

N° d'ordre : 2288

## THESE

présentée  
pour obtenir

**LE TITRE DE DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE  
TOULOUSE**

École doctorale : GEET  
Spécialité : Génie électrique  
Par M. SALANNE Jean-Philippe

Titre de la thèse « Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques  
par l'intermédiaire de leur alimentation. »

Soutenue le 18/11/2005 devant le jury composé de :

M. ROJAT Gérard	Président
MM. CORMIER Jean-Marie	Rapporteur
FOCH Henri	Invité
FULCHERI Laurent	Membre
GABLE Gilles	Membre
PIQUET Hubert	Directeur de thèse
ZISSIS Georges	Membre



## Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du groupe "Système" du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle (LEEI), unité mixte de recherche CNRS-INPT n°5828.

Je tiens à remercier :

Monsieur G.ROJAT et Monsieur JM.CORMIER pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

Monsieur L.FULCHERI pour nous avoir donné l'opportunité de tester nos alimentations sur un dispositif de décharge réel, et pour avoir accepté de participer à l'évaluation de ces travaux.

Monsieur G.ZISSIS pour les discussions que nous avons partagées sur une problématique commune aux plasmas et au génie électrique.

Monsieur G.GABLE pour avoir accepté de faire partie du jury.

Je tiens aussi à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur H. PIQUET pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de m'encadrer durant ces trois ans. Pour sa présence et son aide efficace, particulièrement lors de la rédaction du mémoire.

Je remercie également Monsieur H. FOCH pour sa disponibilité, son aide précieuse et ses remarques toujours judicieuses.

Je remercie aussi Monsieur Y.CHERON, directeur du LEEI, pour avoir accepté de me recevoir au sein de son laboratoire, ainsi que Monsieur X.ROBOAM, responsable du groupe "Système", pour son accueil au sein du groupe.

Je voudrais aussi remercier Sophie, ma femme, pour le soutien inconditionnel qu'elle m'apporte chaque jour.

Je ne voudrais pas oublier mes collègues de bureaux qui m'ont supporté lorsque je coulais sous mon ordinateur lors de la mise au point des simulations. Ainsi que ceux de salle de manipulation qui ont réussi à survivre aux nuisances acoustiques sur toute la gamme de fréquence atteignable par les convertisseurs que j'ai testés.

Par ailleurs, je ne saurais oublier dans mes remerciements les enseignants, les chercheurs et les personnels techniques et administratifs du LEEI et du groupe "Système".

## Table des matières

<i>Introduction générale</i> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Présentation des décharges</b> .....	<b>7</b>
<b>1) Un peu d'histoire</b> .....	<b>7</b>
a) Décharge électrique et plasma dans la nature .....	7
b) Les premières expériences : .....	9
<b>2) Type de décharges</b> .....	<b>11</b>
a) Décharges pointe-pointe .....	11
b) Décharges pointe-plan .....	12
c) Décharges plan-plan .....	14
<b>3) Applications industrielles</b> .....	<b>14</b>
a) Dépollution, traitements des déchets .....	14
b) Métallurgie .....	16
c) Catalyse de réactions chimiques .....	17
d) Dépôts et gravure .....	18
e) Lumière .....	19
<b>4) Alimentations fréquemment utilisées</b> .....	<b>19</b>
a) Source de courant .....	20
b) Source de tension .....	21
<b>5) But recherché</b> .....	<b>21</b>
<b>Chapitre II : Couplage entre la décharge et l'alimentation - modélisation</b> .....	<b>25</b>
<b>1) Caractéristique et couplage</b> .....	<b>25</b>
a) Couplage entre l'alimentation et la décharge .....	25
b) Conclusion sur les couplages .....	32
c) Caractéristique tension/courant du gaz .....	33
<b>2) Phénomènes physiques et formulations mathématiques</b> .....	<b>35</b>
a) Grandeurs physiques considérées .....	35
b) Phénomènes électriques de base de la décharge .....	39
c) Influences des caractéristiques du réacteur sur le comportement électrique de la décharge .....	46
d) Conclusion sur les caractéristiques électriques d'un dispositif .....	48
e) Modélisation générale .....	49
<b>3) Modèle filamenteux</b> .....	<b>56</b>
a) Modèle circuit de la décharge .....	56
b) Comparaison des modèles en régime statique .....	67
c) Comparaison des modèles en régime dynamique .....	69
<b>4) Modèle discrétisé</b> .....	<b>72</b>
a) Discrétisation .....	72
b) Exemple d'application pour une décharge mono filamenteuse .....	79
c) Simplification du modèle discrétisé et application à une décharge glissante .....	82
<b>5) Conclusion</b> .....	<b>91</b>
<b>Chapitre III : Identification numérique des paramètres d'un modèle</b> .....	<b>95</b>
<b>1) Objectifs recherchés</b> .....	<b>95</b>

## Sommaire

<b>2) Méthode d'identification .....</b>	<b>96</b>
a) Définition du modèle.....	96
b) Méthodes d'identification .....	98
c) La méthode d'identification du modèle.....	101
<b>3) Mise en œuvre de la méthode du modèle .....</b>	<b>106</b>
a) Conventions utilisées pour décrire le modèle.....	106
b) Interface mise en oeuvre .....	108
c) Calcul des gradients .....	111
d) Paramètres de l'identification.....	112
e) Résultats d'identification.....	112
f) Application à l'identification des paramètres d'un dispositif de décharge.....	114
<b>4) Conclusion .....</b>	<b>116</b>
<b>Chapitre IV : Décharge à courant continu.....</b>	<b>119</b>
<b>1) Point de fonctionnement recherché .....</b>	<b>119</b>
a) Structure de puissance proposée.....	120
b) Dimensionnement des composants .....	126
c) Commande proposée.....	134
d) Alimentation industrielle.....	146
<b>2) Extension de la plage de fonctionnement.....</b>	<b>149</b>
a) Contraintes due au couplage entre l'alimentation et la décharge .....	150
b) Contrôle indirect de la tension de sortie.....	159
c) Evaluation des performances des commandes proposées .....	170
d) Fourchette courant/tension .....	174
<b>3) Particularités du fonctionnement du glidarc résultant de son alimentation par une source de courant .....</b>	<b>179</b>
<b>4) Conclusion .....</b>	<b>182</b>
<b>Chapitre V : Dispositif à barrière diélectrique .....</b>	<b>185</b>
<b>1) Présentation du point de fonctionnement recherché .....</b>	<b>185</b>
<b>2) Equations aux électrodes .....</b>	<b>186</b>
a) Phénomène général .....	186
b) Phénomènes particuliers.....	194
<b>3) Dispositif d'investigation expérimental.....</b>	<b>196</b>
<b>4) Modélisation .....</b>	<b>201</b>
a) Gaz .....	202
b) Diélectrique.....	203
c) Modèle de l'alimentation .....	209
<b>5) Validation expérimentale .....</b>	<b>210</b>
a) Courbes expérimentales .....	210
<b>6) Conclusion .....</b>	<b>218</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>221</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>i</b>
<b>Annexe : calcul des gradients pour l'identification .....</b>	<b>1</b>
<b>Annexe : mise en équation du système pour la simulation d'une décharge entre deux points.....</b>	<b>5</b>
<b>Annexe : liste des programmes pour l'identification .....</b>	<b>9</b>
<b>Annexe : schéma des cartes électroniques de commande.....</b>	<b>11</b>
a) Les temps morts .....	11

## Sommaire

b) Gestion du flux dans le transformateur .....	12
c) Gestion des sécurités .....	14
d) Filtrage des mesures .....	15
e) Régulation de courant avec une fourchette à fréquence fixe.....	16



# **Introduction générale**



# Introduction générale

Chaque dispositif à décharge possède un point de fonctionnement électrique, caractérisé par un couple tension/courant, qui dépend de sa géométrie et des gaz utilisés, mais également de la source électrique qui l'alimente. Chaque point de fonctionnement est donc lié aux couplages entre l'alimentation et la décharge électrique ; ces couplages proviennent des phénomènes internes à la décharge, ainsi que de ceux qui dépendent des caractéristiques de l'alimentation. Pour maîtriser complètement le point de fonctionnement électrique de la décharge, il faut donc connaître les phénomènes électriques dans la décharge, les phénomènes propres à son alimentation et les interactions entre eux.

Les décharges électriques sont étudiées dans le cadre des laboratoires des plasmas ou des milieux ionisés afin de connaître leur composition chimique, leur température et leurs propriétés lumineuses. Dans la majorité des cas, on sait bien les modéliser, qu'il s'agisse des plasmas à l'équilibre ou des plasmas hors équilibre. Ces modélisations permettent de simuler le comportement physique interne (composition, température...) de la décharge sur des durées de plusieurs microsecondes, voire davantage, avec des temps de simulation qui peuvent, dans le cas de modèles précis, se compter en semaines.

Les alimentations électriques sont étudiées dans des laboratoires d'électronique et de génie électrique afin de caractériser leur comportement électrique et de réaliser leur conception. Ces alimentations sont bien modélisées et leur mise au point fait largement appel à la simulation. Les modèles utilisés permettent de simuler le comportement électrique (sur la base des grandeurs tension et courant) de l'alimentation sur des horizons de temps de plusieurs centaines de millisecondes, voire davantage, avec des temps de simulation de quelques minutes.

Lorsqu'on connecte un dispositif de décharge à une alimentation électrique, ce sont donc deux mondes, qui n'ont pas les mêmes habitudes, les mêmes échelles de temps ni les mêmes préoccupations qui se rencontrent. Ce n'est pas la première fois que des études sont menées sur les décharges électriques et leurs alimentations, mais il y a toujours une certaine méconnaissance du comportement électrique des plasmas par les électroniciens de puissance.

L'objectif de cette thèse est de contribuer à améliorer le contrôle du point de fonctionnement électrique de la décharge, par son alimentation électrique.

Pour cela, on procède par incursions dans le domaine des plasmas, pour étudier le comportement électrique du gaz. Cela nous permet de mieux comprendre les interactions électriques entre la décharge et son alimentation.

Dans le premier chapitre on présente quelques procédés industriels utilisant des plasmas, ainsi que les alimentations traditionnellement utilisées. Ce premier chapitre même s'il n'est pas indispensable à la compréhension globale de ces travaux permet de présenter succinctement quelques applications industrielles des décharges électriques.

La première partie du chapitre 2 (pages 25 à 32) montre, de manière simplifiée, comment est défini le point de fonctionnement électrique d'une association générateur électrique/charge à décharge. Ensuite, la deuxième partie de ce même chapitre (pages 33 à 48) décrit les phénomènes liés aux décharges électriques. Cette partie, écrite par un électronicien de puissance, ne saurait, en aucun cas, être exhaustive et complète sur les phénomènes se déroulant dans les plasmas et décharges. Elle décrit les principaux phénomènes pris en compte lors de notre étude du comportement électrique de la décharge. Elle ne sera donc utile qu'aux personnes méconnaissant le domaine des plasmas, qui cherchent à comprendre les principaux phénomènes à l'origine du comportement électrique, « vu des bornes », de la décharge.

A partir de ces phénomènes simples et de leurs équations générales (décrites de la page 49 à 51), on se propose de modéliser le comportement électrique de la décharge. Il est bien entendu que la plus complète des modélisations proposées ne sera pas aussi précise que la plus simple des modélisations utilisées par les physiciens des plasmas. Pour avoir des temps de simulation acceptables pour un électronicien de puissance (qui se place dans l'optique de la mise au point du générateur), il faut s'affranchir d'un grand nombre d'informations concernant la décharge, ceci dénature beaucoup, vis à vis de la physique de la décharge, les équations que nous utilisons. Ces simplifications permettent d'introduire des modèles simplifiés, dit « OD », d'une décharge électrique linéique (pages 56 à 69). Nous développons ensuite (pages 72 à 88) un modèle discrétisé pour simuler le comportement électrique de décharge dont le lieu varie dans le temps (notamment le phénomène d'arc glissant).

Le fait d'avoir simplifié les équations implique, si l'on prétend être réaliste dans les simulations, une phase d'identification des paramètres des modèles à l'aide de méthodes adaptées : comme on le verra, les phénomènes pris en compte sont pour la plupart

« moyennés » et de ce fait, les paramètres des équations qui les décrivent sont difficilement accessibles. La méthode d'identification utilisée est décrite dans le chapitre 3. On y présente différentes méthodes d'identification (pages 95 à 101) ainsi que la méthode que nous avons retenue et implémentée sous Matlab (pages 101 à 112).

L'étude théorique, décrite dans les chapitres 2 et 3, a été conduite en parallèle avec la mise au point d'alimentations de décharges électriques. Cela a permis de valider mutuellement d'une part les modèles étudiés et d'autre part les commandes mises en œuvre pour contrôler la décharge électrique.

L'étude d'une alimentation pour les décharges à courant continu est présentée au chapitre 4. Ce chapitre développe un processus de réflexion qui conduit à la conception et au dimensionnement d'une alimentation à courant continu pour alimenter et contrôler un dispositif de décharge (page 119 à 148). Un point particulièrement important est la mise en évidence et l'analyse des interactions entre la décharge électrique et l'alimentation (pages 150 à 159) : celles-ci sont exploitées pour la mise au point de modes de contrôle adaptés au fonctionnement dans différentes zones de la caractéristique tension/courant (pages 149 à 179) de la décharge.

Une étude similaire est menée pour l'alimentation de décharges à barrière diélectrique. Après avoir présenté la particularité physique de ce dispositif (pages 185 à 196) on développe un modèle permettant la mise au point par simulation de son alimentation (pages 201 à 218).



# **Chapitre I : Présentation des décharges**



# Chapitre I : Présentation des décharges

## 1) *Un peu d'histoire*

Les premières tentatives de compréhension des plasmas et des décharges électriques ne sont pas récentes, même si l'apparition du concept de plasma ne date que des années 1930. Des phénomènes naturels, souvent spectaculaires, mettent en jeu des arcs et des plasmas. Ils ont intrigué les hommes et motivé des recherches qui débouchent aujourd'hui sur l'utilisation industrielle des plasmas.

Mais d'abord, définissons ce que sont un arc et un plasma. Un arc électrique est une décharge lumineuse à travers un gaz, caractérisé par une grande densité de courant et un faible gradient de potentiel. Le plasma est souvent considéré comme le quatrième état de la matière ; c'est un ensemble, plus ou moins dense, de particules ionisées. Après avoir montré où l'on observe ces phénomènes, nous verrons quels sont les chercheurs qui ont contribué à leur compréhension.

### a) Décharge électrique et plasma dans la nature

Deux phénomènes naturels connus mettent en jeu les éléments que nous étudions.

- La foudre : lorsque de l'air froid recouvre de l'air chaud, les conditions sont favorables au déclenchement des orages. De violents courants d'air verticaux entraînent l'humidité, les fragments de glace, les grêlons et les gouttelettes d'eau à l'intérieur des nuages. On ne connaît pas encore exactement les mécanismes à l'origine de la tension qui se forme dans les nuages d'orage, mais cette tension est influente sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres. Lorsque la tension est suffisante, on peut observer des éclairs entre les nuages et le sol (25% d'entre eux) ou entre les nuages eux-mêmes. Ces arcs ont des vitesses de propagation de l'ordre de 200km/sec. Leur tension est de l'ordre

de 100 millions de Volts et ils sont parcourus un courant de 30000 Ampères [1]. Ce sont donc des phénomènes développant beaucoup de puissance et très visibles pour l'homme. [2]



*Figure 1 : Foudre (Photo Fédération Française de Montagne et d'Escalade)*

- Aurore polaire : les aurores polaires apparaissent, vues depuis la Terre, comme des taches ou des bandes de lumière, souvent striées, un peu comme des rideaux lumineux se balançant dans un courant d'air. Elles sont surtout de couleur verte ou rouge. On peut les observer pendant plusieurs dizaines de minutes. On les observe à des latitudes voisines de 70 degrés, c'est à dire en Scandinavie, au Nord de la Sibérie, au Canada, en Alaska, ou - au Sud - aux abords du continent Antarctique. Ces lumières aurorales sont émises à des altitudes comprises entre 80 et 150 kilomètres, dans l'ionosphère. La lumière des aurores provient des collisions entre des particules rapides provenant de la magnétosphère et les atomes et ions de l'ionosphère. Les aurores boréales sont les aurores polaires que l'on observe dans l'hémisphère Nord ; les aurores australes sont observées dans l'hémisphère Sud. [3] [4]



*Figure 2 : Aurore boréale (Photo Vincent Génot)*

- Beaucoup d'autres phénomènes naturels font intervenir les plasmas, mais se développent ailleurs que sur terre. Les étoiles, les comètes... peuvent être constituées de plasma et génèrent des vents de plasmas autour d'eux.

En cela, l'élément que nous étudions a beaucoup marqué l'imagination commune ; l'homme a cherché à comprendre, puis à domestiquer ce phénomène.

### b) Les premières expériences :

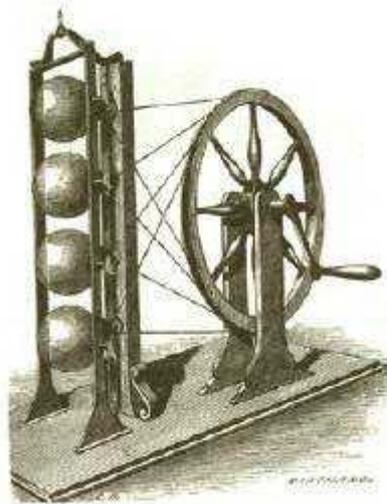
C'est au XVIII<sup>e</sup> siècle que l'on s'est rendu compte que la foudre et l'électricité étaient deux phénomènes liés. Les scientifiques de l'époque ont cherché à comprendre l'origine des phénomènes liés, notamment, à l'électricité statique. Ensuite, ils créèrent le vocabulaire pour expliquer ces phénomènes ; voici quelques expériences et étapes historiques marquantes dans la compréhension et la formalisation de ces phénomènes :

- Expérience sur la foudre : lorsque les premières recherches en électrostatique furent menées, on remarqua assez vite que des éléments chargés de manière électrostatique émettaient des étincelles. Même si le phénomène électrique n'était pas bien connu (la polarité n'était pas connue), on rechercha un moyen d'exploiter ce phénomène (machine de Watson). C'est vers 1750, que l'abbé Nollet et Franklin énumérèrent les points communs entre la foudre et les étincelles qu'ils étudiaient. En 1752, Franklin fit une expérience qui permit de prouver le lien existant entre les deux phénomènes : l'expérience consistait à tenir un cerf-volant à l'aide d'un long fil humide à l'extrémité duquel il avait attaché une clef métallique. Il put constater la présence de petites étincelles qui lui permit de confirmer que de la foudre était de nature électrique. [39]



*Figure 3 : Franklin faisant son expérience*

- Machine de Watson : dans le même temps, Watson utilisait une machine pour allumer des substances inflammables. Cette machine est composée de quatre globes de verre, frottés simultanément par des coussins fixes. Les charges étaient généralement transmises à une épée suspendue à des cordons de soie, au-dessus du flacon contenant le liquide à enflammer. [6]



*Figure 4 : Machine de Watson*

- Au cours du XIX siècle, Faraday, qui travaillait à l'institution royale d'Angleterre, décrit beaucoup d'expériences et inventa les terminologies pour les expliquer. Il définit notamment, les termes « électrode », « anode », « cathode », « ion », « anion » et « cation ».
- Apparue après 1841, la lampe électrique à arc émet entre deux électrodes de graphite une lumière très brillante qui ne convient pas à l'usage domestique. Elle fut utilisée pour l'éclairage public avant d'être supplanté dans ce domaine par la lampe d'Edison.



*Figure 5 : Lampe à arc de modèle Thompson Houston fabriquée par la General Electric Co., vers 1896. (921610)*

- le générateur de Van de Graaf a été mis au point vers 1930 pour produire de très hautes tensions (1MV). Le principe de fonctionnement est assez simple : un moteur

entraîne une courroie qui transporte les charges électriques créés par frottement entre celle-ci et un matériau non-conducteur. Si ce type de générateur fut utilisé pour l'étude des accélérateurs de particules, aujourd'hui il sert surtout à faire des présentations pédagogiques. La tension maximale atteignable dépend de la surface de la sphère (30kV par cm de rayon environ) et peut monter jusqu'à plusieurs millions de Volts. [7] [8]

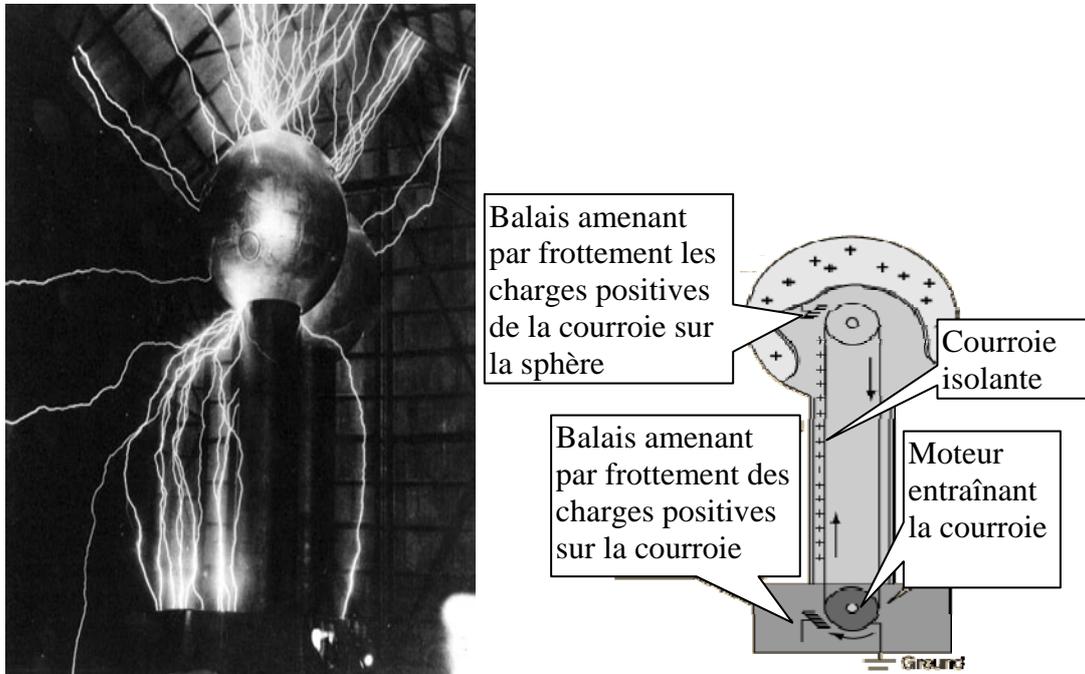


Figure 6 : Générateur Van de Graaf

On peut remarquer que depuis les origines et pendant longtemps, ce sont des générateurs électrostatiques qui ont été utilisés à des fins de recherche scientifique sur les phénomènes physiques liés aux claquages. La plupart des applications actuelles utilisent des générateurs électriques et sont utilisées à des fins industrielles.

## 2) Type de décharges

Les caractéristiques électriques des décharges dépendent fortement de la géométrie des électrodes. On classe celle-ci en trois familles qui induisent des comportements électriques et des applications différentes.

### a) Décharges pointe-pointe

L'utilisation de pointes métalliques pour l'étude des décharges est assez courante. Cela est dû à l'effet de pointe, qui permet d'obtenir localement un champ intense (au niveau des pointes et des angles métalliques). Ce champ intense favorise le claquage électrique des gaz.

C'est pour cela que l'on utilise des pointes comme paratonnerre et que la machine de Watson était équipée d'une pointe...

L'utilisation de pointes a l'avantage de stabiliser le lieu de la décharge puisqu'on est sûr du point de départ et du point d'arrivée de celle-ci (mais rien n'impose que le trajet entre ces deux points soit une ligne droite). Ce sont souvent des décharges entre deux électrodes métalliques ; on n'utilise que rarement cette configuration avec des décharges à barrière diélectrique.

### b) Décharges pointe-plan

Ce sont des arcs dont le chemin peut être instable ; c'est à dire que l'on connaît de manière certaine le point de départ de l'arc mais qu'on ne peut pas prédire quel sera le point d'arrivée sur le plan ni même le chemin parcouru. On peut distinguer trois types de décharge pointe-plan : les arcs transférés, les arcs non transférés et les arcs glissants, qui ont des utilisations industrielles différentes. Les arcs transférés ou non transférés sont utilisés tous les deux en sidérurgie pour obtenir des gaz à de très hautes températures, à l'aide de courants importants (plusieurs centaines d'Ampères).

- Arc transféré [28] [29] : un arc transféré est un arc pointe-plan utilisé couramment pour la soudure. La pointe est l'électrode utilisée par le soudeur et le plan est la plaque de métal à souder. Il arrive qu'on utilise un gaz sous pression pour protéger la zone de soudage (protection contre les oxydations) mais cela ne change pas fondamentalement le trajet de l'arc qui va naturellement d'une électrode à l'autre.

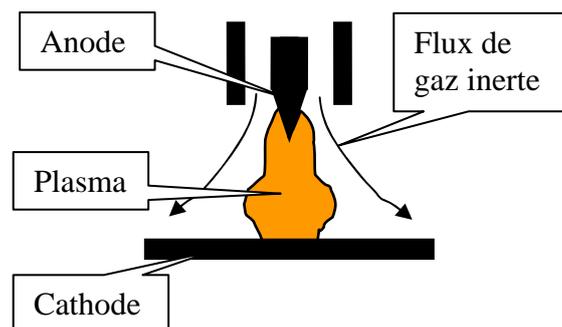


Figure 7 : Arc transféré

- Arc non transféré [28] [29] : la pointe de cet arc est le centre du dispositif et le plan est le tube qui entoure la pointe (cathode le plus souvent). La différence essentielle avec l'arc précédent est que celui-ci est soufflé par un flux de gaz (gaz plasmagène), ce qui crée un arc projeté (jet de plasma) ; c'est une torche à plasma. La plupart du temps, on

se sert de ce type de dispositif pour réaliser des dépôts de métaux sur différents matériaux.

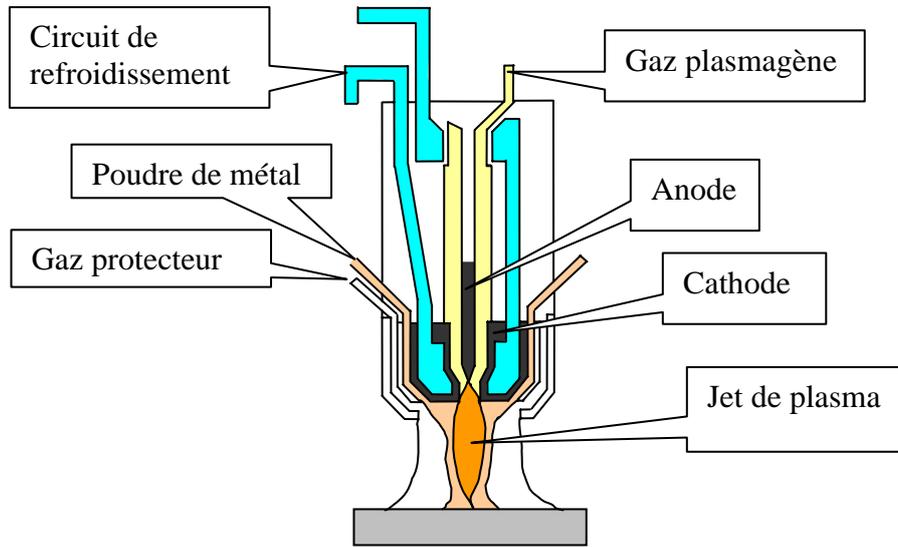


Figure 8 : Arc non transféré (torche à plasma)

- Décharge glissante : dans certains cas, on cherche à faire glisser l'arc en le soufflant le long d'une des électrodes, dans une configuration géométrique de décharge plan-plan ou pointe-plan. Ce sont des dispositifs à arc glissant, généralement caractérisés par un courant de faible intensité ; l'allongement de la longueur de l'arc qui résulte du soufflage peut conduire à des tensions élevées relativement à celles qui seraient obtenues sans soufflage. [21] [41] [32]

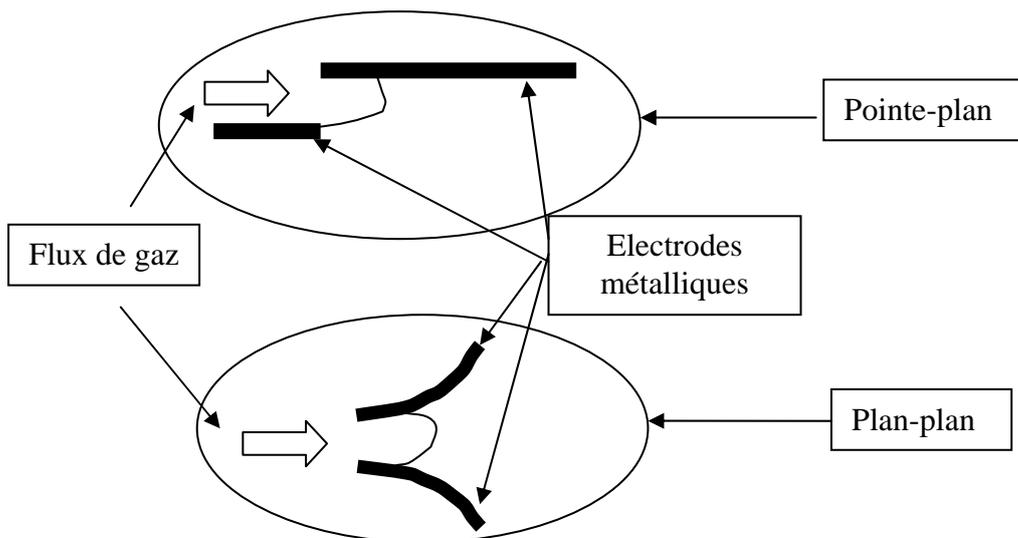


Figure 9 : Décharges glissantes

### c) Décharges plan-plan

Les décharges plan-plan sont rarement des décharges entre électrodes métalliques. En effet, dans le cas d'une utilisation d'électrodes métalliques planes, on ne connaît ni le point de départ de la décharge, ni le point d'arrivée et, sans traitement particulier sur ces électrodes, on n'obtient pas un arc homogène, réparti sur toute la surface des électrodes : on observe un arc unique se déplaçant dans l'espace inter électrodes, ou parfois, plusieurs arcs apparaissant et disparaissant dans ce même espace.

Dans la plupart des cas, on utilise des électrodes qui sont recouvertes d'une couche de diélectrique côté décharge. Avec ce type de dispositif, il est beaucoup plus facile d'obtenir une décharge homogène sur tout le plan. Ce type de décharge met en jeu des tensions importantes (dizaine(s) de kV) et des courants relativement faibles (quelques centaines de mA pour des sections de l'ordre de 10 cm<sup>2</sup>). On utilise ces décharges à barrière diélectrique, entre autre, pour la production d'ozone [42] [51].

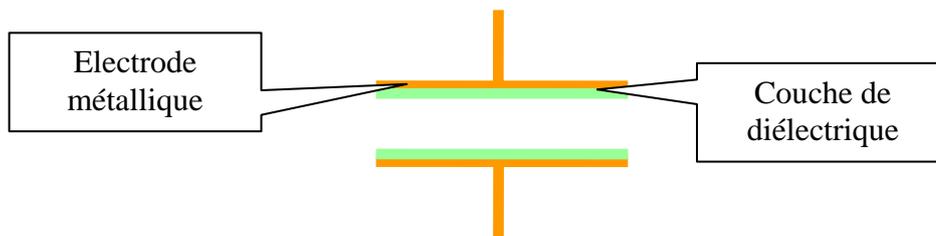


Figure 10 : Electrode de décharge à barrière diélectrique (DBD)

## 3) Applications industrielles

Les applications industrielles des décharges électriques sont très variées et touchent à des domaines d'applications assez hétérogènes. Les plasmas sont utilisés à différents titres : pour leurs hautes températures, parce qu'ils sont riches en espèces réactives chimiquement et également pour leurs propriétés lumineuses. La diversité de ces applications fait que les sources électriques, qui leurs sont liées, ont des caractéristiques variées.

### a) Dépollution, traitements des déchets

Une première utilisation des hautes températures des plasmas est le traitement de déchets afin de limiter la toxicité de certains résidus ou de recycler des matières métalliques.

- Décontamination du sol : les déchets (terre polluée par des produits chimiques) sont mis en suspension dans de l'eau et le tout est injecté au centre d'un dard de plasma d'arc non transféré de 350 kW. Ce type de procédé permet de transformer les déchets

chimiques et non organiques, qui sont nocifs pour l'environnement, en un matériau vitreux stable et non toxique ; ce procédé a été expérimenté par Pyrolysis Systems Inc [10].

- Incinération des déchets ménagers : l'utilisation de plasmas permet de limiter au maximum la pollution engendrée ; en effet, les déchets ménagers sont dans un premier temps triés pour être recyclés. La partie non recyclable des déchets est incinérée. De cette incinération, il subsiste des déchets solides en bas du four (mâchefer) qui servent à fabriquer des enduits pour les routes et le REFIOM (Résidu d'Épuration de Fumées d'Incinérateurs d'Ordures Ménagères). On utilise alors une torche à plasma pour vitrifier celui-ci. Le produit de cette vitrification est concassé et utilisé pour faire des dalles, des pavés ou des bordures de trottoir (source Europlasma).

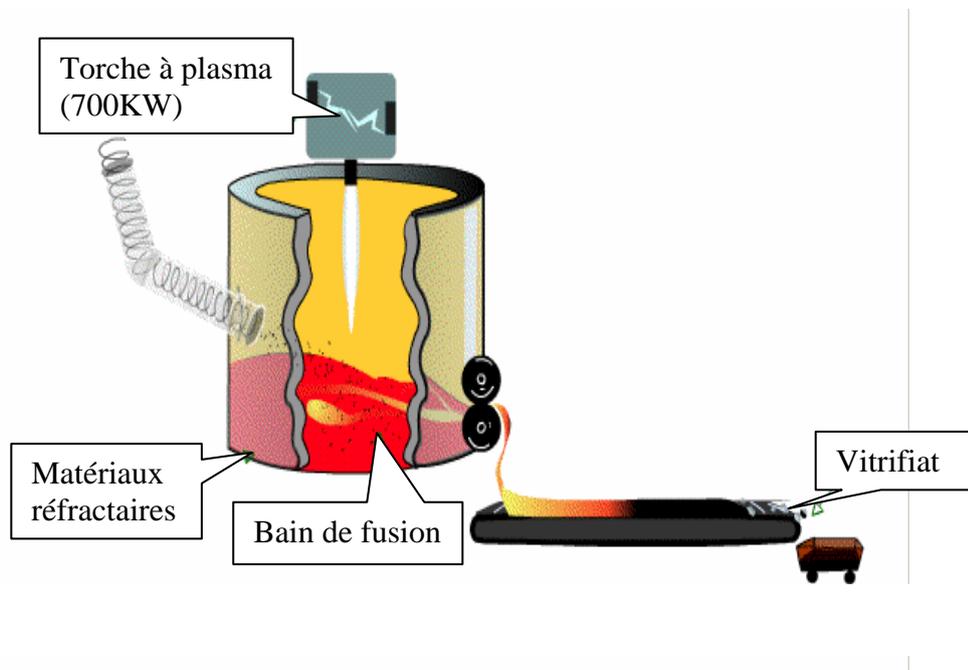


Figure 11 : Vitrification du REFIOM source Europlasma

- Récupération de métaux précieux : des installations de récupération de métaux précieux (palladium, platine, iridium...) contenus dans les catalyseurs de pot d'échappement sont développés en utilisant des torches à plasma.

- Traitement des crasse d'aluminium : le terme de « crasse d'aluminium » désigne les déchets restés collés aux parois des cuves où l'aluminium se trouvait à l'état liquide. L'entreprise Hydro-Quebec (Canada) a développé, vers 1987, des essais de traitement des crasses d'aluminium avec une torche PEC (torche d'arc transféré à électrode froide) de 150kW dans un four avec de l'air comme gaz plasmagène. En 1988, une usine pilote

de 1 MW est construite et en 1991, Plasma Processing Corporation construit aux USA une usine de capacité de 40 000 t/an. Ce procédé de traitement par torche à plasma permet de récupérer 90,5 % de l'aluminium contenu dans les crasses, avec toutefois d'importantes pertes énergétiques.

## b) Métallurgie

La métallurgie utilise les fours à arc pour obtenir les températures élevées nécessaires au traitement de l'acier. Les fours destinés à cet usage peuvent fonctionner en courant alternatif ou en courant continu. Ce sont de gros consommateurs d'électricité, puisque leur consommation totale représente près de 4% de la consommation de la grande industrie en France. La capacité des fours modernes avoisine les 200 t avec une consommation énergétique comprise entre 400 et 500 kWh/t [11]. Cette consommation de puissance est telle qu'elle génère des problèmes sur les réseaux électriques (des papillotements de l'éclairage ou « flicker »). Cela est dû aux variations de tension sur le réseau, provoquées par les instabilités des arcs des fours.

Les fours à arc sont composés d'un récipient dans lequel repose le métal en fusion et d'électrodes en graphite situées au dessus. Ce récipient qu'il est possible de faire basculer pour recueillir le métal en fusion, dispose d'éléments pour refroidir sa voûte et retenir la chaleur du métal en fusion. La hauteur des électrodes est réglable afin de contrôler la tension de la décharge. Dans le cas des fours à courant continu, il y a une électrode au dessus et une électrode intégrée dans le fond du récipient contenant le métal en fusion.

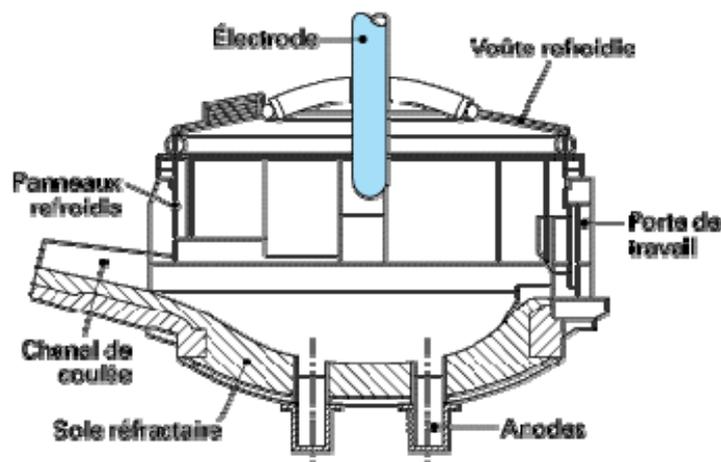


Figure 12 Four à courant continu (Source : les techniques de l'ingénieur)

Dans le cas de four utilisant la tension triphasée alternative, les trois électrodes sont au dessus du bain. C'est le four triphasé qui est le plus utilisé aujourd'hui mais les avantages (meilleur chauffage du métal et meilleur rendement) du four à courant continu tendent à le rendre plus rentable.

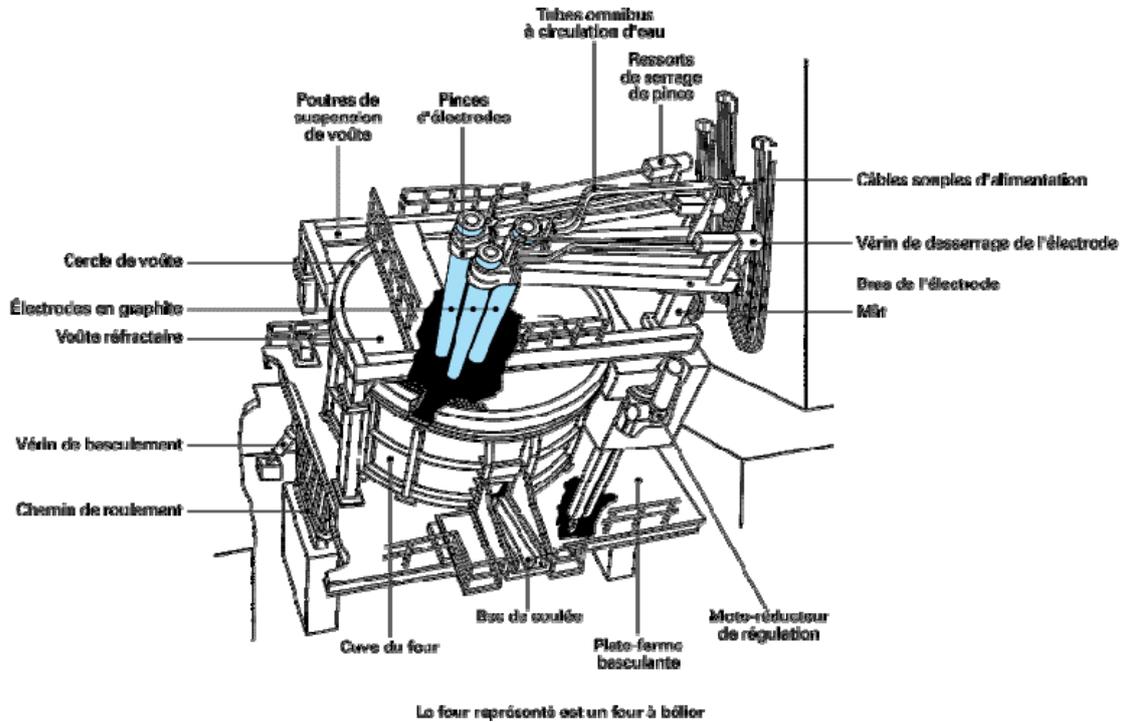


Figure 13 : Four triphasé (Source : les techniques de l'ingénieur)

### c) Catalyse de réactions chimiques

Les espèces chimiques présentes dans les plasmas sont réactives et permettent de catalyser des réactions chimiques.

- C'est notamment le cas du reformage de l'hydrogène à partir d'hydrocarbure. Bien que ce ne soit pas la seule voie possible, elle est étudiée, entre autre, au CENERG. Le principe de ce type de dispositif est de mélanger les réactifs à l'état gazeux dans le réacteur où on entretient une décharge électrique.[43]

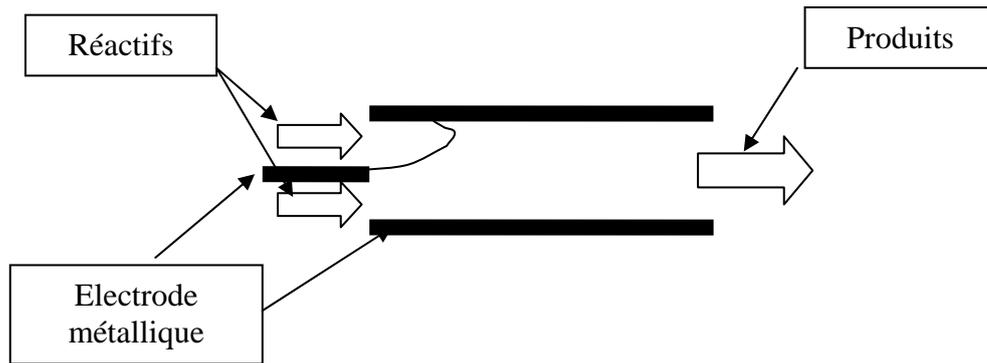


Figure 14 : Réacteur de catalyse du reformage d'hydrogène

- On peut également obtenir la création de nano-tubes de carbone par des procédés plasma. L'utilisation d'un plasma thermique pour la synthèse de nano-particules de carbone est un procédé novateur, protégé par plusieurs brevets. Ce procédé est fondé sur un système à arc plasma triphasé [37].
- Les décharges à barrières diélectriques peuvent être utilisées pour la synthèse d'ozone [42].

#### d) Dépôts et gravure

L'utilisation de plasmas permet de réaliser des traitements de surface, afin d'obtenir ou d'améliorer certaines propriétés spécifiques. On peut ainsi solidifier des pièces métalliques, graver avec précision ou déposer des molécules sur des matériaux plastiques pour en changer les propriétés.

- Rechargement des pièces usées : certaines pièces de métallurgie s'usent de manière importante, notamment lorsqu'elles sont sujettes à de fortes contraintes mécaniques : pièces de centrales nucléaires, pièces de matériaux de forage... Ces pièces peuvent être traitées et renforcées en y déposant du carbure de tungstène ou d'autres composés en fonction des propriétés recherchées (anticorrosion...) [9]. Cette opération de « rechargement » est effectuée à l'aide de torches à plasma.
- Gravure de semi-conducteur : On utilise des décharges à barrière diélectrique pour effectuer la gravure du silicium de composants microélectroniques. Cela permet de réaliser des gravures très précises [44]. Ce type de technologie est également utilisé dans certaines disciplines des sciences de la vie, pour créer des substrats d'étude de cellules isolées ou canalisées.

- Dépôts de matériaux chimiques sur film plastique : les propriétés de surface des films plastiques peuvent être modifiées par dépôts ou altération de leur composition chimique locale ; on peut ainsi améliorer leur imperméabilité à l'oxygène, leurs propriétés d'adhésion. Les procédés qui supposent le traitement de surfaces importantes sont généralement réalisés à l'aide de décharges à barrière diélectrique [45] [46].

#### e) Lumière

Les décharges électriques possèdent des propriétés lumineuses qui sont exploitées dans divers domaines, notamment l'éclairage, où on cherche à obtenir des caractéristiques d'éclairages précises (longueur d'onde, intensité...) mais également pour les écrans plasmas.

- Tube fluorescent : le tube fluorescent, ou tube néon, est très utilisé pour l'éclairage dans des bâtiments accueillant du public ; celui-ci consomme peu d'énergie pour un éclairage important. D'autres lampes à décharge, au sodium à haute pression (SHP), sont très utilisées pour l'éclairage des routes la nuit. Dans le cadre d'un éclairage public, c'est l'efficacité énergétique qui est recherchée. Or, les lampes SHP ont le rapport lumens (unité permettant de mesurer l'efficacité de l'éclairage) par watt le plus élevé, (70 à 100 lumens par Watt), surtout par rapport aux lampes à incandescence (15 lumens/W).[40]
- Ecran plasma : Les écrans plasma utilisent des décharges à barrière diélectrique pour exciter un gaz et générer une image. Le gaz utilisé dans les écrans plasma est un mélange d'argon (90%) et de xénon (10%). Ce gaz est contenu dans des cellules, correspondant aux pixels ; chaque cellule est adressée par une électrode ligne et une électrode colonne qui permettent d'exciter le gaz. En modulant la valeur de la tension appliquée entre les électrodes et la fréquence de l'excitation, il est possible de définir jusqu'à 256 valeurs d'intensités lumineuses. Le gaz ainsi excité produit un rayonnement lumineux ultraviolet (donc invisible pour l'œil humain). Grâce à des luminophores respectivement bleus, verts et rouges répartis sur les cellules, le rayonnement lumineux ultraviolet est converti en lumière visible. [12]

#### **4) Alimentations fréquemment utilisées**

On distingue deux types principaux de sources électriques d'alimentation, selon la forme de leur caractéristique électrique dans le plan tension-courant : les sources de courant (caractéristique parallèle à l'axe des tensions) et les sources de tension (caractéristique parallèle à l'axe des courants). Ce sont les premières qui sont le plus utilisées, car leurs

caractéristiques sont plus appropriées pour alimenter une décharge ; le chapitre 2 développe les éléments de raisonnement autour de ces choix ; nous dressons ici un état des lieux des solutions les plus usitées.

### a) Source de courant

La grande majorité des alimentations pour décharge électrique est composée de dipôles possédant une caractéristique qui les apparente à des sources de courant. Cela est nécessaire, nous le verrons ensuite, par le caractère « source de tension » (au niveau local) des décharges électriques. Ces sources sont souvent réglables en courant. On peut distinguer deux types de sources.

- Dipôle constitué d'une source de tension placée en série avec une résistance, ou plus généralement une impédance : ce type de montage est souvent utilisé en laboratoire pour sa simplicité de réalisation et d'utilisation. Il permet de contrôler le courant moyen en faisant varier la résistance de sortie du générateur et le courant de sortie est relativement stable. Le défaut de ce type de sources est leur très mauvais rendement énergétique (maximum théorique de 50%, dans le cas où l'impédance série est une résistance) et la difficulté pour régler le courant en temps réel, inconvénients qui restreignent leur usage au domaine de l'expérimentation. Ce très faible rendement impose un refroidissement important de la résistance qui règle la valeur du courant puisque c'est elle qui dissipe la majorité de l'énergie. Ce sont donc souvent des alimentations qui présentent des volumes importants et qui sont relativement bruyantes à cause des ventilateurs de refroidissement.

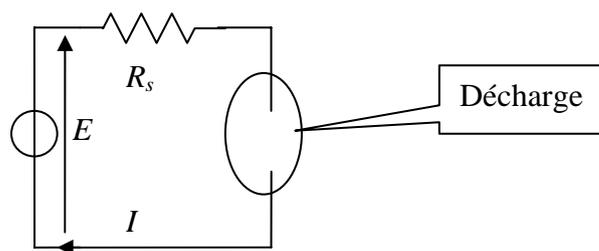


Figure 15 : Source de tension continu (redresseur) mis en série avec une résistance

- Dipôles régulés en courant : c'est le cas des redresseurs contrôlés, utilisés dans l'industrie métallurgique pour contrôler le courant dans les fours à arc. Ce type d'alimentation a l'avantage de limiter les phénomènes de flicker et d'augmenter en partie le rendement. Ces convertisseurs supportent des courants de plusieurs milliers d'ampères.

Remarque : dans le cas des fours à arc fonctionnant en alternatif, on utilise des inductances en série sur le réseau : cette solution permet de disposer d'une caractéristique « source de courant » en instantané, ce qui contribue à limiter les phénomènes de flicker et améliore la qualité du chauffage du métal.

### b) Source de tension

En continu, les sources de tensions ne sont presque jamais utilisées pour l'alimentation de décharges électriques. Cela est dû aux caractéristiques électriques propres du gaz qui ne permettent pas ce type de fonctionnement, comme cela sera établi au chapitre 2.

En alternatif, certains dispositifs de décharge présentant naturellement une impédance en série avec le gaz (comme par exemple les décharges à barrière diélectrique) peuvent être alimentés à l'aide d'une source de tension [47].

## 5) *But recherché*

Le but de nos travaux est de dégager les éléments de raisonnement permettant d'améliorer le contrôle du point de fonctionnement (défini par un couple tension/courant), grâce au choix des caractéristiques électriques de l'alimentation.

Dans une démarche de conception, l'utilisation de ces éléments de raisonnement est confrontée à deux cas d'application concrets qui permettent de valider nos propositions :

- le cas d'un arc glissant à courant continu, où l'on cherche à contrôler le courant total circulant dans le dispositif ;
- le cas d'une décharge à barrière diélectrique, où l'on cherche à obtenir une répartition uniforme de la décharge sur toute la surface des électrodes (en ne considérant que l'alimentation électrique du dispositif comme moyen d'agir en ce sens).

Le choix du point de fonctionnement électrique dans le plan tension-courant dépend de l'application de traitement qui est envisagée ; il reste principalement du ressort des spécialistes du procédé concerné.



## **Chapitre II : Couplage entre la décharge et l'alimentation - modélisation**



## **Chapitre II : Couplage entre la décharge et l'alimentation - modélisation**

Un point de fonctionnement électrique se définit par le couple de valeurs du courant et de la tension. Dans l'optique de contrôler ce point de fonctionnement, nous étudions ici comment prévoir les valeurs obtenues en connectant une alimentation donnée avec un dispositif à décharge. Sur cette base, nous verrons que l'obtention de certains points de fonctionnement est conditionnée par l'utilisation de sources électriques spécifiques.

La conception d'une alimentation permettant d'atteindre des points de fonctionnement choisis nécessite une connaissance du comportement dynamique, toujours du point de vue électrique, du dispositif à décharge. Nous nous proposons, afin de décrire ce comportement dynamique, d'utiliser un certain nombre de connaissances relevant du domaine des plasmas pour mettre au point des modèles dynamiques de la décharge. Ces modèles servent à l'étude, menée dans le domaine électrique, des interactions entre le dispositif à décharge et son alimentation.

### **1) *Caractéristique et couplage***

Connaissant les caractéristiques statiques dans le plan tension/courant de la décharge ainsi que de son alimentation, on peut connaître quel sera le point de fonctionnement électrique obtenu par leur association.

#### **a) Couplage entre l'alimentation et la décharge**

La caractéristique statique d'un dipôle est une courbe définie dans le plan tension/courant, qui associe, à un courant circulant dans le dipôle, la tension qu'on mesure entre ses bornes. On peut tracer la caractéristique statique d'un dipôle en utilisant une convention générateur

(courant et tension dans le même sens) ou en utilisant une convention récepteur (courant et tension en sens contraires).

Une méthode, pour connaître le point de fonctionnement obtenu par l'association d'une alimentation avec une charge, est de tracer la caractéristique statique de l'alimentation en convention générateur et celle de la charge en convention récepteur. Toutes les intersections entre les deux caractéristiques sont des points de fonctionnement possibles, mais pas nécessairement stables.

◆ *Point de fonctionnement statique d'une alimentation classique*

On utilise, pour cette étude qualitative (ce qui justifie que les axes restent sans échelle), une forme classique, que l'on justifiera plus loin, de la caractéristique statique d'un dispositif à décharge. On peut voir que pour des courants assez importants, le choix d'une source de courant est parfaitement justifié puisque la détermination du point de fonctionnement ne pose pas de débat (un seul point d'intersection net). C'est l'illustration d'une règle fondamentale d'association entre une source électrique et sa charge : la règle de complémentarité source/charge. Cette règle énonce qu'une charge ayant une caractéristique « source de tension » (i.e. dont la tension varie peu sur une grande plage de courant) doit être alimentée par une source ayant une caractéristique « source de courant » (i.e. dont le courant varie peu sur une grande plage de tension). A contrario, si on connecte deux sources de même nature (dont les deux caractéristiques sont parallèles à un même axe), il n'y a pas de point de fonctionnement viable (deux droites parallèles ne se croisent pas...).

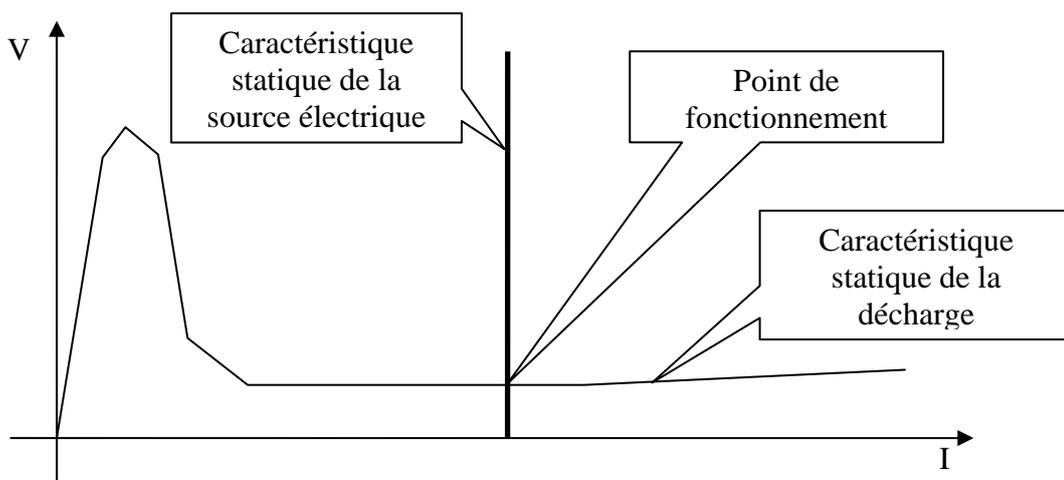


Figure 16 : Point de fonctionnement de la décharge alimenté par une source de courant parfaite

Dans le cas du montage classique d'une source de tension placée en série avec une résistance (Figure 17), on peut vérifier que le point de fonctionnement dépend effectivement de la valeur de la résistance (Figure 18).

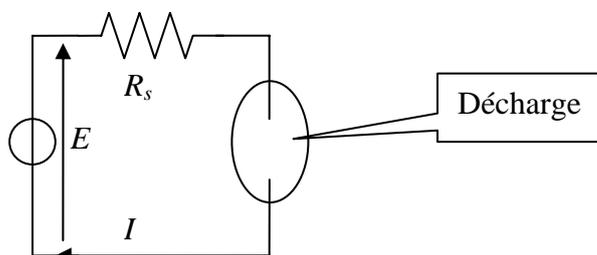


Figure 17 : Source de tension série avec une résistance

Le courant dépend bien de la valeur de la résistance de sortie ( $R_s$ ) ; néanmoins cette dernière dissipe beaucoup d'énergie, ce qui détériore le rendement. En effet, si on multiplie la tension totale par le courant total fourni par la source de tension, on obtient la puissance consommée représentée par les aires grisées (claire et foncée), alors que la multiplication de la tension subie par le dispositif de décharge par le courant total donne l'aire grisée foncée qui représente la puissance utile (Figure 18).

On peut également noter que, pour une résistance de sortie ( $R_s$ ) choisie, certaines zones de la caractéristique de décharge restent inaccessibles. La Figure 18 fait apparaître, surlignée en trait gras, la partie de la caractéristique de décharge considérée qui demeurerait inaccessible pour une alimentation dont la résistance de sortie vaudrait  $R_1$  et dont le réglage s'effectuerait grâce à l'amplitude de la source de tension ( $E$ ).

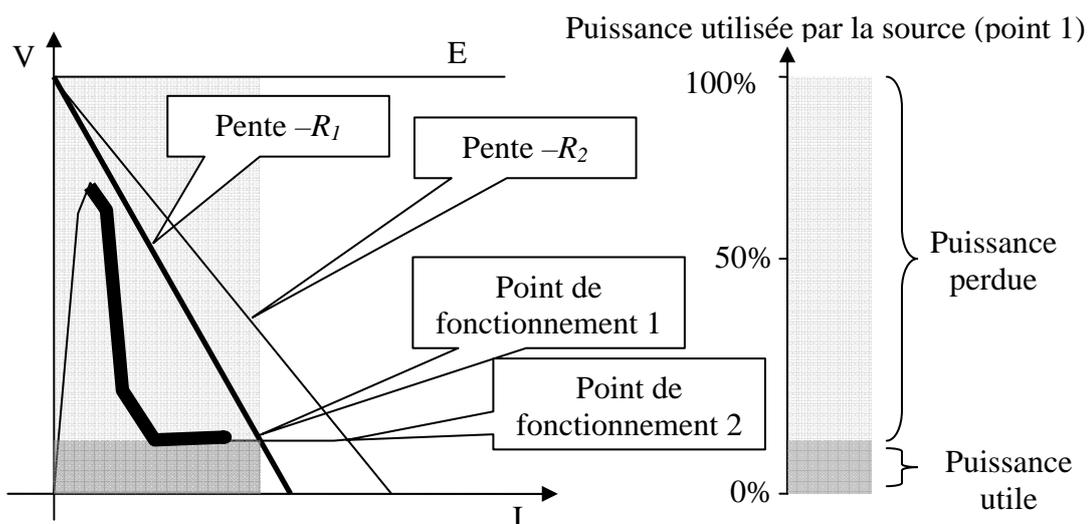


Figure 18 : Point de fonctionnement d'une décharge alimentée par une source de tension en série avec une résistance.

La première difficulté lorsqu'on choisit une alimentation électrique pour les décharges est de savoir, d'une part quel est le point (tension/courant) que l'on cherche à atteindre, d'autre part quel type d'alimentation permet d'obtenir ce point.

Le plan tension/courant permet de savoir ce qu'il est nécessaire d'avoir comme caractéristique statique de l'alimentation, connaissant le point de fonctionnement recherché sur la caractéristique statique du dispositif. Cependant la première approche statique du problème n'indique pas si le point de fonctionnement est stable ou non. Or si un point de fonctionnement n'est pas stable, son obtention n'est pas réalisable. Il faut donc étudier la stabilité des points de fonctionnement trouvés par la méthode qui a été décrite plus haut. Cette stabilité peut être analysée à l'aide des caractéristiques statiques de la décharge et de l'alimentation.

◆ *Stabilité du point de fonctionnement*

Un point de fonctionnement est stable si le système tend à s'opposer à une perturbation extérieure qui aurait pour effet de déplacer ce point, pour revenir au point initial. Pour illustrer ce problème, on étudie le cas de l'alimentation de la décharge par une source dont la caractéristique statique est celle d'une source de tension réelle (une caractéristique pratiquement horizontale ; la très faible pente qui apparaît sur la Figure 19 correspond à la résistance interne de la source, idéalement nulle).

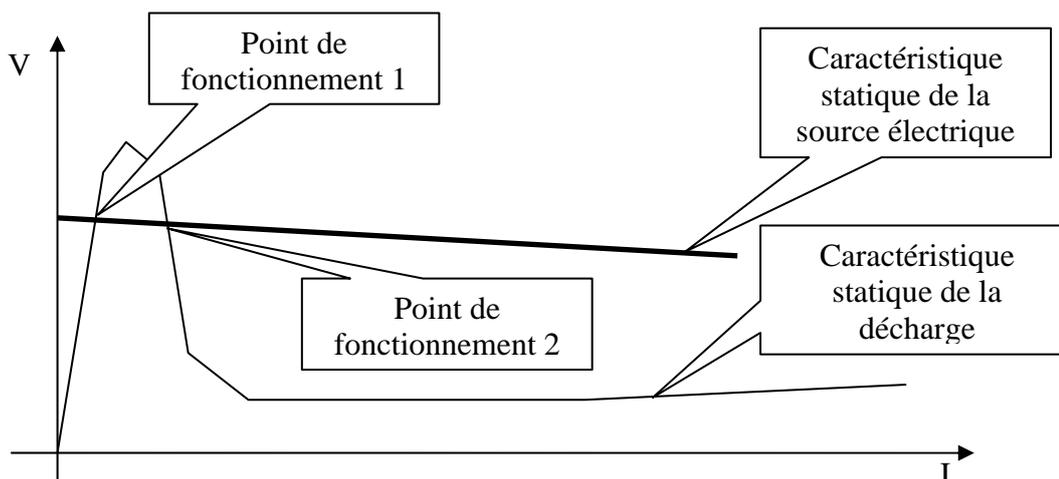


Figure 19 : alimentation de la décharge par une source de tension

Pour cet exemple, on considère une source de tension qui présente une tension à vide inférieure à la tension maximale de la caractéristique statique du gaz. La cas où la tension à vide est supérieure donne un unique point de fonctionnement à courant quasi infini.

Au point de fonctionnement 1, une augmentation de la tension d'arc cause une diminution du courant dans la source (d'après la caractéristique statique de la source). Cette diminution de courant fait diminuer la tension d'arc (caractéristique « à pente positive » de la décharge). Le système répond par une diminution de tension à une perturbation qui tendait à l'augmenter.

De même, si la tension d'arc diminue, le courant de la source devient plus grand, entraînant une augmentation de la tension d'arc. A nouveau, le système répond par une augmentation de tension à une perturbation qui tendait à la diminuer.

Le point de fonctionnement 1 est donc stable. Le raisonnement qui vient d'être développé pour l'établir est synthétisé sur la Figure 20.

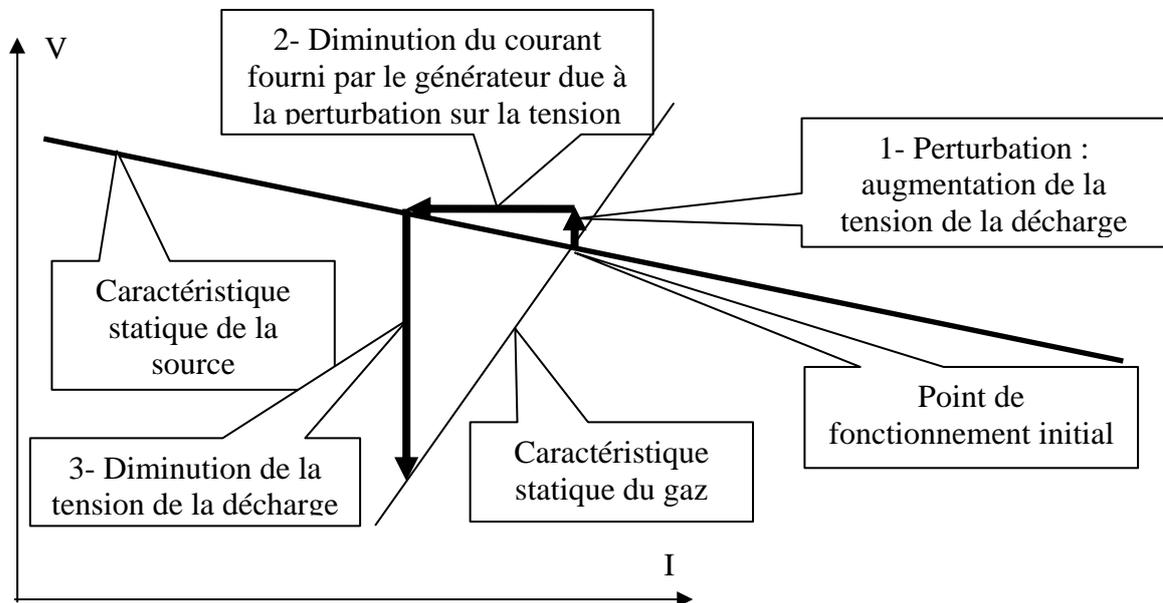


Figure 20 : Stabilité autour du point de fonctionnement 1 pour une augmentation de tension

Au point de fonctionnement 2 (Figure 19), une augmentation de la tension d'arc, cause une diminution du courant dans la source. Cette diminution de courant fait augmenter la tension d'arc (caractéristique statique de l'arc « à pente négative »). Une augmentation de tension entraîne une augmentation de tension. Le point de fonctionnement 2 est donc instable.

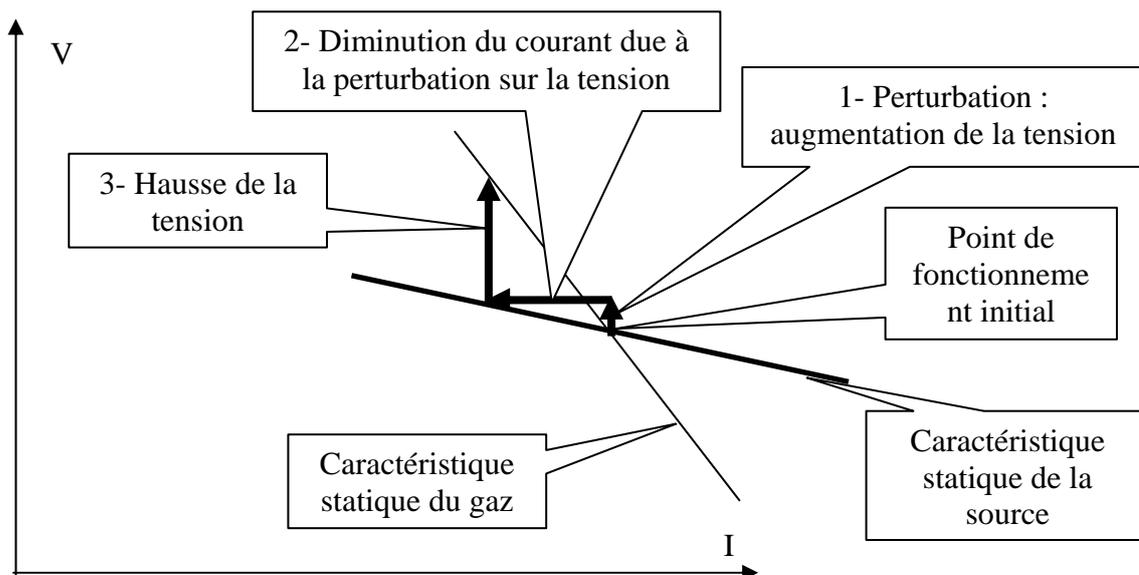


Figure 21 : Instabilité autour du point de fonctionnement 2

Cela montre bien que l'utilisation d'une source de tension traditionnelle ne permet pas d'obtenir certains points de fonctionnement de la caractéristique de décharge considérée.

On peut faire la même analyse concernant une alimentation que l'on voudrait concevoir : par exemple, par la mise en œuvre de commandes spécifiques, on peut imaginer concevoir une source de tension ayant (vue des bornes) une résistance interne négative.

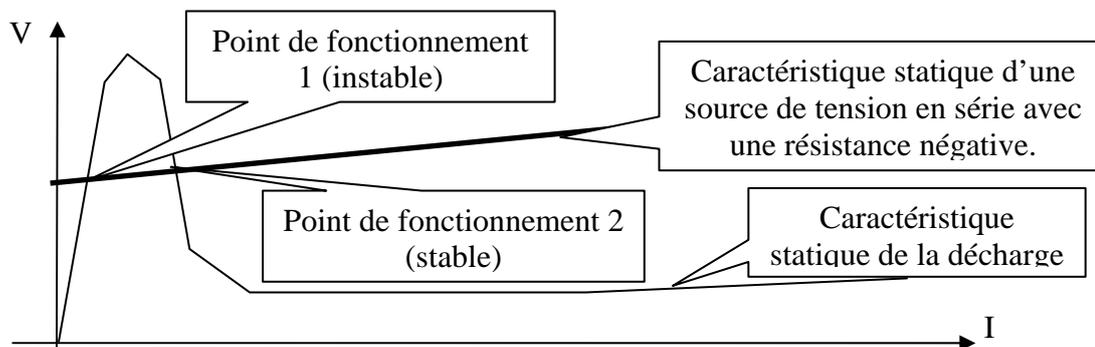


Figure 22 : Cas de l'association d'une décharge électrique avec source de tension en série avec une résistance négative

On obtient deux points de fonctionnement similaire à ceux de la Figure 19. A la différence notable qu'on peut atteindre une autre zone de fonctionnement puisque ici, c'est le point de fonctionnement 2 qui est stable. Cependant, on peut constater (Figure 22) que cette alimentation ne permet pas d'alimenter une charge résistive. Sa mise au point n'est donc envisageable que pour l'alimentation de décharges électriques.

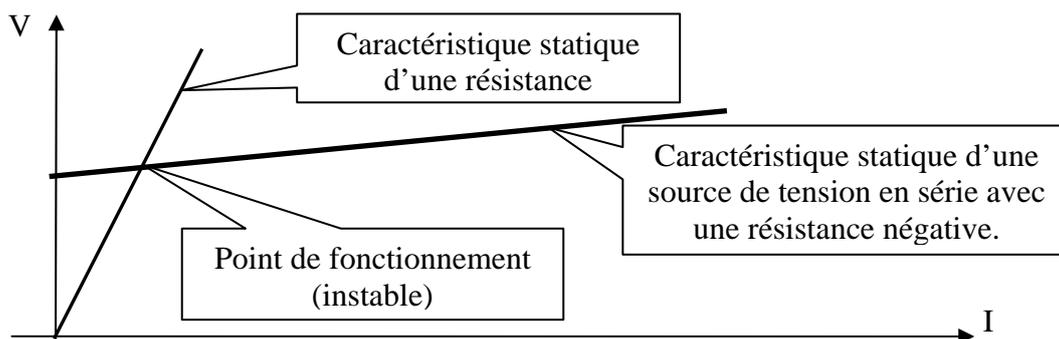


Figure 23 : Cas de l'association d'une résistance avec source de tension en série avec une résistance négative

◆ *Variation du point de fonctionnement*

Aussi bien en ce qui concerne le générateur qu'en ce qui concerne les dispositifs à décharge, on peut être amené à observer des variations de la caractéristique statique autour d'une valeur moyenne. Ceci a pour conséquence le fait que le point de fonctionnement peut varier autour d'un point nominal à cause des variations des caractéristiques statiques.

Par exemple (Figure 24), dans le cas d'une alimentation composée d'une résistance  $R$  en série avec source de tension continue qui présente une ondulation  $\Delta E$  autour de sa valeur moyenne  $E$ , on peut voir que cette variation entraîne une ondulation sur le courant de la décharge (en supposant que la caractéristique statique de la décharge reste fixe) autour d'un courant moyen.

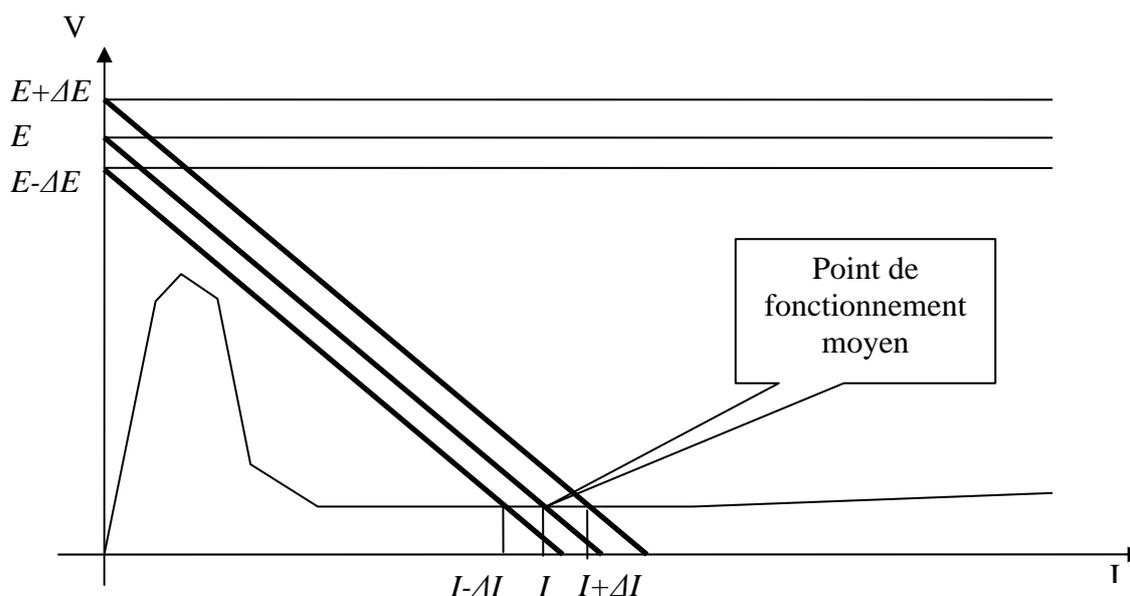


Figure 24 : Ondulation de courant due à l'ondulation de tension

Un autre cas de variation du point de fonctionnement correspond à une variation de la caractéristique statique du dispositif à décharge. Dans le cas d'une décharge glissante par exemple, la longueur de l'arc augmente durant le fonctionnement. Cette augmentation de la longueur fait croître la tension, vue des bornes du dispositif, à courant débité dans le circuit identique. Dans le plan tension/courant nous supposons que cette augmentation correspond à un transformation homothétique (selon l'axe de la tension) de la caractéristique statique du dispositif (Figure 25).

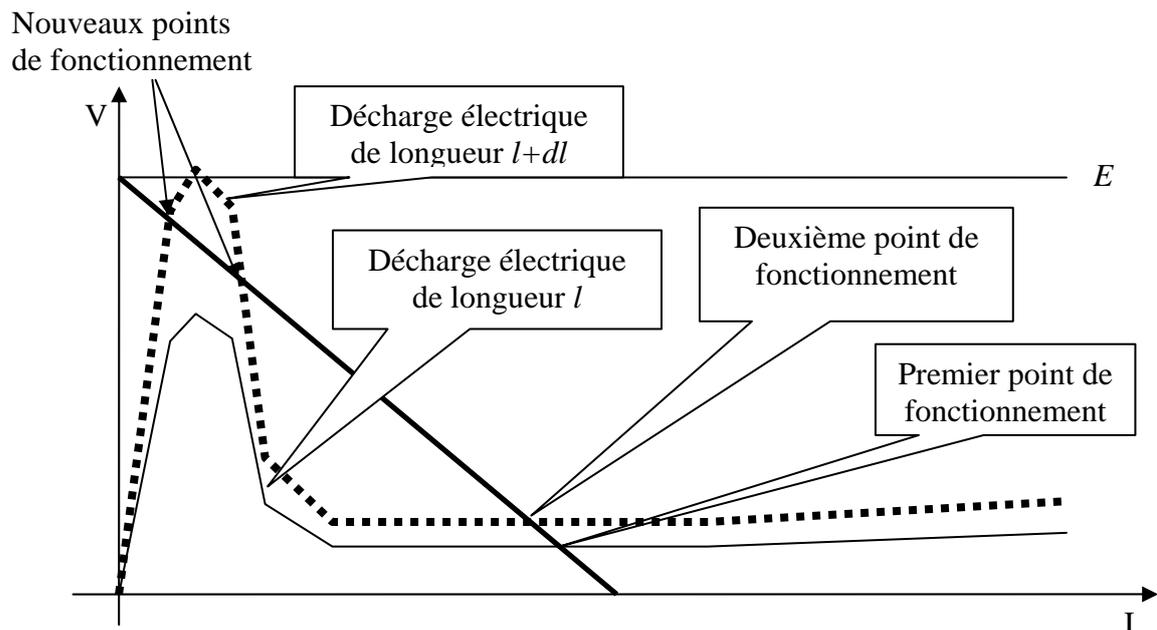


Figure 25 : Variation du point de fonctionnement due à la charge

Dans ce cas, c'est la variation de la caractéristique statique de la décharge qui engendre des variations du point de fonctionnement. On peut voir ainsi que cette variation de la longueur de l'arc crée d'autres intersections entre la caractéristique de la décharge et celle de l'alimentation. Une analyse conforme à celle du paragraphe précédent montre qu'à la suite de cette variation, il y a deux points de fonctionnement stables et un point de fonctionnement instable. En effet, les deux nouveaux points de fonctionnement sont analogues à ceux étudiés dans l'exemple sur l'étude de la stabilité.

### b) Conclusion sur les couplages

Le point de fonctionnement électrique du système dépend donc des caractéristiques de la source et du dispositif à décharge. Une analyse des caractéristiques statiques de la source et du dispositif à décharge permet de connaître ou de choisir le point de fonctionnement du système. Cette analyse donne des conditions nécessaires à l'obtention d'un point de

fonctionnement mais ces conditions ne sont pas suffisantes. La connaissance des conditions suffisantes résultera de l'étude des caractéristiques dynamiques de l'alimentation et du dispositif de décharge. Cette étude sera également complétée dans les chapitres 4 et 5 par des cas expérimentaux.

Il résulte de l'étude de la stabilité, et sous réserve que l'on se ménage la possibilité de mettre au point des générateurs dont les impédances internes aient les caractéristiques adéquates, qu'il n'y a donc aucun point de fonctionnement (électrique) inatteignable dans la caractéristique statique d'un dispositif à décharge. La seule condition à remplir est de disposer d'une source électrique adéquate. La disponibilité des sources électriques permettant d'atteindre certains points n'est pas évidente. En effet, il existe peu d'alimentations conçues spécifiquement pour les décharges et celles-ci sont souvent des adaptations et des optimisations d'alimentations déjà existantes.

Le cas d'une source de tension à résistance interne négative (Figure 22) est un exemple d'alimentation qui ne serait capable d'alimenter que des décharges électriques (ou des charges à résistance négative) et qui n'a même pas de point de fonctionnement stable avec une résistance ! Il n'y a donc pas d'études possibles pour des alimentations de ce genre, en dehors du cadre de recherches sur les interactions entre source électrique et dispositif de décharge.

Ces remarques révèlent donc l'existence d'un champ d'investigations important, concernant les alimentations de décharges électriques afin d'optimiser et de mieux contrôler les points de fonctionnement de la décharge.

Cependant, pour étudier ces alimentations, on ne peut se contenter, comme cela a été fait jusqu'à ce point, de raisonner sur les caractéristiques statiques de la décharge ; il est nécessaire de mieux comprendre le comportement électrique des dispositifs à décharges :

- d'une part pour savoir quels sont les phénomènes prépondérants qui déterminent la caractéristique statique d'un dispositif à décharge ;
- d'autre part pour caractériser son comportement dynamique.

### c) Caractéristique du gaz ionisé

On cherche ici à connaître la caractéristique statique, dans le plan tension/courant, des dispositifs à décharges. Chaque dispositif a sa caractéristique propre et on s'intéresse ici à établir les éléments principaux dont cette caractéristique est issue.

Examinons, à titre d'exemple, la caractéristique statique d'un volume d'air compris entre deux électrodes de type pointe, pour différentes distances inter électrode.

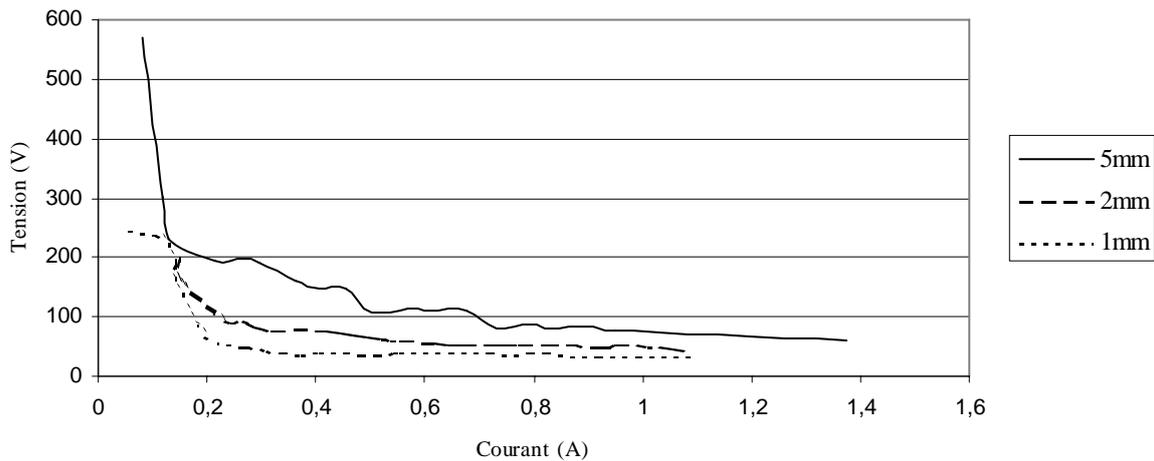


Figure 26 : Caractéristique tension/courant du gaz pour 1, 2 et 5mm

On retrouve bien la forme caractéristique présentée au début (page 26) à l'exception de la zone à courant nul que nous n'avons pas caractérisée expérimentalement.

Il faut souligner ici que l'utilisation de grandeur telle que le courant et la tension est inappropriée vis à vis de la physique ainsi que d'une description générale des décharges électriques ; nous justifions maintenant les termes de cette remarque. La caractéristique statique présentée ici est celle d'un arc avec une distance inter électrode de 1 à 5mm, à la pression atmosphérique, avec une composition du gaz précise et avec une certaine géométrie des électrodes. Si la pression est plus faible, alors la tension de claquage est plus faible ; si les pointes sont plus affûtées, la tension de claquage diminue également.

