d'une décharge glissante pour l'étude de son alimentation

Jean-Philippe Salanne, Hubert Piquet, Henri Foch, Laurent Fulcheri

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Salanne, Hubert Piquet, Henri Foch, Laurent Fulcheri. Modèle d'une décharge glissante pour l'étude de son alimentation. *Electronique de Puissance du Futur* 2004, Sep 2004, Toulouse, France. hal-02517156

HAL Id: hal-02517156

<https://hal.science/hal-02517156>

Submitted on 24 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modèle d'une décharge glissante pour l'étude de son alimentation

JP. Salanne¹ - H. Piquet¹ - H. Foch¹ - L. Fulcheri²

¹ Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle
Unité Mixte de Recherche INPT-ENSEEIH / CNRS
BP 7122 - 2 rue Camichel - 31071 TOULOUSE Cedex 7 - France

² Ecole des Mines de Paris, Centre d'énergétique, Equipe Energétique, Matériaux et Procédés
BP 207 F-06904 Sophia Antipolis Cedex, France

I. DISPOSITIF ETUDIE

Le dispositif étudié est un réacteur chimique qui permet le traitement de gaz par une décharge électrique. Ce type d'équipement est aussi connu sous le nom de « glidarc » [4].

La *figure 1* représente le dispositif qui doit être alimenté par le convertisseur ; il s'agit donc d'une décharge point/plan se développant dans un flux de gaz. Notre objectif est la mise au point d'alimentations performantes pour cet équipement, dont nous présentons ici un modèle.

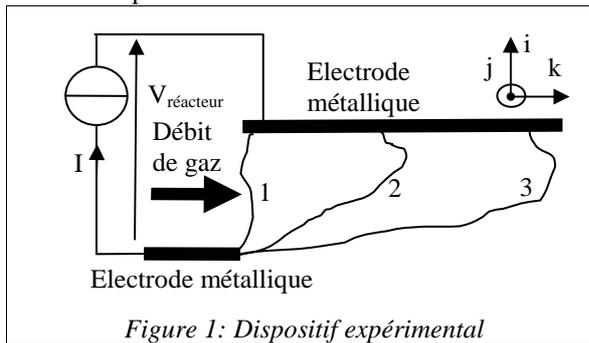


Figure 1: Dispositif expérimental

Une particularité de ce dispositif est la variation périodique au cours du temps de la tension, en fonction du débit de gaz et du courant qui circule dans la décharge. Pour un courant de décharge fixé par l'alimentation, le souffle déplaçant les particules ionisées, l'arc, créé en 1, s'allonge (zone 2) jusqu'à atteindre la zone 3 : un second arc court se reforme (en 1) à l'entrée du dispositif éteignant celui qui se trouvait en 3. Cela est dû au fait qu'en s'allongeant, la tension à ses bornes croît jusqu'à atteindre (en 3) la tension de claquage de la zone 1.

II PRESENTATION DU MODELE

Le modèle que nous étudions a pour but l'étude du couplage entre le dispositif et son alimentation électrique. Ce modèle doit établir une relation entre la tension aux bornes et le courant traversant la décharge.

A - Variables utilisées

Comme nous cherchons une relation liant la tension au courant, nous utilisons comme variables

d'état la conductivité σ et la densité locale de charges ρ .

$$\vec{I} = (m_+ n_+ + m_- n_-) \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad (1)$$

$$\rho = q(n_+ - n_-) \quad (2)$$

Remarque : Les variables d'état couramment utilisées sont les densités de charges positives (n^+) et négatives (n^-). Les variables que nous utilisons correspondent à un changement de base, puisque la densité locale de charges est égale à la différence des densités de charges positives et négatives (2) et que la conductivité est la somme de ces deux densités pondérées par la mobilité des porteurs (m^+ et m^-) (1).

B - Modèle de gaz liant le champ électrique local et le courant.

Le modèle de gaz qui est proposé ici est un modèle macroscopique [3].

On pose l'équation (3) dans l'espace pour évaluer la conductivité locale σ ; (4) correspond au phénomène de conduction.

$$\tau \frac{d\sigma}{dt} = k \|\vec{I}\| + k' \|\vec{I}\|^2 - \sigma \quad (3)$$

$$\vec{I} = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

Dans (3) le terme proportionnel à $\|\vec{I}\|$ (courant local) est la somme du terme de création de charges dû à l'avalanche électronique et du terme de disparition par conduction [1]. Le second terme, proportionnel à $\|\vec{I}\|^2$ dépend de l'énergie apportée dans la décharge [2]. Le dernier représente la quantité disparaissant par recombinaison [1].

