



HAL
open science

**Contribution à l'étude expérimentale des décharges
électriques dans l'eau et des ondes de pression
associées Réalisation d'un prototype industriel 100kJ
pour le traitement de déchets par puissances électriques
pulsées**

Gilles Touya

► **To cite this version:**

Gilles Touya. Contribution à l'étude expérimentale des décharges électriques dans l'eau et des ondes de pression associées Réalisation d'un prototype industriel 100kJ pour le traitement de déchets par puissances électriques pulsées. Physique [physics]. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2003. Français. NNT: . tel-00011179

HAL Id: tel-00011179

<https://theses.hal.science/tel-00011179>

Submitted on 9 Dec 2005

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

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

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 15

CHAPITRE 1. AU SUJET DES PUISSANCES PULSÉES... 21

1.1. INTRODUCTION AUX PUISSANCES PULSÉES..... 23
1.2. LA TECHNOLOGIE DES PUISSANCES PULSÉES..... 26
1.3. CHAMPS ÉLECTRIQUES PULSÉS EN AGRO-ALIMENTAIRE..... 29
1.3.1. INTRODUCTION..... 29
1.3.2. PRINCIPE DE L'ÉLECTROPORATION..... 31
1.3.3. EFFETS DES CHAMPS ÉLECTRIQUES PULSÉS SUR LES CELLULES
BIOLOGIQUES..... 34
1.3.3.1. Bactéries sous forme végétative..... 34
1.3.3.2. Spores..... 35
1.3.3.3. Cellules végétales ou animales..... 35
1.3.4. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES CHAMPS ÉLECTRIQUES PULSÉS..... 36
1.3.4.1. Extraction de composés cellulaires..... 36
a. Extraction de pigments..... 36
b. Extraction de jus..... 36
1.3.4.2. Traitement de préservation des denrées alimentaires..... 37
a. Destruction de la flore naturelle du lait frais..... 37
b. Destruction des bactéries pathogènes..... 38
1.3.4.3. Applications diverses..... 38
1.4. TRAITEMENT PAR EFFET COURONNE ET PAR ÉLECTROFILTRES..... 39
1.4.1. INTRODUCTION..... 39
1.4.1.1. L'effet couronne..... 39
1.4.1.2. Les impulsions de Trichel..... 41
1.4.2. LES FILTRES ÉLECTROSTATIQUES..... 41

1.4.2.1. Principe des filtres électrostatiques (électrofiltres).....	42
1.4.2.2. Description du phénomène électrostatique.....	44
1.4.2.3. Applications relatives aux électrofiltres.....	45
<i>a. Le projet IRIS du CEA</i>	45
<i>b. Filtres à particules</i>	46
1.4.3. TRAITEMENT PAR DÉCHARGES COURONNES.....	47
1.4.3.1. Dépollution des effluents gazeux par décharges couronnes.....	47
<i>a. Position du problème</i>	47
<i>b. Principe du traitement des gaz par décharges couronnes</i>	49
<i>c. Applications des décharges couronnes dans les gaz</i>	50
1.4.3.2. Traitement des liquides par décharges électriques.....	51
<i>a. Principe</i>	51
<i>b. Applications</i>	53
1.5. TRAITEMENT PAR ONDE DE CHOC.....	54
1.5.1. DESTRUCTION ET SÉPARATION DE MATIÈRE PAR LA MÉTHODE PBT.....	54
1.5.1.1. Motivations.....	54
1.5.1.2. Principe délocalisé.....	55
1.5.1.3. Principe localisé.....	55
1.5.2. APPLICATIONS DIVERSES.....	57
1.5.2.1. Pulvérisation de matériaux par les méthodes directe ou indirecte (EDPou EHDP).....	57
1.5.2.2. Réduction de minéraux par la méthode directe ou EDP.....	58
1.5.2.3. Ecroûtage de matériaux par les méthodes EHDP ou EDP.....	58
1.5.2.4. Traitement des eaux par la méthode PBT.....	59
1.6. CONCLUSION DU CHAPITRE.....	60
 <u>CHAPITRE 2. PRÉSENTATION DES DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX</u>	 61
2.1. MISE EN PLACE DU DÉMONSTRATEUR INDUSTRIEL.....	63
2.1.1. GÉNÉRALITÉS ET CONTRAINTES.....	63

2.1.2. FARADISATION ET INSONORISATION.....	65.....
2.1.3. CONDENSATEURS ET ALIMENTATION.....	66.....
2.1.4. CUVE D'ESSAIS ET ÉLECTRODES DE DÉCHARGE.....	68.....
2.1.5. MESURES DE TENSION ET DE COURANT.....	70.....
2.1.5.1. Mesures de tension.....	70.....
<i>a. Diviseur résistif</i>	70.....
<i>b. Diviseur capacitif</i>	72.....
<i>c. Diviseur compensé</i>	73.....
2.1.5.2. Mesures de courant.....	77.....
2.1.6. SÉCURITÉ DU DÉMONSTRATEUR.....	77.....
2.1.7. AUTOMATISATION DU DÉMONSTRATEUR.....	78.....
2.1.7.1. Principe retenu.....	78.....
2.1.7.2. Mise en œuvre de l'automatisation.....	79.....
<i>a. Partie commande</i>	79.....
<i>b. Processus à commander</i>	80.....
<i>c. Chronologie d'une séquence type</i>	80.....
2.2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL DU BANC À FAIBLE ÉNERGIE.....	87.....
2.2.1. MONTAGE EXPÉRIMENTAL.....	87.....
2.2.2. GÉNÉRATEURS HAUTE TENSION.....	88.....
2.2.3. MESURES ÉLECTRIQUES.....	89.....
2.2.3.1. Mesures de tension.....	89.....
2.2.3.2. Mesures de courant.....	90.....
2.2.3.3. Mesures de température.....	92.....
2.2.4. MESURES OPTIQUES.....	92.....
2.2.4.1. Lumière directe.....	92.....
<i>a. Les photomultiplicateurs</i>	92.....
<i>b. Le convertisseur d'images</i>	93.....
2.2.4.2. Lumière indirecte : le strioscope.....	94.....
<i>a. Principe de fonctionnement</i>	94.....
<i>b. Le strioscope du LGE</i>	96.....
2.3. CONCLUSION DU CHAPITRE.....	98.....

CHAPITRE 3. ÉTUDE DE LA DÉCHARGE ÉLECTRIQUE DANS L'EAU 99

3.1.	PRÉSENTATION DU PROBLÈME.....	101.....
3.2.	CONFIGURATION DES ESSAIS.....	104.....
3.2.1.	DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	104.....
3.2.2.	DÉCLENCHEMENT ET SYNCHRONISATION.....	105.....
3.3.	DÉCHARGES SUBSONIQUES.....	106.....
3.3.1.	PREMIÈRE APPROCHE.....	106.....
3.3.2.	ETUDE DÉTAILLÉE DE LA CHRONOLOGIE EN POSITIF.....	108.....
3.3.2.1.	Les enregistrements strioscopiques.....	108.....
3.3.2.2.	Etude de l'apparition des bulles et de la lumière.....	111.....
3.3.2.3.	Analyse d'un claquage.....	114.....
3.3.2.4.	Analyse complète d'une tenue.....	116.....
3.3.2.5.	Etude de la décharge lors d'une tenue, en lumière émise.....	119.....
3.3.2.6.	Analyse de la phase post-arc.....	120.....
3.3.3.	ÉTUDE ÉLECTROTECHNIQUE.....	121.....
3.3.3.1.	Mesures du courant.....	121.....
3.3.3.2.	Définition du paramètre U_{50}	122.....
3.3.3.3.	Reproductibilité des mesures de U_{50}	123.....
a.	Influence de la température θ sur U_{50}	123.....
b.	Influence de la conductivité σ sur U_{50}	124.....
c.	Influence de la hauteur d'eau h sur U_{50}	125.....
3.3.3.4.	Étude de U_{50}	126.....
a.	Influence de la pression P sur U_{50}	126.....
b.	Influence de l'homogénéité du champ électrique sur U_{50}	128.....
3.4.	DÉCHARGES SUPERSONIQUES.....	132.....
3.4.1.	INTRODUCTION.....	132.....
3.4.2.	CONFIGURATION DES ESSAIS.....	132.....
3.4.3.	PHÉNOMÉNOLOGIE.....	133.....
3.4.3.1.	Première approche.....	133.....

3.4.3.2. Développement de la décharge.....	134.....
<i>a. Propagation de la décharge dans l'eau du robinet</i>	134.....
<i>b. Propagation de la décharge dans l'eau distillée</i>	136.....
<i>c. Analyse complète d'une tenue</i>	140.....
3.4.4. COMPARAISON ENTRE LE MODE SUBSONIQUE ET LE MODE SUPERSONIQUE.....	142.....
3.4.4.1. Transition entre le mode subsonique et supersonique.....	143.....
<i>a. Fonctionnement en surtension</i>	143.....
<i>b. Etude de la transition</i>	143.....
3.4.4.2. Initiation des décharges supersoniques.....	145.....
3.4.4.3. Influence des gaz occlus.....	146.....
3.4.4.4. Influence de la pression.....	148.....
3.4.4.5. Discussion et conclusion.....	149.....
<u>CHAPITRE 4. APPLICATIONS DE LA MÉTHODE PBT</u>	<u>153</u>
4.1. INTRODUCTION.....	155.....
4.2. CARACTÉRISATION ÉLECTROTECHNIQUE DU DÉMONSTRATEUR.....	155.....
4.2.1. INFLUENCE DE LA CONDUCTIVITÉ DE L'EAU ET DE LA VALEUR DES CONDENSATEURS.....	155.....
4.2.2. MINIMISATION DE L'ÉNERGIE DE PRÉCLAQUAGE.....	157.....
4.3. ÉTUDE DE LA PRESSION.....	159.....
4.3.1. INTRODUCTION.....	159.....
4.3.2. MESURES DE PRESSION.....	160.....
4.3.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	164.....
4.3.3.1. Influence de la tension de claquage U_b sur la pression.....	164.....
4.3.3.2. Influence de l'énergie E_b sur la pression.....	164.....
4.3.3.3. Influence de la distance capteur-électrodes sur la pression.....	166.....
4.4. ILLUSTRATIONS DE TRAITEMENTS RÉALISÉS AVEC LE DÉMONSTRATEUR EFFITECH.....	168.....

4.4.1. COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES.....	168.....
4.4.2. APPAREILS ÉLECTRIQUES.....	169.....
4.4.3. MATÉRIELS INFORMATIQUES.....	169.....
4.4.4. MATÉRIAUX EN GRAPHITE.....	170.....
4.5. ÉTUDE DU TRAITEMENT ET DE LA PRÉVENTION DES BIOFILMS PAR DÉCHARGES ÉLECTRIQUES.....	171.....
4.5.1. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	171.....
4.5.2. MONTAGE EXPÉRIMENTAL.....	171.....
4.5.2.1. Description générale du montage.....	171.....
4.5.2.2. Le générateur haute tension et la cellule d'essais.....	172.....
4.5.3. EXPÉRIENCES PRÉLIMINAIRES ET RÉSULTATS.....	175.....
4.5.3.1. Définition d'un biofilm.....	175.....
4.5.3.2. Matériel et méthodes.....	176.....
4.5.3.3. Résultats expérimentaux sur un traitement curatif	176.....
<i>a. Bactéries totales</i>	176.....
<i>b. Bactéries cultivables</i>	177.....
<i>c. Impact du traitement curatif sur la teneur en carbone organique du biofilm</i>	178.....
4.5.3.4. Conclusion de l'étude.....	179.....
4.6. CONCLUSION DU CHAPITRE.....	180.....
 <i>C ONCLUSION GÉNÉRALE</i>	 182
 <i>R ÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	 188
 <i>A NNEXES</i>	 202

INTRODUCTION

Les récentes avancées technologiques concernant l'élaboration des fortes puissances électriques pulsées (performances des commutateurs et des générateurs, prix des condensateurs, ...) ont rendu économiquement compétitive l'application de cette technique aux environnements industriels. Initialement destinées aux applications militaires ou scientifiques de très fortes énergies, les puissances pulsées peuvent, maintenant, être adaptées à des applications civiles dans des domaines tels que :

- § le traitement de la nourriture,
- § la médecine,
- § le traitement de pollutions,
- § le recyclage,
- § etc ...

Dans le cas général, ces puissances électriques pulsées sont destinées à générer des décharges électriques (couronnes, Trichels, arc, ...) dont les propriétés spécifiques (réactivité chimique, ionisation, onde de chocs, ...) sont utilisées en fonction de l'application considérée.

Aussi est-il nécessaire d'acquérir une meilleure compréhension des phénomènes liés aux puissances pulsées et de les caractériser par rapport à leurs applications finales, afin d'appliquer cette technique de manière efficace et appropriée.

Ce travail a pour vocation d'apporter sa contribution au développement des connaissances sur ce sujet. Il s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre la société Effitech et le Laboratoire de Génie Electrique de Pau par le biais d'une bourse CIFRE. Dans ce contexte, la société Effitech a proposé de concevoir et de réaliser un démonstrateur industriel 100kJ pour le traitement de déchets par puissances électriques pulsées. Parallèlement à ce travail, une étude expérimentale des décharges électriques de forte puissance dans l'eau et des ondes de pression associées est abordée de manière à optimiser le procédé.

Après avoir rappelé les différents principes de l'élaboration des puissances pulsées, nous présenterons, dans le chapitre 1, les principales applications civiles envisageables avec cette technique pour des énergies de quelques dizaines de kilojoules, c'est-à-dire susceptibles d'être développées au Laboratoire de Génie Electrique.

Nous analyserons, tout d'abord, l'effet des champs électriques pulsés sur les cellules (végétales ou animales) et les bactéries ainsi que les applications industrielles associées.

Le procédé suivant concerne le traitement de gaz par effet couronne et par électrofiltres. Après avoir décrit les principes physiques impliqués dans ces deux procédés, nous exposerons quelques applications relatives à ces traitements.

Enfin, nous développerons le traitement par onde de choc, plus particulièrement destiné aux matériaux solides (concassage, séparation, ...). La méthode utilisée, appelée PBT (Plasma Blasting Technology), constitue le procédé choisi par la société Effitech pour élaborer son démonstrateur.

Le chapitre 2 présente les deux dispositifs expérimentaux que nous avons utilisés durant cette étude. La première partie concerne le démonstrateur industriel : sa conception, son fonctionnement, sa mise en sécurité et son automatisation. La deuxième partie décrit le dispositif expérimental, de plus faible énergie que le démonstrateur industriel, qui nous a permis de réaliser, en association avec divers appareils de mesure électriques et optiques, l'étude physique et électrotechnique de la décharge électrique dans l'eau.

Nous présenterons les résultats expérimentaux issus du banc faible énergie dans le chapitre 3. L'objectif de ce travail est d'étudier le mode d'initiation, puis de propagation, de la décharge électrique dans l'eau. Des mesures optiques et électriques telles que des enregistrements, réalisés au moyen d'un convertisseur d'images ou de photomultiplicateurs, ainsi que des mesures de la tension appliquée mettront en évidence l'existence de deux modes de décharge, à savoir les décharges subsoniques et les décharges supersoniques. Une approche détaillée de l'influence de certains paramètres extérieurs à la décharge (température, conductivité de l'eau, hauteur d'eau, pression, champ...), notamment sur la tension U_{50} , nous permettra d'affiner la compréhension des décharges subsoniques et de mettre en évidence la complexité du mode supersonique.

Enfin, la transition entre les deux modes de décharge sera abordée en fin de chapitre ; par le biais des résultats expérimentaux et d'une étude bibliographique, nous débattrons sur les processus d'initiation et de propagation des décharges supersoniques dans l'eau.

Pour finir, le chapitre 4 présentera deux applications relatives à la méthode PBT. La première concerne le démonstrateur Effitech ; après l'avoir caractérisé de manière électrotechnique et étudié la pression engendrée par la décharge électrique de forte puissance dans l'eau, nous présenterons des exemples d'applications, effectuées avec le démonstrateur, sur le traitement de produits solides. La deuxième illustration des possibilités de la méthode PBT concerne le traitement et la prévention de biofilms par décharges électriques. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire des Matériels Electriques de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France (EDF), les laboratoires de Chimie de l'Eau et de l'Environnement (LCEE) et d'Etudes Aérodynamiques (LEA) de l'Université de Poitiers et le Laboratoire de Génie Electrique (LGE) de Pau. L'objectif de cette action est d'évaluer l'efficacité de l'application des décharges électriques dans l'eau pour le traitement de biofilms présents dans des canalisations.

CHAPITRE 1

AU SUJET DES PUISSANCES PULSEES...

1. Au sujet des puissances pulsées...

L'objet de ce premier chapitre, essentiellement bibliographique, est de faire le point sur les connaissances actuelles concernant les puissances pulsées.

Après avoir présenté cette technique, nous analyserons le principe de la production des puissances pulsées. Nous décrirons, ensuite, différentes applications dans les gaz, les liquides et les solides.

1.1. Introduction aux puissances pulsées

L'appellation « puissances pulsées » (sous entendu électriques) est un terme générique qui recouvre de nombreux aspects dont nous ne traiterons qu'une petite partie dans ce travail.

On peut considérer que les puissances pulsées sont une technique qui utilise des décharges électriques pour concentrer, dans des temps très courts, de l'énergie électrique stockée préalablement.

Deux premiers aspects résultent de cette pseudo définition :

- § l'aspect génération des puissances pulsées,
- § l'aspect utilisation.

Les problèmes liés à la génération des puissances pulsées sont multiples et de grande actualité mais nous ne les développerons pas ici, bien que ce soit une des préoccupations essentielles du laboratoire [*LAC 96, RIV 97, PEC 01*]. Les puissances pulsées peuvent être obtenues avec de forts courants et/ou de fortes tensions. Il existe, notamment pour les forts courants, toute une gamme de générateurs réalisés, le plus souvent, à partir de semi-conducteurs de puissance (thyristors, IGBT, GTO...). Le domaine des hautes tensions est moins classique mais on trouve, néanmoins, un certain nombre d'architectures permettant de générer de tels signaux : transformateurs à lignes, de Tesla, générateurs de Marx... Le problème essentiel de ces générateurs réside, le plus souvent, dans les performances des commutateurs qui y sont associés : ce sont eux qui conditionnent les performances du

générateur par « compression » du temps de restitution de l'énergie électrique stockée conduisant à l'amplification en puissance souhaitée. En effet, le commutateur idéal, susceptible de transmettre une centaine de kilo ampères sous des tensions atteignant la centaine de kilovolts avec des fronts rapides de montée de l'impulsion, suffisamment répétitif et présentant un jitter faible, n'existe actuellement pas. On travaille donc sur la base de compromis imposés par l'application considérée.

Les domaines d'applications des puissances pulsées sont également multiples ; on peut les classer en trois grandes catégories :

- § les applications dans le domaine des lasers, des rayons X et des micro-ondes (laser mega-joule, synchrotron soleil, radars, brouilleurs ...),
- § les applications pour des moyens d'essais spécifiques (tests foudre, CEM, lanceurs électriques...),
- § les applications civiles « tout public » : dépollution, traitement de surface, recyclage, magnétoformage, ...

C'est ce dernier type d'applications que nous allons détailler puisque le sujet de cette thèse en fait partie.

D'un point de vue tout à fait général, l'injection très brutale d'énergie électrique dans des milieux crée des phases de déséquilibre des propriétés physiques, biologiques ou chimiques qui peuvent présenter des caractéristiques très intéressantes. En effet, les décharges électriques peuvent produire, très soudainement, des effets thermiques, des effets photoniques, des effets de chocs ou faire apparaître des radicaux libres qui rendent les milieux très réactifs.

Les applications civiles qui en découlent sont multiples, par exemple en ce qui concerne la dépollution :

- § traitement des gaz : NO_x , SO_x , gaz d'échappement de moteurs classiques ou diesel, dépoussiérage de fumées, ...,
- § traitement des liquides : débactérisation, pasteurisation à froid, extraction de composés cellulaires, floculation de boues, ...,
- § traitement des solides : séparation puis concassage de déchets, réduction en poudre de produits, écroulage de béton, frittage de céramiques...

Comme nous l'avons déjà indiqué, ces traitements s'effectuent par le biais de décharges électriques. Ce terme « décharges électriques » est également assez générique en ce sens qu'il regroupe plusieurs aspects qui peuvent être utilisés séparément ou conjointement :

§ l'aspect « prédécharge » dans lequel on considère que le champ électrique appliqué joue le rôle principal,

§ l'aspect « effet couronne » pour lequel c'est l'ionisation qui prédomine,

§ l'aspect « leader » où la thermalisation commence à jouer un rôle significatif,

§ l'aspect « arc » qui englobe les effets de chocs, lorsqu'il est transitoire, et les effets thermiques lorsqu'il est entretenu (torches à plasma),

§ l'aspect « faisceaux d'électrons » (plasmas non thermiques) dans lesquels les électrons sont très énergétiques,

§ l'aspect décharge à barrière diélectrique.

Par rapport aux procédés classiques, les puissances pulsées présentent un certain nombre d'avantages listés par Lévy *et al* [LEV 92] et Kristiansen [KRI 93] et que l'on peut résumer comme suit :

§ la faible valeur du rapport puissance moyenne/forte amplitude permet :

- d'exciter des effets non linéaires,
- d'exploiter des effets de seuil,
- de minimiser l'effet thermique lorsqu'il est inutile ou néfaste.

§ les avantages liés à la possibilité d'obtenir des impulsions courtes permettent :

- de mieux contrôler, donc de minimiser, l'injection électrique,
- de consommer une faible puissance moyenne, même si les puissances instantanées sont énormes,
- de délivrer brusquement l'énergie puis de laisser évoluer le système, notamment pour certaines réactions chimiques,
- de maîtriser le domaine temporel,
- d'éviter les processus concurrents (phases de leader et d'arc par exemple).

§ l'environnement que nécessitent ces techniques est propre et peu contraignant (pas d'additifs chimiques toxiques) à l'exception de problèmes de CEM qui peuvent apparaître.

Parmi les applications envisageables des puissances pulsées, toutes nécessitent de fortes puissances mais pas obligatoirement de fortes énergies. Nous reportons, tableau I-1, un classement établi par Kristiansen [KRI 93]. Les laboratoires de la taille du LGE sont en mesure de développer de telles applications à condition qu'elles ne dépassent pas quelques

dizaines de kilojoules par impulsion. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons décrire brièvement les applications que nous développons ou que nous serions susceptibles de développer au laboratoire.

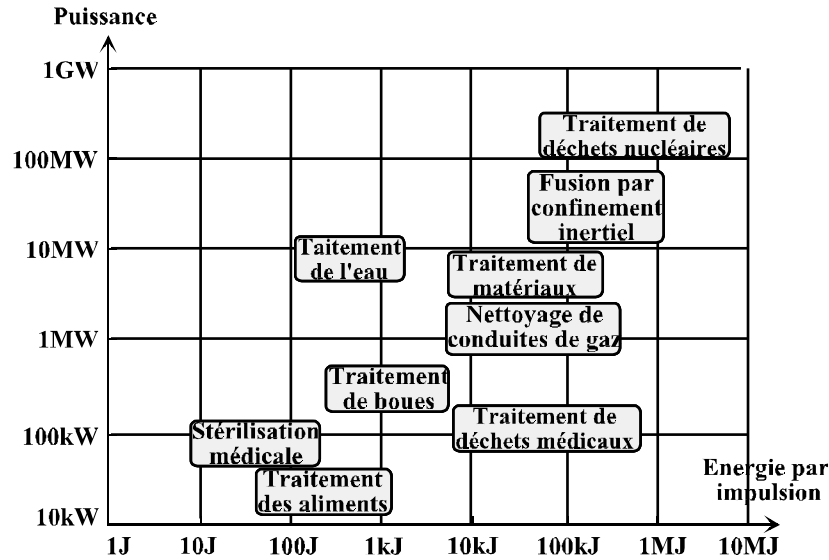


Figure I-1 : Quelques applications des puissances pulsées (d'après Kristiansen)

1.2. La technologie des puissances pulsées

Le principe de la production des puissances pulsées consiste à emmagasiner, lentement, de l'énergie électrique dans un condensateur ou une inductance de stockage et de la restituer à une charge en un temps très bref, à l'aide d'un commutateur de puissance. La figure suivante illustre bien ce principe :

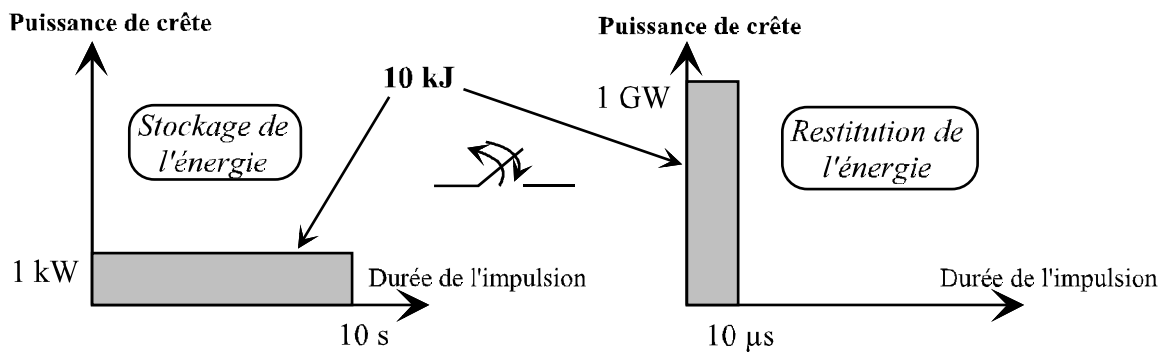


Figure I-2 : Principe de la production de puissances pulsées

Ainsi, par exemple, partant d'une source d'énergie électrique délivrant 1kW, on peut emmagasiner pendant 10s une énergie de 10kJ dans des condensateurs ou des inductances de stockage. Si l'on sait restituer cette énergie en 10 μ s, on délivrera, durant ce laps de temps, une puissance de 1GW.

Le principe général d'un système générateur de puissances pulsées est représenté sur la figure suivante:



Figure I-3 : *Principe général d'un système générateur de puissances pulsées*

La source d'énergie est, généralement, une alimentation haute tension continue, type chargeur de condensateurs. La tension qu'elle fournit peut être bien inférieure à celle disponible aux bornes de la charge.

Le stockage de l'énergie est soit de type capacitif, soit de type inductif. Suivant le type de stockage, la façon dont est restituée cette énergie est différente (figures I-4 et I-5) :

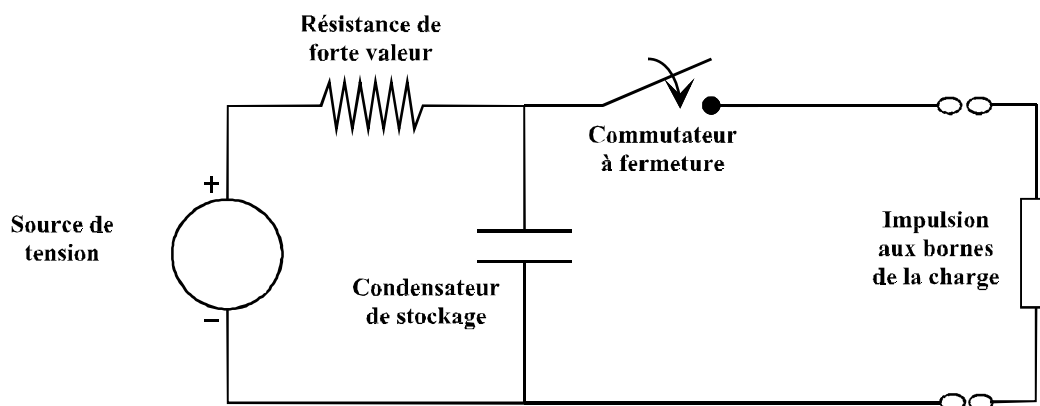


Figure I-4 : *Principe du stockage capacitif*

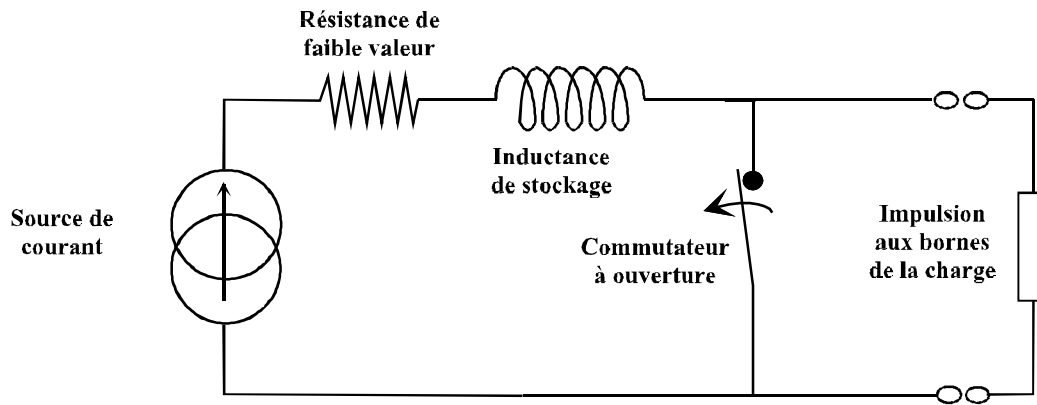


Figure I-5 : Principe du stockage inductif

En ce qui concerne le stockage capacitif, le condensateur de stockage accumule lentement une énergie, égale à $(CV^2/2)$, à travers une forte résistance ; l'énergie est transférée à la charge, presque en totalité, lorsque le commutateur de puissance se ferme.

Pour le stockage inductif, le courant qui circule à travers une faible résistance et la bobine permet à cette dernière d'accumuler une énergie égale à $(L I^2/2)$. Cette énergie est transférée, presque en totalité, à la charge lorsque le commutateur s'ouvre.

Dans le schéma de la figure I-3, nous entendons par « conditionnement de la puissance » le dispositif qui permet de définir les caractéristiques du « signal » électrique qui sera envoyé à la charge : sa nature (courant, tension), sa forme (rectangulaire, trapézoïdale...), sa valeur crête et celles de ses éventuelles oscillations, ses caractéristiques temporelles (temps de front, durée à mi-hauteur, fréquence de répétition). Parmi ces dispositifs, on trouve principalement des réseaux de mise en forme (Pulse Forming Network, PFN), des lignes de mise en forme (Pulse Forming Line, PFL), des transformateurs d'impulsions, des transformateurs à lignes de transmission (T.L.T.), mais également des générateurs de Marx, des générateurs à structure de ligne etc. Le commutateur est alors intégré à la partie « conditionnement ». Dans certains cas particuliers, le conditionnement n'est pas nécessaire et le commutateur seul suffit.

Nous avons vu que suivant la nature du stockage, capacitif ou inductif, on utilise soit des commutateurs à fermeture (stockage capacitif), soit des commutateurs à ouverture (stockage inductif) [MES 95].

Les commutateurs à fermeture sont de quatre types :

- § les commutateurs à gaz,
- § les commutateurs magnétiques,
- § les commutateurs à diélectrique liquide,
- § les commutateurs à diélectrique solide.

Quant aux commutateurs à ouverture, ils se divisent aussi en quatre familles distinctes :

- § les commutateurs à semi-conducteurs,
- § les commutateurs à plasma,
- § les conducteurs explosés électriquement,
- § les thyratrons à injection.

Des conditions plutôt rigoureuses, et parfois contradictoires, sont imposées au commutateur. Il doit être fiable, disposer d'une longue durée de vie et présenter un coût minimal (achat et entretien). D'un autre côté, le commutateur doit être opérationnel pour les fortes puissances pulsées (ou énergies), pour lesquelles de forts courants et/ou de fortes tensions sont nécessaires.

Du point de vue technologique, il existe un choix beaucoup plus important de commutateurs à fermeture que de commutateurs à ouverture. De plus, les commutateurs à fermeture sont beaucoup plus simples à réaliser, donc beaucoup plus fiables et bien moins chers, que ceux à ouverture.

Durant ce travail, nous avons exclusivement utilisé des générateurs à stockage capacitif associés à des commutateurs à fermeture.

1.3. Champs électriques pulsés en agro-alimentaire

1.3.1. Introduction

La demande actuelle des consommateurs s'oriente, de plus en plus, vers des produits alimentaires ayant les caractéristiques suivantes :

- § produits aussi proches que possible des produits frais,
- § produits rapides à préparer,

§ durée de conservation relativement longue.

Pour répondre à cette préoccupation, les industriels du secteur utilisent actuellement, principalement, des procédés thermiques, dont les inconvénients sont connus et significatifs :

§ dégradation des propriétés sensorielles,

§ perte de certaines propriétés nutritionnelles,

§ altération irréversible de la fonctionnalité de certaines molécules.

Ces inconvénients entraînent des différences qualitatives importantes entre les produits frais et les produits conservables.

En réponse à cette antinomie entre qualité et conservabilité, apparaissent actuellement des traitements alternatifs non thermiques. Il s'agit, essentiellement, de techniques mettant en jeu des hautes pressions, de la lumière pulsée (principalement de l'ultraviolet) ou des champs électriques pulsés. Ces nouvelles technologies font aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches, à la fois fondamentales et appliquées. Parmi ces technologies, seules émergeront celles répondant aux souhaits des consommateurs et présentant les caractéristiques suivantes :

§ souplesse d'utilisation (facilité de mise en œuvre, capacité à traiter différents produits ...),

§ coûts d'investissement et d'exploitation raisonnables,

§ sécurité et reproductibilité du traitement.

Parmi ces techniques, celles mettant en jeu les champs électriques pulsés font partie des préoccupations du LGE et nous allons en développer quelques aspects. La technique des champs électriques pulsés (« Pulsed Electric Fields » ou PEF) semble répondre de manière satisfaisante, et à un coût raisonnable, aux besoins évoqués précédemment. Les principales applications concernent l'extraction de métabolites ou de composés cellulaires (pigments, jus, ...) et la réduction de la contamination bactérienne pour augmenter la durée de vie des denrées alimentaires.

Cette technique permet ainsi la pasteurisation d'aliments [MIL 01]:

§ en utilisant peu d'énergie,

§ sans échauffement, ce qui permet de conserver leur qualité.

Contrairement aux traitements thermiques de pasteurisation, cette technique n'induit :

§ ni de modification chimique des constituants des produits traités (préservation des arômes, maintien de l'activité enzymatique),

§ ni de dénaturation des vitamines.

1.3.2. Principe de l'électroporation

Les cellules biologiques sont constituées d'un cytoplasme entouré d'une membrane. Le cytoplasme peut être considéré comme un conducteur électrique et la membrane, constituée d'une double couche lipidique, comme un isolant. Dans les problèmes qui nous intéressent, ces cellules biologiques font partie d'un milieu liquide (eau, lait ...) ou solide (viande) plus ou moins conducteur. L'application d'un champ électrique crée une polarisation de la membrane de la cellule qui se comporte comme un condensateur (figure I-6).

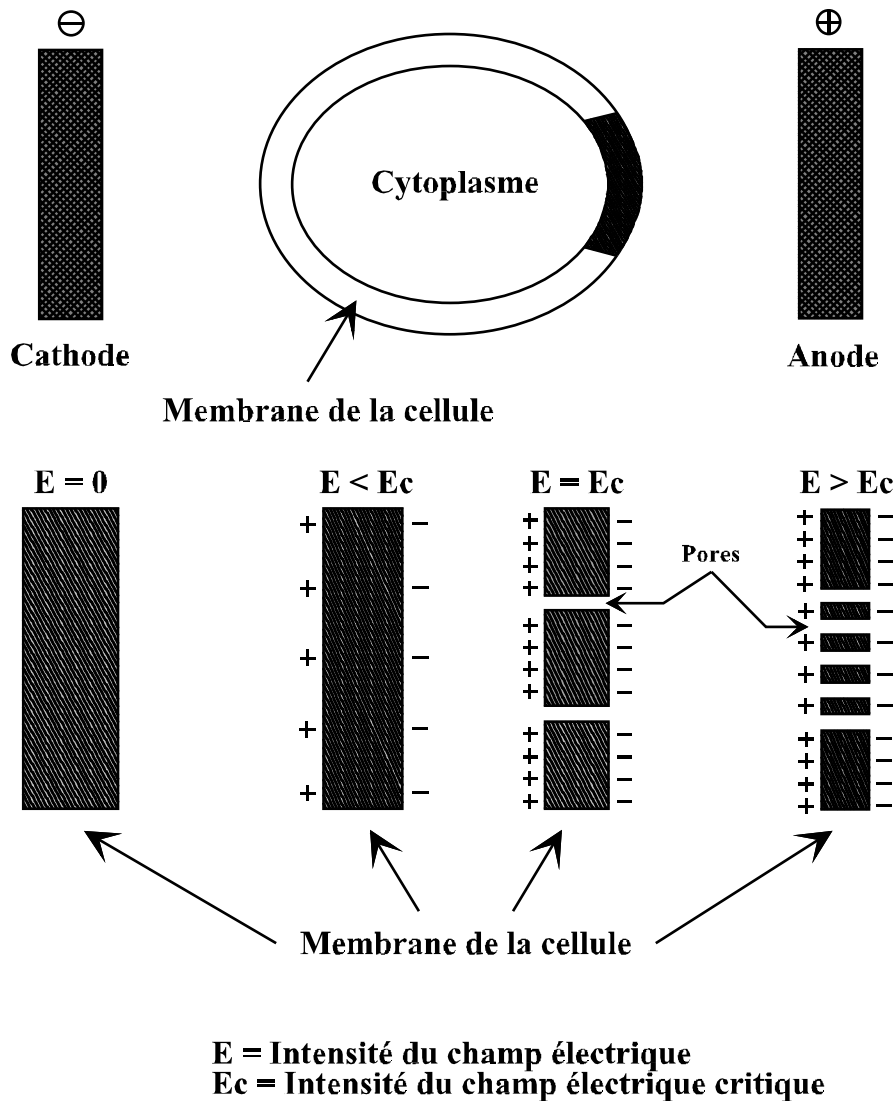


Figure I-6 : Principe de l'effet létal d'un champ électrique

Lorsque le champ électrique appliqué croît, le nombre de charges électriques, de part et d'autre de la membrane, augmente ainsi que la pression électrostatique exercée sur

certaines parties de la membrane. L'épaisseur de cette dernière diminue alors, entraînant une fragilisation qui peut conduire à l'apparition de pores.

Cette électroporation apparaît pour une valeur critique d'environ 1 Volt [POT 95], ce qui correspond à un champ appliqué de l'ordre de la dizaine de kilovolts par centimètre (les biologistes parlent plutôt de potentiel, ici transmembranaire, alors que les électroniciens préfèrent raisonner en termes de champ) [GRA 96, VEG 96, BRU 97, SCH 00, FRA 01].

L'électroporation est réversible tant que le champ appliqué n'atteint pas de valeurs trop élevées, ou n'est pas appliqué trop longtemps. Dans le cas contraire, l'électroporation entraîne la mort de la cellule. Ce phénomène d'électroporation peut donc présenter deux applications : la débactérisation et l'extraction de macromolécules du contenu cellulaire.

De nombreuses études, portant sur une grande variété de bactéries, ont été effectuées et nous en verrons quelques exemples ultérieurement. Dans ces études, les résultats sont généralement présentés sous la forme de courbes portant en ordonnées la fraction de cellules survivantes d'une bactérie donnée en fonction, en abscisse, de paramètres tels que :

- § l'amplitude du champ électrique appliqué,
- § la durée du traitement,
- § la fréquence de répétition des impulsions,
- § la durée à mi-hauteur des impulsions, etc...

La plupart de ces courbes ont l'allure de celles représentées figure I-7 c'est-à-dire qu'elles font, généralement, apparaître un effet de seuil.

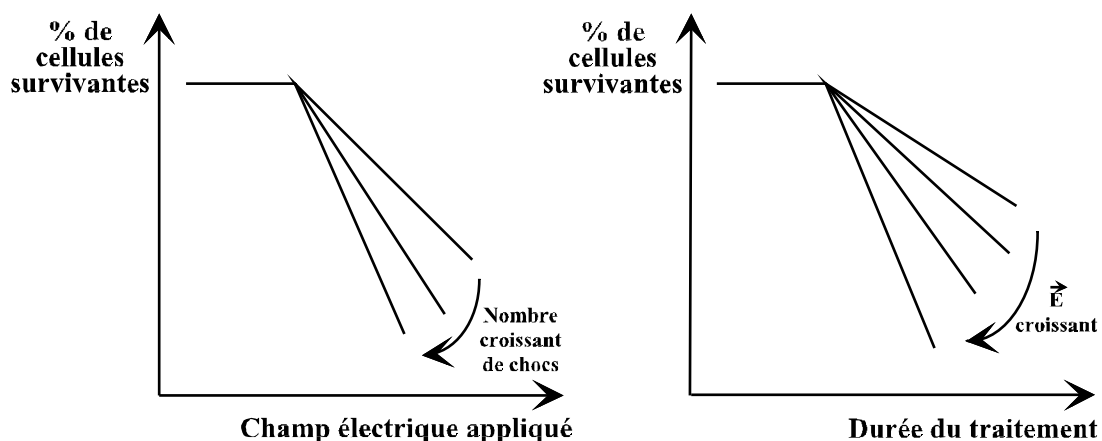


Figure I-7 : Principe de l'apparition de l'effet de seuil

Selon Zimmerman *et al* ainsi que Martín *et al* [ZIM 73, MAR 94], l'inactivation bactérienne, sous l'influence d'un champ électrique, dépend initialement des propriétés intrinsèques de la cellule telles que la résistivité électrique et le potentiel transmembranaire. Le degré de perméabilité de la membrane dépend, en outre, de l'amplitude et de la durée du champ appliqué ; ainsi, pour une bactérie de diamètre $d = 1\mu\text{m}$, le champ électrique requis pour une rupture diélectrique de la membrane est environ de 10kV/cm . Pour une valeur inférieure au champ critique, le champ électrique n'a aucun effet sur la viabilité du micro-organisme (notion de seuil) [SCH 00]. Cette valeur est donnée pour des durées d'impulsions supérieures ou égales à $3\mu\text{s}$.

Avec de telles impulsions, l'énergie requise pour réduire d'une unité logarithmique la concentration en *Escherichia coli* (bactéries pathogènes témoins de la *Salmonelle* et de *Shigella*) d'un milieu donné est de 10J/cm^3 [SCH 00]. Des études réalisées avec des impulsions de durée inférieure à la micro-seconde (durée encore supérieure au temps de charge de la membrane de la cellule, estimé à 30ns) montrent que de telles impulsions exigent, certes, un champ plus fort mais que l'énergie consommée est beaucoup moins importante. L'utilisation d'impulsions sub-microseconde pour la débactérisation des aliments semble donc être une technique rentable. Une étude, effectuée sur un milieu contenant des *Escherichia coli* soumis à des impulsions de 60ns , a montré que, pour réduire la concentration de ces bactéries d'une unité logarithmique, il faut fournir un champ de 140kV/cm . L'énergie correspondante n'est alors que de 1J/cm^3 [SCH 97]. Généralement, on peut estimer que les valeurs caractéristiques des énergies requises pour atteindre une réduction d'une unité logarithmique dans la concentration en bactéries sont comprises entre 1 et 100J/cm^3 [SCH 00].

Pour une décontamination bactérienne complète, des centaines d'impulsions sont généralement requises. En fait, d'après les travaux de Sales et Hamilton [SAL 67], on peut estimer que le degré de décontamination bactérienne est lié au produit du nombre d'impulsions appliquées par la durée de l'impulsion, c'est-à-dire au temps total pendant lequel la tension est appliquée réellement à la cellule. C'est un consensus adopté par la plupart des scientifiques et des ingénieurs. Cependant, un rapport de Matsumoto *et al* [MAT 91] indique que les premiers chocs sont plutôt inefficaces et qu'un nombre minimum d'applications est nécessaire pour obtenir un effet irréversible.

L'efficacité du traitement par champs électriques pulsés dépend étroitement des paramètres microbiologiques tels que l'espèce du micro-organisme et le degré de sa phase de croissance. C'est pourquoi cette technique doit être optimisée au cas par cas.

1.3.3. Effet des champs électriques pulsés sur les cellules biologiques

1.3.3.1. Bactéries sous forme végétative

L'effet létal des champs électriques pulsés sur des suspensions de bactéries végétatives et de levures a été montré par Sale et Hamilton [SAL 67], qui concluent que la mort cellulaire n'est pas due à la chaleur ou à l'électrolyse mais à l'éclatement de la cellule.

Le tableau I-1 dresse une liste du taux de réduction de divers micro-organismes avant et après traitement par champs électriques pulsés [HEN 01] et montre ainsi le réel effet de cette technique sur les micro-organismes:

<i>Micro-organismes</i>	<i>Matrices</i>	<i>Réductio n (log)</i>	<i>Paramètres</i>
<i>Escherichia coli</i>	Lait UHT	4	22 kV.cm ⁻¹ / 20 imp. / 45-50°C
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Tampon	3.5	20 kV.cm ⁻¹ / 30 imp. 36 μs
<i>Salmonella dublin</i>	Lait	4	37 kV.cm ⁻¹ / 40 imp. 36 μs / 63 °C
<i>Lactobacillus delbrueckii</i>	Ultra Filtra Lait	4 / 5	16 kV.cm ⁻¹ / 40 imp. 200 μs / 63 °C
<i>Bacillus subtilis</i>	Soupe de pois	5	33 kV.cm ⁻¹ / 30 imp. 2 μs / 5.5 °C
<i>Staphylococcus aureus</i>	Ultra Filtra Lait	3 / 4	16 kV.cm ⁻¹ / 40 imp. 200 μs / 30 °C
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Jus de pomme	7	25 kV.cm ⁻¹ / 150 imp. 2-20 μs / 63 °C
<i>Candida albicans</i>	Tampon	4.5	20 kV.cm ⁻¹ / 30 imp. 36 μs

Tableau I-1 : Quelques exemples de taux de réduction de micro-organismes

Schoenbach *et al* [SCH 00] ont mis en évidence, expérimentalement, que le champ électrique ne cause aucun effet sur la viabilité des micro-organismes si l'amplitude de l'impulsion reste en dessous d'une certaine valeur, appelée champ électrique critique E_c . La valeur de ce champ critique augmente si la durée de chaque impulsion décroît. En outre, ces mêmes auteurs ainsi que Pothakamury *et al* [POT 95] montrent, qu'en général, l'inactivation des micro-organismes est d'autant plus importante que l'intensité du champ électrique ($E > E_c$) et/ou le nombre d'impulsions sont grands (c'est ce qui a été représenté figure I-6). De même, d'autres facteurs, tels que la température du traitement, le pH, la force ionique et la conductivité du milieu contenant les micro-organismes, affectent l'inactivation microbienne.