La grandeur physique que subit un volume élémentaire de gaz est un champ électrique et ce champ électrique sera la cause d'un courant local ; il faut noter que ces deux grandeurs sont *locales* et peuvent connaître des variations d'un point à l'autre de la décharge. Donc, la caractéristique invariante d'un gaz seul est une caractéristique, champ électrique fonction d'un courant local, puisque les phénomènes physiques de la décharge dépendent du champ électrique (et non de la tension aux bornes) et du courant local (et non du courant total).

Ainsi, la caractéristique tension/courant, vue des bornes d'un dispositif, résulte du couplage entre (Figure 27) :

- la caractéristique du gaz (à pression et composition données), qui associe au champ électrique, un courant local,
- la géométrie du dispositif, qui associe :
  - o à une tension donnée, un champ électrique
  - o aux courants locaux, le courant total.

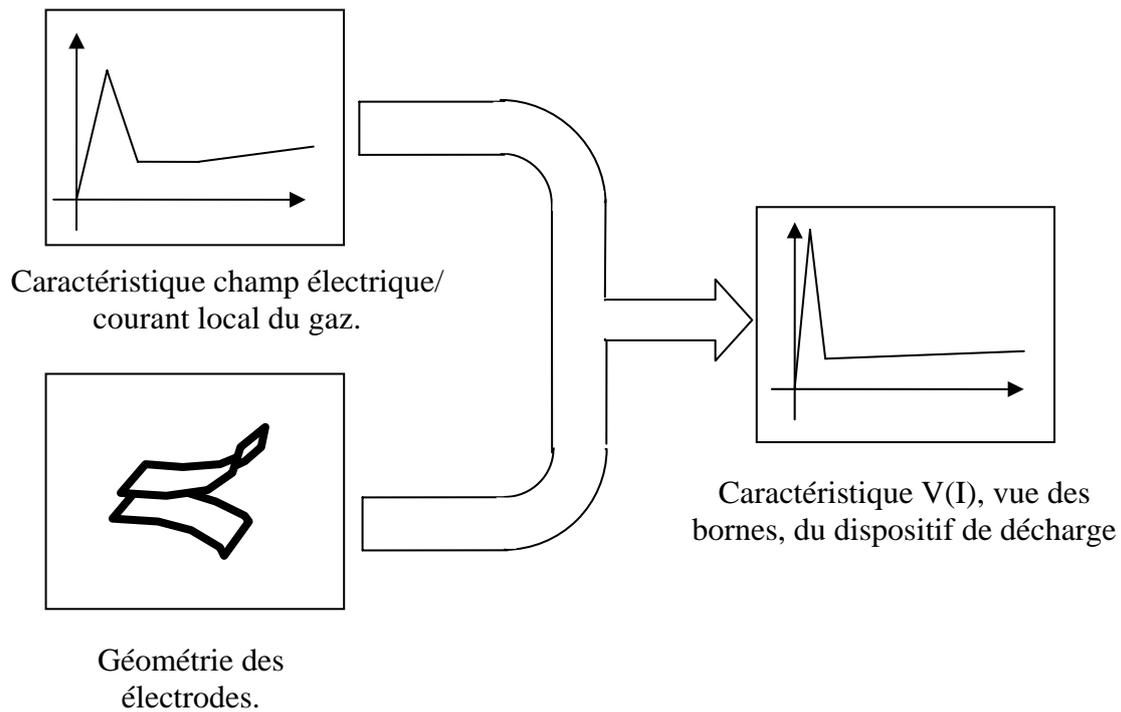


Figure 27 : Origine de la caractéristique  $V(I)$  d'un dispositif de décharge

On ne peut donc pas présenter une caractéristique statique du gaz générale dans le plan tension/courant puisque celle-ci est propre à la géométrie de chaque dispositif associé à un gaz ; néanmoins dans la majorité des cas, elle aura une forme analogue à celle présentée ici.

Si on veut être assez complet dans la compréhension électrique des dispositifs à décharge, il faut prendre en compte les deux contributions (celle liée à la géométrie ainsi que celle qui est caractéristique du gaz). On étudie donc maintenant les principales grandeurs et les principaux phénomènes de la physique des plasmas qui définissent les caractéristiques électriques statique et dynamique du gaz.

## 2) Phénomènes physiques et formulations mathématiques

On montre ici les phénomènes que nous prenons en compte pour décrire le comportement électrique des plasmas.

### a) Grandeurs physiques considérées

Pour étudier les phénomènes électriques dans le gaz, il faut prendre en compte certaines grandeurs électriques prépondérantes dans l'espace inter électrodes. On présente ici ces grandeurs, ainsi que leurs influences sur les caractéristiques électriques d'un dispositif à décharge.

◆ *Champ électrique*

Le champ électrique est la grandeur qui est une des principales causes de la création des décharges électriques dans cette étude. Pour analyser les phénomènes électriques se produisant dans la décharge, il est nécessaire de connaître en chaque point de l'espace de la décharge la valeur de ce champ. Il peut être calculé en utilisant l'équation de Poisson (Équation 1) ou en calculant la somme des contributions générées par les charges présentes dans tout le système (charges réparties dans le gaz, et charges présentes sur les surfaces des électrodes) (Équation 2).

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

*Équation 1 : Equation de poisson*

$$\vec{E} = \iiint_{\Sigma} \frac{\rho}{r^2 \varepsilon_0} \vec{u}_r dr$$

*Équation 2 : Calcul direct du champ*

◆ *Champ magnétique*

Les champs magnétiques peuvent être également utilisés pour générer des décharges. Pour les points de fonctionnement que nous étudions dans ces travaux, nous négligeons l'influence du champ magnétique. Deux raisons expliquent ce choix :

- d'une part, nous n'appliquons pas de champ magnétique à l'aide d'une interface entre la source électrique et le gaz (inductance) ;
- d'autre part, nous considérons les forces dues au champ magnétique induit par le courant dans le gaz comme négligeables face aux forces électriques présentes dans le gaz pour les montages que nous utilisons (courant inférieur à 1A).

En effet, les champs électriques présents dans le gaz sont de l'ordre de  $10^4 \text{V.m}^{-1}$  (10 V sur 1mm par l'Équation 7) ce qui génère une force sur un électron de l'ordre de  $10^{-15} \text{N}$ .

$$\vec{F}_E = q_e \vec{E}$$

*Équation 3 : Force due au champ électrique subie par un électron*

- $q_e$  : charge unitaire d'un électron en Coulomb  $1.6e^{-19}$
- $E$  : champ électrique local en  $\text{V.m}^{-1}$ .

- $F_E$  : force due au champ électrique en Newton.

Le champ magnétique induit est de l'ordre de 0.1mT (à 1mm d'une ligne de courant de 1A par l'Équation 4) ce qui génère une force de Lorentz de l'ordre de  $1e^{-16}$  N sur un électron.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

*Équation 4 : Champ magnétique créé par une ligne de courant à une distance  $r$*

- $\mu_0$  : perméabilité magnétique du vide :  $4\pi \cdot 10^{-4} \text{ H.m}^{-1}$ .

$$\begin{aligned} \vec{F}_B &= q_e \vec{v} \wedge \vec{B} \\ \vec{v} &= w_e \vec{E} \end{aligned}$$

*Équation 5 : Force de Lorentz*

- $w_e$  : mobilité des électrons  $394 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$

Le rapport entre ces forces peut donc s'écrire :

$$\left\| \frac{\vec{F}_E}{\vec{F}_B} \right\| = \frac{1}{w_e \|B\|}$$

Pour un champ magnétique de  $10^{-4}$  T, le rapport entre les forces magnétiques et électrique est de l'ordre de 25.

### ◆ Courants locaux

Le courant local dans un gaz comporte deux composantes :

- un courant de conduction ;
- un courant de déplacement.

Le courant de conduction électrique peut s'exprimer comme un flux de charge à travers une surface. Dans le cas des circuits électriques couramment utilisés en électronique de puissance, le terme « courant de conduction » correspond à la quantité totale de charges circulant dans un fil. En effet, l'étude de la répartition des densités surfaciques de courant dans le fil n'a pas d'intérêt en électronique de puissance (mis à part les effets de peau pour le dimensionnement des conducteurs), puisque toutes les lignes de courant restent à l'intérieur du fil et leur répartition n'a qu'un faible impact sur le comportement tension/courant du fil (hors effet de peau).

Ce n'est pas le cas dans l'étude d'une décharge électrique dans un gaz puisqu'il n'y a pas, a priori, de chemin privilégié pour le passage des charges ; ceci implique des variations géométriques de la décharge dans le temps. Ces variations géométriques impliquent des variations du comportement tension/courant vu des bornes de la décharge.

Le courant de déplacement correspond à la variation du champ électrique dans le gaz. Ce courant, non porteur de puissance moyenne mais de puissance instantanée pour l'alimentation, est souvent négligeable dans le cas de décharges thermiques lorsque le champ électrique varie peu.

$$\vec{j}_{dep} = \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$$

*Équation 6 : Courant surfacique de déplacement*

Dans le cas où le lieu de la décharge varie, on est conduit à calculer la valeur des courants locaux, de conduction et de déplacement, traversant des surfaces élémentaires  $dS$  orthogonales aux lignes du courant.

◆ *Tension et courant global*

A partir des courants locaux et du champ électrique à l'intérieur du dispositif où a lieu la décharge (que nous appellerons réacteur), on peut déduire la tension totale et le courant total vu des bornes de la décharge.

La tension est calculée en intégrant le champ électrique sur un chemin allant d'une borne du réacteur à l'autre. Le signe choisi en facteur de cette intégrale impose la convention (récepteur ou générateur) utilisée.

$$V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

*Équation 7 : Calcul de la tension avec une convention récepteur*

Le courant total  $I$ , du dispositif à décharge, est calculé en faisant la somme, sur toute la surface d'une électrode, des courants surfaciques locaux (de déplacement et de conduction). Par exemple, dans le cas d'une électrode en pointe, on calcule les courants locaux autour de la pointe et on fait la somme de ces courants pour connaître le courant total que fournit le générateur.

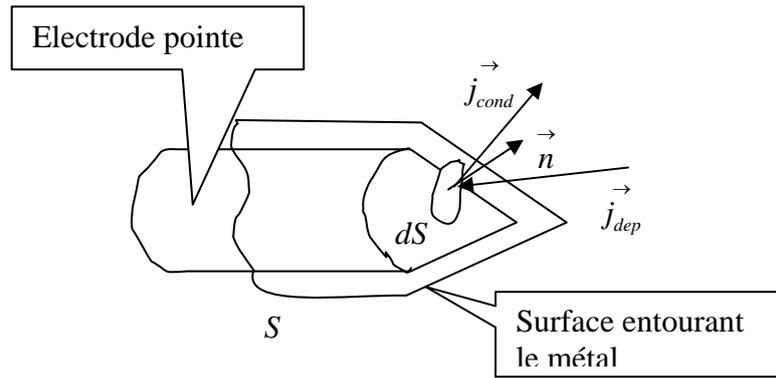


Figure 28 : Notation utilisé pour le calcul du courant total

$$I = \iint_S \left( \vec{j}_{cond} + \vec{j}_{dep} \right) \cdot \vec{n} dS$$

Équation 8 : Courant total dans le dispositif

### b) Phénomènes électriques de base de la décharge

La plupart du temps le gaz est considéré comme un très bon isolant ; comment celui-ci peut-il devenir un excellent conducteur ? Pour être un bon conducteur, un élément doit disposer de porteurs de charges ; cela équivaut à dire qu'il existe deux états limites possibles pour le gaz :

- un état non ou faiblement ionisé, dans lequel il peut être considéré comme isolant ;
- un état fortement ionisé, riche en porteurs de charges, dans lequel on le considère comme conducteur.

L'explication du passage de l'état isolant à l'état conducteur permet de présenter les phénomènes électriques locaux se déroulant dans le gaz.

Les phénomènes que nous décrivons dans les paragraphes suivants ne sont pas exhaustifs. Ce sont ceux que nous avons pris en compte pour étudier le comportement électrique du gaz. A la suite de ce « catalogue », nous montrons comment nous procédons à l'assemblage des équations qui décrivent ces différents phénomènes, pour construire une modélisation électrique de la décharge.

**Remarque :** on donne des illustrations de ces phénomènes dans le cas de l'azote. En effet, des décharges dans l'air peuvent provoquer la création d'ozone, qui est un composant nocif pour la santé. Les expériences menées au laboratoire sont donc majoritairement effectuées sous azote à pression atmosphérique.

◆ *Ionisation permanente*

Tous les gaz, du fait des radiations solaires, sont faiblement ionisés [13]. L'énergie apportée par les radiations solaires crée des porteurs de charges suivant la réaction et le schéma ci-dessous (cas de l'azote) :



*Équation 9 : Création de charge par bombardement solaire*



*Figure 29 : Création de charge par bombardement solaire sur des molécules d'azote*

L'effet de cette ionisation peut être observée si on applique une tension à un gaz : un faible courant, fonction de la distance entre les électrodes et de la surface de celles-ci, apparaît alors dans le gaz. Cette ionisation varie d'un gaz à un autre, et peut être augmentée en chauffant le gaz ou en utilisant des micro ondes.

Même ionisé, le gaz reste globalement neutre.

◆ *Les flux de charges*

La connaissance des flux de charges est nécessaire au calcul des courants de conduction. Les charges se déplacent et génèrent un flux sous deux principaux effets : le champ électrique et la diffusion. Dans cette partie, on établit comment se forme le flux de charges pour une densité  $[n]$  de particules chargées.

Lorsqu'on établit un champ électrique dans un gaz, les charges ionisées subissent une force qui les entraîne de part et d'autre du gaz. En effet, si on effectue un premier bilan des forces subies par une charge présente dans un champ  $\vec{E}$  (en négligeant le poids, celui-ci étant négligeable devant la force créée par le champ électrique), on voit que celle-ci est entraînée de manière colinéaire à  $\vec{E}$ , avec un sens défini par le signe de sa charge  $Q$ .

$$m \dot{\vec{v}} = Q \vec{E}$$

*Équation 10 : Bilan des forces d'une particule chargée dans un champ électrique*

- $m$  : masse de la particule chargée en Kg.

- $Q$  : charge de la particule chargée en Coulomb.

Le premier bilan des forces tend à montrer que la particule ionisée finirait par avoir une vitesse infinie (par intégration de l'Équation 10) ; cela n'est évidemment pas le cas puisque celle-ci entre en collision avec d'autres particules non ionisées (majoritaires dans le milieu), ce qui limite sa vitesse. C'est ce qu'illustre la Figure 30 où un électron, ayant une vitesse initiale  $v_{pc}^1$ , entre en collision avec une molécule neutre possédant une vitesse initiale  $v_{pn}^1$ . Après cette collision élastique, l'électron a une vitesse  $v_{pc}^2$  plus faible que  $v_{pc}^1$  et la molécule neutre une vitesse  $v_{pn}^2$  plus importante que  $v_{pn}^1$ .

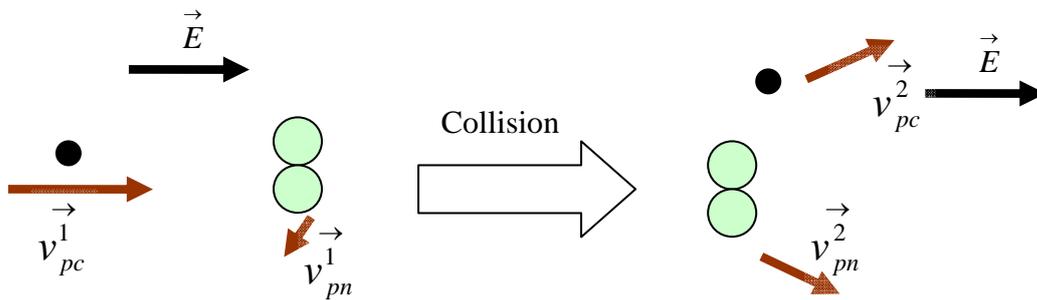


Figure 30 : Collision entre un électron et une molécule d'azote

Cette collision entre un électron et une autre particule provoque un échange d'énergie cinétique (loi de conservation de l'énergie cinétique Équation 11) entre les deux particules, ainsi qu'un changement de direction (conservation de la quantité de mouvement Équation 12).

$$\frac{1}{2}m_{pc}v_{pc}^1{}^2 + \frac{1}{2}m_{pn}v_{pn}^1{}^2 = \frac{1}{2}m_{pc}v_{pc}^2{}^2 + \frac{1}{2}m_{pn}v_{pn}^2{}^2$$

Équation 11 : Conservation de l'énergie cinétique

$$m_{pc} \vec{v}_{pc}^1 + m_{pn} \vec{v}_{pn}^1 = m_{pc} \vec{v}_{pc}^2 + m_{pn} \vec{v}_{pn}^2$$

Équation 12 : Conservation de la quantité de mouvement

- $m_{pc}$  masse de la particule chargée (ici électron) en Kg.
- $m_{pn}$  masse de la particule neutre (ici molécule d'azote) en Kg.

Les collisions se produisent de manière statistiquement périodique selon une fréquence qui est fonction de la densité des particules présentes dans le gaz (pression), de la valeur du champ  $\vec{E}$  et de la taille des particules ionisées [13] [15].

Dans la plupart des cas (pression constante, gaz homogène), on considère que la vitesse moyenne d'une particule (électrons, ions) est directement proportionnelle au champ électrique local, avec un facteur de proportionnalité appelé mobilité des porteurs  $w$ , propre à chaque type de particule.

$$\vec{v} = w \vec{E}$$

*Équation 13 : Vitesse moyenne d'une particule chargée sous un champ E*

- $w$  mobilité des porteurs de la particule considérée en  $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{sec}^{-1}$ .

On considère chaque espèce présente dans le milieu par sa densité volumique ( $[n]$ ), c'est à dire, dans cas le cas des électrons par exemple, le nombre d'électrons présents dans un mètre cube.

Chaque densité volumique locale de particules chargées, notée  $[n]$ , dont la mobilité est notée  $w$  et qui subit un champ électrique  $\vec{E}$ , se déplace donc à la vitesse moyenne calculée dans l'Équation 13 ; cela crée un courant de conduction surfacique  $j_{elec}$ . Ce courant surfacique, intégré sur une surface permettra de connaître le courant traversant celle-ci (Équation 17).

$$\vec{j}_{elec} = Q[n]w \vec{E}$$

*Équation 14 : Courant de conduction surfacique dû au champ électrique*

- $[n]$  densité volumique de particules en  $\text{m}^{-3}$ .
- $Q$  quantité de charges pour une particule en coulomb.

A ce courant de conduction, calculé pour chaque espèce présente dans le milieu, il faut ajouter un courant surfacique diffusif suivant la loi de Fick.

$$\vec{j}_{diff} = -Q\eta \text{grad}([n])$$

*Équation 15 : Loi de Fick*

- $\eta$  coefficient de diffusion des particules  $\text{m}^2\text{sec}^{-1}$ .
- $Q$  quantité de charges par particule.

On connaît alors le courant de conduction surfacique total en sommant les deux contributions dues au champ électrique et à la diffusion.

$$\vec{j} = \vec{j}_{elec} + \vec{j}_{diff}$$

*Équation 16 : Courant de conduction surfacique total.*

Chaque espèce chargée présente dans le gaz crée donc un courant de conduction qui peut être évalué en intégrant les courants de conduction surfaciques à travers les surfaces où on veut évaluer le courant.

◆ *Courant de conduction local*

Le courant de conduction total traversant une surface élémentaire  $dS$  est calculé en faisant la somme des courants de conduction surfacique sur cette surface.

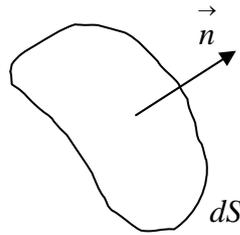


Figure 31 : Courant à travers une surface  $dS$

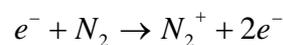
$$I = \iint_S \vec{j} \cdot \vec{n} dS$$

Équation 17 : Calcul du courant local à partir du courant surfacique.

Ces courants locaux induisent une répartition de charges dans l'espace qu'il faut prendre en compte pour calculer le champ électrique local. De plus, c'est la somme de ces courants, aux voisinages des électrodes, qui, additionné aux courants de déplacement, forme le courant que l'alimentation électrique fournit au dispositif à décharge.

◆ *Le phénomène d'avalanche, création de charge*

Les phénomènes décrits précédemment n'impliquent pas la création de particules ionisées mais elles permettent de les introduire. En effet, nous avons vu que, lors de leurs déplacements, les particules ionisées heurtent régulièrement des particules non ionisées. Lors de ces collisions, si la particule chargée a atteint une vitesse critique, la réaction devient créatrice de charge. Ce type de collision correspond plus à ce qui est décrit page 40. On montre ici le phénomène de première ionisation pour l'azote [13] [15].



Équation 18 : Première ionisation de l'azote



Figure 32 : Première ionisation de l'azote

Cela se produit d'autant plus fréquemment que le champ électrique local est intense et qu'il y a de nombreuses particules ionisées. Un terme statistique permet d'évaluer la quantité de charges produites par unité de volume et de temps. Ce terme est, lors de l'établissement de la décharge, majoritairement déterminé par l'intensité du champ (pour la vitesse) et la densité d'électrons (puisque ce sont les plus rapides) dans le gaz. Ce terme, croissant avec le champ électrique et la densité d'électrons, dépend aussi de la composition du gaz, de sa pression et de sa température. On connaît une expression de ce terme pour de l'azote à pression atmosphérique [24].

$$11.9 \times 10^5 \times \|E\| [n_e] e^{-\frac{15.8 \times 10^4}{\|E\|}}$$

*Équation 19 : Quantité de charges produites par unité de volume et de temps pour l'azote à pression atmosphérique.*

La rapidité du phénomène d'avalanche est confirmée par le fait que la valeur de la fréquence d'ionisation augmente avec la quantité de charges présentes dans le gaz ; en effet, à chaque période de la fréquence d'ionisation, la population d'électrons double.

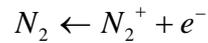
**Remarque :** Le claquage d'un gaz est plus facile à faible pression qu'à forte pression, puisque la fréquence de collision est plus faible : à champ électrique égal, la vitesse acquise par les charges est plus importante, donc la probabilité de création de charges est plus importante.

Le phénomène que l'on décrit ici est l'ionisation primaire, qui crée un électron à partir d'une collision entre une particule neutre et un électron. Lorsqu'un électron entre en collision avec une particule déjà chargée une fois et que cette collision crée une deuxième charge, on parle d'ionisation secondaire. Par ionisations successives, on retrouve de plus en plus d'espèces différentes dans le gaz (dans le cas du  $SF_6$  utilisé dans les disjoncteurs, on peut compter jusqu'à 36 espèces différentes lorsqu'il y a production de plasma [17] !!).

Ce processus de création augmente fortement le nombre de porteurs charges et donc, par conséquence, la conductance globale du gaz vue des bornes du dispositif. Il est donc important de bien comprendre et modéliser ce phénomène.

◆ *La recombinaison*

Les particules chargées de signes opposés ont tendance à s'attirer et à se recombiner [13] [15].



*Équation 20 : Equation de recombinaison*



*Figure 33 : Recombinaison d'un électron avec un ion positif*

La réaction décrite ici est l'inverse de la première ionisation. En fait la particule non chargée issue de cette réaction est dans un état excité mais nous négligerons les phénomènes résultants de cet état. La quantité de charge qui se recombinaison est, dans le cas de l'azote à pression atmosphérique, proportionnelle à la densité d'ions et d'électrons à un facteur  $\alpha$  (facteur de recombinaison) près.

$$\alpha[n_e][n_i]$$

*Équation 21 : Quantité de charges se recombinant par unité de volume et de temps*

La recombinaison fait baisser le nombre de porteurs de charges et, mécaniquement, la conductance vue des bornes du gaz.

◆ *Les charges d'espaces*

La création des espèces chargées, les courants d'ions (courants ioniques) et les courants des électrons (courants électroniques) ont pour effet de diminuer le champ électrique local. On peut faire le parallèle avec la loi de Lenz puisque le courant de conduction local dans le gaz tend à faire diminuer le champ qui l'a créé.

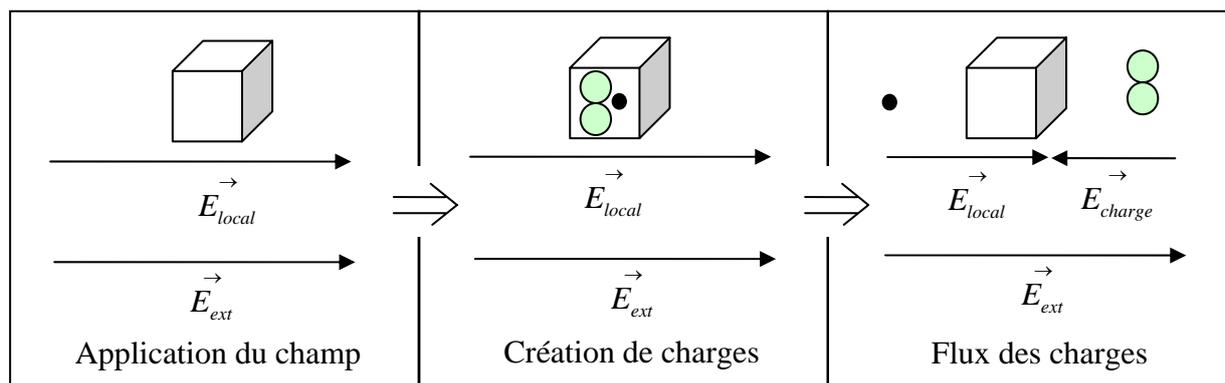


Figure 34 : Réaction d'un volume de gaz à un échelon de charge

Un volume élémentaire subissant un champ électrique extérieur a, initialement, un champ local égal au champ extérieur (Figure 34 case de gauche). A cause de ce champ (s'il est suffisamment élevé), il se crée des charges électriques, le gaz restant globalement neutre (autant de charges positives que de charges négatives ; Figure 34 case du milieu). Tant que ces charges restent dans le volume, le champ local ne varie pas. Cependant, le déplacement de ces charges, lorsqu'elles quittent le volume élémentaire à cause du champ électrique, crée un champ électrique qui a un sens opposé au champ qui a engendré la création et le déplacement de ces charges. Le champ électrique local diminue donc puisqu'il est la somme du champ électrique extérieur et du champ électrique dû aux charges (Figure 34 case de droite).

Donc, un volume élémentaire de gaz crée un courant de conduction pour s'opposer au champ électrique qu'il subit. C'est un phénomène stabilisateur qui limite le courant dans le gaz. Les charges présentes dans le gaz sont appelés « charges d'espaces ».

Ayant une influence sur le champ électrique local ainsi que sur les courants dans le gaz, il est nécessaire, dans certain cas, de les prendre en compte pour simuler le comportement électrique du gaz.

### c) Influences des caractéristiques du réacteur sur le comportement électrique de la décharge

Ce que nous appelons « réacteur » est le lieu où se développe la décharge ; le volume correspondant inclut les électrodes. Nous voulons montrer qu'en fonction du type de réacteur, les points de fonctionnement accessibles ne sont pas les mêmes.

#### ◆ Type d'électrode

Nous ne rentrons pas dans le détail de ce qu'il se passe au voisinage des électrodes. En effet, elles sont soumises à un échauffement et un rayonnement important, ce qui fait varier

localement leurs caractéristiques (conductivité électrique et thermique, état solide ou en fusion, rayonnement lumineux). Néanmoins, il y a une différence essentielle à prendre en compte au niveau de la dynamique électrique de la décharge selon que les électrodes sont conductrices ou non-conductrices.

En effet, lorsque les charges arrivent aux niveaux des électrodes, deux cas de figure se présentent :

- soit l'électrode est conductrice, alors la charge repart dans le circuit d'alimentation ;
- soit elle ne l'est pas et la charge électrique est arrêtée au voisinage de l'électrode.

Comme nous l'avons vu précédemment, le gaz « utilise » les charges produites pour abaisser son champ local (via les charges d'espace -- page 45). Celles-ci ont donc un rôle de limitation du courant puisque tant que le champ local reste élevé, le gaz crée un courant pour le faire diminuer. Donc toute création de courant est auto limitative puisque les charges limitent le champ électrique, et donc le courant dans le gaz. Cependant, si les électrodes sont conductrices, les charges, présentes dans le gaz, passent dans le circuit électrique et se recombinent. Le courant dans le gaz n'est donc limité que par la présence des charges « en transit » entre leur lieu de création et l'électrode où elles vont. Alors que dans un cas où les électrodes ne sont pas conductrices, les charges ne peuvent pas quitter le gaz et donc toutes les charges créées limitent le courant.

### ◆ *Flux de Gaz*

Il est possible que le procédé qui recourt à la décharge électrique requière un flux de gaz (un déplacement gazeux) dans les milieux où se développent ces décharges. Dans les applications de soudure à l'aide de plasma, on peut avoir recours à des flux de gaz pour « protéger » le jet de plasma vis à vis de l'air ambiant. Dans des réacteurs chimiques, se sont les réactifs à l'état gazeux qui sont injectés dans le réacteur (vitesse de gaz inférieure au km/h) [15].

Il faut cependant noter qu'il existe des cas où c'est la décharge elle-même qui crée ce flux de gaz. Dans le cas de plasmas à fort courant, une dépression est créée au niveau des pointes à cause des forces magnétiques. Dans le cas d'une décharge à courant faible, l'échauffement peut créer un flux convectif qui déforme la décharge [13] [15]. On peut le constater facilement si on observe deux décharges pointe-pointe dans l'air ; l'une avec les pointes alignées horizontalement, l'autre avec les pointes alignées verticalement.

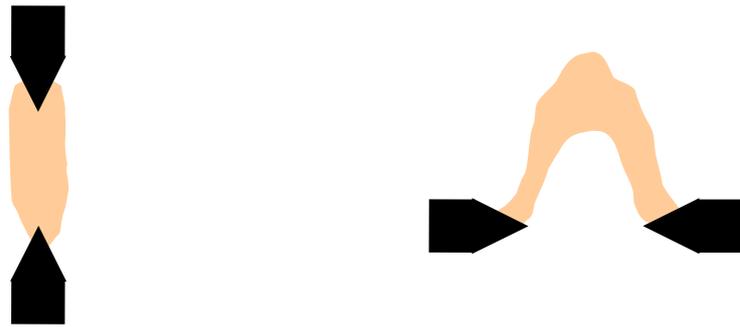


Figure 35 : Déformation d'un plasma pointe-pointe dû à la convection

Ces flux ont pour effet de déformer la décharge ; ils peuvent même, au cours du temps, générer une longueur, et donc une tension, d'arc périodique. Ces phénomènes doivent être pris en compte lors de la conception des alimentations qui alimentent ces décharges.

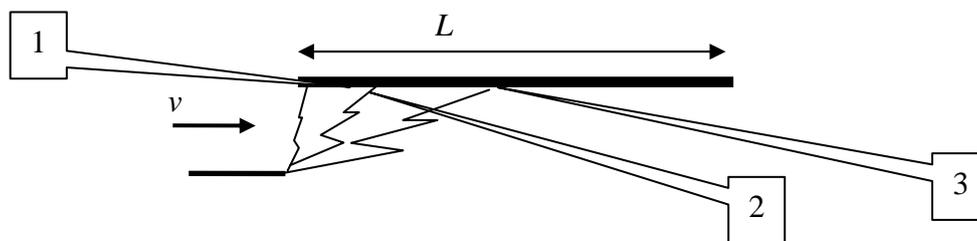


Figure 36 : Cas d'une décharge pointe-plan sous un flux de gaz

Dans le cas d'une décharge pointe-plan sous flux de gaz, le chemin de l'arc va de la pointe au plan. Le lieu où arrive l'arc sur le plan est, lors du premier claquage au niveau où la distance inter électrodes est la plus faible (en 1 sur la Figure 36). Par la suite, le flux de gaz déplace ce lieu en allongeant l'arc (en 2 sur la Figure 36) ; par conséquent la tension vue des bornes du dispositif augmente. Lorsque la tension devient suffisamment élevée, un arc se forme à l'espace inter électrode le plus court et éteint l'arc le plus long (en 3 sur la Figure 36). On a donc un phénomène périodique sur la tension.

#### d) Conclusion sur les caractéristiques électriques d'un dispositif

Les caractéristiques électriques d'un dispositif à décharge dépendent de paramètres géométriques (taille et forme de l'électrode), chimiques (composition du gaz) et physiques (type d'électrode).

La caractéristique statique générale a la forme décrite à la page 26. Cependant, la tension aux bornes à fort courant, la tension de claquage, ainsi que les limites du courant à partir

duquel la tension reste constante, croit ou décroît, dépendent des paramètres géométriques, du type d'électrodes ainsi que du type de gaz employé. Cela rend la prédictibilité d'une caractéristique statique difficile. On ne peut donc faire l'étude quantitative des caractéristiques statiques de l'alimentation décrite dans la première partie que si le dispositif existe physiquement et qu'une alimentation a permis de connaître au moins une partie de cette caractéristique statique.

De plus, dans certain cas, la caractéristique statique tension/courant, n'est pas une notion adéquate pour décrire le comportement électrique d'un dispositif à décharge ; le cas des arcs glissants, où la tension varie à courant constant, montre la limite de l'analyse statique. Il faut donc faire une analyse du comportement dynamique d'un dispositif. Pour cela, la modélisation et la simulation permettent de mettre en évidence certains comportements électriques dynamiques de la décharge.

On propose donc maintenant une modélisation dynamique des décharges, en se limitant à la prise en compte des phénomènes simples décrits précédemment. Cette restriction conduit à une modélisation simpliste, du point de vue de la physique des plasmas, mais suffisante du point de vue de la description du comportement électrique d'un dispositif à décharge.

### e) Modélisation générale

Nous présentons ici dans un premier temps un résumé des méthodes utilisées par les physiciens des plasmas pour réaliser des simulations permettant de caractériser les plasmas thermiques à l'équilibre et les plasmas hors équilibre.

Nous proposons ensuite la méthode que nous avons utilisée pour modéliser le plasma du point de vue électrique, et nous verrons comment elle se situe vis à vis des deux méthodes décrites initialement.

#### ◆ *Méthode utilisée pour les plasmas thermique à l'équilibre*

La méthode traditionnelle utilisée pour connaître l'état d'un plasma thermique à l'équilibre consiste à déterminer la température du plasma en tout point pour en déduire sa composition et ses caractéristiques. Cette modélisation est utilisée pour étudier la composition d'un plasma thermique présent, entre autre, dans les torches à plasma.

Cette méthode se base sur plusieurs équations aux dérivées partielles qui font le lien entre la température, l'énergie, la conservation de la masse et la conservation de la quantité de mouvement. Le plasma thermique est considéré comme un fluide ; alors les équations à traiter sont alors des équations semblables à celles utilisées en mécanique des fluides ; chaque

espèce représente un fluide avec ses caractéristiques et le plasma est un mélange de ces fluides [31].

On peut rarement résoudre ces équations de manière analytique. En effet, non seulement ces équations aux dérivées partielles sont complexes dans le cas général (hors symétrie permettant des simplifications) mais en plus il faut les résoudre pour chaque espèce présente dans le plasma étudié. Pour résoudre ces équations, on utilise des méthodes numériques en discrétisant l'espace de la décharge (lieu où se trouvent les espèces ionisées). Une fois les équations discrétisées, on pose une hypothèse de départ sur la cartographie de la température du gaz. A partir de cette température, on calcule une nouvelle température issue des équations discrétisées. Si la différence entre la cartographie de températures initiales et la cartographie de températures calculées n'est pas assez faible, on refait la même opération en prenant comme cartographie de températures initiales la dernière cartographie de températures calculées. Il y a donc plusieurs itérations jusqu'à ce que la cartographie de températures initiales soit suffisamment proche de la cartographie de températures calculées.

Avec ce type de méthode, la simulation de la coupure d'un disjoncteur sur 50  $\mu$ s nécessite 3 semaines de calcul avec un Pentium 4 à 2GHz.

#### ◆ *Cas des plasma hors équilibre*

Dans le cas des plasmas hors équilibre, c'est l'équation de Boltzmann des gaz faiblement ionisés qui est utilisée.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial n}{\partial \vec{r}} + \gamma \frac{\partial n}{\partial \vec{v}} = \left( \frac{\delta n}{\delta t} \right)_{\text{collisionnel}}$$

*Équation 22 : Equation de Boltzmann des gaz faiblement ionisés*

Cette équation est obtenue en étudiant à l'instant  $t$  le nombre de particules  $dn$  contenues dans un élément de volume  $dV$  situé autour de  $r$  ( $x, y, z$ ), ayant une vitesse  $v$  et subissant une force  $\gamma$ . Le terme de droite correspond aux termes de création et de recombinaison des charges dus aux processus collisionnels (page 43). Les trois termes de gauche correspondent, respectivement, à la variation de la densité locale de particules dans le volume  $dV$ , à la diffusion et à l'action des forces extérieures.

On utilise l'équation de Poisson pour connaître la valeur du champ électrique local. Dans le cas des décharges hors équilibre, on n'a généralement pas besoin de calculer le champ magnétique (se sont des décharges en hautes tensions et faibles courants).

Donc pour les décharges hors équilibre, il faut résoudre l'équation de Boltzmann pour chaque espèce ionisée dans le gaz pour connaître l'évolution des densités en fonction du temps. Comme pour la méthode décrite pour les décharges à l'équilibre, on ne dispose pas de solution analytique de l'équation de Boltzmann ; il est donc nécessaire de réaliser une discrétisation dans l'espace et de résoudre numériquement cette équation pour chaque espèce présente dans le gaz.

### ◆ *Récapitulatif des méthodes « traditionnelles »*

Dans les deux cas, la discrétisation de l'espace entre les électrodes est nécessaire ; il est donc probable que nous soyons contraints, dans certains cas, de faire une étude de la discrétisation de l'espace où a lieu la décharge.

La première méthode que nous avons décrite n'est utilisable que pour des plasmas thermiques, puisqu'elle postule que le plasma est à l'équilibre ; or, nous n'avons aucun moyen de garantir que les plasmas produits, aux points de fonctionnement électriques donnés, sont à l'équilibre.

La deuxième formulation ne pose aucune hypothèse sur les propriétés du plasma qui est simulé. Néanmoins, il faut connaître les espèces à étudier pour avoir une bonne modélisation dans le plan tension/courant.

### ◆ *Formulation proposée*

Nous utiliserons donc l'équation de Boltzmann pour modéliser les décharges que nous étudions. Compte tenu du fait que nous utilisons un modèle de plasma très simplifié, nous utilisons la forme suivante qui permet de dissocier les phénomènes dus aux transports des charges (courants électriques) des phénomènes dus à la création et à la disparition de charges (terme collisionnel).

$$\frac{d[n]}{dt} = \left( \frac{\partial[n]}{\partial t} \right)_{\text{transport}} + \left( \frac{\partial[n]}{\partial t} \right)_{\text{collisions}}$$

*Équation 23 : Formulation utilisée pour nos simulations*

- $[n]$  densité de particules en  $m^{-3}$

Cette formulation sert à étudier la variation de la quantité de particules d'un volume élémentaire autour d'un point donné. Cette variation est due au solde migratoire des particules (qui entrent ou qui sortent du volume considéré) et du bilan des créations et destructions de

particules (dus aux collisions dans ce volume). La dérivée dans le temps de la densité de particules est donc décomposée en deux dérivées partielles :

- la variation de densité due aux transports ;
- la variation de densité due aux phénomènes collisionnels (création et recombinaison de charges).

Si l'on considère que le gaz est formé de plusieurs espèces de particules, cette équation doit être résolue pour chacune d'entre elles. Puisque nous avons choisi de travailler dans l'azote, nous étudierons essentiellement les densités d'électrons et d'ions positifs ( $N_2^+$ ). Il semble difficile et inutile, dans l'état actuel de nos connaissances, de prendre en compte plus de type de particules. Nous avons donc un couple de deux équations aux dérivées partielles.

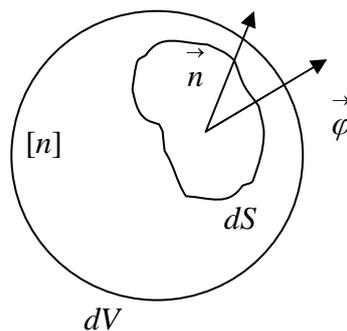
$$\frac{d[n_e]}{dt} = \left( \frac{\partial[n_e]}{\partial t} \right)_{transport} + \left( \frac{\partial[n_e]}{\partial t} \right)_{collisions}$$

$$\frac{d[n_i]}{dt} = \left( \frac{\partial[n_i]}{\partial t} \right)_{transport} + \left( \frac{\partial[n_i]}{\partial t} \right)_{collisions}$$

*Équation 24 : Equations aux dérivées partielles pour les ions et les électrons*

- $[n_e]$  densité d'électrons dans le volume étudié  $m^{-3}$ .
- $[n_i]$  densité d'ions positifs dans le volume étudié  $m^{-3}$ .

Le terme dû aux transports des particules est calculé en utilisant les flux d'ions et d'électrons développés page 40. Les termes de transport pour les ions et les électrons sont différents, puisque leur mobilité, ainsi que leurs coefficients de diffusion sont différents.



*Figure 37 : Notations utilisées*

On fait la somme des flux surfaciques sur toute la surface entourant le volume élémentaire  $dV$  pour calculer les variations de densité de charges  $[n_e]$  et  $[n_i]$ .

$$\left(\frac{\partial[n_e]}{\partial t}\right)_{transport} = \iint_S \vec{\varphi}_e \cdot \vec{n} dS$$

$$\left(\frac{\partial[n_i]}{\partial t}\right)_{transport} = \iint_S \vec{\varphi}_i \cdot \vec{n} dS$$

*Équation 25 : Calcul des termes de transport*

On peut donc calculer les termes de transport avec les expressions des flux suivantes :

$$\vec{\varphi}_e = \eta_e \vec{grad}([n_e]) + \omega_e [n_e] \vec{E}$$

$$\vec{\varphi}_i = \eta_i \vec{grad}([n_i]) + \omega_i [n_i] \vec{E}$$

*Équation 26 : Calcul des flux surfaciques d'ions et d'électrons*

- $w_e$  : mobilité des électrons en  $m^2V^{-1}sec^{-1}$ .
- $w_i$  : mobilité des électrons en  $m^2V^{-1}sec^{-1}$ .
- $\eta_e$  : coefficient de diffusion des électrons  $m^2sec^{-1}$ .
- $\eta_i$  : coefficient de diffusion des électrons  $m^2sec^{-1}$ .

Le terme noté collisionnel de l'Équation 24 est le bilan de création et de disparition de charge. Ces phénomènes ont été détaillés page 43 ; on utilise l'Équation 19 et l'Équation 21 pour connaître la valeur de ce terme. Sachant que nous ne considérons que deux espèces, les ions positifs et les électrons, le terme de création et de disparition est le même pour les deux. En effet, pour respecter la neutralité globale du gaz, il faut qu'il y ait autant de charges positives créées ou détruites que de charges négatives qui subissent le même sort.

Utilisant de l'azote à pression atmosphérique comme gaz plasmagène, on utilise les expressions des termes de créations et de disparitions de charges proposées par Joël POTIN au cours de sa thèse. [24]

$$\left(\frac{\partial[n_e]}{\partial t}\right)_{collisionnel} = 11.9 \times 10^5 \times \|E\| [n_e] e^{-\frac{15.8 \times 10^4}{\|E\|}} - 1e^{-5} [n_e] [n_i]$$

$$\left(\frac{\partial[n_i]}{\partial t}\right)_{collisionnel} = \left(\frac{\partial[n_e]}{\partial t}\right)_{collisionnel}$$

*Équation 27 : Bilan entre la création et la recombinaison des charges*

Les termes de création et de disparition de charges sont des termes difficiles à évaluer de manière théorique. En effet, ceux-ci dépendent fortement du type de gaz utilisé. Pour l'étude

d'autre gaz que l'azote, nous utilisons la même forme d'équation en réévaluant les paramètres à l'aide de méthodes numériques que nous détaillons dans le prochain chapitre.

Les courants surfaciques de conduction et de déplacement font varier la cartographie des densités de charges dans le dispositif. Une nouvelle cartographie des charges entraîne une variation de la cartographie du champ électrique (donc de la tension vue des bornes de la décharge).

La nouvelle cartographie du champ électrique impose à son tour des variations de densité de charge dues au déplacement et aux créations de charges dans l'espace inter-électrode.

Tous les phénomènes à prendre en compte apparaissent donc comme intimement couplés.

La figure suivante (Figure 38) présente l'ensemble des équations qui décrivent ces phénomènes ; ce graphe indique comment nous mettons en œuvre les couplages entre les différentes variables, à travers un enchaînement qui reflète la suite des causalités entre les relations.

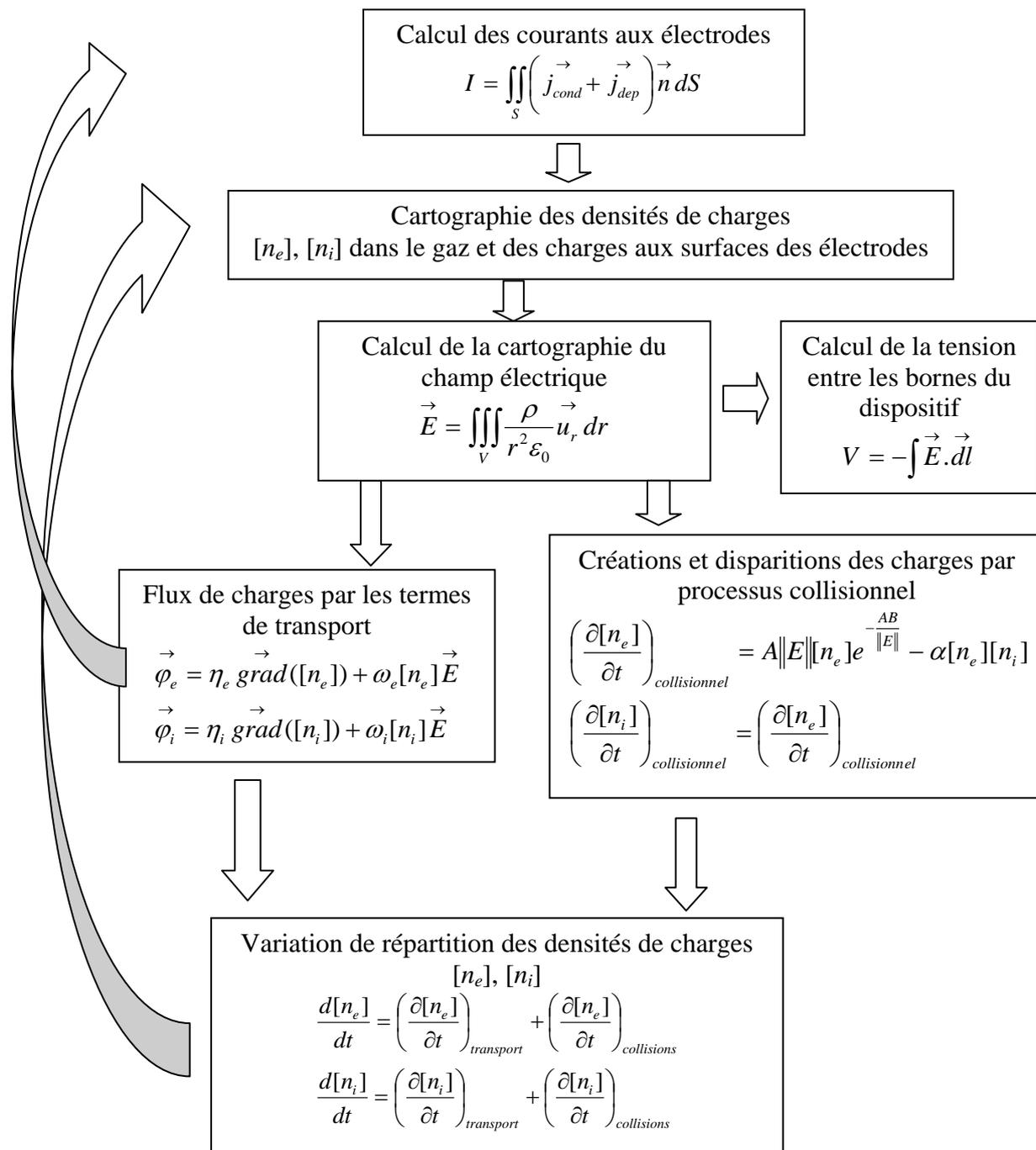


Figure 38 : Enchaînement des réactions dans la décharge qui imposent une relation entre le courant électrique total et la tension total

La formulation utilisée ici (Figure 38) montre les phénomènes en les décrivant dans le sens causal. Par exemple, la dernière case en bas du schéma montre que ce sont les flux de charges ainsi que les phénomènes collisionnels qui sont à l'origine des variations des densités locales de charges. De même cette variation de densité de charges locales entraîne une nouvelle cartographie de la densité de charges.

Nous allons voir maintenant comment utiliser la formulation proposée ci-dessus pour obtenir des modèles de type « dipôle électrique » des dispositifs à décharge. Ensuite, nous verrons dans quels cas, et comment, on doit discrétiser l'espace inter électrode pour simuler certains types de décharge.

### 3) *Modèle filamentaire*

A partir du modèle général présenté dans la partie précédente, on crée un modèle « vu des bornes » d'une décharge filamentaire.

#### a) *Modèle circuit de la décharge*

Le modèle complet de la décharge dont le comportement local a été décrit plus haut, est incomplet du point de vue de la physique des plasmas, même s'il s'en inspire, mais il reste encore très complexe vis à vis des grandeurs, tension/courant, qui nous intéressent. Il est donc important de faire un tri des informations qui sont indispensables à la bonne connaissance du courant et de la tension aux bornes de la décharge.

#### ◆ *Changement de variables*

Ce qui nous est effectivement utile est essentiellement la relation existant entre la tension et le courant. Cette relation dépend uniquement, au niveau du gaz, de la conductivité locale  $\sigma$  (pour calculer le courant de conduction) et de la densité de charge locale  $\rho$  (pour calculer le champ électrique). On note  $\sigma$  tel que :

$$\vec{j}_{conduction} = \sigma \vec{E}$$

*Équation 28 : Formulation du courant de conduction recherchée*

Il importe donc de bien connaître ces deux grandeurs ( $\sigma$  et  $\rho$ ) sans avoir à prendre en compte trop de variables intermédiaires. Dans le cas du modèle proposé, les quantités d'ions et d'électrons sont des variables intermédiaires qui permettent de connaître la relation tension/courant. On recentre, en effectuant un changement de variable, les équations générales sur la conductivité ( $\sigma$  en  $\text{ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$ ) et la densité locale des charges ( $\rho$  en Coulomb), en calculant ces deux grandeurs à partir des densités d'ions et d'électrons.

$$\begin{cases} \rho = q_e([n_i] - [n_e]) \\ \sigma = w_e[n_e] + w_i[n_i] \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} [n_e] = \frac{\sigma - w_i \frac{\rho}{q_e}}{w_i + w_e} \\ [n_i] = \frac{\sigma + w_e \frac{\rho}{q_e}}{w_i + w_e} \end{cases}$$

*Équation 29 : Relation entre les valeurs de la densité locale de charges et de la conductivité et  $n_e$  et  $n_i$*

On dérive par rapport au temps la densité locale de charges et la conductivité pour mettre en évidence les équations différentielles qui régissent le système. On utilise alors les équations régissant la variation des densités d'ions et d'électrons (Équation 30) pour calculer directement les variations de la conductivité locale et de la densité locale de charges.

$$\begin{aligned} \frac{d[n_e]}{dt} &= \left( \frac{\partial[n_e]}{\partial t} \right)_{transport} + \left( \frac{\partial[n_e]}{\partial t} \right)_{collisions} \\ \frac{d[n_i]}{dt} &= \left( \frac{\partial[n_i]}{\partial t} \right)_{transport} + \left( \frac{\partial[n_i]}{\partial t} \right)_{collisions} \end{aligned}$$

*Équation 30 : Equations aux dérivées partielles pour les ions et les électrons*

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dt} &= w_e \left( \left( \frac{\partial[n_e]}{\partial t} \right)_{transport} + \left( \frac{\partial[n_e]}{\partial t} \right)_{collisions} \right) + w_i \left( \left( \frac{\partial[n_i]}{\partial t} \right)_{transport} + \left( \frac{\partial[n_i]}{\partial t} \right)_{collisions} \right) \\ \frac{d\rho}{dt} &= q_e \left( \left( \frac{\partial[n_i]}{\partial t} \right)_{transport} + \left( \frac{\partial[n_i]}{\partial t} \right)_{collisions} - \left( \frac{\partial[n_e]}{\partial t} \right)_{transport} - \left( \frac{\partial[n_e]}{\partial t} \right)_{collisions} \right) \end{aligned}$$

*Équation 31 : Variation de la densité de charge locale et de conductivité à partir de termes de transport et collisionnels des ions et électrons*

Or, ne considérant que deux espèces en présence, les termes collisionnels pour les ions et les électrons sont égaux (Équation 27). On a donc une variation de la densité de charges locales qui ne dépend que des termes de transport pondéré par la charge unitaire. Cela correspond à un bilan sur les courants à la surface d'un volume élémentaire.

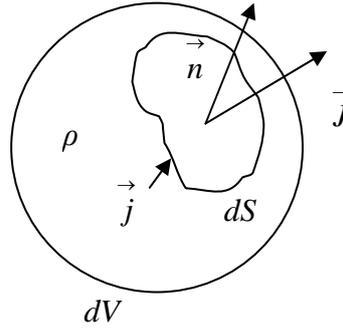


Figure 39 : Bilan des courant pour un volume élémentaire  $dV$

Il faut cependant bien faire la différence, dans la figure précédente, entre le courant local  $j$  au point considéré et le bilan des courants autour de ce point. Le bilan de courant fait varier la densité locale de charge (Équation 32) alors que le local total fait varier la conductivité (Équation 35). On peut donc avoir un courant local important ( $j$  important) avec une variation de densité locale faible (Équation 32).

On a donc pour la densité de charges locales l'équation finale suivante :

$$\frac{d\rho}{dt} = \iint_S \vec{J} \cdot \vec{n} dS$$

Équation 32 : Calcul de la densité de charge à partir du courant

Il reste donc à étudier la variation de conductivité en fonction des variables ; parmi celles-ci, on considère le courant. On pose pour cela l'hypothèse que le courant total est égal au courant d'électrons, ce qui est vrai pratiquement partout, sauf au voisinage de l'électrode négative [13] [15] [28]. De là, on peut simplifier les termes de transport dans l'équation de la conductivité électrique.

$$\frac{d\sigma}{dt} = (w_e + w_i) \left( \frac{\partial n_e}{\partial t} \right)_{\text{collisions}} - w_e \frac{\iint_S \vec{J} \cdot \vec{n} dS}{q_e}$$

Équation 33 : Variation de la conductivité en fonction des courant et du terme collisionnel

Il reste à définir la valeur des courants en fonction de la densité de charge locale et de la conductivité locale uniquement.

Le courant de conduction local dû au champ électrique est calculé en utilisant le champ électrique local ainsi que la conductivité électrique. Les courants dus à la diffusion sont

calculés à l'aide de la loi de Fick en multipliant le flux de charge par la charge unitaire  $q_e$ . Le coefficient de diffusion  $\eta$  peut être évalué par identification numérique.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} - \eta q_e \text{grad}(\rho)$$

Équation 34 : Calcul du courant local à l'aide de  $\sigma$ ,  $E$  et  $\rho$ .

On a alors une modélisation équivalente à la précédente ; mais on utilise maintenant des variables intermédiaires qui donnent des relations directes entre les courants, les champs électriques et la densité locale de charges.

$$\frac{d\rho}{dt} = \iint_S \vec{j} \cdot \vec{n} dS$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = (w_e + w_i) \left( \frac{\partial [n_e]}{\partial t} \right)_{\text{collisions}} - w_e \frac{\iint_S \vec{J} \cdot \vec{n} dS}{q_e}$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} - \eta q_e \text{grad}(\rho)$$

Équation 35 : Nouvelles formulation après changement de base

◆ *Formulation de type « dipôle électrique »*

On recherche une formulation directement utilisable pour des électroniciens de puissance sous forme de dipôle électrique. Cette formulation, qui ressemblera au modèle de MAYR ou de CASSIE [16] [18], permet de réaliser des simulations avec des logiciels de simulation électrique classiques.

Pour que le système d'équation soit complet, il faut associer à l'Équation 35 un terme de création et de disparition dû aux collisions. On prend le terme de l'Équation 36 qui correspond au terme collisionnel dans l'azote à pression atmosphérique.

$$\left( \frac{\partial [n_e]}{\partial t} \right)_{\text{collisionnel}} = 11.9 \times 10^5 \times \|E\| [n_e] e^{-\frac{15.8 \times 10^4}{\|E\|}} - \alpha [n_e] [n_i]$$

Équation 36 : Terme collisionnel de l'azote à pression atmosphérique

$$\frac{d\sigma}{dt} = (w_e + w_i) A \|E\| [n_e] e^{-\frac{B}{\|E\|}} - w_e \frac{\iint_S \vec{J} \cdot \vec{n} dS}{q_e} - (w_e + w_i) \alpha [n_e] [n_i]$$

Équation 37 : Variation de la conductivité en fonction des courants, des ions et des électrons

Considérant que  $w_e$  est cent fois plus grand que  $w_i$ , on peut négliger  $w_i$  et on retrouve le courant d'électron local dans le terme de création de conductivité.

$$j = w_e \|E\| [n_e]$$

*Équation 38 : Courant local i*

$$\frac{d\sigma}{dt} = A \|j\| e^{-\frac{B}{\|E\|}} - w_e \frac{\iint_{S} \vec{J} \cdot \vec{n} dS}{q_e} - (w_e + w_i) \alpha [n_e] [n_i]$$

*Équation 39 : Variation de la conductivité locale*

Le terme de disparition de conductivité est du deuxième ordre en  $[n_e]$  et  $[n_i]$ , ce qui rend la formulation du terme de disparition un peu compliquée ; si on veut le prendre en compte parfaitement, on a le terme suivant (en utilisant les équations du changement de base) :

$$n_e n_i = \frac{\sigma^2 - \frac{\rho^2}{q_e^2} w_i w_e + \sigma \frac{\rho}{q_e} w_e}{(w_e + w_i)^2}$$

*Équation 40 : Expression exacte du terme  $n_e n_i$*

Cette expression est complexe ; or on cherche un modèle avec une formulation assez simple, du même type que celle des modèles de MAYR ou de CASSIE [16] [18]. On simplifie alors l'expression du terme de recombinaison par un terme du premier ordre de  $\sigma$  avec une constante de temps  $\tau$ . A ce stade on obtient :

$$\frac{d\sigma}{dt} = A \|j\| e^{-\frac{B}{\|E\|}} - w_e \frac{\oint J}{q_e} - \frac{\sigma}{\tau}$$

Le terme du bilan des courants peut être annulé, dans le cas où le modèle englobe toute la décharge (cas d'un modèle « 0D » de la décharge). En effet, dans ce cas là, le circuit électrique impose un courant égal aux deux électrodes de la décharge ; or seuls ces deux courants sont pris en compte pour le bilan des courants sur la surface, donc le bilan des courants est nul.

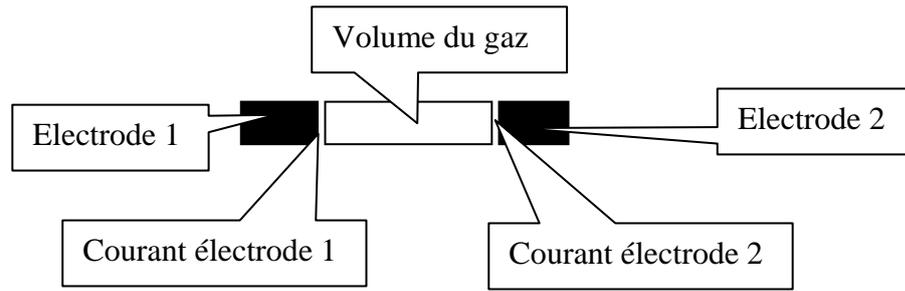


Figure 40 : Cas où toute la décharge est incluse dans le volume étudié.

On obtient alors une équation locale simplifiée.

$$\frac{d\sigma}{dt} = A|j|e^{\frac{B}{\|E\|}} - \frac{\sigma}{\tau}$$

Équation 41 : Equation locale régissant l'évolution de la conductivité

On peut analyser l'équation obtenue et discuter de ce que représente chacun des termes. Le terme de disparition est le plus facile à interpréter, puisque celui-ci, si le courant est nul, tend à annuler la conductivité du milieu avec la constante de temps  $\tau$ .

$$\tau \frac{d\sigma}{dt} + \sigma = 0$$

Équation 42 : Annulation de la conductivité du gaz

Le terme de création peut être considéré comme la multiplication de deux termes : le terme  $A/|j|$  et le terme exponentiel. Le terme proportionnel au courant traduit le phénomène d'emballement de l'arc lorsque celui-ci est alimenté en tension : en effet, à tension constante, s'il y a un courant dans la décharge, la conductivité du gaz augmente ce qui augmente encore plus le courant... Le terme exponentiel agit comme une fonction porte. En effet, si le champ électrique est trop faible, le terme de création est annulé par l'exponentielle ; si le champ est suffisant, alors le terme de création tend vers  $A/|j|$ .

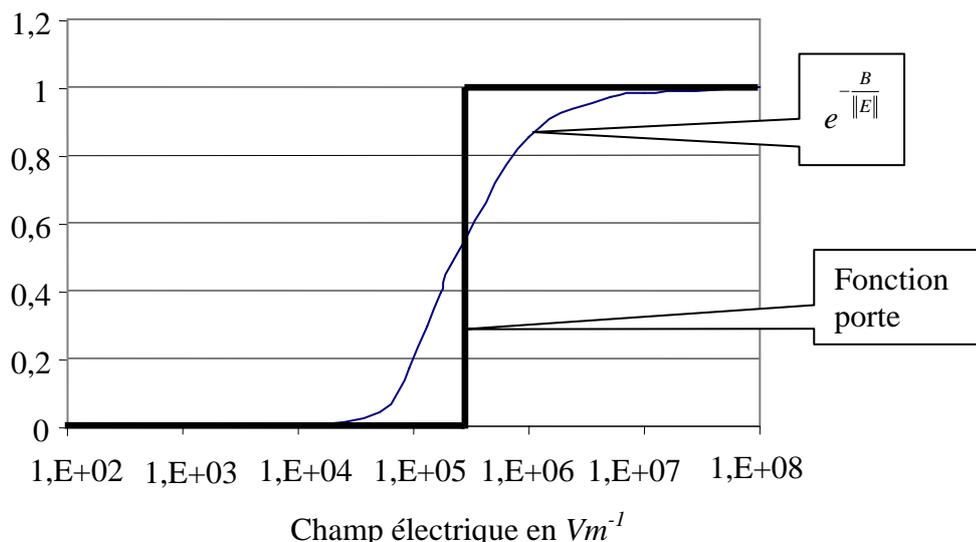


Figure 41 : Valeur du terme exponentiel en fonction du champ électrique pour  $B = 15800$

Au vu de l'allure du terme exponentiel, on peut faire le choix d'utiliser directement le terme exponentiel, d'utiliser une fonction porte, ou encore d'utiliser des expressions conditionnelles sur la valeur du champ pour évaluer le terme de création lors des simulations.

Il faut noter aussi que l'expression de la variation de la conductivité dépend du choix qu'on fait pour le terme collisionnel ; pour un autre terme collisionnel, cette équation aurait été différente. Or, ce terme est très difficile à évaluer et il dépend de la nature du gaz où a lieu la décharge. Un second terme de création de conductivité a été ajouté, s'inspirant de la littérature, où la puissance apportée à la décharge est parfois utilisée comme terme de création. Celui-ci est proportionnel au courant local au carré. La connaissance du facteur  $K'$  impose une identification des paramètres de ce modèle pour obtenir des simulations électriques pertinentes du comportement du gaz.

$$\tau \frac{d\sigma}{dt} = K|j| + K' j^2 - \sigma$$

Équation 43 : Dernière formulation de la variation de conductivité proposée

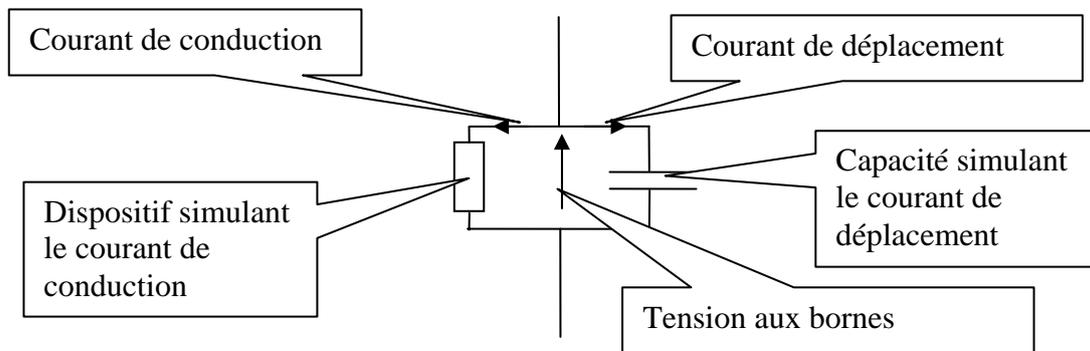
### Equations des courants aux électrodes

On s'est intéressé beaucoup au courant de conduction dans le gaz. Or, le courant total vu par l'alimentation électrique de la décharge est la somme du courant de conduction et du courant de déplacement.

$$I = \iint_S \left( \vec{j}_{cond} + \vec{j}_{dep} \right) \vec{n} dS$$

*Équation 44 : Calcul du courant total aux bornes en intégrant sur toute la surface d'une électrode*

Le courant de déplacement est proportionnel à la dérivée du champ électrique dans la décharge donc, à longueur de décharge constante, à la dérivée de la tension entre les bornes de la décharge. On peut considérer que le courant de déplacement est le courant qui circule dans une capacité parallèle à un dispositif simulant le courant de conduction de la décharge électrique.



*Figure 42 : Séparation du calcul du courant de conduction et de déplacement*

Donc, lorsqu'on a un modèle qui permet de connaître le courant de conduction, on utilise une capacité pour simuler le courant de déplacement.

### **Modèle « 0D » final**

Les modèles qui exploitent directement le courant pour évaluer la conductivité globale du gaz sont souvent utilisés pour modéliser des décharges dans des circuits électriques. Ces modèles sont des modèles macroscopiques qui n'utilisent pas de discrétisation et donc négligent l'influence des charges d'espaces puisque l'ionisation n'est considérée que pour son caractère conducteur. Ce type d'hypothèse est utilisé dans le cas de plasmas thermiques, donc à la limite de ce que nous étudions, mais nous verrons que son utilisation est possible.

Pour modéliser une décharge de manière simple, il suffit de connaître la longueur de l'arc ainsi que sa section et de calculer la résistance vue des bornes de la décharge à l'aide de l'Équation 43. La résolution de ces équations se fait en appliquant la loi d'Ohm à un dipôle qui présente une résistance variable.

$$\begin{aligned}\tau \frac{d\sigma}{dt} &= \frac{K}{S} |i| + \frac{K'}{S^2} i^2 - \sigma \\ r &= \frac{l}{S\sigma} \\ v &= ri\end{aligned}$$

*Équation 45 : Equations utilisées pour la simulation d'un arc avec un modèle 0D*

- $l$  distance inter électrodes.
- $S$  section de la décharge.

On rappelle maintenant les hypothèses utilisées pour l'élaboration de ce modèle :

- Terme de recombinaison simplifié.
- Bilan de courants sur la surface entourant le volume nul.
- Courant ionique négligé.

On peut voir que ce type de simulation nécessite de connaître la longueur de l'arc  $l$ , ainsi que sa section  $S$  à tout instant. Si la longueur de l'arc est facile à mesurer dans le cas où celui-ci reste stable et va en ligne droite, sa section est toujours difficile à évaluer (à moins que celle-ci ne soit imposée par un dispositif). Si on n'a aucun moyen d'effectuer la mesure de ces paramètres, on peut les évaluer à l'aide de méthode d'identification (Chapitre 3).

**Remarque :** La plupart du temps, on évalue la conductance du gaz plutôt que sa conductivité locale. Pour faire cela avec les équations décrites ci-dessus, on considère  $G$  la conductance du gaz vue des bornes.

$$G = \frac{S\sigma}{l} \Rightarrow \sigma = \frac{l}{S} G$$

*Équation 46 : Calcul de la conductance*

On peut donc calculer directement la valeur de la conductance ainsi que la relation entre la tension et le courant de conduction du gaz à l'aide des équations suivantes :

$$\begin{cases} k = \frac{K}{l} \\ k' = \frac{1}{lS} K' \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \tau \frac{dG}{dt} = k|i| + k'i^2 - G \\ Gv = i \end{cases}$$

*Équation 47 : Formulation du modèle de gaz basée sur la conductance*

### Mise en œuvre de ces modèles

Les modèles décrits ici servent à la mise au point et à l'étude entre une décharge électrique et son alimentation. Il est donc nécessaire de les implémenter dans des simulateurs de circuits électriques. Cela a été effectué pour deux simulateurs différents : Saber et PSIM.

Ce sont les équations du dernier modèle proposé que nous utilisons le plus souvent. Bien que se soient les mêmes équations qui sont implémentées dans les deux simulateurs, il y a des différences dans la manière de les coder.

PSIM, un logiciel de simulation circuit, permet de générer un dipôle à partir d'un schéma simulant le comportement de celui-ci. Pour cela, on considère que la grandeur d'entrée est le courant, disponible à partir de sa mesure ; on calcule la valeur de la conductance ce qui permet, en faisant de rapport entre le courant et la conductance, d'imposer la tension aux bornes de la décharge. Deux précisions doivent être apportées :

- On limite la variation de la conductance entre une valeur minimale (représentant l'ionisation permanente du gaz) et l'infini.
- On prend en compte la valeur du courant à  $t-\Delta t$  ( $\Delta t$  pas de simulation) pour les calculs de la conductance et de la tension aux bornes à  $t$ . Cela est dû aux méthodes numériques employées lors de ces simulations.

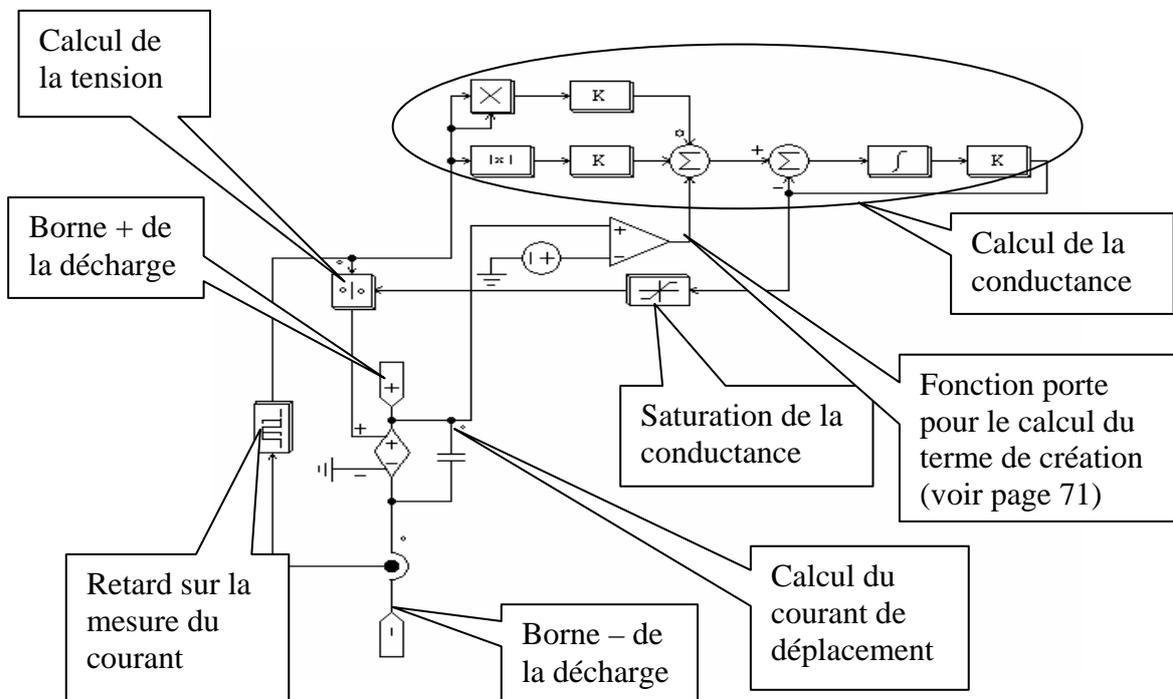


Figure 43 : Schéma de simulation d'une décharge (courant de conduction et courant de déplacement).

Avec le schéma de la Figure 43, on simule le comportement électrique d'une décharge monofilamentaire.

Saber permet d'utiliser un langage de programmation (langage MAST) pour créer des modèles physiques de dipôle. Il suffit de retranscrire les équations décrites précédemment en langage MAST.

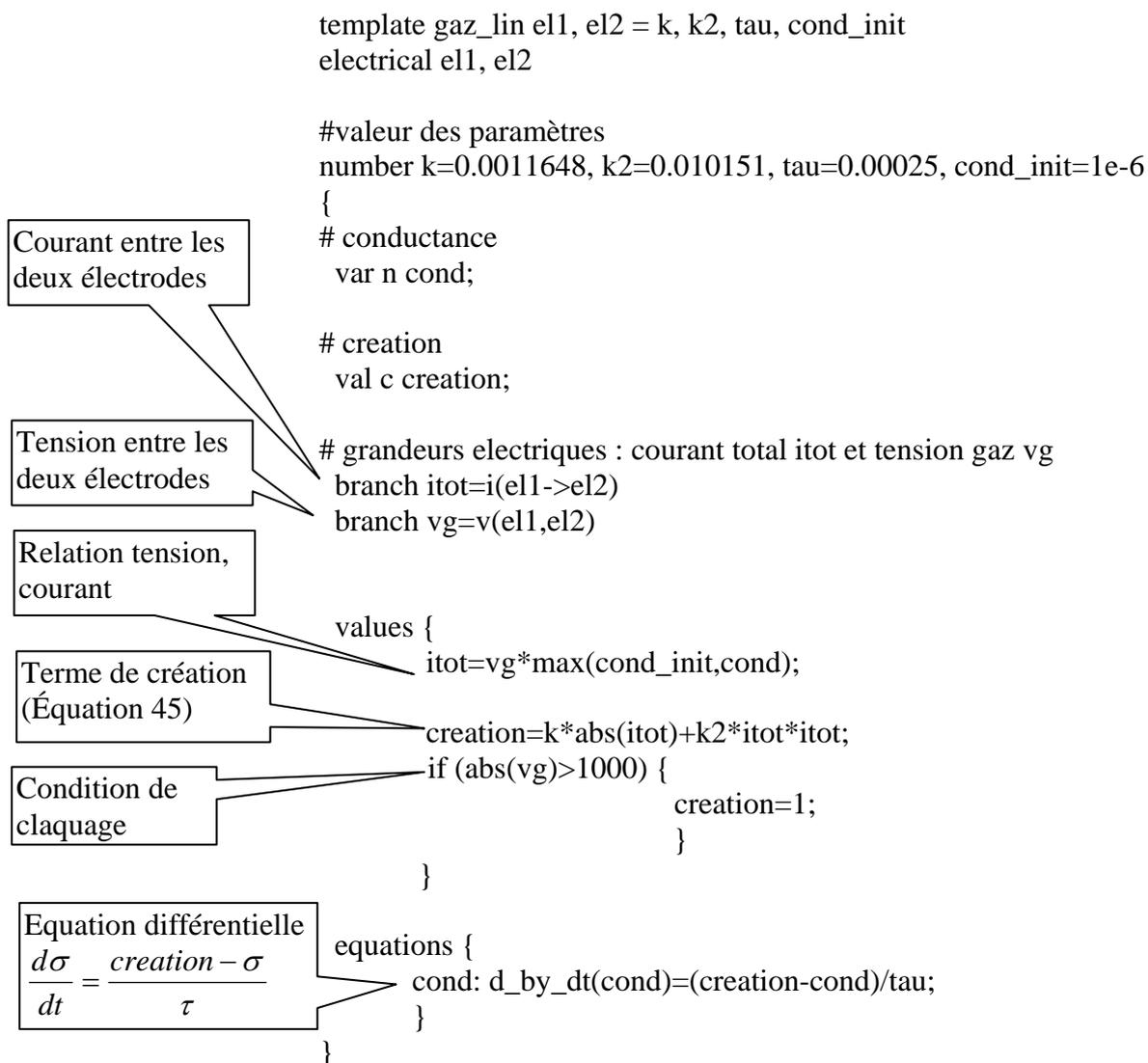


Figure 44 : Fichier MAST pour la simulation du courant de conduction du gaz.

On peut donc simuler les modèles développés précédemment à l'aide de logiciels de simulation de circuit électrique classiques. Ces modèles permettent donc l'étude du couplage électrique entre une décharge et son alimentation.

## b) Comparaison des modèles en régime statique

Un premier moyen d'évaluer la zone où les modèles de décharge peuvent être considérés comme satisfaisants est de comparer les caractéristiques statiques de ceux-ci à la caractéristique statique réelle du gaz. Nous allons donc comparer le régime statique de modèles qui ont comme point commun d'avoir la conductance comme lien entre la tension d'arc et le courant d'arc.

Nous étudierons le modèle de CASSIE, le modèle de MAYR ([16],[17],[18]), et les deux modèles que nous avons présentés. Les modèles de CASSIE et de MAYR sont deux modèles couramment utilisés pour simuler le comportement « vu des bornes » des décharges électriques. Les équations de ces modèles proviennent de l'étude du bilan énergétique de la décharge :

- le modèle de CASSIE considère la densité de courant dans la décharge comme constante (sur toute sa section) ;
- le modèle de MAYR considère que la puissance est perdue en périphérie de l'arc.

$$\tau \frac{dG}{dt} = \frac{vi}{E_0^2} - G$$

$$\tau \frac{dG}{dt} = \frac{i^2}{P_0} - G$$

$$\tau \frac{dG}{dt} = k|i|e^{-\frac{B}{|V|}} - G$$

$$\tau \frac{dG}{dt} = k|i| + k'i^2 - G$$

*Équation 48 : Evaluation de la conductivité à l'aide des modèle (de haut en bas) de CASSIE, de MAYR, premier modèle proposé de la thèse, deuxième modèle proposé.*

- Modèle de CASSIE :  $E_0$  tension aux bornes de la décharge (à courant constant) quand elle est allumée (~100V pour une distance inter électrode de 4mm).
- Modèle de MAYR :  $P_0$  Puissance dissipée dans la décharge (à courant constant) quand elle est allumée (50W pour une distance inter électrode de 4mm).
- Premier modèle proposé :  $k$  ( $S.sec.A^{-1}$ ) et  $B$  ( $V.m^{-1}$ ) ont pour ordre de grandeur respectivement 0.01 et 15000 (pour une distance inter électrode de 4mm).
- Deuxième modèle proposé :  $k$  ( $S.sec.A^{-1}$ ) et  $k'$  ( $S.sec.A^{-2}$ ) ont pour ordre de grandeur respectivement 0.0001 et 0.01 (pour une distance inter électrode de 4mm).

- Pour tous les modèles :  $\tau$  est la constante de temps de recombinaison de charge d'ordre de grandeur  $10^{-3}$  (pour une distance inter électrode de 4mm).

Pour tous ces modèles, on exprime que le courant est proportionnel à la tension et à la conductance.

$$Gv = i$$

*Équation 49 : Relation entre la tension, le courant et la conductance*

En régime permanent, la conductivité ne varie pas ; on annule donc la dérivée et on obtient les tensions suivantes (pour un courant supposé positif).

$$v_1 = |E_0|$$

$$v_2 = \frac{P_0}{i}$$

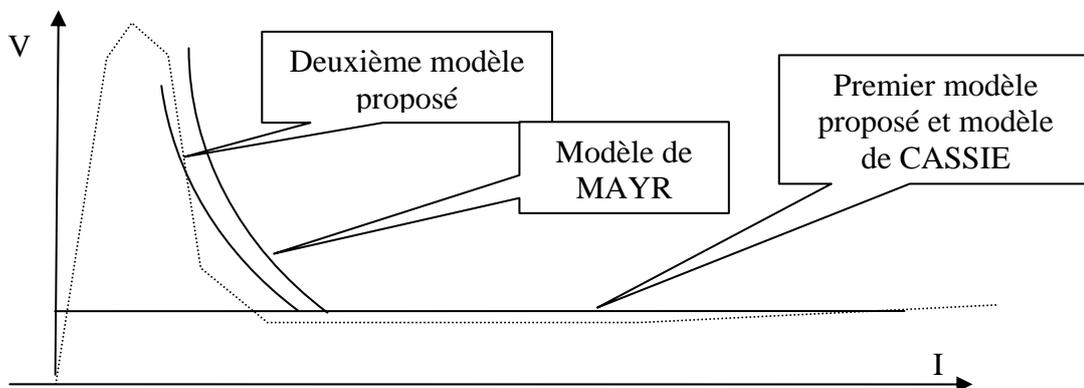
$$v_3 = \frac{lB}{\text{LambertW}(kSB)}$$

$$v_4 = \frac{l}{S(k + k'i)}$$

*Équation 50 : Evaluation de la tension statique à l'aide des modèle (de haut en bas) de CASSIE, de MAYR, premier modèle proposé de la thèse, deuxième modèle proposé.*

- *LambertW* est une fonction mathématiques [52] particulière définie tel que  $\text{LambertW}(x) * \exp^{\text{LambertW}(x)} = x$ .

On peut voir que les caractéristiques statiques des modèles proposés peuvent être classées en deux catégories : les sources de tension, indépendante du courant de décharge (modèle de CASSIE et le premier modèle proposé) et les sources de puissance (modèle de MAYR et le deuxième modèle proposé).