Le courant local \vec{I} est proportionnel à la conductivité locale σ et au champ local \vec{E} (4).

C - Densité de charge

La variation de la quantité de charges en un volume dv , est un bilan des courants entrants et sortants de ce volume.

$$\frac{d\rho}{dt} = I \quad (5)$$

D - Calcul du champ électrique local

L'expression (6) permet de calculer le champ local, connaissant la répartition de densité de charge ρ .

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho}{r^2} \vec{u}_r \, dr \quad (6)$$

E - Flux de gaz

L'écoulement du gaz dans le système est considéré comme homogène et uniforme. Il transporte les particules dans l'espace de la décharge, ce qui influe sur la répartition des particules chargées.

La quantité de charges φ_ρ transférée à travers une surface S, de vecteur normal \vec{n} , est proportionnelle à la quantité de charges ρ locale et à la vitesse du gaz \vec{v} ; η est le facteur d'entraînement. Une relation analogue peut-être établie pour exprimer la variation due au flux de la conductivité locale σ .

$$\varphi_\rho = S \eta \rho \vec{v} \cdot \vec{n} \quad (7)$$

$$\varphi_\sigma = S \eta \sigma \vec{v} \cdot \vec{n}$$

F - Calcul de la tension totale

La tension totale entre les électrodes est calculée (7) en évaluant la circulation de \vec{E} le long du chemin 1 (figure 1).

$$V_{\text{réacteur}} = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (8)$$

II DISCRETISATION DE L'ESPACE

Le lieu de la décharge variant au cours du temps, nous discrétisons l'espace où elle se développe. On repère chaque point du maillage par ses indices (i, k) en considérant la dimension du système selon j comme infinie.

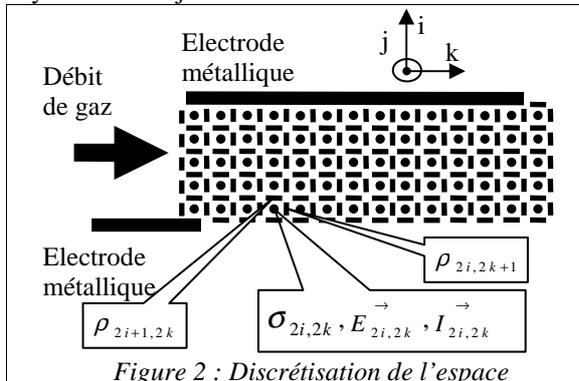


Figure 2 : Discretisation de l'espace

Le champ électrique, la conductivité et les courants locaux sont calculés aux points dont les

deux coordonnées sont paires. On a donc : $I_{2i,2k}$,

$$E_{2i,2k}, \sigma_{2i,2k}.$$

Les densités de charges calculées à l'aide des bilans de courant sont situées aux points $(2i,2k+1)$ et $(2i+1,2k)$. On obtient donc les variables $\rho_{(2^*i)(2^*k+1)}$ et $\rho_{(2^*i+1)(2^*k)}$ comme densités de charges participant à la création du champ.

A - Modèle local de gaz liant le champ électrique et le courant

Les équations (3) et (4) sont discrétisées ((9) et (10)) pour évaluer $\sigma_{2i,2k}$.

$$\tau \frac{d\sigma_{2i,2k}}{dt} = k \left\| I_{2i,2k}^{\rightarrow} \right\| + k' \left\| I_{2i,2k}^{\rightarrow} \right\|^2 - \sigma_{2i,2k} \quad (9)$$

$$I_{2i,2k}^{\rightarrow} = \sigma_{2i,2k} E_{2i,2k}^{\rightarrow} \quad (10)$$

B - Transit des charges

La variation de densité de charge est égale à la différence entre les courants voisins, comme indiqué dans la Figure 3.