Il faut noter que Schoenbach *et al* suggèrent d'envisager, du fait des fortes énergies requises (100 à 400 Joules / cm^3), un traitement combiné, par exemple un traitement thermique allié à un traitement par PEF, pour la pasteurisation complète des aliments.

1.3.3.2. *Spores*

Des essais menés par Knorr *et al* [KNO 94] ainsi que par Grahl *et al* [GRA 96] sur des spores de *Bacillus cereus* et de *Bacillus nivea* dans du lait, soumis à 30 impulsions de durée $t_{\max} = 4\mu\text{s}$ chacune, pour un champ appliqué de 22,4kV/cm et une énergie maximale par impulsion $E_{\max} = 500\text{J}$, n'ont pu montrer d'effet des champs électriques pulsés sur les endospores et les ascospores.

Aussi, il n'est pas envisageable d'utiliser cette technique pour stériliser des produits contenant de tels éléments.

1.3.3.3. *Cellules végétales ou animales*

L'intensité du champ électrique requise pour la création de pores cellulaires est inversement proportionnelle au diamètre cellulaire. Il est donc beaucoup plus facile d'induire la formation de pores dans les cellules bactériennes que dans les cellules végétales ou animales.

1.3.4. Applications industrielles des champs électriques pulsés

Comme nous l'avons déjà mentionné, deux grandes catégories d'applications des PEF peuvent être distinguées en agro-alimentaire :

- § l'extraction de composés cellulaires,
- § la réduction de la contamination bactérienne pour augmenter la durée de vie des produits.

1.3.4.1. Extraction de composés cellulaires

Les recherches actuelles s'orientent, principalement, vers le traitement de cellules végétales pour l'extraction de composés aromatiques, de pigments ou de jus. Les principales expériences menées à ce jour visent à évaluer les rendements d'extraction des pigments et des jus tout en maximisant la durée de vie des cellules.

a. Extraction de pigments

De nombreuses études ont été réalisées et il ressort de ces travaux que l'efficacité des champs électriques pulsés sur la perméabilisation cellulaire dépend étroitement du type de cellules. Ainsi, par exemple, en ce qui concerne l'extraction d'amaranthine (pigment provenant des cellules de *Chenopium rubrum*), une relation a pu être établie entre la valeur du champ, le nombre d'impulsions, la mortalité des cellules et l'extraction de pigments. Un traitement par 10 impulsions créant un champ d'amplitude $1,6\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ à température ambiante permet l'extraction de près de 100% du contenu cellulaire en amaranthine. Néanmoins, dans tous les cas, lorsque plus de 30% des pigments ont été extraits, la plus grande partie des cellules est inactivée.

b. Extraction de jus

Knorr et al [KNO 94] rapportent des travaux menés par Flaumenbaum dans lesquels une purée de pomme, soumise à un traitement par champs électriques avant pressage, a vu son rendement d'extraction en jus augmenté de 12% par rapport aux procédés conventionnels. De plus, le jus extrait est plus clair et moins oxydé que celui extrait des échantillons traités par voie thermique ou enzymatique.

De même, le traitement de carottes râpées par PEF ($0 < E < 2,6\text{kV}/\text{cm}$) puis pressées, aboutit à un rendement en jus maximal de 76%, à comparer aux 51% obtenus pour le témoin.

1.3.4.2. Traitement de préservation des denrées alimentaires

Les applications potentielles de cette technologie incluent la majeure partie des boissons et jus de fruits, le lait, les œufs liquides, les sirops, les sauces ou purées et les soupes.

a. Destruction de la flore naturelle du lait frais

Des échantillons de lait de même origine ont été traités à 55°C par champs électriques pulsés ainsi que par des procédés classiques de pasteurisation. Le tableau I-2 montre l'efficacité du traitement PEF comparé à trois traitements thermiques différents, pour la flore totale, les bactéries lactiques et les coliformes (les unités ne sont pas précisées dans l'article cité en référence). On constate que, dans tous les cas, la teneur en spores n'est quasiment pas modifiée.

Micro-organismes	Traitement thermique 55°C, 16 s	Traitement Thermique 63.3 °C, 16 s	Traitement Thermique 73 °C, 16 s	Traitement PEF 55 °C, 15 s
Flore totale	8400	2600	89	50
Flore lactique	3400	900	28	1
Coliformes	450	350	< 1	<1
Spores	22	10	13	10

Tableau I-2 : Efficacité du traitement PEF comparé au traitement thermique [FRA 01]

De même, une installation pilote permettant de traiter du jus d'orange par des champs pulsés avec une réduction microbienne au minimum égale à 3,6 unités logarithmique a été conçue par Qiu *et al* [QIU 97]. Cette valeur correspond à 99% de réduction de la flore naturelle microbienne.

Il est intéressant de noter qu'une étude menée par Grahl *et al* [GRA 96] montre que l'effet des PEF sur les composants biochimiques du lait cru (lipases et vitamine C) n'a été constaté qu'avec des impulsions de très forte énergie ($Q > 200\text{kJ/l}$, $E = 22\text{kV/cm}$). Les autres composés tels que la phosphatase alcaline, la peroxydase, la vitamine A ainsi que les protéines du lactosérum ne semblent pas affectés par le traitement.

Des évaluations sensorielles sur du lait et du jus d'orange ont permis de constater que le traitement par PEF n'affecte pas, ou très peu, les caractéristiques organoleptiques des denrées.

b. Destruction des bactéries pathogènes

De nombreuses expérimentations sur des suspensions de germes pathogènes ont démontré l'efficacité du traitement des champs électriques pulsés (voir aussi plus haut le tableau I-1).

Ainsi, Vega-Mercado *et al* [VEG 96] ont inoculé 10^7 CFU/ml d'*Escherichia coli*, à une purée de pois. Les résultats montrent que la population bactérienne est réduite de plus de 6 unités logarithmiques après application d'un champ électrique de 28kV/cm, pulsé à une fréquence de 4,3Hz pour une température de 53-55°C.

La même opération, effectuée sur des œufs battus, montre qu'un champ électrique pulsé de 16kV/cm, à une température de 37°C, réduit la population viable d'*Escherichia coli* de 5 à 6 unités logarithmiques après un traitement de 100 impulsions de durée de 2 à 4µs [MAR 97].

Des expériences similaires ont été menées sur du jus d'orange, du jus de pomme [QIN 95, QIN 96] et du lait, permettant de conclure à l'efficacité du traitement par champs pulsés pour des traitements de type pasteurisant, c'est à dire éliminant toute forme végétative de micro-organisme.

1.3.4.3. Applications diverses

D'autres études, plus exotiques, ont été conduites et font partie des applications prometteuses qui ont recours à cette technique.

Ainsi les champs électriques pulsés peuvent être utilisés pour « assommer » des espèces aquatiques voire provoquer leur mort.

Cette méthode peut donc être appliquée pour prévenir l'attachement de larves d'organismes polluants sur des parois, par exemple dans les conduites de systèmes de refroidissement des installations de puissance [SCH 97] (biofouling prevention). A ce sujet, une étude a été conduite en 1994 aux USA pour déterminer si les champs électriques pulsés

pouvaient permettre la réduction du taux de colonisation de la moule *Zebra* dans les Grands Lacs d'Amérique du Nord ; les larves de cette dernière sont supposées provenir des ballasts des bateaux en provenance des ports Européens. Cette moule s'est répandue dans les bassins des Grands Lacs et dans les différents systèmes d'écoulement des eaux [SMY 95]. Le but du traitement est de tuer les larves nuisibles avant qu'elles soient introduites dans un écosystème différent. Du point de vue expérimental, l'application d'un champ électrique de 3kV/cm, avec des durées d'impulsion de 770ns pour un taux de répétition de 12Hz, dans une cellule d'essais remplie d'eau de la rivière *Elisabeth*, donne une protection de 99% contre la pollution de l'eau par ces moules [SCH 97bis]. D'autres données montrent qu'il serait possible de traiter environ 250 000 litres d'eau avec une énergie de 1kWh.

De même, le CEA Pierrelatte [CEA 02] a mis au point un générateur bipolaire à impulsions 30kV éprouvé, tolérant aux courts-circuits et à très faible coût de maintenance, permettant de traiter de l'eau et des boues d'épuration. Le principe est basé sur la génération d'impulsions d'environ 24kV entre deux électrodes détruisant les bactéries présentes dans les différents liquides. Selon le CEA, chaque impulsion ne traite qu'un faible volume, mais le générateur peut travailler à des fréquences de plusieurs dizaines de kHz. Le volume traité espéré est de 360m³/heure dans la version pilote. Ce procédé est bien adapté aux milieux opaques de type boues, assurant à la fois la stabilisation et l'hygiénisation du milieu traité.

1.4. Traitements par effet couronne et par électrofiltres

1.4.1. Introduction

Ces deux traitements utilisent des propriétés différentes de phases distinctes des décharges électriques dans les gaz : l'effet couronne et les impulsions dites de Trichel

1.4.1.1. L'effet couronne

Une des phases essentielles, impliquée dans les décharges électriques, est ce que l'on appelle « l'effet couronne » et sa conséquence la plus marquante est l'ionisation du milieu dans lequel il se produit.

Pour expliquer brièvement cet effet couronne, considérons un milieu gazeux, par exemple de l'air, compris entre deux électrodes dont l'une est portée à la haute tension tandis que l'autre est reliée à la masse.

L'apparition de l'effet couronne résulte du phénomène d'avalanche électronique qui dégénère en streamer : lorsque le champ électrique appliqué est suffisamment élevé ($> 30\text{kV/cm}$ pour l'air à température ambiante et à pression atmosphérique), des électrons, appelés électrons germes, sont susceptibles d'ioniser des molécules neutres. Il y a donc multiplication, ou avalanche, électronique. Si le champ de charge d'espace induit par les ions ainsi créés devient du même ordre de grandeur que le champ appliqué, sa contribution n'est plus négligeable dans le développement d'avalanches secondaires qui s'accélère alors conduisant à l'apparition de streamers. Ces derniers sont donc, en fait, des avalanches dégénérées. Ils se manifestent, visuellement, par un ensemble de « filaments » lumineux de quelques dizaines de microns de diamètre se déplaçant à des vitesses de 10^6 m/s environ. Les streamers doivent donc être considérés, dans le problème qui nous intéresse, comme des éléments de forte ionisation. L'ensemble des streamers constitue ce que l'on a coutume d'appeler une couronne (de streamers).

Le phénomène que nous venons de décrire doit être affiné lorsque le champ géométrique n'est pas homogène, ce qui se produit notamment lorsque les rayons de courbure des électrodes sont différents (par exemple en géométrie fil-cylindre). Dans ce cas, le fait que l'électrode de plus faible rayon de courbure, c'est-à-dire celle où le champ électrique est le plus élevé, d'où partiront les streamers, soit portée à un potentiel positif ou négatif par rapport à l'autre électrode est fondamental. Supposons, pour simplifier le vocabulaire, que l'électrode de grand rayon soit à la masse ; l'autre électrode est donc une anode lorsqu'on lui applique une tension positive ou une cathode lorsqu'on lui applique une tension négative. D'après ce que l'on a vu précédemment, tout le « travail » d'ionisation est effectué par les électrons qui se déplacent sous l'effet du champ ; or, en champ hétérogène, ces électrons vont vers des champs de valeurs absolues de plus en plus élevées lorsqu'on est sous polarité positive et vers des champs de plus en plus faibles lorsqu'on est sous polarité négative. Bien que les conditions d'ionisation soient les mêmes quelle que soit la polarité (existence d'un électron germe dans un champ électrique de valeur suffisamment élevée), un streamer se développera donc beaucoup plus facilement sous polarité positive que sous polarité négative. De plus, sous polarité positive, un streamer laissera, par ionisation en extrémité de couronne, un ensemble d'ions positifs alors que, sous polarité négative, il générera, par attachement, un ensemble d'ions négatifs en extrémité de couronne. Compte tenu de ces différences de comportement,

qui sont en fait plus complexes que ce que l'on vient de décrire, on a l'habitude de parler de streamers positifs (et de couronnes positives) et de streamers négatifs pour les différencier. Pratiquement, il faudra une tension appliquée bien plus élevée en polarité négative qu'en polarité positive pour créer des couronnes de dimensions comparables. On notera, pour terminer, que les streamers positifs et les streamers négatifs se dirigent de l'électrode de faible rayon de courbure vers l'électrode de fort rayon. Ils se déplacent donc dans le même sens que les électrons sous polarité négative et en sens inverse sous polarité positive.

Lorsqu'on utilise l'effet couronne pour traiter un produit, c'est la réactivité chimique du milieu ionisé qui est utilisée afin de modifier la structure ou la nature de certains composés du produit.

1.4.1.2. Les impulsions de Trichel

Lorsque l'on étudie plus finement la décharge négative en géométrie pointe – plan sous tension continue, on se rend compte que l'effet couronne n'est pas le premier phénomène à se manifester. En effet, quand on augmente progressivement la différence de potentiel appliquée, on voit se développer, à partir d'un certain niveau de tension, des streamers isolés (preonset streamers) suivis d'un régime d'impulsions dites de Trichel. Ces dernières sont, en fait, des avalanches électroniques qui se développent au voisinage de la pointe en créant des ions négatifs. Ces ions négatifs ont un effet stabilisateur temporaire qui fait que les impulsions de Trichel se produisent à une fréquence qui augmente avec la tension appliquée. Lorsque cette dernière devient trop élevée, il y a émission d'une couronne négative.

Sans entrer davantage dans le détail, on peut considérer, pour le problème qui nous concerne, les impulsions de Trichel comme une source régulée d'ions négatifs.

Un électrofiltre utilisera ces ions négatifs en les faisant migrer au moyen d'un champ électrique.

1.4.2. Les filtres électrostatiques

Les premiers filtres électrostatiques ont été réalisés par le Docteur Frédéric Gardner Cottrel, dès 1907, pour piéger les rejets de vapeurs d'acide sulfurique issues des usines chimiques. Très rapidement, aux Etats-Unis et au Canada, de nombreuses installations de l'industrie lourde ont été équipées d'électrofiltres. Le phénomène s'amplifia autour des

années 20 avec l'arrivée des chaudières à charbon industriel. Ces dernières produisent de grosses quantités de fumées contenant de très fines particules impossibles à piéger par des procédés mécaniques.

1.4.2.1. Principe des filtres électrostatiques (électrofiltres)

Des gaz, provenant le plus souvent d'une chambre de combustion et chargés de poussières indésirables, sont dirigés à travers une enceinte soumise à un champ électrique orienté perpendiculairement au déplacement des gaz. Ce champ électrique ionise, par le biais d'impulsions de Trichel, des particules neutres environnantes puis les entraîne vers les parois « de collecte » de l'enceinte. Durant leur migration, ces ions interagissent avec les poussières et les précipitent contre les parois. Les gaz sortent ensuite de l'enceinte débarrassés des impuretés. Les poussières collectées sont décollées mécaniquement des parois de l'enceinte par vibrations, pour être traitées ultérieurement. Le champ électrique est généré par une différence de potentiel appliquée entre les parois de l'enceinte et une, ou plusieurs, électrodes qualifiées d'émissives et localisées à l'intérieur de l'enceinte. La tension appliquée doit être supérieure à la tension dite d'ionisation mais ne doit pas dépasser celle d'initiation de l'effet couronne qui conduirait au claquage (arc) [BER 94].

Du point de vue de la conception mécanique, il existe deux principaux types d'électrofiltres haute tension (figure I-8) :

§ l'électrofiltre à collecteur cylindrique, type cheminée : une électrode rigide, soumise à un potentiel négatif, est placée suivant l'axe du cylindre. Les parois du cylindre sont généralement référencées à la terre.

§ l'électrofiltre à collecteur plat : cette configuration est la plus répandue dans l'industrie. Le collecteur est constitué de plaques parallèles entre lesquelles sont situées des électrodes portées à la haute tension négative.

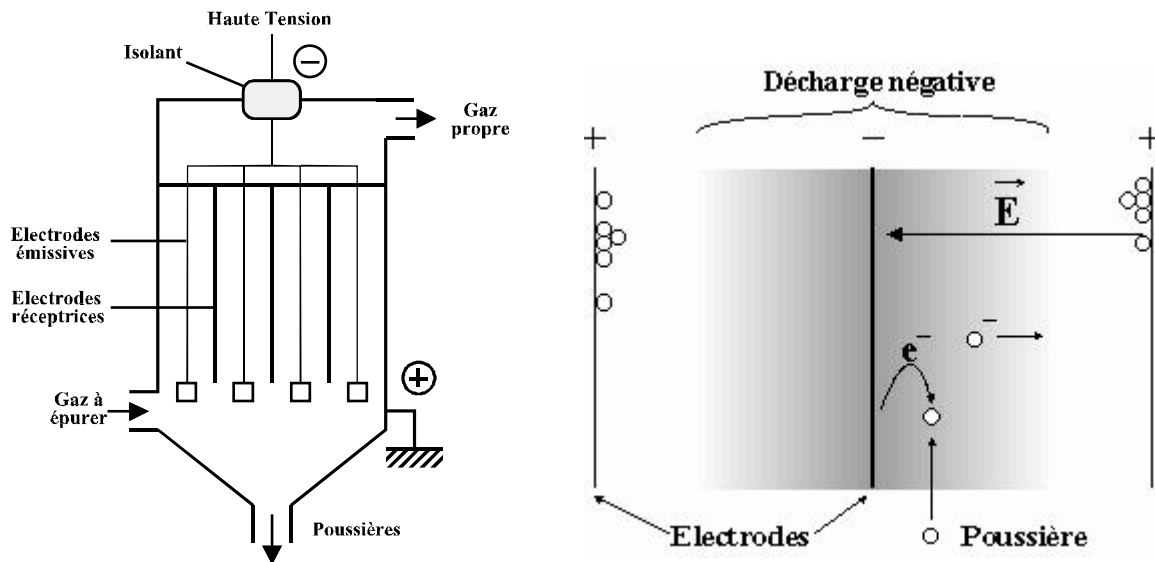


Figure 1-8 : Principe de fonctionnement d'un électrofiltre à collecteur cylindrique

Les électrodes émissives sont constituées de fils, de tubes ou de rubans rigides sur lesquels sont installées des pointes ou des aspérités. Ces aspérités provoquent des élévations locales du champ électrique : c'est « l'effet de pointe » qui améliore les performances du montage [REE 99]. Les électrodes sont tenues solidement à leurs extrémités, pour éviter toute vibration, réduisant ainsi les risques de rupture. Pour les électrodes cylindriques, plus le diamètre de l'électrode est faible, plus le champ électrique est important et plus le système est susceptible d'initier des décharges.

Les parois des électrodes réceptrices sont profilées de telle sorte que les poussières collectées ne soient pas réentraînées. Elles doivent aussi présenter des zones non soumises au mouvement des gaz. C'est dans ces zones de non turbulence que les particules peuvent tomber, en permanence, par gravité vers les trémies de réception.

Le maintien des performances de l'électrofiltre dans le temps est, en principe, essentiellement lié à la propreté des plaques réceptrices. Lorsque l'accumulation de particules sur les électrodes réceptrices est trop importante, une couche isolante peut se former et le courant débité par les électrodes émissives ne s'écoule plus à la terre. Une différence de potentiel apparaît alors entre la couche isolante et l'électrode réceptrice, formant ainsi un condensateur naturel. Dans ces conditions, au bout d'un moment, une étincelle se produit, entraînant l'apparition d'un arc entre l'électrode émissive et l'électrode réceptrice ; cet arc peut provoquer un court-circuit sur l'alimentation du système (la résistivité des particules piégées est un élément prépondérant dans l'apparition de ce phénomène).

1.4.2.2. *Description du phénomène électrostatique*

Comme nous l'avons dit précédemment, la phénoménologie de la précipitation électrostatique comporte plusieurs phases :

- § le développement des impulsions de Trichel,
- § la migration des ions vers les parois de l'enceinte,
- § les collisions de ces ions avec les poussières qu'ils chargent,
- § la collection de ces poussières sur l'électrode prévue à cet effet.

Nous avons décrit brièvement les impulsions de Trichel dont le rôle essentiel consiste à ensemercer d'ions le gaz à traiter. Analysons, maintenant, les mécanismes de transport dans l'électrofiltre qui résultent de deux phénomènes distincts :

- § le « transport par le champ », qui est le phénomène principal : il collecte les poussières dont le diamètre est supérieur à $0,5\mu\text{m}$;
- § le « transport par diffusion », qui permet la capture des poussières d'un diamètre inférieur à $0,2\mu\text{m}$. Entre ces deux dimensions, les deux principes contribuent à la récupération des particules.

- Le transport par le champ :

La présence de particules de poussières de tailles suffisantes ($> 0,5\mu\text{m}$) distord des lignes de champ de telle sorte que ces dernières passent à travers les particules. Les ions qui migrent le long de ces lignes de champ viennent donc en contact de ces particules et y restent collés par la force électrostatique. Lorsque les particules se chargent, les lignes de champ sont déviées en sens inverse de ce qui se produisait initialement et finissent par ne plus passer à travers les particules. On atteint donc une charge limite dont la valeur est fonction de l'amplitude du champ électrique et du diamètre de la particule. Ce mécanisme, qualifié de « dépendant du champ », est d'autant plus marqué que les particules sont grosses.

- Le transport par diffusion :

Les petites particules ($< 0,2\mu\text{m}$) n'ont pas la taille suffisante pour dévier les lignes de champ et attirer « électriquement » les ions. Ce sont des collisions avec ces derniers qui sont à l'origine de leur charge. Ce phénomène de collision semble être contrôlé par les mouvements thermiques des ions. Une fois les particules chargées, le processus de dérive est le même que précédemment.

1.4.2.3. *Applications relatives aux électrofiltres*

Les électrofiltres présentent l'avantage de n'occasionner que de très faibles pertes de charge (50-100Pa) et sont donc particulièrement bien adaptés au traitement de très grands débits gazeux.

Les applications industrielles de ce type regroupent, principalement, les chaudières à charbon, les incinérateurs de déchets industriels et d'ordures ménagères, la sidérurgie, les industries chimiques et pétrolières, les cimenteries, etc... Les électrofiltres associés à ces applications sont volumineux (les plaques de captation des poussières peuvent atteindre 15 à 20m de long) et fonctionnent sous tension continue ou lentement variable.

Si l'on cherche à modifier ces gros dispositifs déjà existants de façon à les faire fonctionner sous tensions pulsées brèves, on va se heurter au problème suivant : pour favoriser l'ionisation et éviter les passages à l'arc intempestif, les impulsions de tension devront présenter des fronts raides (~ 50ns) et des largeurs à mi-hauteur faibles (~ 500ns). Compte tenu des dimensions des électrodes des cellules de précipitation, on peut s'attendre à une dégradation du front de montée de l'onde de tension appliquée et à un effet de propagation qui limiteront l'efficacité du générateur. Il faudrait donc prévoir une partition de chaque cellule et l'utilisation de plusieurs générateurs de faibles puissances. On contrôlerait, ainsi, beaucoup plus aisément la densité de puissance injectée dans le volume à traiter de façon à augmenter l'efficacité d'ionisation en fonction du débit de gaz en rendant cette dernière plus homogène. Un autre avantage résiderait dans l'amélioration de la fiabilité du système puisque la défaillance éventuelle d'un générateur n'aurait qu'une influence marginale sur le rendement global et n'immobiliserait pas le système le temps de sa réparation.

Il apparaît donc que l'utilisation des puissances pulsées dans les électrofiltres doit s'orienter vers de petits modules et, dans cette gamme de produit, le LGE s'intéresse à deux problèmes.

a. Le projet IRIS du CEA [LEM 99]

Le traitement des particules solides, issues de la destruction des déchets nucléaires, est à l'origine du système IRIS développé actuellement par le CEA (Marcoule). Les poussières générées par pyrolyse et par combustion sont, en partie, radioactives ; il est donc nécessaire de les piéger pour éviter leur extraction dans l'atmosphère. Le système IRIS possède deux systèmes de filtration montés en série. Le premier étage est constitué d'un filtre mécanique et

le deuxième étage d'un filtre électrostatique, de type cylindrique, avec une électrode centrale alimentée sous tension continue de polarité négative.

Deux filtres ont été réalisés par le CEA : l'un doit conduire à un rendement de 99 %, l'autre de 99,75%. Les paramètres utilisés, et le dimensionnement qui en résulte, sont reportés dans le tableau I-3.1 :

Dépoussiéreur	N° 1	N° 2
Q (m ³ .h ⁻¹)	476	436
η (%)	99	99,75
v (m.s ⁻¹)	0,21	0,21
S (m ²)	2,8	4,4

Tableau I-3.1: *Caractéristiques des deux filtres du projet IRIS*

Le dépoussiéreur N°1 a été testé avec du gaz chargé en particules ainsi que divers types d'électrodes ; les résultats sont présentés dans le tableau I-3.2 :

Electrodes	Rendement (%)	Voltage (kV)	Intensité (mA)	Puissance (W)
Fil de tungstène	98,7	32	5	160
Tige d'acier 5 mm	90,2	35	1,3	45,5
Tige d'acier 6 mm	88,5	35	1,1	38,5
Tige d'acier 6 mm + pointes	93,0	35	1,9	66,5
Tige filetée 10 mm	98,1	39	3,1	121
Tube 25 mm + formes émissives	97,8	40	3,2	128

Tableau I-3.2 : *Résultats obtenus avec le dépoussiéreur N°1*

Dans un souci d'amélioration de l'efficacité de la filtration, des tests en pulsé sont en cours de réalisation de façon à mieux contrôler l'injection d'énergie et éviter entre autre, du fait de la brièveté des impulsions, les passages à l'arc.

b. Filtres à particules

Dans le but de répondre à la demande d'équipements de traitement de gaz d'échappement automobiles, la société Recycl'air a développé un système de filtre à particules anti-pollution. Ce système est un électrofiltre cylindrique qui doit venir en lieu et

place du pot d'échappement. Les prototypes actuels fonctionnent sous tension continue de polarité négative.

La collaboration LGE - Recycl'air a pour but d'étudier l'amélioration que peut apporter, en termes d'efficacité de filtration, l'utilisation des puissances pulsées sur un tel dispositif. Dans cette étude, on cherche à définir le couple « générateur haute tension / électrofiltre » conduisant à un rendement optimum. Le problème consiste principalement à optimiser l'onde de tension en termes de front de montée, d'amplitude maximale, de largeur à mi-hauteur et de fréquence de répétition.

Un autre problème, déjà soulevé, sera abordé : vaut-il mieux utiliser la polarité positive et travailler par effet couronne ou la polarité négative et fonctionner en électrofiltre ?

1.4.3. Traitement par décharges couronnes

1.4.3.1. Dépollution des effluents gazeux par décharges couronnes

a. Position du problème

L'air que nous respirons ne se compose pas seulement des composants participant aux cycles naturels (N_2 , O_2 , H_2O et CO_2) mais aussi d'autres produits, pas toujours inoffensifs, provenant des activités humaines liées notamment à :

§ la production d'énergie thermique : c'est une source de pollution non négligeable provenant de la combustion du pétrole, du gaz et du charbon ; il en résulte une émission croissante de CO_2 , dont une trop grande concentration contribue à l'effet de serre, d'émissions d'oxydes de carbone (CO), de dioxydes de soufre (SO_2), d'oxydes nitrique (NO), de dioxydes d'azote (NO_2) et de diverses poussières ;

§ l'industrie : elle représente un facteur important de pollution de l'air aussi bien à cause de ses besoins énergétiques que par les procédés industriels eux mêmes ; les produits ainsi rejetés sont des oxydes de carbone, de soufre, d'azote ainsi que divers hydrocarbures et poussières ;

§ l'automobile : les moteurs à explosion sont, de loin, les premiers producteurs d'oxydes d'azote et de divers hydrocarbures alors que les moteurs diesel libèrent du SO_2 , du NO et diverses particules [VOG 93] ;

§ et d'autres sources de pollution telles que le traitement de déchets en milieu urbain qui entraîne des émissions de CH_4 (contribuant à l'augmentation de l'effet de serre) et l'incinération, sans traitement, des fumées qui provoque l'émission de HCl et de métaux lourds.

L'émission d'oxydes d'azote et de dioxydes de soufre dans l'atmosphère atteint désormais, chaque année, 250 millions de tonnes pour le SO_2 et 150 millions de tonnes pour les NO_x [PEN 93]. Cette pollution n'est pas sans conséquence sur la santé puisqu'elle peut provoquer des infections respiratoires, ainsi que sur l'environnement puisqu'elle est l'une des causes des pluies acides, des brouillards photo-chimiques (smogs) et des effets globaux (augmentation de l'effet de serre et rétrécissement de la couche d'ozone).

La mise en place de réglementations concernant les émissions de gaz polluants a conduit les constructeurs à développer différentes technologies. Ainsi, la réglementation dans certains pays pour les grandes industries de combustion fixe des limites qui, généralement, peuvent être atteintes par des mesures dites primaires : il s'agit, en fait, d'aménagements des conditions de combustion comme par exemple les brûleurs bas NO_x ou l'étagement de l'air de combustion.

Il arrive, tout de même, que les limites autorisées d'émission des gaz ne puissent pas être atteintes par le contrôle de la combustion ; le traitement des gaz doit alors être prévu en aval (mesures secondaires).

Les techniques conventionnelles de traitement des gaz [PEN 93bis] que l'on peut citer sont :

§ le processus SCR (*Selective Catalytic Reduction*), impliquant l'injection d'ammoniac en présence d'un catalyseur pour la transformation des oxydes d'azote en vapeur d'eau et en azote,

§ le processus SNCR (*Selective Non-Catalytic Reduction*), évoluant à très haute température, sans catalyseur,

§ la technologie NSCR (*Non-Selective Catalytic Reduction*) qui nécessite l'utilisation d'hydrocarbure et de monoxyde de carbone pour la réduction de NO en présence d'un catalyseur,

§ ou les processus de désulfuration en voie sèche, semi-sèche ou humide pour les rejets de SO_2 , dans lesquels on utilise un réactif tel que la chaux avec les fumées riches en SO_2 .

Ces techniques qui apparaissent depuis quelques années sont limitées du fait des nouvelles réglementations très strictes en matière de dépollution.

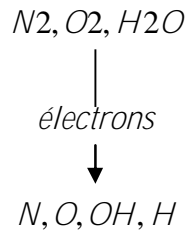
Au contraire, l'application de la technologie des puissances pulsées, et plus particulièrement des plasmas hors équilibre, à ces problèmes environnementaux semble prometteuse.

b. Principe du traitement des gaz par décharges couronnes

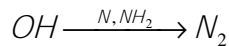
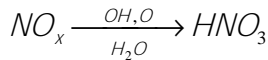
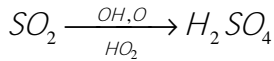
Comme indiqué précédemment, une réaction chimique peut être favorisée par l'élévation de la température ou par l'emploi d'un catalyseur ; l'utilisation de plasmas hors équilibre constitue une troisième voie : ces plasmas non thermiques sont tels que la température des électrons est très élevée alors que celle des ions reste faible. L'énergie consommée par le dispositif n'est donc utilisée que pour chauffer les électrons leur donnant des énergies moyennes très élevées, comprises entre 1 et 20eV, alors que le gaz reste à la température ambiante. Les électrons, à condition d'être suffisamment énergétiques, interagissent avec les molécules de gaz présentes pour produire des radicaux libres. Le milieu est alors extrêmement réactif et de nouvelles molécules, plus stables, peuvent résulter de la rencontre entre ces radicaux libres et les composés polluants [KOH 95].

Ainsi, l'essence de la technique des plasmas non-thermiques est l'utilisation efficace de l'énergie électrique pour une décomposition sélective et simultanée de plusieurs polluants.

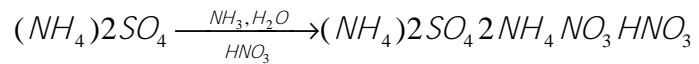
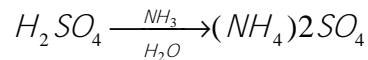
Bhasavanich *et al* [BHA 93] ont donné un modèle simplifié des réactions chimiques relatives à la suppression simultanée des SO₂ et NO_x pour le traitement d'un flux de gaz par plasmas hors équilibre. Les équations qui suivent montrent, tout d'abord, les radicaux formés par l'interaction entre les molécules de gaz (air) et les électrons (équations I-1); les équations I-2 présentent les transformations des SO₂ et NO_x en leurs acides respectifs et la réduction de NO en N₂ ; enfin, les équations I-3 présentent la formation des produits dérivés en sels. Quel que soit le traitement, par décharges couronnes ou par faisceaux d'électrons, les mécanismes et les produits qui en résultent sont identiques ; seules les quantités relatives sont différentes du fait de la plus basse énergie moyenne des électrons en ce qui concerne les décharges couronnes.



Équation I-1



Équations I-2



Équations I-3

c. Applications des décharges couronnes dans les gaz

- Traitement des NO_x

Selon Masuda [MAS 88], une décharge couronne d'une durée sub-microseconde est le type de décharge le plus efficace. C'est pourquoi, il convient d'apporter un soin tout particulier au choix du générateur d'impulsions à utiliser. Oh *et al* [OH 97] ont conçu, à cet effet, un générateur d'impulsions 30kW dans le but d'optimiser le traitement par décharges couronnes d'un gaz contenant du SO₂ et du NO. Ce générateur est testé avec une cellule d'essais à l'intérieur de laquelle circule un flux de gaz, à une température comprise entre 100 et 140°C avec un débit de 1700Nm³/heure. La tension maximale des impulsions appliquées par le générateur dans le réacteur est de 93kV pour un courant de 1,5kA, avec un front de montée de 200ns, une durée d'impulsion de 500ns, pour une énergie délivrée de 41 Joules. Avec ce traitement, la concentration en SO₂ du gaz à traiter chute de 92% pour une puissance injectée par le générateur de 1,5kW ; quant à la concentration en NO, sa diminution est de 84%.

- Emissions de moteurs diesel

Le processus de contrôle des émissions des moteurs diesel par décharges couronnes a été clairement présenté par Vogtlin *et al* [VOG 93] ; ces décharges ont pour vocation, par formation de radicaux tels que O et OH, de supprimer les oxydes nitriques, les dioxydes de soufre, des particules et autres composés organiques. Ces auteurs précisent, eux aussi, que ces décharges doivent être de courte durée, inférieure à la microseconde, pour éviter les pertes

d'énergie dues au chauffage des molécules de gaz. De plus, ils ne préconisent pas l'utilisation de décharges couronnes « classiques » mais plutôt de traiter ces polluants par décharges barrières dans lesquelles au moins une des deux électrodes est isolée d'une décharge directe métal-métal. Ces dispositifs doivent être alimentés par des impulsions de polarité alternative, généralement sinusoïdale, de haute fréquence. L'isolant est alors chargé, d'abord par une décharge couronne d'une polarité, puis par une décharge de polarité inverse.

- Autres applications

D'autres produits, tels que le trichloroéthylène (TCE) et le trichloroéthane (TCA) issus des émissions gazeuses des industries à semi-conducteurs font l'objet d'un traitement par plasmas non-thermiques et plus particulièrement par décharges couronnes. Kohno *et al* [KOH 95] ont mis en place un réacteur à plasma de 100mm de long, de diamètre 10mm et dont les électrodes en tungstène sont distantes de 10mm (dans le sens longitudinal). Le processus de destruction par décharges couronnes permet de dissocier le TCE en CO, CO₂, HO et Cl₂. L'efficacité du traitement sur le TCE atteint plus de 80% de réduction. En ce qui concerne le TCA, les produits obtenus après dissociation sont du CO₂, CO, NO₂, HCl et COCl₂. Après le traitement, suivi de l'activation d'un filtre à carbone, il n'a plus été détecté de présence de TCA, ce qui permet de conclure à l'excellente efficacité de cette technique.

1.4.3.2. Traitement des liquides par décharges électriques

Dans ce titre, nous avons volontairement utilisé le terme, très général, « décharges électriques » car, comme nous le verrons chapitre III, la décharge dans les liquides, et notamment dans l'eau, est assez complexe et la terminologie associée mal définie.

a. Principe

Quand des impulsions haute tension sont appliquées entre des électrodes immergées dans un liquide, des espèces chimiques actives, des électrons hautement énergétiques, de l'ozone, des radiations ultraviolettes voire des ondes de chocs (dans le cas du passage à l'arc), sont produits et peuvent jouer un rôle important dans la débactérisation et la dégradation de micro-organismes [SAT 96, HEE 97, SUN 97, LIS 99, SUN 99, AKI 00, HEE 00, ESP 01]. Ainsi, les décharges électriques dans les liquides permettent d'envisager de mettre en œuvre un grand nombre d'applications commerciales telles que :

- § le traitement de boues,
- § la dissociation de produits chimiques toxiques comme la dioxine,
- § le nettoyage de l'eau contaminée,
- § la stérilisation de lait et de jus de fruits,
- § la gestion de l'eau potable, etc...

En ce qui concerne l'eau et les milieux aqueux, les espèces chimiques actives créées par les décharges électriques sont les radicaux H, OH, O, O₂, HO₂, O₃ et du peroxyde d'hydrogène H₂O₂. Parmi ces espèces, OH, O, O₃ et H₂O₂ sont les plus importantes pour les réactions chimiques. Ces radicaux traitent les composés organiques par oxydation. Les radicaux hydroxyl OH et H₂O₂ sont directement produits par la décharge dans l'eau, suivant les réactions chimiques des équations I-4 et I-5 [YAM 00]:



Pour ce qui est de l'ozone (O₃), sa présence est notamment due à l'injection de bulles de gaz (principalement de l'oxygène) dans le liquide, autour de la zone de décharge.

Les radicaux OH sont spécialement connus pour jouer un rôle important dans la dégradation des composés organiques ; c'est l'espèce qui possède le plus fort pouvoir oxydant (après la fluorine), suivi de l'oxygène singulé O et de l'ozone [SUN 99, ZHO 02]. Selon Sato *et al*, l'émission de ces différents radicaux par la décharge est étroitement liée à la conductivité de la solution, à la tension appliquée, à la polarité (polarité positive plus efficace) et à la géométrie de la pointe portée à la haute tension [SAT 96, SUN 97, SUN 99bis].

Les nouvelles techniques d'oxydation (« AOT ») pour le nettoyage de l'eau sont en plein essor actuellement. Or, les paramètres de performance d'un procédé, décisifs pour sa commercialisation, sont les coûts d'installation, la consommation d'énergie, la facilité d'exploitation et de maintenance. Pour toutes ces raisons, les procédés les plus avantageux semble être l'utilisation de l'ozone et des décharges électriques [HOE 99].

b. Applications

Les nouvelles technologies de traitement de l'eau (eau potable et eaux usées) présentent toutes de puissantes propriétés anti-microbiennes (les champs électriques pulsés, le traitement par couronnes pulsées et par faisceaux d'électrons, le traitement par ultraviolets et ozone). Cependant, tous les micro-organismes ne répondent pas de la même manière à ces traitements. C'est pourquoi, en considérant les applications variées d'un tel système, Espie *et al* [ESP 01] ont imaginé un nouveau procédé exploitant toutes ces propriétés dans le but d'optimiser l'efficacité du traitement sur une large variété de micro-organismes dans les liquides. Le principe est le suivant : en injectant du gaz dans un liquide test et en appliquant des impulsions haute tension, des décharges partielles apparaissent directement à l'intérieur des bulles de gaz. Elles peuvent aussi mener à la rupture diélectrique du liquide. Ce système de traitement a été testé sur des liquides contenant les micro-organismes *Saccharomyces cerevisiae* (industrie de la levure et de la fermentation), des *Bacillus cereus* (bactérie Gram positive omniprésente dans la nature qui peut provoquer des empoisonnements des aliments tels que le riz, le lait ou les céréales) et *Escherichia coli* (bactérie Gram négative). Le gaz injecté est de l'oxygène, du dioxyde de carbone ou de l'air. Durant le processus de décharges partielles dans les bulles, de la lumière UV est transmise au liquide, des électrons sont libérés, des radicaux et de l'ozone sont formés. Si le claquage complet du diélectrique survient, l'onde de choc générée s'ajoute à tous ces processus pour inactiver les micro-organismes présents dans le liquide.

Concernant les traitements anti-microbiens (« Advanced Oxidation technology » ou AOT), l'émission d'ultraviolets par la décharge permet la réduction de micro-organismes dans les eaux usées. Des études récentes [ZHO 02] ont montré que l'irradiation par ultraviolets peut également être efficace pour la suppression des *Cryptosporidium* (parasite transporté par voie d'eau et provoquant des maladies gastro-intestinales graves).

Enfin, les décharges créées dans une solution aqueuse peuvent être utilisées pour oxyder des composés cibles tels que le phénol [SHA 93, HOE 99, SUN 99, AKI 00, VAN 00, VEL 00]. Sun *et al* [SUN 99] ont étudié la dégradation de ce produit au moyen d'un dispositif expérimental, composé d'un système d'électrodes distantes de 21mm (géométrie pointe-plan) permettant de traiter une solution de phénol à un débit de 20 à 200ml/min avec des impulsions de tension d'amplitude maximale 30kV, des courants correspondants de 4,2A, des fronts de montée de quelques dizaines de nanosecondes et un taux de répétition allant de 0 à 50Hz. Les

résultats montrent qu'après un tel traitement, le phénol, de concentration initiale 50ppm, contenu dans une solution aqueuse, est totalement supprimé. Sun *et al* montrent aussi que lorsqu'on injecte des bulles de gaz d'oxygène dans la solution, d'autres espèces actives (telle que l'ozone) sont impliquées dans la réaction avec le phénol en plus des radicaux OH, O et H. Des sous produits de dégradation du phénol ont été déterminés (l'hydroquinone, le pyrocatechol et le 1,4-benzoquinone) ; ils disparaissent si le traitement est poursuivi.

1.5. Traitement par onde de choc

Ce type de traitement concerne, plus particulièrement, les matériaux solides, mais une application concernant le traitement de l'eau est également intéressante et nous y consacrerons quelques lignes. C'est cette méthode de traitement qui est à l'origine de ce travail de thèse.

1.5.1. Destruction et séparation de matière par la méthode PBT

1.5.1.1. Motivations

Les nouvelles réglementations européennes vont nécessiter qu'une part importante des produits industriels puisse être recyclée et décontaminée. De nouvelles technologies doivent ainsi être développées dans le but de :

- § séparer des matériaux de rigidité mécanique différente en ses divers constituants,
- § préparer des matériaux à des fins de recyclage,
- § réduire la pollution de matériaux devant être recyclés,
- § générer des déchets compacts devant être détruits.

Actuellement, l'industrie du recyclage met l'accent sur le remplacement des technologies existantes en ce qui concerne les applications suivantes :

- § le broyage des verres en quartz, des minéraux, des céramiques et du silicium,
- § la fragmentation du béton armé, des verres composites et *Sécurité* et des composants électriques et électroniques [WEI 95].

La méthode PBT (« Plasma Blasting Technology ») est basée sur la restitution rapide de fortes énergies électriques stockées par des condensateurs [EFF 97]. Cette méthode, par la création d'une onde de choc non pyrotechnique mais ayant une intensité comparable, permet, maintenant, d'imaginer une amélioration dans le traitement des déchets et leur recyclage.

Deux principes sont utilisables : l'un, dit délocalisé, où l'onde de choc est transmise au matériau par l'intermédiaire d'un milieu liquide ; l'autre, dit localisé, où la décharge se produit directement dans le matériau.

Par rapport aux techniques basées sur des explosifs chimiques, la méthode PBT offre trois avantages :

- § absence de fumées néfastes et de produits polluants émis par l'explosif chimique,
- § meilleure maîtrise du concassage,
- § coût restreint.

1.5.1.2. *Principe délocalisé*

Le principe délocalisé (« Electro-Hydraulic Disintegration Process » ou EHDP) est la technique que nous allons utiliser lors de notre étude en vue de concevoir un prototype pour le recyclage et le traitement de déchets solides par puissances pulsées dans l'eau. Cette méthode consiste en un système de deux électrodes de décharge immergées dans un liquide et placées près du matériau à traiter (figure I-9). Un système capacitif, délivrant des puissances pulsées sous la forme d'impulsions de quelques dizaines de kilovolts, est déchargé à travers le jeu d'électrodes. Un arc est alors créé, entre les électrodes, à travers le liquide. L'expansion du canal d'arc conduit à la génération d'une onde de pression qui se propage dans le liquide jusqu'au matériau à traiter [HOF 97].

1.5.1.3. *Principe localisé*

Le principe localisé (« Electrical Disintegration Process» ou EDP) consiste à placer le produit à fragmenter, non conducteur électriquement, entre deux électrodes. Les deux électrodes sont connectées à un banc haute tension délivrant une impulsion de quelques centaines de kilovolts au système d'électrodes. Un arc est alors généré à travers le matériau. L'onde de pression, résultant de l'expansion du canal d'arc, fragmente le matériau aux

alentours du lieu de la décharge. En répétant ce processus en différents endroits, le matériau entier peut être traité [HOF 97].

Les techniques actuelles nécessitent, pour la destruction de grands ensembles bétonnés ou le perçage de galeries, l'utilisation d'explosifs. Cela entraîne diverses contraintes telles que :

- § les gaz résiduels, dans les mines, qui obligent une évacuation prolongée ;
- § la difficulté de dissocier le béton du ferrailage, d'obtenir des blocs de taille homogène ou d'éviter un dégagement de poussière dans les opérations de destruction d'ouvrage en béton.

Le principe localisé pallie à ces inconvénients en étant particulièrement économique.

L'avantage de cette technique sur le principe délocalisé vient du fait que les électrodes sont directement en contact avec le matériau permettant ainsi à l'énergie, délivrée par la décharge, d'être en grande partie utile. Le besoin en énergie d'un tel procédé est donc plutôt faible. Par contre, les tensions exigées sont assez élevées (plusieurs centaines de kilovolts) du fait du passage de la décharge directement dans le matériau.