*Équation 51 : Caractéristique statique des modèles proposés comparées à la caractéristique statique réelle de la décharge*

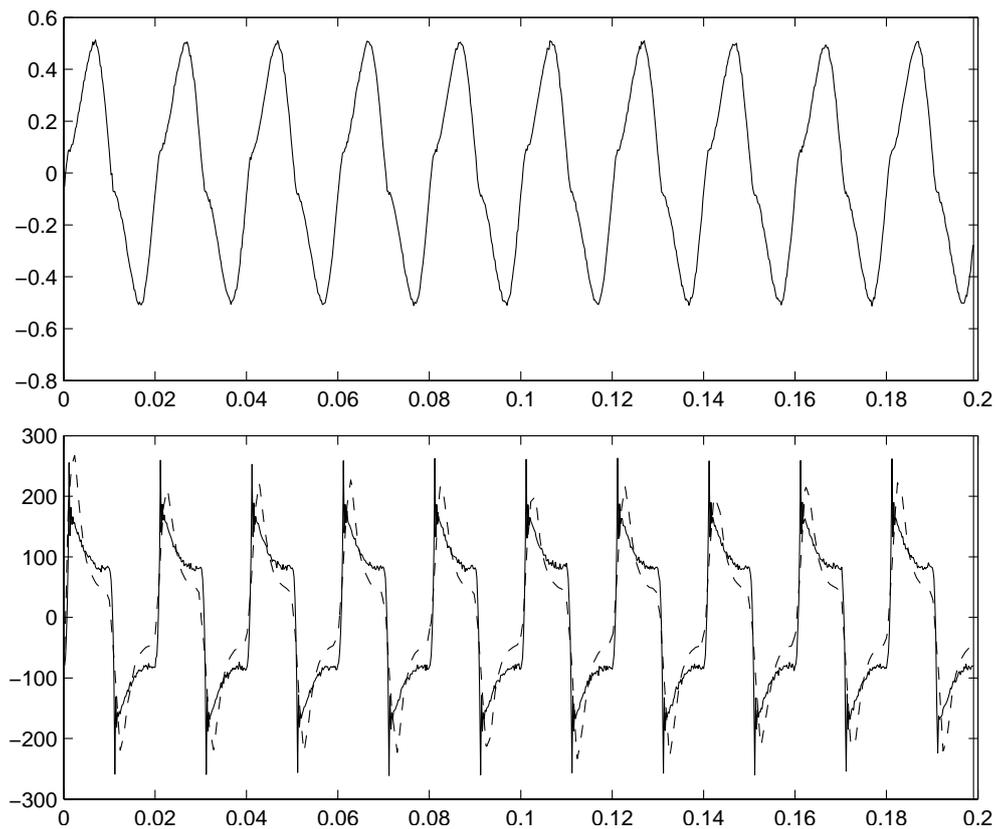
Vis à vis de la caractéristique statique réelle du gaz, on peut dire qu'aucun de ces modèles ne convient sur toute la plage de fonctionnement. Cependant, le premier modèle proposé et le modèle de CASSIE sont plus appropriés pour la partie droite de la caractéristique statique réelle du gaz. La deuxième formulation proposée et le modèle de MAYR semble plus adéquate pour des courant plus faibles.

Pour ce qui est du régime dynamique, il est difficile de trancher directement à partir des équations ; il est nécessaire de tester les différents modèles sur des cas précis avec une dynamique suffisamment riche.

### c) Comparaison des modèles en régime dynamique

On suppose que l'on connaît la valeur des paramètres de chacun de ces modèles (le chapitre sur l'identification montrera comment les obtenir). On peut alors comparer les modèles proposés sur l'essai dynamique d'un tube fluorescent.

Lors du fonctionnement normal d'un tube fluorescent (alimentation à partir du réseau EDF 230V 50Hz), on effectue la mesure temporelle des grandeurs électriques (tension (V), courant (A)). Ensuite, on simule chaque modèle proposé en fournissant comme donnée d'entrée de simulation le courant traversant le tube. L'alimentation du tube est en effet réalisée par l'intermédiaire d'un ballast inductif, qui impose le courant instantané dans le circuit ; il est donc légitime d'effectuer une analyse pour laquelle le modèle de la décharge est placé dans une causalité où le courant est imposé. La comparaison entre les modèles s'effectue en comparant la qualité de la forme de tension simulée par rapport à la tension mesurée.



*Figure 45 : Courbes temporelles du courant mesuré (haut en A) et de la tension (bas continu en V) dans un tube fluorescent. En bas et en pointillé, simulation du deuxième modèle proposé*

La deuxième formulation proposée et le modèle de MAYR donnent des résultats tout à fait identiques. Par comparaison avec les relevés expérimentaux de la tension, on peut estimer qu'avec ces modèles, la simulation donne de bons résultats.

On effectue alors la même comparaison avec le modèle de CASSIE et avec la première formulation proposée.

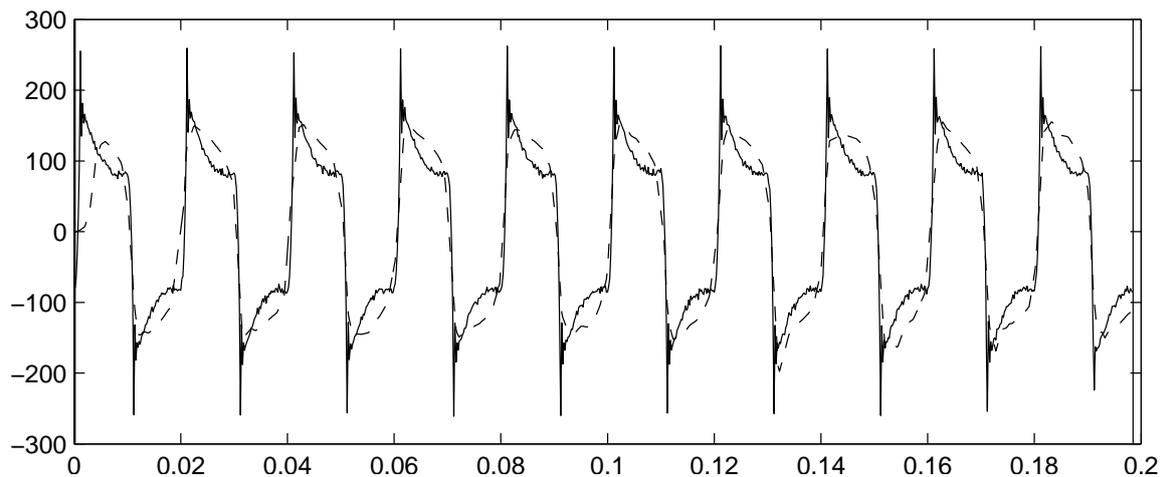


Figure 46 : Courbes de la tension (continu en V) dans un tube fluorescent. En pointillé, simulation du modèle de CASSIE

On peut observer que le premier modèle que l'on a proposé est très proche du modèle de CASSIE, puisqu'ils présentent le même comportement dynamique sur l'expérimentation testée.

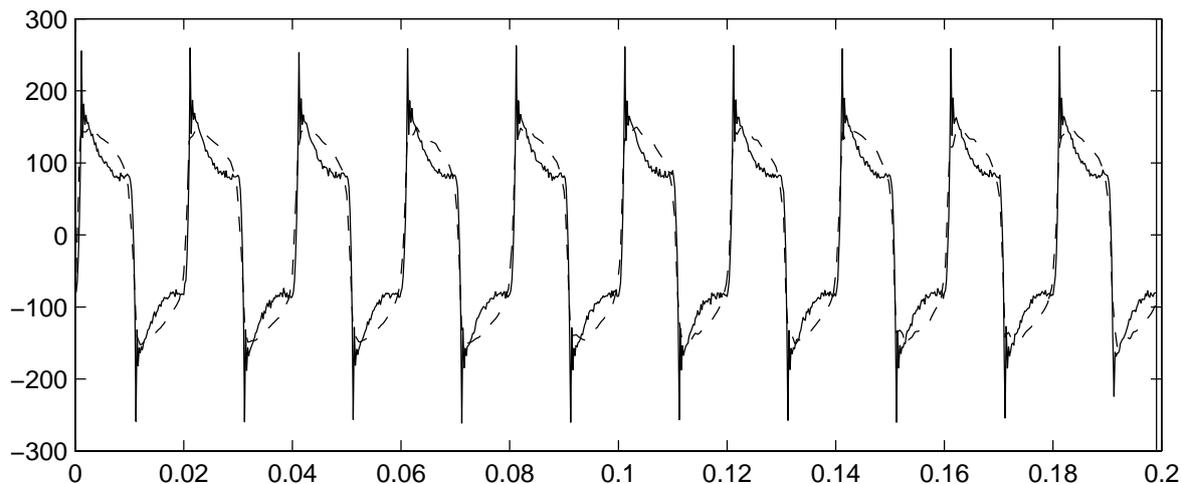


Figure 47 : Courbes temporelles de la tension (continu en V) dans un tube fluorescent. En pointillé, simulation du premier modèle proposé

On constate, sur ces courbes temporelles, que les quatre modèles sont à même de donner des courbes de simulations proches de la réalité. Cependant, la concavité des courbes temporelles fournies par le modèle de CASSIE et la première formulation proposée n'est pas la même que celle constatée expérimentalement (lors de la décroissance de la tension - Figure 48). C'est pour cela qu'on utilisera plutôt la deuxième formulation proposée.

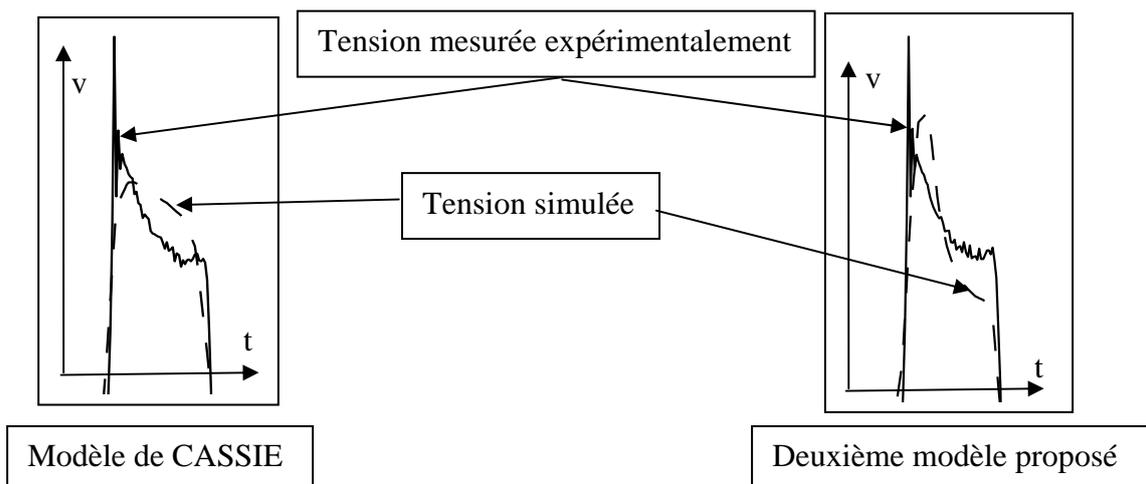


Figure 48 : Comparaison des concavités des courbes entre le modèle de CASSIE et le deuxième modèle proposé.

Cependant, on peut être certain que, quel que soit le modèle utilisé, il ne sera valable que sur une gamme limitée de fonctionnement et il est donc nécessaire d'ajuster les paramètres de ces modèles pour pouvoir obtenir des simulations fiables.

L'ajustement de ces paramètres nécessite l'utilisation de procédures d'identifications sur des essais dynamiques.

#### 4) **Modèle discrétisé**

Dans certain cas, notamment lorsque le lieu de la décharge varie dans l'espace inter électrodes, il est nécessaire de discrétiser cet espace. Au niveau des points de fonctionnements qui nous intéressent, la répartition du champ électrique est liée au champ électrique des charges d'espaces. Ces charges d'espaces doivent donc être prises en compte dans le calcul du champ électrique local pour rendre compte correctement du comportement tension/courant de la décharge.

##### a) **Discrétisation**

On repart donc des équations locales liant les densités d'ions et d'électrons au champ électrique local et au courant local (page 51).

Dans ce but, il est nécessaire de connaître leur localisation dans la décharge afin de calculer correctement le champ à l'aide de l'Équation 2 page 36. Ce champ électrique local est utilisé pour calculer les courants locaux dans le gaz et pour connaître la tension totale via l'Équation 7 page 38.

On utilisera un maillage carré composé de volumes unitaires  $\Delta V$  pour calculer les variables locales qui nous intéressent.

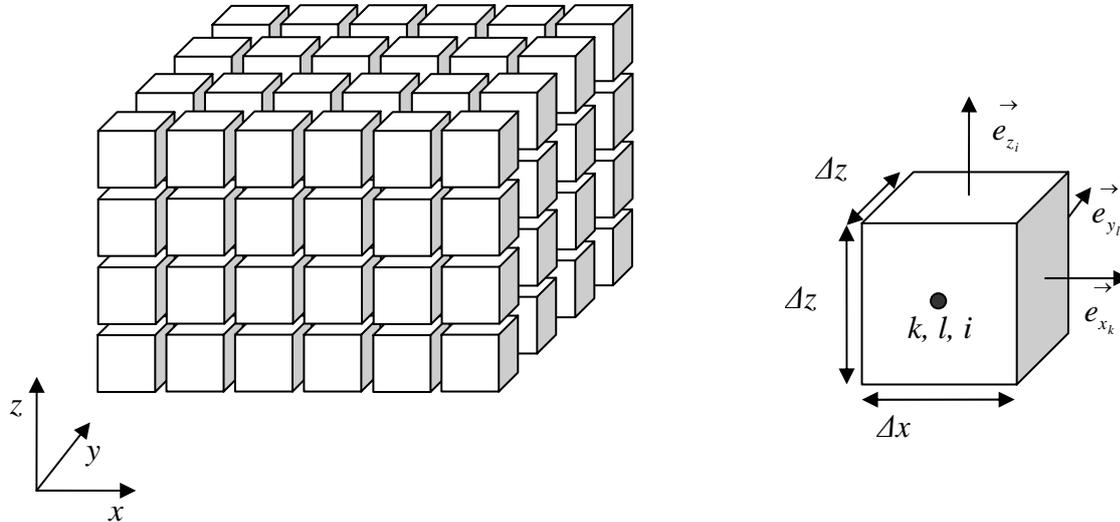


Figure 49 : Discretisation utilisée

On a donc des éléments  $\Delta V$  de taille  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  qui ont pour coordonnées  $(k\Delta x, l\Delta y, i\Delta z)$ . Les variables qui nous intéressent sont les courants et les champs électriques locaux. Pour pouvoir les calculer il nous faut connaître les densités locales de charges positives et négatives.

◆ *Densités locales de charges*

Les densités de charges électriques, positives ( $[n_i]$ ) et négatives ( $[n_e]$ ), sont évaluées pour le volume entourant le point  $(k\Delta x, l\Delta y, i\Delta z)$ . Elles sont considérées homogènes dans tout le volume ; les quantités totales de charges dans le volume, notées  $n_e$  et  $n_i$ , se calculent ensuite aisément. (Équation 52)

$$\begin{aligned} n_e &= [n_e]\Delta x\Delta y\Delta z \\ n_i &= [n_i]\Delta x\Delta y\Delta z \end{aligned}$$

Équation 52 : Calcul du nombre totale de charge dans l'élément de volume

Ces quantités de charges varient en suivant l'équation de Boltzmann des gaz faiblement ionisés (Équation 23). Les termes de création et de disparition de charge sont évalués au milieu du volume discrétisé et les charges sont créées et disparaissent de manière homogène dans le volume. La variation de la quantité de charge totale dans le volume due au terme collisionnel peut être évaluée en intégrant le terme lié à la fréquence d'ionisation dans tout le

volume. On fait l'hypothèse que le champ électrique est le même dans tout le volume ; cela permet de connaître la variation totale de charges due aux collisions dans le volume.

$$\begin{aligned} \left( \frac{dn_e}{dt} \right)_{\text{collisionnel}} &= 11,9 \times 10^5 \times \|E\| n_e e^{-\frac{15,8 \times 10^4}{\|E\|}} - \alpha n_e n_i \\ \left( \frac{dn_i}{dt} \right)_{\text{collisionnel}} &= 11,9 \times 10^5 \times \|E\| n_e e^{-\frac{15,8 \times 10^4}{\|E\|}} - \alpha n_e n_i \end{aligned}$$

*Équation 53 : Quantité totale de charge créées et perdues à cause des collisions*

◆ *Les courants locaux*

Les courants locaux doivent être calculés aux frontières des volumes élémentaires  $\Delta V$ . Ils traduisent les échanges de charges entre ces éléments. Ils sont décomposables en trois composantes :

- Les échanges dus au champ électrique local,
- La diffusion suivant la loi de Fick,
- Un troisième terme dû aux flux de gaz dans la décharge.

La somme de ces trois parties est le courant total de conduction.

**Composante résultant du champ électrique local :** la vitesse des charges qui se déplacent par l'effet du champ électrique peut être évaluée par l'Équation 13 pour les ions et les électrons.

$$\begin{aligned} \vec{j}_{\text{elec\_electrons}} &= q_e [n_e] w_e \vec{E} \\ \vec{j}_{\text{elec\_ions}} &= q_i [n_i] w_i \vec{E} \end{aligned}$$

*Équation 54 : Courants de conduction surfacique dus à l'interaction des électrons et des ions avec le champ électrique.*

Pour discrétiser ces équations, on étudie le cas de  $n$  charges présentes dans un volume  $dV$  qui ont une vitesse  $v$  colinéaire à l'axe des  $x$ . A partir de la vitesse des charges, on peut faire un bilan des charges qui quittent le volume  $\Delta V$  pendant l'intervalle de temps  $dt$ .

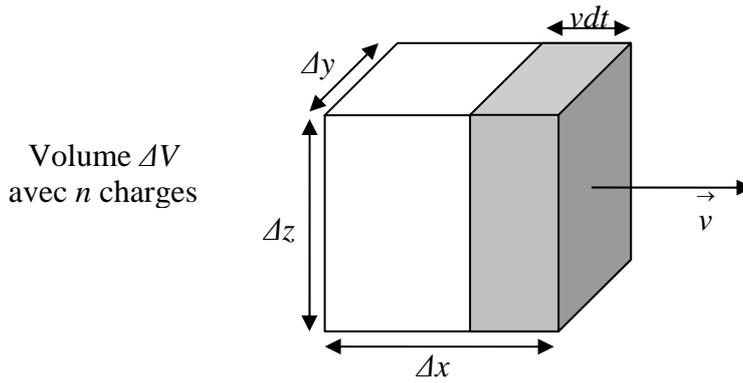


Figure 50 : Bilan des charges transférées pour des particules ayant une vitesse  $v$

L'élément de volume perd les charges incluses dans le volume ( $vdt \Delta y \Delta z$ ) grisé sur la Figure 50. Cela crée des flux que l'on calcule avec l'équation discrétisée suivante :

$$\vec{\varphi} = \frac{n}{\Delta x \Delta y \Delta z} \vec{v} = \frac{n}{\Delta x S} \vec{v}$$

Équation 55 : Calcul du flux surfacique de particule lors de leur déplacement à la vitesse  $v$ .

- $S$  surface d'une face du cube ( $\Delta y \Delta z$ )

On suppose que  $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ . Les flux de charges, dus au champ électrique, sont projetés sur les axes. En utilisant l'équation précédente on trouve les équations suivantes :

$$\vec{j}_{elec\_electrons} = \frac{q_e n_e w_e}{S} \left( \frac{E_x}{\Delta x} \vec{e}_x + \frac{E_y}{\Delta y} \vec{e}_y + \frac{E_z}{\Delta z} \vec{e}_z \right)$$

$$\vec{j}_{elec\_ions} = \frac{q_i n_i w_i}{S} \left( \frac{E_x}{\Delta x} \vec{e}_x + \frac{E_y}{\Delta y} \vec{e}_y + \frac{E_z}{\Delta z} \vec{e}_z \right)$$

Équation 56 : Calcul des courants de conduction surfacique dus au champ électrique

**Composante correspondant à la diffusion :** le flux de particules qui suit la loi de Fick (phénomène de diffusion) est proportionnel au gradient des densités des particules chargées (Équation 15). Pour calculer ce flux, on évalue la dérivée de ces densités à l'aide des différences centrées. Ce flux est calculé pour chaque densité (ions et électrons) et pour chaque axe.

$$j_{diffusion\_electron\_k+0.5} = -q_e \frac{\eta_e}{\Delta x \Delta y \Delta z} \frac{n_{ek+1} - n_{ek}}{\Delta x}$$

$$j_{diffusion\_ion\_k+0.5} = -q_e \frac{\eta_i}{\Delta x \Delta y \Delta z} \frac{n_{ik+1} - n_{ik}}{\Delta x}$$

*Équation 57 : Calcul du courant surfacique de diffusion au point k selon l'axe x*

**Composante due au flux de gaz :** dans le cas où la décharge subit un flux de gaz, les particules chargées sont entraînées dans le sens de ce flux. La vitesse des particules chargées n'est pas égale à celle du gaz (il a été observé que dans le cas du glidarc (arc glissant), la vitesse de déplacement de l'arc est plus faible que celle du gaz [21]). On peut faire le même raisonnement à l'aide de la Figure 50 avec une vitesse  $v$ , de déplacement des charges, proportionnelle à la vitesse du gaz  $v_{gaz}$  à un coefficient  $\lambda$  près (coefficient d'entraînement).

$$\vec{j}_{elec\_electrons} = \frac{q_e n_e \lambda}{S} \left( \frac{v_{gaz_x}}{\Delta x} \vec{e}_x + \frac{v_{gaz_y}}{\Delta y} \vec{e}_y + \frac{v_{gaz_z}}{\Delta z} \vec{e}_z \right)$$

$$\vec{j}_{elec\_ions} = \frac{q_e n_i \lambda}{S} \left( \frac{v_{gaz_x}}{\Delta x} \vec{e}_x + \frac{v_{gaz_y}}{\Delta y} \vec{e}_y + \frac{v_{gaz_z}}{\Delta z} \vec{e}_z \right)$$

*Équation 58 : Calcul du courant de conduction surfacique créé par un déplacement gazeux à une vitesse  $v_{gaz}$*

Il est nécessaire de connaître ces flux sur chaque face des volumes qui servent à discrétiser la décharge. Ensuite, on somme ces densités de courant pour chaque face et on obtient le courant total sur la surface selon tout les axes.

$$\vec{I}_{loc} = S \left( \vec{j}_{elec} + \vec{j}_{diffusion} + \vec{j}_{gaz} \right)$$

*Équation 59 : Courant local en fonction des flux de charges*

### ◆ Champ électriques locaux

#### Présentation de la méthode

Pour connaître la valeur du champ électrique en tout point, on utilise la répartition spatiale des charges électriques, qui après les calculs menés plus haut, est une information disponible. On considère que la contribution d'un élément de volume au champ électrique extérieur est due aux charges se trouvant à l'intérieur de ce volume via l'équation suivante.

$$\vec{E} = \iiint_{\Sigma} \frac{q_e (n_i - n_e)}{r^2 \epsilon_0} \vec{u}_r dr$$

Équation 60 : Calcul du champ électrique à partir de la connaissance de la densité de charges.

Pour évaluer le champ créé par un élément de volume, on fait la somme algébrique des charges présentes dans celui-ci, ce qui donne la quantité  $Q$ ; on considère que celles-ci génèrent le même champ qu'une particule chargée unique, de charge  $Q$ , située au milieu du volume.

On commet donc une approximation en considérant l'expression A1 égale à l'expression A2 selon les notations de la Figure 51.

- A1 représente l'expression exacte du champ électrique créé en  $(x_j, y_j, z_j)$  par un volume élémentaire dont le centre est en  $(x_i, y_i, z_i)$  et dont les densités de charges sont  $[n_e]$  et  $[n_i]$ .
- A2 est l'expression utilisée pour le calcul du champ électrique créé en  $(x_j, y_j, z_j)$  par un volume élémentaire dont le centre est en  $(x_i, y_i, z_i)$  et dont la densité totale de charge est  $n_e$  et  $n_i$ .

$$A1 = \int_{x_i - pas/2}^{x_i + pas/2} \int_{y_i - pas/2}^{y_i + pas/2} \int_{z_i - pas/2}^{z_i + pas/2} \frac{([n_i] - [n_e])q_e}{4\pi\epsilon_0 \left( (x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2 \right)^{3/2}} \left( (x_j - x)\vec{e}_x + (y_j - y)\vec{e}_y + (z_j - z)\vec{e}_z \right) dx dy dz$$

$$A2 = \frac{(n_i - n_e)q_e}{4\pi\epsilon_0 \left( (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \right)^{3/2}} \left( (x_j - x_i)\vec{e}_x + (y_j - y_i)\vec{e}_y + (z_j - z_i)\vec{e}_z \right)$$

Équation 61 : Simplification faite pour le calcul du champ

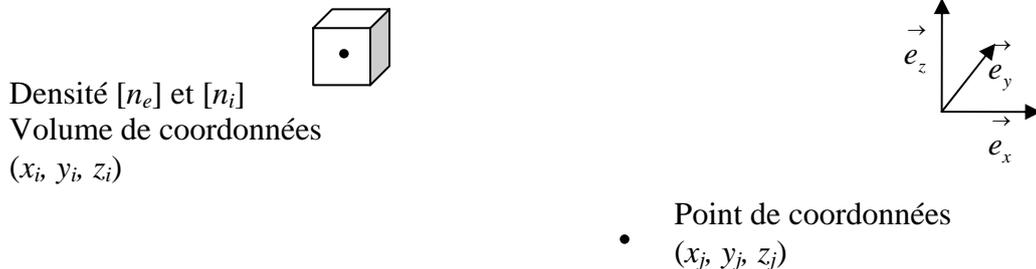


Figure 51 : Notation pour le calcul du champ créé par un volume élémentaire

### Mise en pratique de la méthode

On cherche à calculer la valeur du champ normal à toutes les surfaces des volumes élémentaires de l'espace discrétisé. Pour cela, on considère que l'on connaît la quantité de charge totale  $\rho$  présente dans chaque volume élémentaire. Ces quantités peuvent être prises en compte sous la forme d'un vecteur  $[\rho]$  dont chaque composante correspond à un point discrétisé. A partir de ce vecteur, on cherche à connaître la valeur de chaque composante du champ  $E$  aux points  $i,k,l$  qui nous intéressent. Ces valeurs sont également mises sous la forme de vecteurs  $[E_x],[E_y],[E_z]$ . On décide donc de faire ce calcul à l'aide de matrices qui lient le vecteur densité aux vecteurs champ électrique.

Nous devons donc définir les matrices  $A_x, A_y, A_z$  telles que l'on puisse écrire l'équation suivante :

$$\begin{aligned} [E_x] &= A_x[\rho] \\ [E_y] &= A_y[\rho] \\ [E_z] &= A_z[\rho] \end{aligned}$$

*Équation 62 : Equations matricielles du calcul du champ*

Il faut déterminer les termes des matrices tels que ceux-ci correspondent à l'apport de chaque charge ponctuelle au champ local.

$$\begin{pmatrix} E_{x1} \\ \vdots \\ E_{xi} \\ \vdots \\ E_{xn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & a_{im} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \vdots \\ \rho_j \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \rho_m \end{pmatrix}$$

*Équation 63 : Détails des termes de l'équation matricielle du calcul du champ.*

On voit, via l'Équation 63, que le terme  $a_{ij}$  de la matrice correspond à la contribution au champ  $E_{xi}$  de la charge  $\rho_j$ . Ce terme ne dépend donc que de la distance entre ces deux points, pondérée par le cosinus de l'angle  $\theta$  entre l'axe des abscisses et le vecteur directeur entre les deux points (Figure 52).

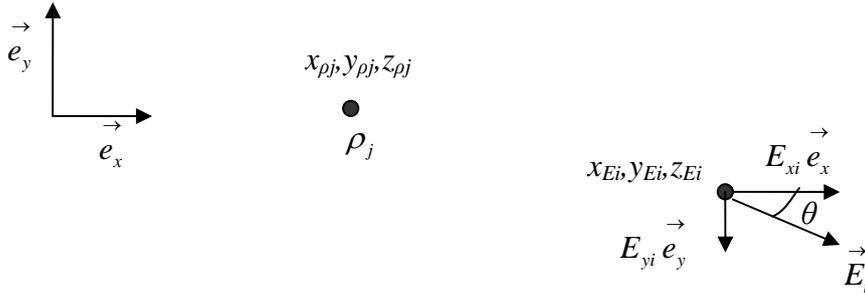


Figure 52 : Cas d'une particule chargée  $\rho_j$  créant un champ électrique

Dans le cas à deux dimensions de la Figure 52, on a les termes  $a_{ij}$  pour le calcul du champ projeté sur  $e_x$  et  $a'_{ij}$  du champ projeté sur  $e_y$  qui sont décrits par les Équation 64. Ce calcul dans le cas 2D est utilisé pour le calcul du champ dans le cas de la décharge glissante (Chapitre II :4c) page 82).

$$a_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\left((x_{Ei} - x_{\rho j})^2 + (y_{Ei} - y_{\rho j})^2\right)^{3/2}} \frac{(x_{Ei} - x_{\rho j})}{\sqrt{(x_{Ei} - x_{\rho j})^2 + (y_{Ei} - y_{\rho j})^2}}$$

$$a'_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\left((x_{Ei} - x_{\rho j})^2 + (y_{Ei} - y_{\rho j})^2\right)^{3/2}} \frac{(y_{Ei} - y_{\rho j})}{\sqrt{(x_{Ei} - x_{\rho j})^2 + (y_{Ei} - y_{\rho j})^2}}$$

Équation 64 : Calcul des termes de la matrice dans le cas 2D

$[A_x]$ ,  $[A_y]$  et  $[A_z]$  ne dépendent que du maillage et sont calculées une fois pour toute en tenant compte des simplifications et des réductions du domaine d'étude qui résultent des symétries éventuelles de la géométrie du système.

### b) Exemple d'application pour une décharge mono filamentaire

Pour évaluer la méthode de discrétisation, on étudie ici un cas simple : celui d'une décharge entre deux points ; le gaz est de l'azote. L'espace inter électrodes est discrétisé comme indiqué en Figure 53.

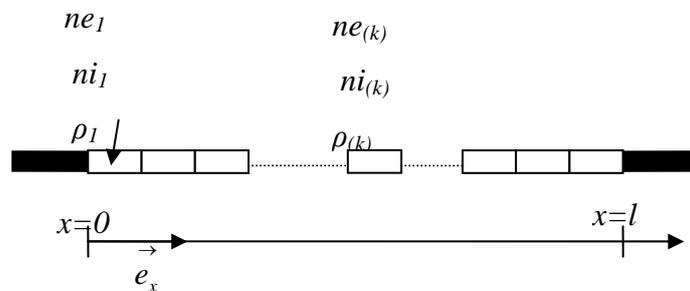


Figure 53 : Discrétisation sur un cas 1D. Avec  $n_{e\_i}$  le nombre d'électrons,  $n_{i\_i}$ , le nombre d'ions et  $\rho\_i$  la densité de charges au point  $i$ .

On discrétise entre les deux points pour avoir l'évolution en fonction de l'abscisse  $x$  des variables suivantes : les quantité d'ions et d'électrons, les flux d'électrons et d'ions et le champ local.

La décharge pointe-pointe a donc été discrétisée à l'aide de 100 points pour une distance de 5mm (le détail des équations discrétisées est fourni en annexe). On simule ce modèle sous Matlab/Simulink (un programme permettant de générer le modèle à été mis au point sous Matlab). La décharge est alimentée par une source de courant constante de 1 A.

On peut d'abord constater que le modèle présente un claquage aux environs de 20kV au bout d'une dizaine de nanosecondes. La tension de claquage atteinte semble cohérente puisque généralement on compte généralement 3kV par mm dans l'air (sachant que les équations utilisées ont des paramètres donnés pour l'azote). Ce claquage est suivi d'un transitoire de stabilisation de la tension qui dure plusieurs dizaines de nanosecondes. Il a été précédé de la charge de la capacité parasite formée par les électrodes métalliques en vis-à-vis ( $C = \frac{S\epsilon_0}{l}$  avec  $S = \Delta y \Delta z$ ).

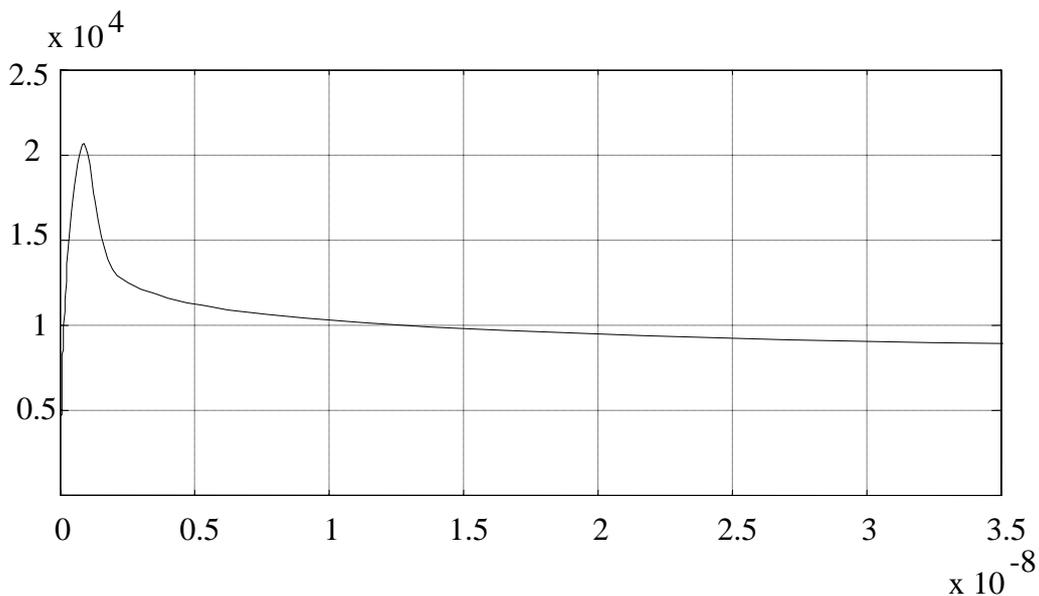


Figure 54 : Chronogramme (temps en sec.) de la tension (V) lors de la simulation de claquage d'un arc pointe-pointe

Pour valider cette simulation nous allons observer les variables internes de la décharge et les comparer à la forme des variables internes décrites dans [15].

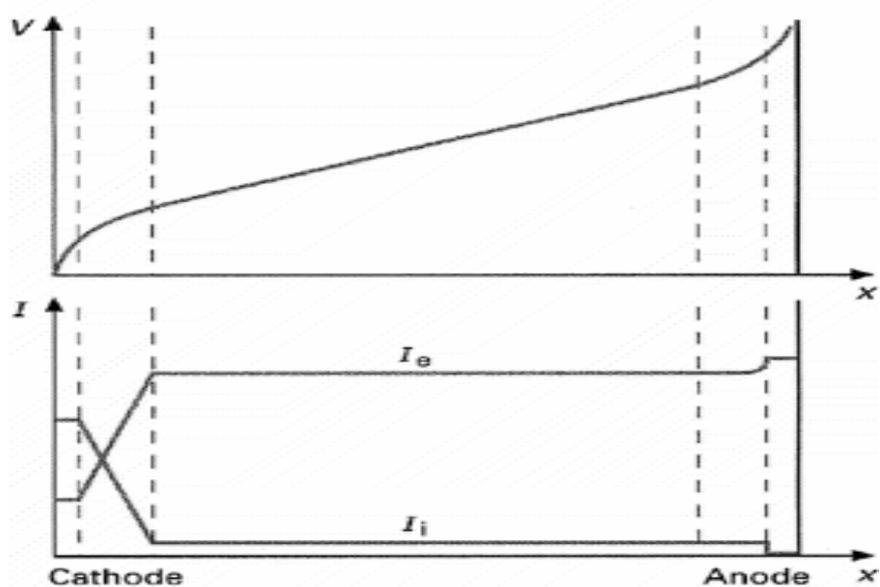


Figure 55 : Allure du potentiel (en haut) et des courants ioniques ( $I_i$ ) et électroniques ( $I_e$ ) dans une colonne d'arc (technique de l'ingénieur)[28].

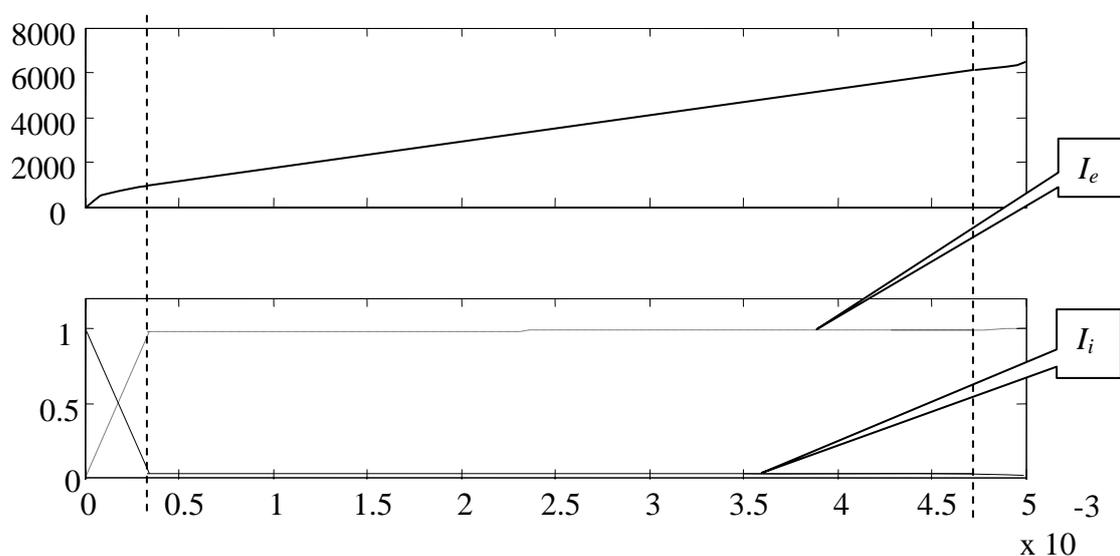


Figure 56 : Variables internes à la décharge de haut en bas : Champ électrique ( $Em^{-1}$ ), potentiel (V), courant d'électrons (pointillé) et d'ions (continu) (A), en fonction de l'abscisse en m

On peut constater que l'allure générale des courbes est cohérente : ce sont les électrons qui génèrent le plus de courant dans l'espace inter électrode. Le courant ionique n'est majoritaire qu'au plus près de la cathode. La différence entre ce qui est donnée dans la littérature et notre

simulation est, qu'à la cathode, dans notre cas, tout le courant est un courant ionique alors qu'en réalité il y a un courant électronique. Cela est dû au fait que nous n'avons pas pris en compte les phénomènes liés aux électrodes notamment que la cathode peut être émettrice d'électrons, donc créatrice d'un courant électronique.

### c) Simplification du modèle discrétisé et application à une décharge glissante

On cherche à mettre au point un modèle discrétisé qui simplifie le modèle précédent. Comme ce sont les variables électriques qui nous intéressent, on utilise le même changement de variable (utilisation de la conductivité locale et de la densité de charges locale) que pour le modèle simplifié non discrétisé. La discrétisation reste nécessaire, parce que la modélisation « 0D » développée pour l'étude circuit de la décharge électrique ne permet pas de prendre en compte les variations de longueur ou de section, notamment dans le cas des décharges glissantes. Ce cas sert d'exemple à notre approche et nous commençons donc par présenter les caractéristiques du dispositif expérimental considéré.

#### ◆ *Présentation du dispositif de reformage d'hydrocarbure*

L'utilisation de la pile à combustible est un enjeu énergétique important qui se heurte au problème du stockage et du transport de l'hydrogène. En effet, ce stockage et ce transport sont rendus difficiles par le caractère explosif, volatil et inflammable de ce gaz. Une solution qui est très étudiée en ce moment est le reformage d'hydrocarbure permettant de produire in situ l'hydrogène nécessaire.

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] [48].

La Figure 57 représente le dispositif qui doit être alimenté par un convertisseur ; il s'agit donc d'une décharge pointe-plan se développant dans un flux de gaz. Une particularité de ce dispositif est la variation périodique 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 ou que la puissance à fournir par l'alimentation est trop

importante. Dans ce dernier cas, c'est l'extinction de l'arc long qui provoque la création d'un nouvel arc.

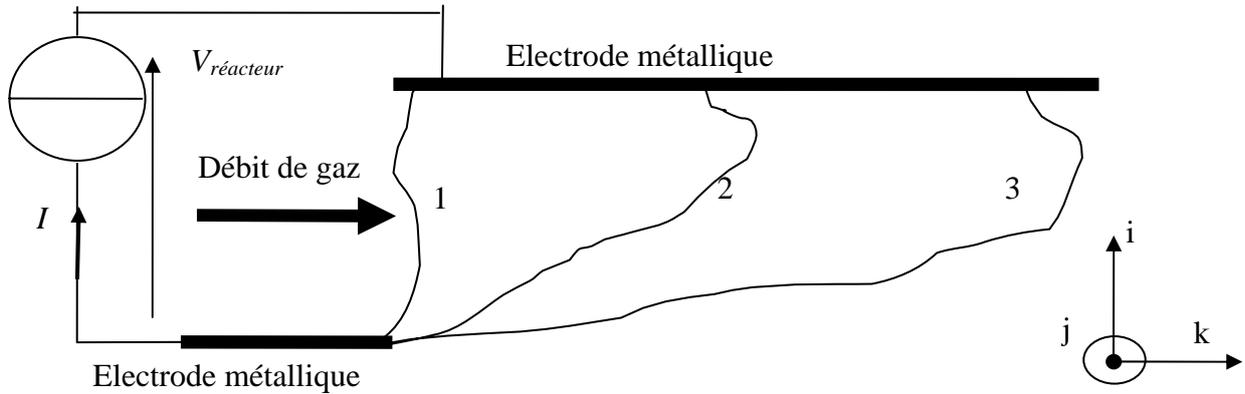


Figure 57 : Schéma de principe du réacteur pour le reformage

◆ *Discretisation simplifiée utilisée*

On pourrait utiliser les mêmes équations que celle utilisées pour la discretisation d'un arc mono filamentaire (page 79), cependant, pour simplifier le problème, on utilise une discretisation simplifiée. On utilise le changement de base, décrit lors de la création du modèle « 0D », qui permet de n'étudier que la conductivité et la densité locale de charges.

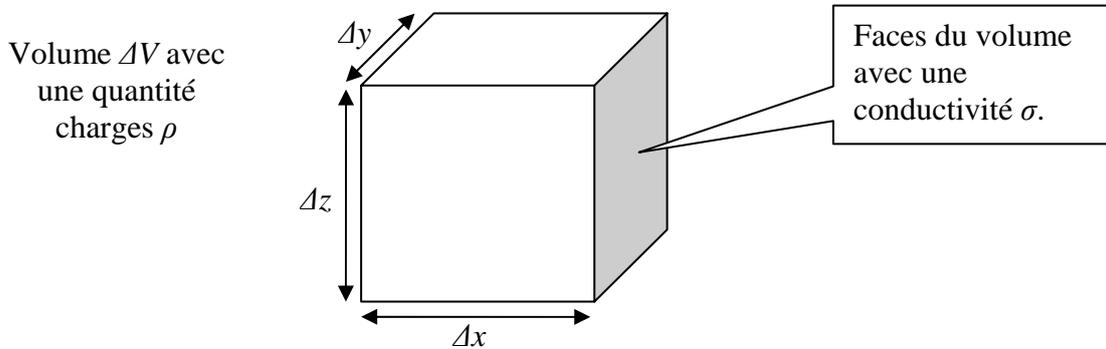


Figure 58 : Élément unitaire de la discretisation simplifiée

On évalue la quantité de charges présentes dans le volume en faisant le bilan des courants autour de celui-ci. Il n'y a pas de condition particulière (page 58) pour utiliser l'équation permettant le calcul de la densité de charge  $\rho$ .

$$\frac{d\rho}{dt} = \iint_S \vec{I} \cdot \vec{n} dS$$

Équation 65 : Calcul de la densité locale de charge en faisant le bilan des courant sur toute la surface entourant le volume.

On évalue la conductivité sur les faces du volume considéré. Comme on évalue la conductivité dans un volume qui se résume à 1 point, le bilan des courants sur la surface entourant ce point est nul. On peut donc (puisque l'on respecte les hypothèses d'utilisation de cette équation – page 64) utiliser l'équation simplifiée liant la variation de conductivité au courant local.

On évalue la densité de charges présente dans les volumes unitaires résultants de la discrétisation (points sur la Figure 59) pour calculer le champ électrique en tout point de l'espace inter électrode. On calcule les courants locaux et la conductivité locale entre ces volumes (traits sur la Figure 59) pour calculer les variations de quantité de charges dans les volumes unitaires.

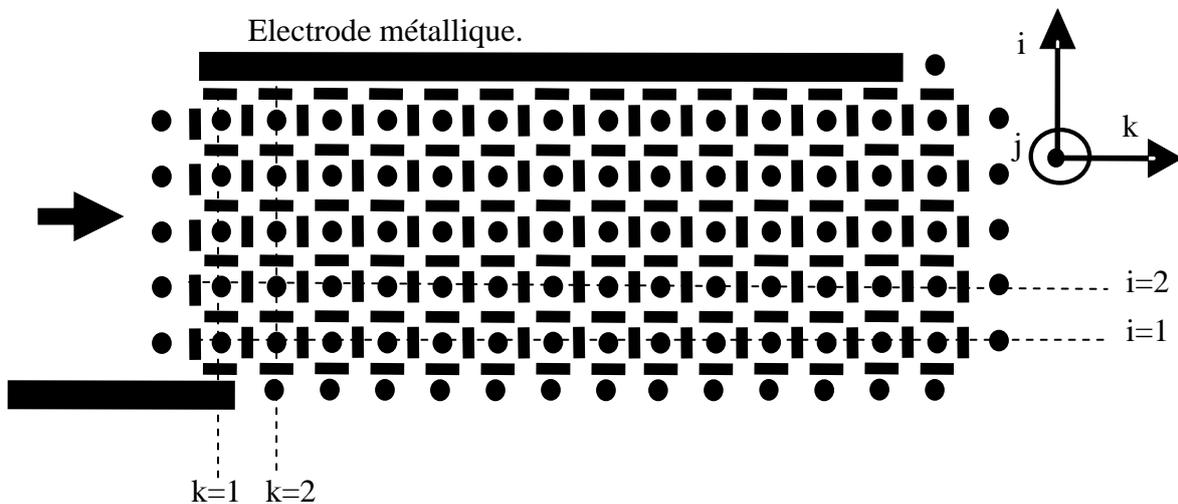


Figure 59 : Discretisation utilisée

On utilise les notations suivantes pour les densités locales de charges, les conductivités locales et les courants :

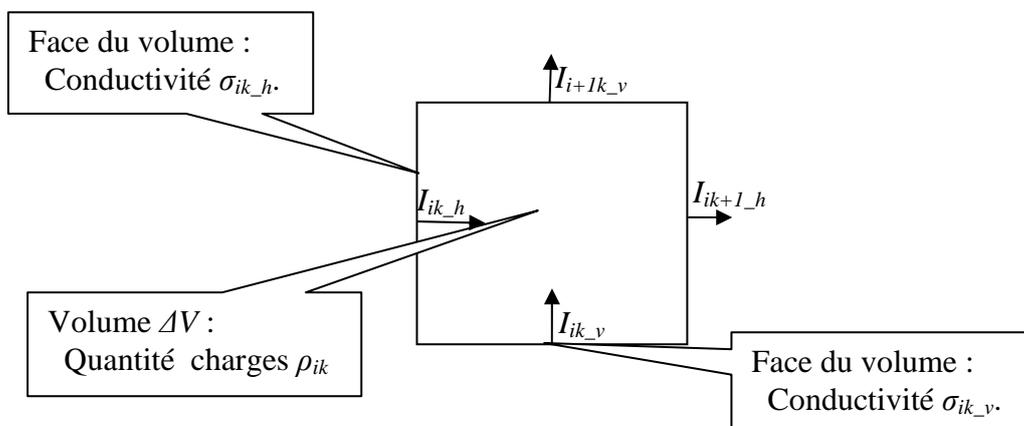


Figure 60 : Notation utilisée pour un élément de discrétisation

Avec ces notations on discrétise l'Équation 65 qui devient :

$$\frac{d\rho_{ik}}{dt} = I_{ik\_h} + I_{ik\_v} - I_{ik+1\_h} - I_{i+1k\_v}$$

*Équation 66 : Variation de la quantité de charge dans l'élément discrétisé*

On calcule la variation de la conductivité à l'aide du modèle liant la variation de la conductivité locale aux densité de courants. Une fois discrétisé l'Équation 43 donne :

$$\begin{aligned} \tau \frac{d\sigma_{ik\_v}}{dt} &= K |j_{ik\_v}| + K' j_{ik\_v}^2 - \sigma_{ik\_v} \\ \tau \frac{d\sigma_{ik\_h}}{dt} &= K |j_{ik\_h}| + K' j_{ik\_h}^2 - \sigma_{ik\_h} \end{aligned}$$

*Équation 67 : Variation de la conductivité aux bords de l'élément discrétisé*

On considère que la quantité totale de charges aux surfaces des deux électrodes est égale et de signe opposé. Dans le cas du dispositif glidarc considéré, la différence entre les deux électrodes (qui ont des géométries différentes) est que la quantité totale de charges se trouve à la surface de la pointe, en un seul point, alors qu'à la surface du plan, on considère la distribution de charge comme uniforme.

Le flux de gaz transporte les particules ionisées de la gauche vers la droite. Ce phénomène est pris en compte avec les équations décrites ci-dessous.

◆ *Variations dues au déplacement du gaz*

Comme on a pu le voir plus haut, les particules chargées sont déplacées par le flux de gaz. Les variables de densité de charges et de conductivité subissent donc des variations dues au déplacement du gaz.

On doit donc évaluer le terme de transport de conductivité ( $\varphi_\sigma$ ) et de densité locale de charges ( $\varphi_\rho$ ) pour chaque élément discrétisé. Pour cela on considère le déplacement des ions et des électrons dû au flux de gaz qui est considéré (page 76) avec les équations suivantes.

$$\begin{aligned} \vec{\varphi}_{electrons} &= \frac{n_e \lambda}{S} \left( \frac{v_{gaz\_x}}{\Delta x} \vec{e}_x + \frac{v_{gaz\_y}}{\Delta y} \vec{e}_y + \frac{v_{gaz\_z}}{\Delta z} \vec{e}_z \right) \\ \vec{\varphi}_{ions} &= \frac{n_i \lambda}{S} \left( \frac{v_{gaz\_x}}{\Delta x} \vec{e}_x + \frac{v_{gaz\_y}}{\Delta y} \vec{e}_y + \frac{v_{gaz\_z}}{\Delta z} \vec{e}_z \right) \end{aligned}$$

*Équation 68 : Flux surfacique d'électrons et d'ions pour un élément discrétisé*

Pour évaluer le flux surfacique de conductivité et de densité locale de charge, on utilise le même changement de variable que celui utilisé (page 59) pour l'introduction du modèle circuit de la décharge. On considère que le gaz a une vitesse colinéaire à l'axe x. Cela nous donne :

$$\begin{cases} \vec{\varphi}_{\sigma} = w_e \vec{\varphi}_{electrons} + w_i \vec{\varphi}_{ios} = \frac{\lambda}{S} (w_e n_e + w_i n_i) \left( \frac{v_{gaz_x}}{\Delta x} \vec{e}_x \right) = \frac{\lambda}{S} \sigma \left( \frac{v_{gaz_x}}{\Delta x} \vec{e}_x \right) \\ \vec{\varphi}_{\rho} = -q_e \vec{\varphi}_{electrons} + q_i \vec{\varphi}_{ios} = \frac{\lambda}{S} q_e (n_i - n_e) \left( \frac{v_{gaz_x}}{\Delta x} \vec{e}_x \right) = \frac{\lambda}{S} \rho \left( \frac{v_{gaz_x}}{\Delta x} \vec{e}_x \right) \end{cases}$$

Équation 69 : Flux surfacique de conductivité et de densité de charges locales pour un élément discrétisé.

Le flux de gaz n'ayant qu'une seule direction, on étudie le cas de deux éléments discrétisés situés au point  $(i, k)$  et au point  $(i, k+1)$ . On considère les flux suivants :

- $\varphi_{\rho ik}$  le flux de charges locales, dû au déplacement gazeux, venant du volume contenant  $\rho_{ik}$  vers le volume contenant  $\rho_{ik+1}$
- $\varphi_{\sigma ik_h}$  le flux de conductivité, dû au déplacement gazeux, venant de la face ayant la conductivité  $\sigma_{ik_h}$  vers la face ayant la conductivité  $\sigma_{ik+1_h}$ .
- $\varphi_{\sigma ik_v}$  le flux de conductivité, dû au déplacement gazeux, venant de la face ayant la conductivité  $\sigma_{ik_v}$  vers la face ayant la conductivité  $\sigma_{ik+1_v}$ .

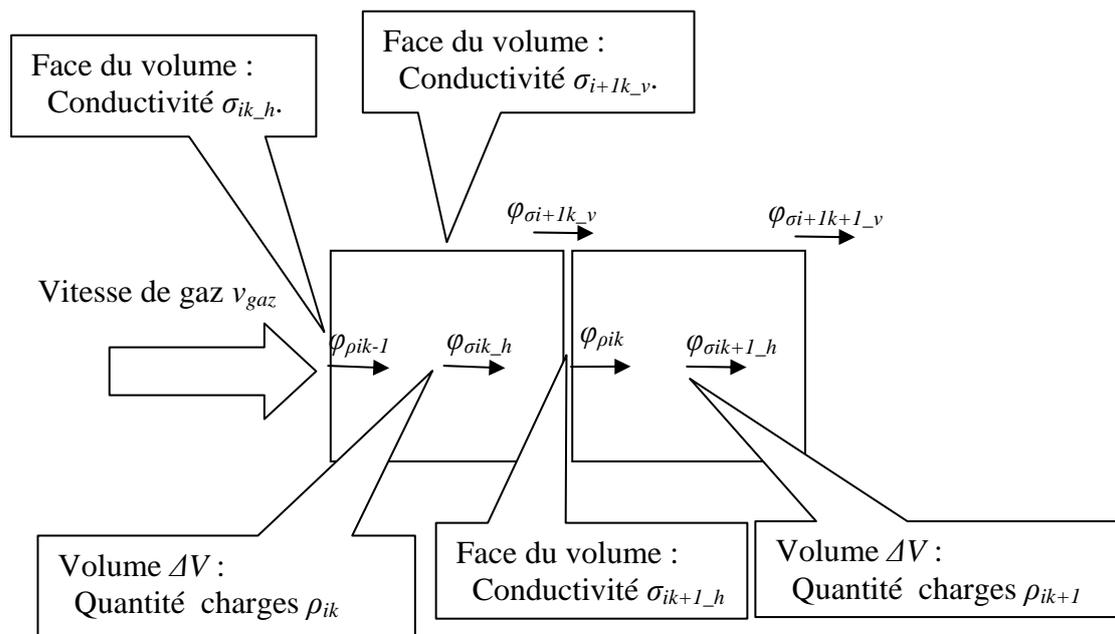


Figure 61 : Notations utilisées pour le bilan de variation de conductivité et de densité locale de charge dû au flux de gaz.

Avec ces notations on a les flux surfaciques suivants :

$$\begin{cases} \varphi_{\sigma_{ik\_h}} = \frac{\lambda}{\Delta x S} \sigma_{ik\_h} v_{gaz} \\ \varphi_{\sigma_{ik\_v}} = \frac{\lambda}{\Delta x S} \sigma_{ik\_v} v_{gaz} \\ \varphi_{\rho_{ik}} = \frac{\lambda}{\Delta x S} \rho_{ik} v_{gaz} \end{cases}$$

*Équation 70 : Flux surfacique de conductivité et de densité locale de charge en k dans notre cas*

La surface du volume qui a une conductivité  $\sigma_{ik+1}$  perd des porteurs de charges à cause du flux de conductivité en  $ik+1$  et en gagne grâce au flux de conductivité en  $ik$ . On a donc un bilan pour la variation de la conductivité due au déplacement gazeux qui s'écrit :

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial \sigma_{ik+1\_h}}{\partial t} \right)_{bilan\_flux\_de\_gaz} &= S(\varphi_{\sigma_{ik\_h}} - \varphi_{\sigma_{ik+1\_h}}) \\ \left( \frac{\partial \sigma_{ik+1\_v}}{\partial t} \right)_{bilan\_flux\_de\_gaz} &= S(\varphi_{\sigma_{ik\_v}} - \varphi_{\sigma_{ik+1\_v}}) \end{aligned}$$

*Équation 71 : Bilan de variation de la conductivité due au déplacement du gaz*

On fait le même bilan pour la variation de densité locale de charge.

$$\left( \frac{\partial \rho_{ik+1}}{\partial t} \right)_{bilan\_flux\_de\_gaz} = S(\varphi_{\rho_{ik}} - \varphi_{\rho_{ik+1}})$$

*Équation 72 : Bilan de variation de la quantité locale de charge due au flux*

On a donc les équations finales suivantes pour le calcul de la conductivité et des densités locales de charges :

$$\begin{aligned} \tau \frac{d\sigma_{ik\_v}}{dt} &= K |j_{ik\_v}| + K' j_{ik\_v}^2 - \sigma_{ik\_v} + S(\varphi_{\sigma_{ik-1\_v}} - \varphi_{\sigma_{ik\_v}}) \\ \tau \frac{d\sigma_{ik\_h}}{dt} &= K |j_{ik\_h}| + K' j_{ik\_h}^2 - \sigma_{ik\_h} + S(\varphi_{\sigma_{ik-1\_h}} - \varphi_{\sigma_{ik\_h}}) \\ \frac{d\rho_{ik}}{dt} &= I_{ik\_h} + I_{ik\_v} - I_{ik+1\_h} - I_{i+1k\_v} + S(\varphi_{\rho_{ik-1}} - \varphi_{\rho_{ik}}) \end{aligned}$$

*Équation 73 : Equations finales du modèle discrétisé simplifié avec flux de gaz*

◆ *Conditions aux limites*

Les conditions aux limites sont définies pour les points situés aux bords de l'espace discrétisé. Les charges y sont amenées par les courants des éléments voisins ; elles participent à la création du champ, mais on considère qu'elles ont une durée de vie limitée.

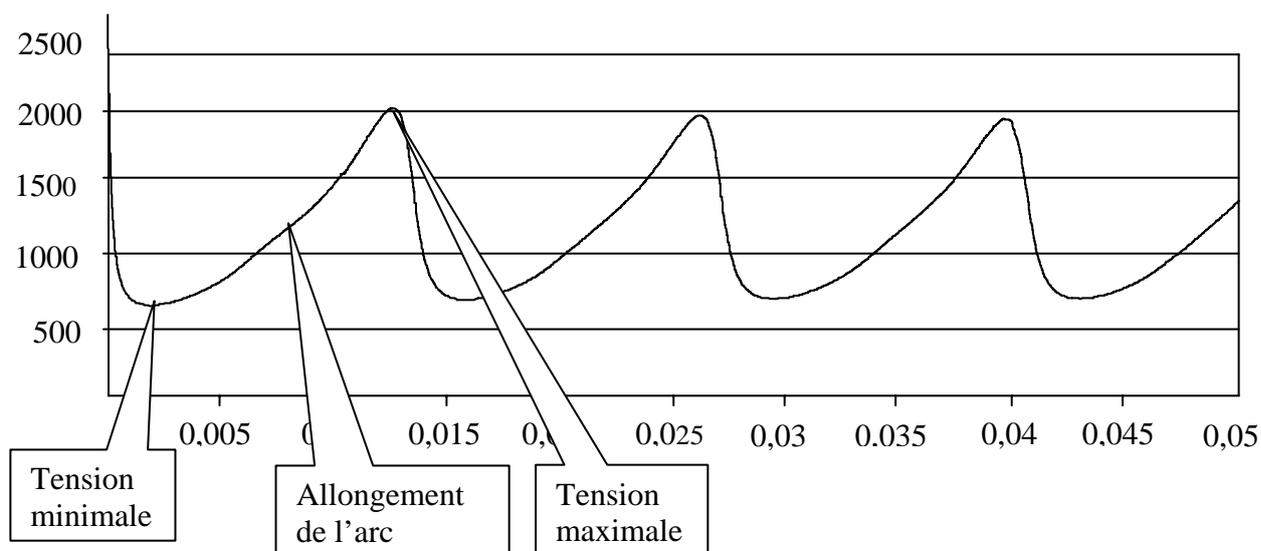
$$\frac{d\rho_{bord}}{dt} = I_{sortie} - \frac{\rho_{bord}}{\tau_{bord}}$$

*Équation 74 : quantité de charge au bord de la zone de décharge*

Cette solution permet de simuler la disparition des charges qui quittent la zone de discrétisation. Le temps de disparition de ces charges dépend d'une constante de temps arbitraire ( $\tau_{bord}$  qu'on fixe à  $10^{-12}$ ) ; si celle-ci est trop importante, les charges sont accumulées au bord de la zone discrétisée et ne disparaissent presque pas ; si elle est trop brève, les charges disparaissent presque instantanément.

◆ *Résultats de simulations et expérimentaux*

Pour valider qualitativement et calibrer le modèle, on le simule dans le cas de l'alimentation par une source de courant constante de 1A, avec un flux de gaz constant. On peut constater que, pour ce qui concerne la tension aux bornes du gaz, le modèle présente un comportement satisfaisant, puisqu'on retrouve un phénomène basse fréquence qui se manifeste par une forme d'onde de la tension en dent de scie (Figure 62).



*Figure 62 : Chronogramme de la tension (en V), pour une alimentation par un courant constant (1A)*

On constate également que le lieu de la décharge varie périodiquement de la gauche vers la droite (dans le sens attendu, compte tenu du sens d'écoulement du flux de gaz). On peut voir que la création de l'arc à l'endroit où la distance inter électrode est la plus faible, débute avant que l'arc précédent ne soit complètement éteint (Figure 62).

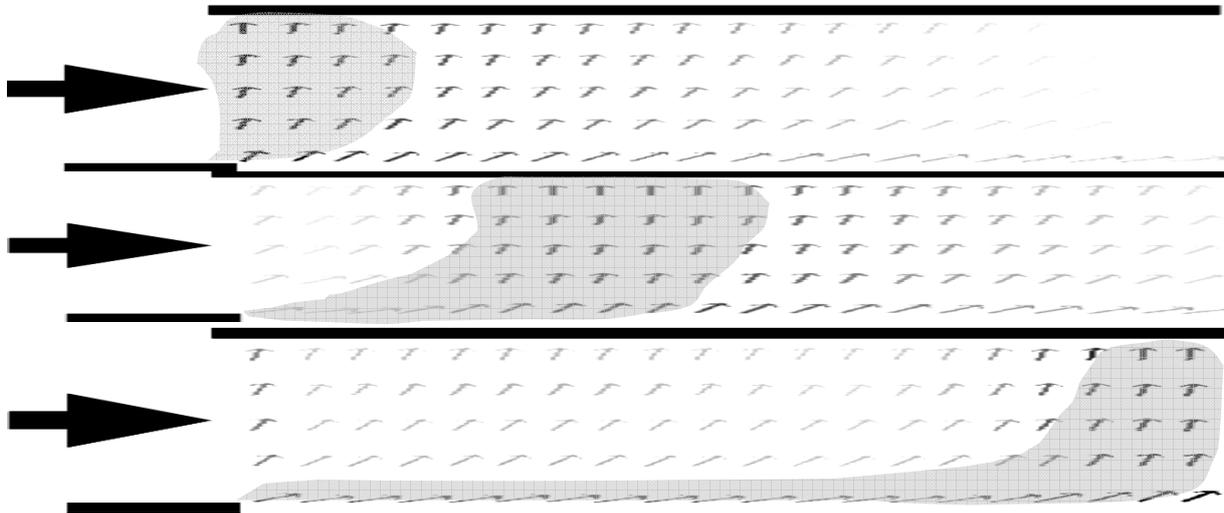


Figure 63 : Localisation des courants majoritaires à tension minimale (en haut) maximale (en bas) et intermédiaire (milieu)

D'autres essais permettent de constater les différents couplages entre la vitesse du gaz et la période de variation de la tension à ses bornes. Plus la vitesse du gaz est élevée, plus la période est courte sans pour autant qu'il y ait directement proportionnalité.

Un autre couplage, qui a pu être constaté expérimentalement, est le couplage entre la valeur du courant total et la fréquence de variation de la tension : plus le courant est important, plus cette fréquence est élevée.

On évalue maintenant, les performances de ce modèle de décharge glissante dans le cas d'une alimentation par une source de tension (réseau triphasé amplifié par un transformateur et redressé, qui fournit une tension de 5000 V à vide) en série avec une résistance (8 kohms) ; il s'agit d'un cas pour lequel il nous a été possible de disposer de relevés expérimentaux.

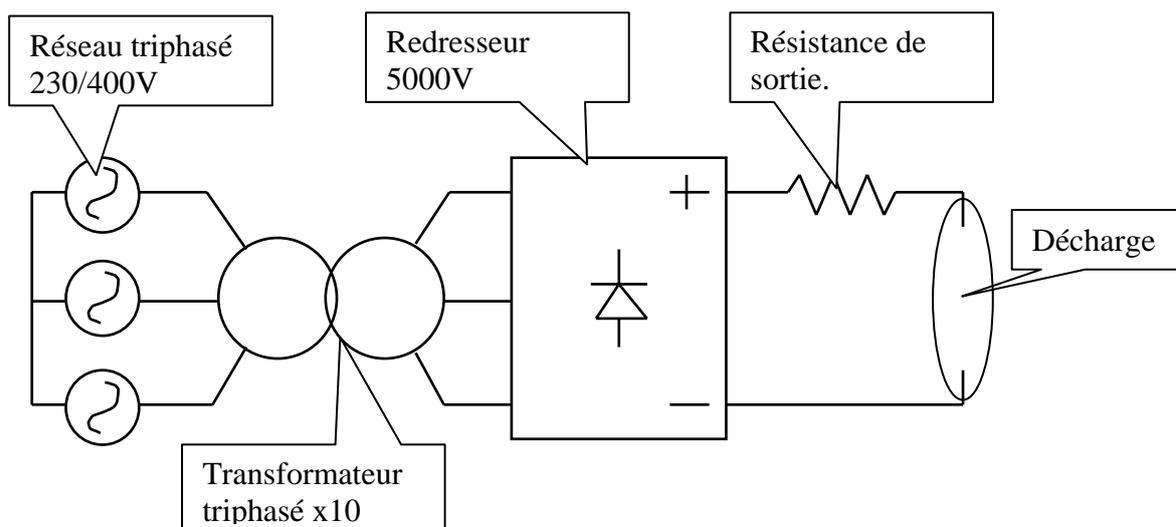


Figure 64 : Alimentation source de tension série avec une résistance

Comme nous l'avons montré qualitativement plus haut, la variation de la tension d'arc dans la décharge entraîne une variation du courant total (page 31). Ce phénomène est visible sur les chronogrammes de la Figure 65.

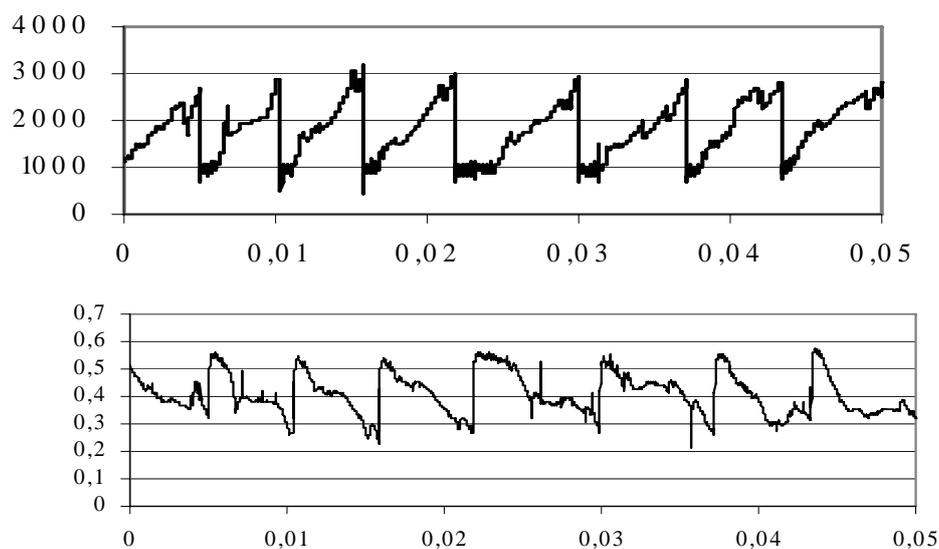


Figure 65 : Chronogrammes expérimentaux de la tension (haut en V) et du courant (bas en A) de la décharge électrique, dans le cas de l'alimentation par une source de tension associée à une résistance de forte valeur

La Figure 65 présente les résultats de simulation de ce dispositif expérimental. On notera le bon accord au niveau :

- Des valeurs moyennes des tensions et des courants ;
- De l'amplitude des ondulations de la tension et du courant.
- De la périodicité de la tension due au phénomène de décharge glissante.

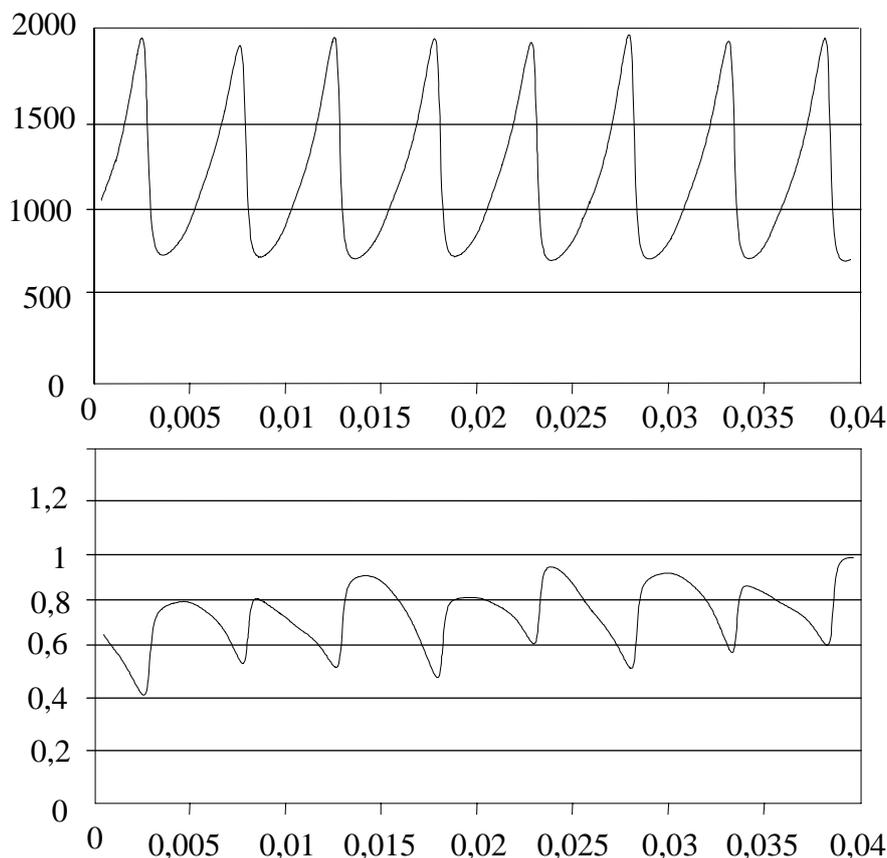


Figure 66 : Résultats de simulation : chronogrammes de la tension (en haut, en V) et du courant (en bas, en A) pour une alimentation source de tension série avec une résistance.

Cette simulation met en évidence la bonne représentativité des phénomènes électriques vu des bornes du dispositif.

### **5) Conclusion**

Nous avons vu comment prévoir le point de fonctionnement obtenu par l'association d'une alimentation et d'un dispositif à décharge. Cette analyse nous a permis de définir des conditions nécessaires à l'obtention de points de fonctionnement sur la caractéristique statique de la décharge.

Nous avons également montré qu'à partir d'un jeu réduit de phénomènes décrits simplement, il est possible de simuler le comportement électrique des décharges, aussi bien

pour des décharges de longueur fixe que pour les décharges de longueur variable. Bien qu'incomplètes du point de vue de la physique des plasma, ces modélisations permettent d'étudier les couplages entre la décharge électrique et son alimentation.

Un point délicat dans la mise au point de nos modèles de simulation est la définition des valeurs numériques des paramètres ; la mise au point de modèles basés sur la physique des plasmas a eu dans notre approche pour objectif initial de permettre l'utilisation d'expressions littérales de ces paramètres ; mais les simplifications auxquelles nous avons dû consentir pour rester fondamentalement dans notre domaine de spécialisation (celui de l'étude des alimentations électriques adaptées au contrôle des décharges) nous ont conduits à restreindre cette ambition et à nous orienter vers la recherche de méthodes d'identification numériques adaptées. Ce point est développé dans le chapitre suivant.

## **Chapitre III : Identification numérique des paramètres d'un modèle**



## Chapitre III : Identification numérique des paramètres d'un modèle

Dans le chapitre précédent plusieurs modèles ont été présentés. Ceux-ci sont constitués d'équations différentielles et leur comportement dynamique dépend de la valeur des paramètres. Pour effectuer des simulations réalistes vis-à-vis des essais expérimentaux, il faut connaître la valeur des paramètres de nos modèles.

Nous présentons une méthode pour déterminer la valeur de ces paramètres. Celle-ci est la «méthode du modèle», associée à différents algorithmes d'optimisation.

Un programme exploitant cette méthode a été réalisé, permettant de calculer les paramètres d'un modèle à partir des expressions littérales de ses équations et de relevés expérimentaux.

### **1) Objectifs recherchés**

La modélisation d'un dispositif à décharge est rendue difficile par l'évolution de la décharge électrique dans l'espace et par la complexité des phénomènes se produisant dans le gaz.

Par ailleurs, la prise en compte de tous les phénomènes physiques ne nous est pas toujours utile et rend les temps de simulation très importants. On est donc amené à faire des modifications sur les équations à simuler ainsi qu'à introduire des hypothèses simplificatrices qui permettent de limiter le temps de simulation. Ces simplifications amènent également à prendre en compte des paramètres dont nous ne connaissons pas aisément la valeur et qu'il faut évaluer.

Dans cette optique, nous avons mis au point un programme permettant de générer rapidement des modèles de décharge et d'évaluer la valeur des différents paramètres pour obtenir des résultats de simulation prédictifs, proches de ceux de l'expérimentation.

## 2) Méthode d'identification

Après avoir montré les notations que nous utilisons pour décrire nos modèles, on présente des méthodes classique d'identification des paramètres.

### a) Définition du modèle

Un modèle, au sens de la simulation, a pour but d'établir une relation entre des variables d'entrées ( $e_i$ ) et des variables de sorties ( $s_i$ ). Pour cela, il est caractérisé par des variables internes ( $v_i$ ), qui évoluent au cours du temps, et des paramètres fixes ( $p_i$ ). Des équations mathématiques font le lien entre les variables internes, les paramètres, les entrées et les sorties du modèle.

Dans le domaine de l'électrotechnique, les modèles de composants donnent une relation entre les courants et les tensions aux bornes du dispositif à modéliser. C'est ce type de relation que nous cherchons à établir entre la tension dans une décharge et le courant circulant dans celle-ci.

Les variables internes ( $v_i$ ) peuvent être des intermédiaires de calcul mais elles représentent souvent un état interne, généralement énergétique, du modèle. Dans le cas des circuits électriques, les courants dans des inductances ou les tensions dans les capacités sont des variables d'états du système.

Les paramètres des modèles sont des constantes qui les caractérisent.

Un modèle liant les entrées  $e_1, \dots, e_i$  aux sorties  $s_1, \dots, s_i$  peut être décrit par un système d'équations, souvent différentiel, comme suit :

$$\begin{cases} v_1 = f_1(p_1, \dots, p_i, v_2, \dots, v_i, e_1, \dots, e_i) \\ \vdots \\ v_i = f_i(p_1, \dots, p_i, v_1, \dots, v_{i-1}, e_1, \dots, e_i) \\ s_1 = g_1(p_1, \dots, p_i, v_1, \dots, v_i, e_1, \dots, e_i) \\ \vdots \\ s_i = g_i(p_1, \dots, p_i, v_1, \dots, v_i, e_1, \dots, e_i) \end{cases}$$

*Équation 75 : Equations générales d'un modèle*

Les équations d'un modèle représentent le plus souvent des équations de la physique mais elles peuvent également provenir d'observations empiriques du dispositif à modéliser. Les modèles électriques que nous utilisons ont des équations qui sont généralement directement issues de lois de la physique (loi d'Ohm), mais dans certains cas ce sont des simplifications qui sont utilisées (issues par exemple d'un moyennage).

Afin d'illustrer notre propos, nous étudions un exemple simple en électrotechnique : la modélisation par un schéma équivalent d'un transformateur haute tension, haute fréquence, tenant compte des éléments parasites. Ce modèle sera utilisé lors de l'étude d'un montage à résonance pour les décharges à barrière diélectrique.

Le choix d'un modèle circuit pour l'illustration des méthodes d'identifications a pour but de simplifier la lecture. Cependant, une utilisation de la méthode pour l'identification des paramètres sur les modèles de gaz est donnée à la fin du chapitre.

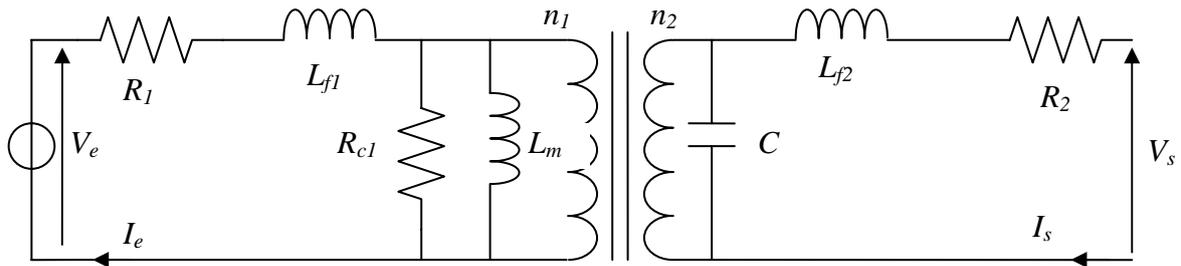


Figure 67 : Circuit équivalent d'un transformateur haute tension et haute fréquence

On impose l'entrée du modèle comme étant la tension  $V_e$ , la sortie étant le courant  $I_e$ . Nous utilisons comme variables internes la tension aux bornes de la capacité et les courants dans les inductances. Les paramètres de ce modèle sont les valeurs des composants. Dans l'étude de ce transformateur,  $R_1$  et  $R_2$  modélisent les pertes Joule au primaire et au secondaire ;  $L_{f1}$  et  $L_{f2}$  sont les inductances de fuites primaire et secondaire,  $L_m$  l'inductance magnétisante ;  $R_{c1}$  modélise les pertes fer et  $C$  est la capacité parasite des enroulements.

L'objectif de la méthode que nous cherchons à mettre au point est la détermination de la valeur de chacun de ces paramètres à partir de chronogrammes expérimentaux de grandeurs électriques significatives.

On considère les cas où la sortie du transformateur est en circuit ouvert ou court-circuité, en fonction des conditions expérimentales.

Pour ce modèle, lorsque le secondaire est en circuit ouvert, on a les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dI_{Lm}}{dt} = \frac{n_1}{n_2} \frac{V_c}{L_m} \\ \frac{dV_c}{dt} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \frac{1}{C} \left( I_{Lf1} - I_{Lm} - \frac{V_c}{R_{c1}} \right) \\ \frac{dI_{Lf1}}{dt} = \frac{V_e - R_1 I_{Lf1} - V_c}{L_{f1}} \\ I_e = I_{Lf1} \end{cases}$$

Équation 76 : Equations du modèle de transformateur avec enroulement secondaire en circuit ouvert

On cherche à obtenir la valeur des paramètres  $R_1$ ,  $L_{f1}$ ,  $R_{c1}$ ,  $L_m$  et  $C$  de ce modèle.  $L_{f2}$  et  $R_2$  seront évaluées à partir de mesures où l'enroulement secondaire est en circuit fermé.

### b) Méthodes d'identification

De façon générale, il existe différentes méthodes pour connaître les valeurs des paramètres d'un modèle.

#### ◆ *Mesure directe*

Les paramètres du modèle qu'on étudie peuvent être mesurés directement. La valeur d'une résistance peut être mesurée à l'aide d'un appareil de mesure. Ce type de méthode est souvent utilisé lorsque les équations du modèle sont des équations proches de la physique. Les paramètres dans ce cas sont souvent des dimensions et des constantes physiques.

#### ◆ *Mesure indirecte*

Les paramètres sont déduits d'un essai effectué dans des conditions précises. C'est souvent le cas lorsque l'on utilise des modèles usités (modèle de machine ou de transformateur) dont la valeurs des paramètres est le fruit d'essais permettant de négliger certains d'entre eux.

Dans le cas du transformateur, un essai à courant continu au primaire et au secondaire permet de connaître les valeur de  $R_1$  et  $R_2$ .

$$\begin{cases} R_1 = \begin{pmatrix} V_e \\ I_e \end{pmatrix} \\ R_2 = -\begin{pmatrix} V_s \\ I_s \end{pmatrix} \end{cases}$$

*Équation 77 : Calcul des résistances du circuit équivalent par mesure indirecte (en courant continu).*

◆ *Méthode d'identification des moindres carrés*

Il y a des cas où l'on cherche à connaître la valeur des paramètres à partir de chronogrammes de fonctionnement en régime transitoire. Dans ce cas, la méthode des moindres carrés permet d'obtenir de bons résultats [38].

Dans un premier temps, il faut effectuer un essai temporel « significatif » qui sollicite toutes les constantes de temps à identifier. Cet essai temporel est enregistré, entrées comme sorties, avec un pas d'échantillonnage constant. Ensuite, on décrit le modèle sous forme d'une fonction de transfert discrétisée, afin d'obtenir une relation récurrente entre l'entrée échantillonnée et la sortie. Dans l'exemple du modèle de transformateur, dans le cas où le secondaire est en circuit ouvert, la fonction de transfert discrétisée est de la forme :

$$\frac{I_e(z^{-1})}{V_e(z^{-1})} = \frac{a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}$$

*Équation 78 : Fonction de transfert discrétisée du modèle équivalent du transformateur HT, avec le secondaire en circuit ouvert*

De la fonction de transfert discrétisée, on déduit sous forme matricielle, une relation de récurrence entre les variables d'entrées, de sorties, et le vecteur des coefficients noté [c]. Cette relation est de la forme :

$$M[c] = Y$$

*Équation 79 : équation matricielle à résoudre pour les moindres carrés*

$M$  et  $Y$  sont composés des mesures échantillonnées des entrées et des sorties du modèle. Dans notre exemple, on note  $V_{ek}$  et  $I_{ek}$ , les valeurs de  $I_e$  et de  $V_e$  aux instants de discrétisation  $kT_e$ ,  $T_e$  étant la période d'échantillonnage, sur  $n$  points. La fonction de transfert discrétisée donne des relations récurrentes de la forme :

$$Ie_k = a_1Ve_{k-1} + a_2Ve_{k-2} + a_3Ve_{k-3} - (b_1Ie_{k-1} + b_2Ie_{k-2} + b_3Ie_{k-3})$$

Équation 80 : Relation récurrente donnée par la fonction de transfert discrétisé

Cela nous permet d'écrire :

$$\begin{pmatrix} Ve_3 & Ve_2 & Ve_1 & -Ie_3 & -Ie_2 & -Ie_1 \\ Ve_{k-1} & Ve_{k-2} & Ve_{k-3} & -Ie_{k-3} & -Ie_{k-2} & -Ie_{k-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Ve_{n-1} & Ve_{n-2} & Ve_{n-3} & -Ie_{n-3} & -Ie_{n-2} & -Ie_{n-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Ie_4 \\ Ie_k \\ \vdots \\ Ie_n \end{pmatrix}$$

The diagram shows the matrix equation above. A box labeled 'M' has a bracket pointing to the matrix. A box labeled '[c]' has a bracket pointing to the coefficient vector. A box labeled 'Y' has a bracket pointing to the output vector.