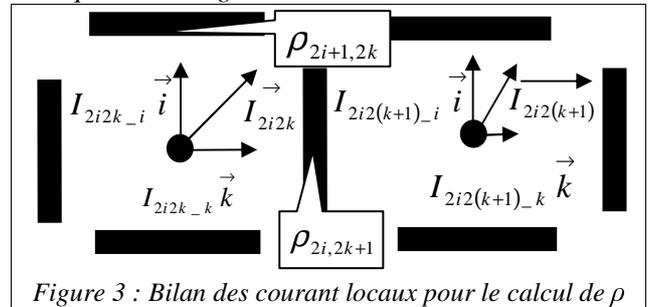


Figure 3 : Bilan des courants locaux pour le calcul de ρ

On calcule avec (11) la répartition des charges locales.

$$\frac{d\rho_{2i+1,2k-}}{dt} = I_{2i,2k-i} - I_{2(i+1),2k-i} \quad (11)$$

$$\frac{d\rho_{2i,2k+1-}}{dt} = I_{2i,2k-k} - I_{2i,2(k+1)-k}$$

C - Calcul de \vec{E}

Considérant la répartition de charge ρ , on utilise la relation (6) pour déterminer le champ électrique local. On décompose le vecteur $E_{2i,2k}$ selon ses composantes selon \vec{i} et \vec{k} et on note i_e, k_e les coordonnées de la charge $\rho_{i_e k_e}$. Cela nous permet de calculer les composantes du champ électrique créé au point $2i,2k$ par cette charge à l'aide de (12).

$$E_{2i,2k}^{\rightarrow} = \frac{\rho_{i_e k_e}}{4\pi\epsilon_0} \frac{(i - i_e)\vec{i} + (k - k_e)\vec{k}}{\left((i_e - i)^2 + (k_e - k)^2 \right)^{1.5}} \quad (12)$$

La relation (10) permettra ensuite le calcul des courants locaux. Le calcul de la distribution spatiale du champ $[\vec{E}]$ à partir des charges $[\rho]$ est mené de manière matricielle. Les matrices de passages sont constantes et évaluées une seule fois après la construction du maillage.

D - Flux de gaz

Le flux de gaz étant colinéaire à \vec{k} , la quantité de charges $\varphi_{\rho_{-ik}}$ évaluée par (7) quitte le point i,k , et est entraînée au point $i,k+2$.

Cette quantité est retranchée aux charges du point i,k à chaque instant et ajoutée, après un temps de transfert, aux de charges du point $i,k+2$. Ce temps de transfert est égal au pas de discrétisation, divisé par la vitesse $\|v\|$.

On note $\Phi_{\rho_{-ik}}$ le bilan instantané, au point i,k , des charges partant de ce point et arrivant du point $i,k-2$ (13).

$$\Phi_{\rho_{-ik}}(t) = \varphi_{\rho_{-i(k-2)}} \left(t - \frac{pas}{\|v\|} \right) - \varphi_{\rho_{-ik}}(t) \quad (13)$$

On complète alors (11) qui devient (14). En utilisant le même raisonnement pour la conductivité, (9) devient (15).

$$\frac{d\rho_{2i+1,2k}}{dt} = I_{2i,2k-i} - I_{2(i+1),2k-i} + \Phi_{\rho_{2i+1,2k}} \quad (14)$$

$$\frac{d\rho_{2i,2k+1}}{dt} = I_{2i,2k-k} - I_{2i,2(k+1)-k} + \Phi_{\rho_{2i,2k+1}}$$

$$\tau \frac{d\sigma_{2i2k}}{dt} = k \left\| I_{2i2k}^{\rightarrow} \right\| + k \left\| I_{2i2k}^{\rightarrow} \right\|^2 - \sigma_{2i2k} + \Phi_{\sigma_{-2i2k}} \quad (15)$$

E - Calcul de la tension totale

Dans l'environnement discrétisé, nous utilisons l'équation (16), qui réalise l'intégration de (8) par le chemin 1 de la figure 1, pour calculer la tension totale.

$$V_{réacteur} = pas \times \sum_{i=1}^{i=i_{fin}} E_{2i,1-y} \quad (16)$$

III SIMULATION

Afin d'évaluer le modèle proposé, une simulation test est effectuée. Ce type de dispositif devant être alimenté en courant, nous utilisons une source de courant parfaite de 1 Ampère pour ce test. Géométriquement, ce dispositif a une taille de 1cm de haut de de 10 cm de large.

A l'issue de cette simulation, effectuée sous Matlab/Simulink, nous examinons les variables externes au dispositif (tension, courant) ainsi que les variables internes (courant locaux, conductivité locale).

A - Courbe tension périodique

Comme présenté en introduction, la tension aux bornes du dispositif présente une composante périodique.