Les schémas de la figure I-9 représentent le principe des deux différents processus EHDP et EDP [HOF 97]:

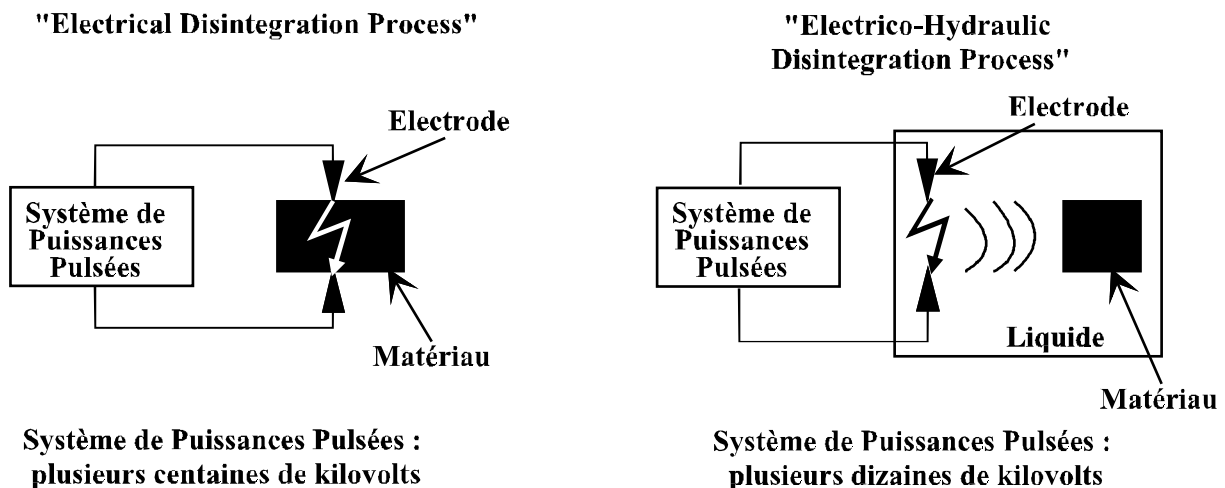


Figure I-9 : Principe fondamental des méthodes EDP et EHDP

1.5.2. Applications diverses

1.5.2.1. Pulvérisation de matériaux par les méthodes directe ou indirecte (EDP ou EHDP) [BIA 91, RIM 99]

Touryan *et al* [TOU89, TOU 91bis] ont utilisé la méthode EHDP dans le but de pulvériser du charbon en particules ultrafines ($< 75\mu\text{m}$) pour l'employer comme combustible. Les différentes expérimentations ont montré que des impulsions d'énergie 4kJ, de durée 200ns avec des taux de répétition de 1Hz, permettent de pulvériser le charbon à la taille désirée. Le paramètre déterminant pour obtenir des tailles de particules minimales est la durée de l'impulsion. La consommation énergétique de ce traitement est plus faible que celle des broyeurs mécaniques.

Par le biais de la même méthode, Noranda Technology Center (Canada) utilise un banc de capacités de 1 mégajoule dans le but de détruire des blocs de béton ou de fragmenter des roches. Le système d'électrodes est inséré dans un trou, préalablement percé dans la roche, rempli d'un liquide (eau du robinet ou gel). L'utilisation de ce banc de 1MJ, délivrant des pics de courant de 700kA avec un temps de montée de 80 μs , a montré que la relation qui lie le rendement de fragmentation à l'énergie électrique délivrée est linéaire [HAM 93, HAM 95, PRO 93,].

La société TZN a lancé, depuis 1992, un programme de recherche et de développement sur les applications commerciales de la technologie des puissances pulsées et, plus particulièrement, sur la réduction et le broyage de matériaux pour s'harmoniser avec les nouvelles lois allemandes sur le traitement de déchets [WEI 95, HOF 97]. TZN s'est ainsi intéressée aux deux technologies décrites ci-dessus.

Un premier système, basé sur la méthode EHDP, pouvant générer des décharges à une fréquence de 100kHz, avec des courants d'amplitude 200kA a été mis en place. La tension de charge étant de quelques dizaines de kilovolts, l'énergie par impulsion varie de quelques kilojoules à quelques dizaines de kilojoules. Ces caractéristiques de sortie sont suffisantes pour un grand nombre d'applications de traitement.

Un deuxième système de puissances pulsées, basé sur la méthode EDP, a été également conçu par TZN pour le traitement du béton armé. Les électrodes de décharge sont connectées à un générateur de Marx d'énergie maximale 10kJ. La tension de sortie est

ajustable jusqu'à 400kV et le taux de répétition peut atteindre 2Hz. Lors de chaque opération, le système d'électrodes peut être piloté et replacé sur l'unité en béton et plusieurs impulsions haute tension peuvent être générées entre les électrodes [HOF 97].

1.5.2.2. Réduction de minéraux par la méthode directe ou EDP

Des travaux réalisés par Touryan *et al* [TOU 91] sur la libération de minéraux précieux de divers fragments de roches montrent les avantages d'une telle méthode sur les méthodes conventionnelles mécaniques ou par explosifs. Au moyen d'impulsions de tension de 150kV, de durée à mi-hauteur de 1 μ s et un taux de répétition de 1Hz, ces derniers réussissent à libérer 8600ppm de cuivre par gramme de minerai traité avec une consommation énergétique de 40J/g. Pour obtenir les mêmes résultats par le biais de méthodes conventionnelles, la consommation d'énergie est beaucoup plus importante.

1.5.2.3. Écroûtage de matériaux par les méthodes EHDP ou EDP

Une autre application importante de la méthode PBT est l'écroûtage de matériaux. Goldfarb *et al* [GOL 97] ont mis en place un système d'électrodes, basé sur le même principe que les procédés de la société TZN, capable de nettoyer les couches superficielles de béton contaminées par des produits chimiques ou des produits radioactifs. Ce système permet d'effectuer une comparaison entre le traitement du béton par ondes de choc initiées dans l'eau et le traitement par claquage direct à travers le béton.

Concernant le principe délocalisé, l'arc est initié pour des tensions de 20-30kV et l'effritement efficace de couches de béton a lieu pour des impulsions de courant de 30-50kA et de durée 20-40 μ s. La consommation de l'énergie emmagasinée dans les condensateurs de stockage est de l'ordre de 1,5kJ pour 1cm³ de béton.

Leur principe localisé nécessite des tensions plus importantes (100 - 150kV), mais, par contre, ne nécessite qu'un courant de quelques kA d'amplitude et de durée 3 à 5 μ s. La consommation d'énergie est alors de 0,8kJ/cm³. La profondeur de pénétration de la décharge, à l'intérieur du matériau, dépend des caractéristiques de l'impulsion et des propriétés diélectriques du matériau à traiter et du liquide environnant.

Il est important de noter que, pour une telle application, l'Université Polytechnique de Tomsk a montré [BOE 97] que, pour une onde de tension de durée inférieure à 1 μ s et d'amplitude supérieure à 200kV, la tenue diélectrique de l'eau, située au dessus d'un matériau

à traiter tel que le marbre par exemple, devient supérieure à la tenue diélectrique du matériau. En dessous de cette tension, le claquage aura lieu préférentiellement dans l'eau. Le principe de l'écroûtage de béton par la méthode EDP est indiqué figure I-10.

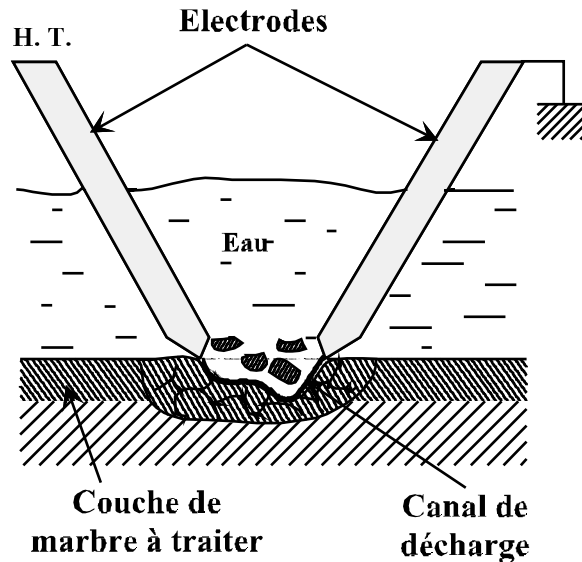


Figure I-10 : Principe de l'écroûtage de béton par la méthode EDP

1.5.2.4. Traitement des eaux par la méthode PBT

Concernant le traitement des eaux par ondes de choc, il faut noter que le processus de décharge conduit à la création de bulles de vapeur, d'une onde de choc intense et à l'émission de lumière ultraviolette. La bulle de vapeur peut mener à une phase d'eau supercritique ($T > 374^{\circ}\text{C}$, $P > 221\text{bar}$) où l'oxydation des substances organiques peut survenir, menant à la réduction ou à la destruction des microbes et des bactéries [LOW 99]. La société « Spartek Environmental » (Ontario) [LOW 99] a démontré, en développant un système industriel basé sur un tel principe, que cette technologie est réellement capable d'éliminer des éléments pathogènes spécifiques et nocifs dans de l'eau. D'autres tests microbiologiques, réalisés avec des tensions appliquées et une distance inter-électrodes plus importantes, ont été effectués sur des organismes encore plus résistants tels que les *Clostridium perfringens* ou les *Cryptosporidium parvum oocysts* et ont montré des résultats probants.

La société « Spartek Environmental » utilise le même procédé afin de réduire la population de moules *Zebra* adultes déjà accrochées dans les pipelines [MAC 99]. La

technologie permet, en même temps, de retarder le dépôt de vase et de réduire le biofilm. Cette technologie est unique à plusieurs égards :

- § opération à très bas coût,
- § facilité d'installation et de maintenance,
- § jusqu'à deux mois de fonctionnement continu entre les maintenances prévues,
- § fonctionnement fiable et qui a fait ses preuves.

Des essais similaires ont été réalisés par l'U.S. Navy en 1995 et avaient conduit aux mêmes conclusions [MAZ 95].

1.6. Conclusion du chapitre

L'introduction aux puissances pulsées qui vient d'être effectuée a permis de se familiariser avec cette technique et de fournir un bilan non exhaustif des nombreuses applications industrielles qui lui sont offertes. Bien que l'intérêt de chacune d'entre elles soit certain, nous nous sommes principalement limités au développement d'un démonstrateur industriel de plusieurs dizaines de kilojoules, exploitant le principe délocalisé de la méthode PBT (Plasma Blasting Technology). La mise en place, le fonctionnement et la description de ce démonstrateur sont ainsi présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2

PRESENTATION DES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

2. Présentation des dispositifs expérimentaux

Nous allons présenter, dans ce chapitre, les deux dispositifs expérimentaux que nous avons développés durant cette étude. La première partie concerne le démonstrateur industriel, sa conception, son fonctionnement et son automatisation. Le deuxième dispositif expérimental, de plus faible énergie que le premier, est décrit dans la deuxième partie ; il a permis de réaliser l'étude physique et électrotechnique de la décharge électrique dans l'eau.

2.1. Mise en place du démonstrateur industriel

2.1.1. Généralités et contraintes

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent, une application importante des fortes puissances pulsées est le concassage et le recyclage des matériaux par la technique appelée PBT (Plasma Blasting Technology). Parmi les deux méthodes existantes qualifiées de « directe » et d'« indirecte », c'est la deuxième qui a été choisie par la société EFFITECH car elle présente une plus large palette d'applications. Un des objectifs de la société et de ce travail de thèse est de développer un démonstrateur dont la vocation est triple :

- § mettre au point les sous ensembles critiques qui se retrouveront, systématiquement, dans les bancs de retraitement industriel (commutateur de puissance, électrodes, enceinte, automatisation, sécurité, ...),
- § établir la faisabilité de chaque application particulière,
- § optimiser le procédé.

Le démonstrateur fonctionne de la manière suivante : un banc de condensateurs de puissance est chargé à l'aide d'une alimentation continue haute tension ; leur décharge s'effectue à travers un commutateur de puissance déclenché. L'énergie est ainsi restituée dans de l'eau au moyen d'une décharge électrique qui fait apparaître un plasma haute pression. L'expansion du canal d'arc s'accompagne de la formation d'une onde de choc de pression qui se propage dans l'eau et permet de casser le matériau (principe délocalisé). Le banc d'essais

comprend divers appareils de mesure (courant, tension, pression) et d'enregistrements (oscilloscopes, micro-ordinateur) permettant une quantification de certains paramètres. Le principe d'une telle application est indiqué sur le schéma ci-dessous :

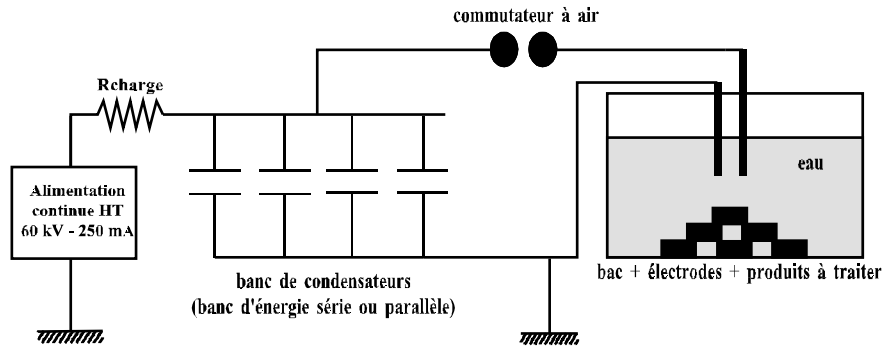


Figure II-1 : Banc d'essais suivant la méthode PBT

Les travaux ont débuté en juin 1999 par la mise en place du local d'essais, loué par la société Effitech sur le technopôle Hélioparc Pau-Pyrénées. Les tensions mises en jeu au niveau du prototype sont de l'ordre de quelques dizaines de kilovolts et les courants générés peuvent atteindre plusieurs dizaines de kiloampères ; de plus, le fait de travailler en transitoires rapides génère des problèmes de compatibilité électromagnétique. Ainsi, pour des raisons de sécurité, d'insonorisation et de faradisation, toute la partie haute tension du prototype a été confinée à l'intérieur d'une enceinte faradisée (voir figure II-2 ci-dessous). Une des finalités du projet est de piloter le démonstrateur, depuis l'extérieur de l'enceinte, sans aucune liaison électrique avec la partie haute tension.



Figure II-2 : Démonstrateur à l'intérieur de sa cage de Faraday

2.1.2. Faradisation et insonorisation

L'enceinte, à l'intérieur de laquelle toute la partie haute tension est localisée, est une pièce de $6 \times 2 \times 2,15$ mètres, selon le plan dessiné sur la figure II-3 ; l'ouverture des portes de l'enceinte conditionne la mise en sécurité électrique du démonstrateur.

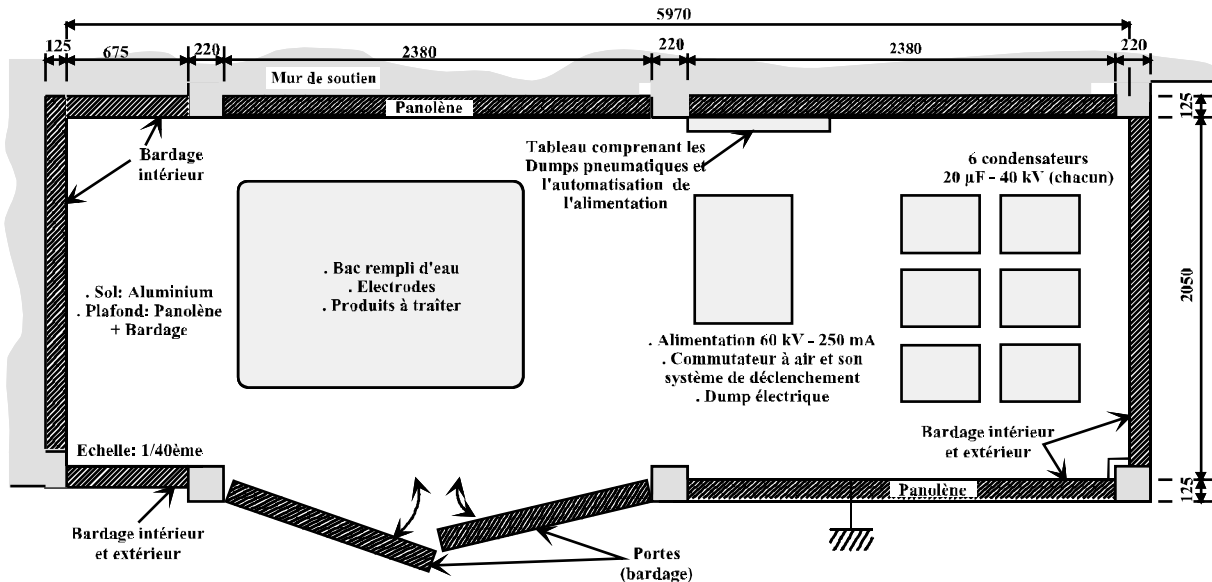


Figure II-3 : Plan de l'enceinte contenant le démonstrateur

Cette enceinte a été faradisée à l'aide d'une double épaisseur de bardage, afin d'empêcher les perturbations électriques de rayonner vers l'extérieur ; elle est reliée à la masse de la zone d'essais pour éviter les risques de montée en potentiel par effet capacitif.

Entre chaque plaque de bardage intérieur et extérieur, un isolant sonore a été installé afin d'effectuer l'insonorisation de la pièce ; cette laine de verre, du Panolène Acoustique Roulé (P.A.R.), constituée de fibres fines et longues, répond aux exigences d'amortissement acoustique élevé demandées par notre application ; ainsi, avec une épaisseur de 2×70 mm de Panolène entre les plaques de bardage, l'indice d'affaiblissement acoustique R est de 60dB(A) par isolant ; les résultats obtenus au niveau de notre prototype sont satisfaisants.

Enfin, le sol a été recouvert, sur toute sa surface, d'une plaque d'aluminium de 0,5 mm d'épaisseur, raccordée aux bardages.

2.1.3. Condensateurs et alimentation

Les impulsions électriques haute tension sont générées au moyen d'un banc de six condensateurs de puissance de marque LCC. Ces condensateurs, de capacité $20\mu\text{F}$ chacun, peuvent être chargés à une tension de 40kV et supportent 100% de tension inverse. La capacité totale peut varier, selon les associations, de $3,3\mu\text{F}$ à $120\mu\text{F}$. Ainsi, les énergies commutées sont ajustables de quelques joules à environ 100kJ . Nous pensons pouvoir ainsi faire varier la pression de l'onde de choc générée dans l'eau et, par conséquent, adapter le dispositif en fonction de la rigidité mécanique des matériaux à traiter.

Les condensateurs sont chargés à l'aide d'une alimentation positive 60kV , 250mA de chez E.T.A.T.. La commande de l'alimentation est déportée à l'extérieur de l'enceinte faradisée et peut s'effectuer soit de manière électrique (commande déportée fournie par E.T.A.T.), soit par fibre optique (voir plus loin).

Les condensateurs de puissance et l'alimentation haute tension sont visibles, respectivement, sur les figures II-4 et II-5.



Figure II-4 : Condensateurs de puissance



Figure II-5 : Alimentation haute tension de chez E.T.A.T.

L'énergie emmagasinée dans les condensateurs est commutée à l'aide d'un éclateur à air, de type trigatron, réalisé au laboratoire. En champ quasi-homogène, il peut commuter des tensions de 100kV et des courants de 200kA . L'impulsion de déclenchement de cet éclateur, délivrée par un générateur d'impulsions 20kV , est transmise par fibre optique, ce qui permet une isolation galvanique avec la partie haute tension.

Le principe de ce système de déclenchement est le suivant (figure II-6) : un condensateur (C_2) est chargé à une tension de 300 Volts . La commutation rapide d'un

thyristor (T_1) (fronts de l'ordre de 300ns) permet de décharger le condensateur à travers le primaire d'un transformateur d'impulsions de façon à obtenir, en sortie du secondaire, une impulsion haute tension supérieure à 20kV avec des fronts inférieurs à 500ns. Le fait d'appliquer une tension aussi élevée permet de déclencher le trigatron avec un faible jitter. La commande de ce générateur d'impulsions est confiée à un transistor (TC_1) qui est piloté soit par un simple interrupteur poussoir K1, soit par une photodiode (D6), via le déclencheur par fibre optique, soit par TTL.

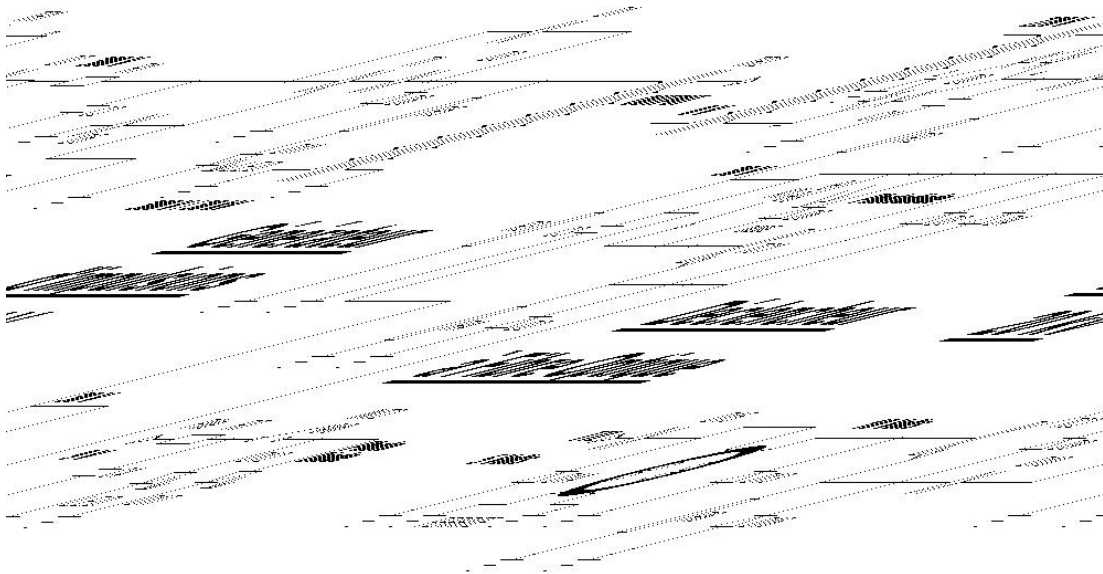


Figure II-6 : *Schéma électrique du système de déclenchement du trigatron*

La photographie de la figure II-7 montre le commutateur associé à son système de déclenchement.



Figure II-7 : *Commutateur associé à son système de déclenchement*

De façon générale, les connexions entre les divers modules de puissance du démonstrateur sont réalisées au moyen d'éléments souples afin d'absorber les forces très importantes mises en jeu lors de la commutation d'impulsions de courant de plusieurs dizaines de kA.

2.1.4. Cuve d'essais et électrodes de décharge

La cuve d'essais et les électrodes de décharge ont fait l'objet d'une attention toute particulière ; en effet, plusieurs critères importants ont été pris en compte afin d'optimiser les performances du démonstrateur :

§ un premier bac « de protection » en polyester a été prévu afin de limiter les risques d'inondation de l'enceinte faradisée (détérioration du matériel de puissance et danger pour l'utilisateur du démonstrateur). C'est dans un deuxième bac de 500 litres, également en polyester, et placé à l'intérieur du premier, que l'on verse l'eau. Les deux électrodes de décharge ont été positionnées sur un support en PVC, en appui sur le deuxième bac. L'espace entre les deux cuves a été comblé par du sable afin d'atténuer les vibrations du sol, transmises par l'onde de choc créée par la décharge électrique ; l'ensemble a été positionné sur des supports antivibratoires (« silent-block ») pour éviter la propagation des vibrations dans le bâtiment.

§ les énergies commutées sont telles que les projections d'eau en dehors de la cuve d'essais sont très importantes ; ainsi, un couvercle ferme complètement le deuxième bac afin de protéger le matériel environnant.

§ les puissances instantanées mises en jeu au cours de la décharge électrique dans l'eau peuvent atteindre le GigaWatt. Au moment de la rupture diélectrique de l'eau, c'est-à-dire lors du passage à l'arc entre les électrodes, les forces exercées sur ces dernières et leurs supports sont très importantes. Il a donc été nécessaire de pourvoir le démonstrateur d'un système d'électrodes capable de résister aux nombreux chocs ; le matériau de la tige supportant l'électrode haute tension a été choisi en acier inox tandis que celui de l'électrode de masse est du nylon (afin de garantir une certaine souplesse de l'ensemble). Plusieurs jeux d'électrodes de diamètre différent, en acier inox, ont été réalisés afin de pouvoir modifier la distance inter-électrodes D ($5 \text{ mm} < D < 30 \text{ mm}$).

§ enfin, une troisième enceinte (figure II-8), à l'intérieur de laquelle plongent les électrodes, a été placée au fond du second bac ; ses 2 critères essentiels doivent être la solidité, pour résister aux ondes de pression engendrées par la décharge électrique dans l'eau, et une géométrie telle qu'elle doit maintenir, après les chocs, les produits à traiter au voisinage des électrodes. L'enceinte est composée de 10 plaques d'aluminium de surface 500mm × 500mm et d'épaisseur 30mm chacune, empilées les unes sur les autres ; chaque plaque a été usinée de manière à former, au centre de la masse en aluminium, une cuve dont le diamètre diminue, du haut vers le bas, de 400mm à 100mm (figure II-8). Le poids de l'enceinte est d'environ 100kg. Les différents éléments de l'ensemble cuve d'essais électrodes de décharge sont visibles sur les figures II-8, II-9 et II-10.

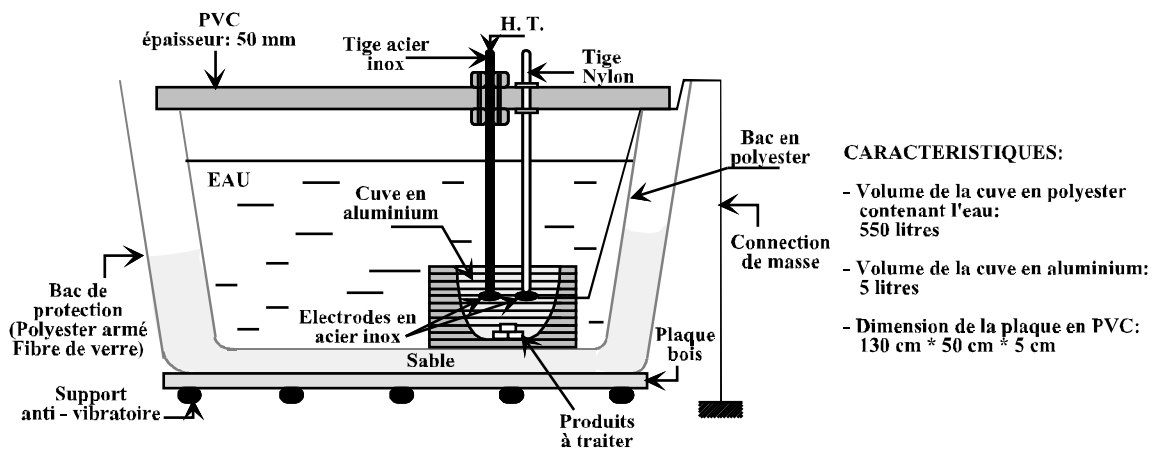


Figure II-8 : Schéma en coupe de l'ensemble cuves d'essais - électrodes de décharge



Figure II-9 : Photographie de l'enceinte en aluminium contenant les électrodes et les produits à traiter



Figure II-10 : Photographie de l'ensemble cuves d'essais - électrodes de décharge

2.1.5. Mesures de tension et de courant

2.1.5.1. *Mesures de tension*

Les impulsions de tension délivrées par le générateur sont des ondes bi-exponentielles pouvant atteindre 60kV avec des fronts de montée inférieurs à 1 μ s, et des durées à mi-hauteur pouvant atteindre plusieurs millisecondes. La mesure de cette tension est effectuée à l'aide d'un diviseur « compensé » de rapport $k = 1000$, réalisé au laboratoire durant cette étude. L'impédance d'entrée de la sonde est de 100M Ω , de telle sorte que le circuit de mesure soit indépendant du circuit d'essai. Le principe de ce diviseur « compensé » consiste à allier les avantages d'un diviseur purement résistif à ceux d'un diviseur capacitif. Le but de cette association est de mesurer aussi bien des tensions continues que des tensions impulsionnelles jusqu'à une certaine fréquence.

Nous présentons, ci-dessous, les simulations sous le logiciel PSPICE d'un diviseur résistif pur et d'un diviseur capacitif pur, mettant en évidence leurs limitations respectives. Les performances du diviseur « compensé » sont exposées par la suite. Au niveau des simulations, on appellera « signal d'entrée » le signal que l'on veut mesurer avec la sonde ; il correspond à une onde biexponentielle de 400V, dont le front raide ($t_f = 100$ ns) doit mettre en évidence les limitations en fréquence de chaque sonde.

a. Diviseur résistif

Le schéma équivalent d'un diviseur « purement résistif » comporte non seulement les résistances de tête et de pied, mais aussi des éléments parasites tels que des capacités (C') notamment par rapport à la masse et des inductances (L') dues aux conducteurs (figure II-11). La simulation de la réponse de cette sonde sous le logiciel PSPICE (figure II-12 (a) et (b)) montre que ce principe n'est pas adapté à la mesure d'ondes de tension à fronts raides. Cette limitation est due aux capacités parasites dont la valeur dépend de la hauteur de la sonde et de son environnement. Ces capacités sont de l'ordre du picoFarad ; lors de la simulation PSPICE, nous avons attribué à ces capacités parasites trois valeurs différentes pour mettre en évidence leur influence sur le front de l'onde.

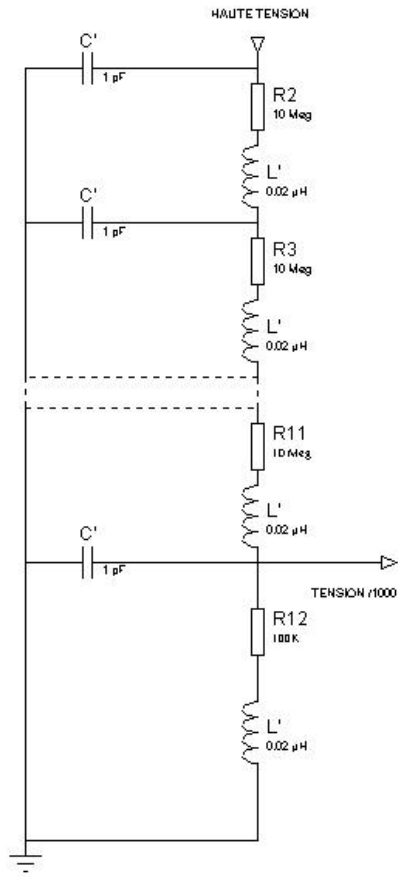


Figure II-11 : Schéma de principe du diviseur résistif pur, associé aux capacités et inductances parasites, respectivement C' et L'

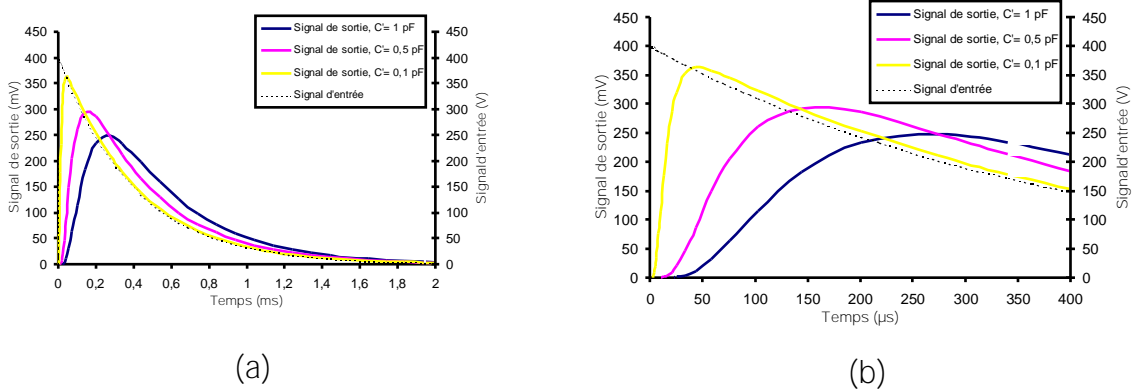


Figure II-12: (a) Simulation PSPICE de la réponse du diviseur "purement résistif"
 (b) Dilatation temporelle du front des impulsions de la figure II-12 (a)

La simulation montre que les fronts des impulsions de sortie de la sonde sont détériorés du fait de la présence des capacités parasites qui, bien que faibles, sont associées à des résistances de fortes valeurs. Les inductances parasites (L') n'ont aucun effet sur la simulation.

b. Diviseur capacitif

La simulation suivante consiste à analyser la réponse d'une sonde de tension « purement capacitive », de rapport 1000, comportant, elle aussi, des capacités C' et des inductances L' parasites, comme le montre la figure II-13.

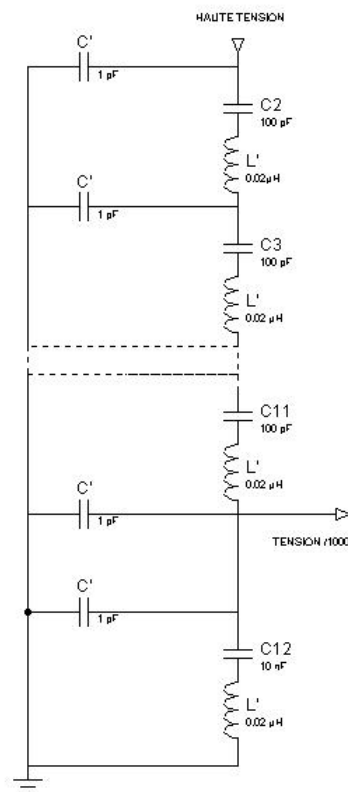


Figure II-13 : Schéma de principe du diviseur "capacitif pur" associé aux capacités C' et inductances L' parasites

La figure II-14 (a) présente la simulation PSPICE du diviseur « capacitif pur » associé à ses éléments parasites ; la figure II-14 (b) représente une dilatation, au niveau du front, de la figure II-14 (a):

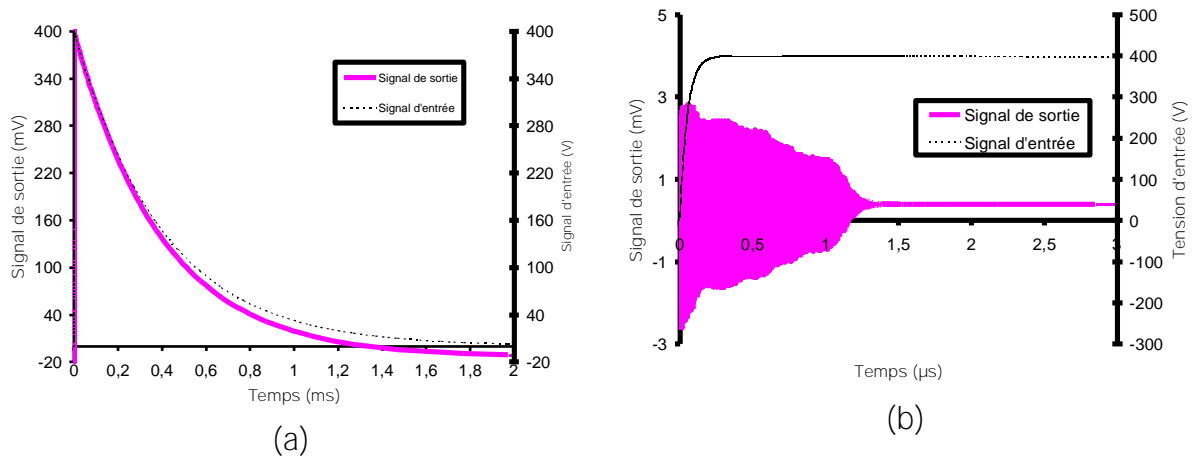


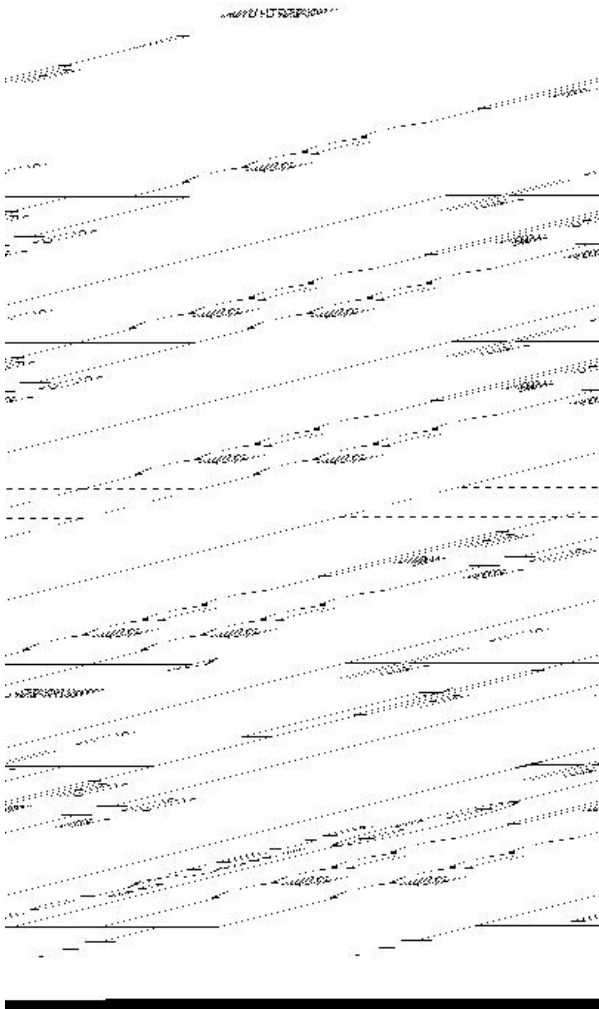
Figure II-14: (a) Simulation PSPICE de la réponse du diviseur "purement capacitif"
 (b) Dilatation temporelle du front des impulsions de la figure II-14

Nous pouvons noter, figure II-14 (a), que l'impulsion de sortie du diviseur « purement capacitif » ne suit pas le signal d'entrée au niveau des basses fréquences. Cette sonde est limitée en terme de bande passante par la constante de temps ($R.C_p$) où R est la résistance interne de l'appareil de mesure (ici, $R_{\text{oscilloscope}} = 1\text{M}\Omega$) et C_p la capacité de pied du diviseur.

La figure II-14 (b) montre que les inductances parasites, associées en série avec ces condensateurs, provoquent des oscillations au niveau du front du signal de sortie de la sonde. Il sera donc nécessaire d'introduire des résistances d'amortissement au détriment de la bande passante haute fréquence.

c. Diviseur compensé

A partir des simulations et des observations précédentes, il apparaît logique d'associer des résistances et des condensateurs en parallèle afin de concevoir un diviseur basses et hautes fréquences le plus performant possible. Les figures II-15 présentent le schéma de principe du diviseur compensé associé à ses éléments parasites et sa réalisation pratique.



- R1 à R11 : Résistances de tête
- C2 à C11: Capacités de tête
- R12 : Résistance de pied
- C12 : Capacités de pied
- P1 : Potentiomètre de réglage
- L' : Selfs parasites
- C' : Capacités parasites

Figures II-15: (a) et (b) Schéma de principe et photographie du diviseur compensé

Le rapport de division simplifié k d'un tel diviseur est donné par l'équation (II-1) :

$$k = \frac{R_T + R_P}{R_p} = \frac{C_T + C_P}{C_T} \quad (\text{II-1})$$

- où R_P = résistance de pied,
- R_T = résistance de tête,
- C_P = capacité de pied,
- C_T = capacité de tête.

Le diviseur est constitué d'une association série de dix cellules RC. Chaque cellule est composée d'une résistance de $10\text{M}\Omega$ (5kV) montée en parallèle avec un condensateur de 100pF (15kV). Le choix de ces résistances de tête a été effectué selon deux critères :

§ le premier est leur tenue en tension ; plus elle est importante et plus la sonde peut mesurer de fortes tensions ;

§ le deuxième est l'impédance d'entrée de la sonde qui doit être grande afin de prélever le moins possible de charge au circuit d'essais (ici, $Z = 100\text{M}\Omega$) et réduire, ainsi, la puissance consommée.

Le rapport k de la sonde, fixé à 1000, impose la valeur de la résistance de pied, à savoir $R_p = R_{12} = 100\text{k}\Omega$. La capacité de pied $C_p (= C_{12})$ peut alors être quantifiée : il faut que la décharge de C_p dans la résistance de pied compense la limitation, au niveau du front, du diviseur purement résistif (voir figure II-12 (b)). C'est pourquoi, nous avons choisi $C_p = 10\text{nF}$, ce qui permet d'attribuer une valeur à la capacité de tête C_T , pour garder un rapport de division de 1000, soit $C_T = 10\text{pF}$. En fait, la capacité de pied doit être « ajustée » autour de 10nF car sa valeur est aussi fonction de la longueur du câble de mesure utilisé. En effet, ce dernier possède une capacité de 100pF par mètre. On remarque donc qu'un mètre de câble fait varier la mesure de 1%.

Il est important de noter, sur la figure II-15 (a), la présence de la résistance R_1 au sommet de la sonde. Elle a été ajoutée de manière à ce que le couple $(R_1.C_i)$ intègre la totalité des oscillations causées par les inductances parasites au niveau du front de l'impulsion de mesure (voir figure II-14 (b)).

Le diagramme de la figure II-16 (a) présente une simulation, sous le logiciel PSPICE, du diviseur compensé ; la figure II-16 (b) est une vue dilatée, au niveau du front de l'impulsion de tension, de la figure II-16 (a) :

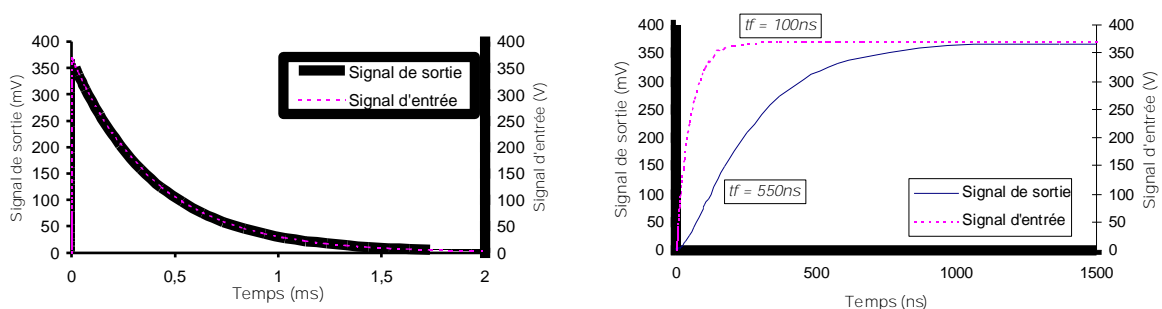


Figure II-16: (a) Simulation PSPICE de la réponse du diviseur compensé
(b) Dilatation temporelle du front des impulsions de la figure II-16 (a)

L'impédance de l'appareil de mesure à connecter doit être égale $1M\Omega$. Ce diviseur possède une bande passante de $600kHz$ à $-1dB$ et de $1,2MHz$ à $-3dB$. Elle permet de mesurer des tensions jusqu'à $60kV$.

L'étalonnage du diviseur a été réalisé avec une onde biexponentielle de $300V$, un temps de front de $100ns$ pour une durée à mi-hauteur de $250\mu s$. Les résultats expérimentaux de la réponse temporelle de la sonde, soumise à l'impulsion de tension biexponentielle étalon, sont reportés sur les figures II-17 (a) et (b) : les courbes expérimentales donnant la réponse du diviseur compensé sont notées sur la voie 1. La voie 2 correspond à la mesure de l'impulsion « étalon » par une sonde Tektronix (1/10).

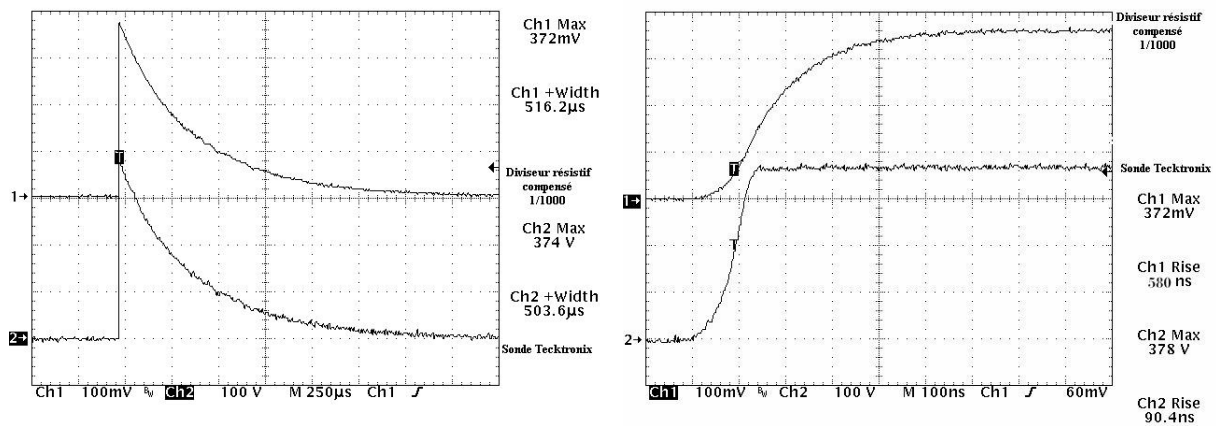


Figure II-17: (a) *Courbes expérimentales d'étalonnage du diviseur "résistif compensé"*

(b) *Dilatation temporelle du front des impulsions de la figure II-17 (a)*

Comme nous pouvons le constater sur la figure II-17bis, notre sonde de tension possède bien un temps de réponse proche de $600ns$, ce qui convient tout à fait pour la mesure des impulsions de tension délivrées par le démonstrateur ($t_f = 1\mu s$). De plus, elle permet des mesures jusqu'à $60kV$ pour un coût très inférieur à celui des sondes de commerce.

La simulation sous le logiciel PSPICE a permis d'envisager une évolution future pour notre sonde. En effet, nous nous sommes rendus compte qu'au moment de l'application de l'onde de tension, la résistance R_1 reçoit toute la haute tension à ses bornes (le temps que les condensateurs de tête se chargent). Cette résistance doit non seulement faire face, à ses bornes, à une forte tension quasi-instantanée, mais doit aussi être de valeur la plus faible possible pour permettre aux condensateurs de tête de se charger rapidement (ainsi, on réduit le temps d'application de la haute tension aux bornes de la résistance). Le problème a été résolu

sous le logiciel PSPICE : en remplaçant cette résistance de $10\text{k}\Omega$ par 10 résistances de $1\text{k}\Omega$, réparties sur chaque étage de la sonde, en série avec les condensateurs de tête, les résultats sont similaires à ceux obtenus plus haut. A ce moment là, il n'y a plus de problème de tenue en tension de la résistance R_1 .

2.1.5.2. Mesures de courant

Les mesures de courant ont été effectuées à l'aide d'une sonde de Rogowski, réalisée au laboratoire (voir paragraphe 2.3.2). Cette sonde permet, en la plaçant autour du câble dans lequel circule le courant que l'on veut déterminer, de mesurer un flux magnétique proportionnel à la dérivée du courant. A l'aide d'un intégrateur $6\text{k}\Omega - 20\text{nF}$, placé entre le câble blindé, relié à la sonde, et l'oscilloscope, on peut connaître les variations du courant en fonction du temps. Dans notre cas, les mesures de courant ont été réalisées avec une sonde ayant un rapport de 2kA.V^{-1} . Cette sonde n'est pas limitée en courant et sa sensibilité est fonction de l'intégrateur utilisé.