Équation 81 : Cas de l'exemple du transformateur

A partir de la relation matricielle, nous pouvons calculer le vecteur coefficients à l'aide de la pseudo inverse  $O$  de la matrice  $M$ .

$$[c] = (M^t M)^{-1} M^t Y = OY$$

Équation 82 : Calcul du vecteur coefficient à l'aide de la pseudo inverse de  $M$

Sous réserve d'avoir moins de paramètres que de coefficients dans la fonction de transfert discrétisée, on peut revenir aux valeurs des paramètres à partir des coefficients du vecteur  $[c]$ .

Le problème majeur de cette méthode est d'effectuer un essai qui soit « significatif » ; en effet, pour qu'il soit considéré comme tel, il faut que la durée de l'essai soit égale à 5 à 10 fois la constante de temps à identifier. En outre, l'échantillonnage ne doit pas être excessif (10 à 100 points pour la constante de temps à étudier) et avec un faible niveau de bruit (cette méthode y est particulièrement sensible). De surcroît, cette méthode n'est applicable que pour des modèles linéaires, puisqu'elle nécessite une représentation par une fonction de transfert.

Dans le cas du transformateur avec le secondaire en circuit ouvert, on a étudié deux cas en simulation pour quantifier ces défauts. Dans les deux cas, le modèle est simulé sous Simulink avec des paramètres connus, une entrée en tension carrée de fréquence 20kHz et d'amplitude 50V. Ensuite, on utilise les mesures obtenues en simulation pour identifier la fonction de transfert discrétisée qui est à son tour simulée pour comparer le résultat de cette simulation à la sortie initiale. Dans le premier cas, le modèle est simulé sans bruit ; dans le deuxième cas,

on additionne aux signaux mesurés un bruit de valeur moyenne nulle. On s'aperçoit alors que même avec des signaux faiblement bruités, le résultat de l'identification est très fortement détérioré. On observe des erreurs similaires lorsqu'on a une période de discrétisation temporelle trop petite.

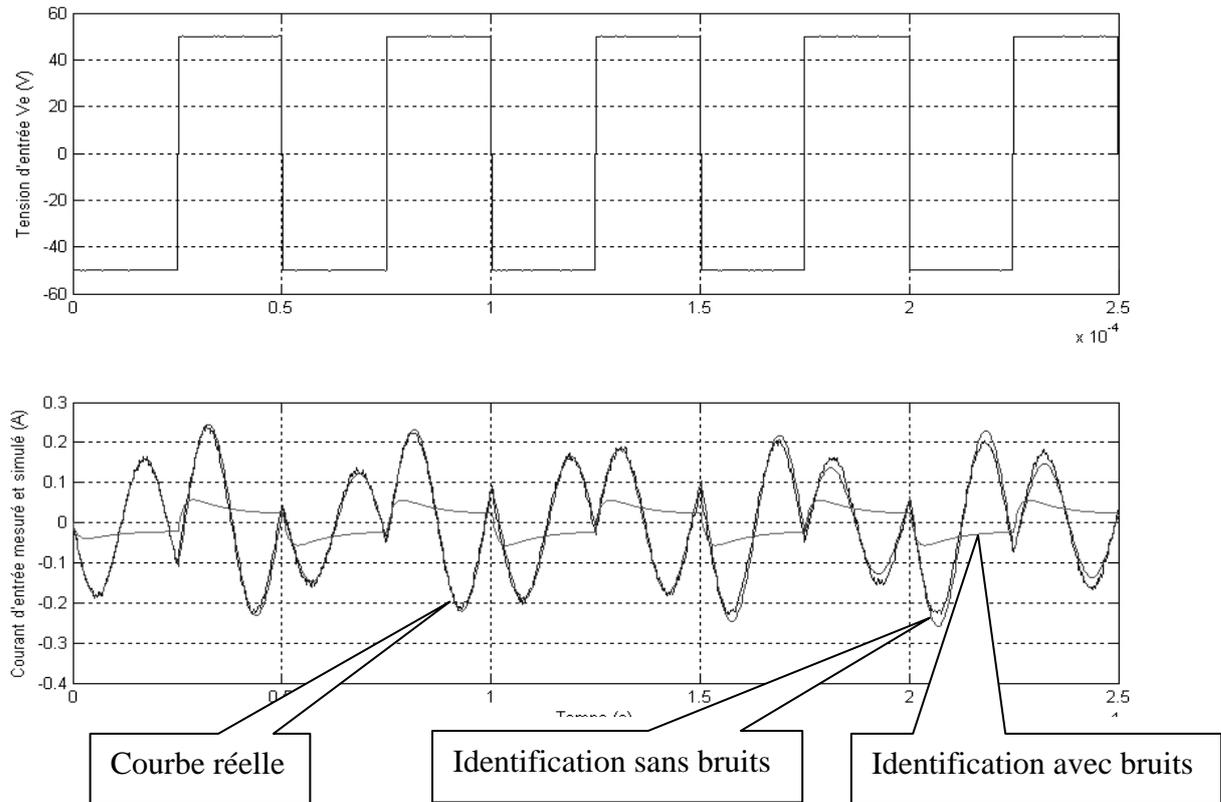


Figure 68 : Comparaison entre deux résultats d'identifications ; courant mesuré et simulé (en bas en A) avec des paramètres identifiés à partir d'un essai temporel avec une tension d'entrée carrée (en haut en V), l'une avec un système parfait, l'autre avec un bruit.

En conclusion, si cette méthode est assez simple à mettre en œuvre numériquement, il est nécessaire d'avoir déjà une bonne connaissance du système pour éviter de mal interpréter les résultats.

### c) La méthode d'identification du modèle

La méthode du modèle est également basée sur un essai expérimental. Néanmoins, elle est moins sensible à la qualité de l'enregistrement et est utilisable avec des modèles non linéaires. Cette méthode consiste à comparer la sortie du modèle simulé et la mesure expérimentale lorsque ceux-ci ont une même entrée afin de minimiser leur différence [38].

Dans ce cadre, le processus d'identification se traduit par la minimisation de la fonction qui, à un vecteur paramètres, associe une erreur entre la sortie simulée et la sortie réelle. C'est donc l'optimisation d'une fonction à plusieurs variables qui va être effectuée.

Cette méthode pose néanmoins un problème de raisonnement sur sa validité, discuté dans la partie suivante : l'erreur minimale entre la simulation et la mesure correspond-elle à une erreur minimale entre la valeur réelle des paramètres et celle estimée pour la simulation ?

Sur la base de cette hypothèse, c'est un raisonnement qui suppose que l'on connaît parfaitement les équations régissant le système à modéliser et que l'on puisse le simuler. Cela suppose également que les mesures soient parfaites et que le chronogramme de sortie considéré, lors de l'essai d'identification, dépend de tous les paramètres. Si toutes ces conditions sont respectées, alors lorsque l'erreur entre la simulation et l'essai expérimental sera nulle, la valeur des paramètres sera exacte.

Bien évidemment, les conditions citées ci-dessus sont quasi impossibles à obtenir : les équations qui modélisent un système complexe sont souvent des approximations. D'autre part, les simulations et le traitement de ces problèmes sont fait dans des espaces discrétisés dans le temps, ce qui implique une imperfection dans les mesures temporelles de l'essai. On peut cependant considérer qu'il est possible d'avoir de bons résultats si l'essai servant à l'identification est suffisamment riche en harmoniques (majorité des modes du système excités) et si les mesures sont effectuées correctement à l'aide de filtre d'anti-recouvrement avec une période d'échantillonnage suffisamment faible. Dans ces conditions, la méthode du modèle se résume à l'optimisation du vecteur paramètre afin de minimiser l'erreur entre la simulation et l'expérience.

En effet, la simulation peut être considérée comme une fonction  $f$  qui, à un vecteur paramètres  $[p]$  et un vecteur d'entrées  $[E]$ , associe un vecteur de sorties  $[s]$ . Ce vecteur de sortie est comparé à la sortie  $[S]$ , mesurée sur le système réel, afin d'évaluer l'erreur quadratique entre la simulation et la mesure. On a donc une fonction  $g$  qui, à un vecteur paramètres, un vecteur d'entrée et un vecteur de sortie, associe une erreur quadratique qui à l'avantage d'être dérivable par rapport à la sortie simulée et toujours positive. Dans le cas d'un système à plusieurs sorties, l'erreur calculée est la somme des erreurs pondérées d'un poids  $m_o$  (l'indice « o » permet de considérer successivement chacune des sorties).

$$\left. \begin{aligned} [s] &= f \begin{pmatrix} [p] \\ [E] \end{pmatrix} \\ \text{erreur} &= \sum_o m_o \sum_i \frac{(s_i - S_i)^2}{S_i^2} \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{erreur} = g \begin{pmatrix} [p] \\ [E] \\ [S] \end{pmatrix} = h([p])$$

Équation 83 : Traduction du problème d'identification en un problème d'optimisation

Nous devons donc minimiser  $h$  en ajustant la valeur du vecteur  $[p]$ . Pour cela, n'importe quel algorithme d'optimisation peut être utilisé. Les plus couramment utilisés pour l'identification sont : la méthode du gradient et la méthode de Levenberg-Maquard ; cependant, si la fonction n'est pas dérivable, on peut être contraint d'utiliser des méthodes qui n'utilisent pas les gradients, comme celle de Hooke Jeeves.

Ce sont des méthodes itératives qui évaluent à chaque itération  $i$ , la valeur  $erreur_i$  de la fonction pour le vecteur  $[p]_i$  et génèrent un nouveau vecteur  $[p]_{i+1}$  pour l'itération suivante. Il est donc nécessaire de donner un point  $[p]_0$  pour faire démarrer ces algorithmes et de définir des conditions d'arrêts (nombre d'itération maximum...).

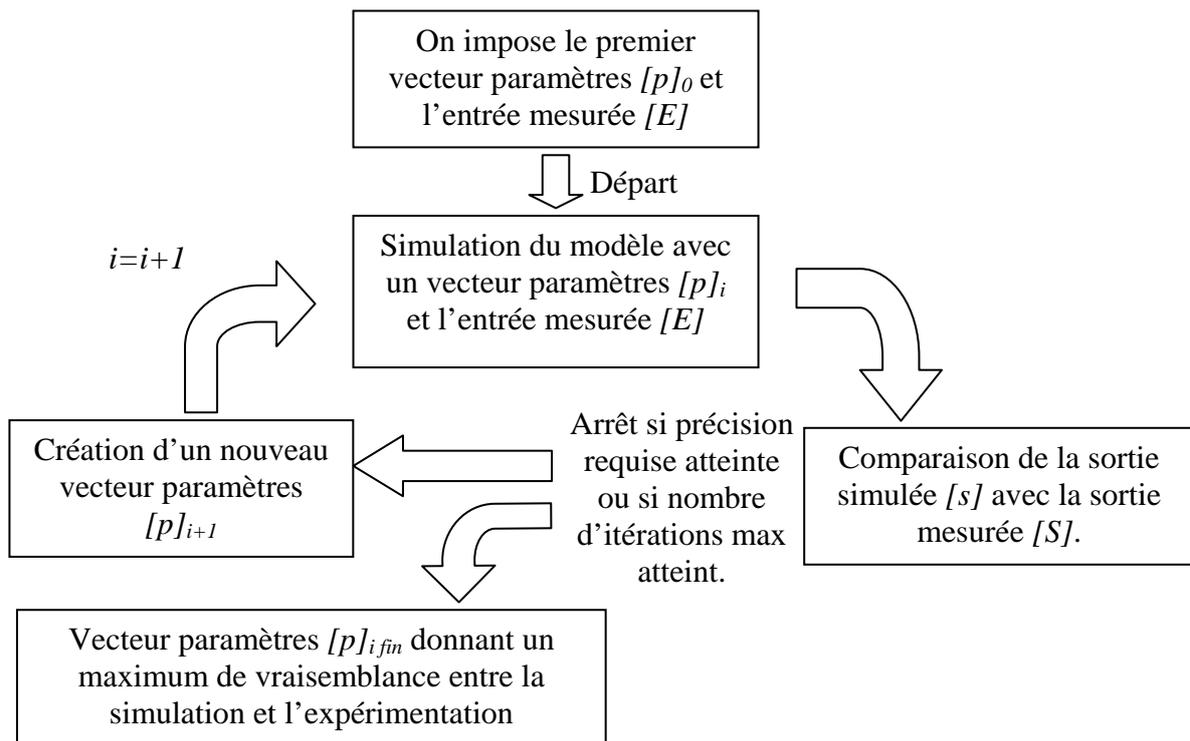


Figure 69 : Organigramme des méthodes d'optimisation pour la méthode du modèle

On peut voir que ce qui va distinguer ces algorithmes entre eux (exception faite des algorithmes évolutionnaires), c'est la méthode utilisée pour obtenir la valeur du vecteur  $[p]_{i+1}$ .

◆ *Méthode d'optimisation du gradient*

La méthode du gradient, plus connue sous le nom de la méthode de la plus profonde descente, est la plus utilisée des méthodes d'optimisation. Elle consiste à parcourir l'espace des solutions possibles dans la direction du plus fort gradient. A chaque itération, on fait varier le vecteur paramètre en ajoutant au vecteur initial la valeur du gradient pondéré par le pas  $a$ . On a donc :

$$[p]_{i+1} = [p]_i + a \nabla h([p]_i)$$

*Équation 84 : Méthode d'optimisation du gradient*

Il est courant de faire varier le pas  $a$  afin d'accélérer la convergence de l'algorithme. Cet algorithme a malheureusement une convergence relativement lente ce qui fait que d'autres algorithmes sont souvent utilisés.

◆ *Méthode d'optimisation de Levenberg-Maquard*

Cette méthode utilise en partie la méthode du gradient et celle de Newton. La méthode de Newton utilise la dérivée seconde pour générer le vecteur  $[p]_{i+1}$ . Cela donne, en notant  $H_i$  le Hessien (dérivée seconde des fonctions à plusieurs variables) de la fonction  $h$  à l'itération  $i$  ( $H_i^{-1}$  est l'inverse du Hessien):

$$[p]_{i+1} = [p]_i - H_i^{-1} \nabla h([p]_i)$$

*Équation 85 : Méthode d'optimisation de Newton*

Malheureusement cette méthode ne converge que si elle est au voisinage d'une solution, ce qui fait qu'elle est peu utilisée telle quelle. La méthode de Levenberg-Maquard pondère l'influence du Hessien par un poids  $a_i$  qui permet de passer d'une méthode à l'autre. En effet on a, avec  $I$  la matrice identité :

$$[p]_{i+1} = [p]_i - (H_i + a_i I)^{-1} \nabla h([p]_i)$$

*Équation 86 : Méthode d'optimisation de Levenberg-Maquard*

Si  $a_i$  est grand, alors on se rapproche de la méthode du gradient avec un pas de  $1/a_i$ , sinon on se rapproche de la méthode de Newton. A chaque itération, on fait varier  $a_i$  tel qu'il diminue si on se rapproche de la solution et qu'il augmente si on s'en éloigne.

◆ *Méthode d'optimisation de Hooke Jeeves*

La méthode de Hooke Jeeves a l'avantage de ne pas utiliser les gradients pour générer le nouveau vecteur paramètre en ne faisant varier qu'un seul paramètre à la fois. Pour cela on choisit arbitrairement l'ordre dans lequel les paramètres varieront ainsi que le pas initial de variation de chacun. Chaque paramètre  $p_k$  est modifié jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible d'obtenir une amélioration de l'erreur avec le pas  $a_i$  choisi. Lorsque tous les paramètres ont variés une fois, on réduit tous les pas de la même manière (par exemple en les divisant par 2).

$$[p]_{i+1} = [p]_i + a_i \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta p_k \\ \vdots \end{bmatrix}$$

*Équation 87 : Méthode d'optimisation de Hooke Jeeves*

Toutes ces méthodes permettent d'obtenir un minimum d'erreur avec la fonction  $h$ . Il n'y a malheureusement aucune garantie que ce minimum soit le minimum global. En effet, chacune de ces méthodes va « plonger » dans le premier minimum qu'elle trouvera.

Dans le cadre d'un problème d'identification, plus le modèle à identifier contient de paramètres, plus il est difficile d'en obtenir la valeur, car la probabilité d'avoir des minima locaux est accrue. Pour palier ce problème on effectue souvent plusieurs identifications à partir de différents points de départ et d'essais différents.

◆ *Calcul des gradients*

Pour pouvoir utiliser les méthodes d'optimisation décrites précédemment, il est nécessaire de calculer le gradient de l'erreur en fonction des paramètres. Il est possible de le calculer directement de manière numérique : on approxime le gradient par les dérivées partielles numériques par rapport aux paramètres.

$$\frac{\partial \text{erreur}}{\partial \text{param}_i} = \frac{\text{erreur} \begin{pmatrix} \vdots \\ \text{param}_i + \Delta \text{param}_i \\ \vdots \end{pmatrix} - \text{erreur} \begin{pmatrix} \vdots \\ \text{param}_i \\ \vdots \end{pmatrix}}{\Delta \text{param}_i}$$

*Équation 88 : Gradient numérique*

Néanmoins, cela représente une approximation qui peut être évitée. En effet la dérivée de l'erreur calculée dans l'Équation 83 peut être écrite sous la forme :

$$\frac{\partial \text{erreur}}{\partial \text{param}_i} = 2 \sum_i \frac{(s_i - S_i)}{S_i^2} \frac{\partial s_i}{\partial \text{param}_i}$$

Équation 89 : Dérivée de l'erreur en fonction d'un paramètre

On définit donc des variables de « sensibilité » aux paramètres qui correspondent aux dérivées de la sortie simulée par rapport à chaque paramètre. Ces dérivées peuvent être calculées à partir de n'importe quel modèle dont toutes les équations sont dérivables.

### 3) Mise en œuvre de la méthode du modèle

Un programme de portée générale a été développé pour gérer toutes les opérations relatives à l'identification. Son déroulement se décompose en trois étapes principales. La première consiste à fournir la description mathématique du modèle. La seconde consiste à calculer les expressions littérales des gradients et à traduire sous forme de fonction de transfert ou sous forme de modèle Simulink les équations mathématiques liées au modèle. La troisième, enfin, est l'identification elle-même.

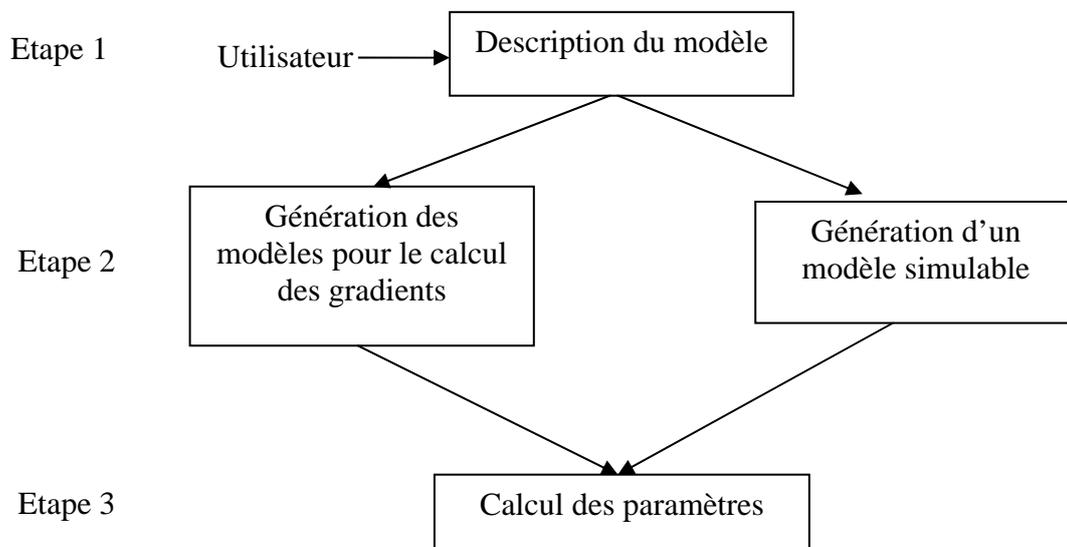


Figure 70 : Les trois principales étapes de l'identification

Une interface graphique a été développée pour décrire simplement le modèle. Elle est décrite dans les paragraphes suivants

#### a) Conventions utilisées pour décrire le modèle

Si on veut avoir un outil générique qui nous permette d'identifier des modèles, il faut avoir une base commune à l'ensemble des modèles que nous allons étudier. Cette base doit fixer les

conventions, permettre de décrire les modèles à identifier et doit être interprétable par un programme.

### ◆ *Paramètres*

Les paramètres sont distingués par un nom et sont affectés d'une valeur initiale. Deux extremums, un minimum et un maximum, doivent être également précisés ainsi qu'une information « duretés ». Cette dernière permet à l'utilisateur de limiter ou d'interdire la possibilité de faire varier la valeur du paramètre lors de l'identification. Si celle-ci est à zéro, alors la variable ne variera pas.

### ◆ *Variables utilisées*

Diverses catégories de variables peuvent être utilisées pour décrire un modèle. On a distingué ici 6 types de variables différents :

- Les entrées.
- Les sorties : elles sont affectées d'un poids qui sera utilisé pour le calcul de l'erreur dans le cas d'un modèle à plusieurs sorties.
- Les états : ce sont des états énergétiques ou des quantités qui obéissent à des lois intégrales. Par exemple pour une capacité, la quantité de charges stockées est égale à l'intégrale du courant dans le temps ( $Q = \int I dt$ ). Lors de la saisie des états il est nécessaire de préciser la valeur initiale de l'intégrale ainsi que les valeurs extrêmes de l'intégrale si l'on veut la limiter.
- Variable retardée : c'est une variable ou une fonction de variables qui subit un retard pur. Cela correspond à un temps de propagation, et nous les avons utilisées pour les migrations d'ions et d'électrons.
- Variable dérivée : cette variable est la dérivation d'une autre variable ou d'une fonction d'autres variables. Cela permet de calculer la densité de courant de déplacement ( $\vec{j}_{dep} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{d\vec{E}}{dt}$ ). Ce type de variable est difficile à calculer numériquement ; c'est pour cela qu'il est recommandé d'éviter de trop les utiliser.
- Intermédiaire pur : c'est une fonction qui pourrait ne pas être calculée et éliminée. Ce type de variable permet d'isoler et de partitionner les équations.

◆ *Utilisation des variables dans les équations*

Pour définir les équations du modèle, il est nécessaire d'avoir autant d'équations que de variables d'état, de sorties, de variables dérivées, retardées et d'intermédiaires. Il faut ensuite écrire ces équations de manière à ce qu'elles soient utilisables par un programme. La convention utilisée est la suivante :

- Pour les variables d'états, la dérivée par rapport au temps d'une variable  $x$  s'écrit  $Dx$ .

Par exemple, l'expression :  $V_e = I_e R_l + L_{f1} \frac{dI_{L_{f1}}}{dt} + L_m \frac{dI_m}{dt}$

s'écrit :  $V_e = I_e R_l + L_{f1} DI_{L_{f1}} + L_m DI_{L_m}$ .

- Les variables dérivées sont définies par des expressions développées en causalité intégrale. Par exemple, dans le cas du courant de déplacement, on écrira  $\varepsilon_0 \varepsilon_r E = \int I_{dep} dt$  que l'on exprime sous la forme  $int\_I_{dep} = \varepsilon_r \varepsilon_0 E$ .
- On définit la variable retardée  $X_{retard}$  par une variable  $X$  à retarder et une durée de retard  $ret$  de la manière suivante  $X_{retard} = retard(X, ret)$ . La variable  $X$  et la valeur de  $ret$  peuvent être une combinaison des variables et des paramètres indépendants de  $X_{retard}$ .
- Les sorties et les intermédiaires de calcul sont utilisés naturellement dans les équations. Il faut cependant s'assurer qu'il y a suffisamment d'équations pour avoir un système avec autant d'équations que de variables à calculer.

◆ *Mise en forme des équations*

Une fois que les équations ont été fournies par l'utilisateur en utilisant les conventions décrites précédemment, on les met en forme de manière à expliciter leur mode de calcul. Les dérivées des états, les valeurs des retards, les formes intégrales des fonctions dérivées, les sorties et les intermédiaires de calcul doivent être exprimés en fonction des variables d'entrée et des variables internes seules, sans utiliser d'opérateurs spéciaux.

Si le modèle, n'est composé que de variables d'états, d'entrées, de sorties et d'intermédiaire pur, alors le programme met automatiquement en forme les équations. Sinon, c'est à l'utilisateur de les mettre en forme manuellement.

**b) Interface mise en oeuvre**

Le programme mis en œuvre doit générer des modèles à partir des données concernant les entrées, les sorties, les variables internes, les paramètres et les équations. Le modèle généré pourra ensuite être utilisé pour l'identification des paramètres. Les interfaces graphiques

permettent de faire la saisie de toutes les informations nécessaires pour la création d'un modèle et l'identification de ces paramètres.

Nous distinguons deux types de modèle qui sont simulés différemment. Les modèles linéaires qui ne comprennent que des entrées, des sorties, des états et des intermédiaires simples, sont simulés sous forme d'espace d'état et de fonction de transfert. Quant aux autres modèles, ils sont simulés sous Simulink.

Nous allons présenter ce programme à travers l'exemple de l'identification des paramètres du modèle complet du transformateur haute tension utilisé jusqu'à présent.

### ◆ *Insertion des paramètres*

On utilise une interface graphique pour lister tous les paramètres du modèle en indiquant les informations type de chaque paramètre.

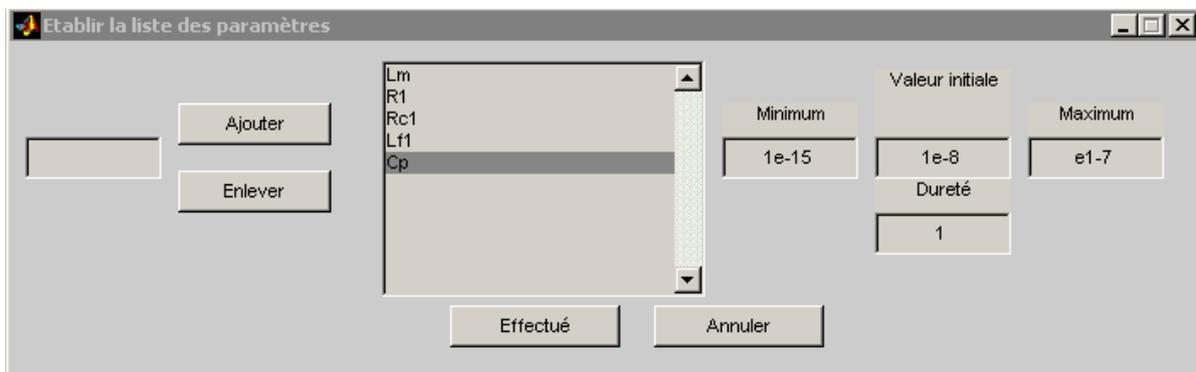


Figure 71 : interface graphique permettant la saisie des paramètres

### ◆ *Insertion des variables*

Une interface graphique similaire est utilisée pour fournir les informations concernant les variables. De gauche à droite, nous avons ; les entrées, les états, les sorties et les variables « spéciales » (intermédiaire, dérivées, retard pur).

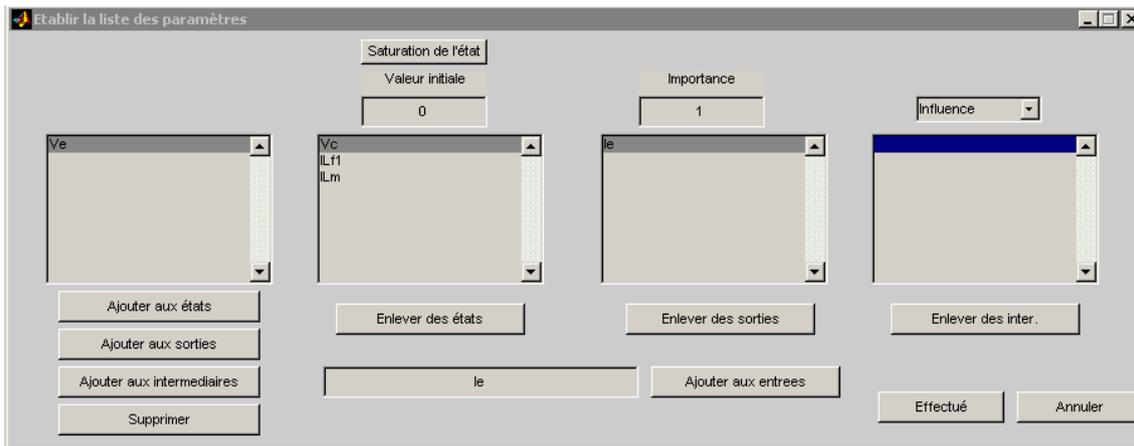


Figure 72 : Interface graphique pour insertions des variables

◆ Insertion des équations

L'interface graphique permettant la saisie des équations rappelle également les paramètres et les variables qui ont été introduits précédemment. Cela permet de limiter les erreurs de syntaxe ultérieure. Il est nécessaire d'implémenter les équations en respectant les conventions décrites précédemment. La mise en forme des équations, dans le cas d'un système d'état, n'est pas nécessaire car le programme le fait automatiquement dans ce cas là. On se contentera donc de lister les lois des mailles et des nœuds du circuit.

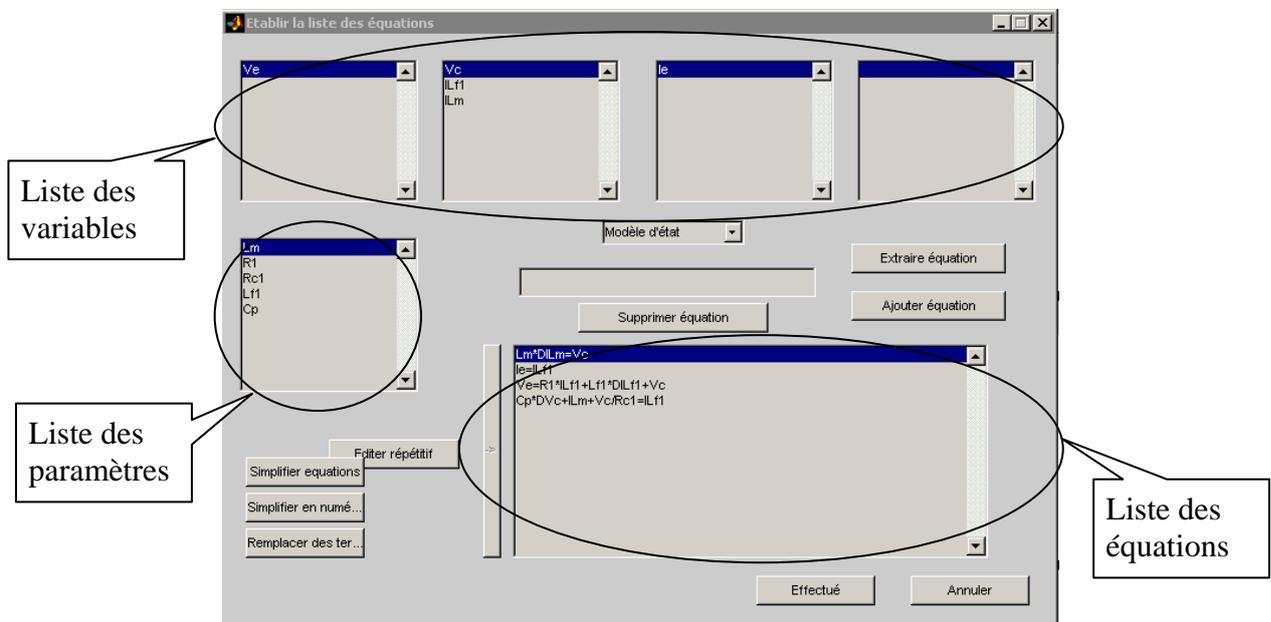


Figure 73 : Interface de saisie des équations

◆ *Mise en forme des équations*

Ensuite pour pouvoir faire la simulation de ce modèle, le programme met en forme les équations qui lui ont été données sous forme d'un système d'état de la forme

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = AX + Bu \\ Y = CX + Du \end{cases}$$

. Ce système d'état est ensuite mis sous forme de fonction de transfert. Le

résultat de cette opération est, dans le cas du transformateur, le suivant :

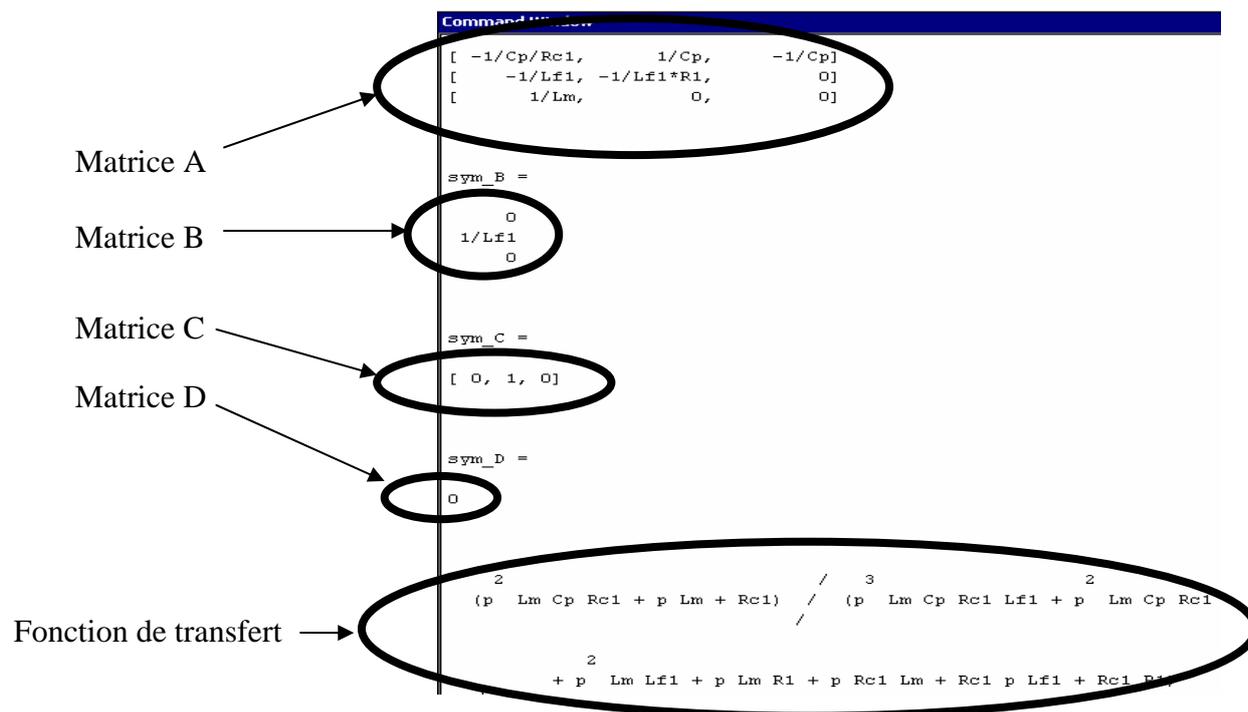


Figure 74 : Simplification et mise en forme de fonction de transfert

c) Calcul des gradients

On distingue deux manières de calculer les gradients des erreurs qui correspondent aux deux types de simulation effectués.

- Les modèles d'états : les sorties étant calculables à l'aide de fonctions de transfert, il est possible de calculer analytiquement les dérivées de ces fonctions de transfert par rapport à chaque paramètre. La simulation de ces fonctions de transfert permet un calcul du gradient.
- Les modèles dont les équations sont toutes dérivables : il faut exprimer les dérivées de toutes les variables internes par rapport à chaque paramètre. L'écriture de ces dérivées

génère un nouveau système d'équations, lié au premier, qui permet le calcul du gradient (des détails sur cette méthode sont fournis en annexe).

Le calcul symbolique des dérivées analytiques permet d'avoir des résultats plus précis mais ajoute un temps de traitement supplémentaire, avant de pouvoir effectuer l'identification.

### d) Paramètres de l'identification

Une fois le modèle généré et les gradients analytiques déterminés, il est possible de lancer une identification. Pour cela, on doit choisir un solveur et fournir ses paramètres spécifiques.

Les solveurs implémentés sont :

- Méthode du gradient.
- Méthode de Levenberg-Maquard.
- La méthode d'optimisation intégrée à Matlab.

Les paramètres réglables sont :

- Nombre d'itérations maximum.
- Précision requise pour l'arrêt.
- Pas de départ a.

On peut également choisir de prendre un point de départ fixé (valeur des paramètres initiaux) par l'utilisateur ou de prendre plusieurs de points de départs aléatoires (valeurs de paramètres initiaux aléatoires). Dans ce dernier cas, la meilleure solution trouvée (dans le sens de l'erreur minimale) après optimisation sera retenue.

### e) Résultats d'identification

Nous avons donc lancé une identification sur le même signal non bruité que pour la méthode des moindres carré. Cette identification a été effectuée avec 40 points de départ générés aléatoirement, combinés avec une optimisation utilisant l'algorithme du gradient limité à 40 itérations. La Figure 75 présente les sorties mesurée et simulée, une fois les paramètres identifiés.

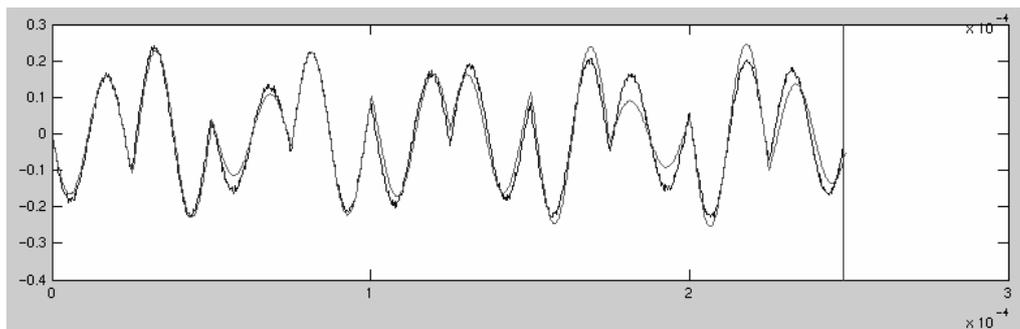


Figure 75 : Comparaison entre la simulation (après identification) et l'expérimentation pour le courant primaire du transformateur

On peut voir que le résultat est satisfaisant puisque l'erreur calculée (Équation 83) ainsi est de 0,8 (sans unité).

Une même identification avec des signaux 10 fois plus bruités que ceux utilisés pour évaluer les performances de la méthode des moindres carrés avec des signaux bruités permet de prouver la robustesse de la méthode.

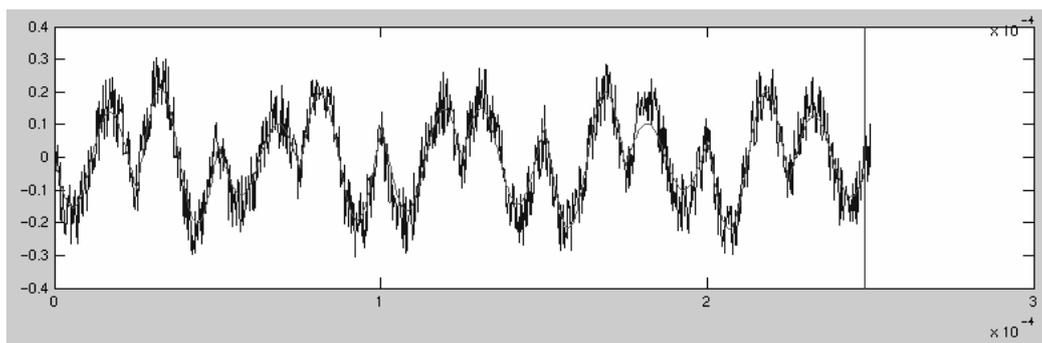


Figure 76 : Comparaison entre la simulation et l'expérimentation dans le cas d'un signal bruité

On peut voir que l'algorithme a permis, malgré un bruit important, de bien retrouver la courbe expérimentale avec une erreur finale de 3,7 (erreur plus importante à cause du bruit).

#### ◆ Relation entre la valeurs des paramètres et les simulations

Lors des exemples d'identification sur le transformateur haute tension, haute fréquence, les comparaisons ont été faites entre les courbes de simulation et l'expérimentation. Il est néanmoins important de replacer ces comparaisons dans le contexte d'une identification paramétrique.

Dans le cas étudié ici, on peut remarquer que l'on se trouve près d'un mode très oscillant. Par conséquent la fréquence propre du circuit oscillant va être « identifiée » en premier. Cette

fréquence propre ne dépendant en pratique que de  $C$  et de  $L_{fl}$ , ces deux paramètres vont être identifiées facilement, voire même être les seuls paramètres identifiés. En effet, on se rend compte qu'il y a une très forte disparité de résultats pour l'identification des autres paramètres (lors d'identifications successives) mais que ceux là ( $C$  et  $L_{fl}$ ) ont toujours les mêmes valeurs (à 10 % près). On en revient aux remarques effectuées dans la présentation de la méthode du modèle : il est nécessaire d'avoir un essai qui représente tous les modes à identifier, ce qui n'est pas le cas ici. Pour obtenir les autres paramètres du modèle, il est nécessaire d'utiliser d'autres mesures expérimentales contenant d'autres modes, basses fréquences notamment.

### f) Application à l'identification des paramètres d'un dispositif de décharge

Dans le cas des dispositifs à décharge, une comparaison des modèles a été faite pour choisir le modèle le plus représentatif d'un tube fluorescent (page 69). Les courbes qui ont été utilisées pour le choix du modèle sont issues de l'identification des paramètres des modèles proposés.

Avec la méthode proposée, on obtient une bonne évaluation des paramètres dans le cas du second modèle que nous proposons (ci-dessous).

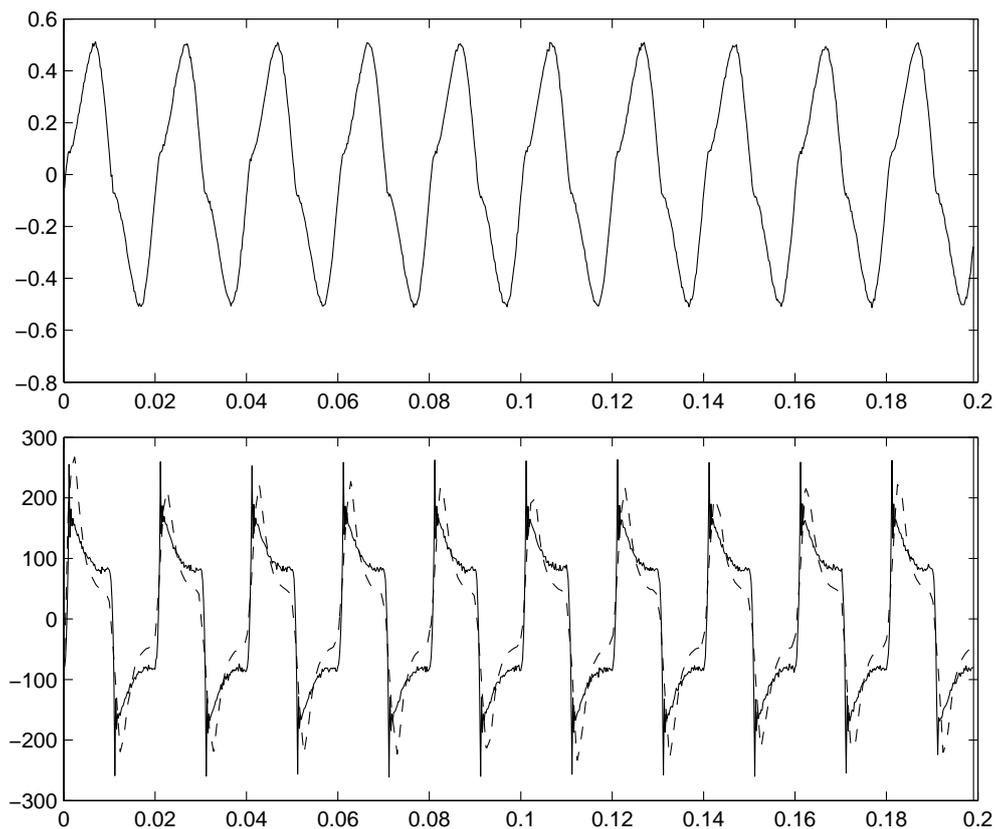


Figure 77 : Chronogrammes expérimentaux du courant (en haut, en A) et de la tension (en bas, trait continu en V) dans un tube néon. En bas, en trait pointillé, simulation du modèle identifié

On peut néanmoins noter que la simulation des autres modèles donne également des allures de courbe cohérente avec l'expérimentation. On le voit dans le cas du modèle de CASSIE.

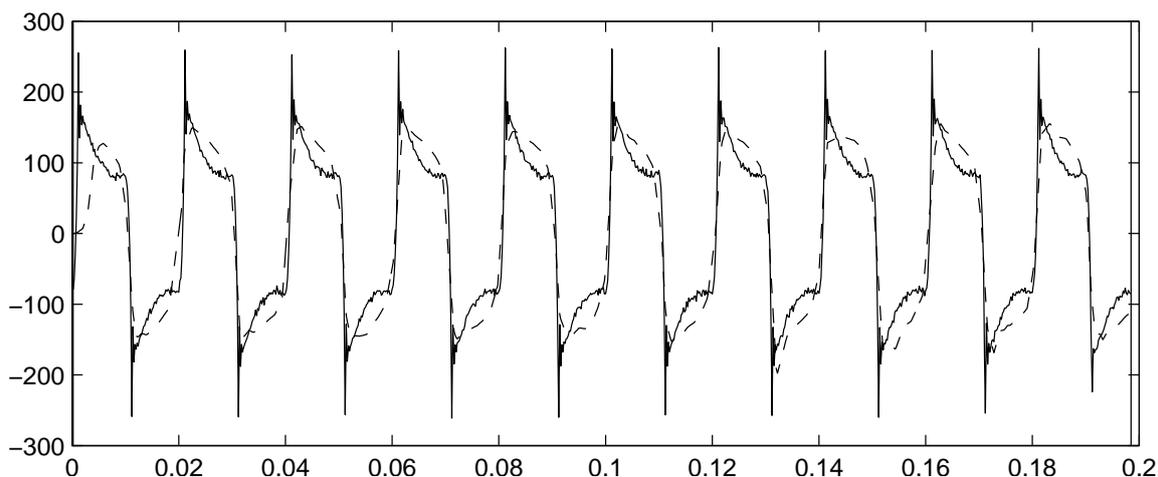


Figure 78 : Chronogrammes expérimental de la tension (trait continu, en V) dans un tube néon. En pointillés, simulation du modèle de CASSIE avec les paramètres identifiés

Cela montre bien que la méthode d'identification utilisé est performante également dans le cas des modèles non linéaires de décharges électriques.

#### **4) Conclusion**

Le détail des algorithmes utilisés n'a pas été donné afin de mieux se focaliser sur la méthode. On peut retenir qu'il n'y avait que peu de solutions possibles pour l'identification des paramètres des modèles de décharge. En effet, même si la méthode des moindres carrés aurait pu être améliorée pour obtenir des résultats plus probants que ceux présentés ici, elle ne peut s'appliquer qu'à des modèles linéaires. Nous aurions donc été limités dans l'écriture des équations qui doivent représenter un système complexe et fortement non linéaire.

La méthode du modèle s'est donc imposée et permet d'identifier les paramètres des modèles que nous proposons. Mais il est nécessaire de bien choisir l'essai temporel permettant de faire l'identification de tous les paramètres à identifier ou, à défaut, de choisir plusieurs expérimentations.

Nous disposons donc d'un programme qui nous permet d'identifier les paramètres des modèles facilement à partir des expressions littérales des équations qui les constituent et d'essais expérimentaux.

Ce programme nous a permis de valider et de comparer les modèles que nous proposons.

## **Chapitre IV : Décharge à courant continu**



## Chapitre IV : Décharge à courant continu

A partir de la connaissance du comportement électrique de la décharge, nous mettons au point un générateur qui permet de placer la décharge dans la zone de fonctionnement où la caractéristique  $V(I)$  est quasi horizontale. Dans une première partie, on réalise la conception de cette alimentation, en considérant les parties puissance et commande, ce qui permet de rester dans une première zone de fonctionnement. Ensuite, on élargit la zone de fonctionnement vers les points à courants de plus faible intensité et à tension plus élevée, en gardant la même structure de puissance mais en adaptant la commande du convertisseur. Dans ce but, nous utilisons les modèles développés dans le chapitre « modélisation » pour simuler le comportement électrique du gaz.

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la conception d'une alimentation industrielle pour le reformage d'hydrocarbure.

### **1) Point de fonctionnement recherché**

Si on considère la caractéristique statique du gaz (Figure 79) on constate qu'à faible courant, elle passe (de droite à gauche) d'une caractéristique source de tension (caractéristique  $V(I)$  horizontale) à une caractéristique source de courant (caractéristique  $V(I)$  verticale). Ces points de fonctionnements sont utilisés, entre autre, dans le reformage d'hydrocarbure puisque les plasmas produits à ces points de fonctionnement sont réactifs et permettent la catalyse de certaines réactions chimiques. Nous étudions, dans un deuxième temps, un point de fonctionnement à plus faible courant, qui est à la limite entre les fonctionnements de type « source de courant » et « source de tension ».

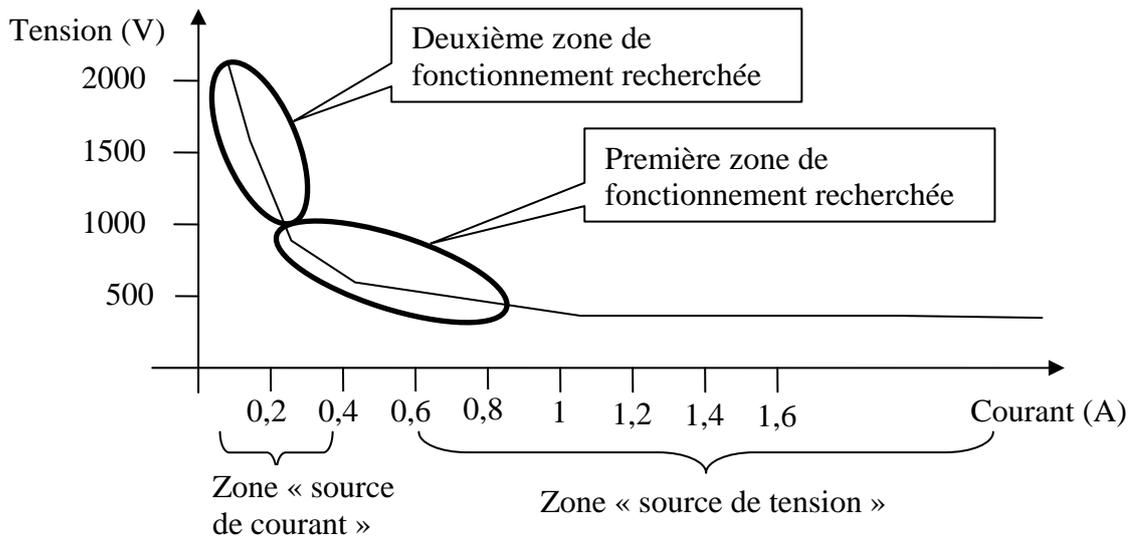


Figure 79 : Zones de fonctionnement recherchées pour un fonctionnement à courant continu.

Nous testons finalement le réacteur mis au point d'un dispositif à arc glissant, c'est-à-dire dont la longueur des lignes de courant n'est pas constante. Nous savons que cela a pour effet, entre autre, de faire varier la caractéristique statique de la décharge vue des bornes puisque, à courant constant, la tension varie périodiquement. L'alimentation électrique doit donc être capable d'alimenter une famille de charges ayant une caractéristique statique de la même forme que celle présentée ci-dessus.

#### a) Structure de puissance proposée

Si on considère la famille de caractéristiques statiques du dispositif à alimenter pour la première zone de fonctionnement, on peut remarquer que la caractéristique statique du générateur doit être la plus verticale possible. En effet, si la caractéristique statique de la source est assez verticale, le point d'intersection entre celle-ci et la famille de caractéristiques statiques à alimenter est précisément défini et on peut attendre un contrôle satisfaisant du point de fonctionnement.

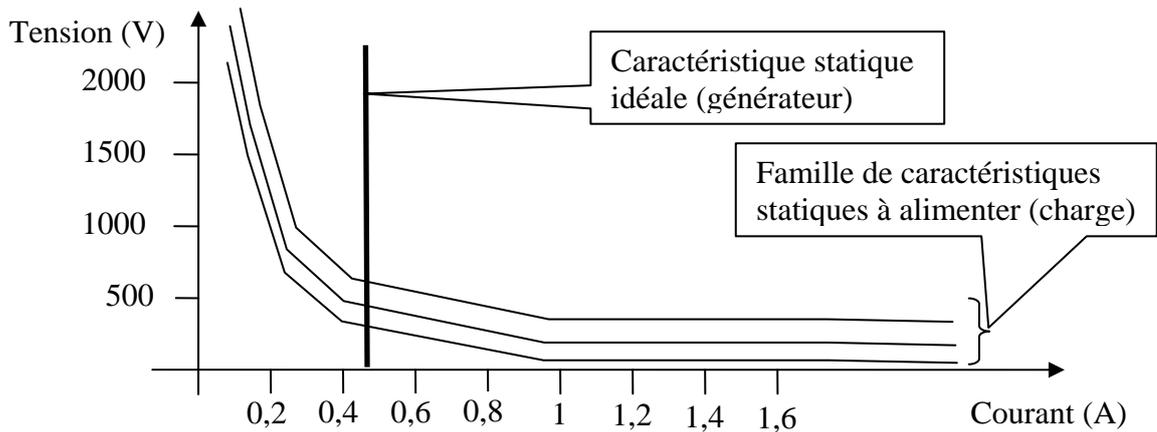


Figure 80 : Analyse dans le plan tension/courant de la caractéristique de la source électrique nécessaire

On envisage donc d'utiliser un générateur qui possède une caractéristique statique de type « source de courant » pour alimenter le dispositif étudié.

On définit, dans un premier temps, le cahier des charges à respecter pour le contrôle de l'ensemble des points de fonctionnement. Ensuite, on recherche la meilleure solution pour le satisfaire de la manière la plus simple possible.

#### ◆ *Cahiers des charges*

Les points de fonctionnement recherchés imposent des contraintes à respecter pour l'alimentation électrique :

- L'alimentation doit contrôler le courant en valeur moyenne et en valeur instantanée (pour éviter les points de fonctionnement à courant fort).
- L'alimentation doit être robuste vis-à-vis des variations de la tension d'arc puisqu'elle doit alimenter un dispositif à arc glissant.
- Elle doit être capable de supporter la mise en court-circuit de sa sortie.
- Elle doit fournir une tension suffisante à courant nul pour pouvoir amorcer la décharge.
- Elle doit présenter un rendement énergétique aussi bon que possible.

Pour l'application pratique envisagée, on considère les valeurs numériques suivantes : une tension de claquage inférieure ou égale à 5000V et un courant réglable de 0 à 1A.

#### ◆ *Structure dévolteuse*

La tenue en court-circuit peut être obtenue par une structure dévolteuse classique de type hacheur abaisseur, présentant une inductance série en sortie.

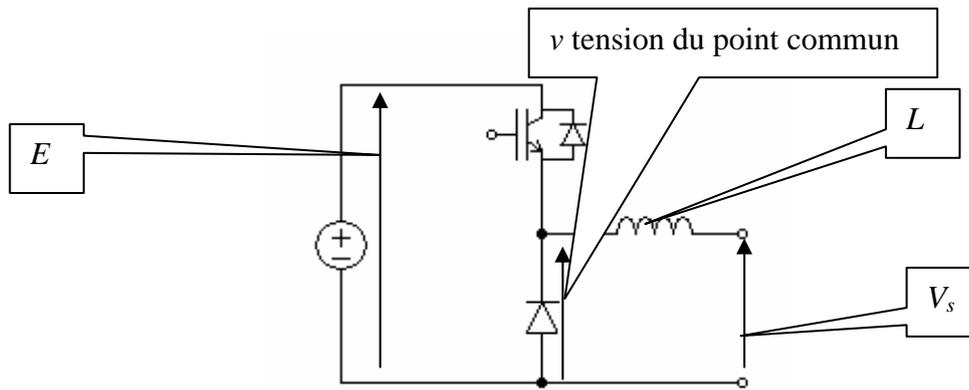


Figure 81 : Structure de hacheur dévolteur classique

Ce type de structure est capable de contrôler le courant à sa sortie pour une tension de sortie  $V_s$  pouvant varier de  $0$  à  $E$ , comme on va le montrer maintenant.

L'IGBT et la diode ne doivent pas être passants en même temps (sous peine de court-circuit de la source continue  $E$ ). De même, ils ne doivent pas non plus être ouverts en même temps (il faut qu'il y ait continuité du courant dans l'inductance  $L$ ). Il n'y a donc que deux possibilités de valeur pour la tension  $v$  pour le nœud commun à l'IGBT et la diode :

- $E$  si l'IGBT est passant et la diode bloquée.
- $0$  si l'IGBT est bloqué et la diode passante.

Pendant une période  $T$  de découpage de ce convertisseur, la tension instantanée vaut  $E$ , pendant un temps que l'on appelle  $t_{on}$ , et  $0$ , pendant un temps que l'on appelle  $t_{off}$ .

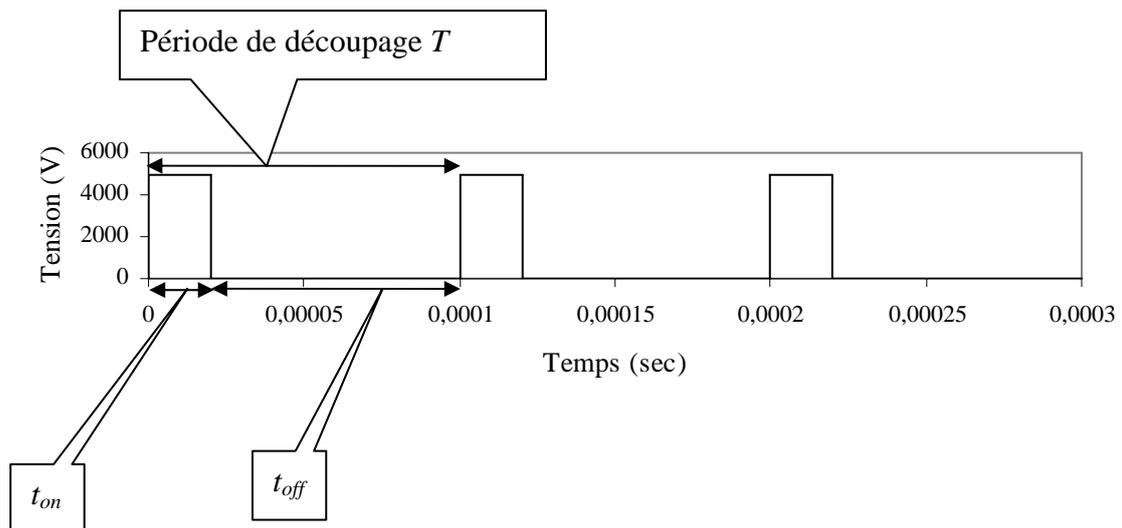


Figure 82 : Tension  $v$  du point commun durant 3 périodes de fonctionnement

La tension moyenne à ce nœud est fonction du rapport entre le temps de conduction de l'IGBT et la période de découpage. Comme  $t_{on}$  ne peut varier qu'entre 0 et  $T$ , la tension moyenne  $\langle v \rangle$  de sortie de ce convertisseur varie de 0 à  $E$ .

$$\langle v \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v dt = E \frac{t_{on}}{T}$$

*Équation 90 : Tension moyenne au point milieu du hacheur*

Le rapport entre le temps de conduction de l'IGBT et la période de découpage, est appelé rapport cyclique. On peut régler ce rapport, à l'aide de régulateurs, pour contrôler le courant moyen dans le convertisseur. Pour des fréquences supérieures à la fréquence de découpage, l'inductance limite les variations de courant.

Avec cette structure, on est capable de contrôler la valeur moyenne du courant (à l'aide du rapport cyclique) et de maîtriser la valeur instantanée du courant (à l'aide de l'inductance). Cela est vrai pour des tensions de sortie comprises entre 0 (court-circuit) et  $E$ , ce qui correspond à la robustesse recherchée vis-à-vis de variation de tension en sortie. De plus, si la tension de claquage est inférieure à  $E$ , alors ce dispositif fournit une tension suffisante, à courant nul, pour amorcer l'arc.

Cela implique, pour atteindre la gamme de points de fonctionnement recherchée, une valeur de tension d'entrée  $E$  de 5000V pour assurer le claquage, ce qui permettra également de contrôler le courant tant que la tension aux bornes de la décharge restera comprise entre 0 et 5000V.

◆ *Possibilités de mise en œuvre de ce type de structure*

La gamme de points de fonctionnement recherchée impose de générer des tensions importantes. Si on utilise comme étage de sortie la structure dévolteuse décrite précédemment, il faut générer, avec un premier étage, la haute tension. Pour cela on peut utiliser un transformateur suivi d'un redresseur, si on dispose d'une source de tension alternative, ou, si on a une source de tension continue, une structure survolteuse de type BOOST.

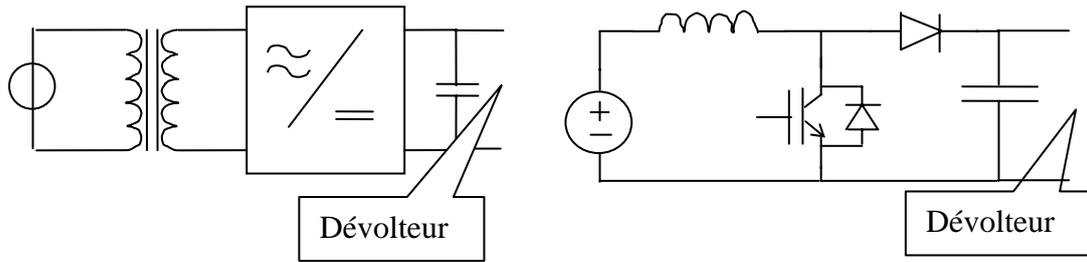


Figure 83 : Structure permettant d'obtenir de hautes tensions continues : transformateur suivi d'un redresseur (gauche), convertisseur continu continu survoleur type BOOST (droite)

Cependant, avant d'étudier ces structures, il faut s'assurer que l'étage dévolteur en sortie est réalisable avec les tensions envisagées. Dans ce but, on examine les contraintes que subissent les interrupteurs de puissance lorsque la tension au point milieu vaut 0 ou E.

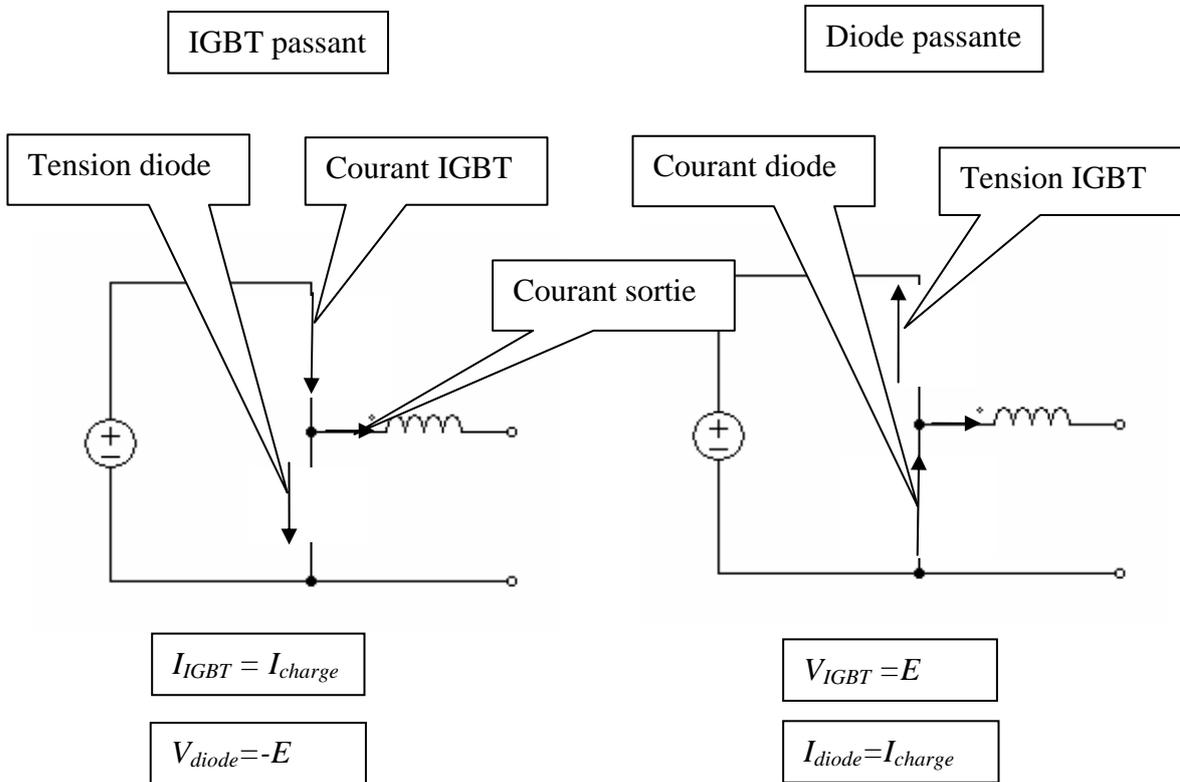


Figure 84 : Contraintes subies par les composants de puissance pour le hacheur dévolteur classique

On constate alors que les interrupteurs de puissance qui doivent être utilisés dans la structure finale dévolteuse, subissent des tensions de 5000V lorsqu'ils sont bloqués. On devrait donc utiliser des interrupteurs de puissance capable de supporter des tensions supérieures à 5000V ; généralement pour ce type de structure, on prend un facteur de

sécurité de 2 pour le calibre en tension, ce qui donne dans notre cas 10000V. De tels composants ne sont pas commercialisés actuellement, ce qui limite la faisabilité de la structure dévolteuse élémentaire analysée ci-dessus. En effet, même s'il est possible d'utiliser la mise en série de composants de puissance pour synthétiser un composant macroscopique capable de supporter des tensions importantes, la mise en œuvre de cette solution impose un contrôle de l'équilibrage des tensions aux bornes de chaque composant mis en série, ce qui complexifie la réalisation du convertisseur.

On recherche, en conséquence, une structure où on contrôle le courant moyen avec des composants de puissance basse tension (inférieure au millier de Volts). Le contrôle du courant instantané est assuré par l'utilisation d'une inductance en sortie du convertisseur. L'amplification de la tension de sortie doit donc être effectuée par un étage situé après les composants basse tension. Comme on limite au maximum l'utilisation d'interrupteurs de puissance haute tension, l'amplification de la tension de sortie est assurée à l'aide d'un transformateur.

Le reste de la structure de puissance qu'on utilise est imposé par les choix précédents (utilisation d'un transformateur et contrôle du courant moyen de sortie réalisé en amont de celui-ci). En effet, l'utilisation d'un transformateur impose l'introduction d'un étage alternatif. Comme on veut un courant continu à la sortie, on utilise un redresseur à diodes entre l'inductance de sortie et le transformateur. Le dispositif électronique qui contrôle le courant moyen de sortie doit imposer une tension alternative au transformateur, ce qui implique d'utiliser un onduleur en amont du transformateur. On utilise donc la structure suivante :

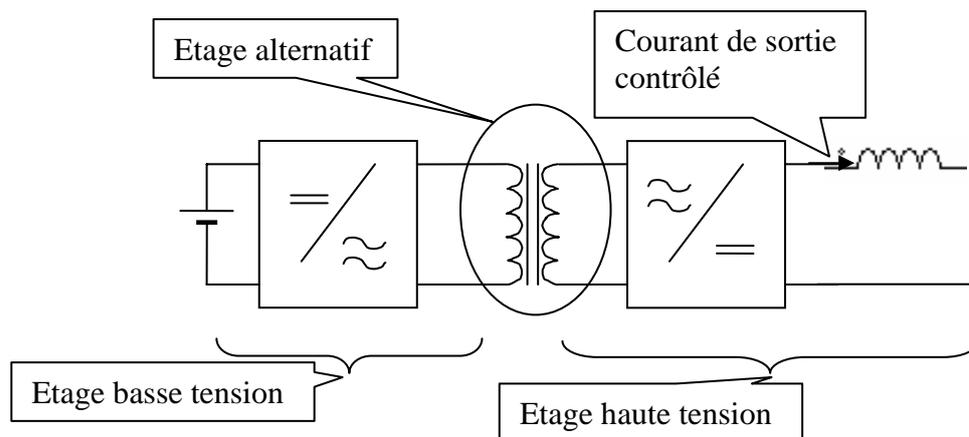


Figure 85 : Structure de puissance proposée.

Au niveau de l'étage basse tension, on utilise un onduleur en pont complet pour :

- imposer une tension alternative au primaire du transformateur ;

- effectuer le contrôle du courant moyen en sortie.

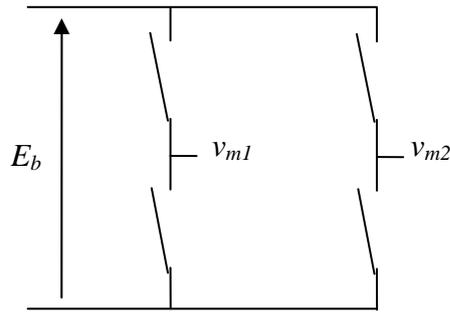


Figure 86 : Structure de l'onduleur utilisée

On a donc une structure de puissance qui va nous permettre de maîtriser le courant circulant dans la décharge. Il faut maintenant la dimensionner et la concevoir cette partie puissance.

#### b) Dimensionnement des composants

On présente, ici, la méthode utilisée pour dimensionner les différents éléments de la partie puissance. La caractéristique de sortie recherchée pour le générateur est rappelée :

- Tension à vide : 5000V
- Courant contrôlé et réglable entre 0 et 1A.

#### ◆ Source de tension utilisée

La source de tension continue d'entrée est constituée d'une alimentation stabilisée Xantrex 600V/4A. Cette alimentation est réglable en tension et limite le courant en cas de surcharge. Cela nous permet d'ajuster la tension du bus continu d'entrée en gardant une sécurité (limitation de courant) qui limite les risques de destruction de la structure de puissance en cas d'erreur de manipulation.

On aurait pu utiliser un redresseur à diode avec un filtre capacitif, branché sur le réseau triphasé, mais cette solution est moins souple pour la mise au point du convertisseur.

On note pour la suite «  $E_b$  » la tension fournie par cette source continue.

#### ◆ L'onduleur

Pour dimensionner l'onduleur, on détermine les calibres des interrupteurs de puissance. Pour cela, on étudie les contraintes que doivent subir les interrupteurs de puissance pour un bras seul. En effet, la structure utilisée impose que les contraintes subies par un bras le seront également par l'autre.

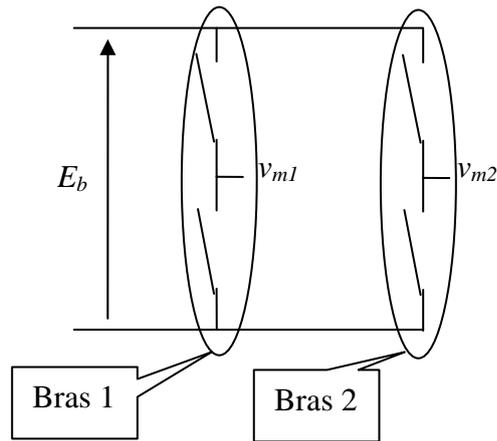


Figure 87 : Distinction entre des deux bras de l'onduleur

Deux interrupteurs d'un même bras ne peuvent pas être conducteurs en même temps sinon on court-circuite la source de tension continue d'entrée ( $E_b$ ). De même, comme cet onduleur alimente un transformateur, on peut considérer que sa charge est inductive et qu'il faut donc assurer la continuité du courant dans celle-ci. Deux interrupteurs du même bras ne doivent donc pas être à l'état bloqué en même temps.

On n'a donc plus qu'à étudier deux cas : le cas où l'interrupteur du haut est passant et le cas où c'est l'interrupteur du bas qui est passant.

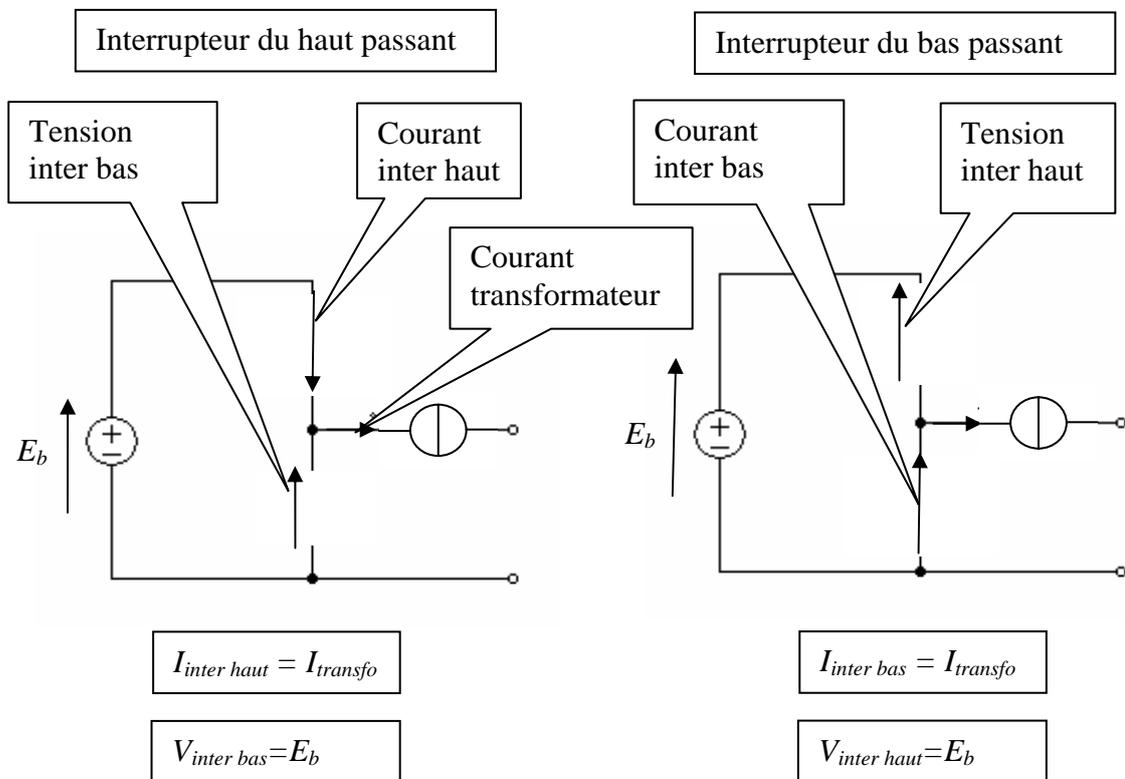


Figure 88 : Contraintes subies par les composants de puissance pour un bras d'onduleur classique

On peut voir que, dans le cas de l'onduleur, la tension que supportent les interrupteurs de puissance à l'état bloqué est égale à la tension du bus continu. Le courant qu'ils supportent à l'état passant est le courant circulant dans le transformateur. Comme la tension du bus continu est constante, ils doivent être unidirectionnels en tension. Cependant, le courant dans le transformateur est en retard de phase avec la tension puisque la charge de l'onduleur est inductive (inductance magnétisante du transformateur). Cela implique que les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant.

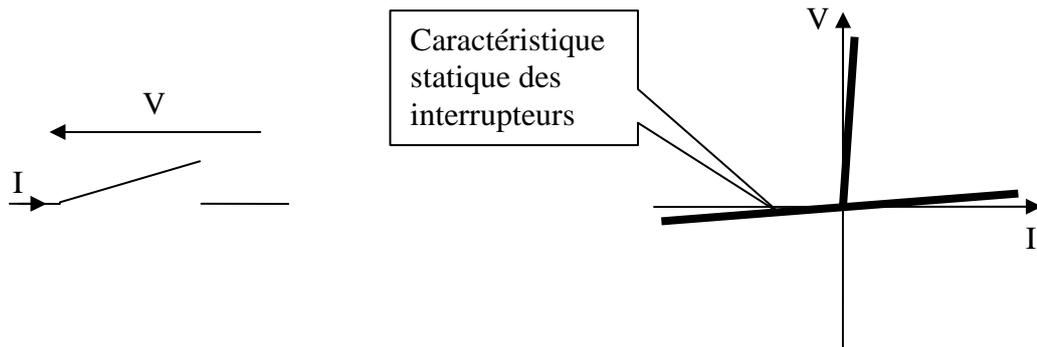


Figure 89 : Caractéristique statique des interrupteurs

Sachant que la tension du bus continu a été fixée à 600V, nous utilisons un calibre en tension de 1200V pour les interrupteurs.

Les interrupteurs doivent supporter le courant de sortie, multiplié par rapport de transformation, additionné au courant magnétisant du transformateur. Comme le courant de sortie est de 1A et que le gain du transformateur varie de 1 à 5 (on utilise un transformateur qui a plusieurs secondaires ce qui permet de faire varier le gain en choisissant le nombre de secondaires que l'on met en série), le courant dans les interrupteurs de puissance, hors courant magnétisant du transformateur, est compris entre 1 et 5A. Le courant magnétisant dépend du transformateur utilisé ; dans notre cas, il a été mesuré a posteriori, et présente un ordre de grandeur de 60mA à la fréquence de fonctionnement choisie (20kHz).

Nous avons donc choisi des interrupteurs de puissance EUPEC 1200V, 25A (25gb120dn2). Ils sont refroidis par ventilation forcée afin de limiter leur échauffement.

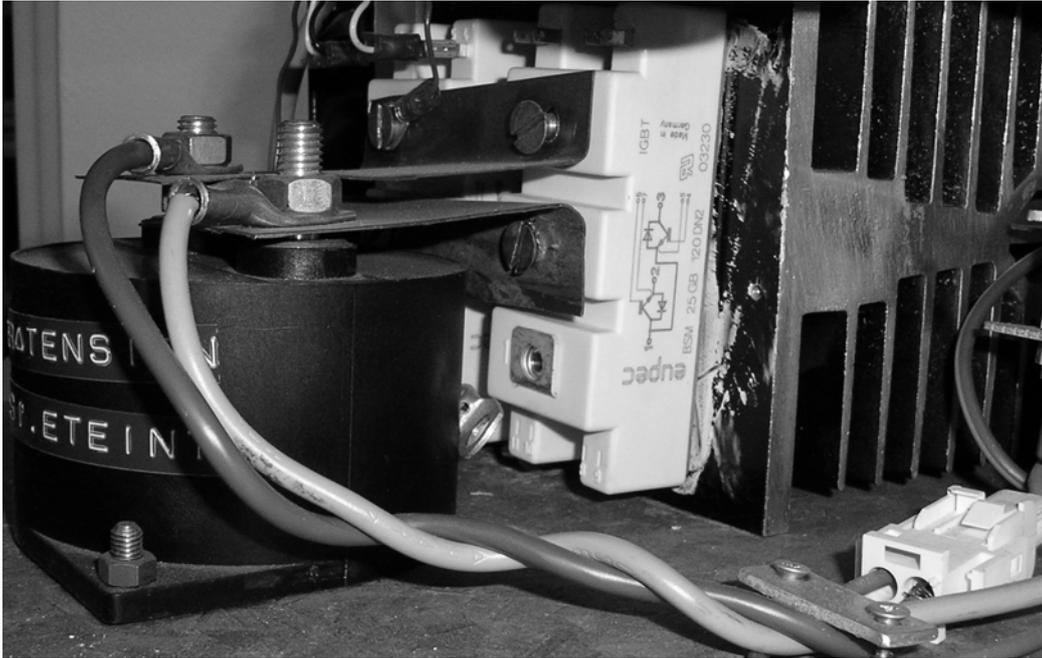


Figure 90 : Onduleur avec les deux bras d'onduleur (en blanc), la capacité de découplage (à gauche) et le radiateur (à droite)

Compte tenu du surdimensionnement de ces composants et en restant à des températures de fonctionnement très acceptable, la fréquence de découpage choisie est de 20kHz. Cette fréquence correspond à la fréquence de fonctionnement maximale du transformateur. Elle permet aussi d'optimiser la taille de celui-ci.

#### ◆ *Transformateur*

Le transformateur a pour but d'amplifier la tension totale en sortie du convertisseur. Sur le premier prototype qui a été mis au point au LEEI, il doit permettre également d'ajuster la gamme de la tension de sortie de l'alimentation. Il dispose donc de plusieurs enroulements au secondaire, qui présentent une tension identique à leurs bornes ; ceci permet de régler le rapport de transformation en choisissant le nombre de secondaires que l'on met en série. Cette solution permet aussi d'assurer une bonne répartition des tensions sur les ponts de diodes placés en sortie.