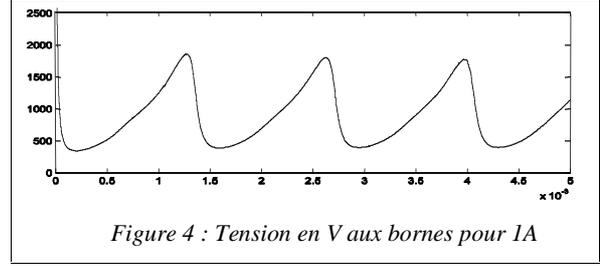


Figure 4 : Tension en V aux bornes pour 1A

On constate une basse fréquence sur la tension à une fréquence de 800Hz.

B - Variation des courant locaux

L'examen des grandeurs locales (I et ρ) à différents instants permet d'expliquer ce phénomène et d'observer le comportement décrit qualitativement à la figure 1.

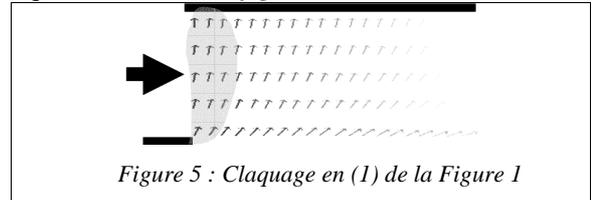


Figure 5 : Claquage en (1) de la Figure 1

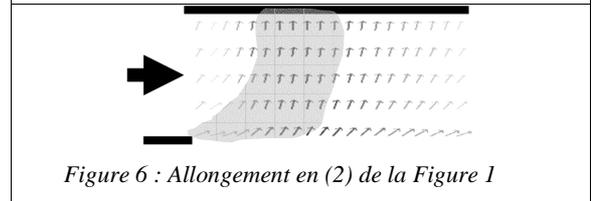


Figure 6 : Allongement en (2) de la Figure 1

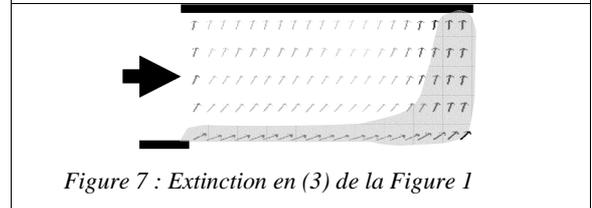


Figure 7 : Extinction en (3) de la Figure 1

On vérifie bien, en observant les courants locaux dans le temps et l'espace, que les charges créées à gauche dans le dispositif migrent dans le sens de l'écoulement de gaz, ce qui provoque une remontée de la tension (baisse de la conductivité vue des bornes) et entraîne un nouveau claquage.

Le modèle ayant un comportement qualitativement fiable, nous le comparons à une expérimentation mettant en œuvre une alimentation de courant réelle.

IV EXPERIMENTATION

Le dispositif étudié est traditionnellement alimenté par un redresseur haute tension associé en série avec des résistances de fortes valeurs pour contrôler le courant [5].

Ce type d'alimentation a la particularité d'amener une ondulation à 300Hz sur les variables électriques notamment sur le courant (Figure 9).

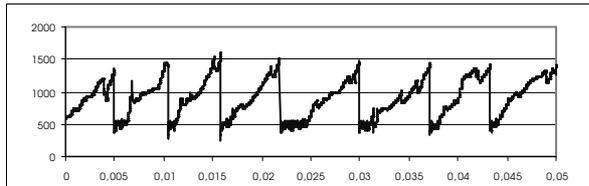


Figure 8 : Tension (V) mesuré aux bornes du dispositif en fonction du temps (sec).

Le courant produit par le générateur subit une décroissance proportionnelle à la croissance de la tension dans le réacteur, suivant la relation (17) :

$$I = \frac{E - V_{\text{réacteur}}}{R} \quad (17)$$

E est la tension à vide du réseau redressé et R la résistance placée en série.

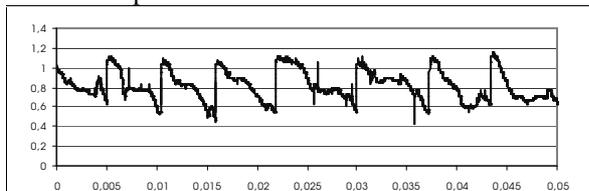


Figure 9 : Courant (A) mesuré traversant le dispositif en fonction du temps (sec).

On peut constater le même phénomène sur une simulation (figure 10) ce qui valide notre modèle.