2.1.6. Sécurité du démonstrateur

Comme nous l'avons dit auparavant, l'ouverture des portes de l'enceinte conditionne la mise en sécurité du prototype ; un commutateur électromagnétique (dump) a été conçu à cet effet. Il permet la mise à la masse de tout le dispositif à travers une résistance à eau. Grâce aux différents essais réalisés au cours de cette étude, on peut estimer la tenue en tension du dump comme étant supérieure à 60kV continu. La résistance à eau est capable de dissiper une énergie de 100kJ , ce qui est bien supérieur à l'énergie usuellement commutée par le prototype. La constante de décharge des condensateurs à travers la résistance, qui est fonction du nombre de condensateurs utilisés et de leur configuration, est inférieure à 300 millisecondes dans le pire des cas. A l'ouverture des portes de l'enceinte, la mise en sécurité peut donc être considérée comme étant instantanée. Le dump, associé à sa résistance à eau, est visible au premier plan de la figure II-18.



Figure 11-18 : *Système de sécurité (dump) électrique*

Ce dispositif est sans doute insuffisant pour une application industrielle. Il faudrait associer un couple dump / résistance à eau à chaque condensateur pour s'affranchir de tout risque de rupture dans les liaisons inter-condensateurs. Dans le cas du démonstrateur actuel, cette carence est compensée par le mode opératoire qui impose à l'utilisateur de décharger les condensateurs à l'aide d'une perche de masse.

Le dispositif de sécurité électrique a été « doublé » avec un système « coup de poing », qui, en cas d'incident à l'intérieur de l'enceinte, permet sa mise à la masse automatique, sans l'ouverture des portes.

Afin d'assurer un découplage électrique complet entre l'utilisateur et les systèmes électriques, nous avons réalisé un dispositif automatique de mise en route et mise en sécurité pneumatique du démonstrateur.

2.1.7. Automatisation du démonstrateur

2.1.7.1. *Principe retenu*

Une attention toute particulière a été accordée à la mise en sécurité du prototype dans l'optique d'une protection optimale de l'opérateur et du processus industriel. Ainsi, nous avons choisi d'automatiser le démonstrateur en utilisant la technologie du pneumatique. Associée à un PC industriel traitant les différentes informations, cette technologie permet un automatisme logique simple, où les ordres et les comptes rendus sont des signaux binaires. Le pneumatique constitue une excellente solution fiable et économique et permet surtout de

concevoir un système sans aucun retour électrique à l'extérieur de l'enceinte faradisée. L'opérateur, derrière son PC industriel, peut piloter le processus en toute sécurité.

Le principe de fonctionnement de cet automatisme est résumé sur la figure II-19.

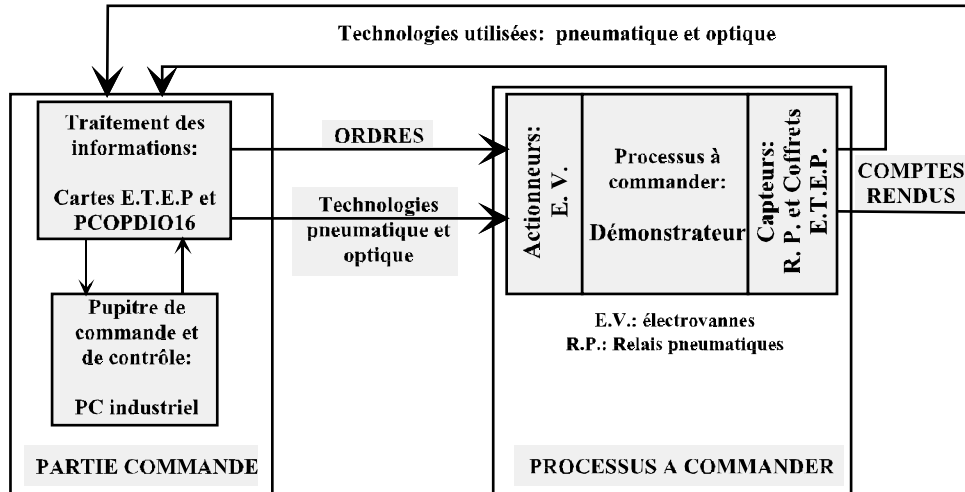


Figure II-19 : Schéma de principe de l'automatisation appliquée à notre démonstrateur

2.1.7.2. Mise en œuvre de l'automatisation

a. Partie commande

Comme le montre la figure II-12, le PC industriel transmet les ordres nécessaires au fonctionnement du procédé industriel et traite les informations issues des divers capteurs installés au niveau du prototype. Le traitement des informations est effectué par le biais de différentes cartes commande - contrôle installées sur le PC :

§ les ordres et les contrôles sont effectués au moyen de la carte PC-OPDIO16 de chez National Instrument comprenant 8 entrées - 8 sorties analogiques 24 Volts DC ou AC, isolées optiquement ;

§ l'acquisition des mesures de tension, courant et pression issues de la décharge électrique dans l'eau s'effectue sur le PC industriel. Chacune des trois sondes envoie un signal analogique, par l'intermédiaire d'un câble blindé, à des coffrets Interface Analogique Optique de chez E.T.E.P. installés dans l'enceinte faradisée. Ces coffrets réalisent la numérisation du signal et son codage optique pour le transport par fibre optique. La fibre optique est alors dirigée hors de l'enceinte et reliée à une carte PCI E.T.E.P. 345 du PC industriel. Cette carte est une interface seize voies optiques qui peut restituer ces dernières à un logiciel sous Windows

NT4.0. Le PC industriel peut accueillir trois cartes PCI E.T.E.P.345 et ainsi interfacier quarante huit voies.

b. Processus à commander

Les sorties analogiques 0-24 Volts de la carte PCOPDIO16 permettent de commander et d'actionner des électrovannes en « tout ou rien ». Un boîtier électronique a été réalisé à cet effet afin, d'une part, de commuter et d'amplifier les signaux 24V issus de la carte et, d'autre part, de recevoir les signaux 24V issus de relais pneumatiques (voir *Annexe 1*). Chacune des électrovannes, située à l'extérieur de l'enceinte, est connectée, en « pneumatique câblé », à un élément du démonstrateur et agit, tour à tour, sur le processus à automatiser. Les différents éléments à commander sont les suivants :

- § deux relais contacts pneumatiques qui permettent la mise en route et l'arrêt de l'alimentation haute tension continue,
- § deux vérins pneumatiques qui actionnent les dumps,
- § les quatre coffrets Interface Analogique - Optique de chez E.T.E.P., dont le contact Marche / Arrêt est pneumatique.

Le fonctionnement du processus industriel nécessite l'utilisation de cinq sorties 0-24V analogiques de la carte PCOPDIO16 pour piloter le même nombre d'électrovannes.

Les capteurs, placés sur le prototype afin de vérifier l'application de chaque ordre issu du PC, sont au nombre de quatre :

- § deux distributeurs pneumatiques à poussoir, utilisés comme détecteur de position des dumps,
- § deux électrovannes, fonctionnant sous 24V, positionnées en face arrière de l'alimentation haute tension afin de vérifier sa mise en route (et son arrêt) ainsi que la fin de la charge des condensateurs.

Les informations, issues de ces capteurs, sont renvoyées en « pneumatique câblé » vers quatre relais pneumatiques positionnés à l'extérieur de l'enceinte faradisée et connectés électriquement à quatre entrées 0-24V de la carte PCOPDIO16.

c. Chronologie d'une séquence type

Le principe de l'automatisation du prototype est résumé sur le schéma de la figure II-20 suivante:

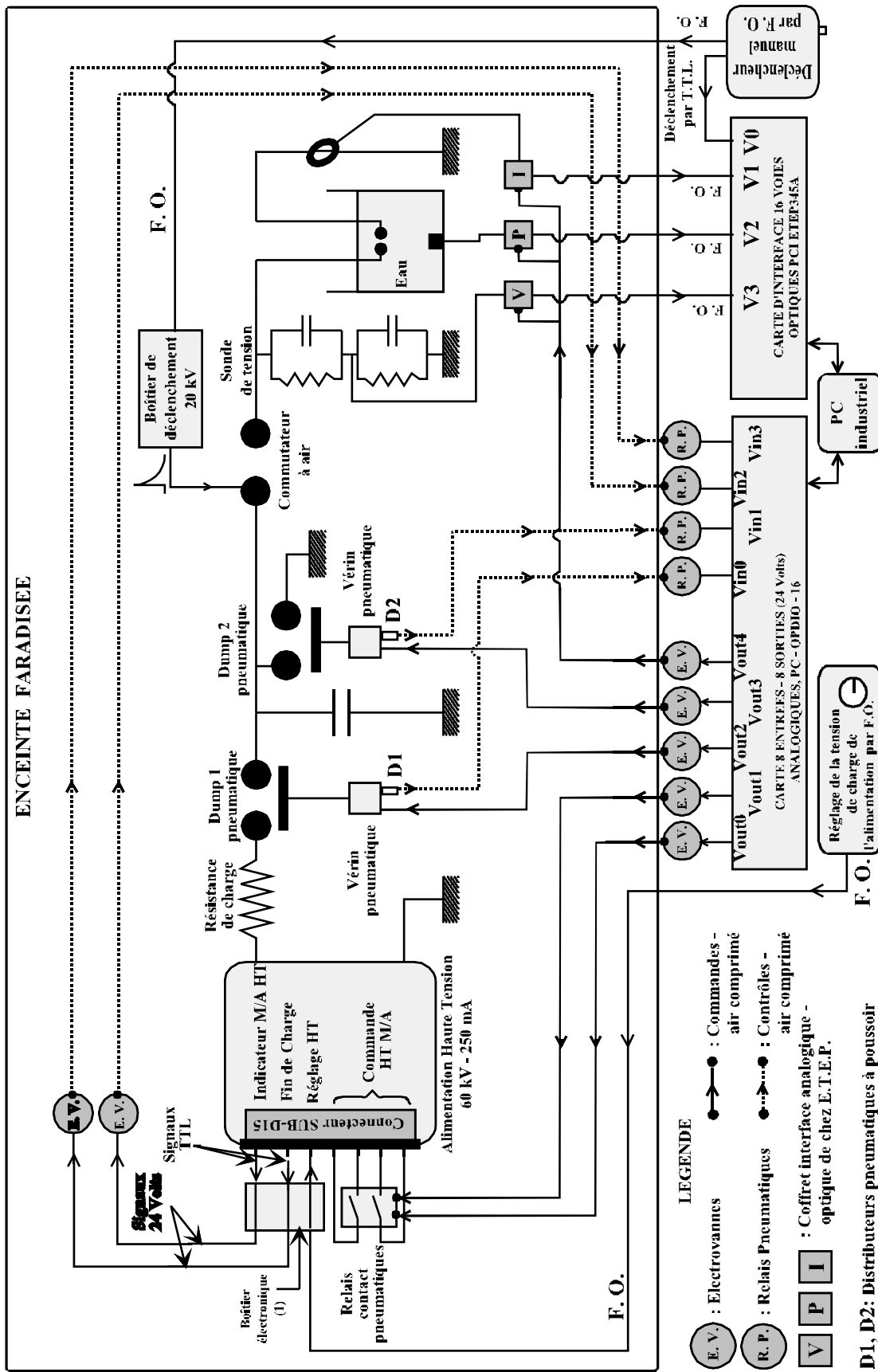


Figure II-20 : Principe de l'automatisation

La position de repos du système, qui correspond à l'état initial du processus (étape 0), est l'état de sécurité : l'alimentation continue haute tension est coupée et les condensateurs de puissance court-circuités à travers la résistance à eau de décharge.

La première étape du processus consiste à mettre en marche l'alimentation continue haute tension. La société E.T.A.T. a prévu, à cet effet, un connecteur SUB D 15 en face arrière de l'alimentation dans le but de donner à son utilisateur la possibilité de la piloter à distance. Ainsi, divers plots de ce connecteur ont été utilisés pour notre application, à savoir :

- § quatre plots qu'il faut mettre en court-circuit (2×2) afin de mettre en marche l'alimentation,
- § un plot indicateur de marche haute tension (contrôle), envoyant un niveau haut TTL pour « marche haute tension »,
- § un plot donnant l'information de fin de charge (contrôle), correspondant à l'image du courant délivré par l'alimentation qui est donc à zéro lorsque les condensateurs sont chargés,
- § un plot pour la programmation de la tension (commande) : une tension de 0 à 10V définit la tension de sortie de 0 à 100% de la tension maximum (0 - 60kVolts).

Le court-circuit des quatre plots permettant la mise en marche de l'alimentation est effectué grâce à deux relais contact pneumatiques, pilotés par deux électrovannes. Le contrôle de la mise en marche de la haute tension s'effectue à l'aide de l'indicateur « marche/arrêt haute tension » (plot SUB D 15) par le biais d'une électrovanne ; un boîtier électronique (1) (voir *Annexe 2*) a été conçu et réalisé durant cette étude afin de transformer et d'amplifier les signaux TTL issus du connecteur SUB D15 en signaux 24V, requis par l'électrovanne. Cette dernière envoie l'information à un relais pneumatique qui est connecté à la carte PCOPDIO 16.

Les étapes suivantes correspondent à la mise sous tension, en pneumatique, (électrovannes) des coffrets interfaces analogique optique de chez E.T.E.P. (*émetteurs*), suivie de la levée de l'état de sécurité, comme l'indique la figure II-21 (ouverture de l'interrupteur 2 et fermeture de l'interrupteur 1). Chacune de ces deux dernières actions est contrôlée par deux distributeurs pneumatiques à poussoir qui renvoient leur renseignement à deux relais pneumatiques.

A cet instant de la séquence, il est possible de programmer la tension de charge de l'alimentation à l'aide du boîtier à conversion analogique optique, conçu au laboratoire (voir *Annexe 3*) ; ce boîtier permet, à l'aide d'un potentiomètre dix tours, d'envoyer une tension de

0 à 10V au plot du connecteur SUB D15 prévu à cet effet ; la conversion optique analogique s'effectue à l'intérieur du boîtier électronique (1), cité plus haut. Le contrôle de l'image du courant au niveau de l'alimentation haute tension nous permet de vérifier la fin de la charge des condensateurs.

Avant de déclencher la décharge des condensateurs par le biais du déclencheur manuel associé à une fibre optique, il est nécessaire d'effectuer la réouverture de l'interrupteur 1 afin de protéger l'alimentation d'un retour possible d'une impulsion de tension dans l'alimentation. Le boîtier de déclenchement à fibre optique permet aussi d'envoyer, au moment du déclenchement manuel, un signal TTL au niveau d'une entrée de la carte d'interface d'acquisition des mesures par fibre optique, jouant ainsi le rôle de trigger extérieur. L'acquisition des mesures de tension, de courant et de pression est alors possible sur le logiciel fourni par la société E.T.E.P..

L'analyse graphique du système automatique ci-dessus, conduit au GRAFCET de la figure II-21.

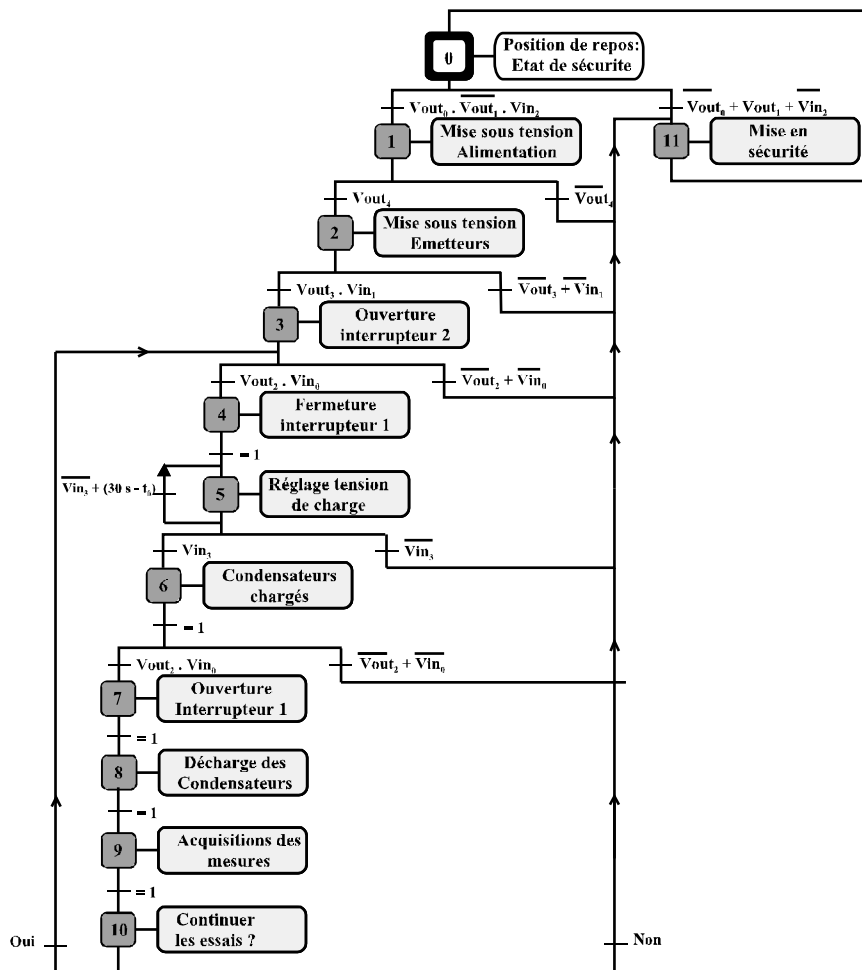


Figure II-21 : Séquence menant à une décharge électrique dans l'eau

La séquence présentée figure II-21 correspond à un fonctionnement « normal » du processus automatisé. Si un problème apparaît au niveau d'une étape de cette séquence, la procédure de mise en sécurité du prototype est lancée : les étapes s'enchaînent, effectuant les actions inverses de la séquence précédente. L'étape ultime est la mise en sécurité complète (position de repos) du prototype ; l'ouverture des portes est alors possible.

Pour des raisons de clarté, nous avons séparé le GRAFCET d'une séquence en fonctionnement « normal » de celui d'une mise en sécurité du prototype, proposé sur la figure II-22 :

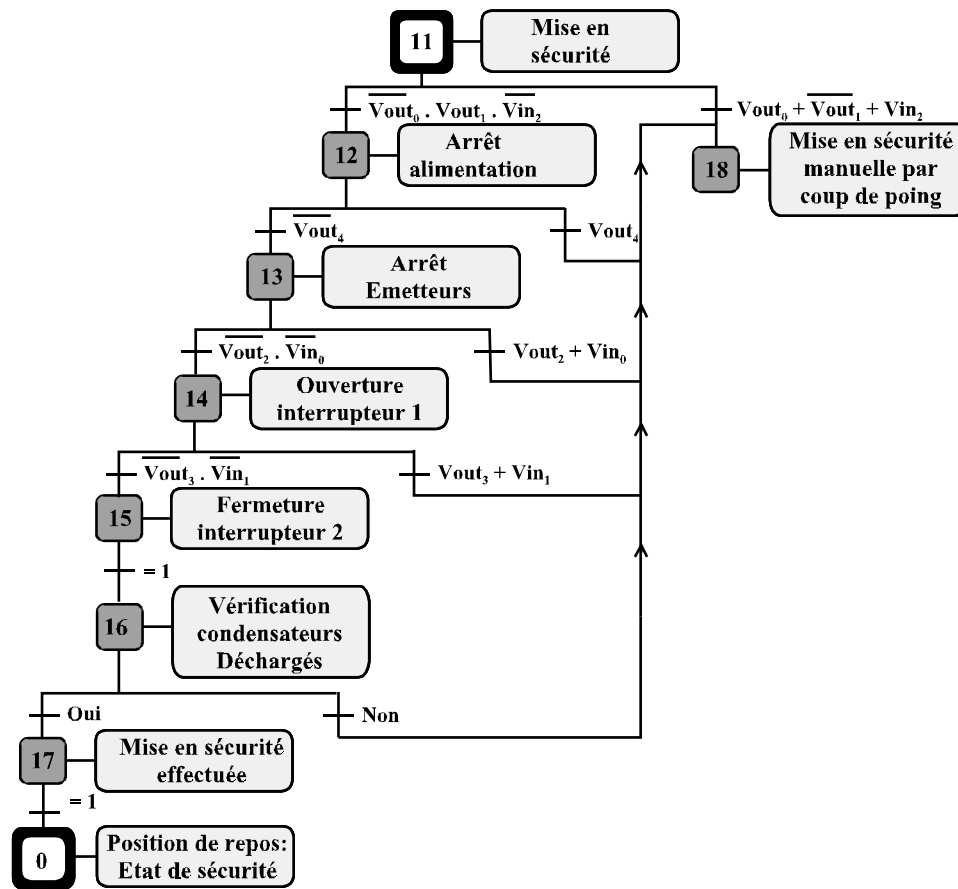


Figure II-22 : Séquence type d'une mise en sécurité du prototype

Le code permettant de commander les deux cartes PC OPDIO 16 et ETEP et de traiter différentes informations a été réalisé sous le logiciel Visual Basic 5.0 durant cette étude. L'interface graphique, créée pour faciliter le travail de l'utilisateur du démonstrateur et intitulée « logiciel de commande et de contrôle », est visible sur la figure II-23. Cette figure montre l'interface à un moment où la séquence n'a pas encore été lancée, c'est-à-dire lorsque

le démonstrateur est dans sa position de sécurité. L'étape du GRAFCET correspondant à cet instant est l'étape 0.

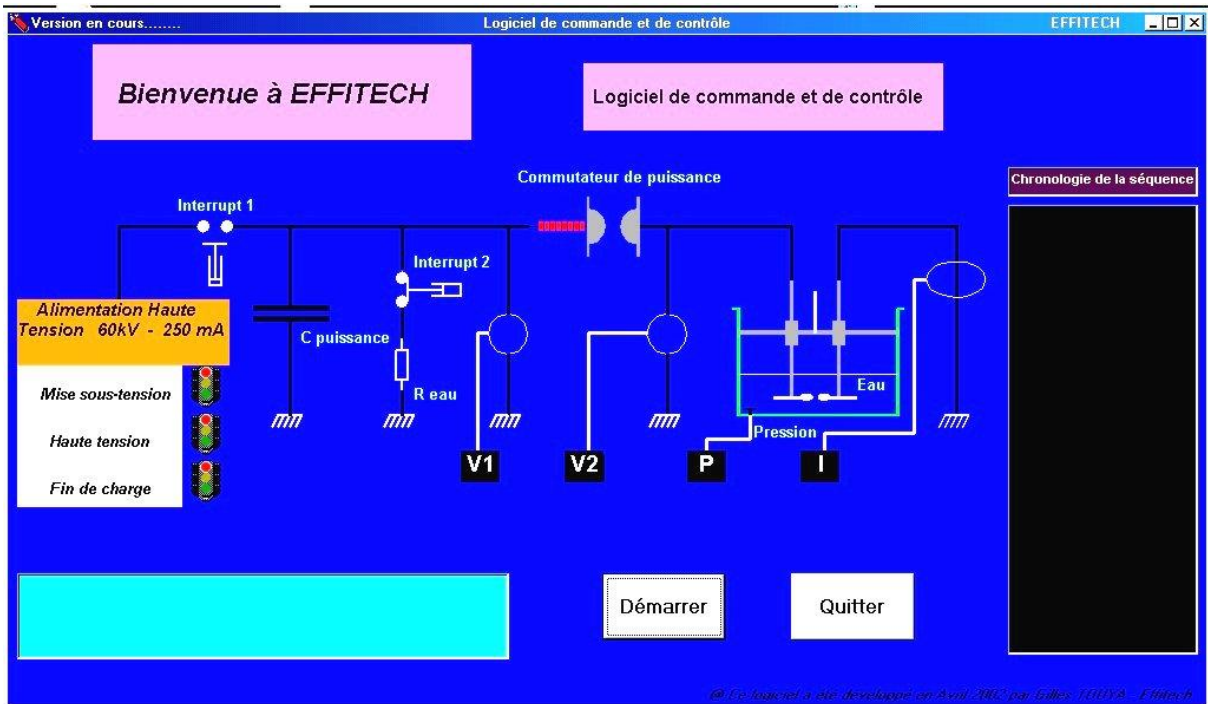


Figure II-23 : Interface graphique permettant la visualisation des étapes d'une séquence

Le schéma visible sur l'interface graphique correspond au schéma de principe de l'automatisation du démonstrateur indiqué figure II-20. Le lancement du logiciel s'effectue en appuyant sur le bouton « Démarrer ». L'application effective de chaque étape, dès le lancement d'une séquence, est visible en temps réel sur l'interface graphique au niveau du rectangle horizontal, en bas, à gauche. La chronologie des étapes déjà effectuées s'inscrit dans le rectangle vertical de couleur noire, à droite de l'interface.

Cette interface graphique est interactive avec le code Visual Basic, non seulement par le biais de textes déroulant mais aussi par un jeu de changement de couleur et de déplacement d'objets correspondant au passage d'une étape bien particulière.

Par exemple, lorsque l'étape 8 du GRAFCET de la figure II-21 a été effectuée, c'est-à-dire quand l'utilisateur du démonstrateur a déclenché manuellement la décharge électrique dans l'eau, l'interface graphique du « logiciel de commande et de contrôle » présente les caractéristiques suivantes :

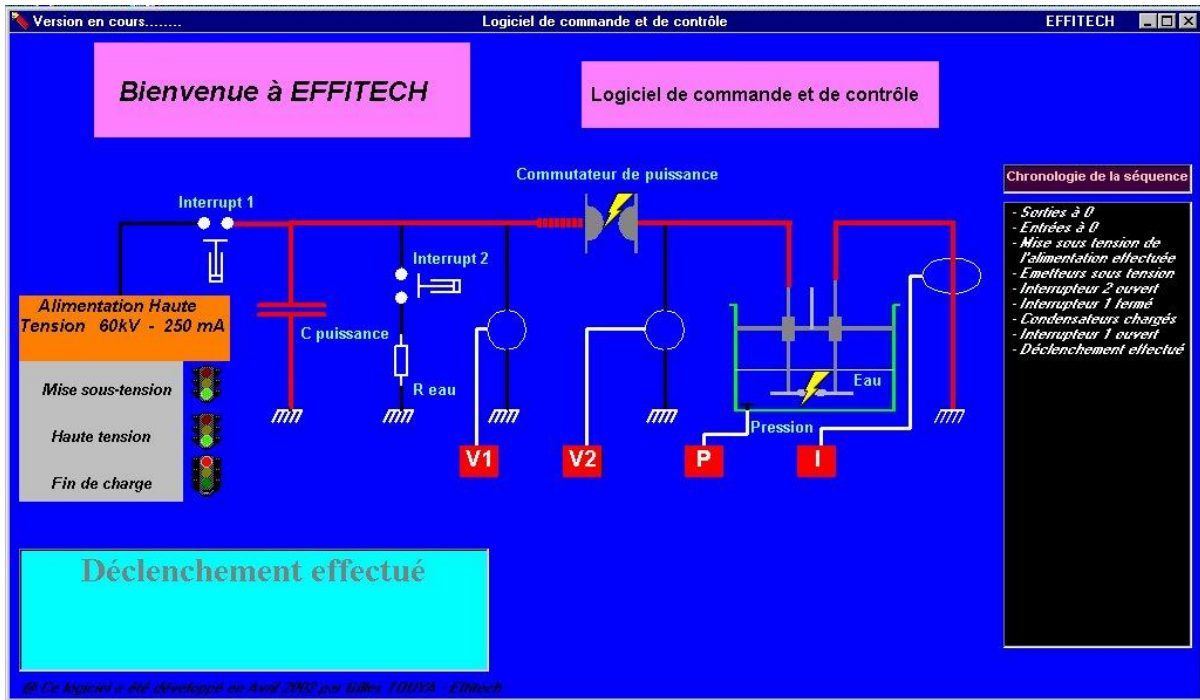


Figure II-24 : Interface graphique au moment de l'étape 8 de la figure II-21

L'état de l'interface graphique, à ce moment de la séquence, montre bien que :

- § Etape 1 (voir GRAFCET figure II-21) ; l'alimentation haute tension continue est sous tension (les feux sont passés au vert au niveau de *Mise sous tension* et *haute tension*),
- § Etape 2 : les coffrets interfaces analogiques optiques (émetteurs) sont sous tension (V_1 , V_2 , P et I sont de couleur rouge),
- § Etape 3 : l'ouverture de l'interrupteur 2 est effectuée (*Interrupt 2* ouvert),
- § Etape 6 : les condensateurs ne sont plus chargés (le feu est repassé au rouge au niveau de *fin de charge*),
- § Etape 7 : L'interrupteur 1 est fermé (*Interrupt 1* fermé et de couleur rouge),
- § Etape 8 : le déclenchement manuel a été effectué et la décharge électrique a eu lieu (les connexions électriques passent au rouge et des éclairs clignotants apparaissent entre les électrodes).

L'étape de la séquence actuellement active, sur la figure 24, est le *déclenchement de la décharge* (rectangle horizontal), et toutes les autres étapes déjà effectuées sont visibles sur le rectangle vertical, à droite.

2.2. Dispositif expérimental du banc à faible énergie

Parallèlement aux essais « fortes puissances », nous avons monté un banc haute tension commutant des énergies beaucoup plus faibles (inférieures à 2kJ). L'objectif de cette étude est d'aboutir à une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu lors de la décharge électrique dans l'eau, non seulement en vue de l'optimisation du démonstrateur industriel mais également pour aborder des applications connexes basées sur l'apparition de radicaux OH ou l'émission de lumière UV.

2.2.1. Montage expérimental

Le fonctionnement de ce banc d'essais est basé sur le même principe que celui du prototype industriel, à savoir la commutation de puissances pulsées. Deux types de générateurs haute tension ont été utilisés sur ce montage :

§ des condensateurs à capacité variable ($1\text{nF} < C < 1,2\mu\text{F}$) pouvant atteindre des énergies de 2kJ. L'énergie emmagasinée dans les condensateurs est commutée à l'aide d'un éclateur à air de type trigatron (figure II-6).

§ des générateurs de type Marx.

La charge des condensateurs s'effectue par l'intermédiaire d'une alimentation continue haute tension (100kV, 12mA), à travers une résistance de $1\text{M}\Omega$. L'impulsion de déclenchement du commutateur à air ou du générateur de Marx est transmise par fibre optique, par l'intermédiaire d'un générateur d'impulsions 20kV.

Les condensateurs se déchargent dans une enceinte remplie d'eau, entre deux électrodes en acier inoxydable de géométrie variable et dont la distance est ajustable de 1mm à 10cm. Le rayon de courbure de l'électrode active peut varier de 100 micromètres, pour des pointes fines à 16 millimètres dans le cas d'une sphère. L'enceinte de forme cubique est en acier inoxydable et possède un volume de 4 litres. Elle est munie d'une traversée haute tension et dispose de quatre hublots permettant des mesures optiques.

Le principe de ce banc d'essais est indiqué sur la figure II-25 qui suit.

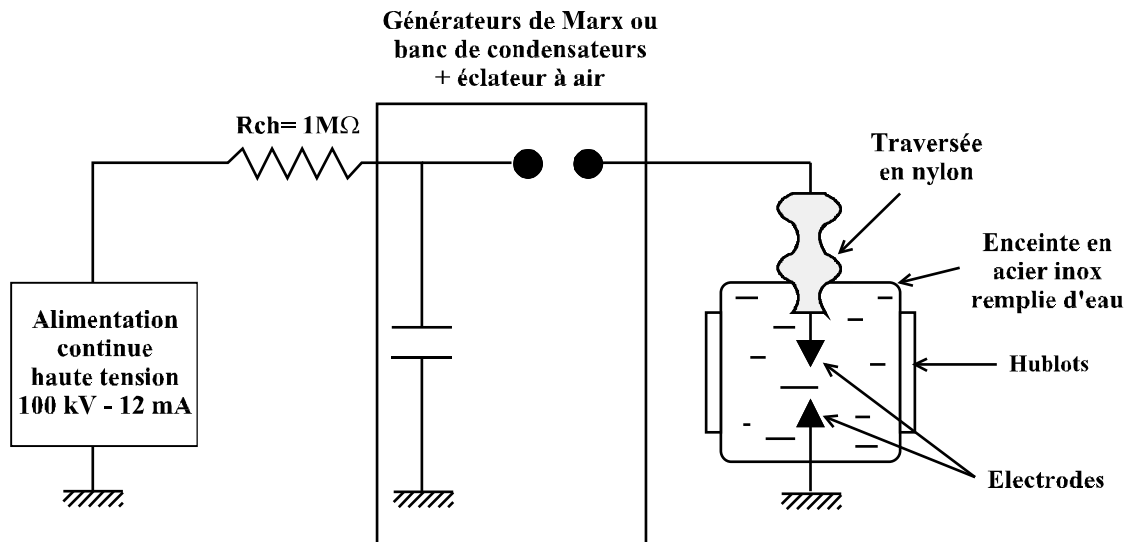


Figure II-25 : Montage expérimental du banc faible énergie

2.2.2. Générateurs haute tension

Outre les différents condensateurs utilisés à l'unité ($C = 2,27\text{nF}$; $3,4\text{nF}$; 200nF et 400nF), associés à leur commutateur à air, trois générateurs de Marx et un banc de condensateurs de plus forte énergie ont été utilisés sur le banc d'essais afin de disposer de différentes formes d'ondes de tension à appliquer à l'espace inter-électrodes.

§ Un banc de six condensateurs montés en parallèle de capacité totale $C = 1,2\mu\text{F}$ peut délivrer des impulsions de tensions bi-exponentielles de 60kV d'amplitude avec des fronts $t_f = 20\text{ns}$; la durée à mi-hauteur t_h dépend étroitement de la conductivité de l'eau et de la distance inter-électrodes D ; à titre d'exemple, $t_h = 350\mu\text{s}$ dans l'eau du robinet pour $D = 10\text{mm}$.

§ Le premier générateur de Marx est composé de 20 étages pouvant délivrer une tension crête de 250kV et une énergie de 3 Joules. Il est associé à un diviseur capacitif 250kV qui joue le rôle à la fois de capacité de mise en forme de l'impulsion et de système de mesure. Son rapport de division est $1 / 9,2$. Les fronts de l'onde de tension générée peuvent être ainsi ajustés dans la gamme de $10\text{ns} - 250\text{ns}$ à l'aide de résistances de front variables.

§ Nous avons utilisé un autre générateur de Marx à 5 étages dont la tension crête peut atteindre 100kV pour une énergie de 50 Joules. Les fronts de l'onde de tension peuvent aller de 100ns à $1\mu\text{s}$.

§ Un dernier générateur de Marx à thyristors a été utilisé : il peut délivrer des tension de 120kV et des énergies de 5 Joules ; le front des impulsions de ce générateur est de 100ns.

2.2.3. Mesures électriques

2.2.3.1. Mesures de tension

Les formes des ondes de tension obtenues sur le banc d'essais peuvent être très différentes. Deux types de sondes de tension ont donc été utilisés :

§ une sonde Tektronix P 6015A de rapport 1 / 1000. La bande passante de cette sonde est de 100MHz . Elle peut mesurer des impulsions de 40kV et des tensions continues jusqu'à 20kV ;

§ un diviseur capacitif réalisé au laboratoire antérieurement. Il est constitué de deux condensateurs en série (C_p et C_T). Le condensateur de tête C_T (quelques pF) est une capacité à air dont les armatures sont formées par deux plateaux en regard. Le condensateur de pied ($C_p = 2nF$) comprend la capacité interne du diviseur et la capacité du câble de connexion à l'oscilloscope. Le rapport de division du dispositif est donné par l'équation suivante :

$$k = \frac{V_s}{V_e} = \frac{C_T}{C_T + C_p} \quad (\text{II-2})$$

où V_e est la tension à mesurer et V_s la tension obtenue par le diviseur.

Ce rapport de division est ajusté en fonction de la distance entre les plateaux. Un tel diviseur peut supporter des tensions de 400kV et sa bande passante est de 300MHz. Par contre, il ne peut pas mesurer de signaux présentant des composantes continues et les impulsions de tension de durée supérieure à 200 μ s ne peuvent pas être mesurées.

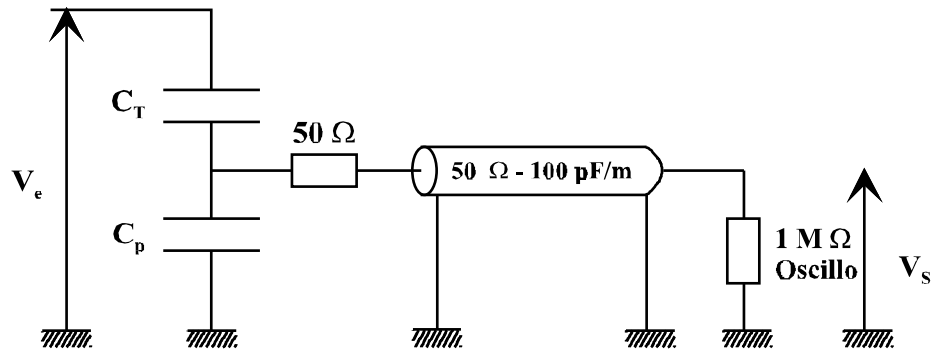


Figure 11-26 : Représentation électrique du diviseur capacitif

2.2.3.2. Mesures de courant

Deux types de sondes de courant ont été utilisés sur le banc d'essais : des sondes de Pearson et des sondes réalisées au laboratoire sur le principe des sondes de Rogowski (sondes 1 ci-dessous).

	Sonde 1 + Intégrateur 60 kΩ - 20 nF	Sonde 1 + Intégrateur 6 kΩ - 20 nF	Sonde Pearson Model 101	Sonde Pearson Model 2878	Sonde Pearson Model 4100
Rapport (sans 50 Ω)	0,05 mV/A	0,5 mV/A	0,01 V/A	0,1 V/A	1 V/A
Amplitude max. de courant (A)	Pas de limitation		50000	400	500
Courant max. RMS (A)			200	10	5
Produit courant - temps (A.s)			2,5	0,004	0,002
Temps de montée min. (ns)	20	20	100	5	10

Tableau 11-1 : Caractéristiques des sondes de courant testées sur le banc d'essais

En fonction des caractéristiques reportées dans le tableau ci-dessus, on choisit la sonde la mieux appropriée à la mesure du courant que l'on veut effectuer.

Une sonde de Pearson est composée d'un noyau ferromagnétique torique, à l'intérieur duquel on fait passer le conducteur transportant le courant à mesurer. Le noyau peut être saturé par la composante continue (valeur moyenne) du courant (A), ou par le produit

courant \times temps (A.s) pour un courant impulsionnel. Cette sonde permet de réaliser directement une mesure du courant par l'intermédiaire d'un câble coaxial d'impédance 50Ω sur l'impédance $1M\Omega$ d'un oscilloscope. L'onde de tension obtenue sur l'oscilloscope est une reproduction fidèle de l'onde de courant. La sensibilité de la sonde, en V/A, fournie par le constructeur, nous donne la valeur de l'amplitude du courant à partir du signal visualisé sur l'oscilloscope. Les deux critères caractérisant le maximum de courant admissible (courant crête et courant continu) ne suffisent pas à caractériser la sonde. Comme nous l'avons dit, il faut aussi ajouter le critère de charge, c'est-à-dire le produit courant \times temps, qui indique la quantité de charges maximale que peut accepter la sonde. Au delà de cette valeur, le ferrite situé à l'intérieur de la sonde sature et le signal est tronqué.

La sonde de courant 1 est composée d'une bobine torique, partiellement blindée sur le diamètre extérieur et sur les cotés, à l'intérieur de laquelle peut circuler un conducteur transportant un courant. La sonde mesure le flux magnétique (Φ) engendré par le passage du courant à travers la bobine. Il est proportionnel à la dérivée du courant par rapport au temps ($\Phi = -L.dI/dt$). La sortie de la sonde doit donc être connectée, via un câble coaxial d'impédance 50Ω , à un intégrateur pour pouvoir visualiser sur un oscilloscope un signal proportionnel au courant. L'avantage d'une telle sonde est que sa sensibilité ne varie pas, que l'on applique un faible ou un fort courant. Son étalonnage en est donc facilité : il suffit de réaliser le circuit de la figure II-27 fonctionnant en basse tension, et d'enregistrer, simultanément, les tensions aux bornes de U_R et en sortie d'intégrateur. La sensibilité de la sonde est déduite de la comparaison des deux enregistrements.

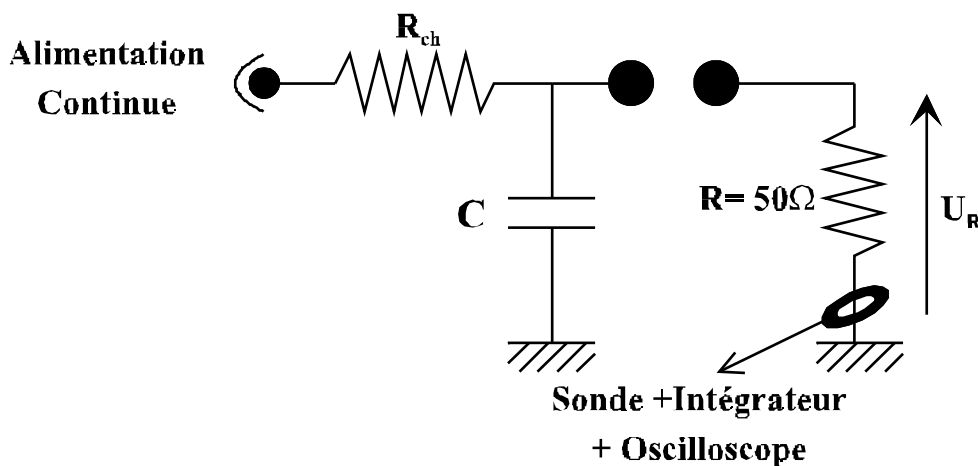


Figure II-27 : Circuit d'étalonnage de la sonde de Rogowski

Le choix du condensateur influe sur la durée de l'impulsion de courant que peut mesurer la sonde. Il faut trouver un compromis entre la constante de temps RC de l'intégrateur et celle R_0C de la mesure ($R_0 = 1M\Omega$ de l'oscilloscope). R_0 étant fixé, une valeur C élevée permet la mesure d'une impulsion plus large au détriment de sa sensibilité.

2.2.3.3. Mesures de température

Au cours d'essais préliminaires, on s'est rendu compte que la température avait une influence non négligeable sur certains paramètres caractéristiques des décharges dans l'eau. On a donc doté le banc d'essais d'un contrôleur de température K6001 de chez Velleman afin de réguler la température de l'eau à l'intérieur de l'enceinte. Ce contrôleur est doté d'un boîtier de réglage et de contrôle de température à affichage numérique, d'un capteur de température de type KTY10 que l'on plonge dans l'eau, et d'un ruban chauffant que l'on enroule autour de l'enceinte. La lecture de température s'effectue en degrés Celcius avec une précision de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. La gamme de température du capteur est de -40°C à 150°C .

Cet appareil nous a permis d'évaluer l'influence de θ sur certains paramètres de la décharge (U_i , $U_{50\%}$, ...) de façon à pouvoir modifier nos mesures ultérieures si nécessaire.

2.2.4. Mesures optiques

Outre les caractéristiques électriques, l'étude des phénomènes lumineux contribue largement à une bonne compréhension des mécanismes de décharge. Nous distinguerons les instruments de mesures optiques à lumière directe, comme les photomultiplicateurs ou les convertisseurs d'images, de celui à lumière indirecte : le strioscope.

2.2.4.1. Lumière directe

a. Les photomultiplicateurs

Un photomultiplicateur, ou PM, est un composant opto-électronique susceptible de fournir un courant sous l'effet d'un flux lumineux incident [REE 97].

Au niveau du banc d'essais, nous utilisons des photomultiplicateurs dont la sensibilité de la photocathode se situe soit dans l'infra-rouge (I.R.), soit dans l'ultra-violet (U.V.). Plus précisément, le photomultiplicateur U.V. utilisé est un XP2012b muni d'une photocathode de

type super A associée à un filtre H325a. Le photomultiplicateur (I.R.) est un XP1017 avec une photocathode de type S20R associée à des filtres J712a ou DJ800b.

La figure II-28 représente les réponses spectrales de la photocathode et du filtre de chacun de ces dispositifs.

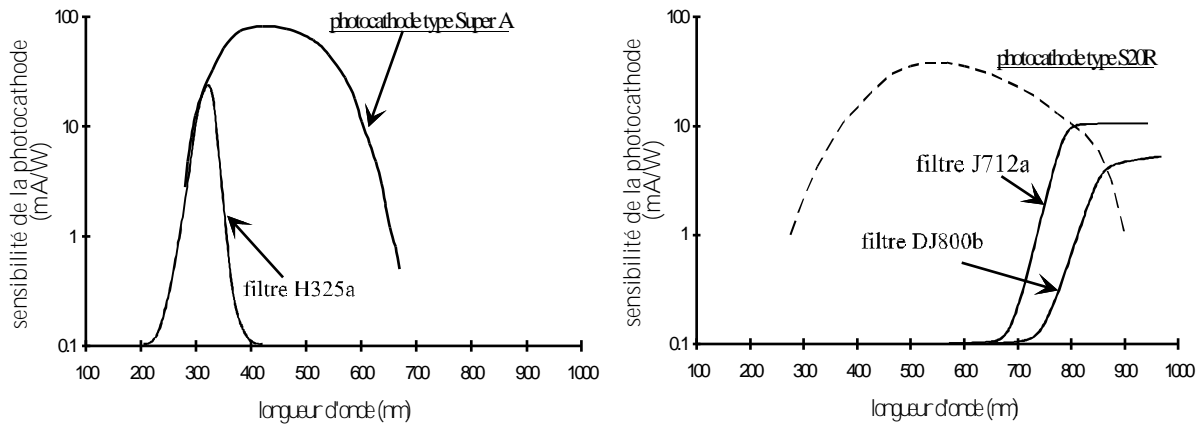


Figure II-28 : Réponse spectrale des P.M. et des filtres associés

b. Le convertisseur d'images

Un convertisseur d'images est un tube à vide équipé d'un écran fluorescent semblable à un tube cathodique, mais sans photocathode chauffée comme source d'électrons. Le faisceau de lumière incidente est focalisé par un objectif sur la photocathode du tube qui est recouverte d'un film photosensible. La lumière extérieure frappe ce film et les électrons, émis à l'intérieur du tube, convertissent l'image optique en image électronique. Celle-ci est accélérée, amplifiée et focalisée sur une photodiode. L'image optique est reformée, à plus forte intensité, sur un polaroïd.