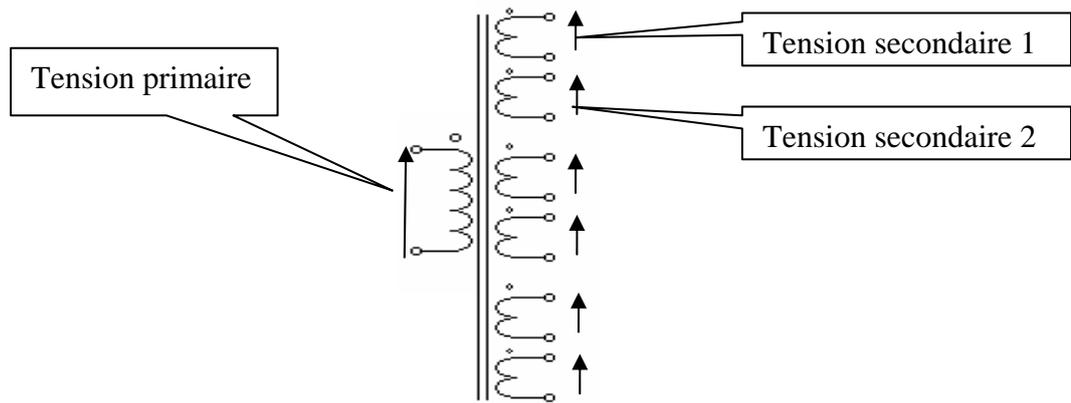


Figure 91 : Transformateur à 6 secondaires et 1 primaire

Les transformateurs ont été bobinés de façon à limiter les risques de claquage entre les enroulements. Un bobinage en nappe a été choisi ; chaque enroulement est constitué d'une nappe séparée des voisines par une feuille de papier isolant. Cela donne la structure suivante :

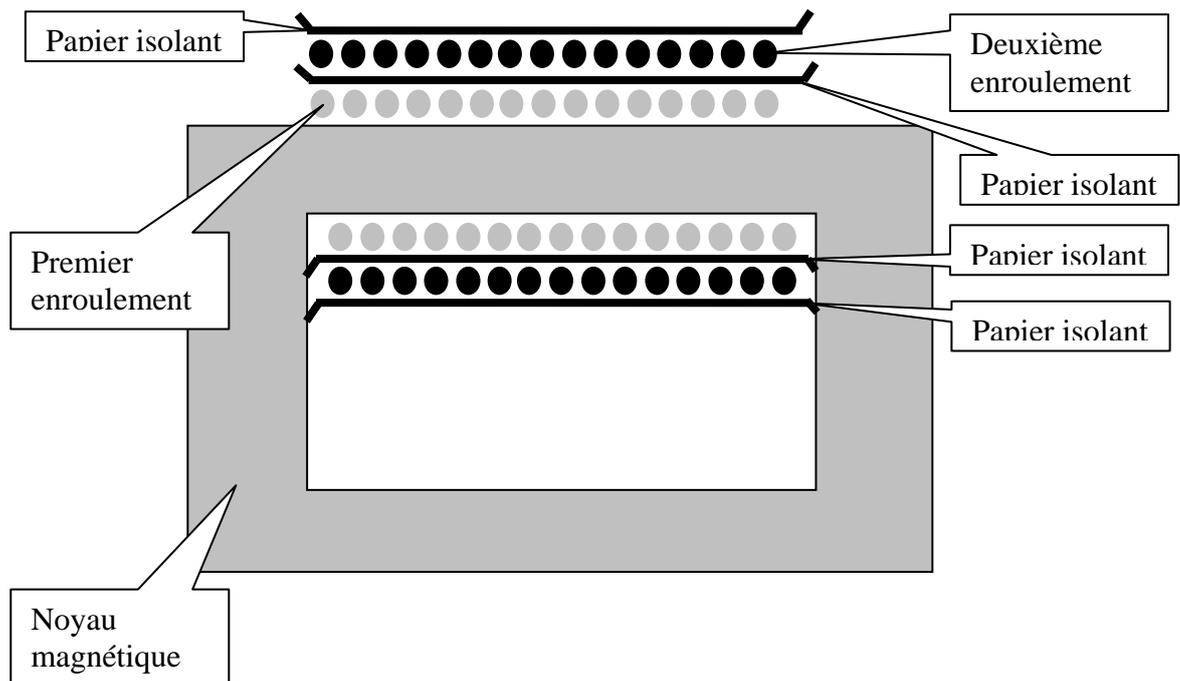


Figure 92 : Enroulements du transformateur.

Le nombre de spires par enroulement est fixé par le choix de la fréquence de fonctionnement et par la valeur du champ magnétique maximal ( $B_{\max}=1,2\text{T}$ ) du matériau magnétique utilisé, ici le 3C6.

En effet, on ne doit pas laisser ce champ magnétique aller au delà de sa valeur maximale. Si celui-ci devient trop important le noyau magnétique sature et génère un appel de courant important qui peut être destructif pour le transformateur comme pour les interrupteurs de puissance placés en amont. Connaissant l'amplitude de la tension au primaire du transformateur, on choisit le nombre de spires minimal (environ 60) qui permet un fonctionnement à la fréquence de commutation de l'onduleur (20kHz).

On a donc un transformateur qui permet d'ajuster la tension de sortie en choisissant le nombre de secondaires utilisés. De plus, grâce à cette solution, on impose la même tension à tous les ponts redresseurs (décrits plus loin), puisque chaque redresseur est associé à un secondaire. En effet, la mise en série de redresseurs peut poser des problèmes d'équilibrage de tension; l'utilisation d'un redresseur par secondaire permet d'éviter ces problèmes puisque le transformateur impose une tension égale sur chacun de ses secondaires.

Disposant d'une source de tension 600V, on choisit un gain unitaire entre la tension au primaire et celles aux secondaires. En effet, chaque redresseur à diodes doit être capable de supporter la tension à chaque secondaire ; une tension de 600V est un bon compromis puisque c'est une tension encore raisonnable pour des composants standard et il suffira de 5 secondaires pour obtenir la tension désirée.

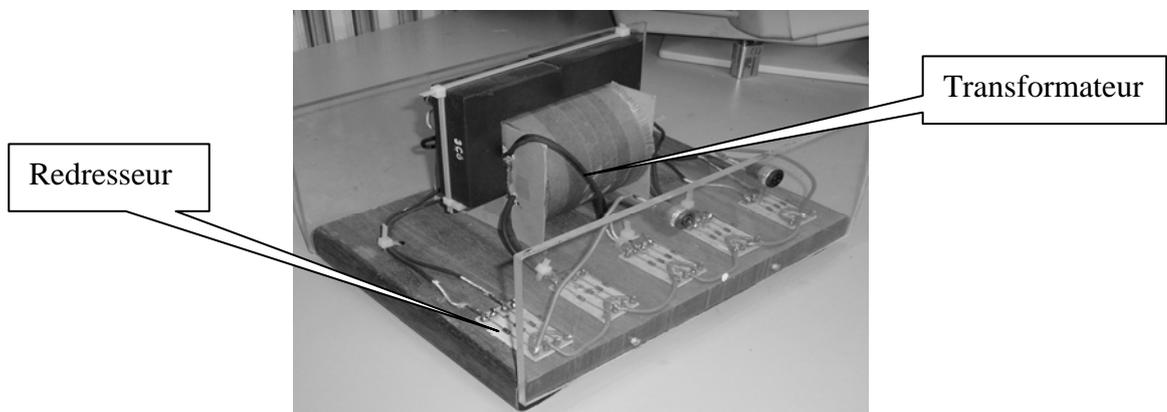


Figure 93 : Transformateur utilisé au LEEI

### ◆ *L'inductance*

Le convertisseur est caractérisé par deux fréquences de fonctionnement :

- la fréquence de la tension au primaire du transformateur.
- la fréquence de découpage pour la régulation de courant de sortie du convertisseur.

La fréquence de la tension au primaire du transformateur est la fréquence de commutation des interrupteurs de puissances.

La fréquence de découpage de la régulation de courant est la fréquence de variation de la tension de sortie des ponts de diodes. Cette tension est égale à  $E$  (tension du bus continu d'entrée  $E_b$  multipliée par le gain du transformateur) ou à 0. Cette fréquence doit être la plus élevée possible pour permettre un contrôle du courant de sortie aussi performant que possible en terme de bande passante. C'est pour cela qu'au point de fonctionnement nominal, cette fréquence est égale à la fréquence de commutation des interrupteurs.

L'ondulation de courant en sortie du convertisseur est régie par la même loi que pour un hacheur dévolteur classique :

$$\Delta i_l = \frac{E\alpha(1-\alpha)}{Lf}$$

*Équation 91 : Ondulation du courant de sortie.*

- $\alpha$  rapport cyclique de sortie (temps de conduction  $t_{on}$  divisé par la période de découpage  $T$  – page 122).
- $E$  tension du bus continu multipliée par le gain du transformateur.
- $L$  inductance de sortie du convertisseur.
- $f$  fréquence de découpage.

L'ondulation de courant est maximale pour un rapport cyclique de 0,5. En imposant une limite à cette ondulation maximale à fréquence donnée, cela impose une valeur d'inductance minimale :

$$L_{\min} = \frac{E}{4f\Delta i_l}$$

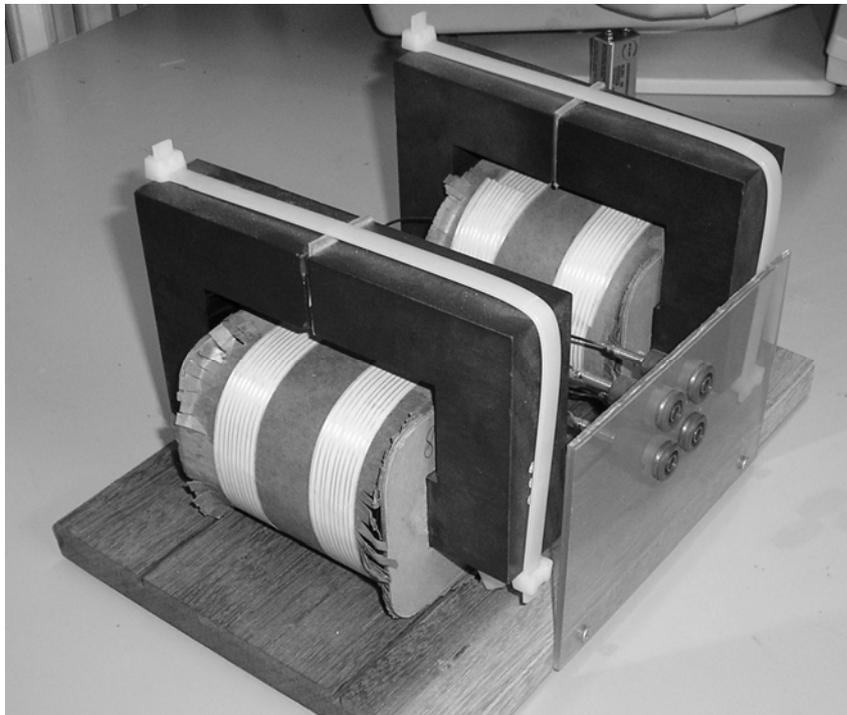
*Équation 92 : Calcul de la valeur minimale de l'inductance.*

Pour une tension  $E$  de 5000V, une fréquence de découpage de la régulation de courant de 20kHz et une ondulation de 100mA (10% de 1A), on est conduit à une valeur d'inductance de 625mH. L'ondulation de 100mA est une valeur assez importante mais c'est une ondulation maximale. En effet, ayant choisi une structure avec un transformateur à gain variable (en fonction du nombre de secondaires utilisées), on peut ajuster ce gain pour diminuer l'ondulation du courant de sortie. Comme l'ondulation du courant de sortie est proportionnelle à  $E$  (tension d'entrée multiplié par le gain du transformateur), on peut,

selon les caractéristiques de la charge alimentée, la limiter en diminuant le nombre de secondaires mis en série.

Pour un fonctionnement optimum du convertisseur, il faut que l'inductance soit aussi faiblement capacitive que possible. En effet, une inductance parfaite interdit toute variation du courant la traversant (c'est pour cela qu'on en utilise une en sortie du convertisseur). Cependant, les inductances sont toujours un peu capacitives à cause des capacités parasites entre les enroulements disposés autour du noyau magnétique. Cela dégrade le fonctionnement, puisque ces capacités parasites laissent passer des composantes de courant hautes fréquences, qui échappent au contrôle dévolu à l'inductance.

Une inductance de sortie a été réalisée au laboratoire ; elle est constituée de deux inductances en série de même valeur (400mH chacune).



*Figure 94 : Inductance de sortie réalisée au laboratoire*

Ces inductances sont destinées à permettent de contrôler l'ondulation de courant en sortie du convertisseur ; la modularité de cette solution offre la possibilité d'ajuster la valeur de l'inductance.

### ◆ *Redresseurs*

Chaque secondaire du transformateur est équipé d'un pont de diodes. Cela permet d'équilibrer la tension subie par chaque pont de diode. La tension maximale à redresser est la tension maximale d'entrée, soit dans notre cas 600V.

Comme la tension alternative à redresser est à une fréquence de 20kHz, il faut que les diodes de redressement soient suffisamment rapides. Des diodes de redressement classiques (à 50Hz) ne sont pas adaptées pour ce montage.

On utilise alors des diodes rapides UF4007, qui peuvent supporter des tensions de 1000V, pour mettre en œuvre ces redresseurs.

### c) Commande proposée.

La commande de ce convertisseur doit respecter deux types de contraintes :

- contraintes bas niveau : ce sont celles qui doivent être impérativement respectées pour que le convertisseur fonctionne, mais qui ne définissent pas les performances électriques, vues de la sortie du convertisseur.
- contraintes haut niveau : ce sont celles qui imposent le mode de fonctionnement électrique vu de la sortie du convertisseur.

#### ◆ *Contrainte haut niveau.*

La contrainte haut niveau à respecter est le respect de la consigne de courant en sortie du convertisseur. Pour cela, on contrôle le courant dans l'inductance de sortie.

Le courant de sortie du montage doit être le plus proche possible d'un courant constant. Cependant, ayant une alimentation à découpage, on subit une ondulation de courant qui est inversement proportionnelle à la valeur de l'inductance. En effet, malgré une structure plus complexe que celle d'un hacheur dévolteur, on en garde le même principe de commande en choisissant la tension  $v$ , en amont de l'inductance, égale à  $E$  ( $=nE_b$  avec  $n$  le nombre de secondaires en série) ou à 0. Cela revient à étudier le schéma suivant.

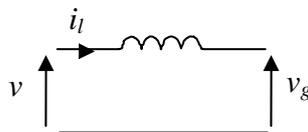


Figure 95 : Circuit simplifié pour la commande en courant

### Contrôles classiques utilisés

Deux types de régulations classiques sont possibles : la régulation par hystérésis ou celle par un correcteur linéaire suivi d'un modulateur. Dans les deux cas, le but est de

contrôler le courant dans l'inductance de sortie. La variation de ce courant est proportionnelle à la tension aux bornes de l'inductance.

$$L \frac{di_l}{dt} = v - v_g$$

*Équation 93 : Variation du courant dans l'inductance de sortie*

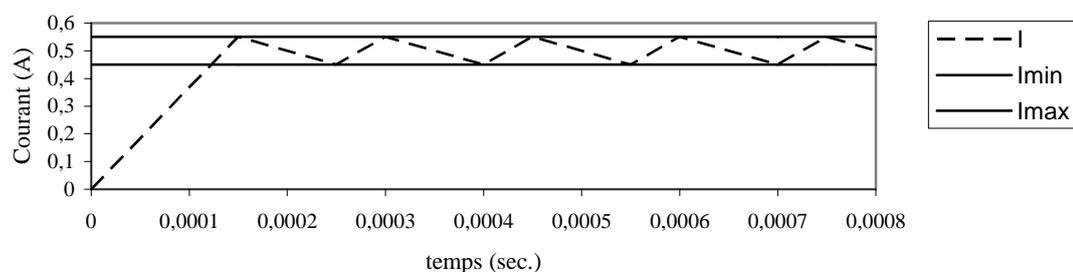
Dans le cas du régulateur linéaire suivi du modulateur, on considère les valeurs moyennées  $\langle v \rangle$ ,  $\langle v_g \rangle$  et  $\langle i_l \rangle$ , sur quelques périodes de découpage, des grandeurs instantanées des variables  $v$ ,  $v_g$  et  $i_l$ .

Ce type de régulation a l'avantage d'être stable et d'avoir une fréquence de commutation constante. Malheureusement, elle n'a pas des performances dynamiques très élevées, puisqu'on régule le courant avec la valeur moyenne, à l'échelle du découpage, de la tension  $v$  qui a donc au moins une période de découpage de retard. Ce retard implique des réponses dynamiques moins rapides et une réponse à un court-circuit moins performante qu'avec une régulation à hystérésis (solution présentée plus loin). C'est pour cela que ce type de régulation n'a pas été utilisé.

La régulation par hystérésis consiste à contrôler directement la tension  $v$  en fonction de la valeur du courant. On cherche à bloquer la valeur du courant à la valeur de référence en tolérant une certaine erreur  $\Delta I$ . Si le courant est supérieur à la référence plus la tolérance à l'erreur, on fixe  $v$  à 0 ; si le courant est inférieur à la référence moins la tolérance, on fixe  $v$  à  $E$  ; entre les deux on ne fait pas varier  $v$ . On voit bien dans l'Équation 93 que si  $v_g$  varie entre 0 et  $E$  :

- la dérivée du courant a un signe négatif si  $v$  est fixé à zéro ;
- la dérivée du courant a un signe positif si  $v$  est fixé à  $E$ .

La commande tend donc à imposer les variations du courant de sortie entre deux bornes (courant min et courant max).



*Figure 96 : Forme d'onde du courant avec une régulation par hystérésis*

Ce type de régulation a l'avantage d'être très rapide mais, dans le cas où la tolérance est trop faible, on tend à avoir des fréquences de commutation très élevées, ce qui n'est pas souhaitable pour le convertisseur. De surcroît, il y a une pollution électromagnétique importante ainsi qu'un bruit acoustique important, si la fréquence de commutation se trouve dans la plage audible.

Pour limiter ces inconvénients, on utilise une commande à hystérésis à fréquence fixe.

### **Contrôle du courant par un hystérésis à fréquence fixe**

Le contrôle du courant se limite à la régulation du courant dans l'inductance suivant la loi décrite par l'Équation 93.

Lorsque la tension en amont de l'inductance vaut  $E$ , l'Équation 93 devient l'Équation 94 a, alors qu'en phase de roue libre elle devient Équation 94 b ( $v_g$  désigne la tension aux bornes du gaz).

$$\begin{aligned} a) L \frac{di_l}{dt} &= E - v_g \\ b) L \frac{di_l}{dt} &= -v_g \end{aligned}$$

*Équation 94 : Variation du courant dans l'inductance selon la séquence de fonctionnement : (a) phase active ; (b) : phase de roue.*

Si on pose comme hypothèse que la tension  $v_g$  reste constante à l'échelle de la période de découpage, alors cette tension est égale à la tension moyenne à la sortie des redresseurs haute tension.

$$v_g = \alpha E = \alpha n E_b$$

*Équation 95 : Valeur moyenne de la tension de sortie*

En régime permanent, on peut alors connaître la valeur de la fréquence de découpage en fonction de la largeur de la fourchette d'une commande par hystérésis.

$$f = \frac{E\alpha(1-\alpha)}{L\Delta i_l}$$

*Équation 96 : Valeur de la fréquence en fonction de la largeur de la fourchette*

On peut voir, avec l'équation précédente, que la fréquence  $f$  varie en fonction de la valeur du rapport cyclique  $\alpha$ , à  $\Delta i_l$  donné.

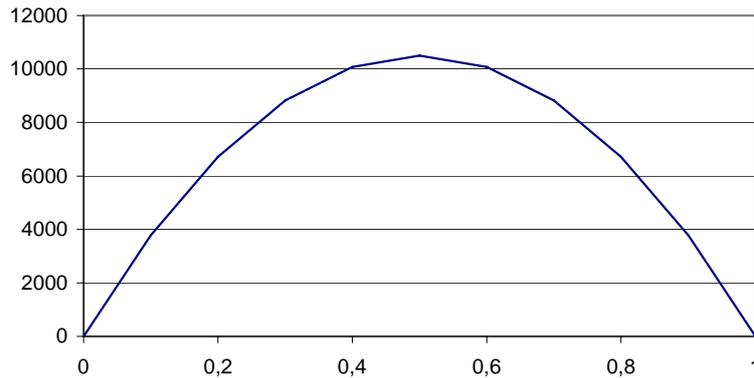


Figure 97 : Fréquence de commutation en Hertz en fonction du rapport cyclique.

Si l'on désire avoir une fréquence de commutation constante en régime permanent, il faut que le rapport entre  $\alpha(1-\alpha)$  et  $\Delta i_l$  reste constant, puisque  $E$  et  $L$  le sont. Le rapport entre ces deux grandeurs impose la valeur de la fréquence.

#### Mise en œuvre de la fourchette à fréquence régulée

Pour obtenir un fonctionnement à fréquence constante, on doit donc imposer une largeur de fourchette qui varie en fonction du rapport cyclique. On évalue celui-ci à partir de la sortie du comparateur à hystérésis. Même si au cours des régimes transitoires, la fréquence et le rapport cyclique varient brutalement, en régime permanent, le rapport cyclique reste constant, quels que soient la fréquence ou l'ondulation autorisée  $\Delta i_l$ . Cette dernière propriété permet d'assurer la convergence de la fréquence de découpage lors de changement de rapport cyclique.

Nous utilisons la méthode suivante pour calculer le terme  $\alpha(1-\alpha)$  : on calcule la valeur moyenne du signal de commande par un filtre passe bas (on obtient ainsi la valeur du rapport cyclique). Cette valeur moyenne est ensuite découpée par le complémentaire de la commande (de valeur moyenne  $1-\alpha$ ) et à nouveau filtrée par un filtre passe bas.

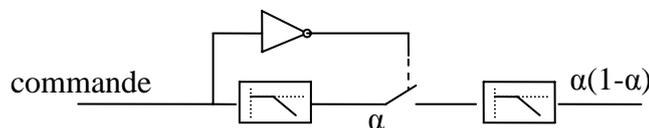


Figure 98 : Obtention du terme  $\alpha(1-\alpha)$  variant avec  $\alpha$  pour l'évaluation de  $\Delta i_l$

Ainsi on obtient, à un facteur près, la largeur de la fourchette à appliquer pour travailler à fréquence fixe.

On additionne et on retranche la largeur de la fourchette (divisée par deux) au courant désiré et on obtient les valeurs minimale et maximale du courant à respecter. Ces extrema

sont comparés à la valeur de courant mesuré, afin de déterminer, à l'aide d'une bascule RS, si la tension en amont de l'inductance doit être  $E$  ou  $0$ .

La Figure 99 présente le schéma de principe de l'ensemble de la commande avec contrôle du courant par hystérésis à fréquence fixe.

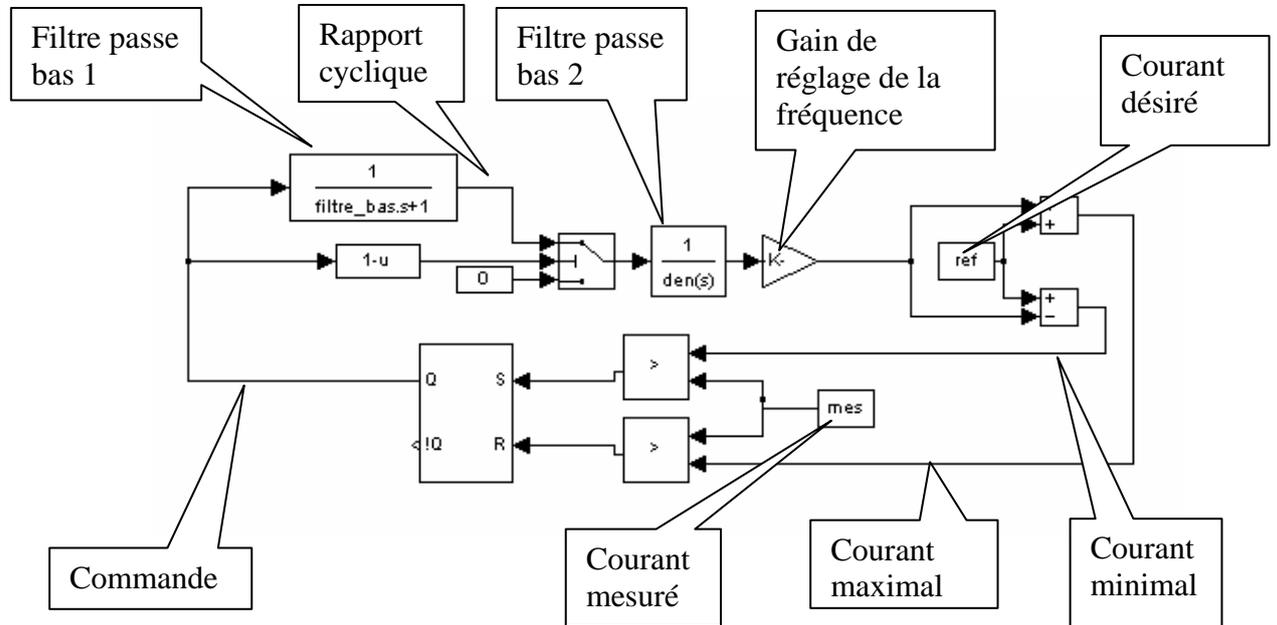


Figure 99 : Schéma du contrôle du courant par hystérésis à fréquence fixe

Lorsque le convertisseur subit un échelon de charge (variation de la tension de sortie), cette commande fait varier la largeur de l'hystérésis pour maintenir une fréquence constante.

Dans l'exemple suivant, la tension moyenne de sortie du convertisseur varie. Cette variation entraîne une variation de rapport cyclique qui, via la structure de commande proposée, impose une variation de la largeur de l'hystérésis afin de maintenir une fréquence constante.

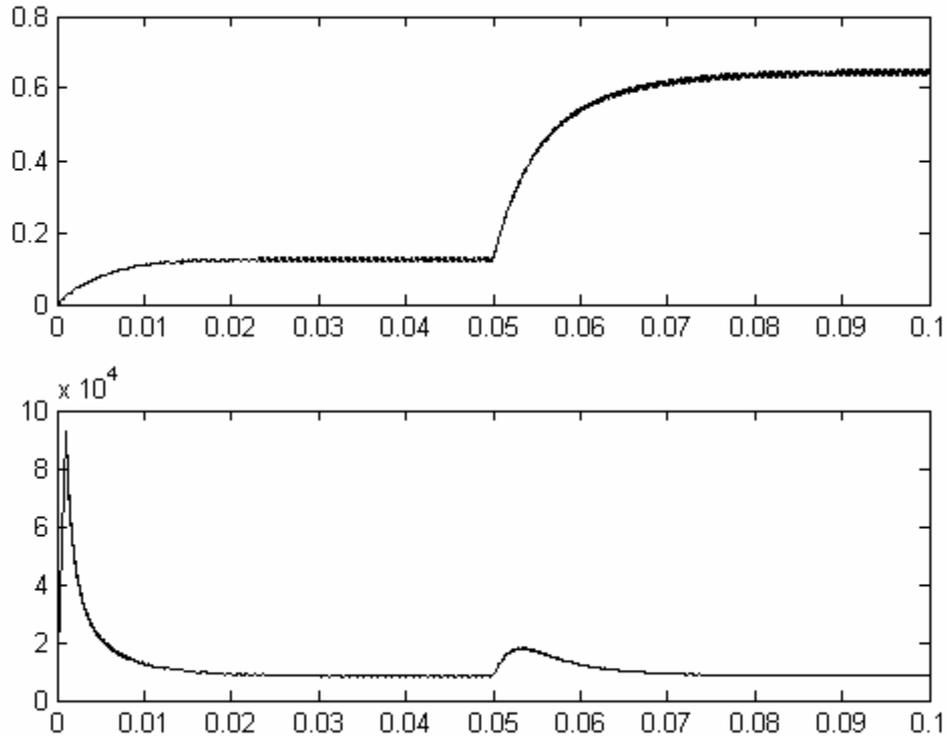


Figure 100 : Variation du rapport cyclique (haut) et de la fréquence au démarrage ( $t=0$ ) et lors d'un échelon de charge ( $t=0,05$ )

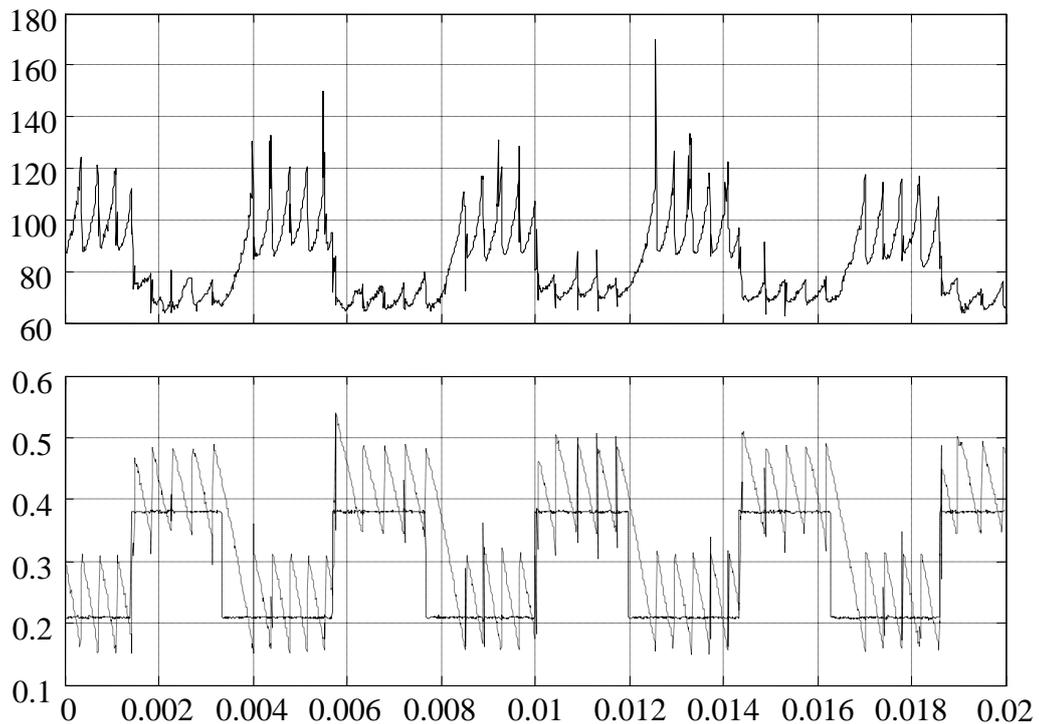
A  $t=0,05$ , Le rapport cyclique passe de 0,1 à 0,7 pour une fréquence qui reste constante après une légère variation.

Les variations de fréquence sont dues au retard entraîné par le calcul des valeurs moyennes du rapport cyclique et du terme  $\alpha(1-\alpha)$ . Si cette variation de fréquence n'empêche pas le respect de la consigne de courant (la valeur moyenne du courant de sortie ne dépend pas de la fréquence), elle peut être destructive pour les composants de puissance.

Pour éviter les sur-commutations, on additionne à la largeur de l'hystérésis calculée comme il vient d'être détaillé, la valeur absolue de la dérivée filtrée de la commande. Ainsi, à chaque commutation, la largeur de l'hystérésis est telle qu'il n'y a plus de commutation possible pendant un laps de temps défini par le filtrage de la dérivée. Cela limite (en valeur minimale) la période de découpage et donc les risques de sur-commutations (schéma proposé en annexes).

On dispose ainsi d'une commande en courant très rapide qui permet de contrôler le courant dans la décharge, comme le montrent les relevés expérimentaux des figures suivantes.

En régime dynamique, cette commande permet de suivre des échelons de consigne de courant (cas d'une décharge pointe-pointe avec un écartement de 3mm dans l'air).



*Figure 101 : Réponse à une consigne de courant en créneaux de valeur moyenne non nulle. Tension aux bornes de l'arc (en haut, en V), courant de consigne (trait plein en bas) et courant mesuré (en pointillés, en bas) en A.*

Elle est suffisamment robuste pour imposer un courant constant à une décharge glissante, dont la tension varie avec l'allongement de la décharge (dispositif de reformage d'hydrocarbure du CENERG).

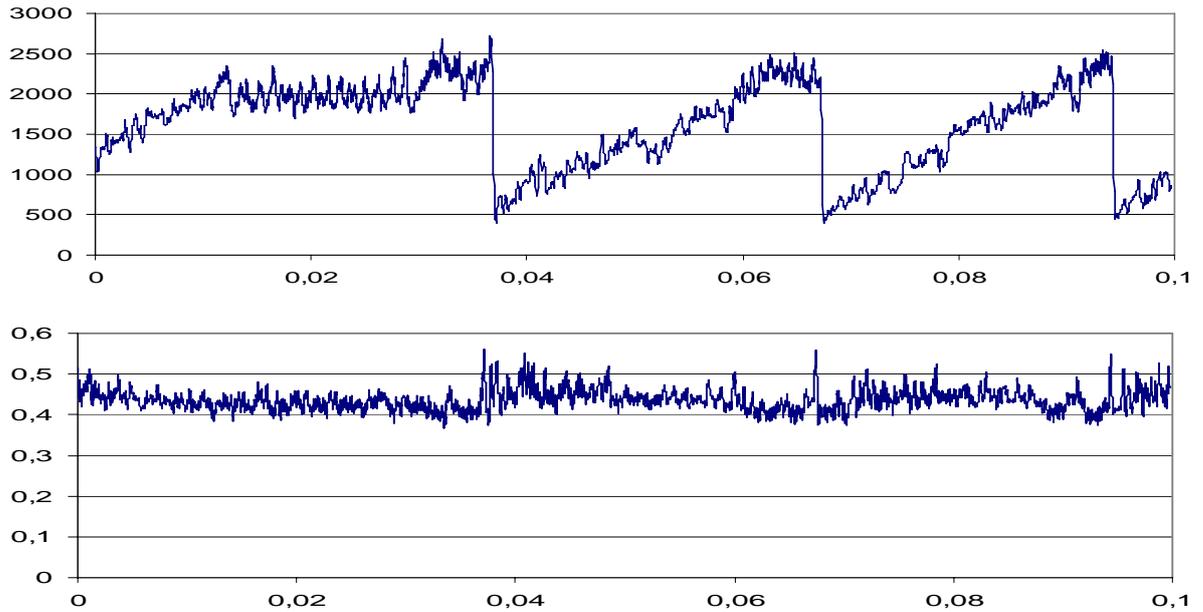


Figure 102 : chronogrammes expérimentaux de la tension (en haut, en V) et du courant (en bas, en A) relevés sur le dispositif du CENERG (décharge glissante)

◆ *Contraintes bas niveau.*

Pour assurer la sécurité du montage, on distingue deux contraintes bas niveau :

- Temps mort au niveau des bras d'onduleur.
- Contrôle du flux dans le transformateur.

**Contrôle des temps mort**

Comme on l'a dit dans la partie concernant le dimensionnement des interrupteurs de puissances de l'onduleur, pour chaque bras, les deux interrupteurs doivent être dans des états complémentaires. Quand un des deux interrupteurs est à l'état passant, le second doit être impérativement à l'état bloqué. On a donc une commande unique pour chaque bras ; cette commande est envoyée directement à un des interrupteurs et indirectement, (via une porte logique inverseuse) au second interrupteur.

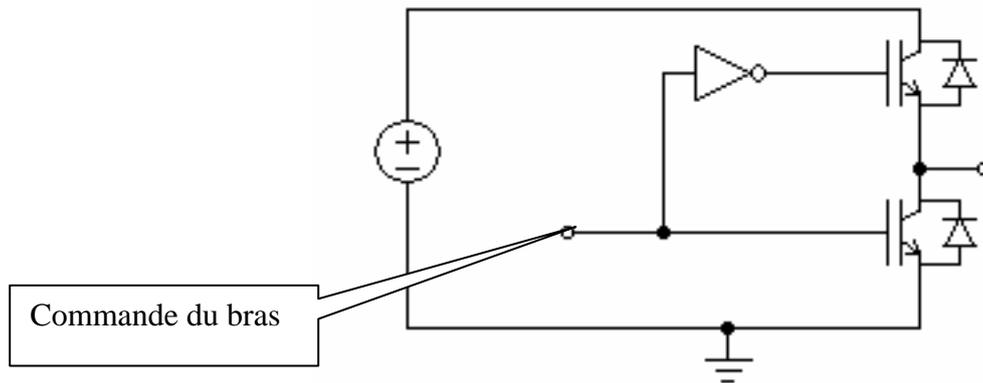


Figure 103 : Schéma de principe de commande des interrupteurs

Dans la pratique, les temps de commutations ne sont pas égaux pour le blocage et pour l'amorçage des interrupteurs. Il faut donc s'assurer que ceux-ci ne peuvent être passants en même temps si on veut éviter de générer des courts-circuits de bras. Pour cela on retarde les commandes d'amorçage des IGBT, c'est-à-dire qu'on envoie directement les ordres de blocage, alors que les ordres d'amorçage sont retardés d'un délai fixe (dans notre cas  $3\mu\text{s}$ ) appelé « temps mort ».

### Contrôle du flux

Le contrôle du flux dans le transformateur est important pour éviter de le saturer et subir des courants qui peuvent être destructifs pour les composants de puissance de l'onduleur.

La régulation de courant détermine la tension ( $E$  ou  $0$ ) qu'il est nécessaire d'avoir à la sorties des ponts de diodes (Figure 104 en haut). Cette information est envoyée au régulateur du flux dans le transformateur, qui fonctionne également sur un principe d'hystérésis.

Le régulateur de flux dans le transformateur impose la tension ( $+E_b$ ,  $-E_b$ ,  $0$ ) au primaire du transformateur (Figure 104 en bas) qui permet de respecter d'une part la consigne donnée par la régulation de courant et, d'autre part, le non dépassement du flux maximal autorisé dans le transformateur.

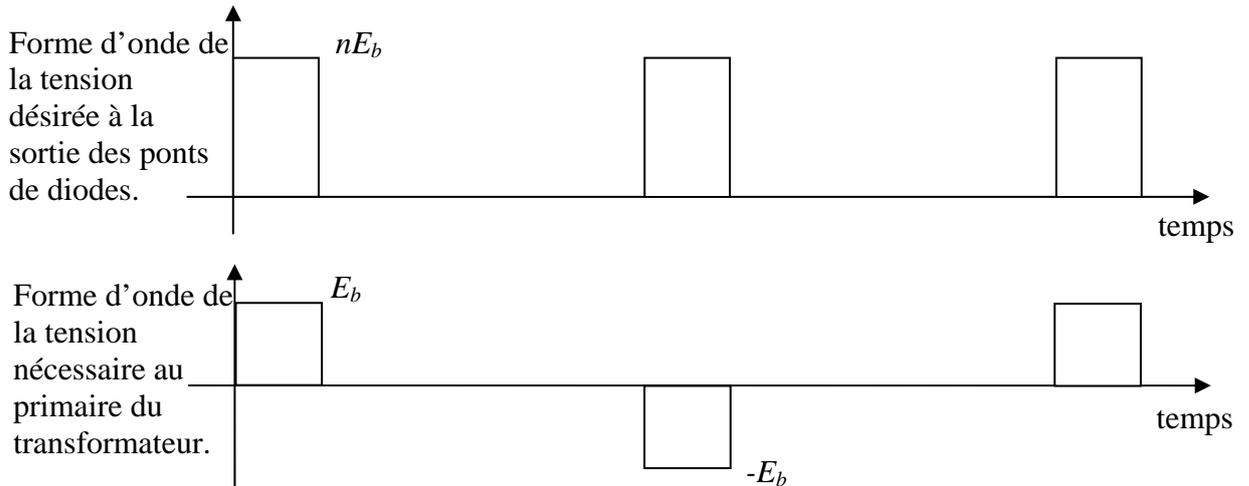


Figure 104 : Forme d'onde recherchée au primaire du transformateur

Puisqu'il doit être contrôlé, le flux magnétique du transformateur doit être connu. Pour le connaître, on l'estime à partir de la tension que l'on impose au primaire du transformateur. En effet, la variation de flux est due, à un facteur près, à la tension au primaire du transformateur :

$$\frac{d\Phi_{trans}}{dt} = n_1 V_{primaire}$$

Équation 97 : Variation du flux magnétique dans le transformateur

- $n_1$  nombre de spires au primaire du transformateur.

La tension  $V_{primaire}$  au primaire du transformateur est imposée par la différence entre  $v_{m1}$  et  $v_{m2}$ , les tensions des deux points milieu des bras de l'onduleur ; le potentiel de ces points peut être fixé par la commande des bras à 0 ou à  $E_b$ .

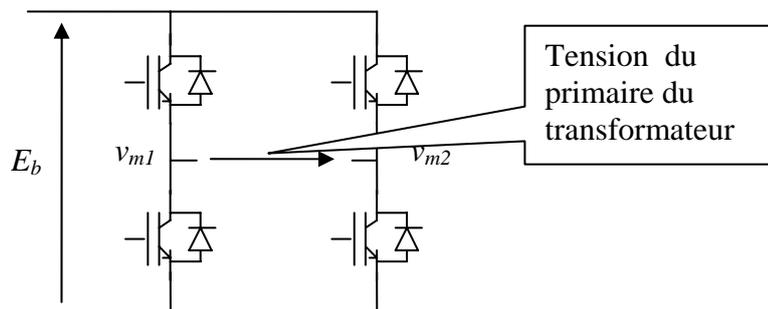


Figure 105 : Schéma et notations utilisées pour l'onduleur

Lorsque la régulation du courant de sortie réclame une tension égale à  $E$  à la sortie des ponts de diodes, le contrôle du flux dans le transformateur doit imposer une tension positive ou négative aux bornes du primaire du transformateur. Pour imposer une tension

positive au transformateur, la régulation de flux doit donner pour consigne de tension à  $v_{m2}$ ,  $E_b$ , et à  $v_{m1}$ , 0. De même, pour imposer une tension négative, il doit donner pour consigne de tension à  $v_{m2}$ , 0, et à  $v_{m1}$ ,  $E_b$ .

Pour limiter l'évolution du flux dans le transformateur, on fixe une fourchette de flux : si le flux estimé sort de cette fourchette, on inverse la polarité de la tension au primaire du transformateur.

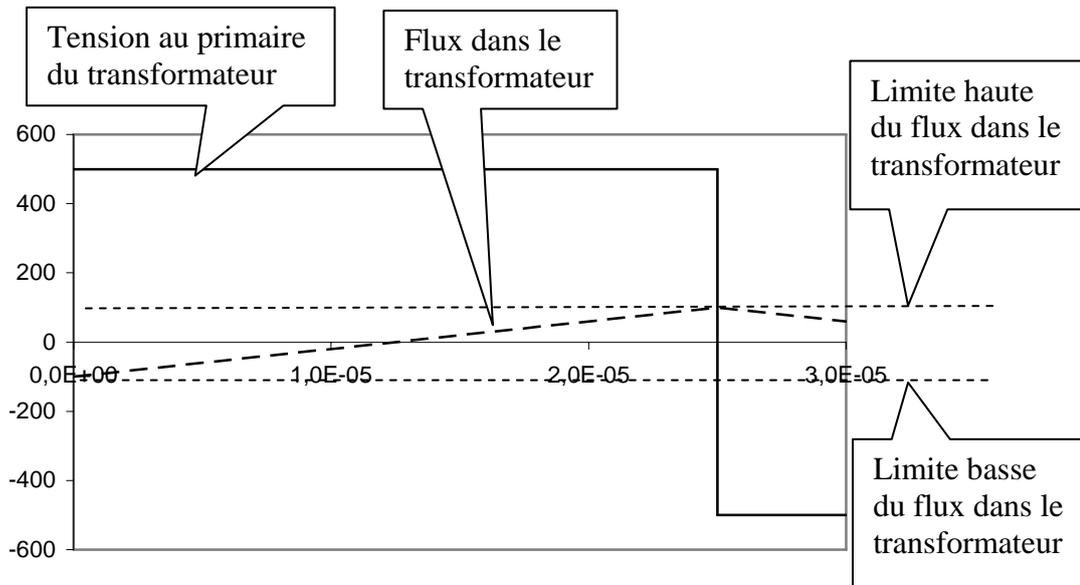


Figure 106 : Tension (V) et flux (mTm<sup>2</sup>) dans le transformateur pour la pleine tension en sortie (courbes théoriques).

Quand la commande en courant annule la tension au primaire du transformateur, le flux reste constant. Lorsque l'onduleur doit redémarrer, selon le signe du flux, le redémarrage se fait avec une tension positive ou négative de manière à avoir une première impulsion la plus longue possible.

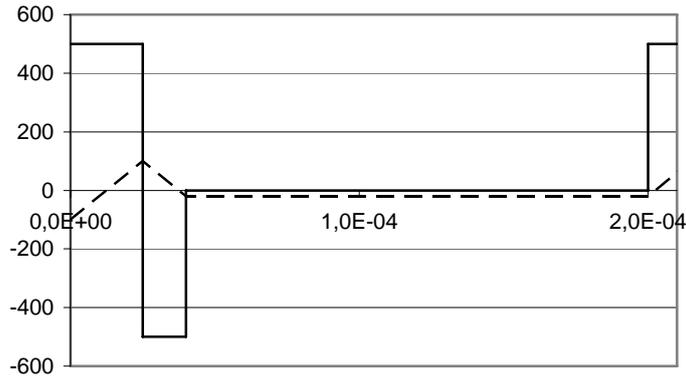


Figure 107 : Tension (V) et flux ( $mTm^2$ ) dans le transformateur lors d'une phase de roue libre (courbes théoriques).

Dans l'exemple ci-dessus, lors de l'arrêt du signal de commande, le flux était décroissant et négatif. Si on redémarre avec la même polarité qu'avant l'arrêt, le flux décroîtrait jusqu'à atteindre la borne inférieure du flux autorisé et le régulateur inverserait la polarité en faisant commuter les interrupteurs. Cependant, on peut voir qu'en redémarrant avec la polarité opposée, la commutation des interrupteurs arrivera plus tard.

Grâce à cette stratégie de contrôle du flux, la commande mise en oeuvre assure un fonctionnement sain du transformateur associé à un contrôle quasi instantané du courant de sortie.

#### ◆ Couplage entre la régulation de courant et le contrôle du flux

Le régulateur de courant de sortie du convertisseur est mis en série avec le contrôle du flux magnétique du transformateur. On peut voir que le système est caractérisé par deux fréquences distinctes importantes pour son fonctionnement :

- La fréquence définie pour le contrôle du flux dans le transformateur;
- La fréquence définie par la régulation par hystérésis à fréquence fixe du courant.

Nous allons voir comment ces deux fréquences interagissent.

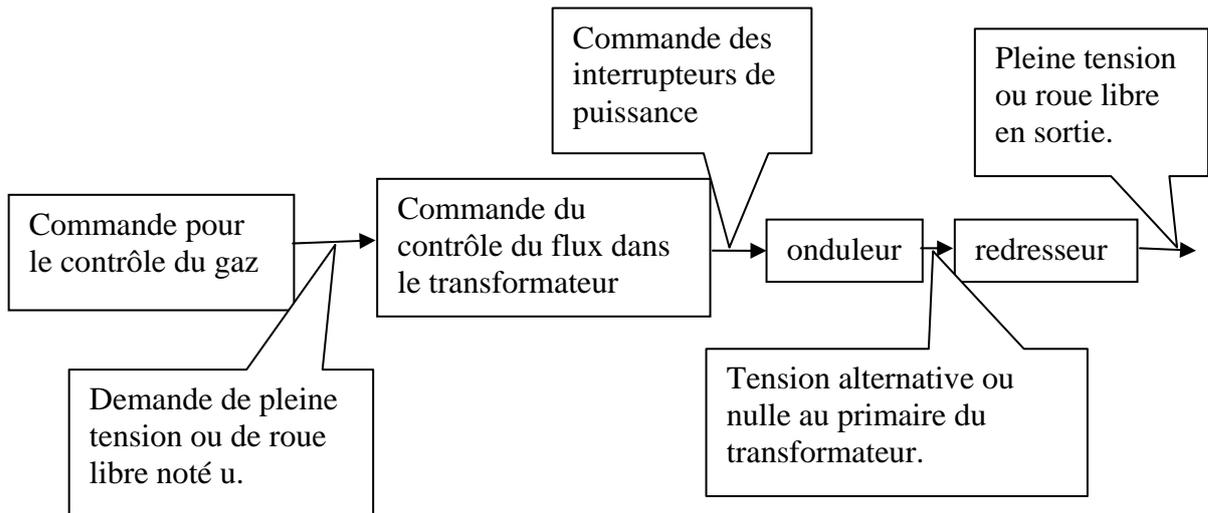


Figure 108 : Rôle des différentes commandes et de la structure de puissance

Les deux fréquences des contrôles sont proches, ce qui ne pose de problème, puisque ces deux régulations sont indépendantes l'une de l'autre. De surcroît, il est intéressant d'utiliser les fréquences les plus élevées possible pour limiter les nuisances sonores. On peut cependant remarquer que la mise en série des deux régulations correspond à la modulation de l'une par l'autre. Une étude simplifiée du signal de sortie, en ne considérant que le fondamental des deux signaux, permet de voir quel type de spectre harmonique est produit en sortie de l'onduleur. La modulation d'un signal par un autre peut être vu comme la multiplication de ces deux signaux.

$$\sin \omega_c t \sin \omega_t t = \frac{1}{2} (\cos(\omega_c - \omega_t)t - \cos(\omega_c + \omega_t)t)$$

Équation 98 : modulation de la fréquence de la commande du courant avec la fréquence du transformateur

- $\omega_c$  pulsation ( $\omega = 2\pi f$ ) liée à la fréquence de commande de la régulation en courant.
- $\omega_f$  pulsation ( $\omega = 2\pi f$ ) liée à la fréquence de fonctionnement du transformateur.

On voit donc que le spectre de sortie a comme harmoniques principales la somme et la différence des fréquences du régulateur de courant et du transformateur. Cela explique les nuisances sonores qui persistent, même si les deux fréquences des régulations sont élevées.

#### d) Alimentation industrielle

L'alimentation mise au point au LEEI n'est pratiquement utilisable que par le personnel qui a participé à sa mise au point. De plus, comme le dispositif à alimenter n'était pas

précisément connu des concepteurs de l'alimentation, celle-ci a été conçue en conservant un maximum de souplesse et de points de réglage.

Une seconde alimentation a donc été mise au point par l'entreprise CIRTEM, reprenant le principe de fonctionnement de la première. La partie puissance de cette seconde alimentation a été dimensionnée et réalisée par cette entreprise ; la partie commande a été réalisée au LEEI (SALANNE JP). On peut trouver les spécifications et le détail des schémas électroniques développés en annexe (fin des annexes).

La partie commande, que nous avons mise au point, présente deux différences notables par rapport à la commande du premier convertisseur. D'une part, on doit assurer une gestion des sécurités électriques permettant de protéger les utilisateurs et de limiter les risques de destruction du convertisseur, d'autre part, on a mis en place une structure modulaire de l'étage de contrôle qui permet de tester d'autres commandes que celle décrite plus haut.

### ◆ *Gestion des sécurités*

Les différentes causes de défaillance du convertisseur ont été examinées, afin de mettre en place les sécurités nécessaires :

- L'onduleur peut connaître trois types majeurs de défaillance :
  - un courant dans les semi-conducteurs trop important ;
  - une fréquence de commutation trop élevée ;
  - une température trop élevée.
- Le transformateur peut avoir :
  - un échauffement trop important ;
  - un courant trop important.
- Les diodes peuvent subir des tensions les détériorant.
- L'inductance de sortie peut subir :
  - un courant trop important ;
  - un échauffement trop important.

Pour pallier chacune de ces sources de défaillance, plusieurs capteurs sont placés afin d'arrêter et de sauvegarder le convertisseur :

- Un capteur de température est intégré au boîtier des IGBTs. Si la température devient trop importante un signal est envoyé à la carte de commande.

- Un capteur de courant permet de mesurer le courant dans le transformateur et dans les IGBTs.
- Un capteur de température indique si le transformateur à une température supérieure à sa température nominale.
- Un capteur de température indique si l'inductance à une température supérieure à sa température nominale.
- Le capteur de courant qui permet de gérer la régulation du courant en sortie permet de vérifier également la valeur du courant dans l'inductance.

Si un défaut est détecté pendant plus de 10 $\mu$ sec, le convertisseur est arrêté et le primaire du transformateur est court-circuité afin d'annuler les courants magnétisants dans le transformateur. Avec tous ces capteurs, il ne reste plus que deux défauts non traités.

- Les sur-commutations des IGBTs.
- Les surtensions aux bornes des diodes.

La commande ne doit donc pas imposer, même transitoirement, des changements d'état trop rapide. Les surtensions aux bornes des diodes représentent un risque faible, puisque les deux ponts de diodes utilisés sont dimensionnés pour supporter 10kV chacun soit, au total, soit 4 fois la tension nominale.

### ◆ *Structure modulaire pour les commandes additionnelles*

La commande a été organisée de façon modulaire, afin de garantir l'évolutivité de cette partie du générateur ; la gestion des sécurités, les parties de « bas niveau » et de « haut niveau » sont placées sur des cartes séparées, ce qui permet de désactiver la commande de haut niveau, au profit de nouvelles cartes permettant de tester d'autres solutions.

Ainsi, un connecteur permettant de tester d'autres commandes que la commande en courant utilisée dans la première version (présentée plus haut) a été ajouté. Il permet d'inhiber la régulation de courant implémentée et de la remplacer par d'autres types de régulation, réalisées sur des cartes additionnelles.

Cependant, le contrôle du flux dans le transformateur et les temps morts des commandes de l'onduleur ne peuvent pas être désactivés (commandes bas niveau).

On dispose sur ce connecteur, en plus d'alimentations +15 et -15V, des informations suivantes :

- Mesure du courant de sortie ;
- Mesure de la tension de sortie ;
- Mesure du courant au primaire du transformateur.

L'alimentation industrielle a été fabriquée en deux exemplaires : un pour le LEEI et un pour le CENERG. Ainsi, d'autres commandes ont pu être testées au LEEI afin de tenter d'élargir le domaine de fonctionnement.

## 2) *Extension de la plage de fonctionnement.*

L'objectif est ici d'élargir la plage de fonctionnement du convertisseur que l'on a mis au point en gardant la même structure de puissance, mais en utilisant d'autres types de commande.

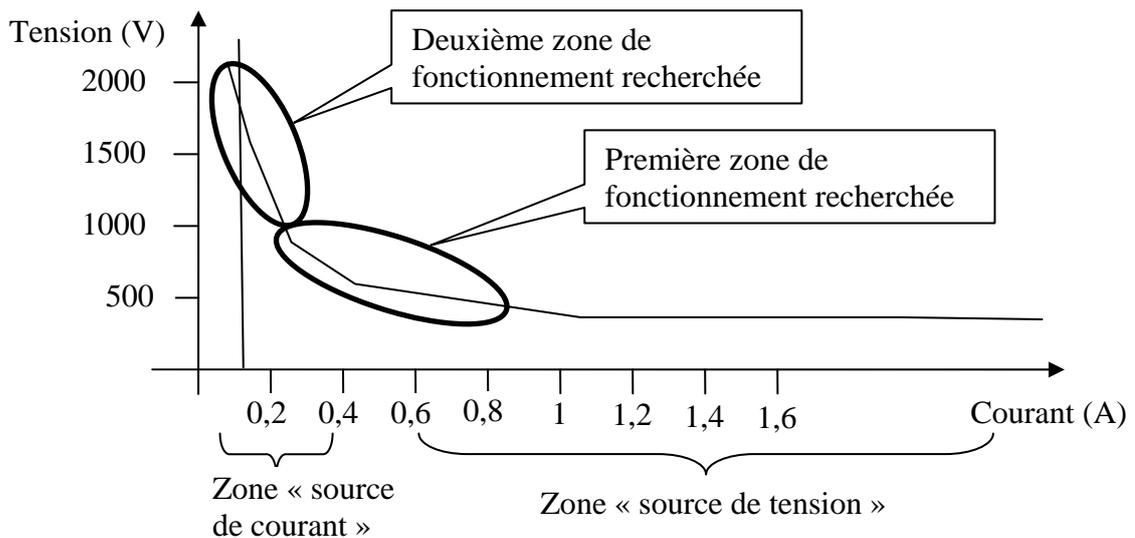


Figure 109 : Extension de la plage de fonctionnement.

Sur la caractéristique de la Figure 109, on peut observer que pour des courants faibles une alimentation de type « source de courant » n'est pas forcément le meilleur choix, puisque la caractéristique statique du gaz tend à devenir verticale ; le point d'intersection entre les deux caractéristiques statiques n'est pas très franc et sa définition et son contrôle deviennent délicats.

Le nouvel objectif est de mieux contrôler les points de fonctionnement électrique pour des courants plus faibles.

Nous sommes donc conduits à étudier dans cette zone la variation de la tension aux bornes du gaz, pour mieux caractériser le point de fonctionnement électrique et à envisager de mettre en place un contrôle « en tension » de celui-ci.

Nous allons voir que celui-ci présente un comportement difficile à maîtriser, puisqu'il dépend des caractéristiques propres au gaz, mais également des caractéristiques internes de l'alimentation.

### a) Contraintes due au couplage entre l'alimentation et la décharge

La recherche d'un point de fonctionnement dans la zone où la pente de la caractéristique statique du gaz est négative met en évidence un couplage important entre l'alimentation que nous utilisons et les décharges électriques.

Pour cette étude, nous procédons à une approximation importante et considérons que l'arc présente une longueur et une section fixe, ce qui nous permet d'utiliser le modèle « 0D » décrit dans la partie modélisation.

Nous montrons maintenant que l'ensemble du système peut présenter au niveau de la tension un comportement dynamique inverse à ce qu'indique la caractéristique statique du gaz : en effet, si la caractéristique statique du gaz montre qu'une diminution du courant entraîne une augmentation de la tension, une diminution *rapide* de faible amplitude du courant entraîne une variation correspondant à une *diminution* de la tension. Cette propriété ne relève pas seulement du comportement du gaz, mais résulte de l'association du générateur et de sa charge, car la vitesse de variation du courant dépend des caractéristiques du générateur.

Nous montrons ici comment la modélisation du gaz que nous avons choisie permet de mettre en évidence ce comportement. Rappelons d'abord les équations que nous utilisons pour une décharge de dimensions fixes, dans le temps où l'on étudie la décharge :

$$\tau \frac{dG}{dt} = k|I| + k_2 I^2 - G$$

$$V = \frac{I}{G}$$

*Équation 99 : équation « 0D » du gaz lorsque la décharge est allumée*

On peut voir que la tension aux bornes du dispositif est définie comme le rapport entre le courant et la conductance globale du gaz. On a pu voir, à la fin du chapitre modélisation que, comme la conductance augmentait lorsque le courant augmentait, la tension décroît lorsque le courant croît. Mais, ce qui est vrai au régime statique ne l'est pas forcément en régime dynamique.

En effet, on peut constater que la variation de la tension dans le temps dépend de la vitesse de variation du courant par rapport à la vitesse de variation de la conductance. Pour mettre en évidence cela, nous proposons une démonstration analytique.

On pose les équations différentielles du gaz et du courant dans l'inductance lors de la phase de roue libre, c'est à dire lorsque la décharge électrique est court-circuitée par la diode en anti-parallèle et que le courant est dans une phase décroissante.

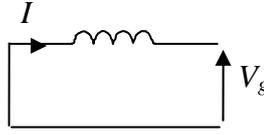


Figure 110 : Etage de sortie lors de la phase de roue libre

On note  $I_0$  et  $V_0$  le courant et la tension à l'instant initial. Nous posons l'hypothèse que la conductance du gaz varie peu autour de  $I_0/V_0$ .

$$\begin{aligned}\tau \frac{dG}{dt} &= k|I| + k_2 I^2 - G \\ \frac{dI}{dt} &= -\frac{V_0 I}{I_0 L} \\ V &= \frac{I}{G}\end{aligned}$$

Équation 100 : Equations simplifiées de la variation de la conductance, du courant et de la tension

La solution analytique des équations présentées ici n'est pas interprétable directement. Il est néanmoins possible de construire une expression de la dérivée de la tension à l'instant initial de la roue libre (Équation 101).

$$\frac{dV_{gaz}}{dt} = -\frac{V_0^2 \left( \frac{\tau}{L} + I_0^2 k_2 + I_0 k - \frac{I_0}{V_0} \right)}{I_0 \tau}$$

Équation 101 : Dérivée de la tension en  $t=0$  lors de la phase de roue libre

Le signe de cette dérivée dépend du numérateur : on peut le décomposer en trois termes :

- le premier terme est le rapport entre la durée de recombinaison des charges et la valeur de l'inductance ;
- le deuxième terme est la valeur de la conductance statique ( $G_s$ ) du gaz pour le courant  $I_0$  (que l'on retrouve à partir de l'Équation 99 en annulant la dérivée) ( $G_s = kI_0 + k_2 I_0^2$ );

- le troisième terme est la valeur de la conductance réelle ( $G_0$ ) au début de la phase de roue libre ( $G_0 = I_0/V_0$ ).

$$\text{signe}\left(\frac{dV}{dt}\right) = -\text{signe}\left(\frac{\tau}{L} + G_s - G_0\right)$$

Équation 102 : Signe de la dérivée du courant en début de phase de roue libre

On ne peut donc pas trancher directement sur le signe de la dérivée du courant au début de la phase de roue libre ; cependant, on remarque que si  $G_s$  est supérieur à  $G$  alors la pente de la tension est toujours négative. Comme la valeur de la conductance dépend d'une équation du premier ordre avec le courant comme terme source, la valeur instantanée de la conductance est l'image retardée du courant. Pour illustrer cela, on simule les équations du gaz et on peut observer que la conductance réelle « suit » la conductance statique avec un retard plus ou moins important.

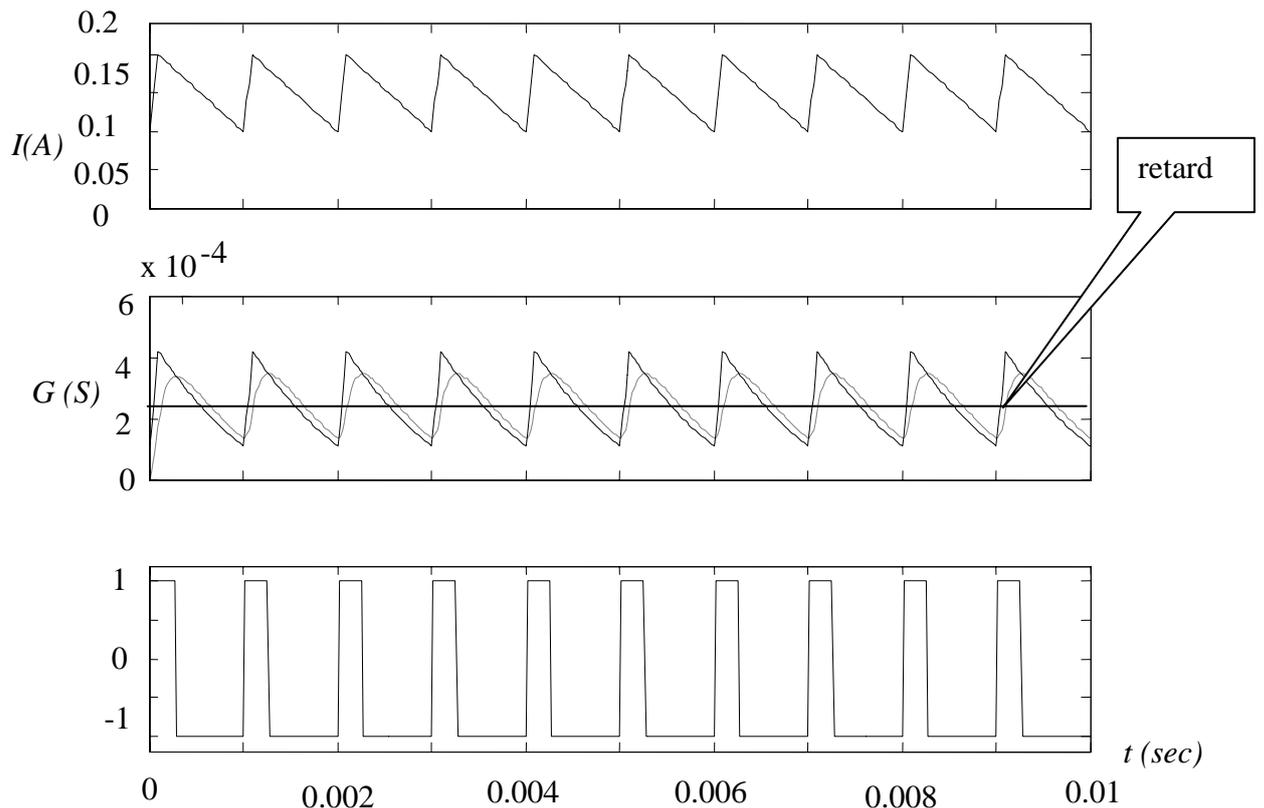


Figure 111 : Variation dans le temps de  $G_0$  (au milieu en pointillé, en Siemens) et de  $G_s$  (au milieu en trait continu, en Siemens) pour un courant en dent de scie (en haut, en Ampère). Signe de la différence  $G_s - G_0$  (bas)

Comme avant la phase de roue libre le courant est une rampe croissante, la conductance réelle est une rampe croissante avec un retard dépendant de la constante de temps  $\tau$ . Dans ce cas, la conductance statique est supérieure à la conductance réelle du gaz. Donc la pente de la tension du gaz est toujours négative en début de phase de roue libre. Ce comportement est l'inverse de celui qu'on aurait attendu au vu de courbe statique du gaz (où la tension croît quand le courant décroît).

Il est intéressant de savoir si le signe de la pente de la tension reste constant ou s'il change au bout d'un certain temps pendant la phase de roue libre. Pour cela, il suffit de déterminer si la dérivée de la tension s'annule et à quel moment. On note  $t_0$  le temps où la dérivée s'annule.

$$t_0 = \frac{G_0 \tau}{2 \frac{\tau}{L} - G_0} \ln \left( \frac{-\frac{\pi k_2 I_0}{L}}{G_0 + 2 \left( \frac{\tau}{L} \right)^2 + \frac{\tau}{L} (G_s + I_0 k - 3G_0) - G_s G_0} \right)$$

*Équation 103 : Instant du changement de pente du courant*

Pour qu'il y ait un changement de pente, il faut que  $t_0$  soit positif. Pour cela le terme pré multiplicatif et le logarithme doivent être de même signe. Le signe du terme pré multiplicatif dépend uniquement du numérateur. Le signe du logarithme dépend de la position de la valeur de la fraction par rapport à 1. On est donc amené à étudier l'inégalité suivante :

$$\left( \frac{\tau}{L} \right)^2 + \frac{\tau}{L} \left( G_s - \frac{3}{2} G_0 \right) + G_0 \frac{G_0 - G_s}{2} \leq 0$$

*Équation 104 : Condition de positivité du logarithme*

Si on résout le système d'équation pour avoir  $t_0$  positif, on obtient des conditions d'existence de  $t_0$  en fonction de la valeur de l'inductance. Si le signe du terme pré multiplicateur est positif alors la valeur de l'inductance doit éviter une zone bornée alors que si le terme pré multiplicateur est négatif,  $L$  doit être incluse dans des bornes. Ces bornes dépendent des zéros ( $z_1, z_2$ ) de l'équation du deuxième degré (Équation 104), où la variable considérée est  $\tau/L$ .

$$L < \frac{2\tau}{G_0} \Rightarrow \begin{cases} L \leq \frac{\tau}{z_1} \\ L \geq \frac{\tau}{z_2} \end{cases}$$

$$L > \frac{2\tau}{G_0} \Rightarrow \frac{\tau}{z_2} \geq L \geq \frac{\tau}{z_1}$$

Équation 105 : Condition, sur la valeur de  $L$ , de présence d'un changement de pente de la tension. On se trouve généralement (avec les ordre de grandeur que nous avons) dans le cas  $LG_0 > 2\tau$ .

Ces équations mettent en évidence de manière forte l'importance du couplage entre la valeur de l'inductance, la conductance et la constante de temps du gaz.

Pour visualiser cela, on utilise le calcul numérique pour calculer le signe de la dérivée de la tension en fonction de  $\tau$  et de  $L$  à un instant donnée ( $t=0,0005$  après le début de la roue libre qui a un ordre de grandeur compris entre la centaine de  $\mu s$  et la ms). On prend pour valeurs des paramètres statiques ( $k=0,001$  et  $k_2=0,04$ ) avec pour point de départ une tension de 75V et un courant de 300mA.

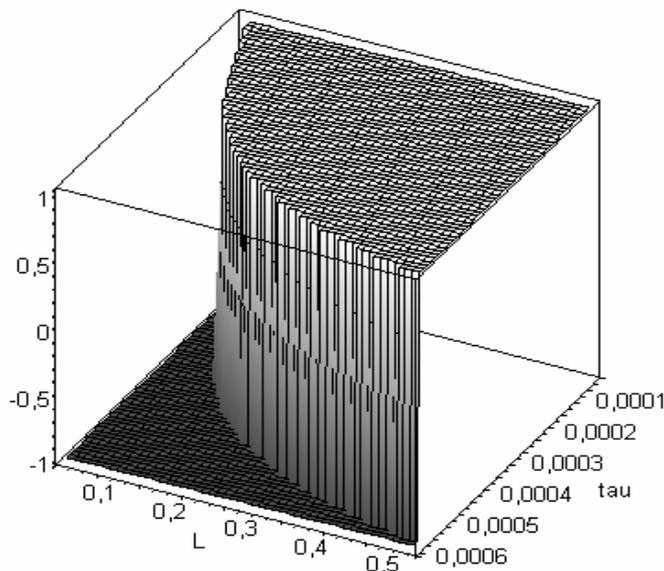


Figure 112 : Sens de variation de la tension en fonction de la valeur de  $\tau$  et de  $L$  pendant la phase de roue libre.

On vérifie que l'inversion du sens de variation de la tension dépend des valeurs de l'inductance et de la constante de temps du gaz.

La constante de temps avec laquelle le courant diminue est le produit entre la conductance et la valeur de l'inductance ( $LG_0$  puisqu'on considère que la conductance varie peu). Si la variation de courant est très rapide devant la variation de la conductance ( $LG_0$  petit devant  $\tau$ ) alors une diminution de courant entraîne une diminution de la tension durant toute la phase de roue libre. Dans le cas où le courant varie lentement ( $LG_0$  grand devant  $\tau$ ) alors une diminution de courant entraîne une augmentation de tension durant la phase de roue libre (sauf au tout début).

On visualise cette propriété avec les évolutions temporelles de  $V_{gaz}$  (Figure 113), pour une même valeur de  $\tau$  mais pour différentes valeurs de  $L$  (de 1H à 0,1H). On voit que plus  $L$  est grand, moins la tension aux bornes du gaz diminue avant de remonter.

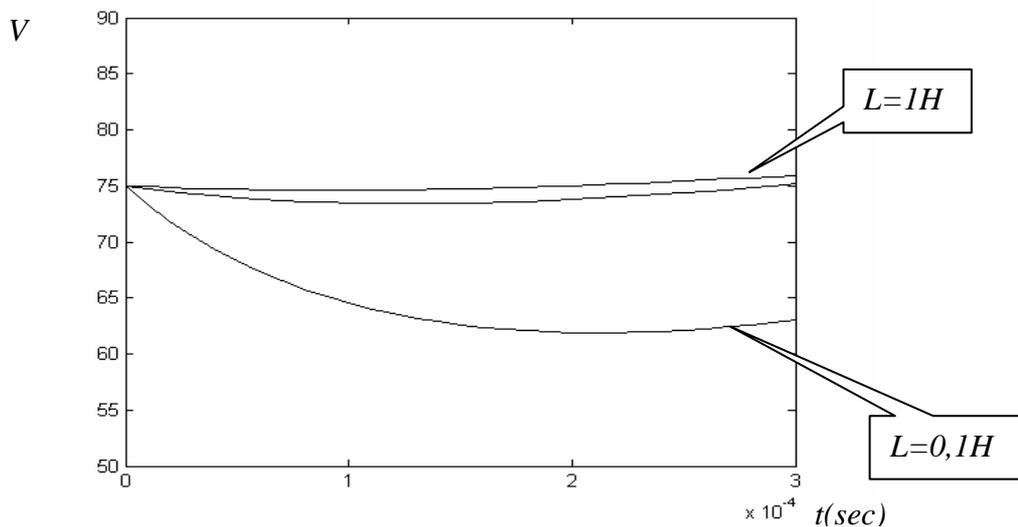


Figure 113 : Forme d'onde de la tension  $V_{gaz}$  (en V) pour plusieurs valeurs de  $L$ , lors de la décroissance du courant.

Cette propriété a une influence importante sur le parcours du point de fonctionnement électrique de la décharge qui va être décrit par la suite (page 158).

Cette étude qui a été menée sur la phase de roue libre, peut être reprise sur la phase de montée du courant. Dans ce cas, avec les mêmes hypothèses que précédemment, on trouve la pente de la tension juste après la commutation (Équation 106).

$$\frac{dV_{gaz}}{dt} = \frac{G_0 - G_s + \frac{\tau}{L} \left( \frac{E}{V_0} - 1 \right)}{V_0 G_0 \tau}$$

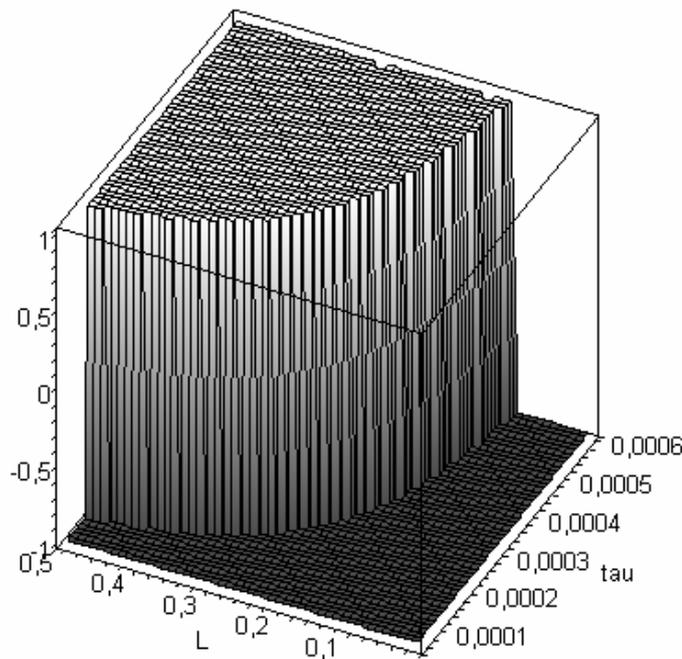
Équation 106 : Pente de la tension juste après l'amorçage de l'IGBT (pleine tension)

On voit qu'ici :

- la pente est positive puisque le terme  $E/V_0$  est supérieur ou égal à 1 (le montage est un hacheur dévolteur donc en valeur moyenne :  $V_{gaz} < E$  ;
- la différence entre la conductance statique et la conductance initiale est positive puisque, avant cet instant, le courant suivait une rampe décroissante.

La même étude que précédemment peut être effectuée : la dérivée de la tension change de signe à un instant qui dépend fortement du couplage entre l'alimentation et la décharge électrique.

On utilise le calcul numérique pour visualiser le signe de la dérivée de la tension en fonction de  $\tau$  et de  $L$  à un instant donnée ( $t=0,00003s$ , après le début de la phase active). On prend pour valeurs des paramètres statiques ( $k=0,001$ ,  $k_2=0,04$  et  $E=5000V$ ) avec pour point de départ une tension de 75V et un courant de 300mA (décharge pointe-pointe avec une distance inter électrodes de 3mm).



*Figure 114 : Sens de variation de la tension en fonction de la valeur de  $\tau$  et de  $L$  pendant la phase de montée du courant.*

L'évolution temporelle de la tension, pour différentes valeurs de  $L$ , est visualisée ci-dessous, lors de la montée du courant.

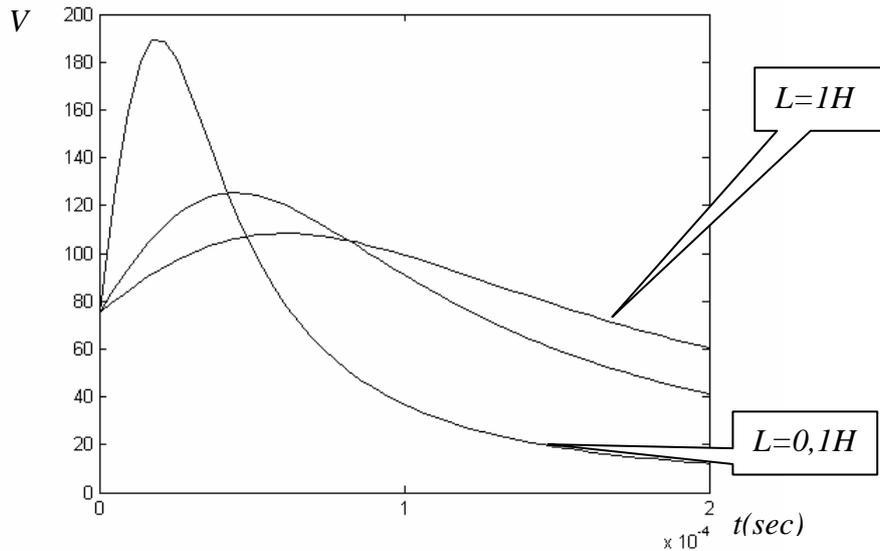


Figure 115 : Forme d'onde de la tension (en V) pour plusieurs valeurs de L lors de la croissance du courant.

On voit bien que pour différentes valeurs de L, le comportement du gaz varie à l'échelle de temps du découpage (hauteur du pic de tension, temps au bout duquel la variation de tension change de sens), ce qu'il faudra prendre en compte si on teste des méthodes de pilotage basées sur la mesure de la tension à cette échelle de temps.

En effet, ce comportement peut être déstabilisateur pour les stratégies de régulation, puisque la pente de la caractéristique statique tension/courant du gaz est négative, alors qu'à l'échelle des durées liées au découpage (en valeur instantanée) on retrouve une pente positive :

$$\text{signe}\left(\frac{dV}{dI}\right)_{\text{statique}} \neq \text{signe}\left(\frac{dV}{dt} \frac{dt}{dI}\right)_{\text{découpage}}$$

Équation 107 : Différence entre la pente de la caractéristique statique du gaz et la pente à l'échelle de temps des durées liées au découpage.

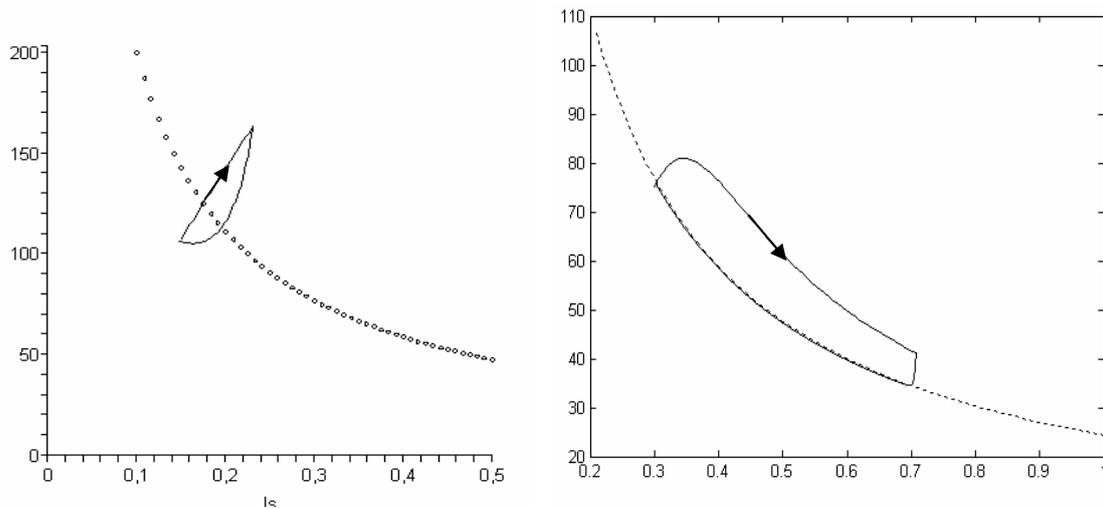
Cette première approche montre deux points qui prennent de l'importance lorsque l'on cherche à contrôler la tension aux bornes d'une décharge :

- Lors d'un changement d'état du convertisseur (passage en roue libre ou passage à pleine tension), la tension varie dans le même sens que le courant pendant un certain laps de temps. On a donc un comportement résistif en haute fréquence.
- Le moment où la tension change de pente (fin du comportement résistif de la décharge) dépend du rapport  $\tau/L$ .

Ces deux points sont importants si on étudie le trajet du point de fonctionnement électrique de la décharge dans le plan  $V(I)$ .

**Trajet du point de fonctionnement de la décharge dans le plan  $V(I)$ .**

Pour confirmer cette propriété, on visualise, dans un premier temps par simulation, le trajet du point de fonctionnement instantané dans le plan  $V(I)$  suivi par le gaz sur une période de découpage du convertisseur. On effectue ce tracé pour une décharge « longue » (plusieurs millimètres), qui présente une constante de temps longue, et pour une décharge « courte » (moins d'un millimètre), qui présente une constante de temps faible.



*Figure 116 : trajet du point de fonctionnement (en trait continu, avec parcours dans le sens horaire) dans le plan  $V(I)$  (en V et en A) ; caractéristique statique du dispositif en pointillé. Distance « longue » à gauche et « courte » à droite*

Le comportement dynamique de la décharge est différent du comportement statique. On peut même voir qu'en fonction de la distance inter électrode, le comportement dynamique peut changer complètement. En effet, en fonction de la constante de temps du gaz, soit on suit la caractéristique statique du gaz ( $\tau$  petit), soit le trajet du point de fonctionnement en dynamique est perpendiculaire à la caractéristique statique ( $\tau$  grand).

Les relevés expérimentaux permettent de valider les résultats obtenus par l'étude analytique.