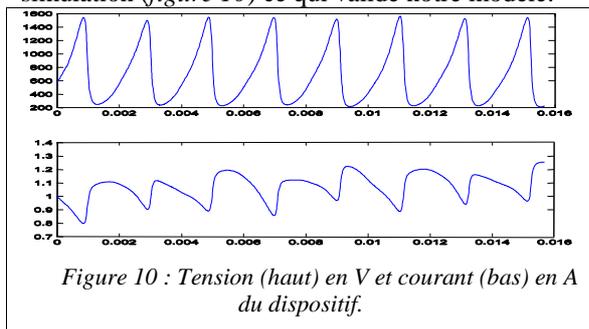


Figure 10 : Tension (haut) en V et courant (bas) en A du dispositif.

Cette première alimentation permet de faire fonctionner le dispositif mais le contrôle du courant est assez sommaire et le rendement est déplorable. En effet, le courant est imposé par la valeur de la résistance série qui ne peut varier en cours de fonctionnement.

Afin de palier cet inconvénient, nous étudions une alimentation électronique contrôlant directement le courant.

IV ALIMENTATION EN COURANT

Nous évaluons la structure de principe suivante :

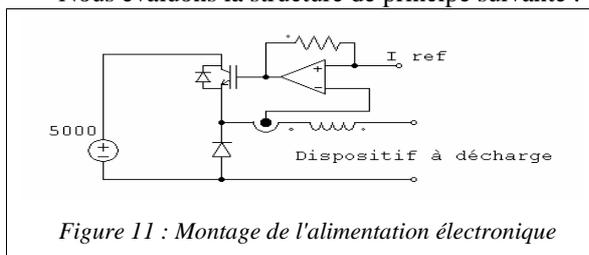


Figure 11 : Montage de l'alimentation électronique

La régulation de courant par hystérésis permet d'obtenir une bande passante importante. Au vu de

la tension aux bornes (Figure 10) la tension de bus continu devra être d'au moins 5000 V.

Afin d'évaluer ce dispositif, nous testons cette alimentation sur le modèle de décharge que nous avons proposé.

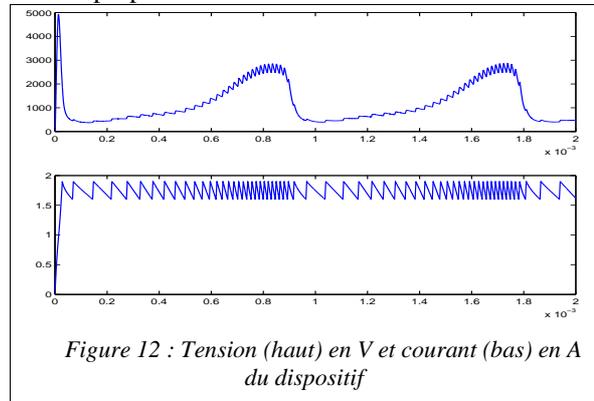


Figure 12 : Tension (haut) en V et courant (bas) en A du dispositif

Lors de cette simulation il apparaît que la fréquence du hacheur devient importante (70KHz) lorsque la décharge a une tension importante. La conception du convertisseur devra prendre en compte cette contrainte.

CONCLUSION

La mise au point de générateurs d'alimentation pour décharge électrique nécessite une bonne représentation dans le domaine électrique du comportement de ce type de charge.

Notre méthode de modélisation prend en compte la conductivité locale du gaz et la géométrie du réacteur. Ainsi, elle permet d'analyser les couplages entre l'alimentation, la géométrie du réacteur et le débit du gaz.

Cela permet de vérifier que le couplage entre l'alimentation et le dispositif à alimenter apporte des performances satisfaisantes et de valider le choix des composants utilisés. Ce modèle permet également de tester de nouvelles lois de commande contrôlant les variables électriques (tension, courant) de la décharge.

REFERENCES

- [1] S. Vongphouthone, H. Piquet, H. Foch "Model of the homogeneous electrical discharge", The European Physical Journal Applied Physics AP 15 123-133 (2001).
- [2] G. Rojat, P. Rossat-Mignod, P. Venet, G. Zissis, N. Daudé, Ch. Joubert, D. Guérin "Contrainte générées par les lampes fluorescentes basse pression sur le réseau électrique » GDR SDGE.
- [3] JP. Salanne, H. Piquet, H. Foch. « Modèle de gaz pour l'étude de l'alimentation en courant continu de décharges électriques » Numélec Toulouse 2003
- [4] J. Chapelle et S. Pellerin « ARC GLISSANT ET APPLICATION ». Journées Electrotechnique TOULOUSE 2001.
- [5] J.R. Roth « INDUSTRIAL PLASMA ENGINEERING » Volume 1 Edition Dekker