La photocathode du tube est de type S20 T. Sa réponse spectrale, ainsi que les dimensions de la fenêtre de la photoanode sur laquelle se focalise l'image, sont représentées figure II-29.

Le L.G.E. de Pau dispose d'un convertisseur d'images (C.I.) THOMSON TSN 506 permettant d'enregistrer, sur polaroïd, le développement spatio-temporel de la décharge. Ce convertisseur peut être utilisé en mode balayage (streak) ou en mode image par image

(frame). En mode streak, le balayage de la caméra peut varier dans la gamme 180ns – 1ms. Un retard entre le déclenchement de la caméra et le début du balayage peut être introduit.

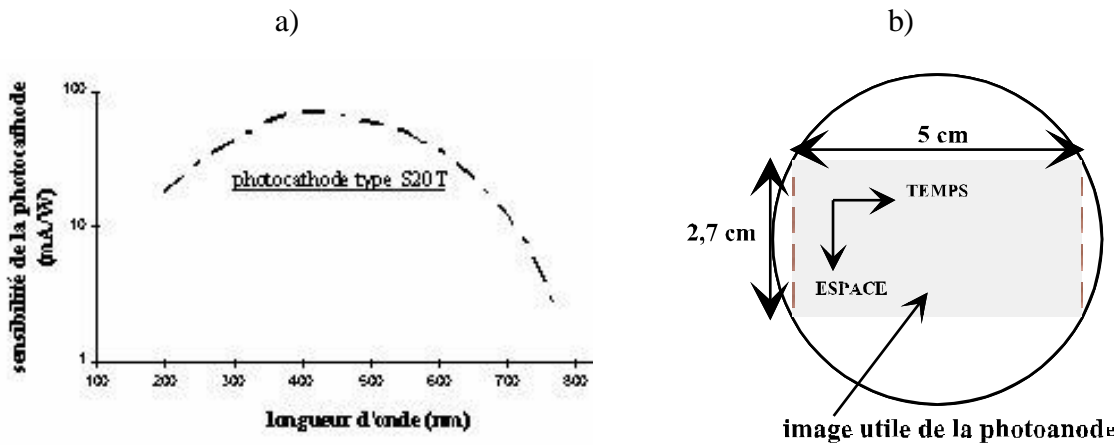


Figure 11-29 : *Caractéristiques du tube de la caméra TSN 506*

- (a) réponse spectrale de la photocathode
 (b) dimensions de la photoanode

En mode frame, ce convertisseur peut prendre une, trois ou six images. Le temps d'exposition de chaque photographie est ajustable dans la gamme 50ns à 10 μ s. Un intervalle de temps variable peut être introduit entre chaque prise de vue. Il doit être supérieur à 2,5 fois le temps d'exposition.

2.2.4.2. *Lumière indirecte : le strioscope*

Les techniques de fonctionnement et d'exploitation d'un strioscope ont été largement décrites par GIBERT [GIB 79]. Dans le cas qui nous intéresse, le strioscope permet d'étudier les variations de densité du milieu inter-électrodes dues, entre autre, au chauffage de l'eau. Nous allons brièvement rappeler les principes de base de la strioscopie.

a. Principe de fonctionnement

La figure II-30 représente, schématiquement, le principe à simple traversée c'est-à-dire un strioscope dans lequel les rayons traversent une seule fois le volume où se produit le phénomène à étudier. L'image d'une source lumineuse S est formée sur le biseau d'un couteau C₁, l'axe de l'image coïncidant avec l'arête du couteau. Ce dernier est situé au foyer

F_1 d'une lentille L_1 . Le phénomène à étudier est placé dans le faisceau de rayons parallèles entre les lentilles L_1 et L_2 . L'image inversée C'_1 de C_1 et l'image de S sont formées en F_2 , dans le plan focal de L_2 . Dans ce plan focal est placé un second couteau C_2 dont l'arête est parallèle à celle de C_1 . La lentille L_3 , disposée derrière F_2 , donne, sur un écran E situé dans le plan conjugué observé, une image I sur fond d'éclairement réglable et uniforme. Cet éclairement est proportionnel à la distance h entre l'arête C_2 et le bord de C'_1 .

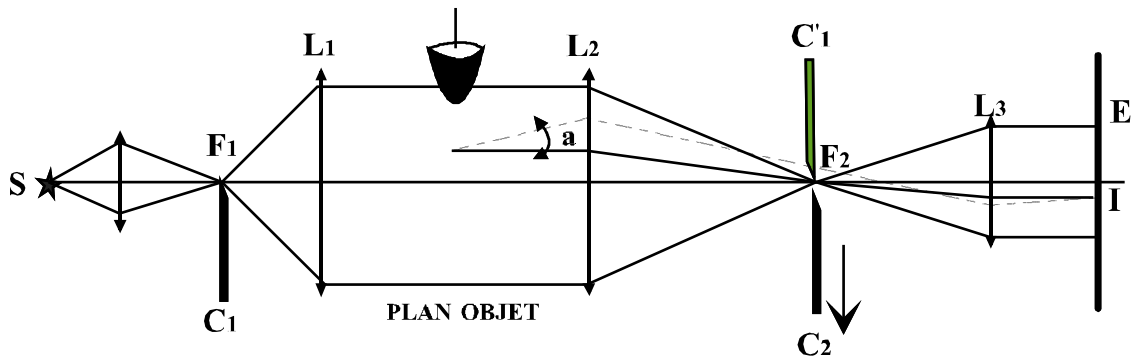


Figure II-30 : Principe d'un strioscope à simple traversée

Si l'indice de réfraction d'une région du phénomène à étudier varie, la trajectoire des rayons lumineux traversant cette zone est modifiée. En effet, l'indice de réfraction n d'un gaz et sa masse volumique ρ sont liés par l'expression suivante :

$$\frac{n-1}{\rho} = \text{Cste} \quad (\text{II-3})$$

Une modification de ρ entraîne une modification de l'indice ce qui entraîne une variation d'un angle a du chemin optique. Il s'en suit une variation d'éclairement observée sur l'écran E .

Cette méthode est très intéressante car elle utilise une source lumineuse extérieure et permet de s'affranchir de la lumière émise par la décharge. On peut donc, par l'intermédiaire de la variation de l'indice du milieu, visualiser l'évolution thermique de zones particulières, notamment à proximité de l'électrode active.

Au niveau de notre banc d'essais, nous utilisons le banc strioscopique aussi bien en « strioscope » qu'en « ombroscope ». Dans ce dernier cas, il suffit d'enlever les couteaux C_1 et C_2 , visibles sur la figure II-30. Ainsi, dès que l'on a une forte variation d'indice dans le

milieu, les rayons parallèles, émis par la source auxiliaire, sont déviés et cela se traduit par une zone sombre. On notera que, dans ce cas, la lumière émise par la décharge n'est pas occultée.

b. Le strioscope du L.G.E.

Le strioscope dont nous disposons a le même principe de fonctionnement que celui de la figure II-30, mais les lentilles L_1 et L_2 sont remplacées par des miroirs sphériques M_1 et M_2 de diamètre 20 cm et de 2 m de distance focale qui ont pour avantage de réduire les pertes de lumière. L'appareil se compose d'un banc d'émission et d'un banc de réception. Le banc d'émission comporte la source S de lumière, un objectif qui forme l'image de la source sur l'arête du couteau C_1 , le miroir M_1 et un miroir auxiliaire afin de dévier la direction du faisceau lumineux.

Le banc de réception comprend le miroir M_2 , un miroir auxiliaire de renvoi, le couteau C_2 et un téléobjectif mobile pour permettre la mise au point sur la photocathode d'un convertisseur d'images placée dans le plan image du dispositif optique.

La source de lumière auxiliaire utilisée repose sur le principe de la décharge d'un condensateur dans un tube à arc à atmosphère de Xénon. Le déclenchement de l'arc est obtenu par une brève impulsion de tension de 7kV appliquée à une grille entourant le tube. L'impulsion lumineuse fournie par ce type de source a une durée à mi-hauteur de 200 μ s. Cependant, le régime d'émission lumineuse maximale n'est obtenu que 70 μ s après la mise sous tension. Ce retard sera pris en compte dans la synchronisation et le déclenchement des différents appareils.

Dans le cas le plus classique, le strioscope est associé à un convertisseur d'images fonctionnant en mode frame ou streak. On peut également y associer un photomultiplicateur et mesurer ainsi les temps de chauffage ou de retour à l'équilibre [BAY 88].

Le dispositif expérimental complet est visible sur la figure II-31.



Figure II-31 : Vue du dispositif expérimental

2.3. Conclusion du chapitre

Nous venons de décrire tous les systèmes expérimentaux qui ont été développés durant ce travail. Le point commun entre ces deux systèmes est qu'ils génèrent tous deux des décharges électriques dans un diélectrique liquide (eau). Ces décharges électriques sont associées à la production d'ondes de choc en vue d'une application à définir à la demande. Cette notion d'ondes de choc est apparue comme essentielle dans l'optimisation du processus de traitement ; c'est pourquoi le chapitre 3 est intégralement consacré à une étude physique et électrotechnique de la décharge électrique dans l'eau afin de mieux comprendre et maîtriser tous les paramètres liés à l'amélioration du procédé.

CHAPITRE 3

ETUDE DE LA DECHARGE ELECTRIQUE DANS L'EAU

3. Etude de la décharge électrique dans l'eau

3.1. Présentation du problème

Les premiers essais ont pour but de dégrossir le problème et de fixer les ordres de grandeurs des paramètres que nous souhaitons mesurer : la tension, le courant, la pression et la lumière émise par la décharge. Des essais préliminaires ont été réalisés à partir du dispositif expérimental présenté figure II-25 et utilisant des condensateurs de $1,2\mu\text{F} - 2\text{kJ}$. Les mesures de courant ont été réalisées au moyen d'une sonde de Pearson modèle 101 et celles de tension avec le diviseur compensé décrit au chapitre 2. Un capteur piezoélectrique pelliculaire PVDF, de type Bauer et dont les caractéristiques seront précisées dans le chapitre suivant, a été positionné sur l'un des hublots de l'enceinte remplie d'eau de sorte que sa surface active arrive à fleur d'eau, parallèlement à l'axe de symétrie des électrodes. Les enregistrements relatifs à un choc caractéristique sont présentés figure III-1.

Les différentes grandeurs électriques qui caractérisent l'onde de tension, lors d'un claquage de l'intervalle inter-électrodes, sont (figure III-1) :

- § sa valeur maximale U_m ,
- § sa décroissance en $\exp(-t/R_0C)$, $\tau = 15.887 \text{ T} \phi \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 305.52 \quad 2$
- § sa valeur U_b à l'instant t_b du claquage (breakdown),
- § sa chute de tension $\Delta U = U_m - U_b$ (ou sa valeur relative $\Delta U/U_m$),
- § sa largeur $\Delta t = t_b - t_0 \approx t_b$.

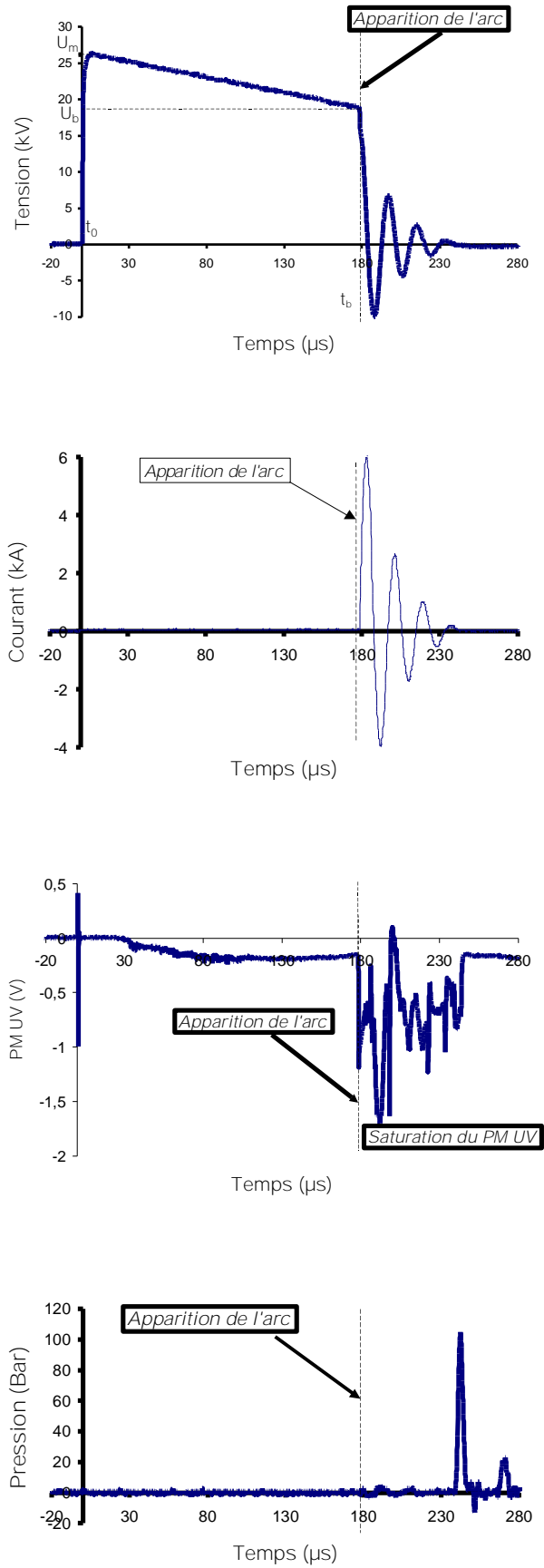


Figure III-1 : Allure de la tension, du courant, de la lumière émise par la décharge et de la pression générés par une décharge électrique dans l'eau en fonction du temps

On constate, sur l'enregistrement de tension, que la phase de prédécharge menant au claquage de l'intervalle dure $180\mu\text{s}$ et, qu'à cet instant, la tension a chuté d'environ 25%. Le courant pendant la phase de prédécharge ($0 < t < 180\mu\text{s}$) est de l'ordre de 50A puis atteint des valeurs voisines de 6kA au moment de l'arc. Concernant l'enregistrement de la lumière émise par la décharge, il est intéressant de remarquer que l'émission lumineuse ne commence que $30\mu\text{s}$ après l'application de l'onde de tension. On note ensuite une émission plutôt continue qu'impulsionnelle, sauf, évidemment, au moment de l'arc. En ce qui concerne l'onde de pression engendrée par l'arc dans l'eau (premier pic), elle survient $60\mu\text{s}$ après l'apparition de l'arc. Le capteur étant situé à une distance $d = 90\text{mm}$ de l'axe pointe - plan, l'onde de pression s'est donc propagée à une vitesse de 1500m/s ; cette valeur est en accord avec la vitesse de propagation du son dans l'eau ($v = 1425\text{m/s}$). La seconde impulsion correspond à une réflexion de l'onde de pression à l'intérieur de l'enceinte.

Ces premiers essais font apparaître un problème essentiel lié au paramètre t_b de la décharge électrique dans l'eau : le jitter sur ce paramètre est très important c'est-à-dire que, pour une même tension maximale U_m , la valeur de t_b peut varier dans une très grande plage, surtout si l'on travaille à U_{50} (voir paragraphe 3.3.4.1.). Pour fixer les idées, nous avons trouvé, pour un nombre pourtant limité de chocs, $40\mu\text{s} < t_b < 500\mu\text{s}$. Ainsi, la tension de claquage U_b de l'espace inter-électrodes peut être de très faible amplitude. Il en résulte une énergie disponible très faible, au moment du claquage, ce qui nous éloigne du but industriel recherché.

Pour essayer de comprendre ce phénomène mais aussi, de façon plus générale, la phénoménologie de la décharge dans l'eau, nous avons entamé une étude plus approfondie.

Les recherches bibliographiques sur le sujet mettent en évidence deux modes de prédécharges dans l'eau, et plus généralement dans les liquides :

§ un mode « lent », ou « subsonique », dans lequel la décharge se propage par l'intermédiaire de bulles de gaz (paragraphe 3.3.),

§ un mode « rapide » ou « supersonique, de formes filamentaires (paragraphe 3.4.).

Alors que la majorité des auteurs s'accorde à dire que le mode subsonique semble provenir d'un processus thermique [BRI 94, GAV 94, BER 95, JON 95, BER 98], la phénoménologie du mode supersonique n'est pas encore bien définie. Divers auteurs ont

proposé des processus d'initiation et de propagation de la décharge différents [GAV 94, FEL 88, JON 95, LEW 98], qui seront développés au paragraphe 3.4.4.5.

Ce chapitre n'a pas la prétention de conduire à une compréhension totale de la phénoménologie de la décharge électrique dans l'eau ; nous allons simplement chercher, par une analyse bibliographique et par diverses études expérimentales, à effectuer un état de l'art de ce problème et à contribuer à l'évolution des connaissances sur le sujet de manière à pouvoir, à notre tour, exposer notre point de vue.

3.2. Configuration des essais

3.2.1. Dispositif expérimental

Le montage expérimental utilisé pour l'étude de la décharge électrique dans l'eau est proposé figure III-2 dans laquelle on a représenté l'ensemble des appareils de mesure, présenté au chapitre précédent, ainsi que les dispositifs de déclenchement que nous avons utilisés pour réaliser ces essais.

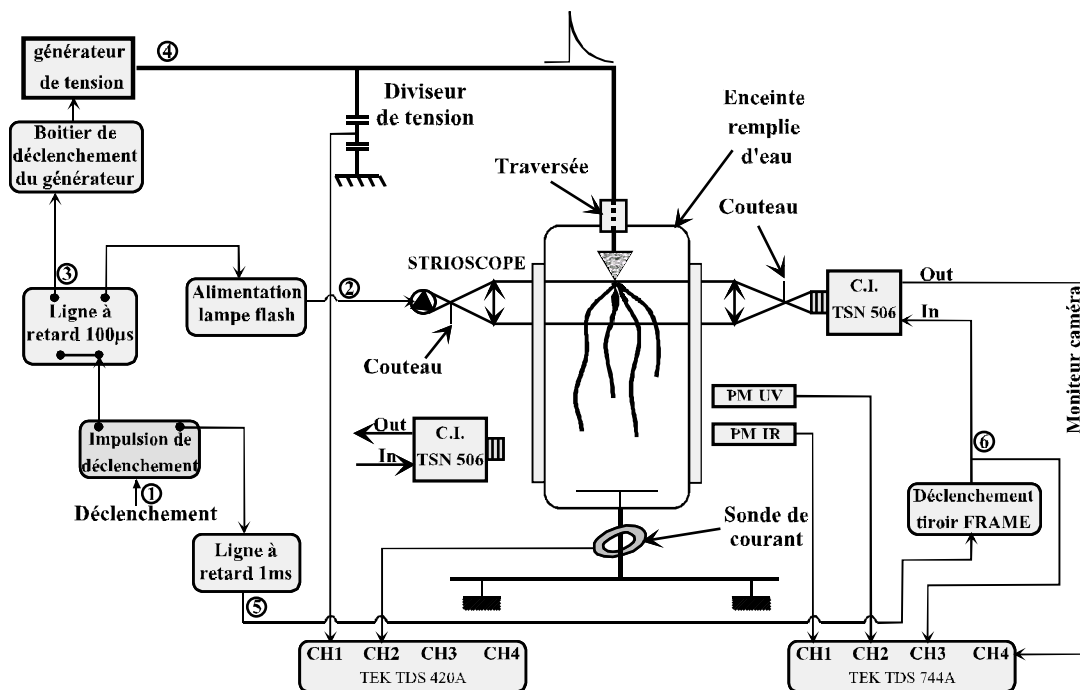


Figure III-2 : Dispositif expérimental

L'appareillage optique qui compose ce banc est constitué de deux photomultiplicateurs (l'un sensible dans l'ultraviolet et l'autre dans l'infrarouge) et du convertisseur d'images THOMSON TSN506. Ce dernier est placé soit en bout de banc, pour les enregistrements réalisés en strioscopie et en ombroscopie, soit perpendiculairement à ce même banc pour les enregistrements effectués en lumière émise par la décharge et en éclairage indirect. Le convertisseur permet, à l'aide de différents objectifs, de viser tout l'intervalle ou des régions précises de l'espace inter-électrodes.

L'acquisition des signaux électriques tels que la forme de l'onde de tension, le courant, les signaux fournis par les photomultiplicateurs ou encore les impulsions d'ouverture et de fermeture du convertisseur, est réalisée au moyen de deux oscilloscopes numériques TEKTRONIX TDS 420A et TDS 744A.

3.2.2. Déclenchement et synchronisation (figure III-3)

Avant de charger en parallèle le banc de condensateurs, nous réglons l'écartement des deux sphères du commutateur de puissance de telle sorte que la tension de charge des condensateurs soit légèrement inférieure à la tension d'amorçage de l'intervalle inter-électrodes du commutateur. De cette manière, il suffit d'appliquer une impulsion de tension de 20kV aux bornes du commutateur pour que les condensateurs se déchargent dans l'eau.

Si le banc de strioscopie est utilisé, une impulsion de synchronisation TTL est envoyée dans une ligne à retard qui va, dans un premier temps, déclencher la lampe flash, via un générateur d'impulsions, puis, 70 μ s plus tard, déclencher l'impulsion de tension de 20kV nécessaire à la commutation des condensateurs (ce délai est nécessaire pour permettre à la lampe flash d'atteindre une intensité suffisante).

L'impulsion de synchronisation TTL initiale est envoyée dans une autre ligne à retard ajustable permettant de déclencher le convertisseur d'images. Le retard maximum peut atteindre 1ms. Pour déclencher le convertisseur d'images, un boîtier électronique est intercalé entre la ligne à retard et le convertisseur d'images auquel il fournit, à partir du signal TTL, une impulsion de 15V avec un temps de montée de 20ns et une durée à mi-hauteur de 500ns. Une telle impulsion est nécessaire pour déclencher la caméra.

L'ensemble des systèmes de déclenchement a été mis au point par A. GIBERT.

La figure III-3 schématise la chronologie des systèmes de déclenchement décrits ci-dessus :

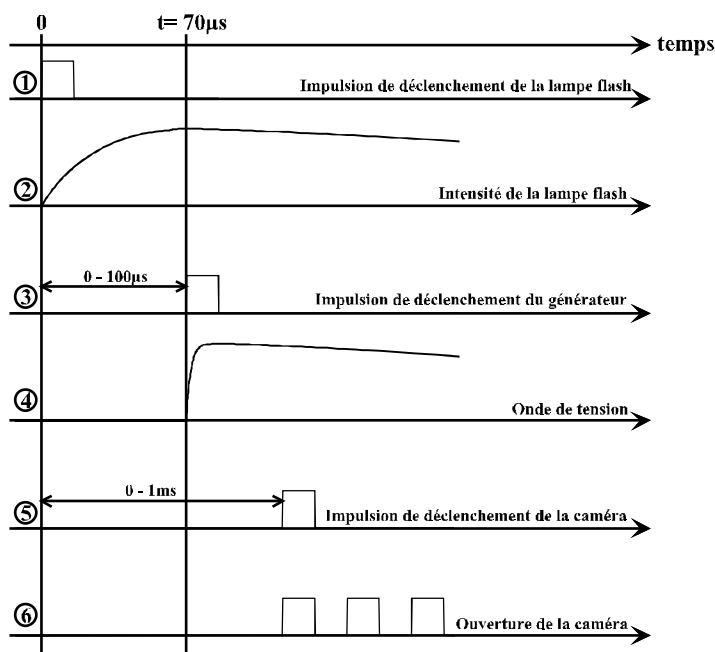


Figure III-3 : Chronologie des systèmes de déclenchement

3.3. Décharges subsoniques

Le générateur de tension utilisé pour l'étude des décharges subsoniques est constitué d'un banc de six condensateurs ($C = 6 \times 0,2\mu\text{F}$), chargés en parallèle par une alimentation continue haute tension 100kV-12mA. Ces derniers sont déchargés à travers un commutateur à air de puissance, entre deux électrodes, dans une enceinte remplie d'eau, comme indiqué sur la figure II-25. L'onde de tension, de caractéristiques temporelles 0,02/350µs, n'excèdera pas 30kV de tension crête.

3.3.1. Première approche

Nous utilisons une géométrie pointe à la haute tension plan à la masse. L'extrémité de la pointe a un rayon de courbure R_p de 1,5mm et le plan, cylindrique, un rayon de 25mm. Ces électrodes, en acier inoxydable, sont distantes de 10mm. L'eau utilisée est de l'eau du robinet de conductivité $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$.

Un exemple caractéristique du développement d'une décharge dans l'eau sous de telles conditions et pour la polarité positive, est présenté figure III-4. Il s'agit d'une photographie prise au convertisseur d'images THOMSON TSN 506 fonctionnant en mode frame. La décharge est éclairée au moyen de la lampe flash placée contre un hublot de

l'enceinte ; le convertisseur d'images est positionné derrière un hublot faisant face à la lampe flash. Nous appellerons ce type d'enregistrement « enregistrement en lumière indirecte » (par opposition aux enregistrements de la seule lumière émise par la décharge et qualifiée de lumière directe). La figure III-4 correspond à une tenue.

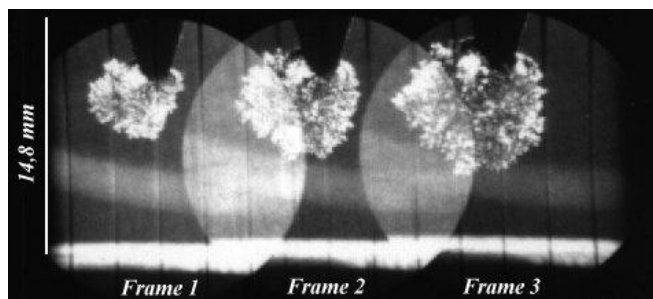


Figure III-4 : Convertisseur d'images en mode frame d'une décharge électrique subsonique dans l'eau (polarité positive, $U_m = 17,8\text{kV}$, $D = 10\text{mm}$, $R_p = 1,5\text{mm}$, $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$, $t_{F1} = 317\mu\text{s}$, $t_{F2} = 425\mu\text{s}$, $t_{F3} = 538\mu\text{s}$)

Des essais similaires ont été réalisés en polarité négative. Un exemple de la propagation d'une telle décharge est présenté figure III-5.

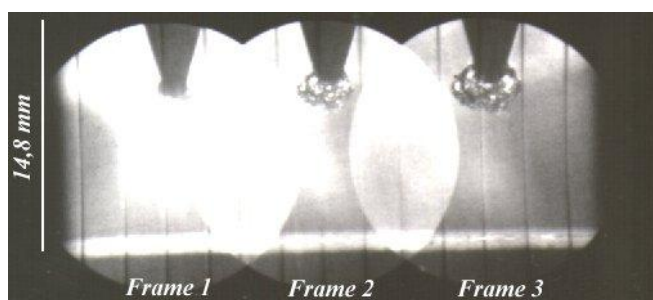


Figure III-5 : Convertisseur d'images en mode frame d'une décharge électrique subsonique dans l'eau (polarité négative, $U_m = -13,6\text{kV}$, $D = 10\text{mm}$, $R_p = 1,5\text{mm}$, $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$, $t_{F1} = 438\mu\text{s}$, $t_{F2} = 560\mu\text{s}$, $t_{F3} = 670\mu\text{s}$)

Ces premières photographies, en positif comme en négatif, mettent clairement en évidence que la rupture diélectrique découle de l'apparition, à partir de l'électrode portée à la haute tension, de bulles de gaz qui se multiplient en tendant à remplir l'espace inter-électrodes. Il faut préciser que, dans les deux cas, nous sommes en limite du claquage de l'intervalle inter-électrodes.

On note une différence de morphologie et de taille entre la « bulle » de gaz sous polarité positive et celle sous polarité négative. Le « volume » de gaz qui se développe dans l'intervalle en polarité positive semble découler d'un agrégat de petites bulles alors que, pour le négatif, ces petites bulles semblent beaucoup moins nombreuses. Cette différence peut

avoir, à notre avis, deux principales causes : d'une part, le fait que les décharges positives et négatives dans les gaz sont très différentes ; d'autre part, que la nature du gaz n'est peut être pas la même dans les deux cas. Nous y reviendrons ultérieurement (paragraphe 3.3.3.4.b.).

3.3.2. Etude détaillée de la chronologie en positif

3.3.2.1. Les enregistrements strioscopiques

De manière générale, les enregistrements strioscopiques sont utilisés pour mettre en évidence la variation d'indice de réfraction de certaines zones d'un milieu transparent. Ces variations d'indice sont principalement dues à des variations de température et/ou de pression. L'utilisation de cette technique, lors de l'étude des décharges électriques dans les gaz, a donné des résultats très intéressants [DOM 88]. Nous avons donc réalisé des essais similaires sur la décharge électrique dans l'eau. La figure III-6 (a) montre une photographie en strioscopie d'une décharge subsonique dans l'eau, lors d'une tenue.

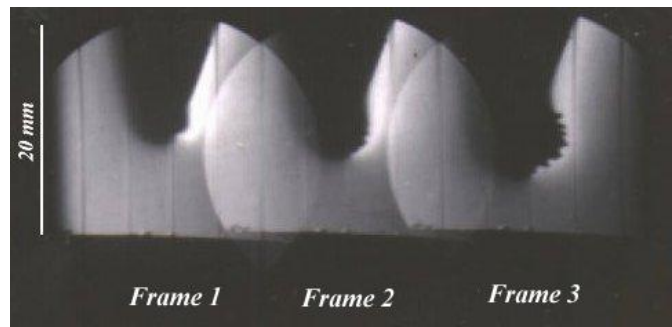


Figure III-6: (a) Enregistrements strioscopiques mettant en évidence l'évolution thermique de la décharge ($U_m = 18,5\text{kV}$, $D = 10\text{mm}$, $R_p = 1,5\text{mm}$, $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$, $t_{F1} = 96\mu\text{s}$, $t_{F2} = 206\mu\text{s}$, $t_{F3} = 320\mu\text{s}$)

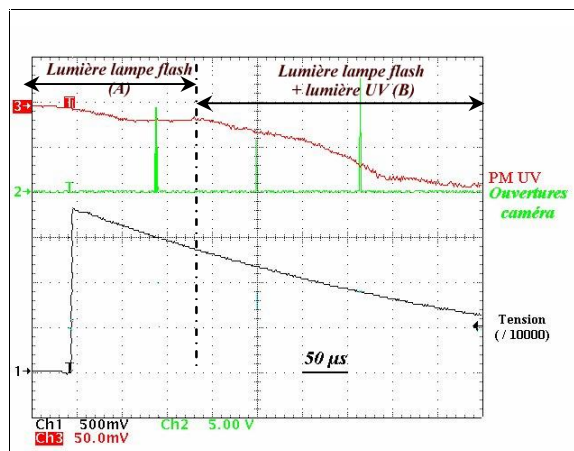


Figure III-6 : (b) Allure de l'onde de tension, des impulsions de synchronisation d'ouverture de la caméra et de la lumière émise en fonction du temps, correspondant à la figure III-6 (a)

Les résultats obtenus sont moins riches en informations que lors de l'étude des décharges dans les gaz et c'est normal : pour les gaz, nous sommes en présence de variations d'indices de réfraction relativement faibles puisqu'il n'y a pas de changement de phase. Ici, le fait que deux phases d'indices de réfraction sensiblement différents soient en présence, produit des déviations conséquentes du faisceau lumineux. Il n'y a plus de dégradé de gris sur les clichés ; c'est du tout ou rien : noir ou blanc suivant que la partie concernée du faisceau incident est déviée ou non.

Analysons les figures III-6 : la figure III-6 (a) représente le cliché strioscopique et ses trois images prises en mode frame. La figure III-6 (b) illustre, entre autre, l'évolution de la lumière émise par la décharge en fonction du temps et sur laquelle nous distinguons deux phases notées (A) et (B). La phase (A) correspond à la lumière émise par la lampe flash, captée par le photomultiplicateur ; on la reconnaît à son front de montée caractéristique $t_f = 70\mu s$. La phase (B) correspond à la superposition de la lumière de la lampe flash et de la lumière émise par la décharge. Il apparaît donc clair que, compte tenu de la position des impulsions de synchronisation d'ouverture de la caméra, la première image se situe à un instant où la décharge n'émet pas encore de lumière. Par contre, les deuxième et troisième images se situent dans la phase (B) où il y a émission de lumière. Il est intéressant de noter, sur l'image 1, la régularité des contours de la zone sombre en extrémité de pointe contrairement aux images 2 et 3 où apparaissent des protubérances que l'on attribue aux bulles de gaz. La zone (A) est donc essentiellement une zone de chauffage de l'eau. De la lumière n'apparaît que dans la zone (B), lorsqu'il y a des bulles. Cette lumière est, selon toute vraisemblance, due à des décharges électriques dans les bulles.

On peut se demander s'il n'apparaît pas, durant la phase (A), de bulles de petites tailles que la résolution de notre convertisseur ne permet pas de détecter. C'est possible, mais de telles bulles, si elles existent, ne semblent pas être le siège de décharges : des essais effectués en supprimant la lampe flash de façon à pouvoir augmenter la sensibilité du PM l'ont montré.

Notons également qu'aucune onde de pression n'est émise dans le champ de visée du strioscope lors du développement de cette phase de prédécharge.

La figure III-7 présente un autre diagramme correspondant à une décharge subsonique dans l'eau, réalisée dans les mêmes conditions que lors de l'enregistrement de la figure III-6.

Lors de cet essai, nous avons remplacé le convertisseur d'images, sur le banc de réception du strioscope, par un photomultiplicateur muni d'une fente visant la pointe de

l'électrode haute tension afin d'étudier le chauffage du milieu (voir figure III-2). On rappelle que ce type d'essai permet de mettre en évidence le chauffage de la zone visée par le PM à fente [BAY 88]. Ce récepteur, nettement plus sensible que le convertisseur d'images, nous a permis de baisser l'intensité de la lampe flash dont la contribution, lors de l'enregistrement au moyen du PM de la lumière émise lors de la phase (B), est ainsi minimisée. Si l'on compare l'allure du signal fourni par le photomultiplicateur à fente à celle du signal fourni par le photomultiplicateur qui capte la lumière émise par la décharge, on note que la variation d'indice apparaît avant l'initiation de la lumière. Pour l'eau utilisée ($\sigma = 220\mu\text{S}/\text{cm}$), on peut supposer que l'énergie injectée est majoritairement consommée par effet joule plutôt que par électrolyse. La zone sombre, uniforme, visible sur l'image 1 de la figure III-6 (a), correspond au chauffage de la région environnant la pointe haute tension ; cette phase de la décharge n'émet pas de lumière, contrairement à la suivante sur laquelle on observe des « aspérités » caractéristiques de petites bulles de gaz.

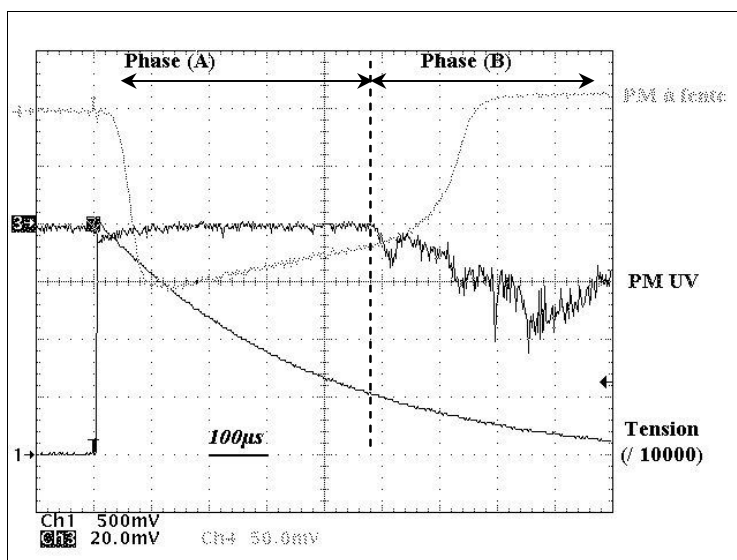


Figure III-7 : Allure de l'onde de tension, de la lumière émise (PM UV) et du chauffage (PM à fente) au niveau de la pointe haute tension en fonction du temps

D'autres enregistrements strioscopiques ont été réalisés, en polarité positive, afin de compléter l'étude du chauffage, sans émission de lumière, de la région entourant la pointe. On suit ainsi, figure III-8, le développement de la zone de chauffage au voisinage de la pointe. Cette méthode ne permet malheureusement pas de quantifier la valeur de la température.

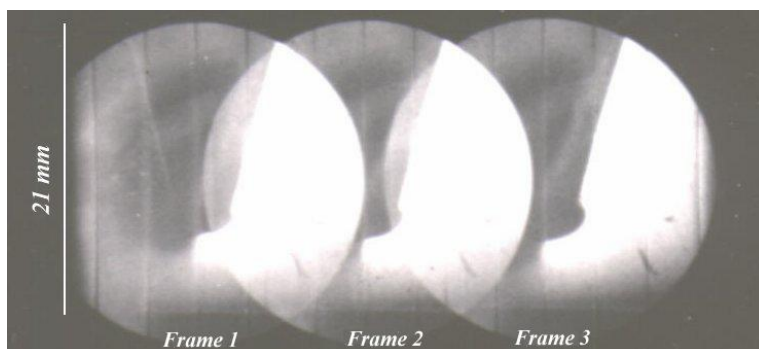


Figure III-8 : Enregistrements strioscopiques mettant en évidence la première phase de l'évolution thermique de la décharge ($U_m = 19\text{kV}$, $D = 6\text{mm}$, $R_p = 1,5\text{mm}$, $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$, $t_{F1} = 45\mu\text{s}$, $t_{F2} = 85\mu\text{s}$, $t_{F3} = 125\mu\text{s}$)

Nous avons ensuite réalisé des essais, en ombroscopie, en enlevant les couteaux du banc strioscopique (voir figure III-2). La figure III-9 représente un des enregistrements obtenus, avec les mêmes impulsions de synchronisation d'ouverture de la caméra que lors de l'enregistrement représenté figure III-6 (a); comme nous pouvons le constater, il ne révèle aucun autre détail déjà mis en évidence par l'effet strioscopique. Nous retrouvons les deux phases de la décharge : le chauffage non lumineux puis l'émission de lumière liée à l'apparition de bulles.

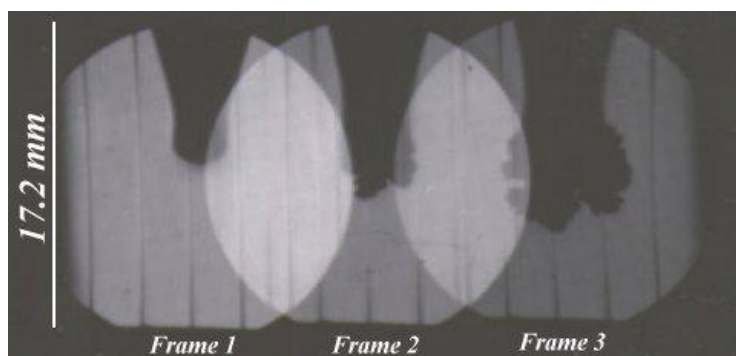


Figure III-9 : Enregistrements en ombroscopie mettant en évidence l'évolution de la décharge ($U_m = 19,5\text{kV}$, $D = 10\text{mm}$, $R_p = 1,5\text{mm}$, $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$, $t_{F1} = 92\mu\text{s}$, $t_{F2} = 202\mu\text{s}$, $t_{F3} = 320\mu\text{s}$)

3.3.2.2. Etude de l'apparition des bulles et de la lumière

Afin d'obtenir des informations complémentaires concernant le développement de la décharge subsonique dans l'eau, nous avons effectué un certain nombre d'enregistrements par la méthode que nous avons précédemment qualifiée de « lumière indirecte ». Avec cette configuration d'essais, il n'est pas possible d'obtenir des enregistrements de lumière émise

par la décharge car la lampe flash, située à une dizaine de centimètres de la décharge, sature le photomultiplicateur.

Les trois enregistrements de la figure III-10 ont été effectués aux mêmes instants et sous les mêmes conditions que les enregistrements présentés figures III-6 (a) et III-9, lors d'une tenue.

La première image de cet enregistrement montre que la phase de chauffage, non lumineuse, ne coïncide pas avec l'apparition d'une bulle de gaz visible optiquement.

Ce mode d'éclairage nous permet également de mieux discerner les contours du volume gazeux et d'observer plus en détail les petites bulles périphériques. Elles correspondent aux « aspérités » déjà visibles en strioscopie et en ombroscopie.

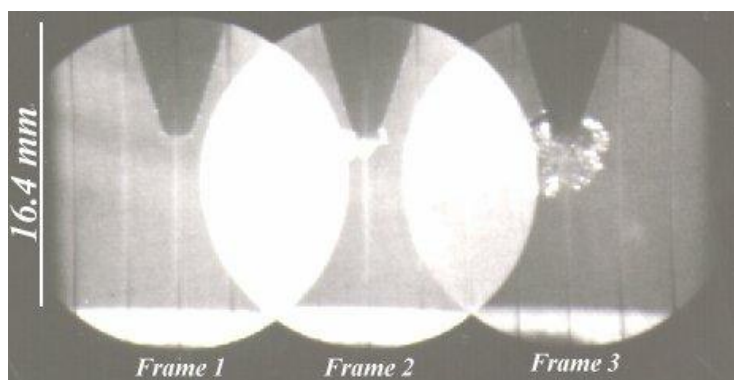


Figure III-10 : Enregistrements réalisés en lumière indirecte et mettant en évidence l'évolution de la décharge ($U_m = 18,2kV$, $D = 10mm$, $R_p = 1,5mm$, $\sigma = 220\mu S/cm$, $t_{F1} = 93\mu s$, $t_{F2} = 202\mu s$, $t_{F3} = 315\mu s$)

A partir de cet enregistrement, on peut calculer la vitesse d'expansion du volume de gaz dans l'eau que nous estimons à $v = 20ms^{-1}$. Si nous réalisons la même mesure sur les différents enregistrements dont nous disposons, la vitesse maximale que l'on trouve est $v = 30ms^{-1}$ et la vitesse minimale de $15ms^{-1}$. Ces valeurs justifient le terme de « décharge subsonique » utilisé par de nombreux auteurs [FEL 88, GAV 94, KUK 96, LES 96, BER 98, KUK 99] pour désigner ce mode de décharge.

Les différents enregistrements réalisés en lumière indirecte montrent que les bulles de gaz occupent des volumes différents suivant l'instant auquel la photographie a été prise. Le volume de gaz créé au niveau de l'électrode haute tension est donc fonction de l'énergie

injectée dans l'intervalle. La figure III-11, représentant le volume de gaz créé en fonction de l'énergie injectée dans l'intervalle, regroupe l'ensemble des résultats obtenus.

Sur cette figure, sont également portées les valeurs théoriques des volumes d'eau que l'on peut porter à ébullition lorsque l'on considère que toute l'énergie injectée est utilisée en chauffage. Un tel volume peut se calculer à partir de l'équation suivante :

$$\Delta E = m.c.\Delta T \tag{III-1}$$

avec ΔE : variation d'énergie

$$\Delta T = 100-20 = 80^\circ\text{C} \text{ (variation de température)}$$

$$c : \text{chaleur spécifique} = 4,18 \text{ J.g}^{-1}\text{C}^{-1}$$

$$m : \text{masse de l'eau} = \rho \times V$$

avec V : volume correspondant

$$\rho : \text{masse volumique de l'eau} = 1\text{gcm}^{-3}$$

Soit $\Delta E_{\text{exp.}}$, la variation d'énergie mesurée expérimentalement : $\Delta E_{\text{exp.}} = C(U_r)^2 T \varphi \mu \Phi \delta \quad 21.2'$

On peut alors déterminer le volume V correspondant :

$$V = \frac{\Delta E_{\text{exp.}}}{\rho.c.\Delta T} \tag{III-2}$$

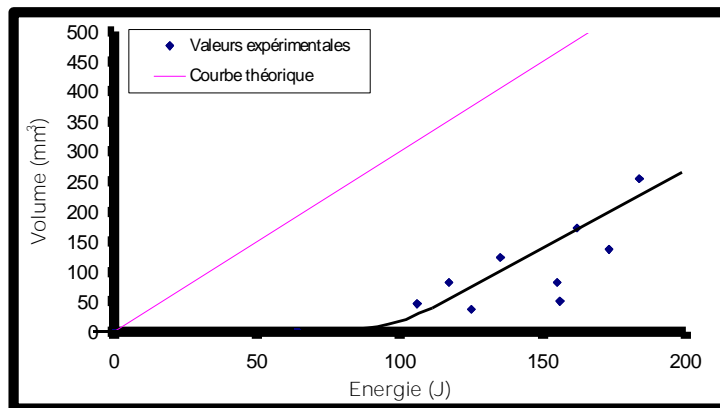


Figure III-11 : Variation du volume de gaz créé en fonction de l'énergie injectée

Il est intéressant de noter que la courbe expérimentale présente un seuil. En d'autres termes, et toujours dans l'hypothèse où toute l'énergie consommée est utilisée pour le chauffage de l'eau, il apparaît que, dans la configuration géométrique utilisée, il est nécessaire

d'injecter environ 70J pour pouvoir créer des bulles discernables au voisinage de l'électrode haute tension. Ce seuil passé, le volume de gaz (difficile à mesurer avec précision) est pratiquement proportionnel à l'énergie injectée. Le franchissement, par les bulles, de l'espace inter-électrodes restant ne nécessite, ensuite, qu'une centaine de joules. Dans la phase initiale, il est vraisemblable que l'hypothèse de la consommation d'énergie exclusivement par chauffage n'est pas justifiée (électrolyse, ionisation, ...). Par contre, une fois les premières bulles créées, il se peut que le mode de chauffage des suivantes ne soit plus le même : nous voulons dire par là que ce serait les décharges, à l'intérieur des bulles existantes, qui créeraient la thermalisation des suivantes. L'apport d'énergie serait essentiellement consacré à cette thermalisation ; il y aurait donc moins de « pertes » par les autres modes de dissipation de l'énergie. C'est pourquoi, la courbe expérimentale serait alors pratiquement parallèle à la courbe théorique représentative de l'utilisation de toute l'énergie en thermalisation.

Bernades et Roses [BER 83] ont réalisé des essais similaires avec des distances inter-électrodes variant de 1mm à 3mm. Ils ont estimé que l'énergie utile pour atteindre la rupture diélectrique de l'eau variait de 30J à 100J.

3.3.2.3. Analyse d'un claquage

Les enregistrements présentés précédemment correspondent à des tenues de l'intervalle inter-électrodes. La figure III-12 correspond au développement d'un claquage de l'intervalle dans l'eau.