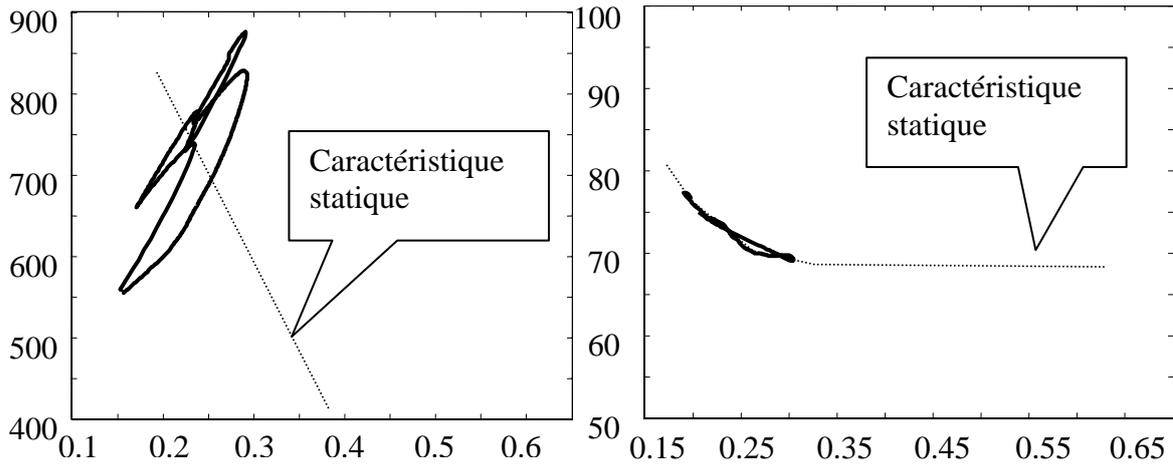


Figure 117 : Trajet, dans le plan tension (V) / courant (A), effectué par le point de fonctionnement pour un  $\tau$  fort (espace inter électrodes de 17mm) et pour un  $\tau$  faible (espace inter électrodes de 1mm) - tension en V (en ordonnées) et courant en A (en abscisses)

Dans l'objectif de placer le point de fonctionnement de la décharge dans la zone des tensions élevées et des courants faibles, l'analyse du comportement dynamique de la décharge fait apparaître un couplage indissociable des caractéristiques du gaz et de l'alimentation. Le contrôle recherché devient tâche ardue : en effet, non seulement la caractéristique statique est difficile à connaître a priori, mais de plus le comportement dynamique du système dépend très fortement du couplage entre l'alimentation et la décharge. Ce couplage induit des évolutions temporelles de la tension de décharge variables, parfois opposées aux informations données par la caractéristique statique du gaz.

Les stratégies de régulation doivent tenir compte de ces particularités, surtout si c'est un contrôle de la tension de fonctionnement qui est recherché.

### b) Contrôle indirect de la tension de sortie

Pour étendre la zone de fonctionnement du convertisseur, un contrôle de la tension aux bornes de la décharge semble être une solution cohérente puisque la caractéristique statique du gaz tend à devenir verticale.

On montre ici comment contrôler la tension aux bornes du gaz à l'aide d'un régulateur linéaire chargé de définir le courant de référence. Pour dimensionner ce régulateur, on construit la fonction de transfert qui décrit la variation de la tension du gaz pour une variation de courant.

◆ *Fonction de transfert du gaz*

Pour le dimensionnement des régulateurs, on utilise des méthodes nécessitant la connaissance de la fonction de transfert du gaz. Les fonctions de transfert représentent la réponse temporelle de la sortie (ici  $V$ ) d'un système linéaire à une excitation d'entrée ( $I$ ).

Pour obtenir la fonction de transfert du gaz qui, à une variation de courant, associe une variation de tension, on linéarise les équations autour du point de fonctionnement moyen recherché. Pour cela, on commence par exprimer la variation de la tension, due à une variation du courant, à partir des dérivées partielles par rapport au courant et aux variables internes du modèle. On note  $(I_m, V_m)$  le point de fonctionnement moyen recherché ; avec l'Équation 99, on obtient la relation  $I_m = (kI_m + k_2 I_m^2) V_m$  entre la tension moyenne et le courant moyen.

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial I} \Delta I + \frac{\partial V}{\partial G} \frac{\partial G}{\partial I} \Delta I$$

*Équation 108 : Variation de  $V$  due à une variation de  $I$*

Ensuite, on exprime ces dérivées partielles à l'aide de la connaissance du modèle.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial G} \frac{\partial G}{\partial I} &= -\frac{I_m}{G_m^2} \frac{k + 2k_2 I_m}{1 + \tau p} \\ \frac{\partial V}{\partial I} &= \frac{1}{G_m} \end{aligned}$$

*Équation 109 : Expression des dérivées partielles au voisinage du point de fonctionnement étudié.*

En réinjectant ces dérivées partielles dans l'équation initiale (Équation 108), on obtient une fonction de transfert au voisinage du point étudié. Cette fonction de transfert décrit le comportement du gaz autour du point de fonctionnement moyen  $(I_m, V_m)$ .

$$\frac{V(p)}{I(p)} = \frac{\tau p - \frac{k_2 I_m^2}{G_m}}{G_m (1 + \tau p)}$$

*Équation 110 : Fonction de transfert du gaz au voisinage du point de fonctionnement étudié.*

Cette fonction de transfert permet de vérifier le comportement globalement stable de la décharge puisque il n'y a qu'un seul pôle négatif au dénominateur. On trouve également un

zéro positif au numérateur. Cela se traduit par le comportement, décrit au Chapitre IV :2)a), qui établit que la tension présente une évolution temporelle « inverse », à l'échelle de temps du découpage, de celle prévue par sa caractéristique statique.

On peut tester cette fonction de transfert en la comparant au modèle dont elle découle pour quantifier l'erreur commise. On simule alors la fonction de transfert trouvée en parallèle avec le modèle complet. La fonction de transfert décrite précédemment donne la variation autour du point de fonctionnement autour de  $I_m$  et  $V_m$ . Il faut donc ajouter ces valeurs moyennes lors de la simulation.

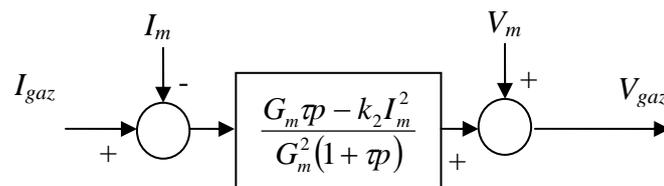


Figure 118 : Fonction de transfert à comparer au modèle complet

On choisit donc un point de fonctionnement réel d'une décharge pointe/pointe de 3mm, autour d'un courant de 0.3A. Les paramètres du modèle ont été identifiés par la méthode du modèle.

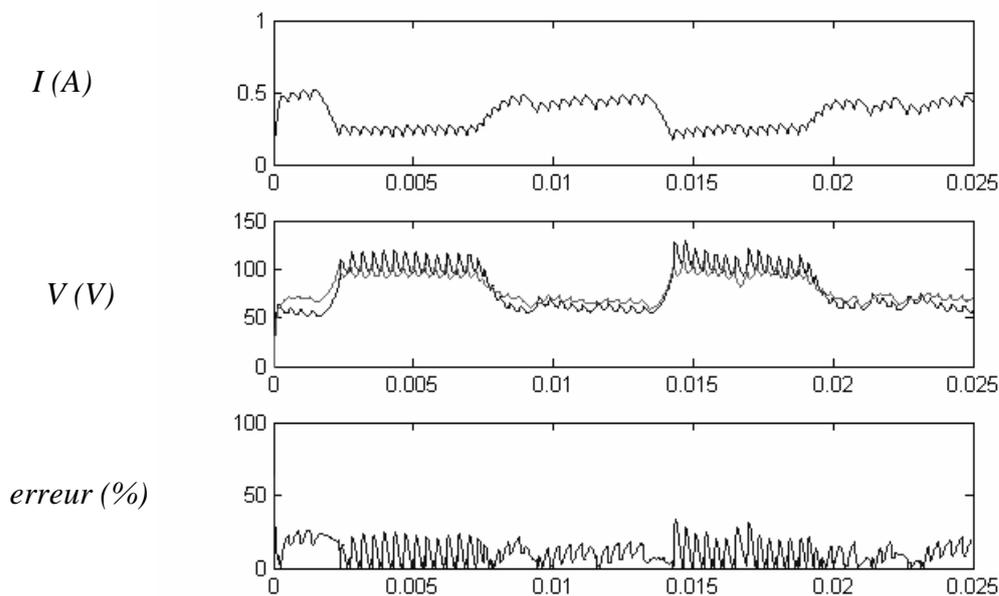


Figure 119 : Comparaison entre un chronogramme expérimental et une simulation du modèle complet 0,3A ; courant en Ampère (en haut), tension en V mesurée (trait grisé) et du modèle complet (trait foncé) (au milieu) et erreur relative sur la tension (en bas) en %.

Décharge pointe-pointe dans l'azote à pression atmosphérique avec un espace inter électrodes de 3mm

Pour valider le modèle complet identifié, on compare la tension mesurée aux bornes de la décharge, à la tension obtenue par la simulation du modèle complet avec comme entrée le courant mesuré. On obtient une erreur moyenne de 9,5%.

Ensuite, on utilise une simulation autour du point de fonctionnement (avec un courant d'entrée de 0,3A +/- 0,1A) pour voir comment se comporte le modèle linéarisé par rapport au modèle complet.

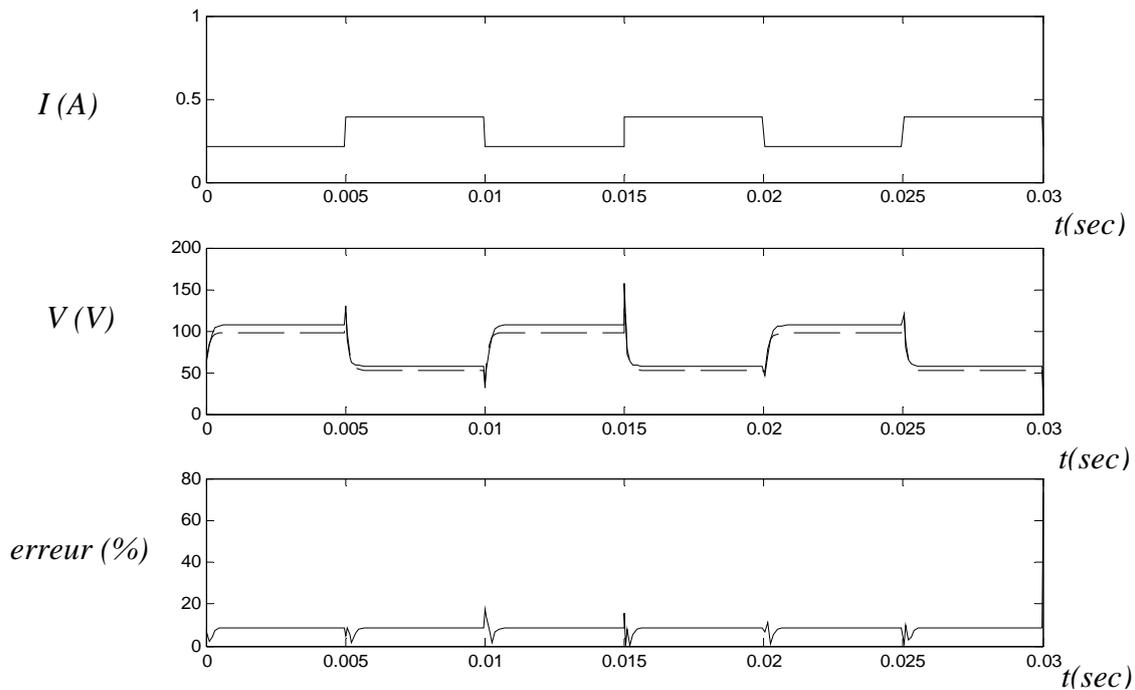


Figure 120 : Comparaison de la simulation du modèle complet et du modèle linéarisé autour de 0,3A ; courant en Ampère (en haut), tension en V du modèle complet (trait continu) et du modèle linéarisé (trait pointillé) (au milieu) et erreur relative sur la tension (en bas) en %

L'erreur relative moyenne est de 8.6%. Plus l'ondulation autour de  $I_m$  est faible, plus l'erreur relative est faible. Le modèle linéarisé présente donc un fonctionnement satisfaisant, vis à vis du modèle complet.

◆ *Commande cascade courant/tension.*

La commande cascade courant/tension est souvent utilisée dans les convertisseurs statiques. Une boucle de courant contrôle le courant dans l'inductance de sortie ; une boucle de tension impose une référence à la régulation de courant pour obtenir la tension désirée en sortie. Ce bouclage impose une bande passante plus rapide pour la boucle de courant que pour la boucle de tension, afin que le système soit stable.

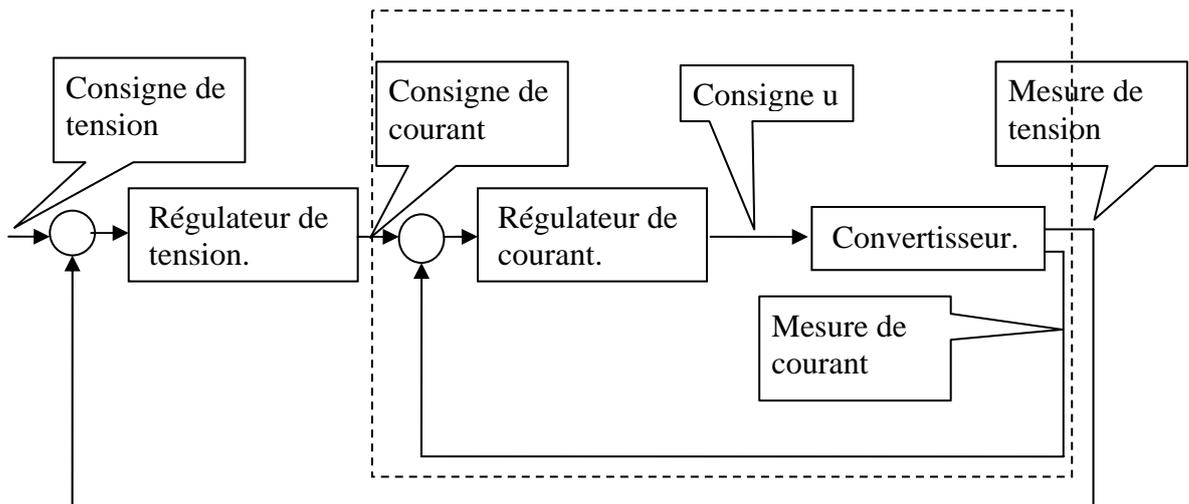


Figure 121 : Schéma bloc de la structure cascade de contrôle de la tension

Avec ce type de régulation, on ne peut contrôler que la tension moyenne aux bornes de la décharge, à l'échelle du découpage. En effet, si l'ondulation de courant à la sortie du convertisseur induit une ondulation importante de tension, on sera obligé de la subir et on ne pourra que réguler la tension moyenne aux bornes de la décharge. Les relevés oscillographiques qui ont été effectués, ont montré que la bande passante réelle de la boucle de courant est de l'ordre du kHz. La bande passante de la régulation de tension ne pourra donc pas excéder la centaine de Hz.

Dans le cas général où la fonction de transfert présente un gain négatif, les gains proportionnel et intégral du régulateur PI sont négatifs. On stipule alors dans notre cas, sachant que le gaz présente une caractéristique statique à résistance dynamique négative, que les gains du régulateur sont négatifs.

Pour dimensionner le régulateur, on étudie, selon les méthodes classiques, la fonction de transfert du système, composée du régulateur de tension en série avec le gaz en boucle fermée (on considère que le convertisseur, qui fournira le courant défini par le correcteur, présente un gain unitaire). Pour vérifier la stabilité on utilise le critère de marge de phase. Nous étudions donc le système décrit par le schéma bloc de la Figure 122.

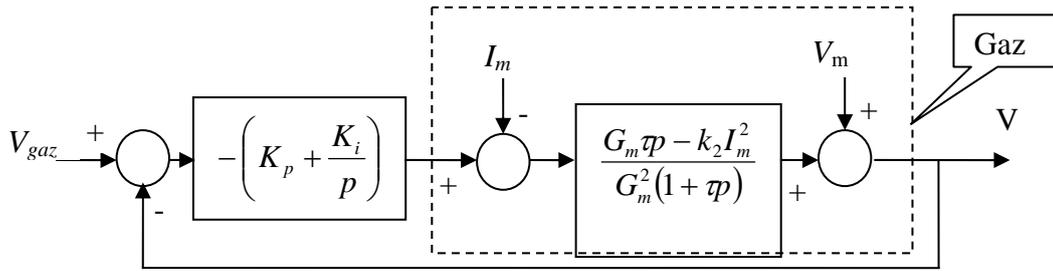


Figure 122 : schéma bloc de la régulation de tension par un PI

On calcule alors la fonction de transfert en boucle ouverte GBO et en boucle fermée GBF.

$$G_{BO}(p) = \frac{k_2 I_m^2 + p(K_p k_2 I_m^2 - \tau G_m K_i) - p^2 K_p G_m \tau}{p G_m^2 (1 + \tau p)}$$

$$G_{BF}(p) = \frac{G_{BO}(p)}{1 + G_{BO}(p)} = \frac{\frac{k_2 I_m^2 K_i}{\tau G_m (G_m - K_p)} + p \frac{(K_p k_2 I_m^2 - \tau G_m K_i)}{\tau G_m (G_m - K_p)} - p^2 \frac{K_p}{G_m - K_p}}{\frac{k_2 I_m^2 K_i}{\tau G_m (G_m - K_p)} + p \frac{K_p k_2 I_m^2 - \tau G_m K_i + G_m^2}{\tau G_m (G_m - K_p)} + p^2}$$

Équation 111 : Fonctions de transfert en boucle ouverte et fermée du système régulateur + gaz

La fonction de transfert en boucle ouverte permet de calculer la valeur des gains  $K_i$  et  $K_p$  permettant d'obtenir une réponse impulsionnelle satisfaisante. Pour cela, on identifie le dénominateur de la fonction de transfert à une fonction classique du deuxième ordre :

$$\frac{1}{\omega_0^2 + 2\zeta\omega_0 p + p_2}$$

Équation 112 : Equation de transfert typique du premier ordre

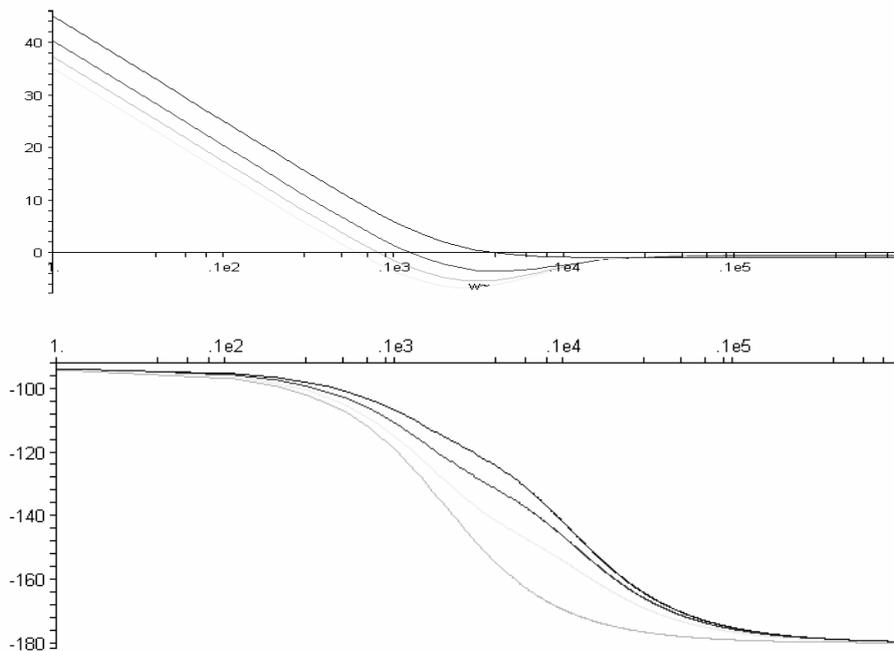
On peut obtenir la valeur des paramètres  $K_i$  et  $K_p$  permettant d'avoir une dynamique « relativement » maîtrisée. Il est cependant difficile de dire si cette dynamique sera a priori respectée puisque, si la majeure partie de la réponse temporelle d'une fonction de transfert est liée au dénominateur de celle-ci, le numérateur peut jouer un rôle déstabilisateur (d'autant plus qu'il existe ici deux zéros au numérateur).

$$K_p = \sigma_m^2 \frac{2\zeta\omega_0\tau + \frac{\omega_0^2\tau^2 G_m}{k_2 I_m^2} - 1}{k_2 I_m^2 + 2\zeta\omega_0\tau G_m + \frac{\omega_0\tau_2 G_m^2}{k_2 I_m^2}}$$

$$K_i = \frac{\omega_0^2\tau G_m (G_m - K_p)}{k_2 I_m^2}$$

*Équation 113 : Valeur des paramètres permettant d'obtenir une réponse impulsionnelle avec une pulsation propre  $\omega_0$  et un amortissement  $\zeta$*

Il faut s'assurer que le système est stable, c'est à dire qu'il présente une marge de phase suffisante. On utilise donc la fonction de transfert en boucle ouverte et on trace le diagramme de Bode. On effectue ce tracé pour plusieurs valeurs de l'amortissement, afin de visualiser à partir de quelle valeur de celui-ci le système est suffisamment stable.



*Figure 123 : diagramme de Bode pour  $\zeta$  variant de 1 à 10 (de droite à gauche)*

On peut voir que plus  $\zeta$  est grand, plus la marge de phase est importante. Une étude de l'influence de la constante de temps  $\tau$  et du facteur d'amortissement est faite pour étudier leur influence sur la marge de phase et donc la stabilité du système.

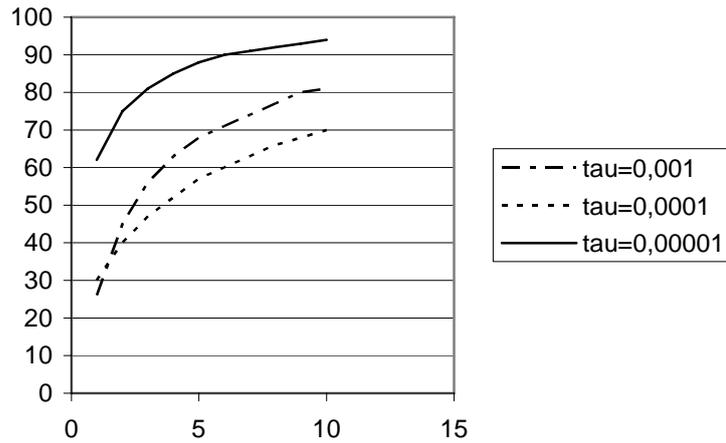


Figure 124 : Variation de la marge de phase en fonction de l'amortissement pour différentes valeurs de  $\tau$

On peut voir qu'il faut choisir un amortissement relativement fort si on veut avoir un fonctionnement assez stable de la régulation de tension. Si le régulateur présente une dynamique trop rapide, il se fera « piéger » par le comportement dérivateur du gaz et il ne pourra pas réguler la tension convenablement.

On teste en simulation la régulation proposée. Afin de comparer les diverses approximations faites, on teste la régulation sur la fonction de transfert obtenue par linéarisation du gaz, sur la fonction de transfert obtenue par linéarisation sans les compensations des valeurs moyennes, et sur le modèle complet du gaz sans les compensations des valeurs moyennes. La pulsation  $\omega_0$  choisie est de 9000rad.sec<sup>-1</sup>, et l'amortissement de 0,7 (pour vérifier les instabilités possibles).

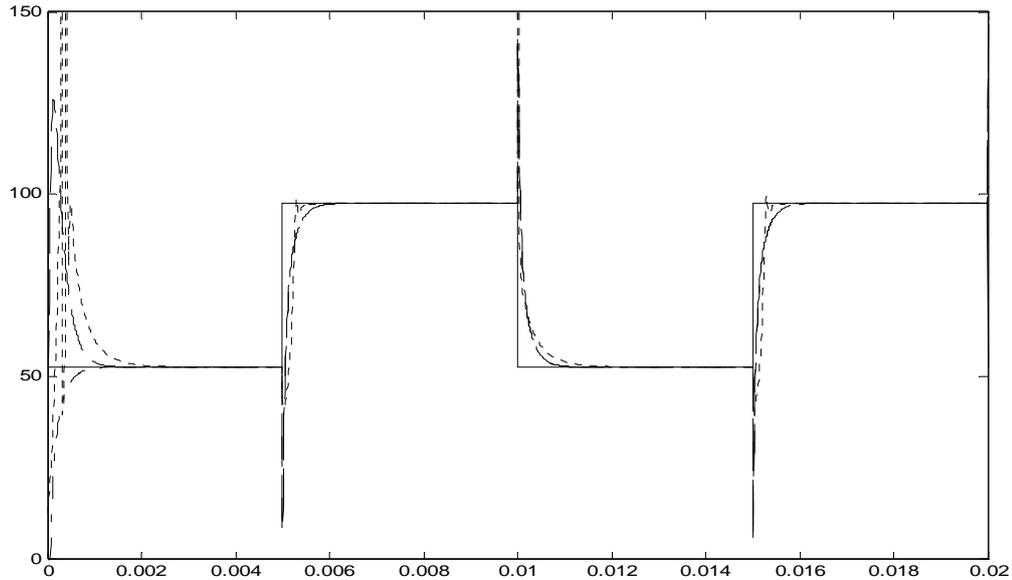


Figure 125 : Réponse à des échelons de consigne de tension (trait continu), de la fonction de transfert compensée (trait pointillé) et non compensée (trait points pointillé) et du modèle complet non compensé (points)

Remarque : on ne doit pas tenir compte de la première partie des courbes qui correspond au transitoire dû à la valeur des états initiaux des modèles simulés.

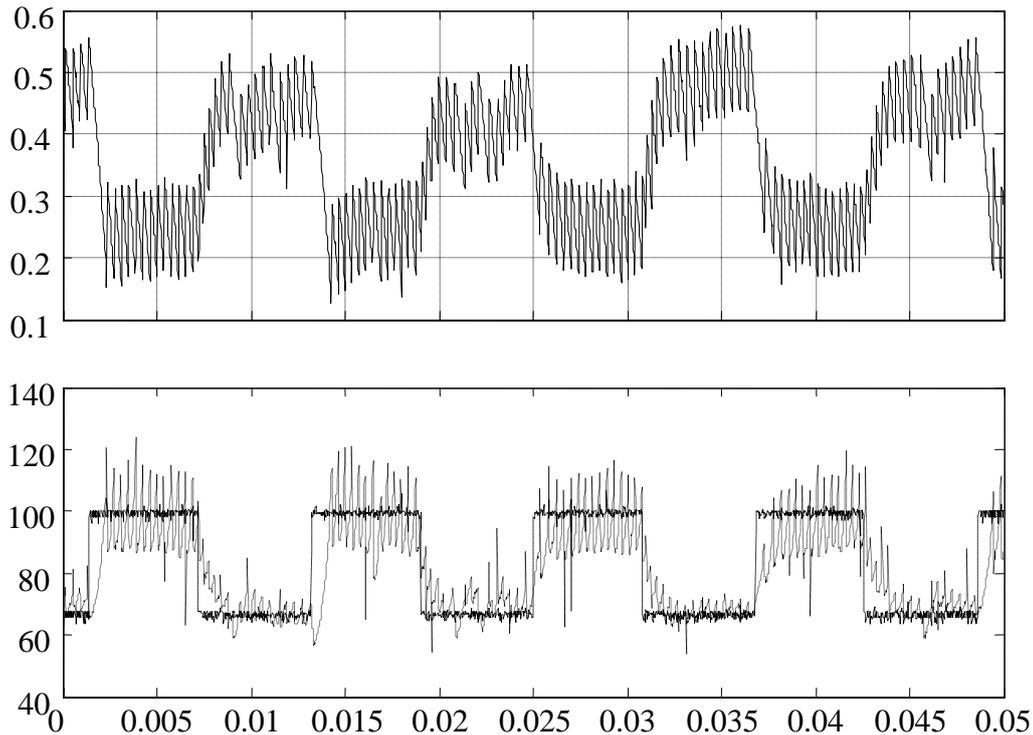
Il apparaît (Figure 125) que la régulation de tension fonctionne de façon satisfaisante, avec les fonctions de transfert obtenues par linéarisation, avec ou sans compensation. Sur le modèle complet, on voit que la dynamique est plus importante et les dépassements plus grands. Cependant, le système reste stable et la consigne est respectée avec une bande passante de plus de 100Hz. On a choisi cette bande passante afin de respecter la séparation des modes, c'est-à-dire que la régulation de courant doit être plus rapide que la régulation de tension.

#### ◆ *Performance dynamique*

Le régulateur du paragraphe précédent pilote une source de courant industrialisée développée par la CIRTEM et le LEEI. Celle-ci permet de réguler la valeur moyenne de la tension en sortie du convertisseur, tout en présentant une ondulation très importante. Cela est dû à l'imperfection de l'alimentation qui présente une ondulation de courant assez importante à faible tension de sortie (de façon à garder la fréquence fixe), comme on peut le prévoir d'après Équation 91.

La dynamique de la régulation a été choisie pour avoir un temps de réponse de l'ordre de 1ms, avec un amortissement assez faible ; la sortie du PI est limitée pour éviter des consignes de courant trop fortes ou trop faibles. Les valeurs des paramètres du régulateur sont calculées à partir de l'Équation 112, en utilisant ses valeurs résultant de l'identification des paramètres du modèle de gaz.

La régulation fonctionne correctement avec un temps de réponse plus lent que prévu, de l'ordre de 2ms.



*Figure 126 : Réponse à une consigne créneaux de tension. Courant (en haut), en A. Consigne de tension (en bas, en trait continu) en V et tension mesurée (en bas, en pointillé) en V. Décharge pointe-pointe dans l'azote à pression atmosphérique avec un espace inter électrodes de 3mm*

Cette expérience montre que l'on peut réguler la tension d'un arc dans la seconde zone de fonctionnement recherchée et que les hypothèses qui ont été utilisées pour l'étude de la fonction de transfert sont valables, puisque c'est à partir de celles-ci que le régulateur a été dimensionné.

◆ *Remarque sur l'utilisation d'une capacité parallèle au gaz*

Au vu de l'ondulation importante de la tension (Figure 126) autour de sa valeur moyenne (fixée grâce à la régulation), on pourrait (par un réflexe de novice) espérer améliorer le résultat en plaçant une capacité aux bornes du gaz.

Malheureusement, si une capacité peut diminuer l'ondulation de tension aux bornes d'une résistance, elle ne permet pas de le faire aux bornes d'une décharge qui a une caractéristique statique à pente négative. L'ensemble formé du gaz et d'une capacité placée en parallèle, destiné à être alimenté par une source de courant (comme nous l'avons fait plus haut), est instable au delà d'une certaine valeur de capacité. Cette valeur limite correspond à la limite du comportement dynamique « à résistance positive » du gaz.

Cela peut être constaté en observant la fonction de transfert résultant d'une mise en parallèle de ces deux composants :

$$\frac{V(p)}{I(p)} = \frac{G_m \tau p - k_2 I_m^2}{G_m^2 + p(\tau G_m^2 - C k_2 I_m^2) + G_m \tau p^2}$$

*Équation 114 : Fonction de transfert d'une capacité parallèle au gaz (alimentation par une source de courant pour fixer la tension)*

La stabilité de l'ensemble dépend du lieu des pôles de cette fonction de transfert. Si la partie réelle des pôles est positive, alors le système est instable ; sinon, il est stable. On calcule les pôles de la fonction de transfert pour des valeurs croissantes de C et on les place dans le plan imaginaire (partie réel en abscisse, partie imaginaire en ordonnée).

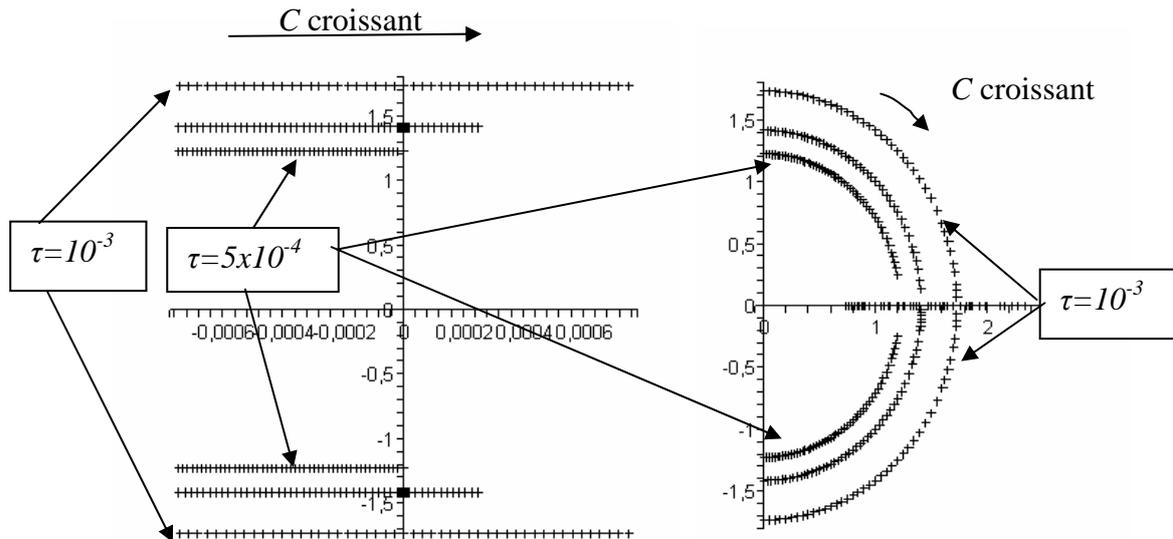


Figure 127 : Lieu des pôles pour  $C$  croissant (de gauche à droite) de  $1e^{-8}$  à  $2,5e^{-6}$  à gauche et  $C$  variant de  $2,5e^{-6}$  à  $6,4e^{-3}$  à droite. Pour trois valeurs de  $\tau$  de  $1e^{-3}$  à  $5e^{-4}$  (de l'extérieur vers l'intérieur).

Le polynôme au dénominateur ayant des coefficients réels, les pôles sont conjugués et ont une symétrie par rapport à l'axe des abscisses.

On peut voir que pour une capacité petite et une constante de temps assez grande, le système est stable (pôles conjugués à gauche de l'axe des ordonnées du graphe de gauche). Mais que si la constante de temps est petite, ou la capacité grande, le système est instable (pôles conjugués à droite de l'axe des ordonnées).

Utiliser une capacité ne permet donc pas d'améliorer le comportement de la décharge si on veut rester dans la zone de fonctionnement à résistance négative.

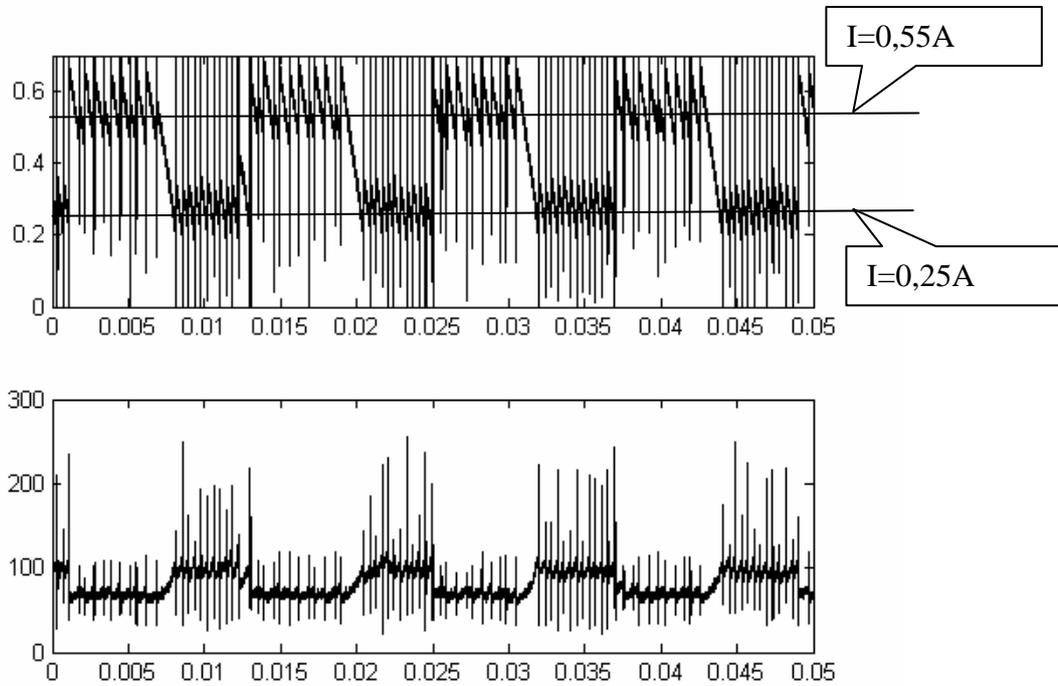
### c) Evaluation des performances des commandes proposées

On se propose d'étudier les deux commandes proposées (commande en courant et commande en tension). Nous considérerons d'abord le cas d'une décharge de longueur fixe, puis le cas d'une décharge soumise à un flux de gaz.

#### ◆ Cas d'un point de fonctionnement à longueur fixe

On peut utiliser les commandes en courant et en tension pour évaluer leurs performances dynamiques et évaluer leur capacité à suivre une référence : comment et à quelle vitesse, avec ces régulations, la système va-t-il atteindre sa référence ?

On se place concrètement dans le cas où l'on veut passer d'un point de fonctionnement ( $I=0,55A$   $V=70V$ ) au point de fonctionnement ( $I=0,25A$   $V=100V$ ), (cas d'une décharge pointe-pointe avec une distance inter électrodes de 3mm) pour observer comment et à quelle vitesse ces régulations vont atteindre leur référence.



*Figure 128 : Relevé expérimental de la réponse à une consigne échelon de référence de courant pour la régulation de courant ; courant en haut en Ampère tension en bas en Volt.*

*Décharge pointe-pointe dans l'azote à pression atmosphérique avec un espace inter électrodes de 3mm*

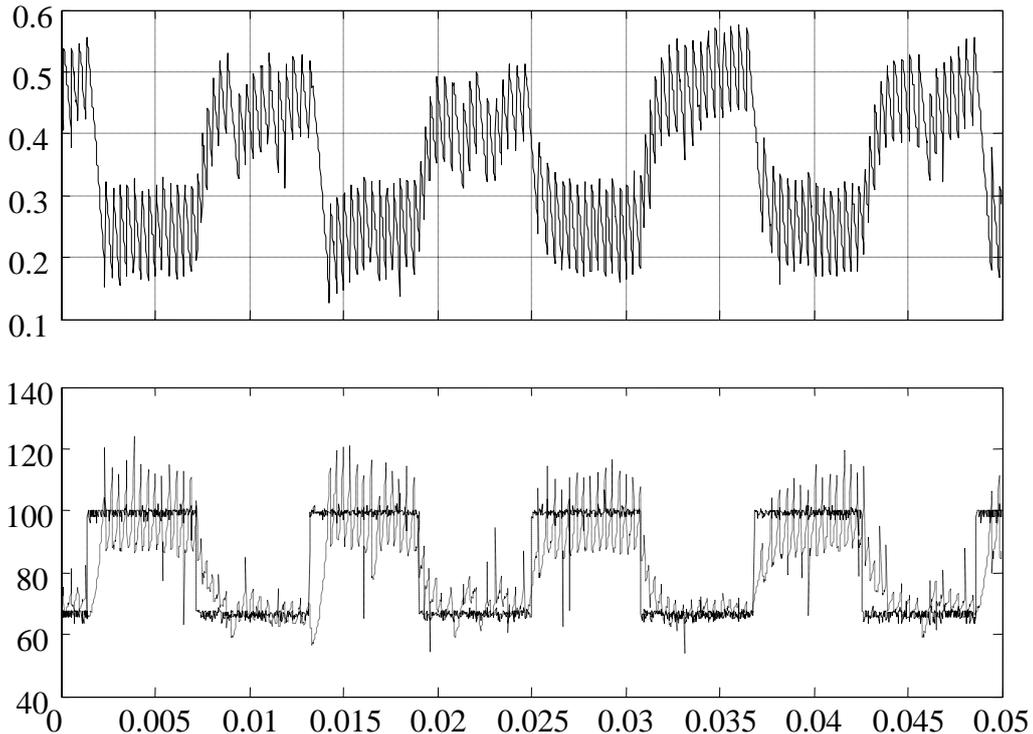


Figure 129 : Relevé expérimental de la réponse à une consigne créneaux de tension. Courant en haut, en A. Consigne de tension (en bas, en trait continu) en V et tension mesurée (en bas, en pointillé) en V. Décharge pointe-pointe dans l'azote à pression atmosphérique avec un espace inter électrodes de 3mm

On peut constater que la régulation en courant est très rapide puisqu'en une seule période de découpage, on atteint la valeur de référence. Cependant, elle présente un léger biais (ici dû au capteur de courant).

La régulation de tension est plus lente puisqu'il faut plusieurs périodes de découpage pour atteindre le point de fonctionnement de référence. Cela est normal puisque pour pouvoir mettre en œuvre cette commande il faut que la bande passante en tension soit inférieure à la bande passante en courant (page 162). Cependant, on a une erreur statique nulle en régime permanent sur la tension.

On a donc deux possibilités de réglage du point de fonctionnement ; le choix de l'une ou de l'autre de ces possibilités dépend de la caractéristique que l'on recherche pour le plasma.

#### ◆ Test sous flux de gaz

On teste ces deux commandes pour un montage pointe-pointe fixe, qui subit un flux de gaz. Cela nous permettra d'évaluer leur robustesse face à une perturbation.

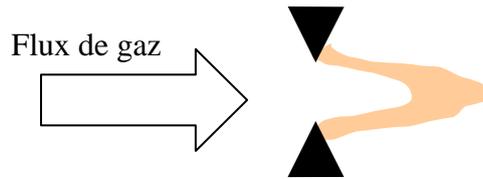


Figure 130 : dispositif effectué pour la comparaison des régulations

On obtient un chronogramme typique de décharge glissante. On peut le voir notamment avec une commande à courant constant.

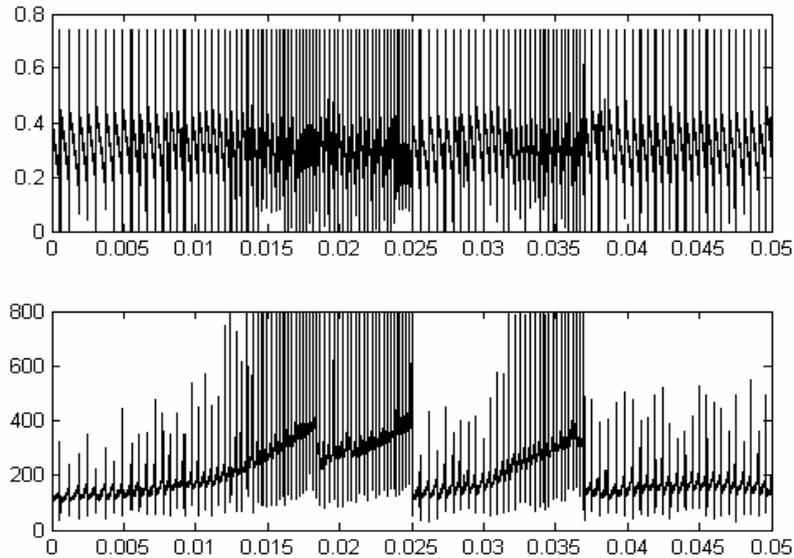


Figure 131 : Chronogramme d'une décharge pointe-pointe sous flux de gaz avec une commande à courant constant ; courant en A en haut, et tension aux bornes en V en bas.

On peut voir qu'il y a une variation périodique de la tension aux bornes du dispositif. En effet, sous l'effet du flux de gaz, l'arc s'allonge périodiquement, ce qui entraîne une augmentation de la tension de la décharge vue des bornes.

Pour une consigne donnée de chaque commande, on fait varier le flux de gaz et on mesure le point de fonctionnement électrique pour tester la robustesse de la commande vis-à-vis de cette perturbation.

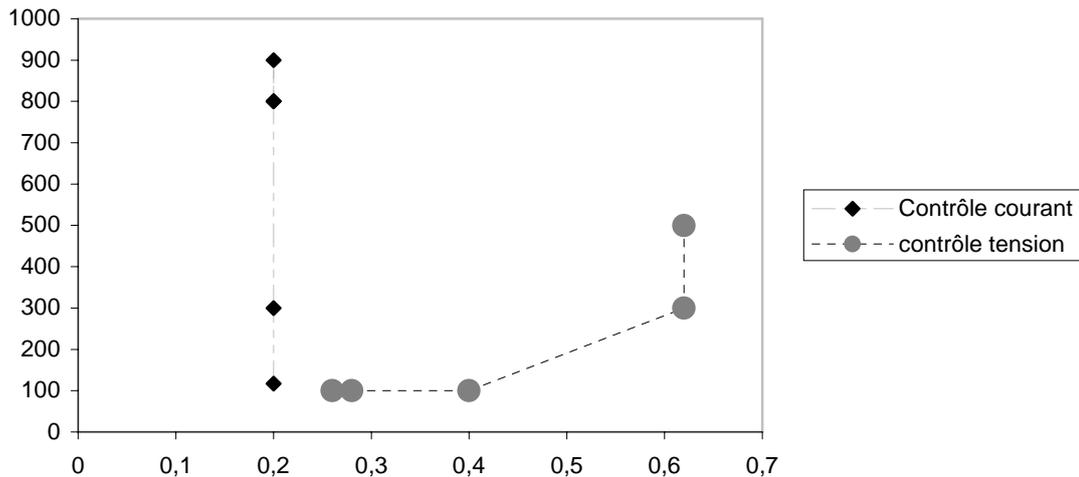


Figure 132 : Variation du point de fonctionnement pour les différentes commandes ; tension en ordonné (en V) ; courant en abscisses (en A). Chaque point correspond à un débit différent.

On peut voir que la commande en courant semble robuste puisque quoiqu'il arrive, la consigne est respectée. Cela est dû au fait que notre alimentation est une source de courant, ce qui mis en évidence par le fait que tous les points se trouvent sur une droite verticale dans le plan  $V(I)$ .

La commande en tension respecte la consigne jusqu'au point où le courant est saturé. En effet, la commande en tension est une commande où le régulateur de tension donne une consigne de courant. Or, pour des raisons de sécurité, la consigne de courant que peut donner le régulateur de tension, est limitée. On a donc une caractéristique source de tension qui devient, lorsque le courant à fournir est trop important une caractéristique source de courant.

#### d) Fourchette courant/tension

Un autre moyen d'obtenir un contrôle plus précis du point de fonctionnement est de prendre en compte l'information sur la tension pour choisir les instants de commutation. Pour gagner en précision, on ne peut pas réduire beaucoup l'ondulation de courant ; en effet, celle-ci est calculée et dépend de la valeur de l'inductance (fixe), de la tension du bus continu (fixe), du rapport cyclique (variant peu autour d'un point de fonctionnement) et de la fréquence de commutation (limité par les interrupteurs de puissance).

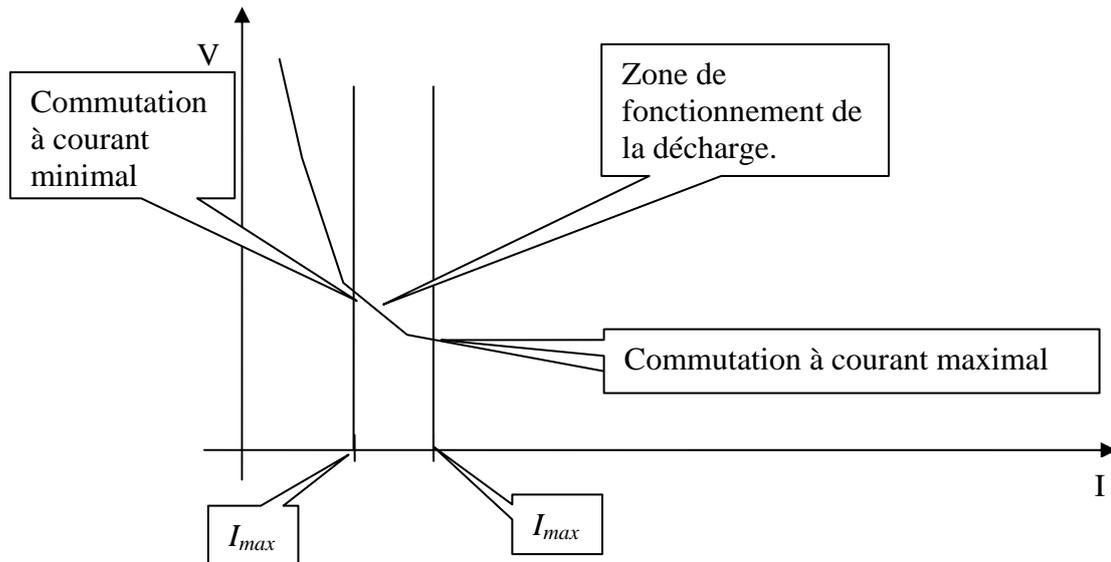


Figure 133 : Lieu de commutation de l'alimentation pour un hystérésis de courant

Avec la fourchette de courant, l'alimentation entretient un courant entre  $I_{min}$  et  $I_{max}$ . L'ondulation de courant est donc définie par ces bornes et la commande compare le courant mesuré à ces deux limites.

Cependant, la mesure du courant est toujours en retard par rapport au courant réel et pour une faible variation de courant, la tension de décharge peut varier beaucoup (surtout dans la zone de sa caractéristique où le courant est faible). Donc pour caractériser un point de fonctionnement à faible courant, la valeur de la tension est plus précise que la valeur du courant.

On se propose donc d'assurer un contrôle du point de fonctionnement entre un courant maximum et une tension maximale : si le courant  $i_l$  dépasse le courant maximum, on impose une tension  $v$  (Figure 134) nulle (phase de roue libre). Si la tension  $V_{gaz}$  dépasse la tension maximale choisie, alors on impose  $v=E$ . Entre ces deux points on maintient l'état de la commande.

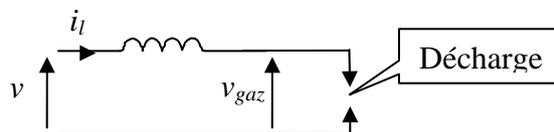


Figure 134 : Rappel des notations utilisées pour l'étage de sortie

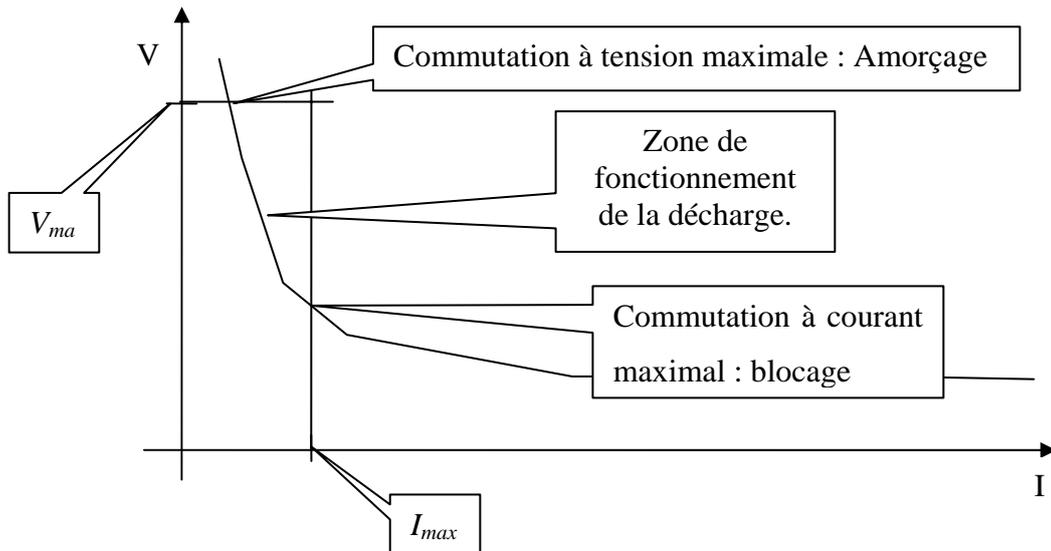


Figure 135 : Lieu de commutation de l'alimentation pour un hystérésis de tension courant

La Figure 135 présente le principe du fonctionnement envisagé ; dans la pratique, on cherchera des valeurs de  $V_{max}$  et  $I_{max}$  qui définissent une zone de fonctionnement très limitée, autour du point recherché. Cette commande ne peut fonctionner que si le couplage entre l'alimentation et la décharge impose au point de fonctionnement de « suivre » la caractéristique statique du gaz. En effet, comme on l'a vu dans la partie détaillant le comportement dynamique du point de fonctionnement, en fonction de la valeur de l'inductance et de la constante de temps de recombinaison des charges, le point de fonctionnement peut rester, ou non, sur la caractéristique statique du gaz.

Dans le cas où l'inductance est correctement dimensionnée (ici,  $L=0.3H$ ), alors la commande fonctionne de façon satisfaisante dans le cas d'une décharge pointe-pointe avec une distance inter électrodes de 3mm, pour la paire de valeurs suivantes :

- $V_{max}=100V$  ;
- $I_{max}=0.35A$ .

La Figure 136 présente une simulation numérique correspondant à ces valeurs.

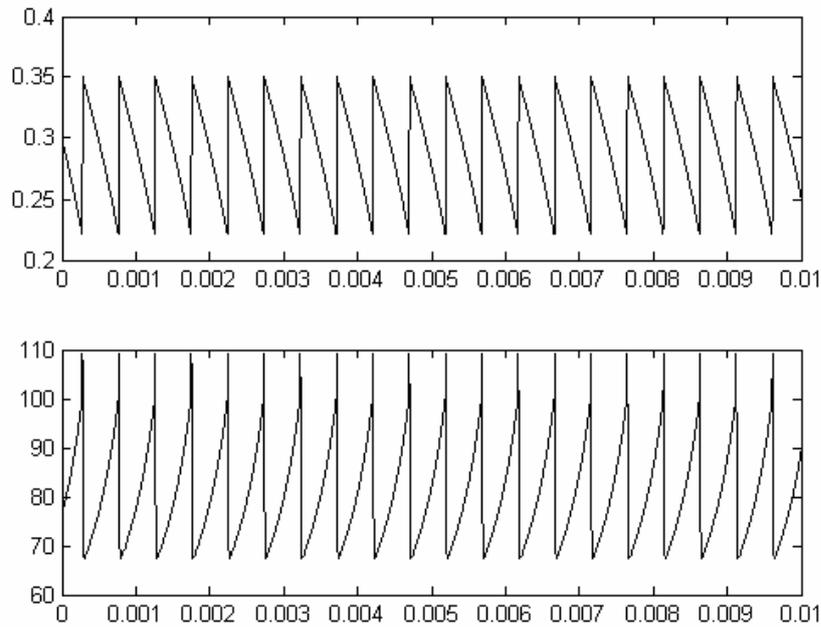


Figure 136 : Chronogramme du courant (en haut, en A) et de la tension (en bas, en V), avec une fourchette tension/courant pour  $V_{max}=100$ ,  $I_{max}=0.35A$ , et une inductance de 300mH (temps en sec). Simulation numérique.

On peut observer que la tension présente des dépassements. Ceux-ci sont dus au fait que lors de la commutation :

- Le courant croît rapidement.
- La décharge présente un caractère résistif en hautes fréquences qui fait que sa tension commence par croître (ce qui entraîne le dépassement observé) avant de décroître en suivant la caractéristique statique.

Cette commande a également été testée expérimentalement, sur la partie puissance de l'alimentation industrialisée réalisée par la CIRTEM et le LEEI. On montre, ci-après, les chronogrammes du courant et de la tension lors du fonctionnement en fourchette tension courant. Pour cette expérimentation,  $I_{max}=0,2A$  et  $V_{max}=200V$  (distance inter électrode 3mm).

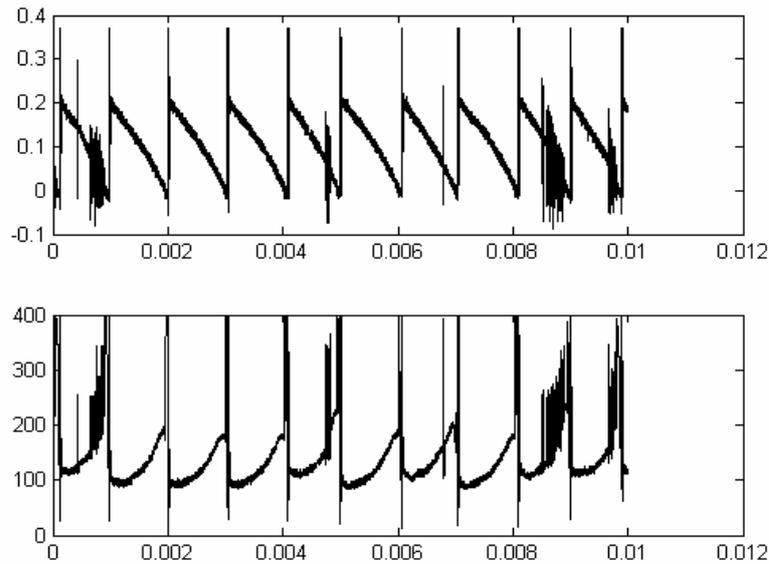


Figure 137 : Chronogramme expérimental du courant (en haut, en A) et de la tension (en bas, en V) avec une fourchette tension/courant, pour  $V_{max}=200$ ,  $I_{max}=0.2A$ , et une inductance de 300mH (temps en sec). Décharge pointe-pointe dans l'azote à pression atmosphérique avec un espace inter électrodes de 3mm.

On peut voir en simulation que si on utilise une inductance trop faible, alors cette régulation ne fonctionne pas et la décharge s'éteint.

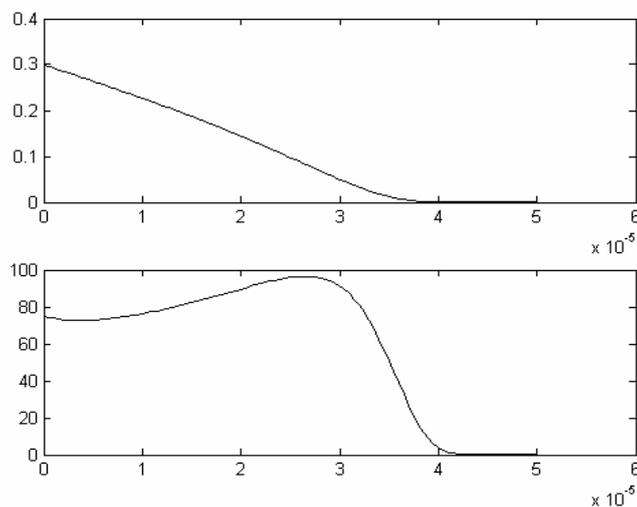


Figure 138 : Chronogramme du courant (en haut en A) et de la tension (en bas en V) avec une fourchette tension courant pour  $V_{max}=100$ ,  $I_{max}=0.35A$ , et une inductance de 10mH (temps en sec)

En effet, pour cet exemple, lors de la décroissance du courant, la tension ne monte pas suffisamment pour que la commande change d'état ; donc le courant s'annule et la décharge s'éteint.

On peut donc conclure à la capacité de fonctionnement de ce nouveau mode de commande pour le contrôle du point de fonctionnement électrique de la décharge.

Bien évidemment, la seule analyse du point de fonctionnement électrique ne permet pas de conclure sur l'intérêt d'une commande de manière générale. Une analyse des plasmas obtenus, en fonction de la commande serait aussi nécessaire.

### 3) Particularités du fonctionnement du glidarc résultant de son alimentation par une source de courant

On teste la source de courant sur le dispositif de décharge glissante qui a été modélisé dans le chapitre modélisation (page 82). C'est un dispositif de reformage d'hydrocarbure qui, en tant qu'outil d'investigation en laboratoire, est « couramment » alimenté par une source de tension en série avec une résistance.

#### ◆ Alimentation « classique » utilisée

Souvent les dispositifs à arc glissant sont alimentés par une source de tension continue (réalisée à l'aide d'un redresseur) en série avec une résistance.

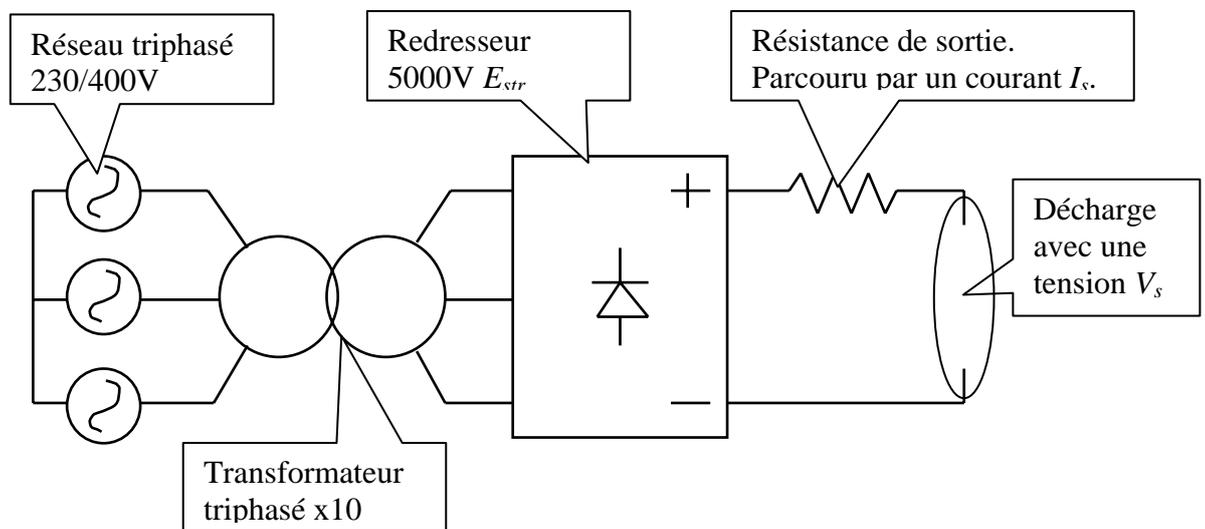


Figure 139 : Source de tension résistive : alimentation « classique »

Ce type d'alimentation a l'inconvénient d'avoir un rendement mauvais (inférieur à 50%) et une puissance fixée à courant donné. En effet, on a la relation suivante entre la tension d'entrée, le courant de sortie et la résistance du convertisseur :

$$V_s = E_{str} - RI_s$$

*Équation 115 : Relation entre les grandeurs électrique dans le cas d'une source de tension résistive*

C'est à dire que pour un courant  $I_s$  de sortie fixé, la puissance fournie à la décharge est fixée par le montage à  $P = E_{str} I_s - RI_s^2$ .

Or, lors de l'allongement d'un arc glissant, la puissance à fournir à la décharge par le générateur croît. Si le générateur ne peut pas fournir une puissance suffisante, alors l'arc s'éteint et une nouvelle décharge se forme à l'endroit où la distance inter électrode est la plus faible [49].

Dans le cas de notre alimentation, à courant de sortie  $I_s$  donné, la puissance de sortie peut varier de 0 à  $E I_s$ . Avec celle-ci, l'extinction se produit parce que, la tension  $V_{gaz}$  ayant atteint une valeur suffisante, une deuxième décharge s'est formé à l'espace inter électrode le plus court, ce qui annule le courant dans la première.

#### ◆ *Performance de la nouvelle alimentation*

L'alimentation que nous avons mise au point est une source de courant à découpage qui peut fonctionner jusqu'à 5kV. Ce niveau de tension a été déterminé en considérant la tension de claquage connu du dispositif à arc glissant. Le courant est régulé entre 0 et 1A mais en deçà de 100mA la régulation est rendue difficile par l'ondulation de courant.

Le relevé expérimental effectué montre que le courant dans la décharge reste bien maîtrisé, ce qui donne une dent de scie à la pente, au niveau de la tension, précisément définie.

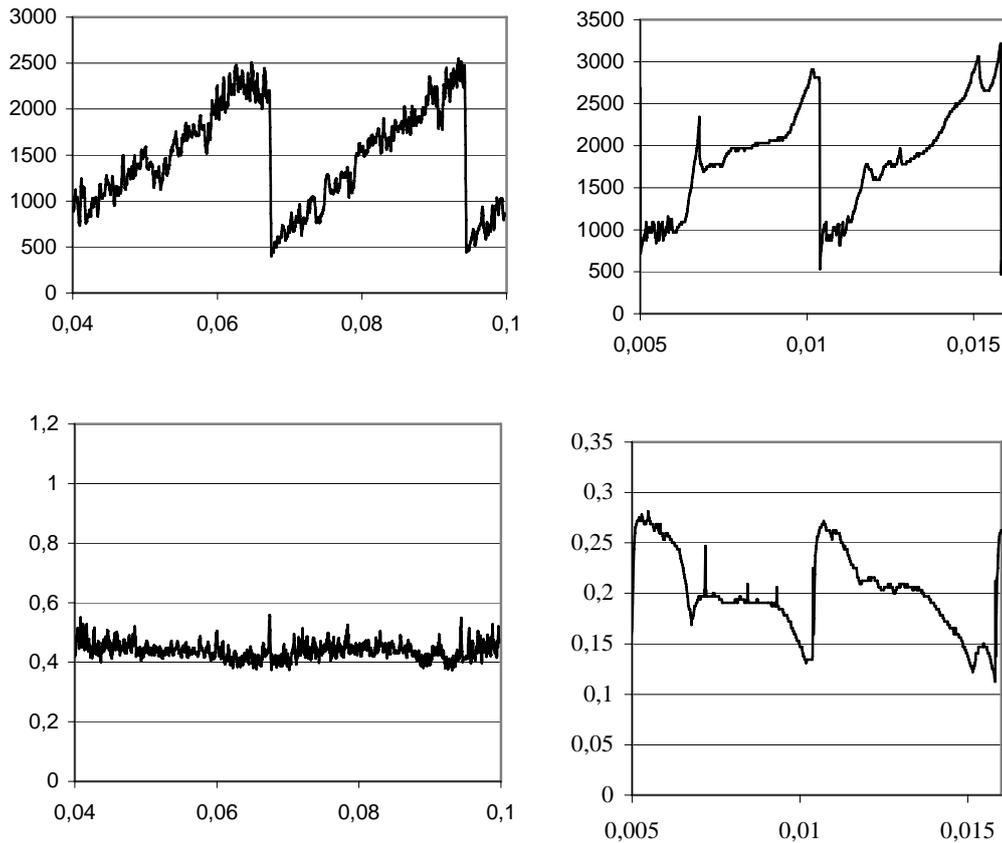


Figure 140 : Chronogrammes de la tension (en haut, en V) et du courant (en bas, en A) relevés expérimentalement sur le dispositif du CENERG ; à gauche alimenté par la source de courant ; à droite, alimenté par l'alimentation « classique »

Cette propriété est due à la nature de l'alimentation. Comme il s'agit d'une source de courant, la variation de tension, en basse fréquence (c'est à dire hors phénomènes liés au découpage), n'est due qu'à l'allongement de l'arc.

La source de courant mise en œuvre dans ce chapitre permet visiblement de contrôler le courant dans le dispositif de reformage d'hydrocarbure. Le point de fonctionnement électrique obtenu, son évolution temporelle sous l'effet du flux de gaz et les déplacements de la décharge dans l'espace inter électrodes sont différents si on les compare avec ceux obtenus avec une alimentation « classique » (puisque le couplage entre l'alimentation et le dispositif est différent). Nous ne pouvons cependant pas conclure sur la qualité de ces points de fonctionnement du point de vue du traitement réalisé à l'aide de la décharge.

#### **4) Conclusion**

Nous avons donc mis au point une structure de puissance capable d'alimenter des décharges en courant continu.

Une approche de conception nous a permis de définir la structure de puissance adaptée ainsi qu'un premier mode de fonctionnement en source de courant. La commande proposée permet ainsi de contrôler le courant de sortie du convertisseur en temps réel de manière simple. Après la fabrication d'un premier prototype au laboratoire, une alimentation industrialisée a été mise au point pour alimenter un réacteur expérimental destiné au reformage d'hydrocarbure.

Pour étendre la zone de fonctionnement de ce convertisseur vers les valeurs de courant très faibles, nous avons étudié le comportement dynamique de la décharge dans le plan tension/courant. Cette étude montre que le choix des valeurs des composants de la structure de puissance (valeur de l'inductance) a des conséquences importantes sur le comportement électrique dynamique de la décharge. Ce couplage n'est pas évident, a priori, et il peut faire obstacle à la réalisation de commandes spécifiques de la décharge (fourchette tension-courant). En tenant compte de ces limitations, nous avons étudié et expérimenté deux solutions pour le contrôle de la tension aux bornes de la décharge.

Enfin, ces études ont montré que les modèles proposés dans la partie « modélisation » permettent de rendre compte de ce qui se passe dans la décharge de façon satisfaisante, à un degré de finesse suffisant pour permettre l'étude et la conception de l'alimentation et de son contrôle.

## **Chapitre V : Décharge à barrière diélectrique**



## Chapitre V : Dispositif à barrière diélectrique

Nous présentons dans ce chapitre notre contribution à l'étude du contrôle du point de fonctionnement de décharges à barrière diélectrique. Cette partie de notre travail est essentiellement orientée vers la modélisation de ces dispositifs, qui nécessite cette fois la prise en compte des caractéristiques électriques des électrodes et l'analyse de leur contribution à la répartition spatiale des courants. L'objectif est l'obtention d'un modèle suffisamment complet pour permettre :

- l'analyse des interactions avec le générateur d'alimentation (en vue de la mise au point de ce dernier) ;
- la connaissance au moins qualitative de l'état de la décharge (décharge homogène ou filamentaire).

Cette étude ne présente pas le même degré de finalisation que pour le cas des décharges à courant continu (en particulier pour la conception des générateurs d'alimentation) ; nous synthétisons ici l'ensemble de nos travaux dans ce domaine, en intégrant certaines contributions apportées par plusieurs stagiaires du LEEI (J.POTIN [24] (ATER), J.LEFORT [50] (stagiaire ingénieur) et G.POULIN [22] (stagiaire DEA)).

### **1) Présentation du point de fonctionnement recherché**

Les travaux relatifs aux décharges à barrière diélectrique ont débuté au LEEI dans le cadre du projet ADEPLAS, qui avait pour objet le traitement de films plastiques. Le régime recherché est une décharge « lumineuse ». On utilise des électrodes diélectriques planes qui limitent le courant local dans la décharge à des valeurs faibles. C'est donc une décharge plan-plan.

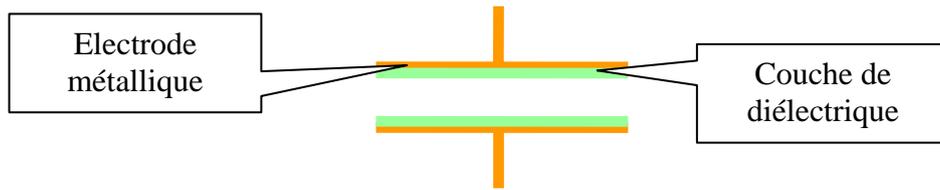


Figure 141 : Schéma d'un dispositif à barrière diélectrique

Ces électrodes imposent d'utiliser des alimentations en courant alternatif, puisque cela revient à interposer des capacités entre l'alimentation et le gaz et que seules les variations de tension pourront être transmises au gaz. De surcroît, comme on travaille à faible courant, les tensions aux bornes du gaz sont relativement élevées (distance inter électrodes variant de 0 à plusieurs mm), et les capacités en série supportent des tensions également élevées (épaisseur de 0 à 1mm) ; les alimentations doivent donc être capables de fournir des tensions très élevées (dans notre cas, de l'ordre de grandeur de la dizaine de kV).

On cherche, par ailleurs, à obtenir des points de fonctionnement où la décharge occupe tout l'espace inter électrode. Cela justifie l'usage d'électrode diélectrique, puisque celles-ci favorisent l'homogénéisation de la décharge sur toute la surface [34] [35].

Les points de fonctionnement recherchés sont facilement atteignables à basse pression mais plus difficilement atteignables à pression atmosphérique [34] [35]. Le but des travaux présentés dans ce chapitre est de savoir dans quelle mesure l'alimentation de la décharge peut favoriser l'homogénéisation de celle-ci.

Les conclusions auxquelles on arrive sont moins abouties que dans le cas de décharge à courant continu ; néanmoins nous apportons une contribution à l'étude des interactions entre le générateur et la décharge. Cette formulation et les modèles mis au point sont utilisables pour la conception d'alimentations optimisées.

## 2) Equations aux électrodes

### a) Phénomène général

#### ◆ *Phénomène physique*

Comme dans tous les cas de décharge, lorsque le champ électrique augmente, le gaz crée des charges ; le déplacement de ces charges génère un courant qui s'oppose au champ électrique qui est à son origine. Le courant de conduction ainsi généré amène les charges sur les surfaces de diélectrique. Celles-ci opposent donc au champ électrique au milieu du dispositif en contribuant à la diminution du champ électrique dans le gaz

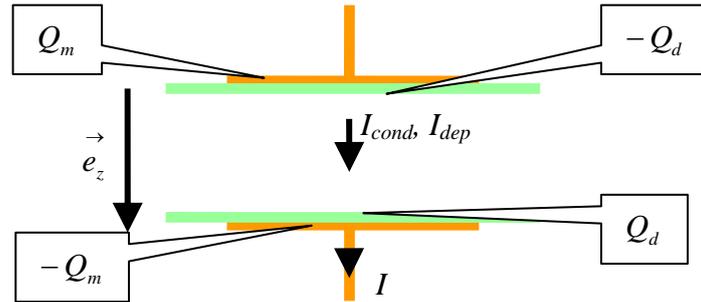


Figure 142 : Notations utilisées pour les DBD (Décharges à Barrières Diélectriques)

On peut simplement illustrer le phénomène en évaluant au cours du temps les différentes quantités de charges sur les surfaces métalliques ( $Q_m$ ), les surfaces de diélectrique ( $Q_d$ ) ainsi que les courants de conduction ( $I_{cond}$ ) et de déplacement ( $I_{dep}$ ) dans le gaz et le courant dans les électrodes métalliques et le circuit d'alimentation ( $I$ ). Pour simplifier les explications, on considère que la décharge est homogène.

Les quantités de charges sur les diélectriques et au niveau des surfaces métalliques sont issues, respectivement, des courants de conduction dans le gaz et dans le circuit électrique.

$$\frac{dQ_m}{dt} = I$$

$$\frac{dQ_d}{dt} = I_{cond}$$

Équation 116 : Variation des quantités de charges à la surface des électrodes métalliques (haut) et sur les surfaces de diélectrique (bas)

Le calcul du champ électrique dans le gaz produit par les charges sur les électrodes métalliques ( $E_m$ ) et sur les diélectriques ( $E_d$ ) est mené en considérant la surface  $S$  comme beaucoup plus grande que l'épaisseur (distance entre les surfaces métalliques). Cela permet d'utiliser l'expression connue des champs électriques générés par une densité surfacique de charge. Au final, en utilisant le théorème de superposition, on connaît le champ électrique total ( $E_{gaz}$ ) dans le gaz si on néglige la contribution des charges dans le gaz qui ne sont pas sur la surface des diélectriques.

$$\vec{E}_m = \frac{Q_m}{S\epsilon_0} \vec{e}_z$$

$$\vec{E}_d = -\frac{Q_d}{S\epsilon_0} \vec{e}_z$$

$$\vec{E}_{gaz} = \left( \frac{Q_m}{S\epsilon_0} - \frac{Q_d}{S\epsilon_0} \right) \vec{e}_z$$

Équation 117 : Calcul du champ électrique dans le gaz

Si la décharge est éteinte ( $I_{cond}=0$ ), un courant, supposé constant, imposé par le circuit électrique fait augmenter le champ dans le gaz (puisqu'il fait augmenter  $Q_m$ , Figure 143 à gauche) ; tout le courant de la source électrique se traduit en courant de déplacement dans le gaz. Lorsque le champ électrique est suffisamment intense, il y a phénomène d'avalanche qui se traduit par un courant de conduction dans le gaz. Ce courant de conduction, apportant des charges sur les diélectriques (augmentation de  $Q_d$ , Figure 143 à droite), a pour effet de diminuer le champ électrique vu par le gaz.

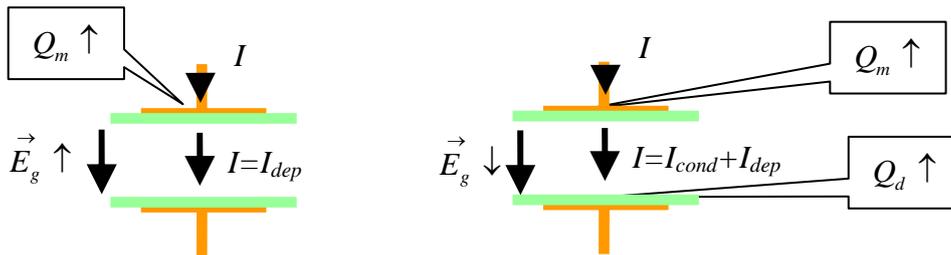


Figure 143 : Illustration des décharges à barrières diélectriques

On peut ainsi établir la chaîne de causalité qui crée et limite le courant dans le dispositif à DBD.

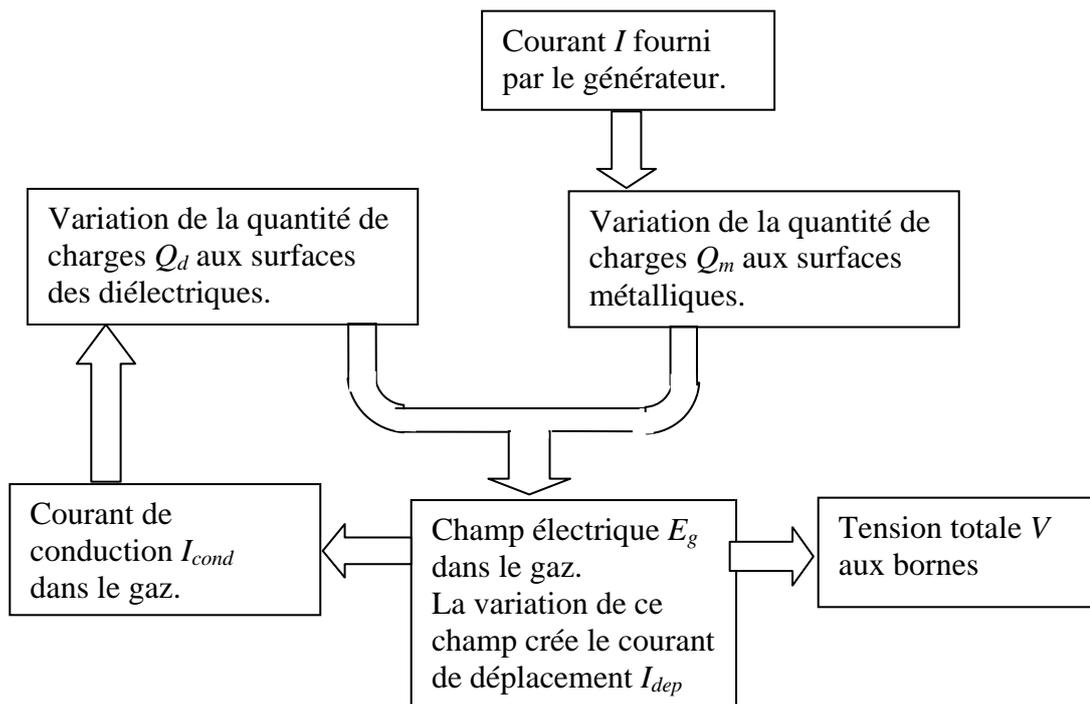


Figure 144 : Chaîne de causalité liant le courant du générateur à la tension aux bornes du dispositif DBD

◆ *Point de vue électrotechnique*

En électrotechnique, il est souvent fait appel à des circuits équivalents au système physique. Nous en proposons un, en continuant de développer les équations précédentes.

Le champ électrique ( $E_{diélectrique}$ ) dans les diélectriques ne dépend que des charges électriques à la surface de la métallisation.

$$E_{diélectrique}^{\rightarrow} = \frac{Q_m}{S \epsilon_0 \epsilon_r} e_z^{\rightarrow}$$

Équation 118 : Champ électrique dans les diélectriques.

- $S$  surface métallisé de l'électrode en  $m^2$ .
- $\epsilon_0$  perméabilité électrique du vide.
- $\epsilon_r$  perméabilité relative du diélectrique.

On peut calculer la tension en calculant la circulation du champ électrique sur un chemin entre les deux bornes électriques de la décharge. Les diélectriques ont chacun une épaisseur  $e$  (on suppose que les revêtements diélectriques ont la même épaisseur) et la distance inter électrodes est de  $d$ .

$$V = 2e \frac{Q_m}{S \epsilon_0 \epsilon_r} + d \left( \frac{Q_m}{S \epsilon_0} - \frac{Q_d}{S \epsilon_0} \right)$$

*Équation 119 : Valeur de la tension aux bornes de la décharge*

- $e$  épaisseur des diélectriques m.
- $d$  distance inter électrode m.

Si on dérive par rapport au temps l'équation de la tension et que l'on remplace les dérivées des quantités de charges ( $Q_m$ ,  $Q_d$ ) par les courants qui leurs sont associés on obtient :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{2e}{S \epsilon_0 \epsilon_r} I + \frac{d}{S \epsilon_0} (I - I_{cond})$$

*Équation 120 : Variation de la tension aux bornes du dispositif.*

On retrouve que la variation de la tension dépend des courants de conduction dans le métal et dans le gaz ; les coefficients multiplicatifs correspondent aux valeurs des capacités des céramiques et du gaz.

$$C_{gaz} = \frac{S \epsilon_0}{d}$$

$$C_{diélectrique} = \frac{S \epsilon_0 \epsilon_r}{e}$$

*Équation 121 : Valeur des capacités du système*

L'Équation 120 devient donc :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{2}{C_{diélectrique_r}} I + \frac{1}{C_{gaz}} I_{dep} = 2 \frac{dV_{diélectrique}}{dt} + \frac{dV_{gaz}}{dt}$$

*Équation 122 : Variation de la tension aux bornes du dispositif en fonction des capacités.*

Le comportement décrit par cette équation revient à celui d'un modèle avec trois capacités en série, dont une est en parallèle avec un dipôle qui correspond au comportement tension/courant de conduction du gaz.

**Remarque :** ce modèle est valable tant que les deux électrodes ne sont pas conductrices. Si l'une des deux électrodes est conductrice, alors il faut prendre en compte la mobilité de chaque espèce dans le modèle de gaz qui évalue le courant de conduction, comme nous le justifions dans la suite.

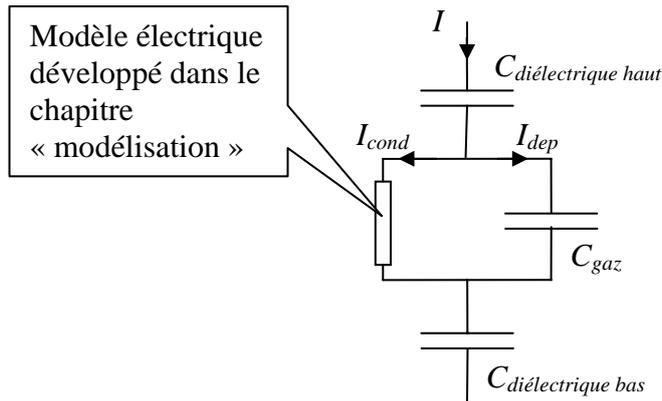


Figure 145 : Schéma électrique équivalent à un dispositif DBD

Le modèle électrique ainsi construit est assez général et ne nécessite qu'une hypothèse : le fait de négliger pour le calcul du champ électrique, la contribution des charges électriques qui circulent dans le gaz. Cette modélisation par schéma électrique permet d'obtenir une bonne analyse du comportement dynamique de la décharge vis à vis de l'alimentation.

Les paramètres de ce modèle s'énoncent comme suit :

- les capacités de chacune des électrodes diélectriques (qui peuvent être de valeurs différentes si, contrairement à ce qui a été implicitement posé dans les calculs précédents, les épaisseurs ou les permittivités des diélectriques des deux électrodes sont différentes) ;
- la capacité du volume de gaz inter électrodes.

En effet, si on observe les chronogrammes de la tension et du courant du gaz lors de deux essais, l'un avec deux électrodes capacitatives et l'autre avec une électrode capacitive (de valeur moitié par rapport aux précédentes) et une électrode métallique, on n'obtient pas les mêmes chronogrammes de courant pour un même chronogramme de tension.

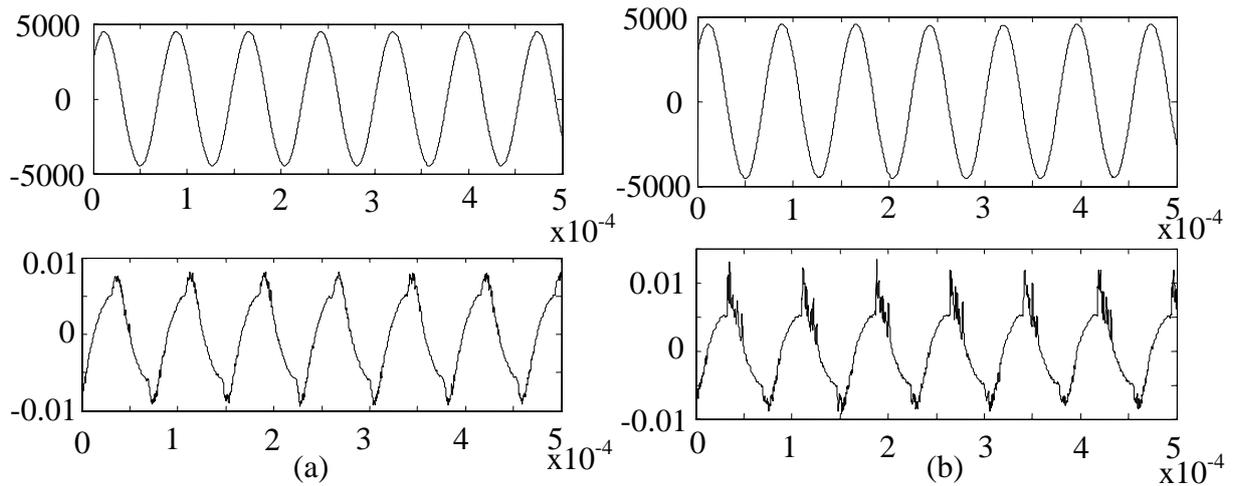


Figure 146 : Courant total de dispositifs à DBD (deux électrodes diélectrique à gauche, une seule à droite) avec deux électrodes différentes. Tension en haut en V, courant en bas en A.

Il apparaît que la décharge n'a pas le même comportement en fonction de sa polarité, dans le cas d'une décharge entre une électrode capacitive et une électrode métallique. Cela provient du fait que les charges produites dans le gaz passent dans le circuit électrique via l'électrode métallique et qu'en fonction de la polarité, les porteurs de ces charges n'ont pas la même mobilité (ions ou électrons), comme évoqué en remarque 2.

**Remarque 1** : dans tout les cas de figure, une équivalence entre deux schémas électriques n'implique pas une équivalence entre deux dispositifs à décharge. En effet, dans le cas d'une formulation circuit, on peut remplacer les deux capacités diélectriques apparaissant de part et d'autre de la décharge par une seule de valeur moitié. Le deuxième schéma électrique obtenu correspond également à une décharge entre une électrode céramique et une électrode métallique. Si d'un point de vu circuit les deux schémas sont équivalents, ce n'est pas le cas des dispositifs physiques.

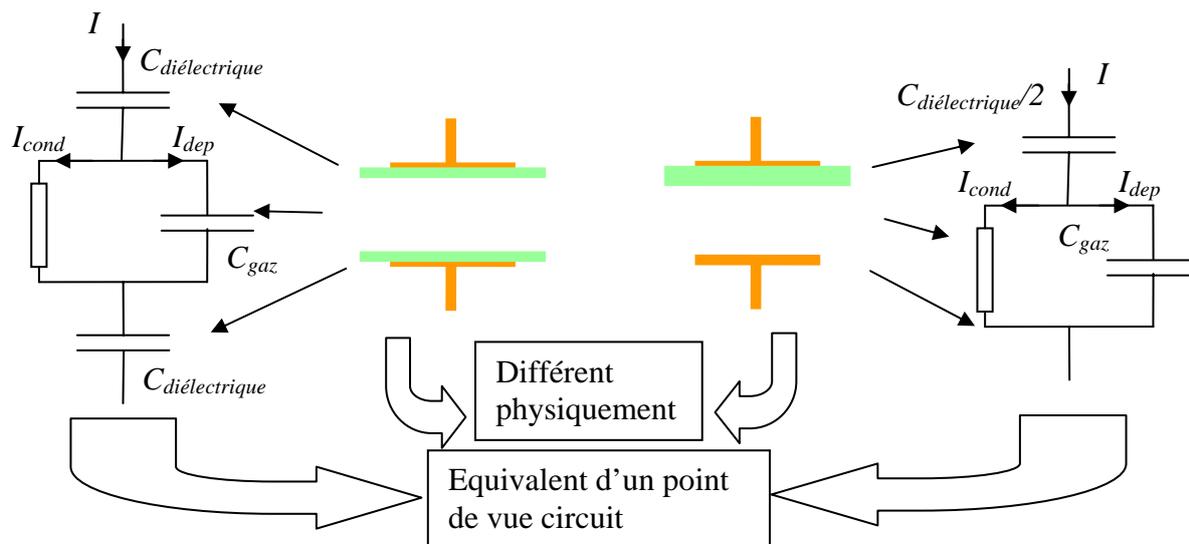


Figure 147 : Deux dispositifs électriques différents ayant deux schémas électriques équivalents.

**Remarque 2 :** Un modèle a été proposé par J.POTIN pour prendre en compte la différence entre la mobilité des porteurs des électrons et celle des ions à laquelle on peut attribuer la dissymétrie des courbes de la Figure 146 (b). Le principe de cette modélisation est d'évaluer la quantité d'électrons et d'ions dans l'espace inter électrodes et aux bords des diélectriques. L'évolution de ces quantités dans l'espace inter électrode est due :

- A la création et à la disparition de charges dues au processus collisionnels.
- Aux migrations de charges (courants ionique et électronique) vers le bord des diélectriques.

L'évolution de ces quantités aux bords est due :

- Aux migrations de charges (courants ionique et électronique) vers le bord des diélectriques.
- A la disparition de charges par recombinaison.

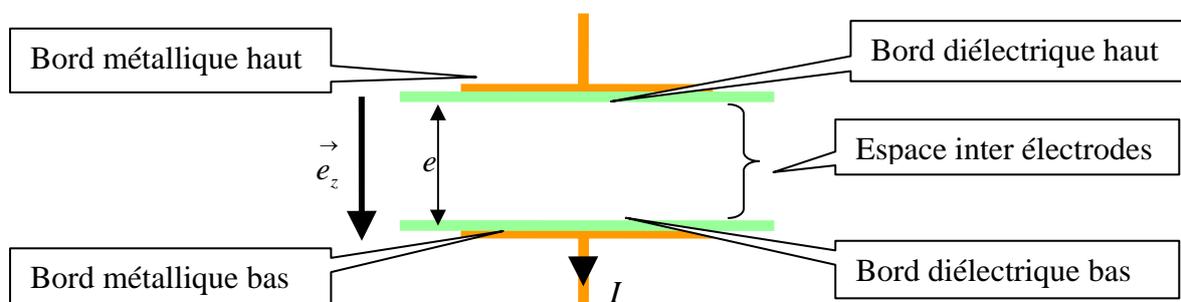


Figure 148 : Lieu pris en compte pour le modèle de J.POTIN

Pour calculer les variations des quantité d'ions et d'électrons dans l'espace inter électrodes, on utilise la formulation décrite dans le chapitre « Couplage entre la décharge et l'alimentation - modélisation » (page 53).

Pour simuler la migration des charges vers le bord des diélectriques, J.POTIN calcule les quantités d'électrons et d'ions qui migrent. Ces quantités sont retranchées aux quantités d'ions et d'électrons dans l'espace inter électrode. Enfin, elles sont ajoutées aux quantités d'électrons et d'ions aux bords des diélectriques, après un temps de retard correspondant au temps nécessaire pour ces particules (électrons et ions) pour traverser l'espace inter électrode. Ce temps de retard est donc différent pour les ions et les électrons puisque leurs vitesses sont différentes. Cela permet de simuler la dépendance à la polarité d'un dispositif ayant une électrode diélectrique et une métallique.

### b) Phénomènes particuliers

#### ◆ *Homogénéité*

Lorsque le régime de décharge n'est pas homogène (c'est dire que la densité courant n'est pas uniforme sur toute la surface), on observe un régime filamentaire : de petites décharges se créent par intermittence dans le gaz. Lorsqu'une micro décharge (appelée « streamer ») se développe, deux phénomènes à effet contraire se produisent :

- d'une part, les charges qui arrivent sur le diélectrique diminuent le champ local autour du streamer, ce qui empêche la décharge de se propager latéralement [22] ;
- d'autre part, l'ionisation du gaz a tendance à diffuser autour d'elle des porteurs de charges qui rendent le milieu autour du streamer plus conducteur [34] [35].

Il y a donc un équilibre qui peut conduire la décharge vers un régime homogène ou filamentaire.

#### ◆ *Rôle des électrodes*

Comme cela est montré dans la partie « modélisation », la géométrie des électrodes joue un rôle important dans la cartographie du champ. C'est également le cas de leurs caractéristiques diélectrique ( $\epsilon_r$ ) [22].

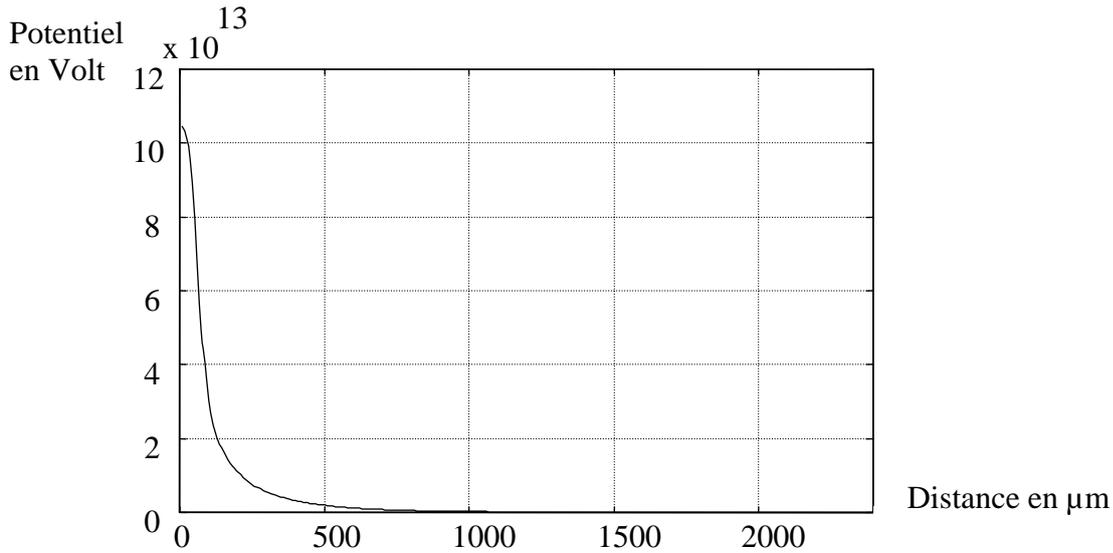


Figure 149 : Fonction  $F_V(r)$  de répartition du potentiel électrique (en V) en fonction de la distance par rapport à une charge de 1 Coulomb situé entre  $r=0$  et  $r=5\mu\text{m}$ . Cas d'une électrode diélectrique de 1mm d'épaisseur et de perméabilité électrique relative de 6.

A ce titre, la Figure 149 présente le potentiel électrique local à la surface d'une électrode diélectrique, au voisinage d'une charge (ici d'une valeur de 1 C) déposée par un streamer : il apparaît de façon évidente qu'une charge électrique déposée sur le diélectrique a une influence sur le potentiel électrique au voisinage.

Il est donc possible d'étudier quelles sont les géométries et les caractéristiques diélectriques qui favorisent ou non l'homogénéisation de la décharge.

**Remarque :** Dans le cas des électrodes à barrière diélectrique, le « phénomène d'émission secondaire » peut être également à prendre en compte pour décrire la création de porteurs de charge dans le gaz. Il se produit lorsque les ions (particules lourdes) arrivent sur les diélectriques ; ces particules arrivent à des vitesses nettement moins importantes que celles des électrons, mais leur masse est beaucoup plus élevée et la collision avec le diélectrique peut arracher un électron. Le flux d'électrons généré à la surface du diélectrique par ce phénomène est proportionnel au flux d'ions qui arrivent sur la surface du diélectrique [24].

$$\Phi_{\text{électrons\_emis}} = \gamma \Phi_{\text{ions\_incident}}$$

Équation 123 : Flux d'électrons à la surface du diélectrique dû à l'émission secondaire

- $\gamma$  deuxième coefficient de Townsend (ordre de grandeur  $10^{-3}$ ).

### 3) Dispositif d'investigation expérimental

Dans le but d'étudier les modèles et de valider une première structure d'alimentation, le laboratoire a mis au point un dispositif d'étude (non industriel) de décharge à DBD. Ce système est constitué d'une alimentation à résonance et d'un dispositif à barrière diélectrique.

Le dispositif à barrière diélectrique est constitué de :

- diélectriques plans ayant une épaisseur proche de 1mm (de 0,1 à 1,2) ;
- de surfaces métalliques de  $9\text{cm}^2$ , déposées sur une face des diélectriques ;
- d'un dispositif mécanique permettant de régler la distance inter électrode de 0 à quelques mm.

Le générateur alimente une charge qui est capacitive par nature (Figure 145) ; pour cette raison, il faut qu'il fournisse un courant alternatif. Il doit être capable de fournir des tensions de plusieurs dizaines de kV (ici 20kV). Les courants qui circulent dans ces décharges étant de l'ordre de la centaine de mA, l'alimentation fournit une puissance de l'ordre du kVA.

Pour cela, une alimentation possible est un onduleur suivi d'un transformateur. En effet, il n'existe pas d'interrupteur à semi conducteur capable de tenir de telles contraintes (en tension) directement.

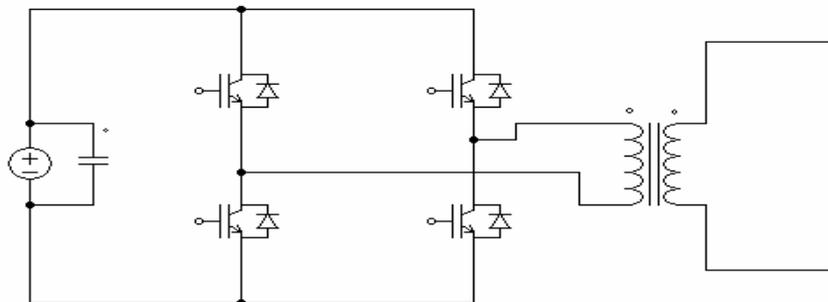


Figure 150 : Onduleur suivi d'un transformateur élévateur

Les gains en tension atteignables par ce type de structure sont égaux au gain fournis par le transformateur ; il est possible d'obtenir de plus grands gains si on utilise des convertisseurs à résonance. A la sortie de l'onduleur, on fait résonner une inductance avec la capacité vu des bornes de la décharge à barrière diélectrique. Dans ce cas, le gain maximal obtenu dépend de l'amortissement du circuit oscillant.

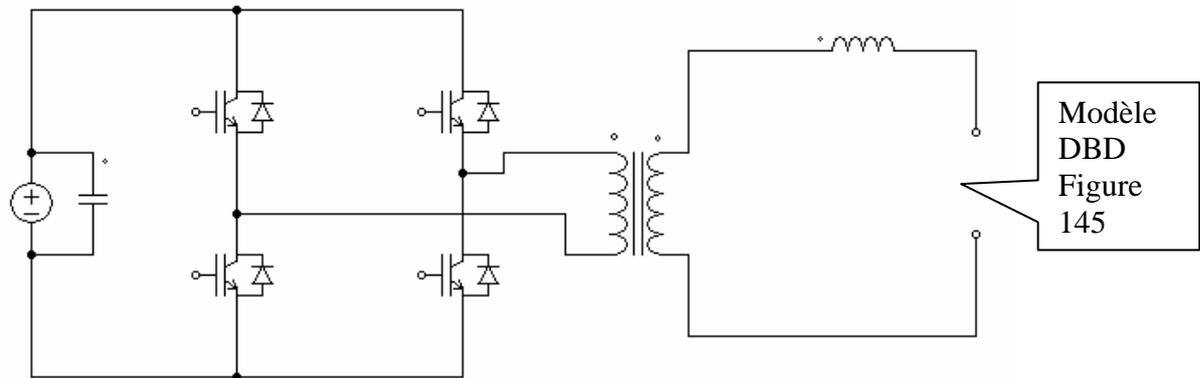


Figure 151 : structure à résonance classique

Outre le fort gain en tension que l'on peut obtenir grâce à la résonance (comme on le démontre mathématiquement plus loin), cette alimentation est plus adaptée à la charge que l'on a à alimenter. En effet, les décharges à barrières diélectriques ont un comportement capacitif. Ce comportement capacitif fait qu'on a un comportement de type « source de tension » à haute fréquence. Il est donc nécessaire, d'un point de vue électrotechnique, d'alimenter le dispositif par un générateur ayant un comportement de type « source de courant ». La structure à résonance présentant une inductance en série, possède ce comportement en hautes fréquences de type « source de courant ».

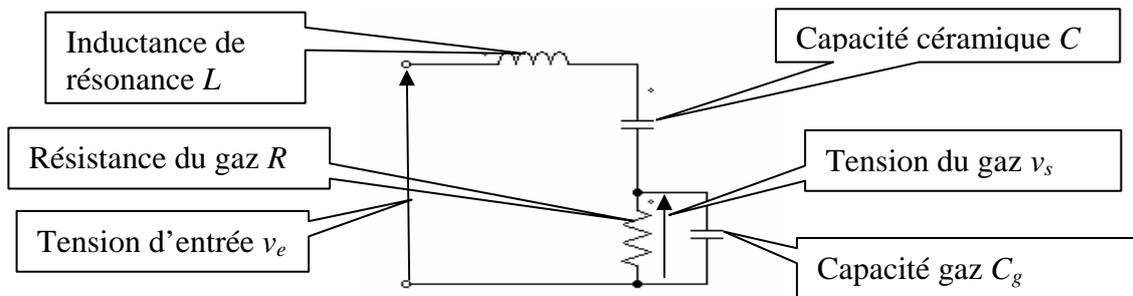


Figure 152 : Etage résonant de sortie

On étudie la fonction de transfert donnant la tension au niveau du gaz ( $v_g$ ) connaissant la tension d'entrée ( $v_e$ ), pour montrer comment cette structure permet d'obtenir des gains en tension importants.

$$\frac{v_s(p)}{v_e(p)} = \frac{RCp}{1 + R(C + C_g)p + L Cp^2 + RLC_g Cp^3}$$

Équation 124 : Fonction de transfert de sortie du système

Lorsque la décharge est éteinte ( $R=\infty$ ), on a un système du deuxième ordre non amorti. La tension « aux bornes » du gaz devient très grande (il existe quand même un amortissement dû aux résistances des fils, négligées ici) pour la fréquence de résonance. La fonction de transfert entre la tension d'entrée et la tension de sortie devient :

$$\frac{v_s(p)}{v_e(p)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{C_g}{C}\right) + LC_g p^2}$$

Équation 125 : Fonction de transfert de l'étage final du convertisseur gaz éteint

Le gain, en amplitude, entre la tension d'entrée et de sortie est égal au module de la fonction de transfert pour  $p=j\omega$ .

$$\left| \frac{v_s(p)}{v_e(p)} \right| = \frac{1}{\left| \left(1 + \frac{C_g}{C}\right) - LC_g \omega^2 \right|}$$

Équation 126 : Gain en amplitude du à la résonance de l'étage de sortie, décharge éteinte.

Le gain en amplitude tend vers l'infini pour la pulsation de résonance  $\omega_{rés}^2 = \frac{1}{L} \left( \frac{1}{C_g} + \frac{1}{C} \right)$ .

On peut donc régler le gain et donc la tension disponible sur l'étage de sortie, à l'aide de l'Équation 126, en faisant varier la fréquence d'excitation de la tension d'entrée  $v_e$ .

Même à la résonance, la tension de sortie ne tend pas vers l'infini, Il y a toujours des résistances séries (fils, connecteurs...) entre l'inductance et la capacité, ce qui fait que le gain dû à la résonance reste fini et dépend de la qualité du montage. Dans notre cas expérimental, on a un gain maximal de l'ordre de cent lorsque l'on se place à la fréquence de résonance.

Dans le cas où la décharge est allumée, celle-ci a un comportement de type « source de tension ». On note  $V_{g0}$  la valeur de tension imposée par le gaz.

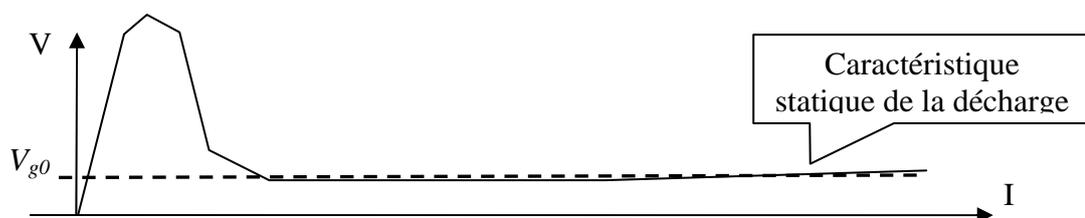


Figure 153 : Tension  $V_{g0}$  aux bornes du gaz lorsque la décharge est allumée.

La décharge impose donc une tension constante ( $\pm V_{g0}$  en fonction du sens du courant) à ses bornes (Figure 154). Dans ce cas de figure, la fréquence de résonance du circuit

$$\text{devient } \omega_{\text{réso}}^2 = \frac{1}{LC}.$$

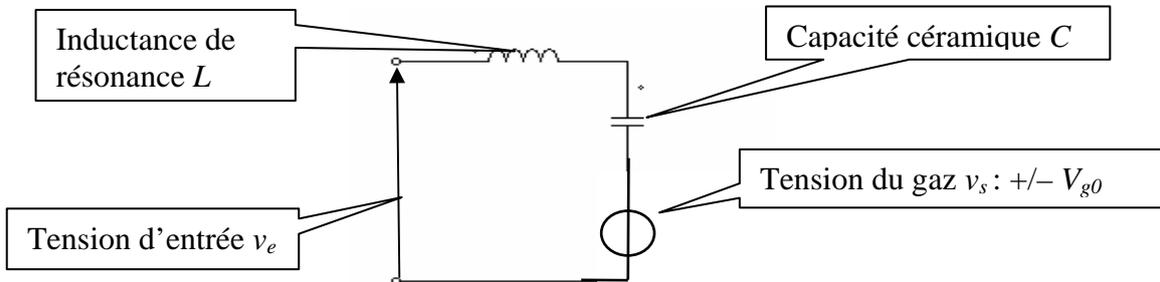


Figure 154 : Schéma électrique équivalent lorsque la décharge est allumée

En simulant l'étage de sortie résonant avec le dispositif à barrières diélectriques, on montre que ce phénomène permet d'obtenir des courants de conduction dans le gaz (la décharge s'allume). Dans l'exemple de la Figure 155, on considère que la décharge est homogène et on a comme valeur de paramètres  $C_{\text{gaz}}=16\text{pF}$ ,  $C_{\text{diélectrique}}=40\text{pF}$ .

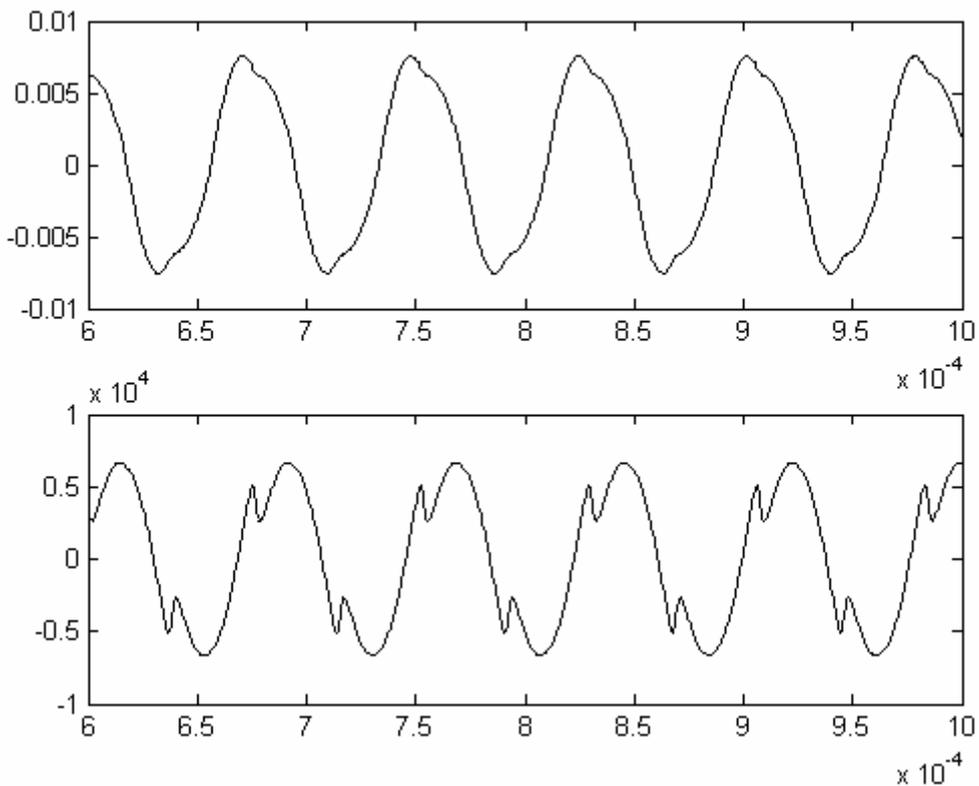
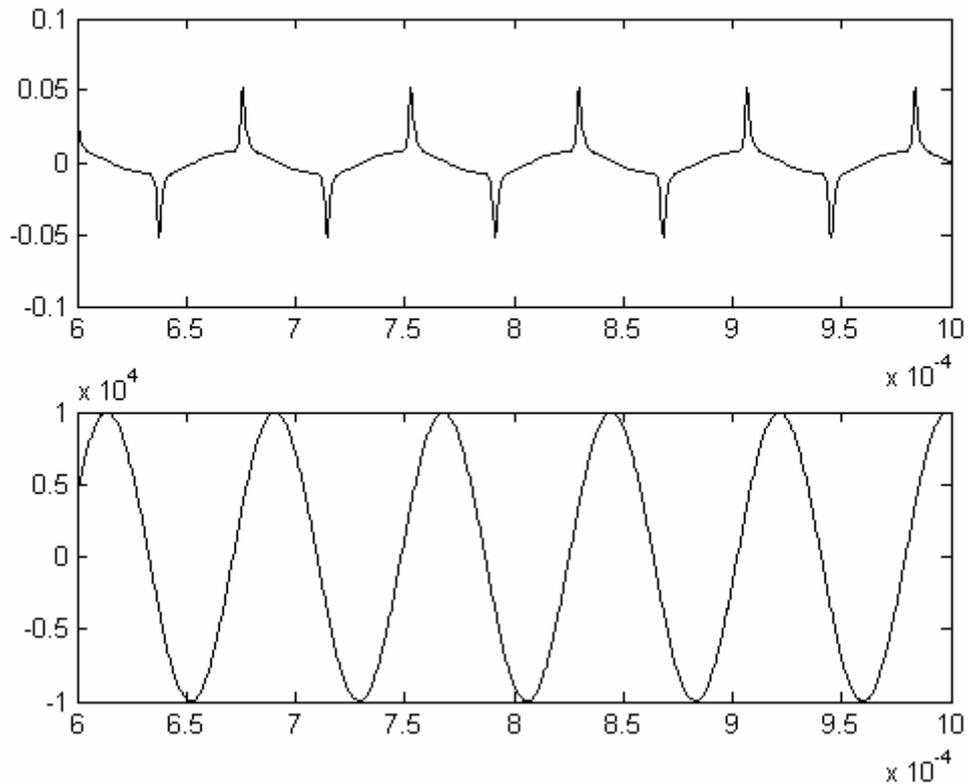


Figure 155 : Courant total (en haut, en A) dans la décharge et tension totale (en bas, en V) aux bornes du dispositif DBD alimenté par un dispositif à résonance. Temps en secondes.

On constate que la tension aux bornes de la décharge subit une déformation dû à la présence de l'inductance placée en série qui limite les variations du courant total dans la DBD. Si on simule le même dispositif DBD avec une tension purement sinusoïdale, on a un résultat différent (Figure 156).



*Figure 156 : Courant total (en haut, en A) dans la décharge et tension totale (en bas, en V) aux bornes du dispositif DBD alimenté par une source de tension sinusoïdale. Temps en secondes.*

Le courant obtenu par une source de tension sinusoïdale pure présente des pics importants. Comme on recherche à maîtriser les courants dans le dispositif à barrière diélectrique, il semble qu'un montage à résonance s'impose. En effet, il contrôle les variations de courant dans le dispositif et limite donc l'amplitude des courants de conduction dans le gaz.

Pour illustrer ce dernier point, on compare les courants de conduction des deux simulations précédentes.

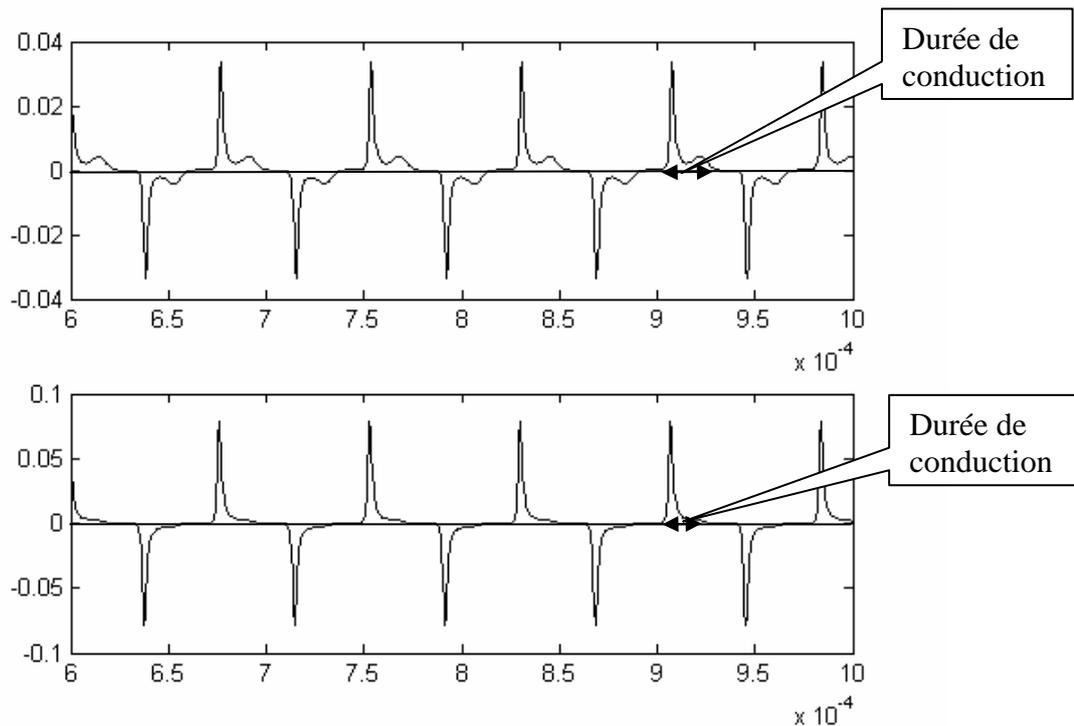


Figure 157 : Courant de conduction (en Ampères) dans le gaz avec une alimentation à résonance (en haut) et un source de tension sinusoïdale (en bas).

On constate que le courant de conduction dans le gaz varie moins avec l'alimentation à résonance qu'avec la source de tension pure. Certes, ce courant est plus important dans le cas de la source de tension pure mais c'est une pointe de courant alors que dans le cas du dispositif à résonance ; le courant garde un même ordre de grandeur plus longtemps. Le temps de conduction est donc supérieur, pour un gaz ayant les mêmes caractéristiques, avec l'alimentation à résonance qu'avec la source de tension sinusoïdale. C'est un argument qui a été retenu en faveur de l'alimentation à résonance.

#### 4) Modélisation

La modélisation est un moyen de mieux comprendre et d'analyser les interactions entre l'alimentation, les diélectriques et le gaz. Celle-ci permet la mise au point de simulations qui sont un moyen d'investigation en vue de la conception du système composé de l'alimentation et du dispositif à barrière diélectrique.

Cette présentation de la modélisation du dispositif de DBD a été divisée en trois parties :

- la modélisation du gaz,
- la modélisation des céramiques,
- la modélisation de l'alimentation.

Par cette approche, on découple les problèmes de la modélisation de l'alimentation, du diélectrique et du gaz.

### a) Gaz

La modélisation du gaz a été étudiée dans le chapitre concernant la modélisation. Le phénomène le plus important dans la création du champ électrique dans le gaz est l'arrivée de charges aux surfaces des diélectriques. Les charges d'espace ne se situant pas aux surfaces des diélectriques ont un rôle moins important que celles présentes aux surfaces des diélectriques [24]. On ne prend donc en compte, dans notre modèle, que les charges présentes aux surfaces des métallisations et celles présentes aux surfaces des diélectriques ; celles présentes dans l'espace inter électrodes [24] ne sont pas prises en compte pour le calcul du champ.

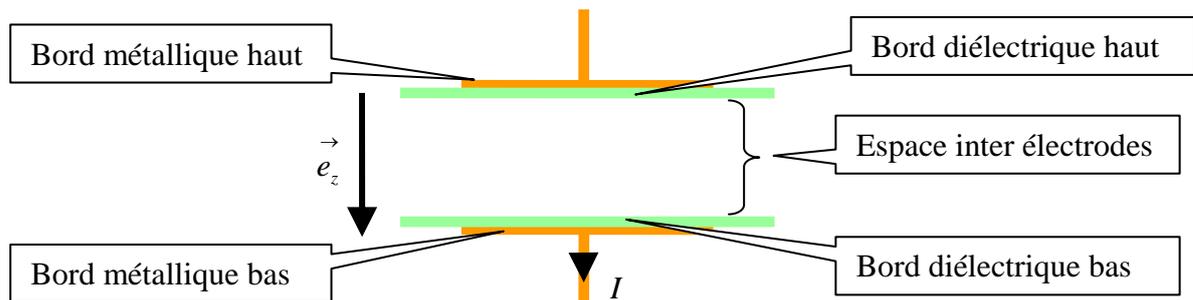


Figure 158 : Lieu de prise en compte des charges pour le calcul du champ.

Pour modéliser la relation entre le champ électrique dans le gaz et les courants locaux, on utilise les modèles de décharge à conductance développés dans le chapitre modélisation (page 64).

Comme on veut étudier la répartition surfacique du courant dans la décharge, on est conduit à discrétiser la surface de la décharge. Le modèle à conductance donne de bons résultats de simulation (pages 199 et 200) ; on l'utilise donc pour simuler une section élémentaire de la décharge.

Un point délicat à trancher est de savoir dans quel modèle la quantité de charges aux surfaces des électrodes doit être évaluée. En effet, elles sont à la frontière entre le diélectrique et le gaz :

- Si elles sont évaluées dans le modèle du gaz, on doit calculer le champ électrique dans celui-ci. On inclut donc dans le modèle de gaz les paramètres du diélectrique, ce qui conduit à un modèle global comprenant le gaz et le diélectrique.
- Si elles sont évaluées dans le modèle du diélectrique, alors celui-ci doit « fournir » au modèle de gaz le champ électrique à l'intérieur du gaz pour chaque élément discrétisé.

Ayant choisi de dissocier le modèle du gaz du modèle de diélectrique, on évaluera conformément à la seconde option les charges aux surfaces des diélectriques dans le modèle des diélectriques.

## b) Diélectrique

### ◆ *Position du problème*

Les diélectriques expérimentalement utilisés sont de deux types :

- des plaques d'époxy de différentes épaisseurs ;
- des céramiques d'alumine de 0,1mm d'épaisseur.

Les surfaces de ces diélectriques sont planes. On cherche à simuler le comportement d'une surface élémentaire de référence de 1mm<sup>2</sup> du diélectrique (en considérant que le reste de la surface se comporte comme ce mm<sup>2</sup> étudié).

La modélisation des céramiques doit permettre de rendre compte de l'influence d'un streamer (dans le cas d'une décharge filamentaire) sur son voisinage. Cette influence est due aux charges qui sont amenées par la décharge sur la surface des céramiques. Celles-ci créent un champ électrique local qui diminue le champ électrique dans le gaz. Ce champ électrique a une influence sur la décharge qui a amené les charges et sur le voisinage de cette décharge. La méthode utilisée pour modéliser les électrodes est celle proposée par G.POULIN [22].

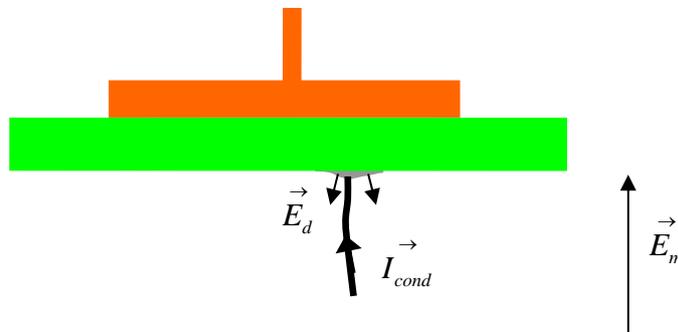


Figure 159 : Création d'un champ électrique local du aux charges amenées sur un diélectrique

On considère qu'un streamer a amené des charges sur la surface du diélectrique et on étudie leur influence sur le champ électrique local et aux alentours. Pour quantifier cet effet, on calcule la valeur du potentiel électrique au voisinage de la zone où les charges ont été déposées. Le calcul du potentiel est effectué en considérant une symétrie de révolution autour du point où la charge est déposée.

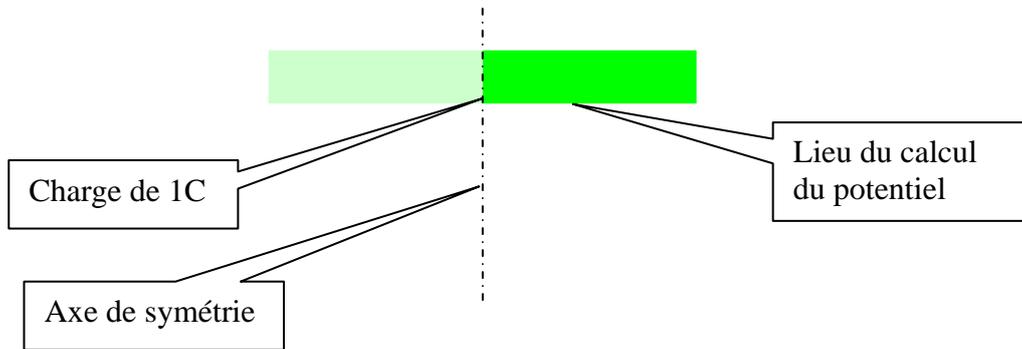


Figure 160 : Hypothèse prise en comptes pour le calcul du potentiel

Cette hypothèse se justifie par le fait que la plaque de diélectrique est très grande devant la zone d'influence d'une charge isolée. Le calcul est effectué avec le logiciel de calcul de champ Ansys.

On utilise une charge de  $1C$  de manière arbitraire pour pouvoir utiliser la courbe obtenue avec n'importe quelle quantité effective de charge. En se plaçant dans l'hypothèse d'un comportement linéaire de la céramique, il suffit de multiplier la valeur du potentiel calculée pour une charge de  $1C$  par la valeur de la charge réelle pour avoir la valeur réelle du potentiel.

Sur la Figure 149 (page 195), on constate que pour une distance inférieure à  $500\mu m$ , le potentiel créé par la charge est non négligeable. Ce potentiel réduit le champ électrique au voisinage du streamer et limite la création de décharges autour du point considéré ; ce phénomène est un handicap pour l'obtention de décharges homogènes.

L'obtention de la cartographie du potentiel  $F_v(r)$  due à l'ensemble des streamers nécessite une discrétisation de l'espace, puisque le lieu de ces streamers est indéterminé et varie (dans le cas de décharges filamenteuses).

On discrétise le diélectrique avec un maillage de pas  $100\mu m$  pour bien prendre en compte la répartition du potentiel créé par un streamer. Chacun des éléments du maillage est caractérisé par une tension et une densité de charges locales. On caractérise l'électrode étudiée par sa matrice d'influence  $A$ , qui lie les vecteurs charge  $[Q]$  et tension  $[V]$ .

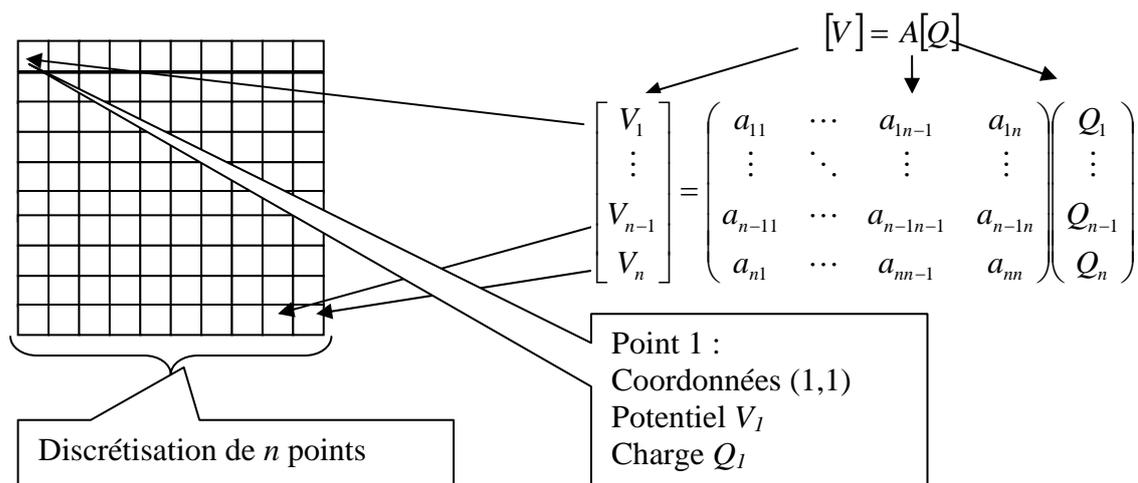


Figure 161 : Discretisation utilisée (vue depuis le dessus d'une électrode).

De la même manière que dans le chapitre 3 pour le calcul du champ électrique local, on utilise une relation matricielle pour déterminer la tension locale générée par les charges locales. Néanmoins, les termes de la matrice sont calculés de manière différente. On utilise le calcul du champ effectué précédemment pour évaluer chaque terme de la matrice.

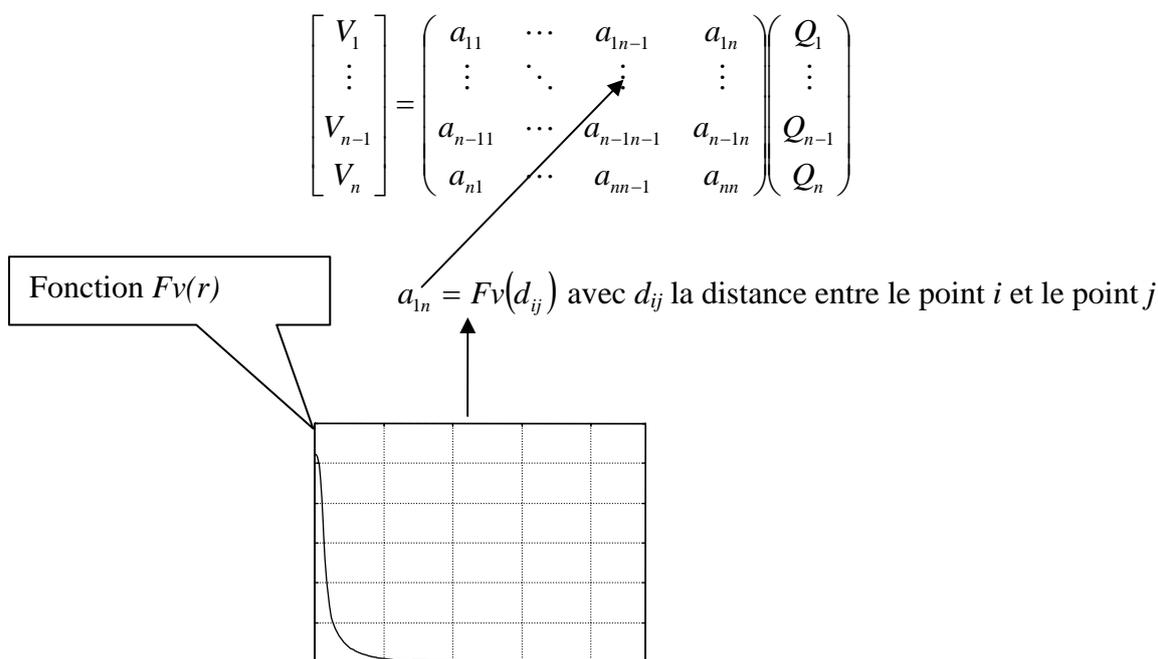


Figure 162 : mode de calcul des termes de la matrice A

Le pas de discrétisation doit être assez faible pour garantir une représentation réaliste du potentiel électrique créé au voisinage d'un point. Pour limiter la taille du problème traité, on se limite à 1 échantillon de  $1\text{mm}^2$  supposé représentatif ; il faut prendre en compte

l'environnement qui influe sur cet échantillon (les mailles du bord jouxtent d'autres décharges et en subissent les conséquences). Pour cela, G.POULIN utilise la notion de périodicité [22].

On considère que tous les phénomènes électriques ont une périodicité de  $1\text{mm}^2$  dans le plan de la surface des électrodes. Cette hypothèse permet de s'affranchir des effets de bord dans nos calculs ; il faut cependant choisir combien de périodes on prend en compte: pour une périodicité de un, on ne considère que les carrés de  $1\text{mm}^2$  adjacents à celui étudié, pour une périodicité de deux, on prend les carrés adjacents à celui étudié et ceux qui leur sont adjacents... G.POULIN a montré qu'une périodicité de trois était suffisante pour avoir une convergence des valeurs de la matrice  $[A]$ .

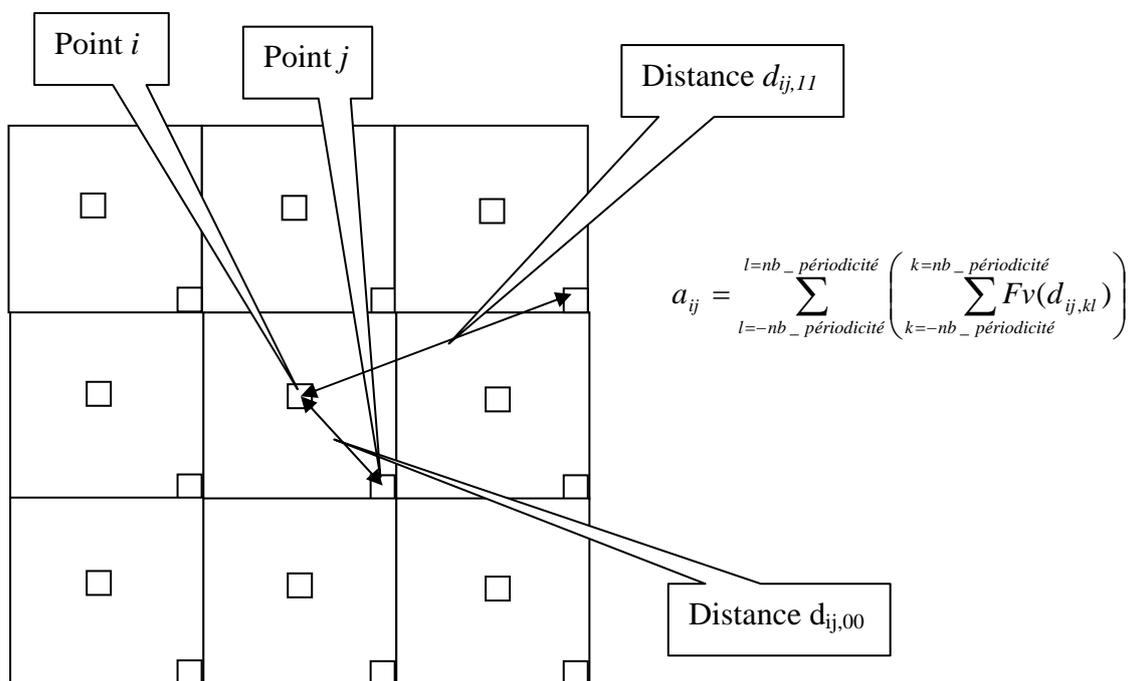


Figure 163 : Calcul des termes de la matrice en prenant en compte les périodicités

◆ *Mise en œuvre*

On utilise plusieurs logiciels pour modéliser les électrodes :

- Ansys, pour le calcul du potentiel électrique et la détermination de la fonction  $f_v(r)$  ;
- Matlab, pour le calcul de la matrice d'influence ;
- Saber pour la simulation finale.

Ainsi, partant de la description géométrique et des paramètres électriques des électrodes, on obtient le modèle discrétisé des électrodes.

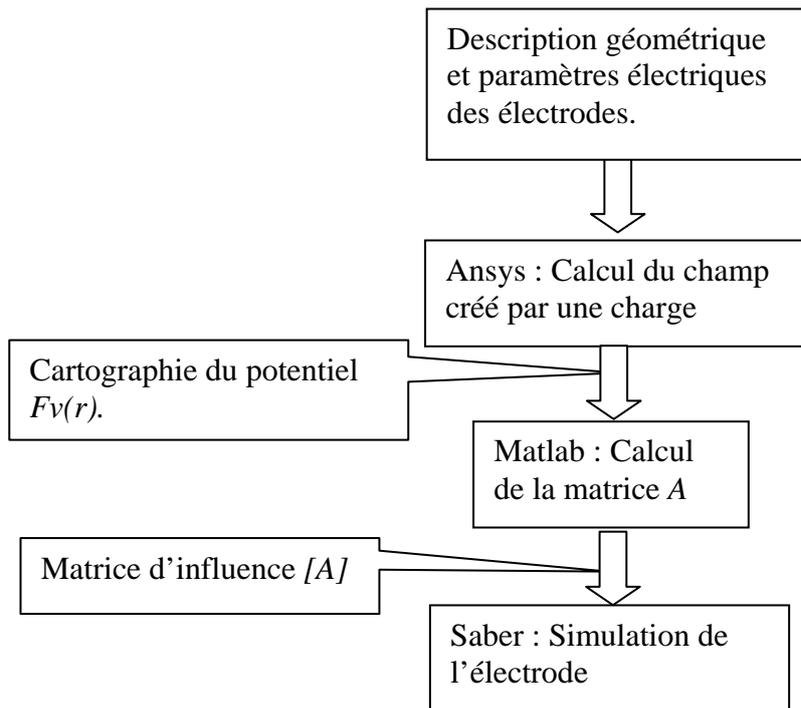


Figure 164 : Récapitulatif pour la mise en œuvre du modèle de diélectrique.

◆ *Validation des modèles d'électrodes diélectriques*

Pour une validation partielle de ces calculs, on utilise Saber pour vérifier la valeur de la capacité vue des bornes des électrodes ainsi simulées.

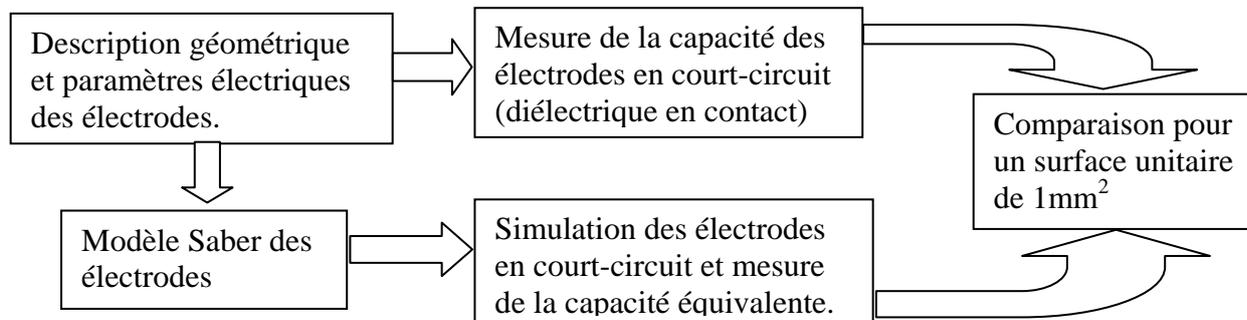


Figure 165 : Ordre des opérations à effectuer pour vérifier la valeur de la capacité équivalente présentée par le modèle de céramique

On compare alors la valeur de la capacité simulée et de la capacité identifiée, lors d'un essai sinusoïdal, à l'aide du logiciel d'identification. En effet, ayant de très faibles valeurs de capacité à mesurer, une mesure directe par un banc à résonance peut être pénalisante pour la précision des mesures.

La mesure de la capacité s'effectue sur la surface totale du dispositif. La simulation ne portant que sur 1mm<sup>2</sup>, il faut donc ramener la mesure de la capacité à cette superficie.

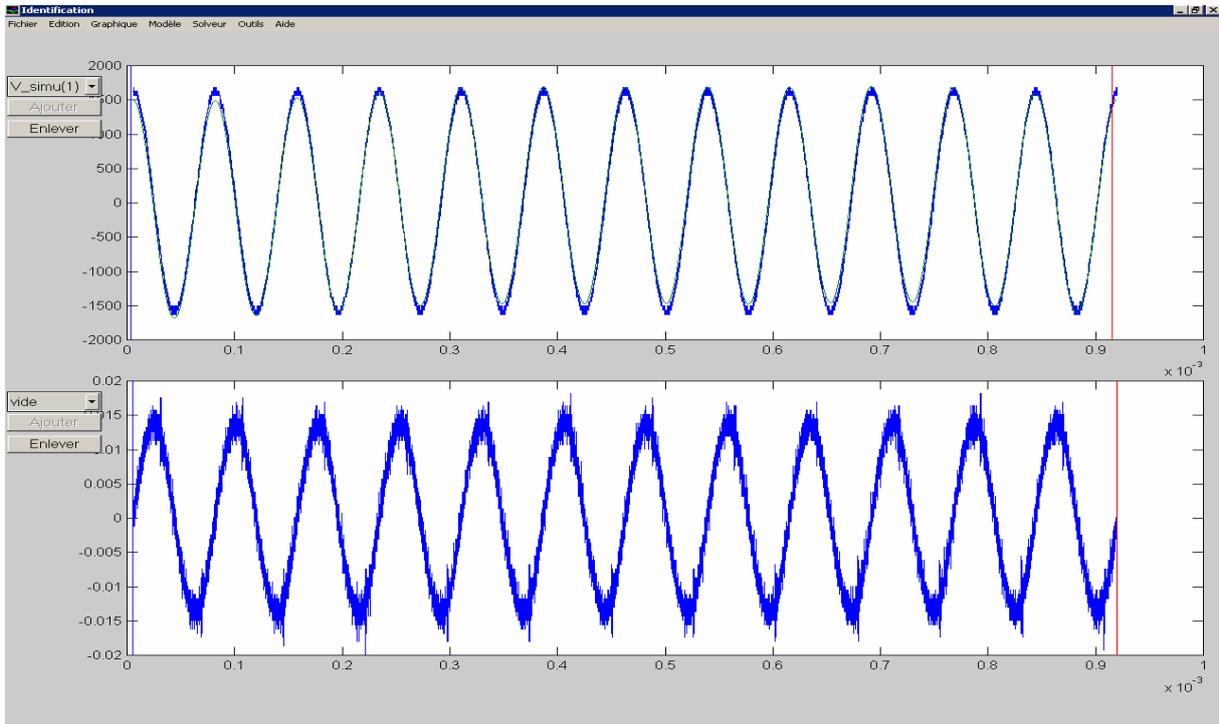


Figure 166 : Courant fourni par le générateur (en bas, en A) ; tension aux bornes du dispositif mesurée et simulée après identification, (en haut, en V).

On peut alors faire le bilan des erreurs entre les valeurs simulées et mesurées des capacités, pour des diélectriques époxy de plusieurs épaisseurs.

Tableau 1 : Valeurs simulées

épaisseur	Valeur simulée sur 1mm <sup>2</sup>	Unité
0,8 mm	6,49E-14	F
1 mm	5,24E-14	F
1,2 mm	4,42E-14	F

Tableau 2 : Valeurs mesurées (ramenées à 1mm<sup>2</sup>)

épaisseur	Valeur mesurée sur 1mm <sup>2</sup>	Unité
0,8 mm	6,67E-14	F
1 mm	5,11E-14	F
1,2 mm	4,22E-14	F

Tableau 3 : Récapitulatif des erreurs

épaisseur	Erreur relative	Unité
0,8 mm	2,6	%
1 mm	-2,5	%
1,2 mm	-4,7	%

La cohérence entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées est suffisamment bonne pour penser que la modélisation, sous l'angle de cette grandeur globale, est satisfaisante. On ne peut pas vérifier expérimentalement si la discrétisation spatiale de la surface des électrodes est satisfaisante puisque, pour cela, il faudrait être capable de mesurer :

- le champ électrique à la surface d'un diélectrique ;
- la répartition surfacique des charges.

### c) Modèle de l'alimentation

L'alimentation expérimentale utilisée associe en série (Figure 167) :

- un onduleur à point milieu capacitif ;
- un transformateur haute tension ;
- l'inductance de l'étage résonant ;
- le dispositif de décharge.

Par rapport à cette description idéalisée, ce dispositif expérimental pose cependant un problème, puisque le dispositif expérimental de DBD que nous étudions, étant de faible surface ( $9\text{cm}^2$ ), la valeur de sa capacité équivalente est proche de la valeur des capacités parasites du transformateur haute tension. De fait, la fréquence de résonance du dispositif ne dépend plus uniquement de la valeur de l'inductance de sortie et de la capacité vue des bornes du dispositif DBD. De plus, l'inductance de sortie que nous utilisons possède également une capacité parasite.

Pour préciser la fréquence de résonance, il faut étudier les éléments parasites du transformateur puisqu'ils ont pour effet de déplacer la fréquence de résonance du convertisseur. Il est donc nécessaire d'effectuer des corrections au montage pour obtenir la fréquence de résonance désirée. L'étude effectuée par J. LEFORT sur le transformateur a permis de montrer que la fréquence de résonance obtenue est due au couplage entre l'inductance de fuite d'entrée du transformateur et la capacité du dispositif. Pour régler la fréquence de résonance, on ajoute une inductance en série au primaire du transformateur.

Bien évidemment, il existe d'autres fréquences de résonance dues aux couplages entre les différents éléments parasites du transformateur. Mais ces fréquences sont difficilement exploitables pour le point de fonctionnement recherché (fréquence d'environ 20kHz).

Donc, pour simuler l'alimentation à résonance expérimentale, on utilise un modèle circuit de l'onduleur et du transformateur haute tension tenant compte des éléments parasites décrits au chapitre « identification ».

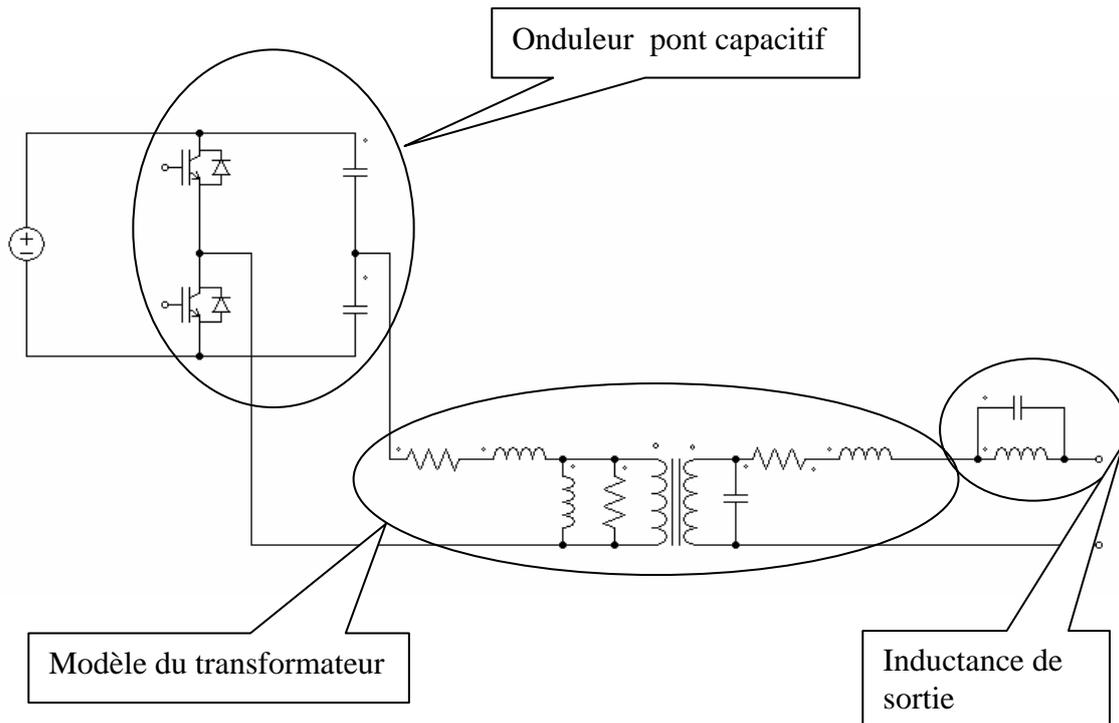


Figure 167 : Modèle circuit de l'alimentation expérimentale

Avec ce modèle circuit, on modélise les principaux phénomènes parasites qui contribuent à la définition du point de fonctionnement.

**Remarque :** si on ne simule qu'un seul  $\text{mm}^2$  du diélectrique (à cause du choix pour la discrétisation page 203), l'alimentation ne voit qu'une fraction du courant de toute la surface du dispositif. Le rapport est égal au rapport des surfaces ; si on veut simuler une surface réelle de  $9\text{cm}^2$  avec le modèle discrétisé de  $1\text{mm}^2$ , alors le courant circulant dans l'alimentation doit être multiplié par 900 (la prise en compte de ce facteur apparaît sur le schéma de la Figure 171).

## 5) Validation expérimentale

### a) Courbes expérimentales

Des essais ont été effectués au laboratoire sous azote à pression atmosphérique. Pour cela, le dispositif à décharge est placé dans une enceinte non hermétique qui possède une arrivée d'azote industriel. L'azote sous pression permet de chasser l'air initialement présent dans l'enceinte et de conserver un gaz assez pauvre en molécules d'oxygène responsable de la création d'ozone.

L'alimentation expérimentale utilisée est une alimentation à résonance constituée d'un onduleur à pont capacitif, d'un transformateur haute tension, caractérisé dans le chapitre identification, et d'une inductance de sortie. La source de tension continue est une alimentation à tension variable (0,600V) Xantrex.

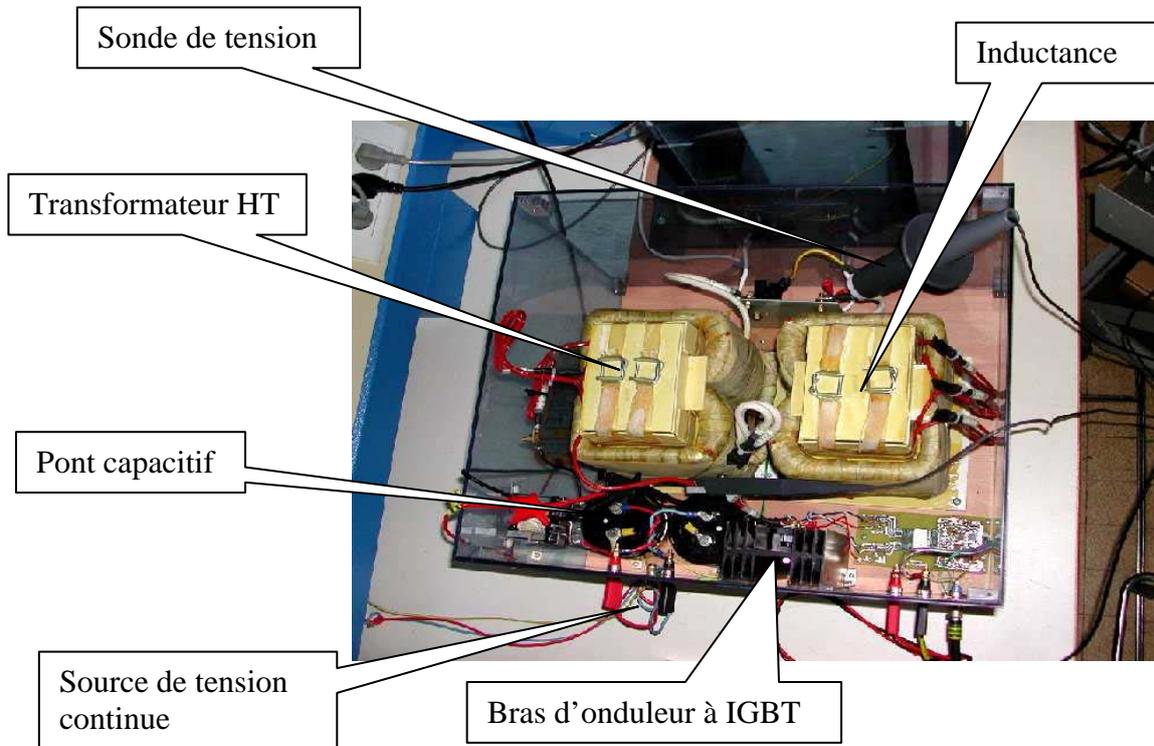


Figure 168 : Photo de l'alimentation à résonance (photo J.LEFORT)

Ce montage, réalisé J.M.BLAQUIERE, ingénieur du LEEI, permet d'obtenir des décharges à barrière diélectrique pour des tensions allant jusqu'à 20kV. Un montage mécanique, réalisé par R.LAROCHE, technicien du LEEI, permet de régler la distance inter électrode de la DBD de 0 à 3cm avec une précision du centième de millimètre.

Le montage utilisant la résonance pour amplifier la tension de sortie, celle-ci varie avec la fréquence d'excitation. Ainsi, il est facile d'obtenir des tensions de sortie de l'ordre de plusieurs milliers de Volts avec une centaine de Volts seulement en entrée. Pour régler le point de fonctionnement électrique du système, à géométrie donnée, on peut utiliser :

- La tension de la source continue d'entrée (Figure 167);
- La fréquence de fonctionnement de l'onduleur. En effet, en fonction de la fréquence utilisée le gain dû à la résonance varie (Équation 126 page 36).

Lors des essais expérimentaux, la distinction entre une décharge homogène et filamentaire ne se fait qu'à l'œil et à l'aide de l'oscilloscope. En effet, nous ne disposons pas de matériel optique pour analyser la décharge comme en sont équipés les laboratoires d'étude des

plasmas. Lorsqu'il y a décharge filamentaire, la densité de filaments dans l'espace inter électrode peut donner l'impression, dans un premier temps, que la décharge est homogène. Cependant, dans tous les cas l'information donnée par l'oscilloscope est assez précise. La présence de filaments dans la décharge correspond à des pics de courant brefs ; ces pics, mesurés par l'oscilloscope, donnent un chronogramme du courant facilement reconnaissable et typique de décharge non homogène.

Les figures suivantes présentent les chronogrammes expérimentaux typiques d'une décharge filamentaire (Figure 169) et d'une décharge homogène (Figure 170).

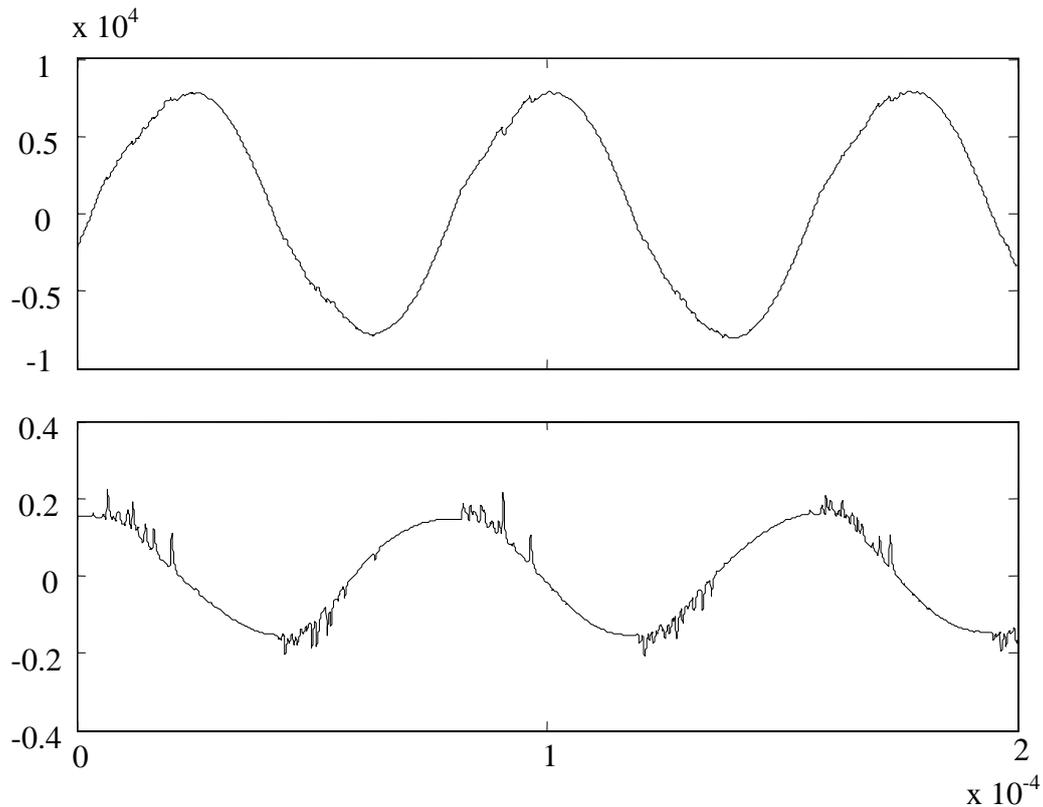


Figure 169 : Décharge filamentaire dans un espace inter électrode de 3mm sur une surface de 9cm<sup>2</sup>. Tension en V en haut, et courant en A en bas

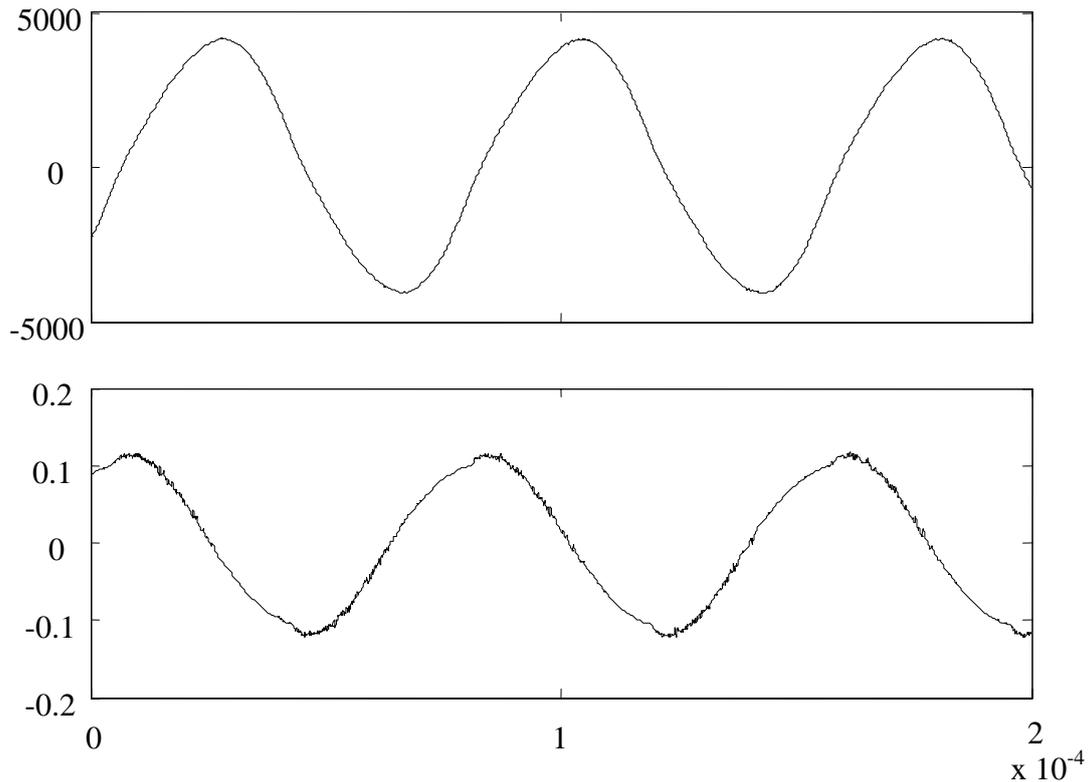


Figure 170 : Décharge homogène dans un espace inter électrode de 0,5mm sur une surface de 9cm<sup>2</sup>. Tension en V en haut, et courant en A en bas

La différence entre les deux régimes est assez nette sur les relevés oscillographique : l'alimentation fournit un courant globalement sinusoïdal avec plusieurs pics par période dans le cas non homogène, ou une seule déformation du courant (une augmentation en valeur absolue) dans le cas de décharges homogènes.

On se propose de simuler ce système. Pour cela, on utilise les modèles développés précédemment pour simuler l'alimentation, les diélectriques et le gaz. Le simulateur Saber (un logiciel de simulation de circuit électrique) permet de connecter tous les éléments du système entre eux :

- L'alimentation est modélisée à l'aide de son schéma électrique (Figure 167 page 210) ;
- Les diélectriques sont modélisés à partir de la matrice d'influence (Figure 161 page 205). Le calcul matriciel est effectué à l'aide d'un programme écrit en C. Saber, au travers du langage de programmation MAST [27], utilise ce programme pour calculer le potentiel en chaque point de la discrétisation de l'électrode.
- Le gaz est simulé en MAST comme décrit dans le chapitre modélisation (Figure 44 page 66).

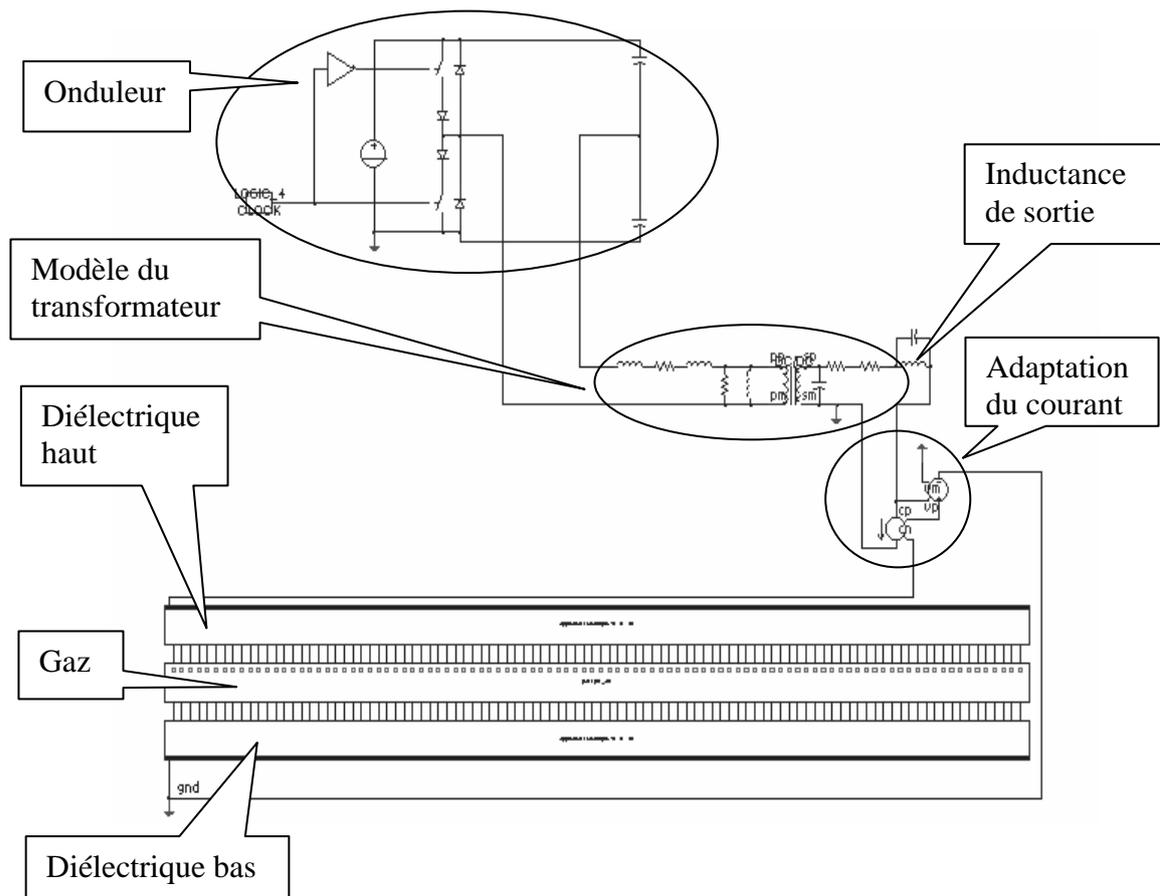


Figure 171 : Modèle Saber du système complet

Grâce à la méthode utilisée, on peut facilement changer un élément du système pour étudier son influence sur le comportement global du système. En effet, comme les modèles du gaz, des céramiques et de l'alimentation sont indépendants, on peut en changer les caractéristiques facilement et indépendamment. Plus précisément, il est possible de changer l'alimentation étudiée pour voir si une structure est plus adaptée ou non à l'alimentation de la DBD.

On peut simuler l'ensemble du système composé de l'alimentation avec sa charge. On visualise alors la tension aux bornes du dispositif et son courant.

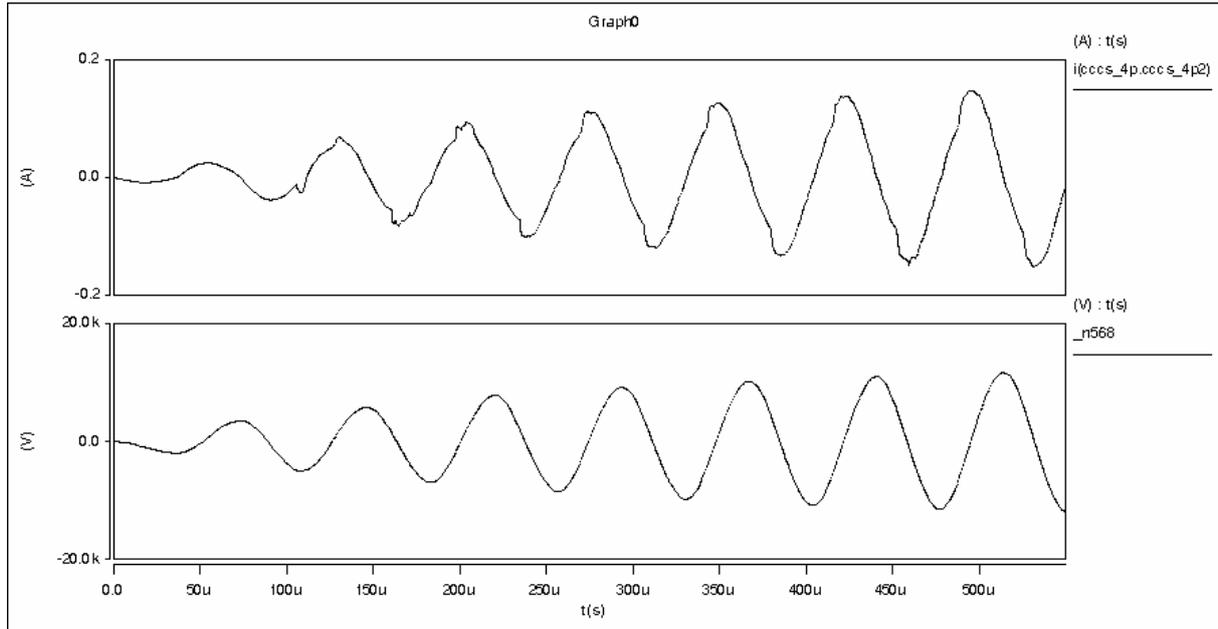


Figure 172 : Chronogramme de la tension (en V, en bas) et du courant total (en A, en haut) du dispositif à DBD simulé sous Saber.