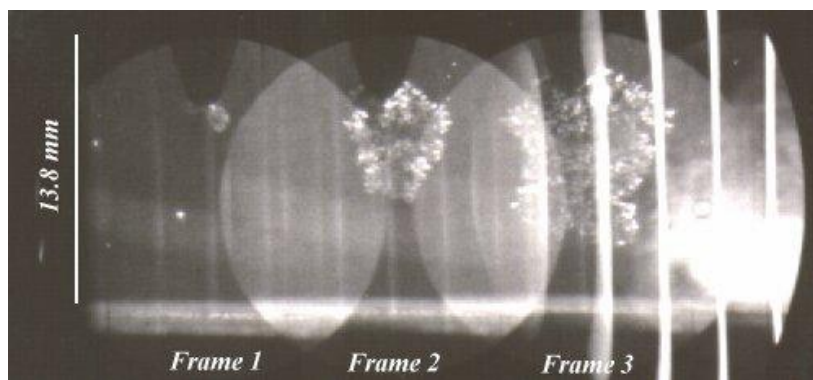


Figure III-12 : (a) Enregistrements réalisés en lumière indirecte et mettant en évidence l'évolution de la décharge lors d'un claquage de l'intervalle ($U_m = 21\text{kV}$, $D = 10\text{mm}$, $R_p = 1,5\text{mm}$, $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$, $t_{F1} = 145\mu\text{s}$, $t_{F2} = 255\mu\text{s}$, $t_{F3} = 370\mu\text{s}$)

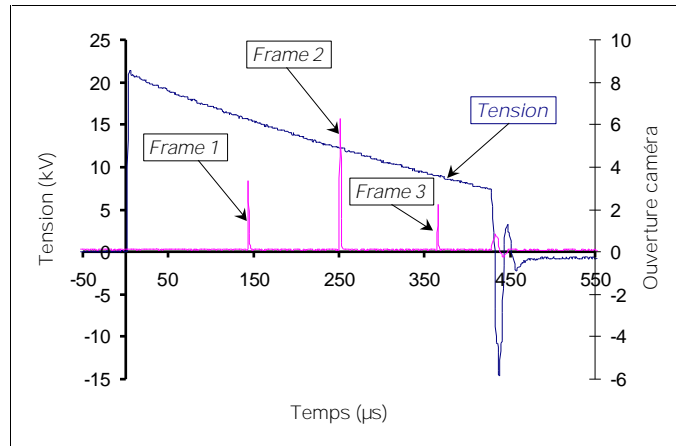


Figure III-12 : (b) Allure de l'onde de tension et des impulsions de synchronisation d'ouverture de la caméra en fonction du temps, correspondant à la figure III-12 (a)

On note que, comme on pouvait le prévoir, le volume de bulles tend à remplir l'espace inter-électrodes au fur et à mesure du développement du phénomène.

Cet enregistrement, associé à tous ceux mettant en évidence une tenue de l'espace inter-électrodes, nous permet de proposer une explication simplifiée de la propagation de la décharge électrique subsonique dans l'eau (figure III-13).

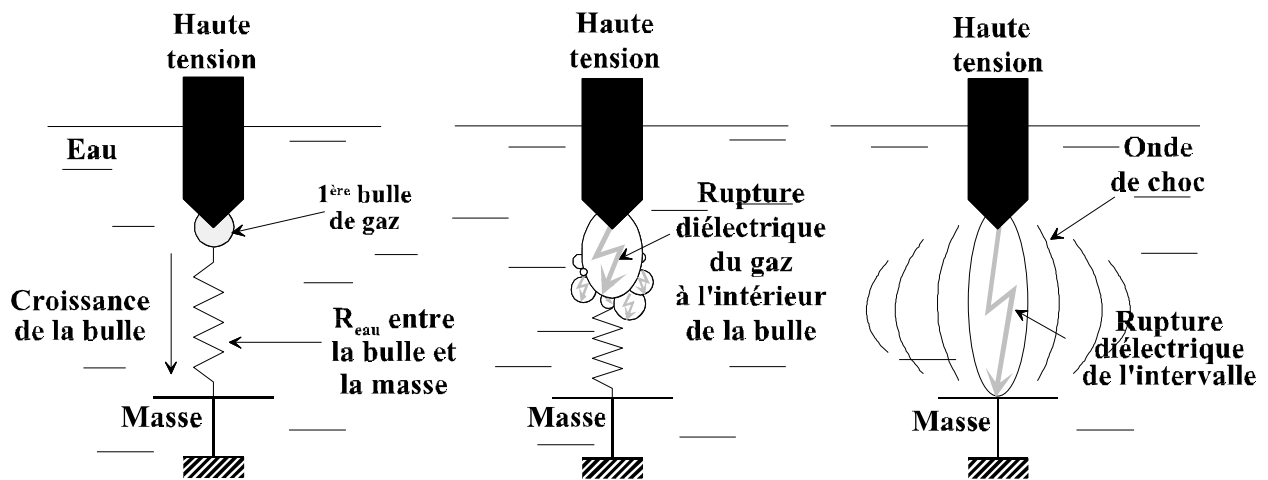


Figure III-13 : Schématisation de la propagation sous polarité positive d'une décharge électrique subsonique dans de l'eau ($\sigma \approx 200\mu\text{S/cm}$)

Dès que le commutateur est déclenché, le banc de condensateurs délivre son énergie au milieu liquide. Cette énergie sert, principalement, à thermaliser ce milieu. Compte tenu de la géométrie pointe – plan utilisée, la concentration des lignes de champ, au voisinage de la pointe, fait que cette zone est préférentiellement chauffée. Une bulle de gaz, vraisemblablement de la vapeur d'eau, apparaît donc au voisinage de la pointe où règne un

champ électrique relativement élevé ($\sim 80\text{kV/cm}$ dans les essais réalisés). Sans entrer dans des considérations aussi détaillées que celles présentées par Aka-Ngnui et Béréal [AKA 01], on peut considérer que cette valeur du champ est plus de trois fois supérieure à celle nécessaire pour déclencher un microclaquage dans la bulle (30kV/cm dans l'air à 27°C). Bien que le courant d'arc soit limité par la résistance du volume d'eau présent entre la bulle et la masse, on a constaté, qu'en plus de l'émission ultraviolette, il y avait émission de lumière infrarouge. Ceci signifie que l'on peut atteindre des températures suffisamment élevées pour thermaliser l'intérieur et le voisinage de la bulle qui a subi un claquage et créer, ainsi, de nouvelles bulles. Le canal d'arc étant conducteur, le potentiel de la pointe est reporté en extrémité de bulle et le phénomène peut se propager. Cette propagation est relativement lente et la tension appliquée décroît au cours du temps. De ce fait, une compétition s'engage entre la vitesse de progression des bulles et la décroissance de l'onde de tension qui conduit aux deux éventualités suivantes :

§ soit il n'y a plus suffisamment de tension, ou d'énergie, pour obtenir des claquages et former de nouvelles bulles et le phénomène s'arrête (tenue),

§ soit le phénomène peut se propager jusqu'à atteindre le plan et il y a rupture diélectrique complète du milieu. On comprend ainsi que les valeurs des tensions pour lesquelles se produisent les claquages (U_b) puissent être beaucoup plus faibles que les valeurs maximales (U_m) de la tension appliquée.

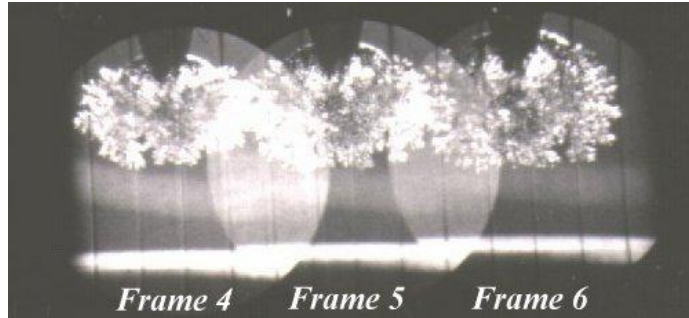
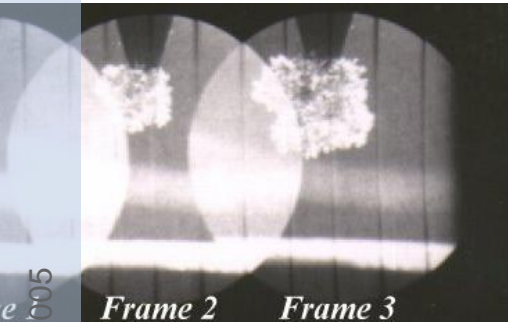
3.3.2.4. *Analyse complète d'une tenue*

La chronologie complète d'une décharge électrique subsonique dans l'eau pour une tenue est représentée figure III-14. Cette figure, comportant 18 clichés (frames 1 à 18), a été réalisée à partir de 6 chocs distincts. Il est important de noter que, pour une tension appliquée $U_m = 17,5\text{kV}$, la durée à mi-hauteur de l'onde de tension est de $350\mu\text{s}$. La phase de progression du volume des bulles dans l'intervalle inter-électrodes se poursuit donc jusqu'à l'image F_3 comprise. La tension étant ensuite inférieure à $U_{\text{max}}/2$, il ne semble plus y avoir de progression longitudinale mais plutôt une expansion radiale (frames 4, 5 et 6) avec aplatissement, côté plan, de l'agrégat de petites bulles. On note, sur ces trois clichés, qu'une grosse bulle semble se développer au voisinage de la pointe. On peut interpréter ce phénomène en considérant que, bien que toutes les bulles semblent avoir à peu près la même taille au moment de leur création, les premières créées sont thermalisées par les arcs successifs qui les traversent. Elles ont donc tendance à grossir et à absorber les plus petites qui présentent une pression interne plus élevée. Les frames 7, 8 et 9 imagent bien ce propos.

Les frames 10 à 18 sont plus délicates à interpréter. On constate que les bulles (grosses et petites) se détachent de la pointe et migrent vers le plan de masse. Nous ne pensons pas que ce soit sous l'action des forces électrostatiques mais plutôt sous celle d'un flux convectif que l'on distingue parfaitement à l'œil nu en strioscopie et que l'on peut comparer au « vent électrique » caractéristique des décharges dans les gaz. La disparition des bulles au voisinage du plan est due au fait que cette zone a été peu thermalisée et que le système retrouve donc son équilibre initial.

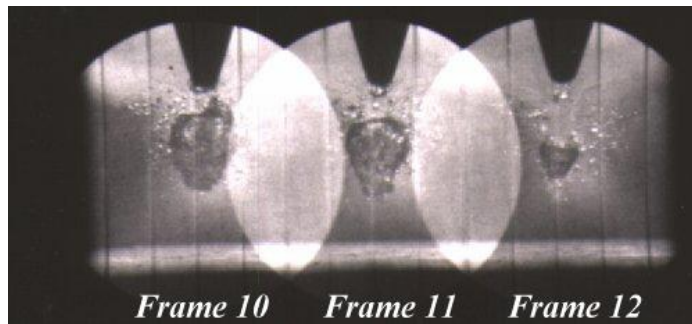
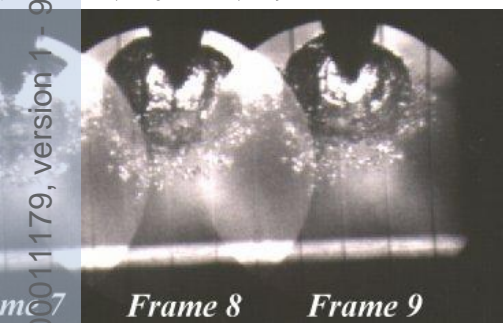
$\Delta t_1 = 137\mu\text{s}$, $\Delta t_2 = 246\mu\text{s}$, $\Delta t_3 = 350\mu\text{s}$
 $V_1 = 14\text{kV}$, $V_2 = 11,2\text{kV}$, $V_3 = 8,6\text{kV}$

$\Delta t_4 = 523\mu\text{s}$, $\Delta t_5 = 631\mu\text{s}$, $\Delta t_6 = 746\mu\text{s}$
 $V_4 = 5,6\text{kV}$, $V_5 = 4,2\text{kV}$, $V_6 = 2,8\text{kV}$



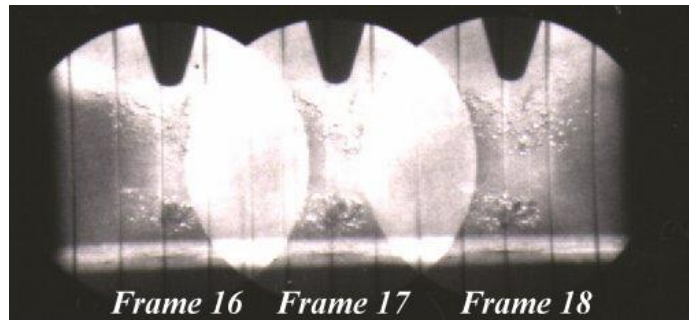
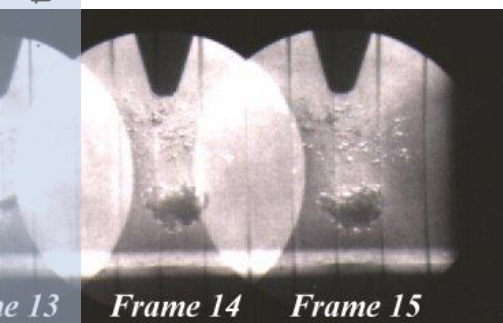
$\Delta t_7 = 1,4\text{ms}$, $\Delta t_8 = 1,5\text{ms}$, $\Delta t_9 = 1,6\text{ms}$
 $V_7 = 200\text{V}$, $V_8 \approx 0\text{V}$, $V_9 = 0\text{V}$

$\Delta t_{10} = 2\text{ms}$, $\Delta t_{11} = 2,1\text{ms}$, $\Delta t_{12} = 2,2\text{ms}$



$\Delta t_{13} = 2,7\text{ms}$, $\Delta t_{14} = 2,8\text{ms}$, $\Delta t_{15} = 2,9\text{ms}$

$\Delta t_{16} = 3,8\text{ms}$, $\Delta t_{17} = 3,9\text{ms}$, $\Delta t_{18} = 4\text{ms}$



3.3.2.5. *Etude de la décharge lors d'une tenue, en lumière émise*

Un autre mode d'étude optique consiste à observer la lumière émise par la décharge. Le positionnement de la caméra est le même que lors des essais précédents (perpendiculaire au banc strioscopique) mais la lampe flash n'est plus utilisée. Un enregistrement de la lumière émise par la décharge lors d'une tenue est proposé figure III-15.

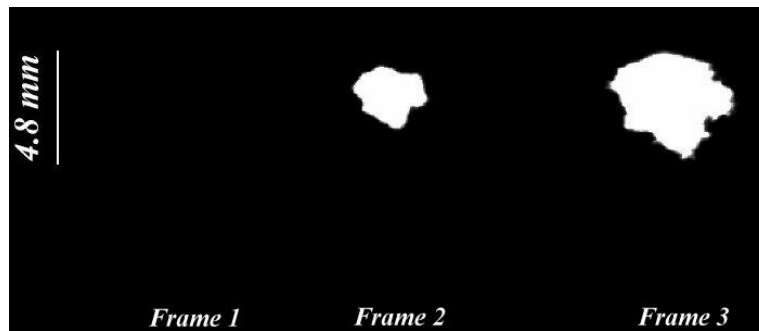


Figure III-15 : (a) *Enregistrement de la lumière émise par la décharge au cours de son évolution* ($U_m = 17,3\text{kV}$, $D = 10\text{mm}$, $R_p = 1,5\text{mm}$, $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$, $t_{F1} = 178\mu\text{s}$, $t_{F2} = 300\mu\text{s}$, $t_{F3} = 412\mu\text{s}$)

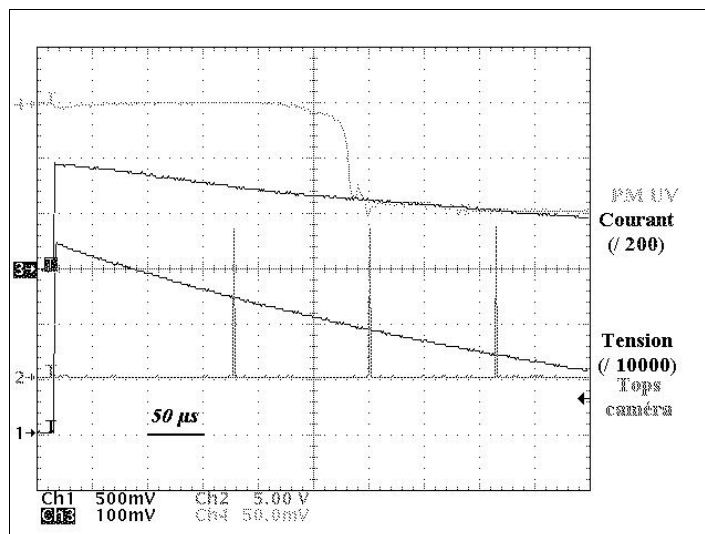


Figure III-15 : (b) *Allure de l'onde de tension, des impulsions de synchronisation de l'ouverture de la caméra, du courant et du PM UV en fonction du temps, correspondant à la figure III-14 (a)*

On constate, comme déjà vu, que l'émission de lumière n'est pas immédiate. De plus, cette émission est violente et blanche. Il ne s'agit donc vraisemblablement pas que de streamers mais également de filaments chauds, voire de leaders. Ceci confirme nos précédentes suppositions.

3.3.2.6. Analyse de la phase post-arc

L'enregistrement de la figure III-16 correspond à la phase post-arc en ce sens que le premier cliché a été pris 26,4 μ s après l'arc dont on voit encore l'empreinte lumineuse.

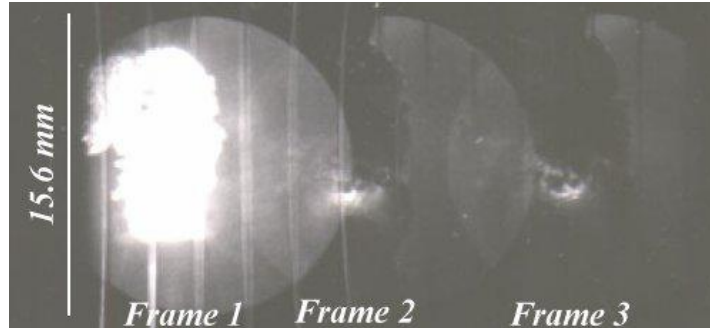


Figure III-16 : (a) Enregistrement de la lumière émise par la décharge lors de la phase post-arc ($U_m = 24\text{kV}$, $D = 6\text{mm}$, $R_p = 1,5\text{mm}$, $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$, $t_{F1} = 26,4\mu\text{s}$ après l'arc, $t_{F2} = 49,6\mu\text{s}$, $t_{F3} = 74\mu\text{s}$)

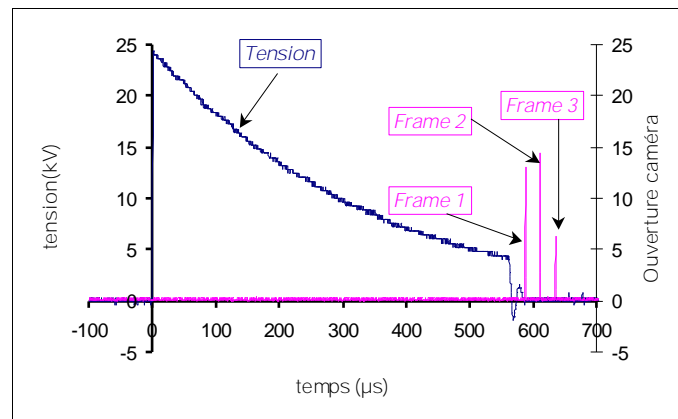


Figure III-16 : (b) Allure de l'onde de tension et des impulsions de synchronisation de l'ouverture de la caméra en fonction du temps, correspondant à la figure III-16 (a)

Nous observons sur les images 2 et 3 de la figure III-16 (a) la présence d'une lumière après le passage à l'arc. Or, au moment des impulsions 2 et 3 d'ouverture de la caméra, la tension et le courant aux bornes des électrodes sont nuls. Cette lumière post-arc ne semble donc pas provenir d'une énergie injectée dans le milieu mais plutôt de la restitution d'énergie stockée. Ce phénomène est sans doute à rapprocher de la *sonoluminescence* qui consiste en une production de lumière par une bulle de gaz comprimée ; il semble que ce phénomène tire son origine de la petite quantité d'argon contenue dans l'air. L'élévation de température consécutive à la compression de la bulle entraîne en effet l'éjection de quelques électrons par les atomes d'argon. C'est l'interaction de ces électrons avec les atomes et les ions, et leur

absorption par ces derniers, qui produit de la lumière [LAR 02]. Dans le cas de la phase post-arc, tous les « ingrédients » (bulles, températures élevées, ondes de pression) sont disponibles pour produire de la luminescence.

Nous venons d'étudier, à l'aide de mesures optiques et électriques, la naissance et la propagation de la décharge subsonique de polarité positive dans l'eau. Cette étude nous a permis de proposer une description physique de la phénoménologie de cette décharge. Dans le paragraphe qui suit, nous allons réaliser une étude électrotechnique dans le but de quantifier certains paramètres influençant la propagation de ce type de décharge.

3.3.3. Etude électrotechnique

3.3.3.1. Mesures du courant

Dans l'étude des décharges électriques, les mesures de courant permettent de déterminer, à tout instant, la quantité de charges et l'énergie injectées. C'est donc un outil précieux dans l'interprétation de la phénoménologie. Malheureusement, lorsqu'on étudie le comportement d'une eau relativement conductrice ($\sigma \sim 200\mu\text{S/cm}$), soumise à une différence de potentiel, le courant de conduction dans le liquide a une valeur élevée par rapport à celle du courant des microdécharges qu'il masque donc. En fait, le courant enregistré est la somme de trois composantes :

- § le courant d'influence, proportionnel à la dérivée du champ $j = \epsilon_0 \partial E_g / \partial t$ et qui est donc prédominant en début d'enregistrement (E_g : champ électrique) ;
- § le courant de conduction de l'eau, qui varie pratiquement proportionnellement à l'onde de tension (loi d'ohm) ;
- § le courant dû à la décharge. Dans le cas considéré (claquage « subsonique » mettant en jeu des bulles de gaz), ce courant découle d'une succession de microclaquages. Il se superpose au courant de conduction mais sa valeur n'est pas mesurable, car nettement plus faible que le courant de conduction, comme on peut le constater figure III-15 (b) [JON 95, VEL 02].

C'est pour cette raison que, dans la suite du travail, nous ne présenterons pratiquement jamais d'enregistrements de courant.

Pour pallier cet inconvénient, nous avons déterminé les charges et l'énergie injectées par le biais des mesures de tension ($dQ = CdV$; $dE = CdV^2/2$). Cette méthode est moins précise que les mesures de courant, notamment lors de variations rapides. Dans ce cas, on rappelle que les enregistrements de la lumière émise par la décharge sont très fortement corrélés à ceux du courant et qu'ils peuvent donc fournir des informations, tout au moins qualitatives.

3.3.3.2. Définition du paramètre U_{50}

L'un des paramètres caractéristiques de la tenue diélectrique d'un intervalle est la valeur maximale U_m de la tension à appliquer pour permettre le claquage de cet intervalle. La détermination de cette valeur fait appel à une étude statistique et des notions de probabilité de claquage. On définit ainsi la tension, notée U_{50} , qui représente la valeur de la tension U_m conduisant à 50% d'amorçages (breakdown) [EDF 84].

Par la méthode appelée « Up and Down » [BOU 71] et en effectuant une série de n chocs, la valeur U_{50} se détermine par :

$$U_{50} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{m_i} \quad (\text{III-3})$$

BOUTTEAU *et al* [BOU 71] ont montré qu'il suffit d'une cinquantaine de chocs pour obtenir une valeur significative de U_{50} .

La dispersion sur les mesures étant importante, l'écart type par rapport à la valeur moyenne sera systématiquement présenté sous forme de barres d'incertitudes.

La valeur U_{50} permet de quantifier la perte de rigidité diélectrique du milieu pour un intervalle et une configuration donnés. Les principaux paramètres qui influencent habituellement cette valeur sont :

- § la forme de l'onde de tension appliquée, qui dans l'étude que nous menons dépend de la valeur de la capacité mais également de la conductivité de l'eau ainsi que de la géométrie inter-électrodes,
- § sa polarité,
- § les conditions « atmosphériques » (température θ et pression P),
- § la nature du diélectrique, ici de l'eau et sa conductivité σ ,

§ la géométrie de l'intervalle (distance inter-électrodes D et rayon R_p de l'électrode haute tension dans le cas d'une géométrie pointe-plan).

3.3.3.3. Reproductibilité des mesures de U_{50}

Avant d'entamer une étude électrotechnique assez systématique, il faut s'assurer de la reproductibilité des mesures et donc quantifier l'influence de certains paramètres afin de connaître les précautions ultérieures à prendre à leur égard.

Dans l'étude que nous menons, et qui a pour finalité le fonctionnement d'un dispositif industriel, nous envisageons de travailler à pression et à température ambiantes avec de l'eau du « robinet » ($\sigma \sim 220\mu\text{S}/\text{cm}$). Etant donné que la température et la conductivité de l'eau risquent d'évoluer quelque peu du fait de la répétitivité des chocs, nous avons étudié l'influence de ces deux paramètres.

La plupart des essais effectués dans la suite de ce travail l'ont été sous polarité positive. Lorsque ce ne sera pas le cas, nous le préciserons.

a. Influence de la température θ sur U_{50}

Les conditions expérimentales sont les suivantes : $\sigma = 220\mu\text{S}/\text{cm}$, géométrie pointe – plan ($D = 10\text{mm}$, $R_p = 1,5\text{mm}$). Le protocole expérimental de régulation de la température de l'eau à l'intérieur de l'enceinte a été exposé au chapitre 2.2.3.3. Les résultats obtenus sont présentés figure III-17.

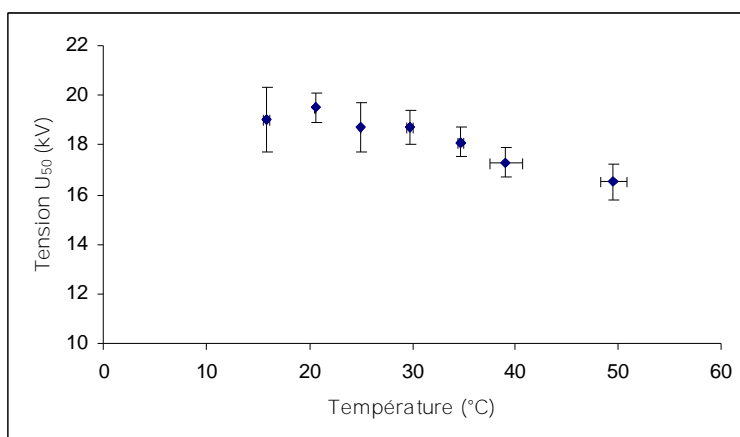


Figure III-17 : Influence de la température sur la valeur U_{50}

La valeur de U_{50} décroît quelque peu lorsque la température de l'eau augmente. Ce résultat s'explique simplement : plus la température de l'eau est élevée et moins l'énergie à fournir, pour atteindre la température d'ébullition, est importante.

De plus, la conductivité de l'eau augmente aussi avec la température, ce qui contribue à la diminution de U_{50} . Quoiqu'il en soit, on note que la variation de U_{50} en fonction de la température dans la plage qui nous intéresse ($20^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$) est faible.

b. Influence de la conductivité σ sur U_{50}

Les essais relatifs à l'étude de l'influence de la conductivité σ sur U_{50} ont été réalisés à partir du banc forte énergie (prototype présenté chapitre 2) avec une géométrie plan – plan ($R_{\text{électrodes}} = 10\text{mm}$, $D_{\text{inter-électrodes}} = 10\text{mm}$) et pour différentes valeurs de condensateurs ($C = 5,3\mu\text{F}$, $10,6\mu\text{F}$ et $21,2\mu\text{F}$). Les résultats sont présentés figure III-18 [BAC 00].

Les variations de U_{50} en fonction de la conductivité de l'eau font apparaître des courbes en « U » :

§ Pour une valeur constante de la conductivité de l'eau, U_{50} augmente pour des valeurs décroissantes de la capacité. Ce résultat se justifie par le fait que la durée à mi-hauteur de l'impulsion de tension diminue en même temps que C ($\tau = RC$). Or, d'après les résultats expérimentaux, les valeurs des instants de claquage t_b correspondant aux U_{50} de la figure III-18 varient peu ($100\mu\text{s} < t_b < 150\mu\text{s}$) sur la plage de conductivité comprise entre $250\mu\text{S/cm}$ et $1500\mu\text{S/cm}$. Pour les formes d'ondes étroites, le manque de tension à l'instant t_b doit donc être compensé par une hausse de la tension maximale de l'onde appliquée.

§ Pour les fortes valeurs de la conductivité, les valeurs correspondantes de la résistivité de l'eau sont faibles ce qui induit une diminution de la durée à mi-hauteur de l'onde de tension. Comme précédemment, cette variation doit être compensée par une hausse de la tension maximale appliquée [TOU 03, TOU 03bis].

§ Pour les faibles valeurs de la conductivité ($\sigma < 200\mu\text{S/cm}$), il faut augmenter la tension appliquée de façon à délivrer une énergie suffisante, dans ce milieu devenu plus résistif, pour thermaliser le voisinage de la pointe.

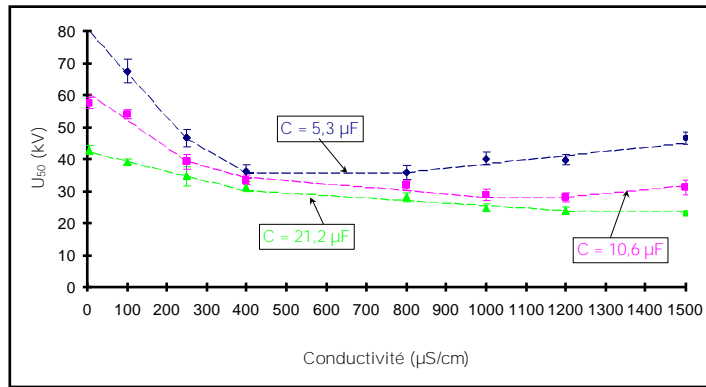


Figure III-18 : Variation de U_{50} en fonction de la conductivité de l'eau

c. Influence de la hauteur d'eau h sur U_{50}

Malgré le contrôle de la température et de la conductivité, nous nous sommes rendus compte que nous avons encore un problème de reproductibilité de nos mesures. Nous nous sommes donc intéressés au volume de remplissage en eau de l'enceinte que nous caractérisons par la hauteur d'eau, h, au dessus de la pointe. Les conditions expérimentales sont les suivantes : banc de condensateurs $C = 1,2\mu\text{F}$, $D = 10\text{mm}$, $R_p = 1,5\text{mm}$, $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$, $\theta = 18^\circ\text{C}$ et nous faisons varier h.

Les résultats, présentés figure III-19, montrent que la variation du paramètre U_{50} en fonction de la hauteur d'eau est croissante ($\Delta U_{50}/\Delta h \approx 1,8\text{kV/cm}$).

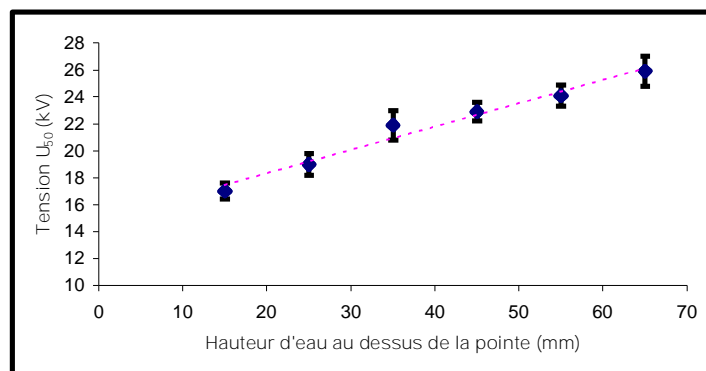


Figure III-19 : Influence de la hauteur d'eau sur la valeur de U_{50}

D'après l'équation fondamentale de la statique des fluides (III-4), la pression en un point d'un fluide est liée à sa profondeur par :

$$P + \rho gh = cte \tag{III-4}$$

avec P : pression à la pointe en bar, ρ : masse volumique de l'eau, g : accélération de la pesanteur en m/s^{-2} , h : hauteur d'eau en m.

Selon le diagramme de changement de phase de l'eau, une variation de la pression entraîne une variation de même sens de la température d'ébullition. L'énergie à injecter pour atteindre l'ébullition est alors modifiée.

Si l'on s'intéresse aux valeurs numériques (figure III-19), on s'aperçoit que la pression relative, $P_{r,p}$, engendrée au niveau de la pointe par les différentes hauteurs d'eau et définie par $P_{r,p} = P - P_{abs.}$, varie de $P_{r,p} = 2\text{mbar}$ à $P_{r,p} = 5\text{mbar}$ pour h variant de 20mm à 50mm. Une si faible variation de $P_{r,p}$ ne peut donc pas être responsable d'une telle variation du U_{50} .

Il est donc important de noter que, lorsqu'on fait varier la hauteur d'eau dans l'enceinte, on modifie la forme de l'onde de tension appliquée, comme indiqué figure III-20. Ceci est tout à fait normal puisque la « résistance » du volume d'eau à l'intérieur de l'enceinte forme, avec les condensateurs de stockage de l'énergie électrique, un réseau RC qui conditionne la décroissance de l'onde de tension. Ainsi, par exemple, la largeur à mi-hauteur varie de 400 μs pour $h = 15\text{mm}$ à 300 μs pour $h = 55\text{mm}$ (figure III-20). Les résultats présentés figure III-19 n'ont donc pas été réalisés à forme d'onde constante et nous pensons que c'est ce phénomène qui conditionne l'allure croissante de la courbe. Nous avons vu paragraphe 3.3.2.3 (b) que l'influence de la variation de la conductivité de l'eau sur U_{50} conduit aux mêmes conclusions. Dans la suite du travail, on veillera à maintenir h constante.

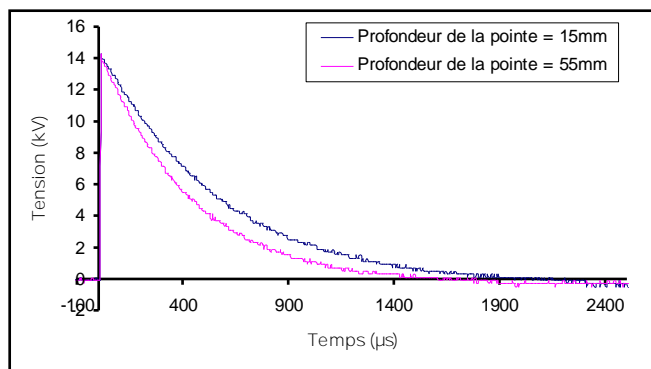


Figure III-20 : Influence de la hauteur d'eau sur la forme de l'onde de tension appliquée

3.3.3.4. Etude de U_{50}

a. Influence de la pression P sur U_{50}

Ces essais ont été effectués dans les mêmes conditions que ceux présentés au paragraphe précédent. Le mode opératoire a consisté à mesurer U_{50} , à température et à hauteur d'eau constantes ($\theta = 18^\circ\text{C}$, $h = 30\text{mm}$), pour différentes pressions du gaz situé au dessus de l'eau. L'étude a été effectuée sous atmosphère d'azote. Nous sommes partis d'une pression de 4bar que nous avons ensuite diminuée au moyen d'une fuite réglable puis d'une pompe. Il est

intéressant de noter que pour $P \leq 0,8\text{bar}$ des bulles, visibles à l'œil nu, commencent à apparaître spontanément dans l'espace inter-électrodes, c'est-à-dire en l'absence de tension appliquée.

Les résultats obtenus sont présentés figure III-21. La variation de U_{50} en fonction de la pression fait apparaître, de part et d'autre de $P = 1\text{bar}$, deux zones pratiquement linéaires mais de pentes différentes.

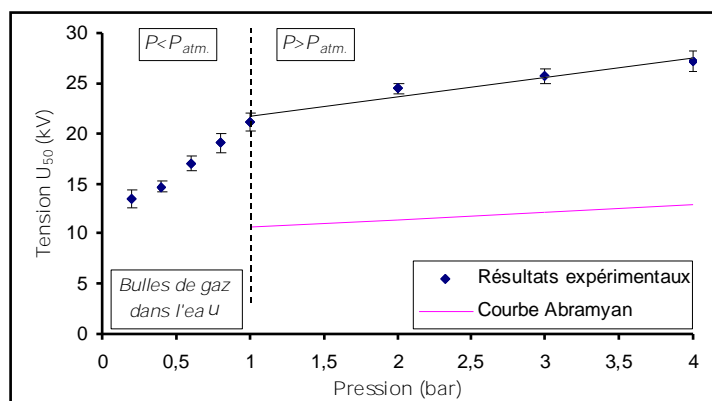


Figure III-21 : Influence de la pression sur la valeur du U_{50}

§ Pour $P < P_{atm.}$, et bien que la température d'ébullition et la pression varient, il semble évident que le phénomène prépondérant soit l'apparition, indépendante de la contrainte électrique, de bulles dans l'intervalle inter-électrodes. La vaporisation du milieu est d'autant moins nécessaire que l'apparition spontanée de bulles est importante, c'est-à-dire que la pression diminue.

§ Pour $P > P_{atm.}$, la pression du gaz modifie sensiblement celle au niveau de la pointe et l'on peut considérer que $P_{r,p} \sim P$ (le terme ρgh est négligeable). Or, la valeur de U_{50} que nous trouvons varie relativement peu avec la pression ($\Delta U_{50}/U_{50} \approx 30\%$ pour $\Delta P/P = 400\%$) alors que, par exemple pour l'azote $\Delta U_{50}/U_{50} \approx \Delta P/P$ [PEC 01bis]. Si nous nous référons à ce que nous connaissons des décharges dans les gaz, cette faible variation signifierait que le champ réduit (E_g/N) à l'intérieur des bulles varie relativement peu lorsque la pression varie de 1 à 4 bar (sachant que les températures d'ébullitions correspondantes sont 100°C et 144°C).

Des études similaires ont été effectuées par Abramyan *et al* [ABR 72] en géométrie plan-plan mais jusqu'à 140 bar. La variation qu'ils obtiennent est linéaire et nous avons reporté la pente correspondante sur la figure III-21. L'accord entre leur résultat et le nôtre est très satisfaisant.

On notera, pour terminer, que, contrairement à l'étude concernant les variations de U_{50} en fonction de la hauteur d'eau, la forme d'onde n'est bien évidemment pas modifiée lorsque l'on fait varier la pression du gaz.

b. Influence de l'homogénéité du champ électrique sur U_{50}

La répartition du champ électrique dans l'intervalle inter-électrodes est un paramètre majeur du comportement des décharges électriques. Cette répartition est parfois caractérisée par le facteur « a » dit d'homogénéité du champ électrique et défini par $a = E_{max} / E_{moyen}$. Ces deux valeurs du champ dépendent de la distance inter-électrodes D et du rayon r_i des électrodes. Malheureusement, plusieurs couples ($D ; r_i$) peuvent donner la même valeur de « a » et ce paramètre perd donc de son intérêt car il ne fait pas bien ressortir le rôle du rayon le plus faible qui commande l'initiation de la décharge, par rapport à celui de la distance, qui conditionne davantage sa propagation.

Malgré cela, des essais ont été réalisés en faisant varier le rayon de la pointe et la distance inter-électrodes. Les résultats obtenus sont présentés figure III-22, pour $\sigma = 220 \mu S / cm$, $\theta = 18^\circ C$, $h = 30 mm$, sous polarité positive et sous polarité négative.

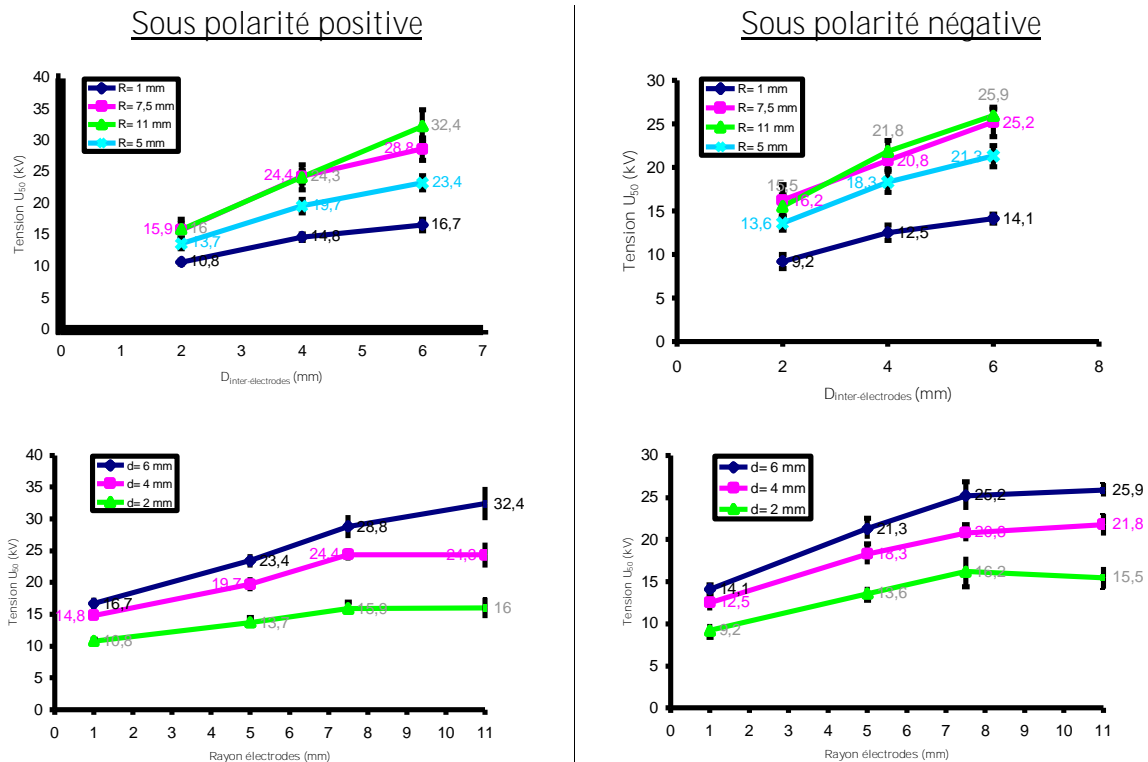


Figure III-22 : Influence de la distance inter-électrodes D et du rayon des électrodes sur U_{50} , sous polarités positive et négative

Concernant l'allure des courbes, les résultats sont conformes à ce que l'on pouvait prévoir :

- § à rayon d'électrode constant, U_{50} augmente avec la distance inter-électrodes ;
- § à distance inter-électrodes constante, U_{50} augmente avec le rayon de la pointe.

Ce qui est plus surprenant, c'est que les valeurs de U_{50} sont plus élevées sous polarité positive que sous polarité négative. Ce résultat est contraire à ce que l'on observe pour l'air à température et à pression normale mais des travaux antérieurs, portant sur l'azote pressurisé, avaient conduit à des observations similaires [PEC 01bis]. Ce phénomène avait été attribué à la nature des électrons germes qui diffèrent suivant la polarité.

Nous avons repris l'étude précédente pour un rayon donné ($R_p = 1,5\text{mm}$) en augmentant la distance inter-électrodes jusqu'aux limites en tension du banc de condensateurs permettant des claquages (figure III-23).

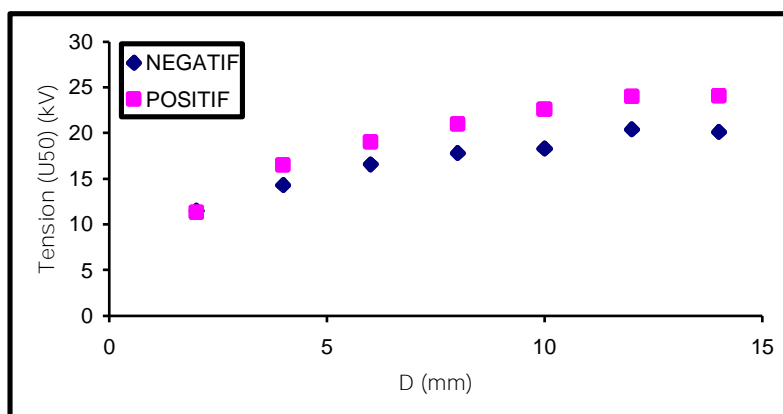


Figure III-23 : Influence de la polarité sur de U_{50}

Il est difficile de commenter ces courbes car le paramètre U_{50} est un paramètre électrotechnique qui ne reflète pas, sauf dans des cas bien précis, de propriété physique particulière. Dans le cas des décharges, les paramètres électriques sont surtout intéressants à l'instant t_i d'initiation de la décharge et à l'instant t_b (breakdown) du claquage.

On considère que l'instant t_i correspond à l'apparition du premier phénomène lumineux (que l'on détecte au moyen d'un PM) et que l'instant t_b correspond au claquage (et que l'on mesure sur l'enregistrement de l'onde de tension).

Nous avons donc comparé les comportements des décharges positives et négatives à ces instants caractéristiques et c'est l'aspect énergétique qui nous a semblé le plus intéressant. Considérons, pour cela, la figure III-24 sur laquelle ont été portées les variations, avec la distance, des énergies consommées, pour les deux polarités, jusqu'aux instant t_i et t_b .

Les résultats sont sensiblement différents en ce sens que :

- § la décharge sous polarité positive consomme, pour « s'initier », entre trois et quatre fois plus d'énergie que la décharge sous polarité négative;
- § la décharge sous polarité négative « s'initie » à énergie pratiquement constante, contrairement à la décharge sous polarité positive.

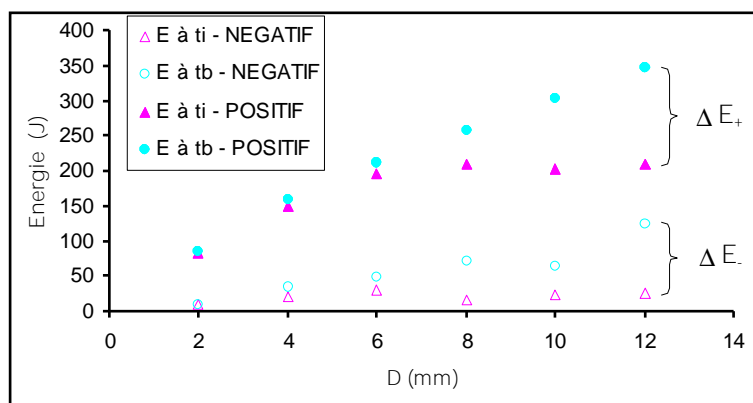


Figure III-24 : Energies injectées à t_i et t_b , en polarités positive et négative

D'après ce que nous avons vu jusqu'à présent, l'initiation des décharges subsoniques est liée à l'apparition des bulles de gaz. Il semble donc que la nature des bulles ne soit pas la même pour les deux polarités. Pour une même tension appliquée on peut admettre que, tant qu'il n'y a pas de décharge, la thermalisation due au courant de conduction est la même quelle que soit la polarité. Il faut donc se demander si l'électrolyse ne joue pas un rôle majeur dans la différence de comportement que nous avons mise en évidence. Considérons donc deux systèmes pointe-plan identiques dans l'eau et soumis à la même onde de tension dont on change la polarité. Dans ce qui suit, quand on parlera d'anode et de cathode, il s'agira toujours de la pointe.

Concernant l'électrolyse, on sait qu'à charge, ou à énergie, consommée égale, le volume de gaz est deux fois plus important à la cathode (hydrogène) qu'à l'anode (oxygène). Ces deux gaz ont des propriétés diélectriques très différentes : l'oxygène est un gaz fortement électro-négatif, contrairement à l'hydrogène, et les valeurs des champs critiques sont de

30kV/cm pour l'oxygène et de 20kV/cm pour l'hydrogène (conditions normales de température et de pression).

Ces trois remarques font clairement apparaître qu'une décharge aura beaucoup plus de mal à s'initier à l'anode qu'à la cathode.

La figure III-24 montre que, sous polarité négative, l'énergie nécessaire à l'initiation de la décharge est indépendante de la distance inter-électrodes. Ceci indique que la thermalisation ne joue pas un grand rôle et que c'est l'électrolyse qui fournit, majoritairement, le gaz initial (mélange de vapeur d'eau et d'hydrogène). Sous polarité positive, l'énergie nécessaire à l'initiation de la décharge augmente avec la distance. Ceci signifie qu'il faut fournir de la vapeur d'eau vraisemblablement parce que l'oxygène n'est pas favorable au déclenchement et au développement des décharges (gaz attachant).

Une fois la décharge déclenchée, il est intéressant de noter, toujours sur la figure III-24, que les consommations énergétiques ΔE_+ et ΔE_- sont à peu près égales quelle que soit la polarité. Ceci confirme l'hypothèse que nous avons émise précédemment (voir paragraphe 3.3.1.1.b) : le mode de création des bulles suivantes devient identique pour les deux polarités. Il s'agit d'une thermalisation par les arcs déclenchés dans les bulles déjà existantes.

3.4. Décharges supersoniques

3.4.1. Introduction

Nous nous intéressons, maintenant, aux décharges dans l'eau dites « supersoniques ». D'après la littérature, le champ électrique, par le biais de la géométrie des électrodes et de l'amplitude de la tension appliquée, a une influence considérable sur la structure, la vitesse et le mode de propagation des décharges dans les liquides [BER 98, AKA 01]. La valeur des champs électriques requis pour la génération de décharges supersoniques dans l'eau, ou plus généralement dans les liquides, excède de loin celle requise pour les gaz [KAT 02]. Alors que la valeur du champ d'ionisation de l'air à 20°C et à pression atmosphérique est $E \approx 30\text{kV/cm}$, celui de l'eau est établi dans une plage de 250kV/cm à plus 1MV/cm, suivant les caractéristiques de l'eau et les conditions de surface des électrodes. Pour atteindre de telles valeurs de champ, avec les dispositifs expérimentaux que nous avons mis en œuvre, nous avons tout intérêt à utiliser des pointes à rayon de courbure très faible.

3.4.2. Configuration des essais

Tous les essais ont été réalisés en géométrie pointe-plan sous polarité positive. Les électrodes sont en acier inoxydable et le plan, relié à la masse, a un rayon de 25mm. Les pointes, portées à la haute tension, ont des rayons de courbure variant de 100 μm à 800 μm .

Le dispositif expérimental utilisé est semblable à celui présenté figure III-2. Le système de déclenchement et de synchronisation a été modifié pour l'adapter aux contraintes temporelles de cette nouvelle phénoménologie, mais, globalement, son principe reste le même.

Pour essayer d'analyser ce nouveau mode de décharge, nous avons été amenés à utiliser plusieurs types de générateurs impulsifs.

§ des bancs de condensateurs déclenchés par trigatron comme lors de l'étude des décharges subsoniques. Dans ce cas, toutes les formes d'ondes ont le même temps de montée mais la durée à mi-hauteur varie en fonction de la valeur des condensateurs utilisés.

§ des générateurs de Marx à commutateurs gazeux ou solides, présentés chapitre 2.2.2., et dont on résume les caractéristiques dans le tableau III-1.

	C (pF)	U_m (kV)	E (J)	t_f (ns)	t_h (ns)	Commutateur
Marx 1 (2 étages)	$25 \cdot 10^3$	40	20	50 à 1000	dépend de la configuration des électrodes et de l'eau utilisés	Gaz
Marx 2	500	250	3	10 à 250		Gaz
Marx 3	800	100	4	100		thyristors

Tableau III-1 : Présentation des différents générateurs impulsionnels utilisés

3.4.3. Phénoménologie

3.4.3.1. Première approche

La configuration expérimentale est la suivante : $R_p = 150\mu\text{m}$; $D = 28\text{mm}$; $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$; Marx 1 ($t_f = 50\text{ns}$; $t_h = 4,7\mu\text{s}$; $U_m = 30\text{kV}$; $C = 25\text{nF}$).

Un exemple caractéristique du développement d'une décharge supersonique dans l'eau, sous de telles conditions, est présenté figure III-25. Il s'agit d'une photographie prise au convertisseur d'images THOMSON TSN 506 fonctionnant en mode frame. L'enregistrement est effectué en « lumière indirecte », pour une tenue.

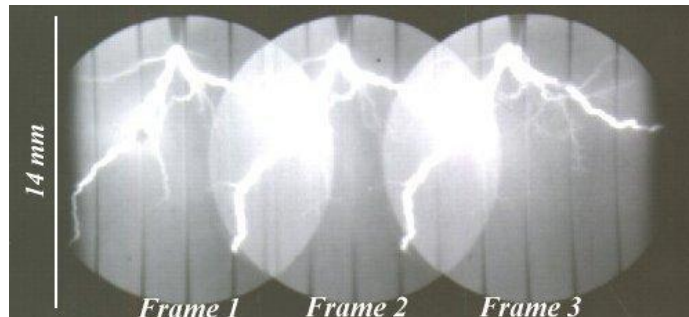


Figure III-25: (a) Convertisseur d'images d'une décharge électrique supersonique dans l'eau (polarité positive, $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$, $U_m = 30\text{kV}$, $R_p = 150\mu\text{m}$, $D = 28\text{mm}$, temps d'exposition : 200ns , $t_{F1} = 252\text{ns}$, $t_{F2} = 1,85\mu\text{s}$, $t_{F3} = 3,7\mu\text{s}$)

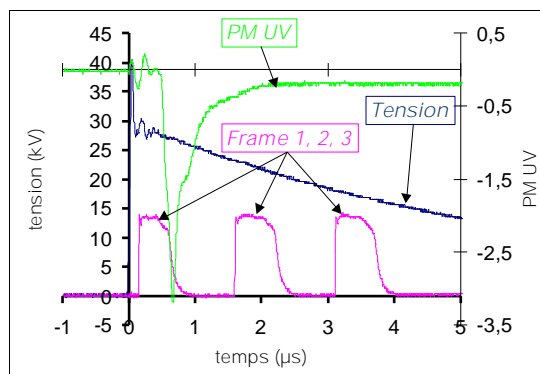


Figure III-25: (b) Allure de l'onde de tension, des impulsions de synchronisation d'ouverture de la caméra et de la lumière émise en fonction du temps, correspondant à la figure III-25 (a)

Les enregistrements des figures III-25 (a) et (b) montrent clairement que ce nouveau type de décharge est constitué de « filaments » partant de la pointe et se dirigeant vers le plan. On notera la tortuosité du phénomène et les divers branchements qui rappellent singulièrement ce qui se passe dans les gaz. L'enregistrement PM UV présente une impulsion unique de durée à mi-hauteur égale à quelques centaines de nanosecondes : le développement de la décharge semble donc très rapide. Attention cependant aux photos prises au convertisseur d'images : l'intervalle pointe-plan est éclairé au moyen de la lampe flash et ce n'est donc pas la seule lumière émise par la décharge qui est enregistrée sur les clichés mais également celle de la lampe flash diffractée, ou réfractée, par l'empreinte de la décharge. En effet, l'impulsion unique de lumière enregistrée au PM présentait un jitter important, de l'ordre de $2,5\mu\text{s}$, et il était donc très aléatoire de pouvoir faire coïncider la synchronisation de la caméra avec le développement de la décharge. On a donc jugé préférable d'éclairer le phénomène afin de le visualiser à coup sûr.

On précise, également, que les figures III-25 (a) et III-25 (b) ne correspondent pas au même choc puisqu'on ne peut pas utiliser, simultanément, la lampe flash et le PM enregistrant la lumière émise par la décharge.

En fait, l'étude du développement de la décharge par mode frame ne semble pas intéressant du fait de l'incompatibilité entre la durée du phénomène et les contraintes temporelles de ce mode de fonctionnement du convertisseur d'images.

3.4.3.2. *Développement de la décharge*

a. Propagation de la décharge dans l'eau du robinet

Suite aux remarques précédentes, nous avons décidé de travailler en mode streak afin d'analyser, plus finement, le développement de la décharge.

Ce mode de fonctionnement du convertisseur d'images est plus contraignant et nous avons utilisé le générateur de Marx à thyristors réduit à cinq étages ($t_f = 100\text{ns}$; $t_h = 350\text{ns}$) qui est beaucoup moins perturbant, du point de vue compatibilité électromagnétique, que les générateurs à éclateurs à gaz.

La distance inter-électrodes a été réduite à 11mm et la figure III-26 présente l'enregistrement d'une tenue obtenue sous de telles conditions.

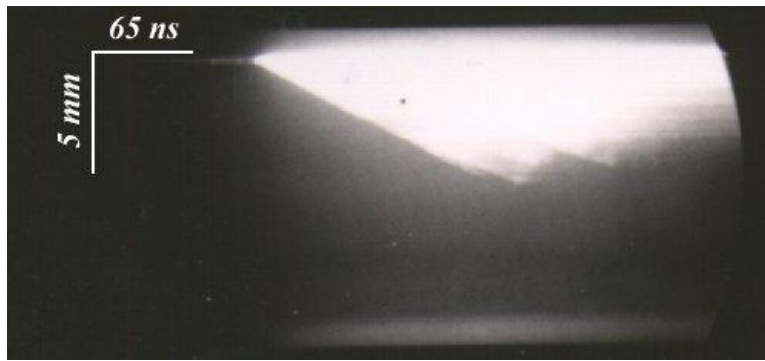


Figure III-26: (a) *Convertisseur d'images en mode streak d'une décharge électrique supersonique dans l'eau lors d'une tenue (polarité positive, $U_m = 45\text{kV}$, $R_p = 150\mu\text{m}$, balayage = 400ns)*

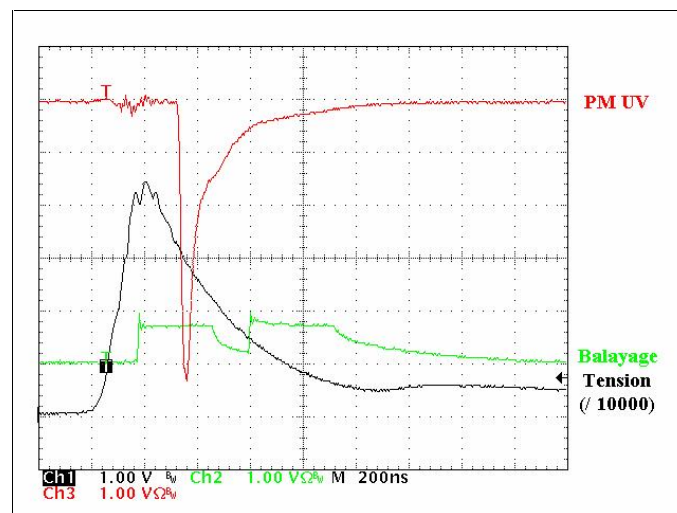


Figure III-26 : (b) *Allure de l'onde de tension, des impulsions de synchronisation d'ouvertures de la caméra et de la lumière émise en fonction du temps, correspondant à la figure III-26 (a)*

La figure III-26 (b) ne suscite pas de commentaires particuliers sinon que les deux impulsions de synchronisation de la caméra (balayage) correspondent l'une à l'ouverture et l'autre à la fermeture de la caméra. On précise que la lampe flash n'est pas utilisée et que les figures III-26 (a) et (b) correspondent donc au même choc.

La photographie, prise en mode streak, ressemble à des clichés du développement de première couronne obtenus pour des gaz à une nuance près : l'empreinte de la décharge est très linéaire ce qui montre qu'elle se propage à vitesse pratiquement constante alors qu'en général, pour les premières couronnes, on voit un ralentissement très net de la propagation, notamment dans le cas des tenues. La décharge semble donc perdre très peu d'énergie au cours de sa propagation, à moins qu'elle ait démarré avec un surcroît d'énergie important, bien que nous soyons proches de U_{50} (tenue).

Ce type de cliché permet d'évaluer la vitesse de propagation de la décharge que nous estimons à 33km/s. Cette valeur est en accord avec les résultats d'autres auteurs [FEL 88, LES 96, LIS 98, LIS 99, LIS 99bis, KAT 02] et justifie l'appellation de « supersoniques » employée pour qualifier de telles décharges [FEL 88, GAV 94].

La figure III-27 présente un enregistrement réalisé dans les mêmes conditions expérimentales mais pour un claquage ($U_m = 50\text{kV}$). Les remarques précédentes sont valables et l'accélération que l'on note en fin de propagation est tout à fait classique de l'influence du plan lors des claquages.

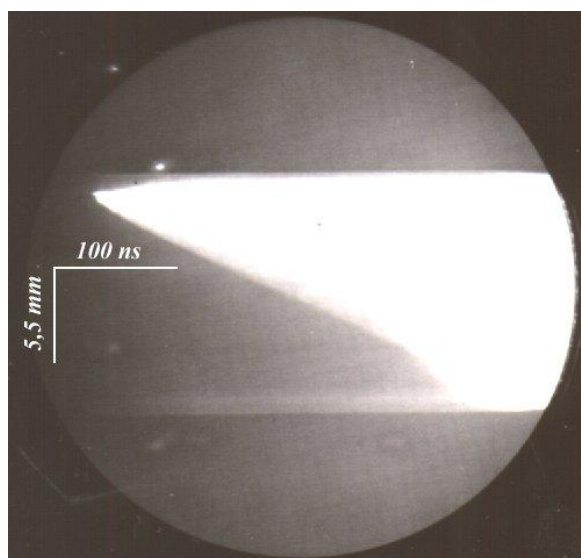


Figure III-27 : Convertisseur d'images en mode streak d'une décharge électrique supersonique dans l'eau lors d'un claquage (polarité positive, $U_m = 50\text{kV}$, $R_p = 150\mu\text{m}$, balayage = 400ns)

b. Propagation de la décharge dans l'eau distillée

Revenons sur la remarque concernant la vitesse de propagation constante, notamment lors d'une tenue : il se peut que, comme l'onde de tension est relativement étroite ($t_h \approx 350\text{ns}$), seules puissent partir des décharges « sur-énergétiques » puisqu'on n'est pas en mesure de fournir de l'énergie pendant suffisamment longtemps.

Afin de fournir de l'énergie plus longtemps, nous avons cherché à « élargir » l'onde de tension, ce que l'on peut faire de deux façons : en augmentant C ou en augmentant R, c'est-à-dire σ . L'augmentation de C est pénalisante car nous augmentons ainsi l'énergie délivrée lors du claquage ce qui risque de détériorer les pointes dont le rayon de courbure est très faible.

Les essais suivants ont donc consisté à étudier la propagation de la décharge supersonique dans de l'eau distillée de conductivité $\sigma = 11\mu\text{S/cm}$.

Des enregistrements en mode streak de décharges dans l'eau distillée ont été réalisés avec la même géométrie d'électrodes que précédemment et pour une distance inter-électrodes $D = 33\text{mm}$. Des enregistrements caractéristiques correspondant à un claquage et à une tenue sont proposés, respectivement, figures III-28 et III-29. Compte tenu du jitter sur l'initiation des phénomènes, il n'a pas été possible d'utiliser des balayages plus rapides qui auraient permis de détailler davantage l'initiation du phénomène.

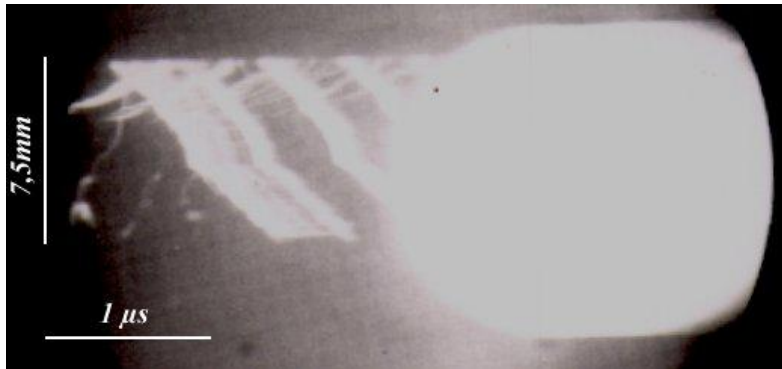


Figure 28 : (a) *Convertisseur d'images en mode streak, pour un claquage, d'une décharge électrique supersonique dans l'eau distillée (polarité positive, $U_m = 31\text{kV}$, $R_p = 150\mu\text{m}$, $D = 33\text{mm}$, $\sigma = 11\mu\text{S/cm}$, balayage = $4,2\mu\text{s}$)*

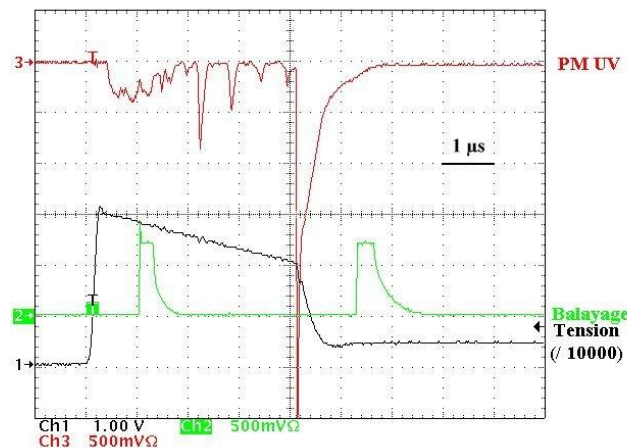


Figure III-28 : (b) *Allure de l'onde de tension, des impulsions de synchronisation d'ouverture de la caméra et de la lumière émise en fonction du temps, correspondant à la figure III-28 (a)*

Le streak de la figure III-28 débute 500ns après l'initiation de la décharge qui a davantage l'allure d'un leader que de streamers. Il est surprenant que la décharge cesse brutalement sa progression après avoir parcouru environ un tiers de l'intervalle et qu'elle

puisse repartir ensuite alors que la tension appliquée continue de décroître. Est ce dû à un effet de charge d'espace ou le claquage se produit-il sous l'effet de décharges en provenance du plan ? Nous n'avons pas pu mettre en évidence ce dernier phénomène mais nous ne sommes absolument pas certains qu'il n'existe pas.

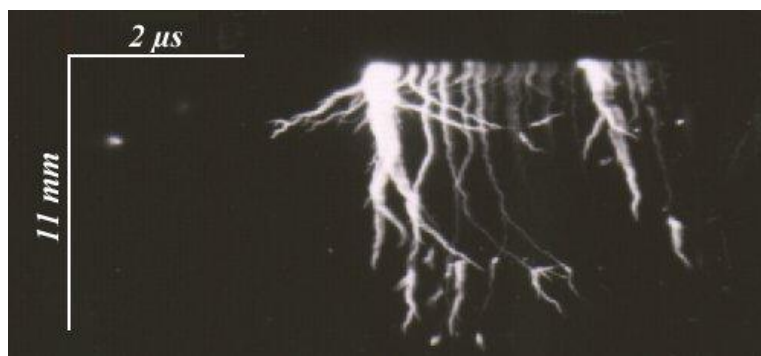


Figure III-29: *Convertisseur d'images en mode streak, pour une tenue, d'une décharge électrique supersonique dans l'eau distillée (polarité positive, $U_m = 31kV$, $R_p = 150\mu m$, $D = 33mm$, $\sigma = 11\mu S/cm$, balayage = $7\mu s$)*

L'enregistrement d'une tenue, figure III-29, détaille un peu plus la phase initiale de la décharge constituée d'un filament principal qui se réillumine à plusieurs reprises. Des zones lumineuses isolées dans l'espace rappellent la structure de la décharge négative grande distance dans l'air (stem spaciaux) ce qui semblerait accréditer la notion de charge d'espace.

Pour poursuivre cette étude, nous avons essayé d'établir un lien entre nos enregistrements réalisés avec de l'eau distillée et ceux obtenus avec de l'eau du robinet. Partant de l'eau distillée, nous avons reproduit l'onde de tension délivrée avec de l'eau du robinet en plaçant, en parallèle avec l'espace inter-électrodes, une résistance de 230Ω . Les enregistrements proposés figure III-30, obtenus avec l'eau distillée, sont comparables à ceux de la figure III-26 obtenus avec de l'eau du robinet : l'impulsion de lumière est unique (PM UV) et la vitesse de la décharge est estimée à $28km/s$ (attention à l'impulsion d'ouverture de la caméra qui s'est produite légèrement après le départ de la décharge et qui peut faire croire que cette dernière ralentit fortement à son début de propagation).

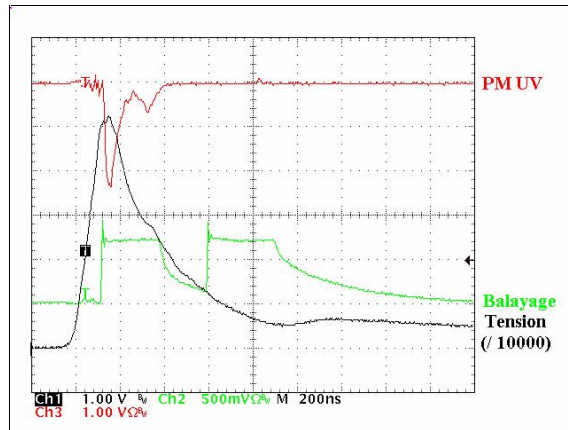


Figure III-30: (a) Allure de l'onde de tension, des impulsions de synchronisation d'ouvertures de la caméra et de la lumière émise en fonction du temps.

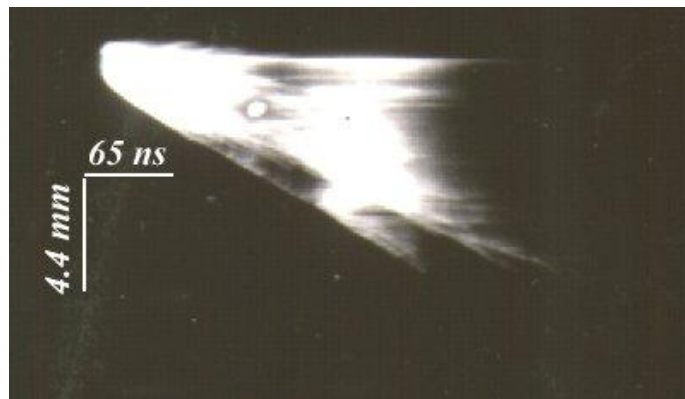


Figure III-30: (b) Convertisseur d'images en mode streak d'une décharge électrique supersonique dans l'eau correspondant à la figure III-30 (a) (polarité positive, $U_m = 44\text{kV}$, $R_p = 150\mu\text{m}$, balayage = 400ns)

Enfin, pour terminer cette partie, nous avons étudié les variations de U_{50} en fonction de la distance inter-électrodes pour l'eau distillée et pour l'eau du robinet mais en maintenant la forme d'onde constante dans les deux cas.

Les résultats obtenus sont présentés figure III-31. Il n'y a pas de différence significative entre les valeurs de U_{50} et on peut donc en conclure que la conductivité de l'eau n'a pas d'incidence, à forme d'onde équivalente, sur la décharge supersonique. Le résultat a déjà été mentionné par d'autres auteurs [KAT 02].

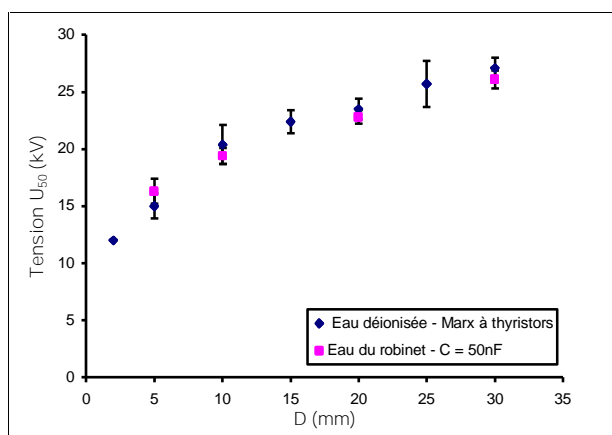


Figure III-31 : Variation de U_{50} en fonction de la distance inter-électrodes, pour deux formes d'ondes équivalentes, et des eaux de conductivité différente

c. Analyse complète d'une tenue

L'évolution, après la phase de développement des « filaments », d'une décharge supersonique dans l'eau, pour une tenue, est représentée figure III-34. Cette figure, comportant douze clichés (Frame 1 à 12), a été réalisée à partir de quatre chocs distincts. Les conditions expérimentales sont les suivantes : $R_p = 150\mu\text{m}$; $D = 28\text{mm}$; $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$; Marx 25nF ($t_f = 50\text{ns}$; $t_h = 4,7\mu\text{s}$; $U_m = 29,4\text{kV}$). Le générateur est donc susceptible de fournir de l'énergie jusqu'à l'image F_8 comprise.

Sur cette figure, on note l'apparition d'une enveloppe gazeuse qui grossit autour des canaux (« filaments ») dans lesquels la décharge s'est propagée. Il y a donc une thermalisation très nette ce qui confirme que les « filaments » initiaux étaient plus proches de leaders que de streamers. Il est également intéressant de comparer les frames 5, 6, 8 et 9 avec des clichés de claquage grande distance dans l'air [DOM 87]. On retrouve une « association » de sphères caractéristiques d'une propagation antérieure de la décharge par « step leader ».

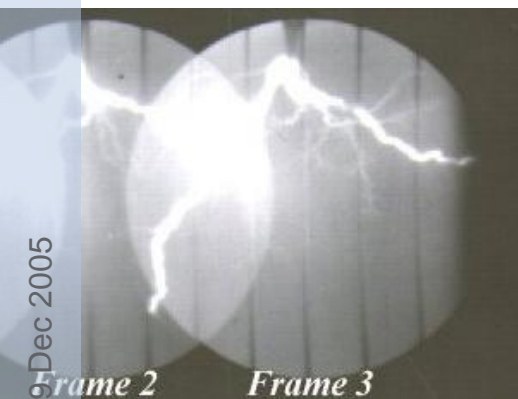
Le tableau III-2 donne, à titre indicatif, les valeurs de l'énergie consommée jusqu'à l'instant où chacun des clichés a été pris.

Frame	1	2	3	5	6	8
E_c (J)	0,2	4	6,7	10,4	10,7	10,8

Tableau III-2 : Energie consommée lors des clichés 1, 2, 3, 5, 6 et 8 de la figure III-34

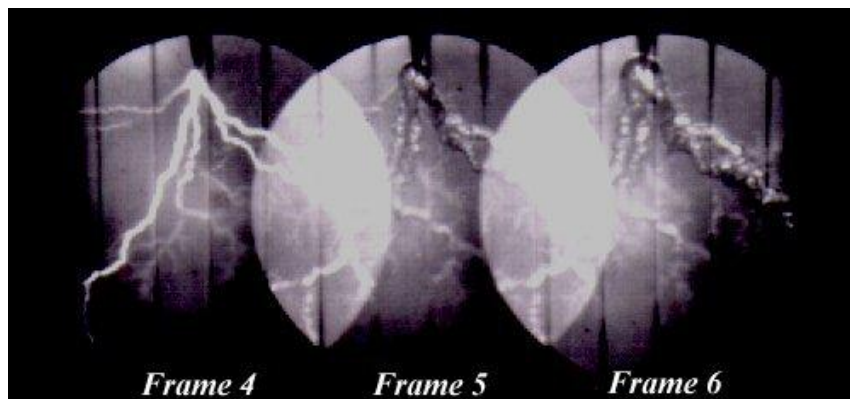
$U_1 = 23,4\text{kV}, U_2 = 23,4\text{kV}, U_3 = 18\text{kV}$

$\Delta t_1 = 1,6\mu\text{s}, \Delta t_2 = 1,6\mu\text{s}, \Delta t_3 = 3,1\mu\text{s}$



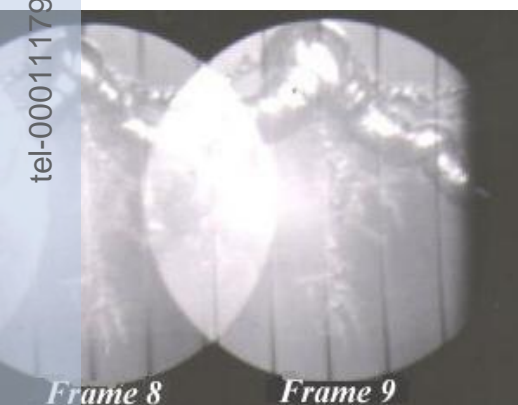
$U_4 = 18\text{kV}, U_5 = 5,1\text{kV}, U_6 = 2,3\text{ V}$

$\Delta t_4 = 3,1\mu\text{s}, \Delta t_5 = 11,8\mu\text{s}, \Delta t_6 = 20,1\mu\text{s}$



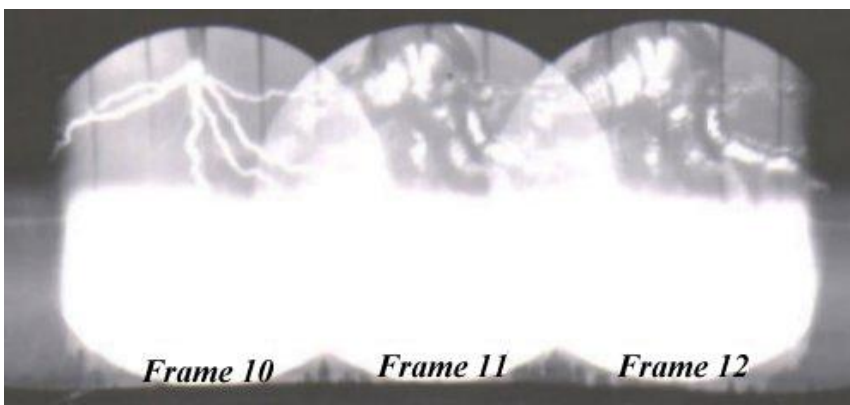
$U_7 = 0,4\text{kV}, U_8 = 0,4\text{kV}, U_9 = 0\text{V}$

$\Delta t_7 = 39,6\mu\text{s}, \Delta t_8 = 39,6\mu\text{s}, \Delta t_9 = 79,5\mu\text{s}$



$U_{10} = 18\text{kV}, U_{11} = 0\text{V}, U_{12} = 0\text{V}$

$\Delta t_{10} = 3,1\mu\text{s}, \Delta t_{11} = 120\mu\text{s}, \Delta t_{12} = 160\mu\text{s}$



3.4.4. Comparaison entre le mode subsonique et le mode supersonique

L'étude du développement des décharges dans l'eau par mode subsonique a montré, assez clairement, les processus mis en jeu lors des phases d'initiation, de propagation, de tenue, de claquage et post-arc.

Compte tenu de la rapidité des phénomènes, les phases d'initiation et de développement des décharges supersoniques dans l'eau sont beaucoup plus délicates à analyser.

La question essentielle qui semble se poser est de savoir dans quel milieu se développent les décharges supersoniques : gaz ou liquide ?

Nous avons donc essayé, dans les paragraphes qui suivent, de mettre en œuvre un certain nombre d'expérimentations susceptibles d'apporter quelques renseignements complémentaires.

Pour l'instant, les différences essentielles entre ces deux modes de décharges sont les suivantes :

§ l'initiation des décharges supersoniques nécessite un champ électrique beaucoup plus élevé que celui des décharges subsoniques ;

§ les décharges subsoniques mettent en jeu un agglomérat de bulles de gaz pour se propager alors que les décharges supersoniques se développent par le biais de filaments ;

§ le temps formatif ($t_f = t_b - t_i$) peut atteindre plusieurs centaines de microsecondes pour les décharges subsoniques alors qu'il n'est que de quelques centaines de nanosecondes pour les décharges supersoniques. Les enregistrements proposés figure III-33 (a) et (b), caractéristiques, respectivement, de ces deux types de décharges, le montrent clairement.

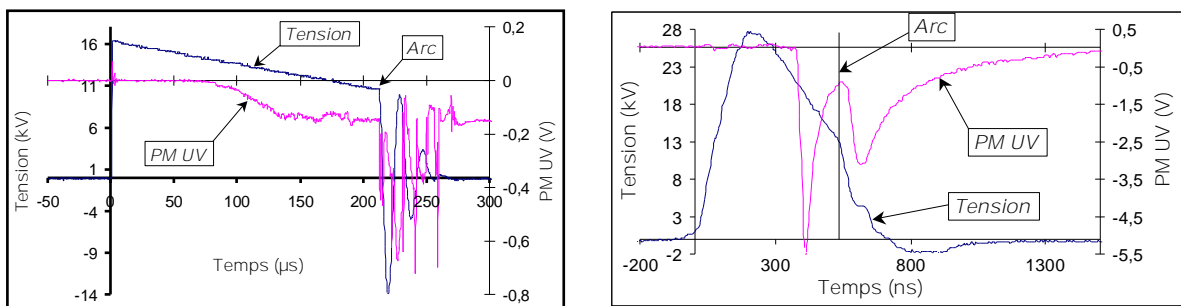


Figure III-33 : Enregistrement de décharges subsonique (a) et supersonique (b)

3.4.4.1. Transition entre le mode subsonique et supersonique

a. Fonctionnement en surtension

La première idée venant à l'esprit, lorsqu'on regarde les temps formatifs respectifs des décharges supersoniques et subsoniques, est de partir d'une configuration générant des décharges subsoniques et de surtensionner progressivement l'intervalle : il est bien connu que le temps formatif et le temps jusqu'au claquage diminuent lorsque la surtension augmente [EDF 84, ESP 01ter].

Nous sommes donc partis d'une « configuration subsonique » ($R_p = 1,5\text{mm}$; $D = 6\text{mm}$; $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$) pour laquelle nous avons augmenté U_m progressivement à partir de la valeur $U_{50} = 19,6\text{kV}$.

Les résultats obtenus sont présentés figures III-34 et III-35. La figure III-34 montre, comme nous nous y attendions, que, plus la surtension ($U_m - U_{50}$) est élevée et plus le temps de claquage t_b est court. Ce qui est beaucoup plus intéressant c'est le fait que l'énergie E_c consommée jusqu'au claquage ($E_c = C(U)^2 T_0 / 2$) de, brutalement, d'un facteur 10 pour une valeur donnée de U_m , ici 27kV, correspondant à un champ appliqué en extrémité de pointe de 130kV/cm. Ce type de discontinuité est assez caractéristique d'un changement de régime de décharge.

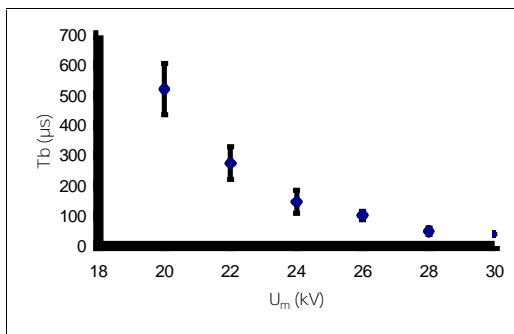


Figure III-34 : Influence de la valeur maximale de l'onde de tension appliquée sur le temps de claquage

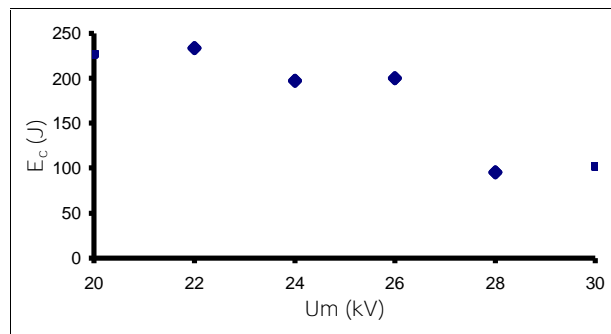


Figure III-35 : Variation de l'énergie en fonction de la tension appliquée

b. Etude de la transition

De l'étude précédente semble ressortir l'idée qu'il existe une valeur seuil de champ conduisant à un changement de régime de décharge. Nous avons donc cherché une configuration expérimentale associant une pointe fine, indispensable pour générer des champs

élevés, à un générateur suffisamment énergétique pour créer des bulles sans endommager la pointe au moment du claquage.

La configuration qui nous a semblé présenter le meilleur compromis est la suivante :
 $R_p = 100\mu\text{m}$; $D = 5\text{mm}$; $\sigma = 220\mu\text{S/cm}$; $C = 1,2\mu\text{F}$.

Les résultats sont très intéressants :

§ en augmentant progressivement l'amplitude de l'onde de tension appliquée nous arrivons, à partir de $U_m = U_{50\text{bulles}} = 8,3\text{kV}$, à obtenir des claquages par bulles (figure III-36).

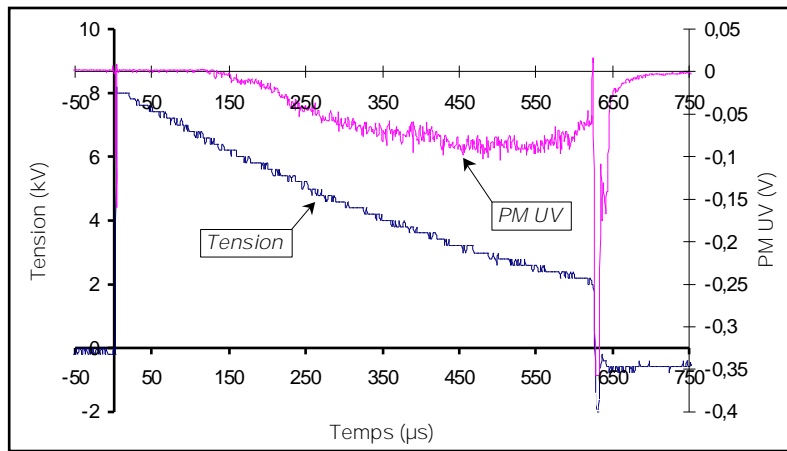


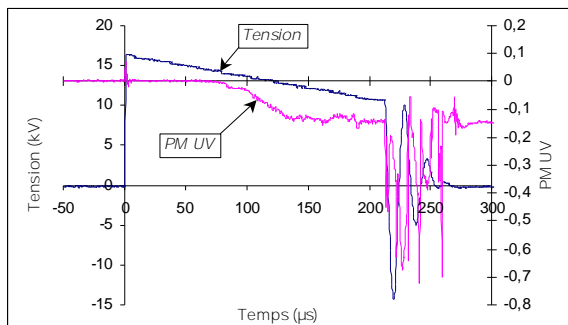
Figure III-36 : Tension correspondante au mode de décharge par bulles

§ pour $8,3\text{kV} < U_m < 16\text{kV}$, l'intervalle claque systématiquement par bulles ;

§ pour $16\text{kV} < U_m < 16,4\text{kV}$, le claquage se produit indifféremment par bulles ou par filaments (figure III-37) ;

§ enfin, pour $U_m > 16,5\text{kV}$, tous les claquages sont filamenteux.

Mode subsonique



Mode supersonique

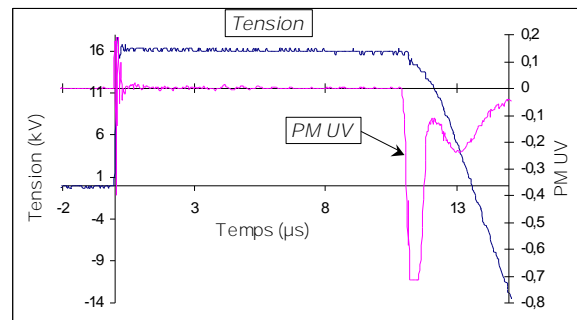


Figure III-37 : Tension pour laquelle les deux modes de décharge coexistent

Il ressort de cette étude que les claquages filamenteux nécessitent un seuil de tension, ou plutôt de champ (ici, 600kV/cm), pour se développer. Si ce seuil n'est pas atteint et si le générateur est suffisamment énergétique, il y a claquage par bulles (les décharges par bulles nécessitent un seuil énergétique comme nous l'avons montré figure III-11).

Si l'on analyse un peu plus en détail les enregistrements de la figure 37 qui montrent que l'on peut claquer, pour une même tension appliquée, par mode subsonique ou par mode supersonique, on constate :

- § que le temps formatif est six cent fois plus court pour une décharge supersonique que pour une décharge subsonique (200ns contre 133 μ s) ;
- § que le temps d'initiation est environ 8 fois plus bref pour une décharge supersonique que pour une décharge subsonique (11 μ s contre 80 μ s) ;
- § que l'énergie correspondante E_i est approximativement cinq fois plus faible pour une décharge supersonique que pour une décharge subsonique (8J contre 38J).

Ces résultats sont, à notre avis, très importants mais difficile à généraliser, tout au moins d'un point de vue quantitatif :

- § concernant les décharges subsoniques, il est évident que E_i et E_b dépendent fortement du volume d'eau à thermaliser et à vaporiser c'est-à-dire de la configuration géométrique utilisée ;
- § concernant les décharges supersoniques, le problème est différent et une des questions essentielles est la suivante : dans quel milieu s'initie, puis se propage, les décharges filamenteuses ? Ou, en d'autres termes : cette notion de seuil de champ est-elle suffisante pour expliquer cette phénoménologie.

3.4.4.2. *Initiation des décharges supersoniques*

Nous avons tenté de quantifier énergétiquement l'initiation des décharges supersoniques. Nous avons utilisé, pour cela, le Marx le moins énergétique ($C = 500\text{pF}$) de façon à empêcher les filaments de dégénérer. Il est clair qu'avec un tel générateur nous n'avons jamais pu initier de décharges subsoniques car l'énergie disponible est insuffisante. Par contre, l'enregistrement proposé figure III-38 montre une décharge filamenteuse dont la structure se rapproche de celle d'une première couronne dans les gaz. L'énergie injectée au moment du développement de la décharge (t_i) vaut environ 300mJ ; le champ électrique à la pointe est alors de 1MV/cm.

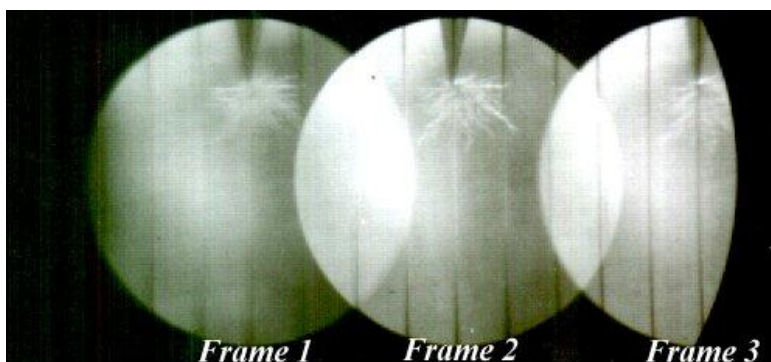


Figure III-38 : *Convertisseur d'images en mode frame d'une décharge électrique supersonique dans l'eau (polarité positive, $\sigma = 220\mu S/cm$, $U_m = 50kV$, $R_p = 150\mu m$, $D = 28mm$, temps d'exposition = $1\mu s$, $t_{Frame1} = 184ns$, $t_{Frame2} = 1,6\mu s$, $t_{Frame3} = 3,1\mu s$)*

Du point de vue énergétique, les valeurs les plus basses que nous avons pu obtenir pour initier une décharge filamenteuse sont :

$$E_i \sim 140mJ$$

$$Q_i = 8\mu C$$

Les volumes correspondants de gaz produits par électrolyse ou par chauffage (compte tenu du « rendement » déduit de la figure III-11) lorsqu'on leur attribue toute l'énergie sont faibles (de l'ordre du μm^3).

Concernant les valeurs de tension (donc de champ), nous avons un problème de compréhension : il faut impérativement dépasser une valeur seuil de la tension maximale U_m pour qu'il y ait initiation d'une décharge supersonique mais cette initiation ne se produit pas systématiquement à l'instant t_m correspondant à U_m . Elle peut se produire à un instant t_i tel que $U_i < U_m$.

Du point de vue champ, les deux valeurs les plus basses que nous avons trouvées sont :

$$E_{m,seuil} \sim 570kV/cm$$

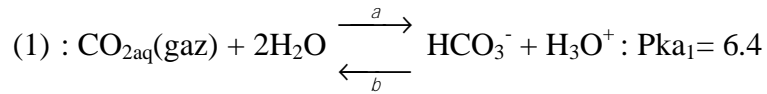
$$E_i \sim 130kV/cm$$

Ce point sera repris ultérieurement.

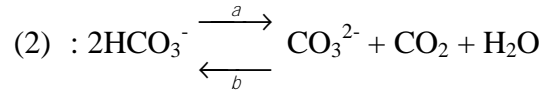
3.4.4.3. *Influence des gaz occlus*

Les gaz occlus contenus dans l'eau pourraient être à l'origine de l'initiation de la propagation des streamers. Ces gaz occlus, essentiellement de l'azote et du CO_2 , peuvent être présents avant le début de l'expérimentation ou bien être introduits au moment des claquages qui perturbent fortement le milieu et notamment l'interface eau/gaz. L'étude suivante consiste à les supprimer puis à mettre en contact cette eau « purifiée » avec des gaz de nature différente afin d'analyser le comportement de la décharge.