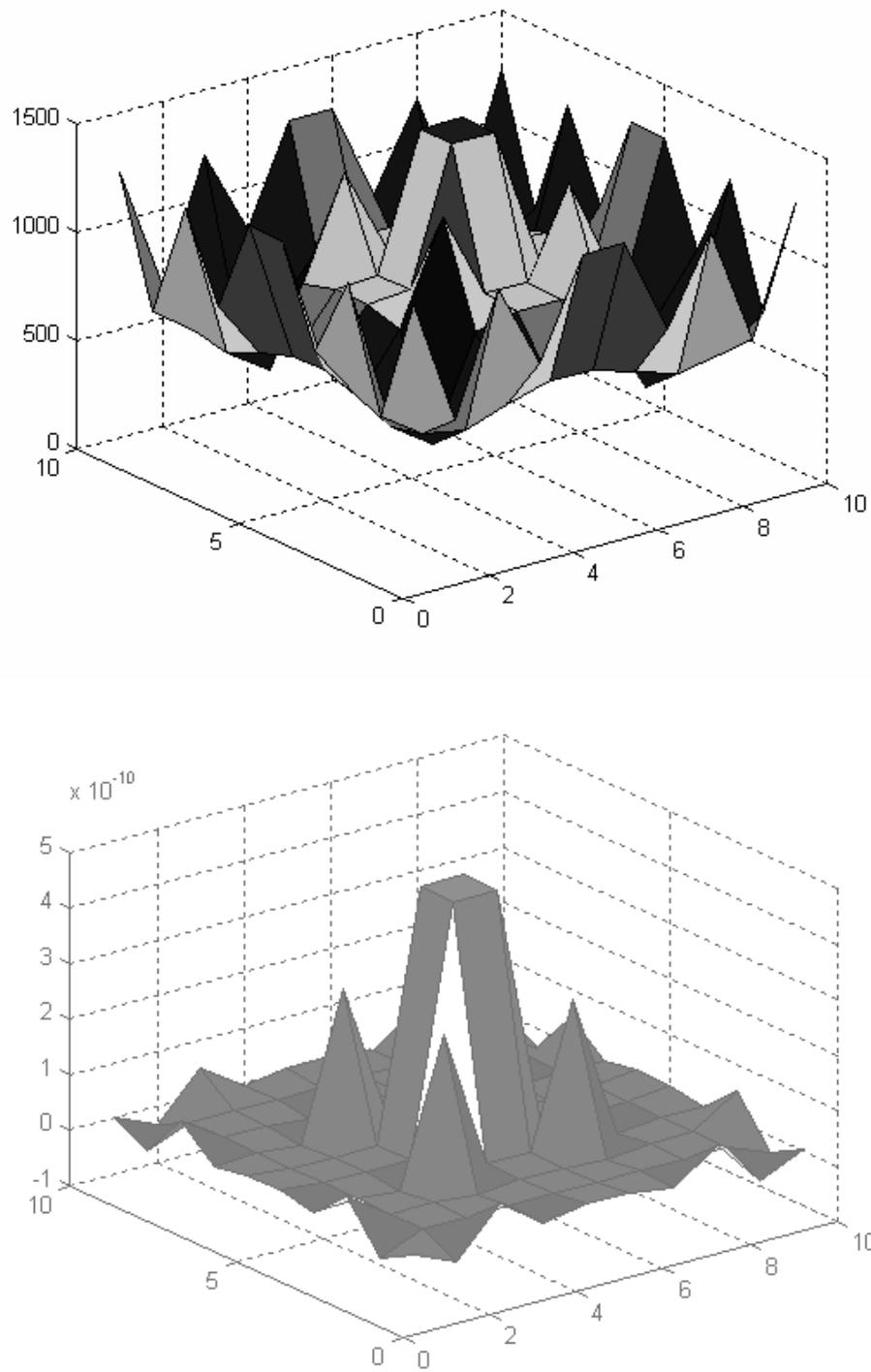
On voit qu'après le transitoire dû au chargement du filtre LC, la tension et le courant ont des formes attendues similaires à celles obtenues expérimentalement.

En effet on a une tension proche d'une tension sinusoïdale avec une amplitude de 10kV (7kV expérimental) et un courant d'amplitude 0,15A (0,12A expérimental). Les pics de courant (dus aux courants de conductions) sont ici de l'ordre de 0,01A (5mA expérimental).

Les simulations sont qualitativement satisfaisantes pour l'étude des interactions électriques entre l'alimentation et un dispositif à barrière diélectrique en vue de la maîtrise et du contrôle du point de fonctionnement. De plus elles permettent de visualiser la cartographie des courants et des tensions dans le gaz.

On visualise les cartographies suivantes :

- Répartitions des courants et des tensions dans le cas d'une décharge filamentaire, au début de la simulation ( $t=0.14\text{ms}$ ) (Figure 173) ;
- Répartitions des courants et des tensions dans le cas d'une décharge homogène, à la fin de la simulation ( $t=0.535\text{ms}$ ) (Figure 174).



*Figure 173 : Répartition des tensions gaz (en Volt, en haut) et des courants de conduction (Ampère, en bas) à la surface des électrodes à  $t=0.14ms$ . Discrétisation de 10 points (axe des  $x$ ) sur dix points (axes des  $y$ ) pour une surface de  $1mm^2$*

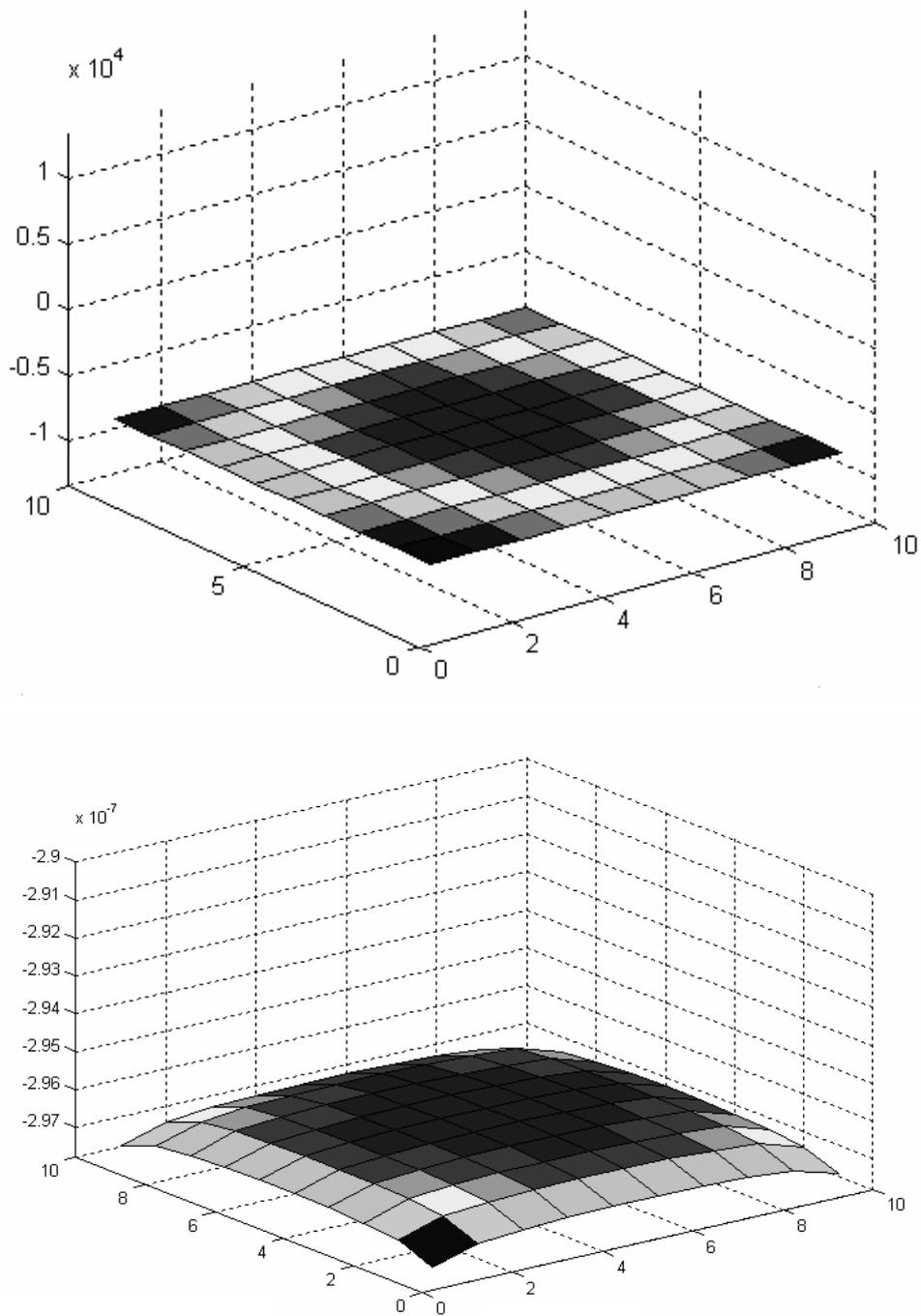


Figure 174 : Répartition des tensions gaz (en Volt, en haut) et des courants de conduction (Ampère par  $10^{-8} \text{m}^2$ , en bas) à la surface des électrodes à  $t=0.535 \text{ms}$ . Discretisation de 10 points (axe des x) sur dix points (axes des y) pour une surface de  $1 \text{mm}^2$

## **6) Conclusion**

L'obtention de décharges homogènes ainsi que le contrôle du courant dans les dispositifs à décharges à barrières diélectriques est difficile. Nous proposons un modèle pour l'étude et l'optimisation des alimentations électriques de dispositifs à DBD.

Pour cela, nous avons analysé le système d'un point de vue électrique. Nous avons vu qu'un modèle électrique de décharge homogène est assez simple à mettre en œuvre si on a un bon modèle permettant de connaître le courant de conduction dans le gaz.

De ce point de vu simplifié, on a proposé une modélisation du système global en trois parties :

- Le gaz.
- Les diélectriques.
- L'alimentation.

L'avantage important de la modélisation proposée est qu'elle permet d'interchanger les différents éléments, ce qui permet de valider le modèle alimenté par notre dispositif d'investigation (la première alimentation à résonance) pour ensuite mettre au point une alimentation spécifique.

## **Conclusion générale**



## Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail est le contrôle du point de fonctionnement électrique de la décharge grâce aux caractéristiques structurelles et à la commande du générateur. Nous avons exploré plusieurs voies possibles pour atteindre cet objectif, notamment dans le cas de décharges à courant continu et dans le cas de décharges à barrière diélectrique.

Dans une approche électrotechnique, l'étude de la charge à alimenter est essentielle. Le chapitre 2, qui aboutit à la modélisation de la décharge, montre ce qu'il est important de connaître pour comprendre le fonctionnement de la décharge d'un point de vue électrique. Pour cela, nous avons été amenés à effectuer quelques incursions dans le domaine de la physique des plasmas pour ramener dans le domaine du génie électrique une connaissance suffisante de la décharge.

Ainsi, cette première partie présente les phénomènes physiques élémentaires de la décharge et nous a permis de proposer des modèles basés sur l'évolution des populations de porteurs de charges dans la décharge. A partir de ces modèles, nous avons développé des modèles s'appuyant sur l'évaluation de la conductance et avons montré comment prendre en compte la géométrie du réacteur et les flux de gaz (décharge glissante).

La question de la connaissance des paramètres des modèles se pose de façon aiguë dès lors qu'il s'agit de représentations globalisées ou moyennées de la décharge. En effet, dans ces cas, les paramètres des modèles que nous avons présentés ne sont pas directement accessibles à partir des caractéristiques physiques du dispositif. Cela impose une phase d'identification des paramètres du modèle que l'on cherche à utiliser. Nous avons donc mis en œuvre un programme d'identification qui permet de connaître, à partir d'un essai temporel, la valeur des paramètres d'un modèle donné par l'utilisateur.

A l'aide des outils présentés dans les chapitres 2 et 3 nous avons étudiés quelles sont les caractéristiques du générateur les mieux adaptées dans le cas de décharges à courant continu et dans le cas de décharges à barrières diélectriques.

La mise en évidence et l'analyse des interactions entre la structure de puissance et la décharge nous ont permis d'établir que les topologies les mieux adaptées au contrôle du point de fonctionnement électrique de la décharge sont celles qui permettent une maîtrise

du courant instantané dans la décharge (en particulier grâce à une inductance placée en série).

Selon le point de fonctionnement recherché, nous avons également mené des investigations sur les caractéristiques et la structure de commande les mieux adaptées. Nous avons vu que dans la majorité des cas, il faut assurer le contrôle du courant instantané dans la décharge, et ce en courant continu comme en courant alternatif.

Cela a mené à une structure d'alimentation à découpage contrôlée en courant (chapitre 4), dans le cas des décharges à courant continu. En recherchant des points de fonctionnements à courants faibles, et hautes tensions, nous avons montré que des commandes spécifiques, adaptées aux caractéristiques de la décharge permettent d'obtenir de tels points de fonctionnement. En pratique, ces solutions correspondent à la commande en cascade tension-courant, pour un contrôle des grandeurs en valeur moyenne et à la commande par fourchette tension courant, pour un contrôle instantané de la zone de fonctionnement (chapitre 4).

Dans le cas de décharge à barrières diélectriques, nous avons utilisé une alimentation à résonance (chapitre 5). Le montage expérimental de cette alimentation a permis d'une part de montrer qu'une alimentation à résonance peut alimenter directement des dispositifs à barrières diélectriques ; d'autre part, il a permis d'étudier expérimentalement une modélisation de tout le dispositif constitué des diélectriques, du gaz et de l'alimentation. La modélisation proposée a le grand avantage d'être décomposée en éléments simples, indépendants les uns des autres. Cela veut dire que pour étudier une alimentation différente de celle proposée, on peut réutiliser tous les éléments concernant la décharge et décrire, sous forme de schémas électriques, la nouvelle alimentation.

Les caractéristiques spatiales des décharges ont été également prises en compte et les modèles disponibles offrent la possibilité d'évaluer :

- Les variations de la localisation de la décharge (cas du flux de gaz pour les décharges glissantes)
- Les répartitions surfaciques de courant dans le cas des DBDs.

En cela, les études menées au laboratoire permettent de mieux contrôler le point de fonctionnement électrique de la décharge par son alimentation. Cependant, il reste à établir jusqu'à quel point ce contrôle est possible ; notamment savoir comment et jusqu'où l'alimentation électrique peut avoir une influence sur la géométrie de la décharge. Dans le cas de décharges à barrière diélectrique par exemple, il reste savoir comment

homogénéiser la décharge via l'alimentation et déterminer jusqu'où il est possible de le faire. Si ce manuscrit n'apporte pas de réponse à cette problématique, il donne néanmoins les outils pour étudier celle-ci.



## **Bibliographie**



# Bibliographie

Les sites Internet correspondent aux informations utilisées pour l'élaboration du Chapitre 1. Ce sont des sites Internet de vulgarisation scientifique et technique.

[1] « *La foudre* » Fédération Française de la Montagne et de l'Escalade  
<http://www.ffme.fr/technique/meteorologie/le-temps/foudre/foudre.htm>

[2] W. EARLE « *L'électrisation des orages* »  
[http://metamiga.free.fr/Meteo\\_applique/Electrisation/electrisation.htm](http://metamiga.free.fr/Meteo_applique/Electrisation/electrisation.htm)

[3] F. MOTTEZ « *Les aurores polaires* » Centre d'Etude des Environnements Terrestre et Planétaires <http://www.cetp.ipsl.fr/1gdpub/21phspa/aurores/introAurores.html> Octobre 2004

[4] M.MULLER « *Aurore boréale* » L'encyclopédie de L'agora  
[http://agora.qc.ca/mot.nsf/Dossiers/Aurore\\_boreale](http://agora.qc.ca/mot.nsf/Dossiers/Aurore_boreale) Mars 2005

[5] P MOUSSETTE « *Les plasmas cosmiques* » Regroupement stratégique en science et technologie des plasmas  
<http://www.plasmaquebec.ca/La%20physique%20des%20plasmas/PlasmasNature/Plasmas%20naturels.htm> 2004

[6] « *Machine de Watson* » Musée EDF électropolis  
<http://www.electropolis.tm.fr/statique/electrostatique/pages/watson.html> 2003

[7] « *Machine de Wimshurst* » Musée EDF électropolis  
<http://www.electropolis.tm.fr/statique/electrostatique/pages/wimshurst.html> 2003

[8] L BAUM « *Les générateurs très hautes tensions* »  
<http://members.aol.com/lyonelb/vdg4.html> 2004

[9] « *Plasma à arc transféré* » Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie pour la transformation et le traitement des métaux <http://www.mines.u-nancy.fr/metall2t/PTA.html>

- [10] « *Plasma arc centrifugal treatment* » Retech system llc  
<http://www.retechsystemsllc.com/PACT%20webpagesC/sld001.htm>
- [11] Maurice KRATZ « *Fours à arc* » Les techniques de l'ingénieur, Dossier D5920 du 02/1999
- [12] A.COUSIN « *Restitutions des images – Ecran plats* » Les techniques de l'ingénieur, Dossier E5660 (06/1992).
- [13] « *Industrial plasma engineering* » de J Reece Roth édition Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia.
- [14] « *Poste de soudage* » Direct industry <http://www.directindustry.fr/cat/outillages-soudage-traitement-de-surface/postes-de-soudage-N-334.html> 2005
- [15] club E.D.F. arc électrique « *L'arc électrique et ses applications* » éditions du CNRS 1985
- [16] King-Jet Tseng, Yaoming Wang and D. Mahinda Vilathgamuwa « *An experimentally verified hybrid Cassie-Mayr Electric arc model for power electronics simulations* » IEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONIC, VOL. 12, NO 3, May 1997, page 429-436
- [17] Lionel R. Orama-exclusa, Bienvenido Rodriguez-Media « *Numerical arc model parameter extraction for SF6 circuit breaker simulations* » International conférence on power Systems transients – IPST 2003 in New Orleans, USA
- [18] K.J. Tseng, Y. Wang and D.M. Vilathgamuwa « *Development of a dynamic model of electric arc for power electronics simulations* » IEE 0-7803-3544-9/96
- [19] K.Hassouni, E.Marode, J.Paillol, P.Séguir, A.Bourdonc « *Modélisation des décharges filamenteuses à pression atmosphérique* » ECOMOD 2003 2-3 Juin2003
- [20] M.Bertin, J.-P.Faroux, J.Renault « *Electromagnétisme 1* » Ed Dunod université 1984
- [21] J.Chapelle et S.Pellerin « *Arc glissant et application* » Journées électrotechnique Toulouse 2001.
- [22] G.Poulin « *Alimentation d'un dispositif de décharge : étude de dispositifs d'application.* » Rapport de DEA de l'INP Toulouse 2001

[23] B. TALA-IGHIL « *Utilisation des éléments parasites des transformateurs haute et très haute tension dans les convertisseurs statiques à résonance fonctionnant à fréquence variable* » Thèse de l'université de Montpellier 2, 1992

[24] J. POTIN « *Modélisation numérique d'une décharge filamentaire contrôlée par barrière diélectrique dans l'azote à la pression atmosphérique* » Thèse de l'université Paul Sabatier CPAT 2001.

[25] S.Voungphoutone, H.Piquet, H.Foch « *Model of the homogeneous electrical discharge* » European Physics Journal, Applied Physics 2001

[26] « *Ansys Basic analysis Procedures Guide* » Release 5.5 3ème édition 1998

[27] « *Saberbook* » Version 2.4 1999

[28] S. VAQUIE « *Arc électrique* » Les techniques de l'ingénieur Dossier D2870 - 03/1995

[29] R. CAZES « *Soudage à l'arc* » Les techniques de l'ingénieur Dossier B7730 - 08/1995

[30] C. BAS « *Nouvelle alimentation de four à arc* » Thèse de doctorat soutenue à l'INP Toulouse-LEEI 2002

[31] A Gleizes, J J Gonzalez and P Freton « *Thermal plasma modelling* » J. Phys. D: Appl. Phys. 38 No 9 (7 May 2005) R153-R183

[32] J.M. CORMIER, I. RUSU. « *Syngas production via methane steam reforming with oxygen; plasma reactors versus chemical reactors* » J. Phys. D:Appl. Phys., 34,2798 (2003)

[33] L SHUHAI, N.MANFRED « *Electrical modelling of homogeneous dielectric barrier discharges under an arbitrary excitation voltage*» J.Phys D:Appl. Phys. 36 3144-3150 (11/2003).

[34] U. KOGELSCHATZ « *Fundamentals and applications of dielectric-barrier discharges*» HAKONE VII Int. Symp. On High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Greifswald, Sept 2000.

- [35] U. KOGELSCHATZ, B. ELIASSON, W. EGLI « *From ozone generators to flat television screens: history and future potential of dielectric-barrier discharges* » Pure Appl. Chem., vol 71, No 10, pp. 1819-1828, 1999.
- [36] S. BHOSLE, G. ZISSIS, JJ. DAMELINCOURT, FP DAWSON « *Calculation of the impedance of an axisymmetric DBD lamp for power supply design purposes* » Industry Applications conference 2004
- [37] L. FULCHERI, T. GRUENBERGER, J. GONZALEZ-AGUILAR, F. FABRY, E. GRIVEI, N. PROBST, G. FLAMANT, H. OKUNO, J.-C. CHARLIER « *Plasma processing of carbon nanomaterials* » High Technology Plasma Processes, 8, 1, 119-138 (2004)
- [38] Lennart LJUNG « *Systems identification – Theory for user* » PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 1999
- [39] Christine BLONDEL « *Histoire de l'électricité* » Pocket Science, 1994
- [40] JJ. DAMELINCOURT et Georges.ZISSIS « *Source de lumière et lampes à décharge* » Journées électrotechnique 2001 Toulouse.
- [41] A. FRIDMAN, A.PETROUSOV, J.CHAPELLE, JM.CORMIER, A.CZERNICHOWSKI, H.LESUEUR & J.STEVEFELT « *Modèle physique de l'arc glissant* » J.PPhys.III France. 4 (1994) 1449-1465
- [42] Anne-Marie POINTU, Jérôme PERRIN, Jacques JOLLY « *Plasmas froid de décharge – Applications et diagnostic* » Les techniques de l'ingénieur Dossier D2835 (11/1997).
- [43] T.PAULMIER, L.FULCHERI « *Use of non thermal plasma for hydrocarbon reforming* » Chemical Engineering Journal, 106, 59-71 (2005).
- [44] JS.DANEL « *Micro-usinage des matériaux monocristallins* » Les techniques de l'ingénieur Dossier BM7290 (07/1998)
- [45] TRAN MINH DUC « *Analyse de surface par ESCA – Analyse élémentaire et applications* » Les techniques de l'ingénieur Dossier P2626 (09/1998)
- [46] GHERARDI N. « *Physico-chimie et régimes des décharges contrôlées par barrière diélectrique en mélange azote – Gaz oxydant – silane. Application à l'activation des surfaces*

*polymères et aux dépôts.* » Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier (N° d'ordre 2538) 1996.

[47] F.MASSINES, N.NAUDE, J.P.CAMBRONE, N.GERARDHI «*Etude du couplage générateur-décharge pour le développement d'un procédé de traitement de surface.* » Journées thématique du réseau Plasmas Froids : Génération de Plasmas à la pression atmosphérique, 27 novembre 2002, Orsay.

[48] J.P. SALANNE, H.PIQUET, H.FOCH, L.FULCHERI «*Modèle d'une décharge glissante pour l'étude de son alimentation.* » EPF Toulouse 2004.

[49] O.MUTAF-YARDIMA, Alexie V.SAVELIEV, Alexander A.FRIDMAN and Lawrence A.KENNEDY. « *Thermal and nonthermal regimes of giding arc discharge in air flow.* » J. Appl. Phys., vol 87, N°4, 15 Février 2000.

[50] J.LEFORT « *Contribution à l'étude des interactions entre une alimentation à résonance et un dispositif de décharge à barrière diélectrique* » Rapport de fin d'étude ENSEEIHT-LEEI 2002.

[51] C.MONGE, R.PEYROUS, B.HELD « *Optimization of a corona wire-to-cylinder ozone generator. Comparison with economical criteria*» Science & Engineering. Vol. 19, no. 6, pp. 533-547. 1997.

[52] RM.CORLESS, GH.CONNET, DEG.HARE, DJ.JEFFREY, DE.KNUTH « *On the Lambert W function* » Advances in Computational Mathematics 5 : 329-359 (1996).



# Annexes

Calcul des Gradients pour l'identification	1
Mise en équation du système pour la simulation d'une décharge entre deux points.	5
Liste des programmes pour l'identification	10
schéma des cartes électroniques de commande	11

## Annexe : calcul des gradients pour l'identification

Nous avons vu dans le chapitre « identification numérique des paramètres d'un modèles » que cette identification nécessitait la connaissance des dérivées de l'erreur, entre la simulation et l'expérimentation, par rapport à chaque paramètre à identifier. Dans le cas où le modèle peut être représenté par une fonction de transfert, ces dérivées sont faciles à obtenir (en dérivant la fonction de transfert). Néanmoins, le modèle de gaz que nous utilisons ne pouvant être décrit globalement par une fonction de transfert, il faut utiliser une autre méthode.

---

L'outil d'identification nécessite la connaissance des dérivées des sorties du modèle par rapport à chaque paramètre. En effet, les algorithmes d'optimisations nécessitent la connaissance de la dérivée de l'erreur par rapport à chaque paramètre. On a vu que dans le cas des fonctions de transfert, cela ne posait pas de problèmes particuliers. Qu'en est-il dans le cas où le système n'est pas linéaire ? Le calcul reste assez simple mais devient fastidieux dans le cas général.

On traite le calcul de ces dérivées dans le cas général puis dans le cas du modèle de décharge électrique pour un paramètre.

$$\begin{aligned}\frac{de_k}{dt} &= u_k(v, e, der) \\ v_i &= f_i(v, e, der) \\ int\_der_j &= g_j(v, e, der) \\ s_m &= h_m(v, e, der)\end{aligned}$$

*Équation 127 : Système d'équation initial et dans le cas général.*

- $v$  variables internes pures (intermédiaire de calcul).
- $e$  variables d'états.
- $der$  variables internes de dérivées.

On s'intéresse à la dérivée des sorties par rapport au paramètre  $p_n$  dans le cas général. On calcule d'abord les dérivées partielles par rapport au paramètre  $p_n$  et par rapport à toutes les variables internes. La dérivée de la sortie par rapport au paramètre  $p_n$  est donc la somme des

dérivées partielles pondérées par les dérivées des variables internes par rapport au paramètre  $p_n$ .

$$\frac{ds_m}{dp_n} = \frac{\partial h_m(v, e, der)}{\partial p_n} + \sum_k \frac{\partial h_m(v, e, der)}{\partial der_{ji}} \frac{de_k}{dp_n} + \sum_i \frac{\partial h_m(v, e, der)}{\partial v_i} \frac{dv_i}{dp_n} + \sum_j \frac{\partial h_m(v, e, der)}{\partial der_{ji}} \frac{d der_j}{dp_n}$$

Équation 128 : Dérivées des sorties par rapport aux paramètres dans le cas général.

-  $\frac{dv_i}{dp_n}$  dérivée de l'intermédiaire de calcul  $v_i$  par le paramètre  $p_n$ . On notera cette

variable  $v_{in}$ .

-  $\frac{d der_j}{dp_n}$  dérivée de la variable interne dérivée  $der_j$  par le paramètre  $p_n$ . On notera cette

variable  $der_{jn}$ .

-  $\frac{de_k}{dp_n}$  dérivée de l'état  $e_k$  par le paramètre  $p_n$ . On notera cette variable  $e_{kn}$ .

Ensuite on calcule les dérivées des variables internes par rapport à chaque paramètre (terme décrit ci dessus). Dans le cas général, on note  $v_{in}$  et  $der_{jn}$  les nouvelles variables intermédiaires qui sont les dérivées des variables internes (état, intermédiaire de calcul, dérivées dan le temps) précédentes par rapport à chaque paramètre.

L'équation générale de sortie devient alors :

$$\frac{ds_m}{dp_n} = \frac{\partial h_m(v, e, der)}{\partial p_n} + \sum_k \frac{\partial h_m(v, e, der)}{\partial der_{ji}} e_{kn} + \sum_i \frac{\partial h_m(v, e, der)}{\partial v_i} v_{in} + \sum_j \frac{\partial h_m(v, e, der)}{\partial der_{ji}} der_{jn}$$

Équation 129 : Nouvelle formulation proposée pour la dérivé des sorties

On constate alors que pour calculer les dérivées de la sortie par rapports aux paramètres, on doit calculer les dérivées des variables internes par rapport à chaque paramètre.

$$\begin{aligned} \frac{de_{kn}}{dt} &= \frac{\partial u_k(v, e, der)}{\partial p_n} + \sum_k \frac{\partial u_k(v, e, der)}{\partial u_k} u_{kn} + \sum_i \frac{\partial u_k(v, e, der)}{\partial v_i} v_{in} + \sum_j \frac{\partial u_k(v, e, der)}{\partial der_j} der_{jn} \\ v_{in} &= \frac{\partial f_i(v, e, der)}{\partial p_n} + \sum_k \frac{\partial v_i(v, e, der)}{\partial u_k} u_{kn} + \sum_i \frac{\partial f_i(v, e, der)}{\partial v_i} v_{in} + \sum_j \frac{\partial f_i(v, e, der)}{\partial der_j} der_{jn} \\ int\_der_{jn} &= \frac{\partial g_j(v, e, der)}{\partial p_n} + \sum_k \frac{\partial g_j(v, e, der)}{\partial u_k} u_{kn} + \sum_i \frac{\partial g_j(v, e, der)}{\partial v_i} v_{in} + \sum_j \frac{\partial g_j(v, e, der)}{\partial der_j} der_{jn} \end{aligned}$$

Équation 130 : Nouveaux système d'équations pour les variables internes

## Annexes

On a donc un nouveau système d'équations qui présente le même formalisme que le système d'équation initial (Équation 127). Cela permet donc d'utiliser les programmes déjà utilisés pour la simulation des systèmes d'équations dans le but de calculer les gradients.

Dans le cas général, la dérivée de l'erreur par rapport au paramètre  $p_n$  se calcule en simulant le système suivant qui découle du système initial.

$$\begin{aligned}
 \frac{dv_i}{dt} &= f_i(v, e, der) \\
 int\_der_j &= g_j(v, e, der) \\
 \frac{dv_{in}}{dt} &= \frac{\partial f_i(v, e, der)}{\partial p_n} + \sum_i \frac{\partial f_i(v, e, der)}{\partial v_i} v_{in} + \sum_j \frac{\partial f_i(v, e, der)}{\partial der_j} der_{jn} \\
 int\_der_{jn} &= \frac{\partial g_j(v, e, der)}{\partial p_n} + \sum_i \frac{\partial g_j(v, e, der)}{\partial v_i} v_{in} + \sum_j \frac{\partial g_j(v, e, der)}{\partial der_j} der_{jn} \\
 \frac{ds_m}{dp_n} &= \frac{\partial h_m(v, e, der)}{\partial p_n} + \sum_i \frac{\partial h_m(v, e, der)}{\partial v_i} v_{in} \sum_j \frac{\partial h_m(v, e, der)}{\partial der_{ji}} der_{jn} \\
 s_m &= h_m(v, e, der)
 \end{aligned}$$

*Équation 131 : Dérivée d'une sortie par rapport à un paramètre  $p_n$*

On peut voir qu'au final, pour avoir les dérivées d'un système à 1 sortie, n paramètres et m variables intermédiaires, cela fait (n+1) x m équations. Le calcul des dérivées des sorties peut devenir difficile à gérer (même s'il n'est fait qu'une fois).

Si le calcul analytique des dérivées n'est pas possible (fonction non dérivable) on peut utiliser le calcul numérique. Cependant, l'identification donne de meilleurs résultats avec les dérivées analytiques qu'avec les dérivées numériques.

Dans le cas de l'identification du paramètre  $\tau$  du modèle de gaz mono filamentaire, on prend en compte le système d'équation initial suivant.

$$\begin{aligned}
 \frac{d\sigma}{dt} &= \frac{(k \times abs(I) + k_2 I^2 - \sigma)}{\tau} \\
 V &= \frac{I}{\sigma}
 \end{aligned}$$

*Équation 132 : Système d'équation initial pour le modèle de décharge électrique.*

On s'intéresse à la dérivée des sorties par rapport  $\tau$  (pour l'exemple, pour les autres paramètres, c'est la même opération qui est faite). On calcule la dérivée partielle par rapport à  $\tau$ .

$$\frac{dV}{d\tau} = 0 + \frac{\partial \frac{I}{\sigma}}{\partial \sigma} \sigma_{\tau}$$

*Équation 133 : Dérivées des sorties par rapport aux paramètres pour le modèle de décharge électrique.*

Ensuite on calcule les dérivées des variables internes par rapport à chaque paramètre. On constate alors que pour calculer la dérivée de la sortie par rapport à  $\tau$ , on doit calculer les dérivées des variables internes par rapport à celui-ci.

$$\frac{d\sigma_{\tau}}{dt} = -\frac{\tau\sigma_{\tau} + (k \times \text{abs}(I) + k_2 I^2 - \sigma)}{\tau^2}$$

*Équation 134 : Nouveaux système d'équations pour les variables internes*

Pour le modèle de gaz, la dérivée de la sortie par rapport à  $\tau$  se calcule en simulant le système d'équations suivant :

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dt} &= \frac{(k \times \text{abs}(I) + k_2 I^2 - \sigma)}{\tau} \\ \frac{d\sigma_{\tau}}{dt} &= -\frac{\tau\sigma_{\tau} + (k \times \text{abs}(I) + k_2 I^2 - \sigma)}{\tau^2} \\ \frac{dV}{d\tau} &= -\frac{I}{\sigma^2} \sigma_{\tau} \\ V &= \frac{I}{\sigma} \end{aligned}$$

*Équation 135 : Dérivée de la tension d'arc par rapport à  $\tau$*

## Annexe : mise en équation du système pour la simulation d'une décharge entre deux points.

Dans le chapitre qui concerne la modélisation, on a mis en avant une discrétisation de l'espace pour l'étude des grandeurs électriques dans la décharge. Pour évaluer cette méthode, une simulation simple est effectuée : le cas d'une décharge mono filamentaire entre deux points.

On présente ici la discrétisation des équations qui a permis d'obtenir les résultats commentés à la fin du chapitre présentant les modèles de gaz utilisés (page 79).

Pour évaluer la méthode de discrétisation, on a étudié un cas simple : celui d'une décharge entre deux points, dans de l'azote. La discrétisation étudiée est celle de la Figure 175.

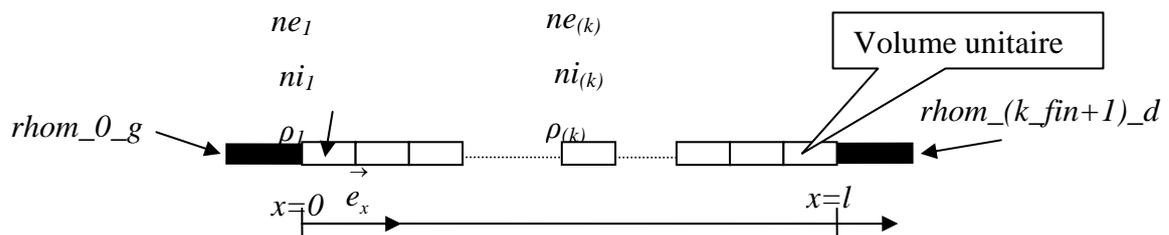


Figure 175 : Discrétisation sur un cas 1D

On discrétise l'espace entre les deux points pour avoir l'évolution en fonction de l'abscisse  $x$  des variables suivantes : les quantités d'ions et d'électrons, les flux d'électrons et d'ions et le champ local. Pour cela, on note les grandeurs internes discrétisées dans le tableau suivant.

Nom de la variable	Abscisse	Correspondance
$Ne_{(k)}$	$k \times pas$	Quantités d'électron et d'ion en k
$ni_{(k)}$		
$rho_{(k)}$		Quantité de charge en k
$collision_{(k)}$		Bilan collisionnel de création/disparition d'e <sup>-</sup>
$E_{(k)}$	$(2k-1)/2 \times pas$	Champ électrique au bord des volumes unitaires
$Fluxdne_{(k)}$		Flux d'électrons et d'ions dus à la diffusion
$Fluxdni_{(k)}$		
$Fluxcne_{(k)}$		Flux d'électrons et d'ions dus au champ électrique.
$Fluxcni_{(k)}$		
$Ine_{(k)}$		Courants d'électrons et d'ions
$Ini_{(k)}$		
$rhom\_0\_g$	0	Quantité de charges sur l'électrode de gauche
$rhom\_k\_fin+1\_d$	l	Quantité de charges sur l'électrode de droite

Tableau 4 : Variables utilisées pour la discrétisation 1D avec ions et électrons

Les quantités d'ions et d'électrons sont calculées à l'aide de l'équation de Boltzmann. La variation de la quantité d'électrons ou d'ions dépend de la quantité de charges créée localement par les phénomènes collisionnels et du bilan migratoire du flux d'ions et d'électrons au bord (droite et gauche) du volume unitaire considéré.

$$\frac{dne_{(k)}}{dt} = collision_{(k)} + fluxcne_{(k)} - fluxcne_{(k+1)} + fluxdne_{(k)} - fluxdne_{(k+1)}$$

$$\frac{dni_{(k)}}{dt} = collision_{(k)} + fluxcni_{(k)} - fluxcni_{(k+1)} + fluxdni_{(k)} - fluxdni_{(k+1)}$$

Équation 136 : Résolution de l'équation de Boltzmann au point k

La quantité de charges locale est la différence entre le nombre d'électrons et le nombre d'ions pondérée par leur charge unitaire. Cette quantité sert à calculer le champ électrique.

$$rho_{(k)} = qe(ni_{(k)} - ne_{(k)})$$

Équation 137 : Quantité de charges présentes au point k

Le terme de création et de disparition des ions est calculé en utilisant la moyenne algébrique des champs électriques au deux bords du volume discrétisé.

$$collision_{(k)} = A \frac{abs(E_{(k)} + E_{(k+1)})}{2} e^{-\frac{2B}{abs(E_{(k)} + E_{(k+1)})}} ne_{(k)} - \alpha ne_{(k)} ni_{(k)}$$

*Équation 138 : Bilan collisionnel utilisé initialement*

Un terme source supplémentaire a été ajouté pour tenir compte de l'ionisation permanente de l'air. C'est un terme constant, égal au terme de recombinaison lorsque l'ionisation est égale à l'ionisation permanente de l'air.

$$collision_{(k)} = A \frac{abs(E_{(k)} + E_{(k+1)})}{2} e^{-\frac{2B}{abs(E_{(k)} + E_{(k+1)})}} ne_{(k)} - \alpha (ne_{(k)} ni_{(k)} - n_{init}^2)$$

*Équation 139 : Bilan collisionnel utilisé*

Le calcul du champ se fait de manière matricielle à l'aide du vecteur contenant les quantités de charge (celle aux surfaces des métallisations incluses). On crée le vecteur contenant l'information sur les quantités de charges.

$$[E_{(k)}] = A \begin{bmatrix} rho_{(k)} \\ rhom\_0\_g \\ rhom\_(k\_fin + 1)\_d \end{bmatrix}$$

*Équation 140 : Résolution du calcul du champ électrique de manière matricielle en incluant les charges présentes aux électrodes.*

Les flux de charges sont comptés positivement lorsque celles-ci se déplacent de la gauche vers la droite. Cela donne la définition suivante pour les flux dus à la diffusion :

$$fluxdne_{(k)} = Kdiff \frac{ne_{(k-1)} - ne_{(k)}}{pas}$$

$$fluxdni_{(k)} = Kdiff \frac{ni_{(k-1)} - ni_{(k)}}{pas}$$

*Équation 141 : Diffusion des charges selon la loi de Fick.*

Pour le calcul des flux dus au champ électrique, on utilise le champ électrique aux bords des éléments discrétisés. Le sens du champ électrique local impose le sens du flux et donc le nombre de particules choisies pour calculer la valeur du flux. C'est à dire que si les particules se déplacent de la gauche vers la droite, alors le flux est proportionnel au nombre de particule à gauche. Dans le cas des électrons, si le champ électrique est négatif (i.e. de la droite vers la

gauche), les particules se déplacent en sens contraire (i.e. de la gauche vers la droite). C'est donc la densité de particule de gauche (i.e.  $k-1$ ) qui permet de connaître la valeur du flux.

$$\begin{aligned} fluxcne_{(k)} &= \frac{we}{pas} \left( \frac{abs(E_{(k)} - abs(E_{(k)}))}{2} ne_{(k-1)} - \frac{abs(E_{(k)} + abs(E_{(k)}))}{2} ne_{(k)} \right) \\ fluxcni_{(k)} &= \frac{wi}{pas} \left( \frac{abs(E_{(k)} + abs(E_{(k)}))}{2} ni_{(k-1)} - \frac{abs(E_{(k)} - abs(E_{(k)}))}{2} ni_{(k)} \right) \end{aligned}$$

*Équation 142 : Flux de charges dû au champ électrique.*

Le courant électrique entre deux volumes élémentaires est évalué avec les grandeurs calculées précédemment. C'est la somme des flux de charges multipliée par la valeur de leur charge unitaire.

$$\begin{aligned} Ine_{(k)} &= -qe(fluxcne_{(k)} + fluxdne_{(k)}) \\ Ini_{(k)} &= qe(fluxcni_{(k)} + fluxdni_{(k)}) \end{aligned}$$

*Équation 143 : Calcul du courant connaissant les flux de charges.*

Connaissant toute les variables internes au gaz, il est nécessaire de connaître les équations aux bords. On pose l'hypothèse que la quantité de charge présente aux deux électrodes est de même valeur et de signe opposé. On peut également dire que cette quantité de charge résulte du bilan des charges amenées par la source électrique et par celle amenées par le gaz.

$$\begin{aligned} \frac{drhom\_0\_g}{dt} &= Itot - (Ine_1 + Ini_1) \\ rhom\_ (k\_ fin + 1)\_ d &= -rhom\_ 0\_ g \end{aligned}$$

*Équation 144 : Calcul des charges présentes dans les électrodes.*

Un programme a été développé pour générer ces équations de manière automatique pour qu'elles soient codées sous Matlab/Simulink et sous Saber. Ce programme reprend les conventions utilisées pour décrire les équations des modèles à identifier dans le chapitre identification.

## Annexe : liste des programmes pour l'identification

Pour automatiser l'identification et la création des modèles, un programme a été mis au point. Il est bâti à partir d'interfaces graphiques qui permettent aux utilisateurs d'entrer une description du modèle ainsi que des variables qui lui sont associées. On liste ici les principaux sous-programmes qui servent au programme (en pratique il y a plus de 70 fichiers).

Nom	Taille (nb lignes)	Utilité
Identifie	1200	Programme maître, interface graphique principale.
Lister_ese	470	Entrée des variables, interface graphique.
Lister_param	216	Entrée des paramètres, interface graphique.
Lister_vecteurs	658	Entrée des vecteurs, interface graphique.
Lister_equations	400	Entrée des équations, interface graphique.
Lister_equation_rep	400	Entrée des équations discrétisé, interface graphique.
Lister_equations_mat	214	Entrée des équations matricielles, interface graphique.
Creer_modele	407	Création de modèle sous simulink.
Creer_equation	1000	Création d'une équation sous simulink.
Creer_espace_etat	330	Création de l'espace d'état d'un modèle linéaire.
Creer_gradient	13	Création des gradients analytique d'un modèle linéaire.
Creer_grad_simulink	800	Création des gradients analytique d'un modèle non-linéaire.
Creer_fonction_transfert	13	Création de la fonction de transfert d'un modèle linéaire.
Prepare_simu	132	Préparation à la simulation (états initiaux, entrée) d'un modèle sous simulink.
Simul_modele	42	Simulation d'un modèle (simulink et linéaire).
Optimisation_levenberg	90	Identification des paramètres du modèle.
Limite_variation	25	Limitation des variations des paramètres lors de l'identification.
Calcul_erreur	27	Calcul de l'erreur entre l'expérimentation et la simulation lors de l'identification.
Calcul_sigma	96	Calcul du gradient lors de l'identification.
Creer_relation_mat_simu	340	Création des matrices sous simulink.
Créer_matrice_distance	80	Création de la matrice en numérique
Extrait_modele	120	Extraction du modèle pour être utilisé hors identification.
Creer_saber	740	Extraction du modèle pour être utilisé sous Saber.

## Annexes

On peut voir que ce qui « coûte » le plus de ligne de code c'est la mise en forme des équations plus que l'identification en elle-même. La mise en forme choisie permet de créer beaucoup de modèle et de les utiliser à plusieurs fins (identification, simulation, analyse fréquentielle...) mais elle est assez lourde à mettre en œuvre.



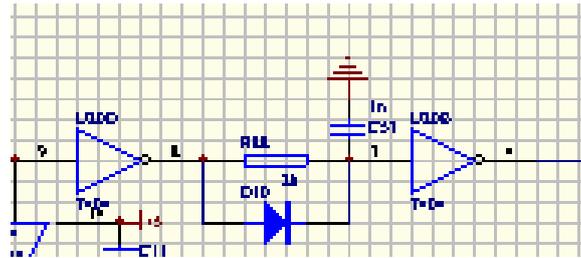


Figure 177 : Retard pur généré par l'utilisation de deux portes NON et d'un circuit RC

Pour générer ce retard pur, on utilise deux portes non avec un circuit RC entre elles. Il y a donc un retard pur, dépendant de la constante de temps RC et du seuil de commutation des portes logiques, entre l'entrée du dispositif et la sortie. Pour que ce retard pur n'apparaisse qu'à l'amorçage, on utilise une diode en parallèle avec la résistance.

Les signaux sont ensuite amplifiés par des comparateurs pour être envoyés à la carte de puissance via un connecteur 26 broches.

### b) Gestion du flux dans le transformateur

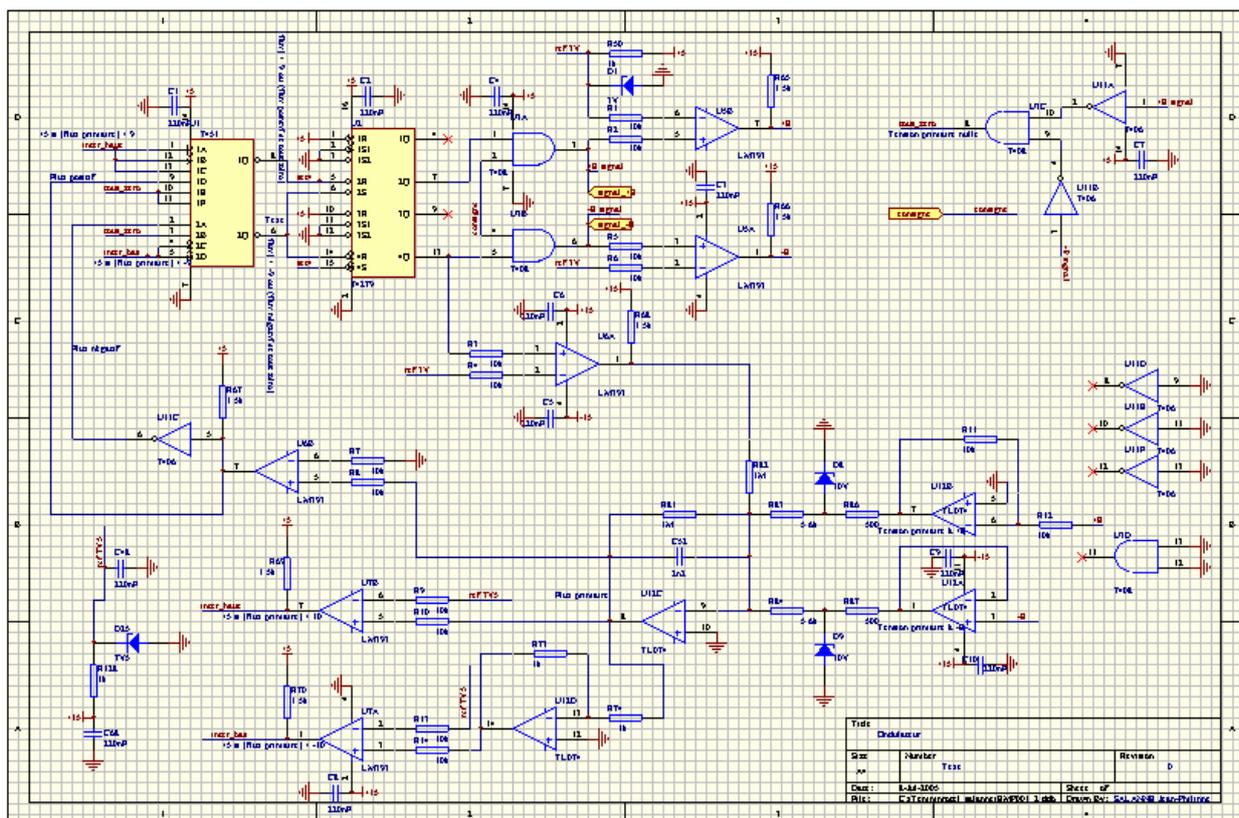


Figure 178 : Schéma électronique de gestion du flux dans le transformateur

L'estimation du flux dans le transformateur se fait en considérant que la tension au primaire de celui-ci est égale à sa consigne. Cette consigne est envoyée à la partie gérant les temps morts (ci-dessus).

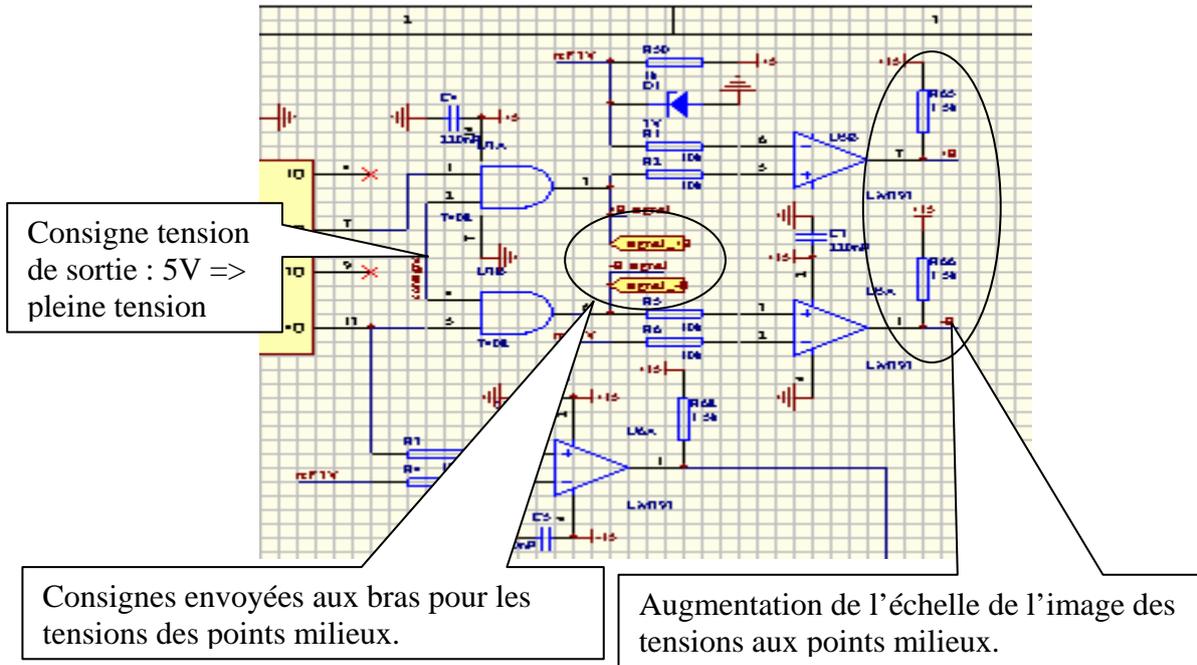


Figure 179 : Création et mise à l'échelle de l'image de la tension aux points milieu

A partir de la consigne de tension de sortie et de l'état précédent, on détermine la tension à appliquer aux points milieu de l'onduleur à l'aide de portes ET. On peut remarquer que cela implique une modulation des signaux. Le signal généré est, d'une part, envoyé à la partie qui gère les temps mort et, d'autre part, est amplifié pour faire l'évaluation du flux dans le transformateur.

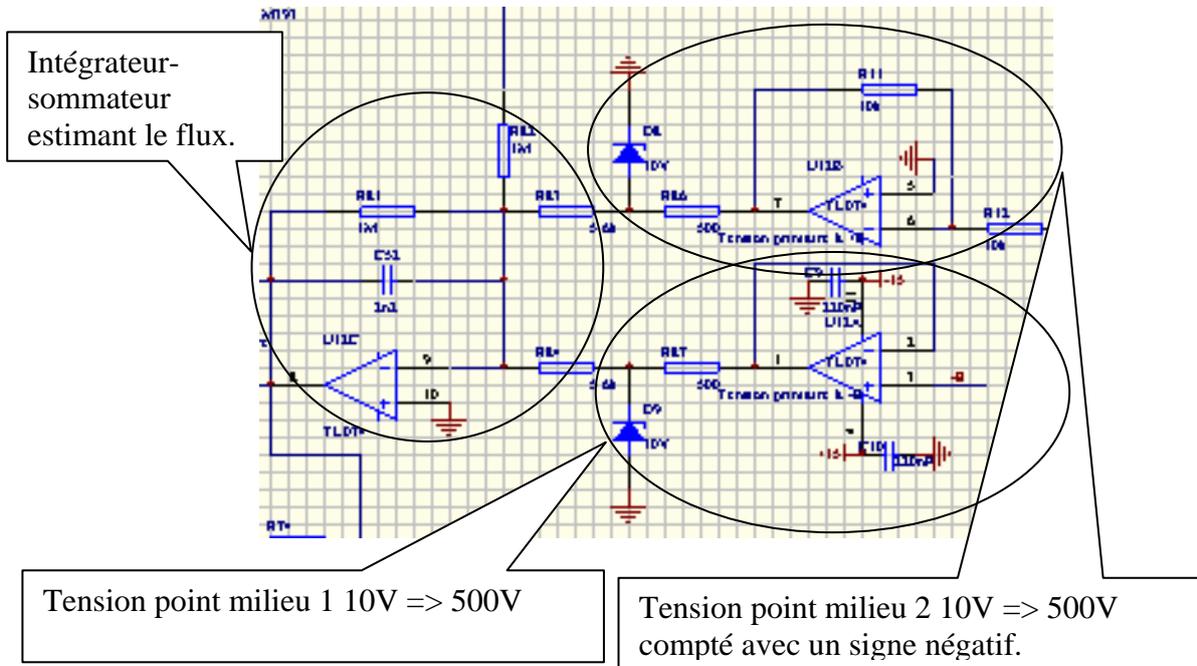


Figure 180 : Estimation du flux dans le transformateur à l'aide d'un intégrateur

## Annexes

Pour estimer le flux dans le transformateur, il faut faire l'intégrale de la différence entre les tensions des points milieux. Pour cela on les met à une échelle fixe et strictement égale à l'aide de diodes Zener. Ensuite, cette différence est intégrée par un montage intégrateur.

Le signal de l'intégrateur est comparé à des seuils fixes (10V et -10V). Les sorties de ces comparateurs gèrent les bascules RS qui règlent la polarité du signal.

### c) Gestion des sécurités

La gestion des sécurités inclut la surveillance des températures IGBT, transformateur et inductance. Celles-ci ne sont pas mesurées mais si elles dépassent un certain seuil, un bilame ferme un contact : si une fermeture est détectée, alors on signale un défaut température.

Pour les protections de dépassement de courant, ceux-ci sont mesurés. Ces mesures sont comparées à une référence : si un courant est trop important, un défaut courant est signalé.

Les interfaces avec l'utilisateur (arrêt d'urgence, interrupteur et signal lumineux de présence HT), sont également gérés dans cette partie. Le bouton d'arrêt d'urgence est géré comme les défauts température, mis à part qu'il n'y a pas de signalisation du défaut et que c'est l'ouverture d'un interrupteur qu'il faut détecter. Le bouton marche arrêt fonctionne sur front du passage de l'état arrêt à l'état marche.

Remarque : les câbles connectés aux bilames servant à détecter les défauts température passent nécessairement près de la partie puissance. Cela fait qu'il ramène beaucoup de bruits électromagnétiques. Il faut donc faire un filtrage important.

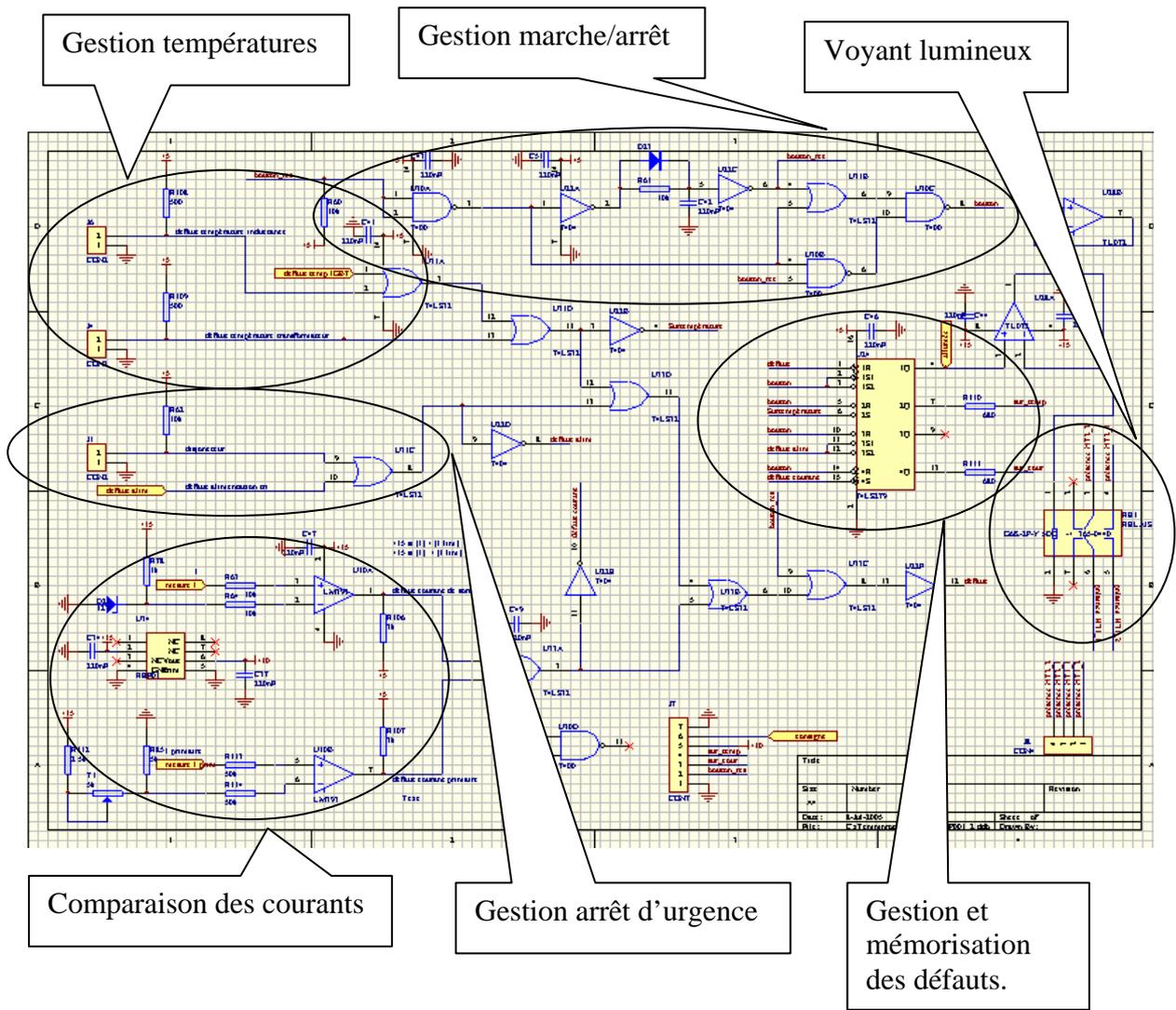


Figure 181 : Gestion des sécurités

#### d) Filtrage des mesures

Pour les régulations et les sécurités, on utilise des mesures de courant et tension. On doit pouvoir changer la polarité de sortie du convertisseur. Cela n'est pas un problème pour l'électronique de puissance puisque, passant par un transformateur, on est libre du choix de la polarité de sortie. Cependant, vu des capteurs, les courants et la tension de sorties changent de signe. Pour les régulations, il est nécessaire de compenser cela en utilisant dans les régulations que les valeurs absolues des grandeurs mesurées. De plus on filtre toutes les mesures, consigne de l'utilisateur comprise, pour travailler sur des signaux propres.

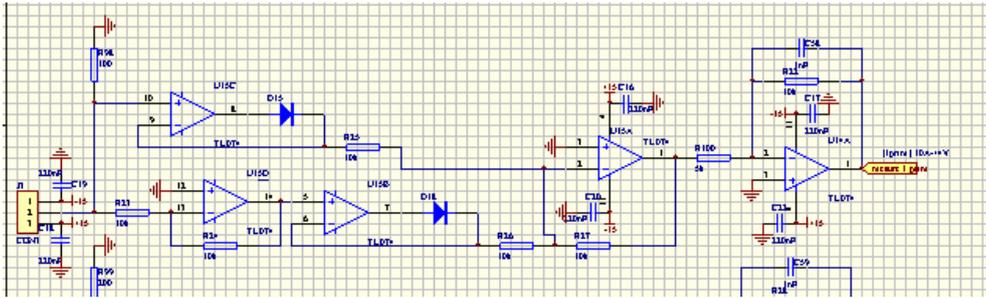


Figure 182 : Schéma d'une mesure comprenant la mise à la valeur absolue et le filtrage

Chaque grandeur est filtrée à une fréquence différente. Pour la tension et le courant dans le transformateur, on prend des fréquences basses (100Hz) puisqu'il ne s'agit pas de grandeurs liées aux régulations. Pour le courant de sortie on prend une fréquence plus élevée (10kHz).

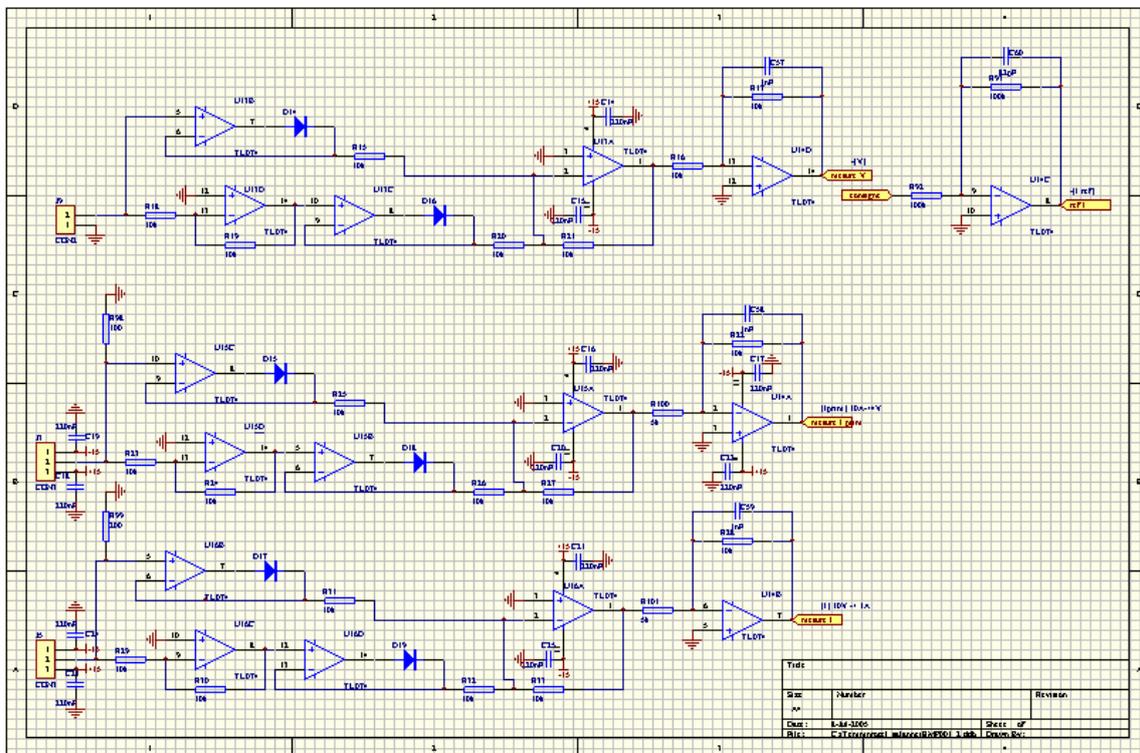


Figure 183 : Schéma des filtrages des mesures

Les capteurs de courant doivent être alimenté en plus et moins quinze Volt. On fourni ces alimentations par les mêmes connecteurs que pour les mesures.

e) Régulation de courant avec une fourchette à fréquence fixe.

Pour la régulation de courant, une commande est implémentée par défaut ; c'est la commande à hystérésis à fréquence fixe. Pour cette commande, on calcule la largeur de l'hystérésis pour réguler la fréquence de découpage du courant de sorti.

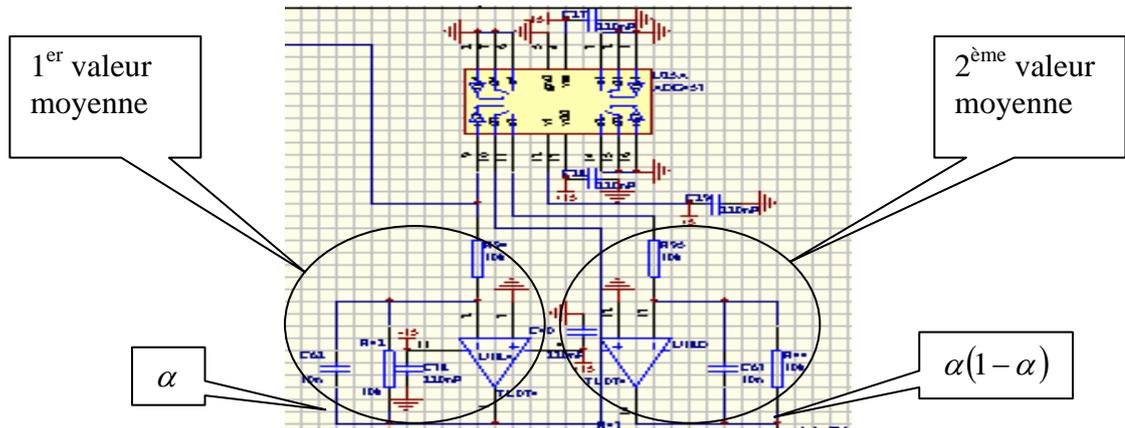


Figure 184 : Calcul du facteur  $\alpha(1-\alpha)$

Pour calcul le facteur  $\alpha(1-\alpha)$ , on fait la moyenne de la commande que l'on découpe par le complémentaire de la commande. Le calcul final se fait en refaisant la valeur moyenne du signal ainsi obtenu.

Il faut bien faire attention au choix fait sur les filtres qui calculent les valeurs moyennes. Trop lents, ils rendent les transitoires longs et risquent de provoquer des sur-commutations, trop rapides, les valeurs moyennes varient trop et ne sont pas exploitables (ils faut que la largeur de l'hystérésis reste fixe à l'échelle de temps du découpage).

En parallèle, on calcule la valeur absolue de la dérivée filtrée de la commande. Se sont des pics qui, ajoutés à la largeur de l'hystérésis, servent à limiter la fréquence de découpage des interrupteurs.

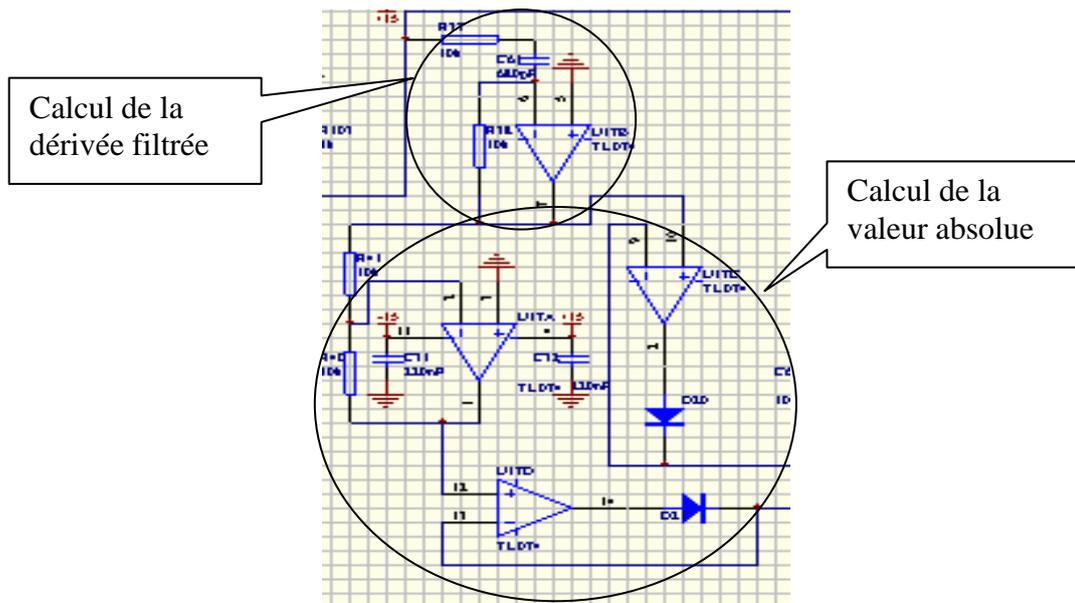


Figure 185 : Calcul de la valeur absolue de la dérivée filtrée

## Annexes

Ensuite on compare la mesure du courant de sortie avec la valeur de la consigne plus et moins la largeur de l'hystérésis souhaité pour contrôler la bascule RS qui gère l'état de la tension de sortie en amont de l'inductance.

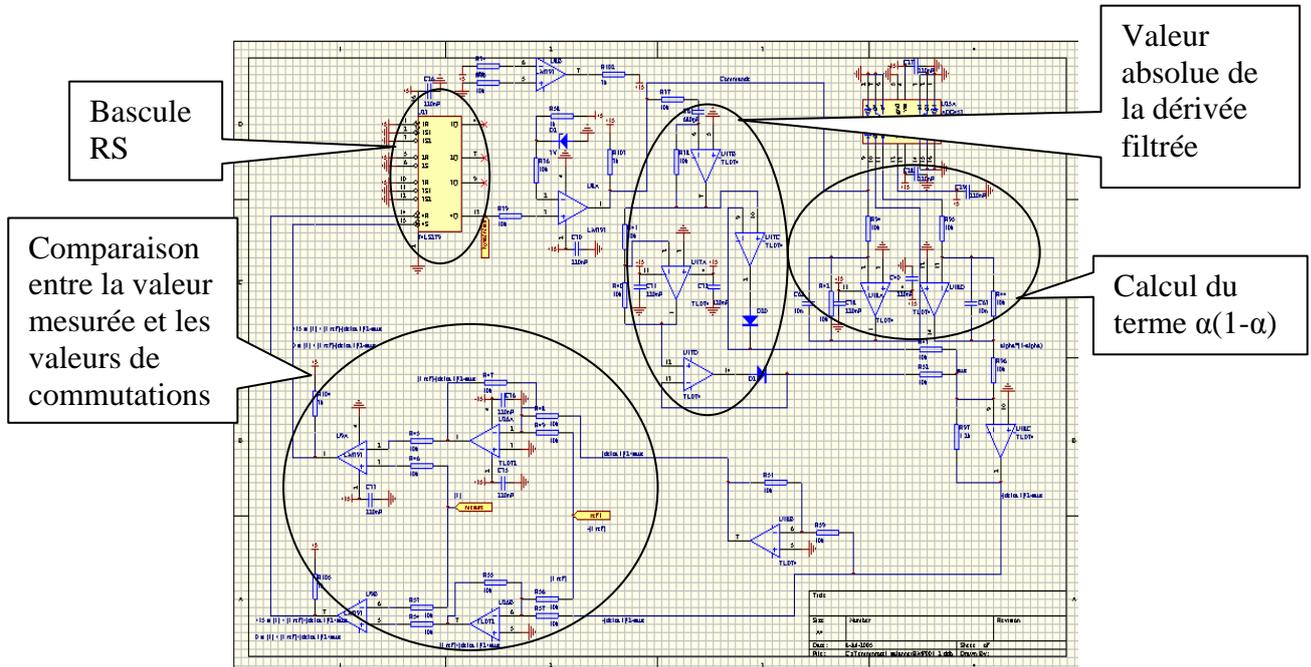


Figure 186 : Schéma complet de la régulation de courant

## **Annexe : Spécifications de la carte de commande**

Les pages suivantes sont les spécifications techniques, fournies par la CIRTEM, de l'alimentation à courant continu.

Ces spécifications ont servies de cahiers des charges pour la mise au point de la carte de commande.

---

	<b>Spécification technique</b>	Nom : SP-EMP002A-00  Indice : 00  Date : 01/05/04  Nbre. de pages : 3
<h2><i>Alimentation HT pour décharge continue : Carte de commande</i></h2>		
Rédigé par PC	Vérifié par BM	Approuvé par MCC

### ***1. ARCHITECTURE DE L'ALIMENTATION :***

- L'alimentation EMP001 est une source de courant continu isolée et régulée, ajustable entre 0.1 et 1A, avec une tension maximum de 5KV. La tension à vide est limitée par un écrêteur à 7KV.
- Les principaux éléments constitutifs sont :
- Entrée puissance : 400V +6%/-15% triphasé 50Hz
- Disjoncteur magnéto-thermique triphasé à commande et consignation manuelles
- Contacteur électromécanique triphasé
- Alimentation auxiliaire isolée et protégée 24V/3A
- Redresseur 50Hz triphasé en pont
- Filtre capacitif (26uF)
- Onduleur de tension à IGBT en pont complet avec drivers isolés
- Capteur de courant onduleur à effet hall (Lem LA55P)
- Transformateur élévateur de tension (500V/2x2500V/20KHz/5KVA)
- Redresseurs 20KHz monophasés en pont
- Ecrêteur à diodes transil (7000V)
- Inductance de lissage du courant de sortie (300mH/40KHz)
- Capteur de courant de sortie à effet hall (Lem LA25-NP/SP11)
- Sortie puissance : + ou - 5000V continu, 1A maximum
- Panneau interne pour la sélection manuelle de la polarité de sortie
- Entrée sur fiche banane 4mm pour contact sec (24V/1A) pour autorisation de mise sous tension
- Sortie sur fiches bananes 4mm sur contact sec (24V/1A) pour signalisation de haute tension

### ***2. FONCTIONS DE LA CARTE DE COMMANDE :***

- Contrôle de l'onduleur de tension à IGBT en pont complet à une fréquence de 20KHz avec génération des temps morts (3 $\mu$ S); fréquence de découpage transitoire : 80KHz maximum / 10ms, 40KHz / 20ms.
- Régulation du courant continu de sortie entre 0.1 et 1A,
- Conditionnement et mémorisation des protections sur-température et sur-courant (réglable 15 à 25A),
- Gestion de l'interrupteur Marche découpage / Arrêt et Reset défauts (Reset des défauts lors de la mise en Marche découpage ; le Marche découpage doit s'effectuer sur un front et non sur un état afin d'éviter un démarrage automatique après une coupure secteur.
- Conditionnement consigne de courant (0-10V)
- Génération  $\pm 15V/+10V/+5V$  pour la commande et les capteurs à effet hall
- Conditionnement des mesures de courant

### **3. INTERFACES DE LA CARTE DE COMMANDE :**

- Contact auxiliaire du disjoncteur de puissance (J1)
- Contact auxiliaire du contacteur de puissance (J1)
- Commande IGBT et défauts conditionnés par le driver d'IGBT (J2)
- Entrée alimentation 24V (J2)
- Capteur de courant onduleur (J3)
- Thermo-contact transformateur (J4)
- Capteur de courant de sortie (J5)
- Capteur de tension de sortie (J9 Option)
- Thermo-contact inductance de sortie (J6)
- Interrupteur Marche découpage / Arrêt et Reset défauts (J7)
- Interrupteur consigne interne / externe (J7)
- Potentiomètre 10 tours de consigne interne du courant de sortie (J7)
- Entrée BNC 0-10V de consigne externe du courant de sortie (J7)
- Leds rouges « sur-température » et « sur-courant » (J7)
- 2 sorties sur contact sec « présence haute tension » (J8)

### **4. CONNECTEURS :**

#### **Connecteur J1 : contacts auxiliaires disjoncteur et contacteur de puissance**

Type : HE15 embase femelle droite 1x2 ctc mâles, Fab. AMP, Réf. 0-0350786-1

Pin	Nom	E/S	Type	Fonction
1	Acd/0	E	A	GND
2	Acd/1	E	A	Contacteur et disjoncteur fermés = contact fermé

NB : Les contacts auxiliaires du disjoncteur et du contacteur sont connectés en série ; Le contact du bouton d'arrêt d'urgence et les contacts d'ouverture des panneaux sont connectés en série et commandent la fermeture du contacteur de puissance.

**Connecteur J2 : Driver**

Type : embase HE10 droite 2x13 ctc mâles bas profil, Fab. 3M, Réf. 2526-6002

Pin	Nom	E/S	Type	Fonction
1	0V24/J	E	PS	0V alimentation auxiliaire (1A maxi)
2	+24V/J	E	PS	+24V alimentation auxiliaire (1A maxi)
3	ACB/1/J	E	PS	NU (+/- 24V 100KHZ AC BUS) non connecté
4	ACB/1/J	E	PS	NU (+/- 24V 100KHZ AC BUS) non connecté
5	ACB/0/J	E	PS	NU (+/- 24V 100KHZ AC BUS) non connecté
6	ACB/0/J	E	PS	NU (+/- 24V 100KHZ AC BUS) non connecté
7- 25	GND	S	L	0V Logique (pins 7,9,11,13,15,17,19,21,23,25)
8	DFAX /1	S	L/EF	Défaut alim. aux. = 0V (+5V/10mA max)
10	DFT/1	S	L/OC	Défaut température IGBT = 0V (+5V/10mA max)
12	CDE/T1	S	L	NU (Bras N°1, IGBT bas) à relier au GND
14	CDE/B1	S	L	NU (Bras N°1, IGBT bas) à relier au GND
16	CDE/T2	S	L	Bras N°2, IGBT haut, Bloqué = 0V, Passant = 15V / 3.5mA
18	CDE/B2	S	L	Bras N°2, IGBT bas, Bloqué = 0V, Passant = 15V / 3.5mA
20	CDE/T3	S	L	Bras N°3, IGBT haut, Bloqué = 0V, Passant = 15V / 3.5mA
22	CDE/B3	S	L	Bras N°3, IGBT bas, Bloqué = 0V, Passant = 15V / 3.5mA
24	CDE/T4	S	L	NU (Bras N°4, IGBT haut) à relier au GND
26	CDE/B4	S	L	NU (Bras N°4, IGBT bas) à relier au GND

PS : Power Supply ; CS : Contact Sec ; A Analog ; L Logic ; EF : Emitter

Follower ; OC : Open Colector ; NU : Non Utilisé

**Connecteur J3 : capteur de courant onduleur**

Type : embase miniKK 1x3 ctc droit avec verrouillage, Fab. Molex, Réf. 22-27-2031

Pin	Nom	E/S	Type	Fonction
1	+15V/1	S	PS	+15V alimentation auxiliaire (80mA maxi)
2	Iom/1	E	A	Mesure courant onduleur : Résistance de charge 100Ω (±10A => ±2V)
3	-15V/1	S	PS	-15V alimentation auxiliaire (80mA maxi)

NB : Capteur à effet hall Lem LA55P avec 2 spires au primaire, rapport 1/500.

La résistance de charge est placée sur la carte de commande.

**Connecteur J4 : thermo contact transformateur de puissance**

Type : embase miniKK 1x2 ctc droit avec verrouillage, Fab. Molex, Réf. 22-27-2021

Pin	Nom	E/S	Type	Fonction
1	Ttr/0	E	L/CS	GND
2	Ttr/1	E	L/CS	Contact ouvert = Sur température => Arrêt découpage (10mA mini)

**Connecteur J5 : capteur de courant sortie**

Type : embase miniKK 1x3 ctc droit avec verrouillage, Fab. Molex, Réf. 22-27-2031

Pin	Nom	E/S	Type	Fonction
1	+15V/1	S	PS	+15V alimentation auxiliaire (40mA maxi)
2	Ism/1	E	A	Mesure courant de sortie : Résistance de charge 200Ω (1A => 5V)
3	-15V/1	S	PS	-15V alimentation auxiliaire (40mA maxi)

NB : Capteur à effet hall Lem LA25-NP/SP11 avec 1 spire au primaire, rapport 1/40.

La polarité de la mesure de courant est la même que celle du courant de sortie.

La résistance de charge est placée sur la carte de commande.

#### Connecteur J6 : thermo contact inductance de puissance

Type : embase miniKK 1x2 ctc droit avec verrouillage, Fab. Molex, Réf. 22-27-2021

Pin	Nom	E/S	Type	Fonction
1	Til/0	E	L/CS	GND
2	Til/1	E	L/CS	Contact ouvert = Sur température => Arrêt découpage (10mA mini)

#### Connecteur J7 : Bandeau de commande

Type : embase miniKK 1x7 ctc droit avec verrouillage, Fab. Molex, Réf. 22-27-2071

Pin	Nom	E/S	Type	Fonction
1	GND	S	L	0V carte de commande
2	On/1	E	L/CS	Contact fermé = Marche découpage
3	Loi/1	S	L	Led Rouge allumée = sur courant onduleur ou sur courant de sortie (sortie OC avec résistance de limitation pour 5mA)
4	Lot/1	S	L	Led Rouge allumée = sur-température onduleur ou transformateur ou inductance (sortie OC avec résistance de limitation pour 5mA)
5	Pot/1	S	A	Référence +10V pour potentiomètre 10KΩ
6	Ref/1	E	A	Entrée consigne 0 - 10V ; Impédance d'entrée > 10MΩ
7	Ref/0	E	A	0V consigne

NB : résistance de limitation sur la carte de commande.

#### Connecteur J8 : Signalisation

Type : embase miniKK 1x4 ctc droit avec verrouillage, Fab. Molex, Réf. 22-27-2041

Pin	Nom	E/S	Type	Fonction
-----	-----	-----	------	----------

1	PHT/1	S	L/CS	Contact 1 : 1A/24V (fermé = Présence Haute Tension)
2	PHT/2	S	L/CS	Contact 1 : 1A/24V (fermé = Présence Haute Tension)
3	PHT/3	S	L/CS	Contact 2 : 1A/24V (fermé = Présence Haute Tension)
4	PHT/4	S	L/CS	Contact 2 : 1A/24V (fermé = Présence Haute Tension)

NB : 1 Relais avec 2 contacts travail 24V/1A fermés lorsque l'onduleur découpe.

### **Connecteur J9 : capteur de tension de sortie (option)**

Type : embase BNC à souder sur CI

Pin	Nom	E/S	Type	Fonction
1	Vsm/0	E	A	GND
2	Vsm/1	E	A	Mesure tension de sortie : selon caractéristiques sonde

NB : Sonde non incluse dans l'alimentation. La polarité de la mesure de tension est la même que celle de la tension de sortie.

### **5. INTERFACES MECANIQUES :**

- Trous de fixations de diamètre 4.5mm dans chaque coin de la carte de commande.
- Dimensions maxi :                      200mm                      x                      350mm