Lorsque l'on utilise de l'eau du robinet (pH = 8 - 8,2), divers ions sont présents tels que Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} et HCO_3^- (ions hydrogénocarbonates qui fixent la conductivité). Ces derniers interviennent dans les équilibres suivants :



De plus, en présence de chaleur :



Si on enlève le CO_2 (gaz), on détruit l'équilibre (1) en favorisant (b) qui recrée du CO_2 (gaz). Dans l'eau du robinet, il existe initialement des HCO_3^- ; donc, même si on enlève le CO_2 (gaz), les HCO_3^- en recréent.

Pour éliminer CO_2 (gaz), il est nécessaire d'utiliser une eau sans HCO_3^- , c'est-à-dire recourir à une eau déionisée (résistivité = 18,2M Ω .cm).

Pratiquement, si l'on veut contrôler les gaz occlus, il est nécessaire de réaliser le vide pendant quelques minutes dans l'enceinte remplie d'eau déionisée afin d'enlever l'azote dissout et le CO_2 (gaz) qui se solubilise en très peu de temps (en 2min le pH passe de 0 à 5,5). La réaction (a) de l'équation (1) est toutefois trop lente pour que les HCO_3^- se recréent en grande quantité.

Après avoir enlevé, par pompage primaire, le CO_2 (gaz) et l'azote de l'eau déionisée, nous avons ramené la pression dans l'enceinte à un bar par injection d'azote ou de SF_6 , puis nous avons effectué une étude de U_{50} en fonction de la distance inter-électrodes ($R_p = 145\mu\text{m}$). Les résultats obtenus sont présentés figure III-39. Sachant que le SF_6 est un très bon diélectrique, il ne semble pas que les gaz occlus, notamment lors du « brassage » de l'eau et du gaz au moment du claquage, influent sur l'initiation et le développement de la décharge.

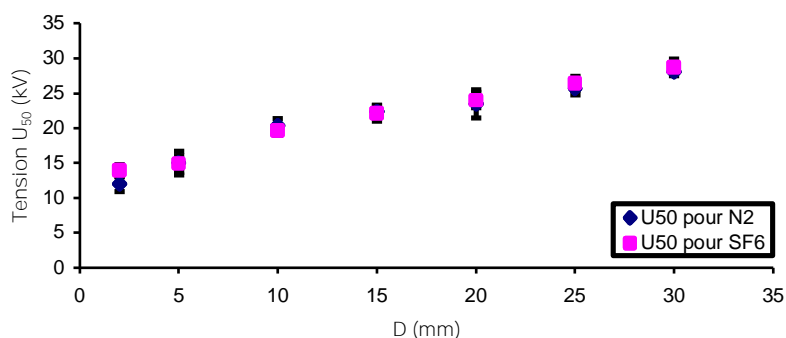


Figure III-39 : Variation de U_{50} en fonction de la distance inter-électrodes dans l'eau déionisée, pour deux gaz dissous différents

3.4.4.4. Influence de la pression

Nous avons repris, pour les décharges supersoniques, l'étude des variations de U_{50} en fonction de la pression du gaz de remplissage de l'enceinte (N_2). Les résultats que nous avons obtenus sont présentés figure III-40 (Marx à thyristors, $R_p = 150\mu m$, $D = 5mm$; $\sigma = 220\mu S/cm$).

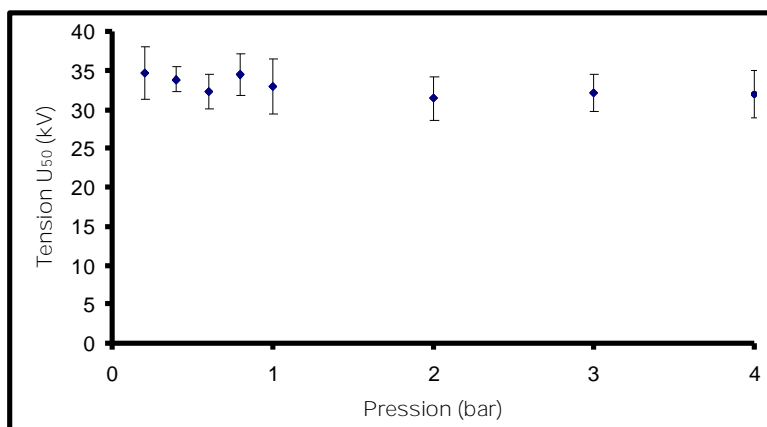


Figure III-40 : Influence de la pression sur la valeur de U_{50}

Nous ne trouvons pas de variation significative, contrairement au cas des décharges subsoniques. Toutefois, notre dispositif expérimental ne nous permet pas d'aller au delà de 4 bar et nous n'avons pas trouvé, dans la littérature, de tels résultats portant sur les décharges supersoniques. Cette question est importante et il faudrait reprendre l'étude en montant plus haut en pression.

3.4.4.5. *Discussion et conclusion*

En dépit du nombre important de travaux effectués sur les diélectriques liquides soumis à de forts champs électriques, il n'y a pas unanimité sur l'interprétation de la phénoménologie et donc, encore moins, sur les modèles d'initiation et de propagation de la décharge. Le cas de l'eau semble encore plus complexe d'autant que les publications sur le sujet sont en nombre relativement restreint par rapport à ce qui s'est fait sur les huiles ou autres mélanges hydrocarbonés. A ce propos, il est intéressant de reprendre les travaux de Béréal qui travaille depuis longtemps sur le sujet et qui cerne bien le problème en décrivant les processus électroniques et gazeux mis en jeu, la nature subsonique (buissons) ou supersonique (filaments) des décharges, leur structure plus ou moins filamentaire et notamment l'effet du champ électrique sur les bulles. Il aborde également le rôle d'additifs, pourvoyeurs ou consommateurs d'électrons, ainsi que celui de la pression hydrostatique [BER 86, BER 98, BER 01]. Malheureusement, il a très peu travaillé sur l'eau, notamment conductrice.

Concernant l'eau, la problématique est la suivante : tous les auteurs s'accordent sur le fait qu'il y a, au moins, deux types de décharges dans les liquides : des décharges lentes (subsoniques) et des décharges rapides (supersoniques).

- Concernant les décharges lentes, l'apparition de bulles, sièges de décharges, semble admise. La compréhension globale de la phénoménologie est satisfaisante, même si certains points restent à éclaircir comme, par exemple, la différence entre les décharges positives et négatives (nature du gaz initial, différence de propagation ?).
- Pour les décharges rapides, il est difficile, compte tenu des temps mis en jeu (inférieurs à la microseconde), d'extrapoler le mécanisme des bulles par chauffage de tout le volume d'eau afin de créer une zone « utile » au voisinage de l'électrode haute tension. Il faut donc tenter de trouver une explication basée sur des phénomènes plus rapides, notamment électroniques (ionisation), même si, dans un second temps, une phase gazeuse peut apparaître. Les valeurs du champ seuil d'ionisation E_t et du coefficient d'ionisation α , pour $E > E_t$, de l'eau sont telles qu'on ne peut imaginer, compte tenu des résultats expérimentaux, d'ionisation directe de ce fluide. La plupart des auteurs cherchent donc à justifier un changement de phase de façon à pouvoir appliquer des résultats connus de la théorie des décharges dans les gaz.

Nous allons résumer et commenter les travaux d'auteurs, ou d'équipes, qui ont, à notre avis, les opinions les plus tranchées.

Selon Felici [FEL 88], dans les deux modes de décharge, une phase gazeuse est présente, vraisemblablement par vaporisation, car c'est le processus qui consomme le moins

d'énergie. Nous ne sommes pas certains de la validité de cette hypothèse : si l'on applique suffisamment longtemps une onde de tension d'amplitude relativement faible, il y aura bien vaporisation puis décharges. Mais nous avons montré, et d'autres avant nous [GAV 94], qu'il y a un seuil de champ électrique pour lequel une autre phénoménologie prend le pas sur la précédente.

Kunhardt et Jones [JON 95, JON 95bis] réfutent l'hypothèse selon laquelle une avalanche électronique peut croître directement dans l'eau, et ils ont vraisemblablement raison puisque nous avons montré paragraphe 3.4.4.1.b, ainsi que d'autres [JON 95], que l'on pouvait déclencher une décharge supersonique avec des champs aussi faibles que 200kV/cm. Comme ils considèrent que le mécanisme de création de bulles par thermalisation du volume d'eau est trop lent, ils introduisent la notion de zones de « faible densité ». Ils cherchent, en fait, à créer un chauffage local, donc rapide, d'où ces zones de faible densité qui s'apparentent à des microbulles se créant au voisinage de l'électrode via des aspérités et de l'effet de champ. Cette idée est reprise par d'autres auteurs [ABR 72, LIS 98, LIS 99, LIS 99bis]. Ils disposent alors d'une bulle et d'électrons libres et peuvent développer leur théorie, très proche de celle des décharges dans les gaz :

- § formation de sites de faible densité (nucléation), près de l'électrode ;
- § croissance et expansion de ce site jusqu'à une valeur critique de la densité permettant à l'ionisation par impact électronique de prendre place (mécanisme de Townsend) ;
- § croissance d'une avalanche électronique et apparition d'un front d'ionisation ;
- § propagation du front d'ionisation avec chauffage par injection d'électrons, baisse de la densité du liquide , croissance d'avalanches, etc...

Leur phrase la plus ambiguë est tout de même la suivante : « *thus, field emission currents from asperities (which can provide the necessary heating and free electrons for avalanche to develop) emerge as the most probable agent contributing to bubble nucleation* » [JON 95]. On peut se demander ce qu'ils entendent par effet de champ, notamment en polarité positive.

L'équipe du High Voltage Institute de Tomsk [GAV 94, KUK 96, KUK 99] a mené des études expérimentales de grande qualité, notamment grâce à leur dispositif optoélectronique puisqu'ils font de l'ombroscopie, en utilisant un laser, qui leur permet d'obtenir une résolution spatiale de un micromètre et qu'ils peuvent prendre des photographies avec des temps d'exposition de l'ordre de la nanoseconde. Ils ont donc pu ainsi mettre en évidence et détailler les décharges subsoniques et supersoniques que nous avons décrites. Ils ont

également mené une étude sur les décharges négatives, ce que nous n'avons pas réalisé. Les deux aspects de leurs travaux sont à discuter :

- *L'aspect expérimental* : comme nous l'avons déjà mentionné, ils ont mis en évidence des décharges subsoniques et des décharges supersoniques. Leurs résultats, en supersonique, sont semblables aux nôtres à quelques détails près. Ils parlent de streamers supersoniques dont le développement est accompagné d'une onde de pression. Nous préférons parler de leader parce que nos travaux antérieurs dans les gaz ont montré qu'il faut une thermalisation (donc des leaders et non des streamers) pour qu'il y ait onde de pression. Ils notent que les zones qui ont contenu leurs streamers (nos leaders) génèrent des microbulles, ce que nous montre la figure III-32. Concernant les décharges subsoniques, nous avons quelques difficultés à comparer nos résultats aux leurs. En effet, tous leurs travaux ont été effectués avec de l'eau distillée ($\sigma = 5.10^{-5} \text{S/m}$) et, lorsqu'ils mettent en évidence des « streamers subsoniques » par ombroscopie, ils ajoutent qu'ils n'ont pas pu détecter de lumière émise. Or, dans nos expériences (figure III-15) notre caméra était pratiquement saturée par l'émission lumineuse. Est-ce bien la même phase que nous mettons en évidence et, si oui, pourquoi cette différence ? Nous avons trop de résultats similaires (phénoménologie, ordre de grandeur des tensions, vitesse des décharges subsoniques et supersoniques, ...) pour envisager que nous ne parlions pas du même phénomène. Nous attribuons plutôt cette différence au fait qu'ils travaillent avec de l'eau distillée, c'est-à-dire avec des courants faibles, et qu'ils n'ont donc qu'une faible variation de température (ce qu'ils précisent par ailleurs) sans changement de phase, donc sans décharge. C'est encore la terminologie qu'ils utilisent qui nous pose problème : il est curieux qu'ils qualifient de « streamers » cette phase non lumineuse alors que le terme streamer est apparu pour les gaz et sous entend ionisation, émission de lumière et faible température.

Dans une autre partie de leur étude, ils soulignent la transition brutale, lorsque l'amplitude de la tension appliquée augmente, entre les décharges subsoniques et les décharges supersoniques. Ceci est, à notre avis, très important et rejoint nos conclusions du paragraphe 3.4.4.1.

Parmi les autres résultats présentés par ces auteurs, notons qu'ils ont mis en évidence des décharges supersoniques émergeant de subsoniques ; ce résultat n'est pas en contradiction avec les nôtres à condition que ces phénomènes se produisent dans le front de l'onde de tension : apparition des « streamers » (non lumineux) subsoniques jusqu'à ce que la tension seuil des supersoniques soit atteinte. Et c'est effectivement le cas lors de leurs essais.

- *Du point de vue interprétation* : comme tout le monde, ces auteurs cherchent à trouver un changement de phase dû à des effets autres que thermiques lents, pour expliquer la transition subsonique/supersonique. Dans un premier temps [GAV 94], ils attribuent ce changement de phase à de la cavitation mais semblent délaissier cette idée dans leurs articles suivants. Ils parlent alors de « *the formation of weakly conducting and weakly luminous but scattering laser beam matter at the point* » ce qui est beaucoup plus flou. Par contre, ils précisent que la formation de cette zone s'effectuerait en dix nanosecondes et aurait une taille voisine de dix micromètres, ce que nous ne sommes pas en mesure de détecter avec nos appareils. De plus, cette phase précéderait systématiquement l'émission de décharges supersoniques. Si ce que nous avons dit précédemment concernant les différences entre leurs résultats et les nôtres pour les décharges subsoniques est vrai (conductivité de l'eau), il serait intéressant de vérifier si cette phase existe toujours avec de l'eau conductrice afin de savoir si elle est indispensable ou non. Cette question est importante : nous avons introduit la notion de seuil de tension (donc de champ) et nous ne revenons pas dessus mais certains enregistrements de décharges supersoniques sont troublants : pour qu'il y ait décharge supersonique, il faut atteindre une valeur minimale de la tension crête de l'onde mais les décharges ne démarrent pas systématiquement à l'instant correspondant à cette valeur crête. Certaines partent avec un certain retard tel que $U_i < U_m$ (voir figure III-26 (a)). Et nous ne savons pas à quoi est utilisé ce retard...

La dernière approche, proposée par Lewis [LEW 98] et reprise par Katsuki *et al* [KAT 02], est très intéressante car elle émane d'un laboratoire d'électronique moléculaire et biomoléculaire et apporte donc un regard nouveau sur le problème. Cet auteur rappelle que, pour les liquides diélectriques, des ruptures de liaisons inter-moléculaires, dues à la température, introduisent des modifications locales de la configuration moléculaire qui peuvent créer des cavités microscopiques. En l'absence de forces extérieures, ces cavités disparaissent spontanément. Il poursuit son raisonnement en analysant l'influence d'un champ électrique sur ce phénomène initial et conclut que de forts champs peuvent également créer de telles micro-cavités puis les faire dégénérer en fissures plus importantes (« *field driven crack propagation* »). On aurait donc là une nouvelle source de changement de phase dans laquelle pourraient se développer les décharges.

C'est un aspect nouveau qu'il serait intéressant d'approfondir en s'associant avec des électrochimistes et des biologistes qui sont familiers de ces notions d'interfaces [VOL 98]. On pourrait ainsi peut-être répondre à un certain nombre des questions posées et non encore élucidées.

CHAPITRE 4

APPLICATIONS DE LA METHODE PBT

4 Applications de la méthode PBT

4.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de caractériser de façon électrotechnique le démonstrateur qui a été décrit au chapitre 2 et d'optimiser l'onde de pression générée par la décharge électrique dans l'eau. On présentera également deux applications particulières concernant la génération d'ondes de choc :

- § le traitement de matériaux par le démonstrateur Effitech,
- § le traitement de biofilms.

4.2 Caractérisation électrotechnique du démonstrateur

4.2.1 Influence de la conductivité de l'eau et de la valeur des condensateurs

Dans le but d'optimiser les performances du démonstrateur, nous avons réalisé sa caractérisation électrotechnique par le biais de l'étude de l'influence de la conductivité de l'eau et de la valeur des condensateurs de stockage sur les paramètres U_{50} , U_b , t_b et E_c (énergie consommée). Attention donc à l'interprétation de ces courbes : aucun des points d'une même figure ne correspond à la même forme d'onde puisque la largeur à mi-hauteur varie en fonction de C et de R.

Les essais ont été réalisés avec des électrodes cylindriques dont les extrémités hémisphériques ($R = 15\text{mm}$) sont distantes de 10mm. Pour faire varier la conductivité de l'eau dans un domaine allant de $250\mu\text{S/cm}$ à $1500\mu\text{S/cm}$, nous rajoutons du sel (NaCl) à de l'eau du robinet. Nous mesurons alors cette conductivité à l'aide d'un conductimètre.

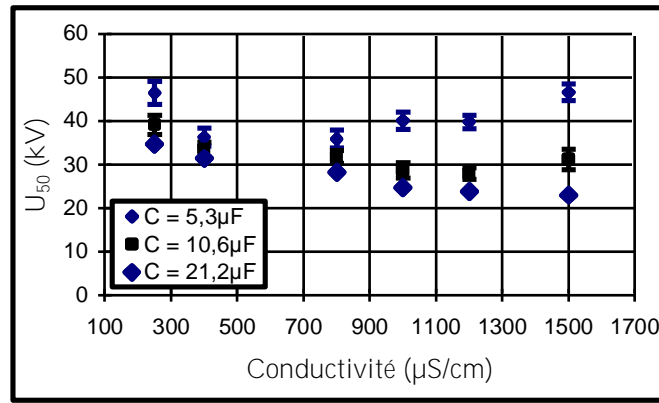


Figure IV-1 : Variation de U_{50} en fonction de la conductivité de l'eau et de la valeur des condensateurs

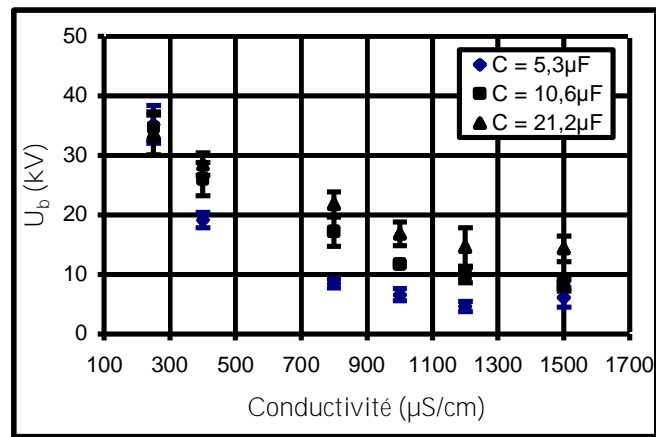


Figure IV-2 : Variation de U_b en fonction de la conductivité de l'eau et de la valeur des condensateurs

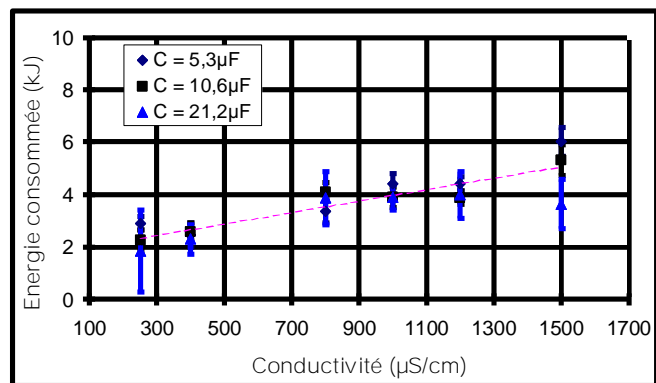


Figure IV-3 : Energie consommée au moment de l'arc en fonction de la conductivité de l'eau et de la valeur des condensateurs

La figure IV-1, déjà présentée et commentée au paragraphe 3.3.2.3.(b), représente les variations de U_{50} en fonction de la conductivité de l'eau. Les figures IV-2 et IV-3 mettent en évidence, respectivement, les variations de la tension U_b et de l'énergie consommée E_c jusqu'au moment du claquage en fonction de la conductivité de l'eau et de la valeur des condensateurs utilisés. Cette énergie consommée et son incertitude se calculent par :

$$E_c = C \times (U_{50})^2 \quad (IV-1)$$

$$\Delta E_c = E_c \times \left[\left(\frac{2U_{50}\sigma_{U_{50}}}{U_{50}^2 - U_b^2} \right) + \left(\frac{2U_b\sigma_{U_b}}{U_{50}^2 - U_b^2} \right) + \left(\frac{\Delta C}{C} \right) \right] \quad (IV-2)$$

où $\sigma_{U_{50}}$ et σ_{U_b} représentent les écarts types introduits par la dispersion sur les mesures.

Compte tenu de la configuration utilisée, les décharges sont subsoniques et, comme nous l'avons montré précédemment (voir paragraphe 3.3.1.1.(b)), l'énergie qu'il faut fournir à l'espace inter-électrodes pour thermaliser l'eau, notamment le volume utile au voisinage des électrodes, est considérée comme perdue pour l'application qui nous intéresse (génération d'une onde de choc). Il est intéressant de noter, figure IV-3, que cette énergie diminue avec la conductivité et qu'il n'est donc pas trop pénalisant de travailler avec de l'eau disponible « au robinet ». Nous réaliserons ainsi toutes nos applications utilisant le démonstrateur avec ce type d'eau.

4.2.2 Minimisation de l'énergie de préclaquage

Pour améliorer le rendement du démonstrateur, nous cherchons à disposer du maximum d'énergie au moment du claquage. Le but des essais suivants est donc de limiter cette énergie consommée en créant, artificiellement, des bulles par injection d'air comprimé dans l'intervalle. Un tuyau dans lequel circule de l'air comprimé a donc été fixé en amont de l'électrode reliée à la masse ; par l'intermédiaire d'un conduit usiné dans l'électrode, on amène l'air comprimé au devant de l'électrode de manière à créer des bulles dans l'intervalle inter-électrodes (figure IV-4).

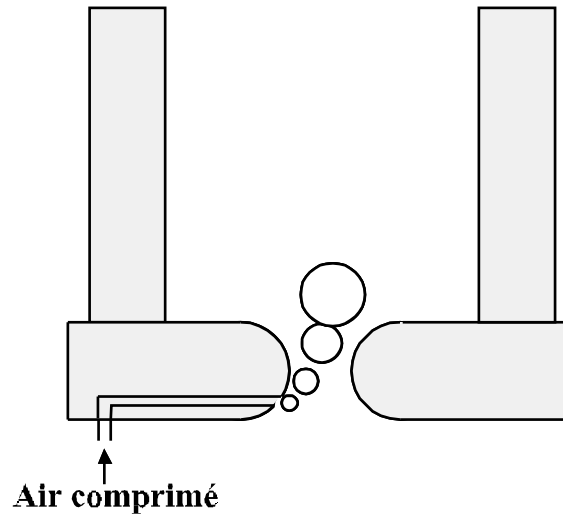


Figure IV-4 : Schéma de principe de l'injection de bulles d'air

Trois débits différents sont utilisés et correspondent chacun à trois pressions d'air comprimé ($P = 1 ; 4 \text{ et } 6 \text{ bar}$). Pour les pressions de 4 et 6 bar, le flux d'air est quasi continu. Les figures IV-5 et IV-6 regroupent les résultats de ces essais.

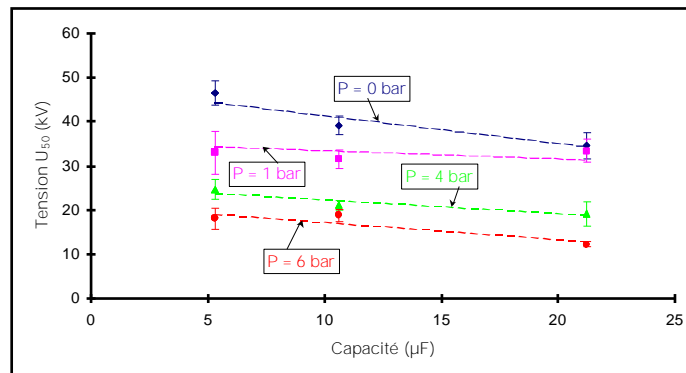


Figure IV-5 : Variations de U_{50} en fonction de la capacité

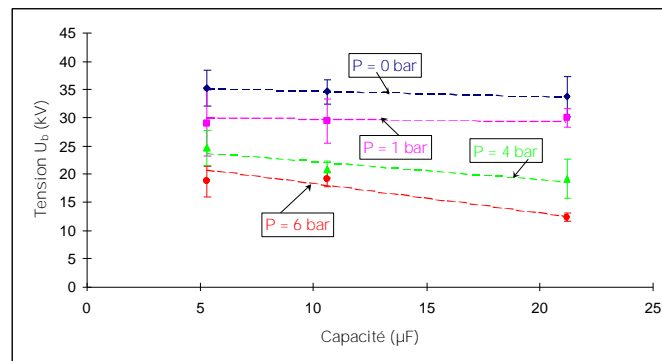


Figure IV-6 : Variations de U_b en fonction de la capacité

Il apparaît clairement que, plus l'eau est chargée en bulles d'air, plus la valeur de U_{50} diminue (pour $C = 5,3\mu\text{F}$, $U_{50} \approx 25\text{kV}$ à $P = 4$ bar contre 45kV sans bulle d'air). Il en est de même quant à la variation de t_b ($t_b \approx 7\mu\text{s}$ pour $P = 4$ bar contre $110\mu\text{s}$ sans bulles d'air). Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés au paragraphe 3.3.2.4 (a) (influence de la pression sur U_{50}).

Pour se rendre compte de l'efficacité de cette technique d'injection de bulles, il convient plutôt de tracer la courbe $\Delta U = U_{50} - U_b$ en fonction du débit de l'air comprimé. La figure IV-7 présente les résultats obtenus pour $C = 5,3\mu\text{F}$ par exemple. Cette courbe signifie que, sans injection d'air, on charge les condensateurs à 50kV pour claquer à 35kV alors que pour $P = 4$ bar, $U_{ch} \approx U_b \approx 25\text{kV}$. En d'autres termes, pour claquer à une tension donnée, on est obligé de surdimensionner la tenue en tension des condensateurs de 25% quand on n'utilise pas d'air additionnel alors qu'on les utilise à 100% de leurs possibilités quand on injecte de l'air à 4 bar.

Cette idée n'a pas été approfondie mais devra l'être compte tenu du pourcentage que représente le prix des condensateurs dans le prix total du dispositif industriel.

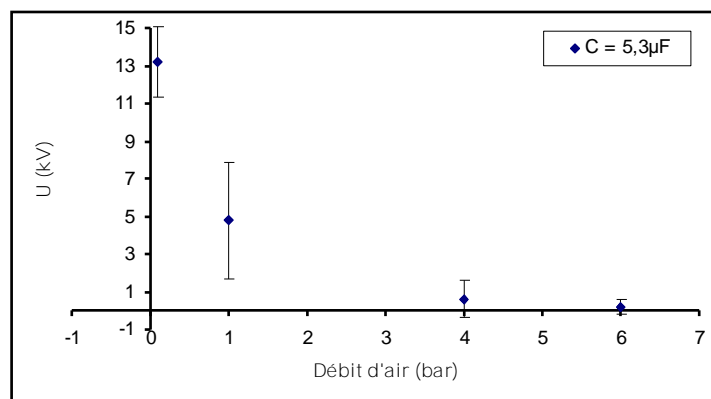


Figure IV-7 : Variations de ΔU en fonction du débit d'air comprimé dans l'espace inter-électrodes.

4.3 Etude de la pression

4.3.1 Introduction

L'optimisation du processus de traitement des déchets par la méthode PBT passe par la maîtrise de l'onde de pression. En particulier, il est indispensable d'estimer, en fonction de l'énergie commutée, son amplitude maximale, son temps de montée et sa durée de manière à

pouvoir sélectionner un type de capteur. Les quelques données bibliographiques [FAR 94, GHE 95, PER 97] sur le sujet sont assez vagues puisqu'elles ne donnent que des ordres de grandeur du temps de montée (quelques microsecondes) et des valeurs crêtes (plusieurs centaines de bar). Ces quelques résultats mettent en relief la difficulté évidente de mesurer de telles ondes de chocs qui, de plus, sont générées dans un milieu fortement perturbant.

4.3.2 Mesures de pression

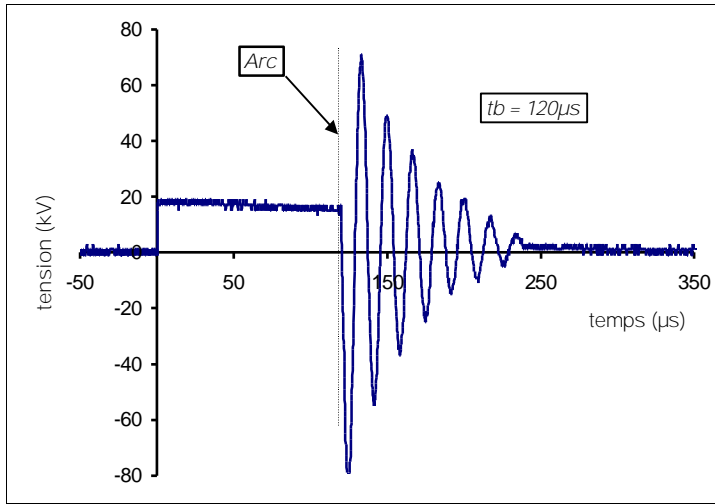
Nos premiers essais en pression ont été effectués avec un capteur à quartz 603B de chez Kistler capable de mesurer des pressions pouvant atteindre 200bar pour des températures allant jusqu'à 200°C. Sa fréquence propre est de 400kHz. Par l'intermédiaire d'un diaphragme, la pression agit sur l'élément de mesure (quartz) qui transforme la pression P (bar) en charge électrique (en pico-coulomb). Le capteur est branché à un amplificateur de charge, type 5011B monocanal (200kHz), alimenté par secteur et commandé par un microprocesseur transformant la charge électrique engendrée par le capteur piézoélectrique en une tension proportionnelle. La bande passante de l'ensemble est donc limitée à 200kHz. Le signal peut être visualisé sur un oscilloscope, l'affichage s'effectuant alors directement en unités mécaniques conformément à l'échelle préalablement sélectionnée. Les applications typiques d'un tel capteur sont les mesures de pression dans les tubes de choc ou les mesures de propagation d'ondes d'explosion. Les premiers essais relatifs à notre étude ont mis en évidence les limites des performances du capteur Kistler. En effet, les mesures du front de montée des ondes de pression générées par les décharges électriques dans l'eau étant inférieures à 2 μ s, le capteur rentre en résonance pour de telles impulsions. Ce capteur s'est donc avéré inutilisable pour la plupart de nos expériences.

Les caractéristiques, en termes de pression et de fréquence, des autres jauges de pression courantes disponibles sur le marché étant équivalentes à celles du capteur Kistler 603B, nous nous sommes dirigés vers une jauge de pression de choc dynamique développée à l'Institut Franco-Allemand de Recherche de Saint Louis (ISL) et commercialisée par la société *Piezotech* [COU 96]. Le principe de cette jauge, ou capteur *Bauer*, est basé sur les propriétés piézoélectrique du polyfluorure de vinylidène (PVDF). Ce polymère présente une activité piézoélectrique bien plus élevée que les transducteurs piézoélectriques habituels (quartz, niobate de lithium, ...), et a des temps de réponse très faibles, de l'ordre de la nanoseconde. L'utilisation de ce type de capteur est fréquent dans les domaines de l'acoustique et des explosifs. Les principaux paramètres d'un capteur à base de PVDF sont

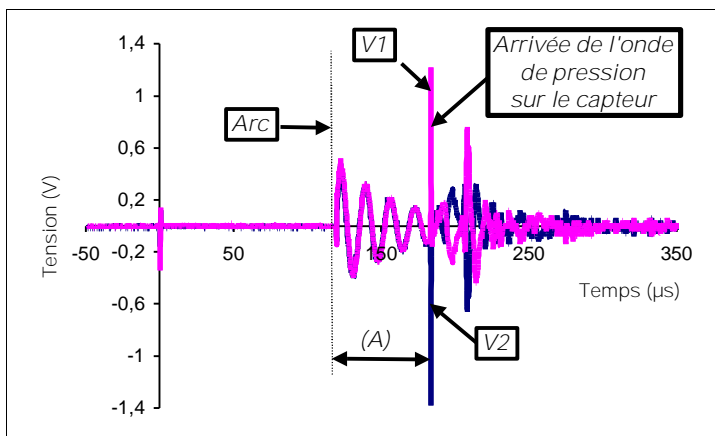
son épaisseur, sa cristallinité et sa polarisation. Pour cette étude, le capteur utilisé est un capteur mince PVDF standard de $25\mu\text{m}$ pouvant mesurer des pressions de plusieurs dizaines de kilobar [COU 96].

Les premiers essais, réalisés à l'ISL, ont montré que ce type de capteur PVDF est sensible aux parasites électromagnétiques créés par les décharges électriques de fortes puissances dans l'eau. En effet, les parasites sont d'une amplitude telle que la pression mesurée est difficilement décelable. L'Institut Saint Louis s'est alors proposé de modifier le capteur et de réaliser un capteur PVDF différentiel. Le principe de cette mesure consiste à transmettre deux signaux de tension de même amplitude, mais en opposition de phase, proportionnels à la déformation du piézoélectrique. Les parasites se superposent de façon identique à ces deux signaux (mode commun) et un calcul différentiel permet de s'affranchir de leurs effets. La mesure de tension de chaque signal est enregistrée aux bornes d'une résistance $R = 1\text{k}\Omega$. Le signal obtenu est alors intégré. Un rapport d'étalonnage a permis de définir la sensibilité S du capteur : $S = 14,13\text{pC}/\text{bar}$. Ce type de capteur permet des mesures de pression jusqu'à 100 bar, avec des fronts de l'ordre de la nanoseconde. Comme nous le verrons, la dynamique du capteur est largement suffisante ; par contre, nous serons pénalisés par la valeur crête maximale admissible.

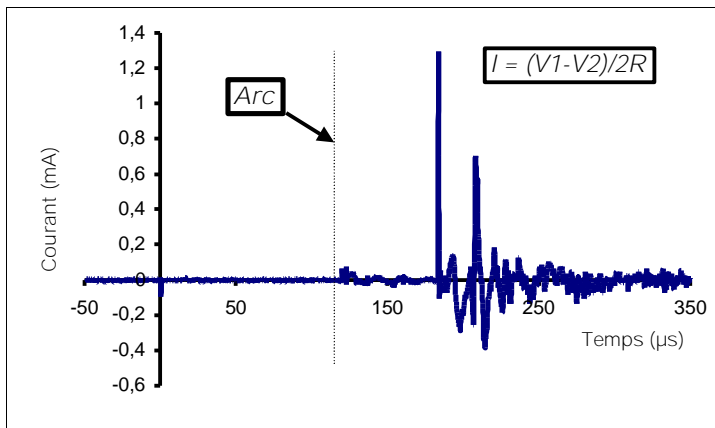
La figure IV-8 représente un ensemble de signaux enregistrés lors de l'utilisation du banc faible énergie avec la petite enceinte (voir présentation paragraphe 2.2) dans l'eau de conductivité $\sigma = 220\mu\text{S}/\text{cm}$, pour une configuration pointe-pointe ($R_p = 1,5\text{mm}$, $D = 3\text{mm}$), avec des condensateurs de valeur $C = 1,2\mu\text{F}$ et une distance capteur-électrode $d = 90\text{mm}$.



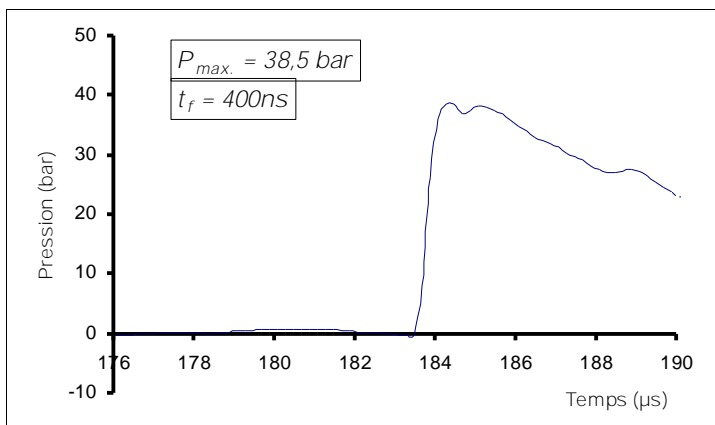
(a) Enregistrement de l'impulsion de tension



(b) Enregistrements des deux signaux bruts issus du capteur Bauer



(c) Courant différentiel résultant, après traitement numérique



(d) Evolution temporelle de l'onde de pression, après traitement numérique

$$P = \frac{1}{4} \rho c \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) \left(\frac{V_1 - V_2}{2} \right) \left(\frac{1}{R} \right)$$

Figure IV-8 : Exemple de signaux délivrés par le capteur différentiel PVDF soumis à l'onde de choc générées par une décharge électrique

La figure IV-8 (a) présente l'impulsion de tension ; l'arc survient à $t_b = 120\mu\text{s}$.

Sur la figure IV-8 (b) représentant les signaux bruts issus du capteur PVDF, nous remarquons une première phase (A) durant laquelle les signaux V_1 et V_2 , de même signe, suivent les parasites électromagnétiques générés par l'arc électrique dans l'eau. Une impulsion est visible sur chacune des voies du capteur $63\mu\text{s}$ après l'arc : c'est le temps mis par l'onde de pression générée par l'arc pour atteindre le capteur à la vitesse de 1500m/s (vitesse de propagation du son dans l'eau). Ce sont ces deux impulsions, de signes opposés, qu'il faut analyser et traiter. Plus la tension de claquage est élevée, et plus ces oscillations amorties de la phase post-arc sont importantes et durent longtemps.

Sur la figure IV-8 (c), nous avons soustrait et divisé par la résistance $R = 1\text{k}\Omega$ les deux signaux de la figure IV-8 (b) issus du capteur afin de visualiser le courant associé. Le signal a aussi été divisé par 2 car, avec ce mode différentiel, on retrouve en sortie du capteur deux fois la charge (+Q) et (-Q). On peut remarquer que les parasites issus de la zone (A) n'ont pas totalement disparu. Cela vient du fait que les amplitudes de ces signaux sur la figure IV-8 (b) ne sont pas parfaitement identiques.

Enfin, la figure IV-8 (d) représente l'onde de pression correspondante, après intégration du signal de la figure IV-8 (c) et multiplication par le facteur de sensibilité du capteur $S = 14,13\text{pC/bar}$. Nous n'avons présenté que l'impulsion de pression issue de l'onde de choc générée par l'arc électrique ; les autres impulsions, causées par les rebonds de l'onde dans l'enceinte, interfèrent rapidement et rendent l'interprétation délicate.

La figure IV-9 représente le montage expérimental permettant de réaliser des mesures de pression transversales, au niveau du prototype Effitech, qui seront analysées plus loin. La distance, d , entre le capteur et l'axe de la décharge est de 345mm , 445mm ou 555mm .

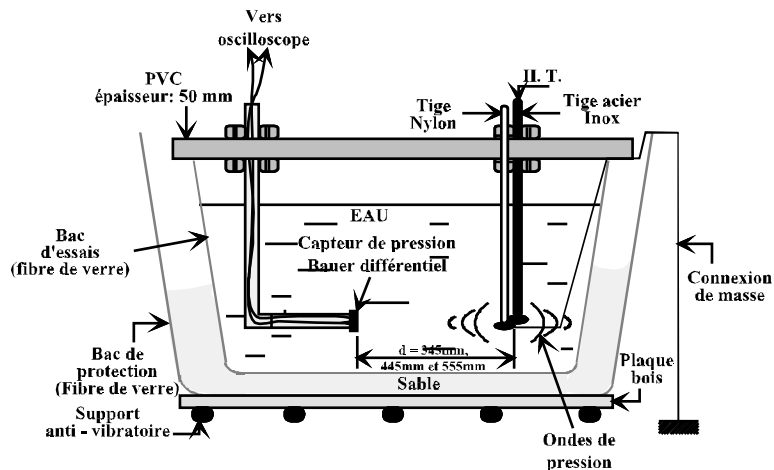


Figure IV-9 : Montage expérimental pour les mesures de pression au niveau du prototype

4.3.3 Résultats expérimentaux

4.3.3.1 Influence de la tension de claquage U_b sur la pression

La figure IV-10 représente l'évolution de la pression en fonction de la tension de claquage pour deux valeurs de condensateurs ($C = 42,4\mu\text{F}$ et $84,8\mu\text{F}$). La distance inter-électrodes est fixée à $D = 10\text{mm}$. Les deux électrodes ont des rayons de courbure de valeurs assez élevées ($R = 15\text{mm}$) de manière à conserver un aspect cylindrique à l'onde de pression. La distance capteur-électrodes est $d = 345\text{mm}$. Pour faire varier U_b , il suffit de se placer à des valeurs de tension telles que $U_m \geq U_{50}$ et, pour chacune d'elles, de laisser statistiquement évoluer le jitter à l'amorçage.

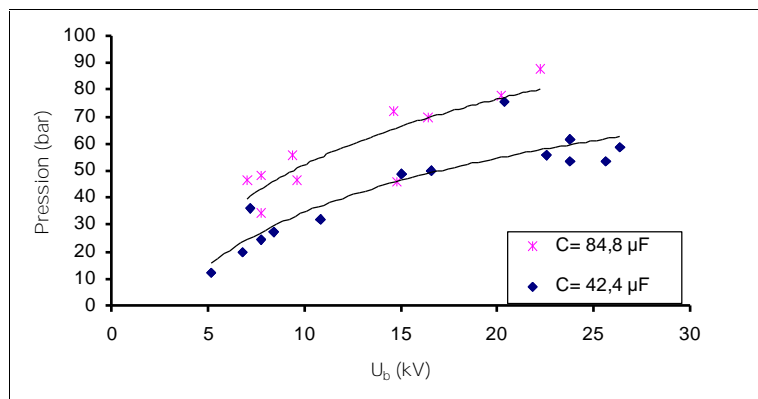


Figure IV-10 : Allures de la pression en fonction de la tension de claquage, pour $d = 345 \text{ mm}$

La figure IV-10 confirme que les pressions engendrées par les décharges électriques dans l'eau sont étroitement liées aux tensions de claquage U_b . De plus, pour une même valeur de U_b , la pression engendrée par la décharge pour $C = 84,8\mu\text{F}$ est supérieure à la celle obtenue pour $C = 42,4\mu\text{F}$. Ce résultat montre que la pression est fonction de l'énergie injectée dans l'intervalle inter - électrodes au moment du claquage.

4.3.3.2 Influence de l'énergie E_b sur la pression

Que l'on fasse varier U_b ou bien C , le paramètre commun est l'énergie disponible au moment de l'arc, c'est-à-dire $E_b = \sqrt{2} \cdot C \cdot U_b^2$.

La figure IV-11 représente les variations de la pression engendrée par la décharge électrique en fonction de cette énergie injectée pour différentes distances capteur-électrodes.

La pression augmente avec l'énergie injectée et semble se stabiliser aux alentours de dix à quinze kilojoules. Cette remarque est importante pour les applications industrielles.

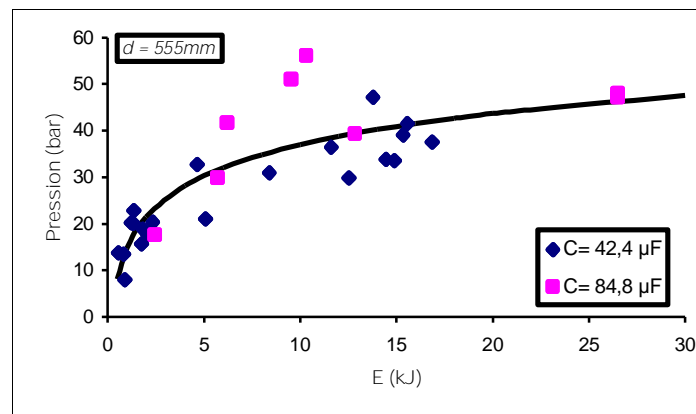
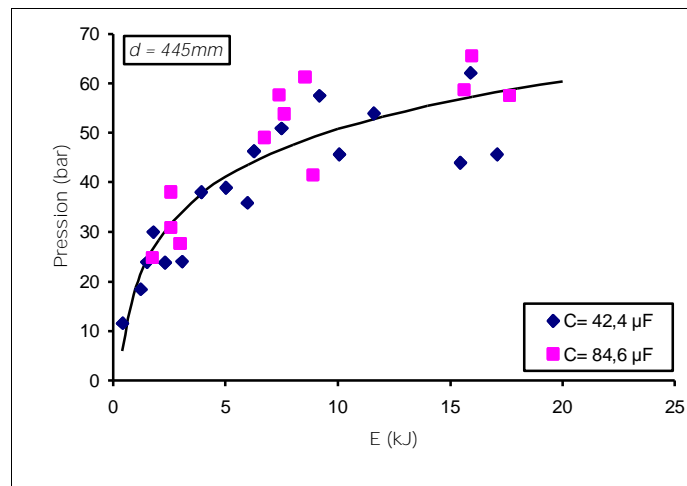
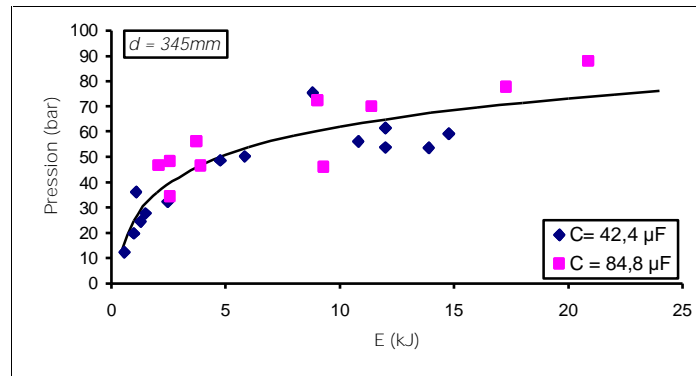


Figure IV-11 : *Allures de la pression en fonction de l'énergie au moment du claquage pour trois distances capteur-électrodes*

Nous avons également effectué des mesures de pression pour différentes géométries et distances inter-électrodes. Ces essais ont été réalisés dans la petite enceinte avec le banc faible

énergie ($C = 1,2\mu\text{F}$), dans de l'eau de conductivité $\sigma = 250\mu\text{S/cm}$, pour deux distances inter-électrodes $D = 3\text{mm}$ et 6mm et deux configurations : l'une boule-boule ($R_B = 11\text{mm}$) et l'autre pointe-pointe ($R_p = 1,5\text{mm}$). Le capteur est placé à une distance $d = 90\text{mm}$ des électrodes.

La figure IV-12 présente les résultats obtenus lors de ces essais.

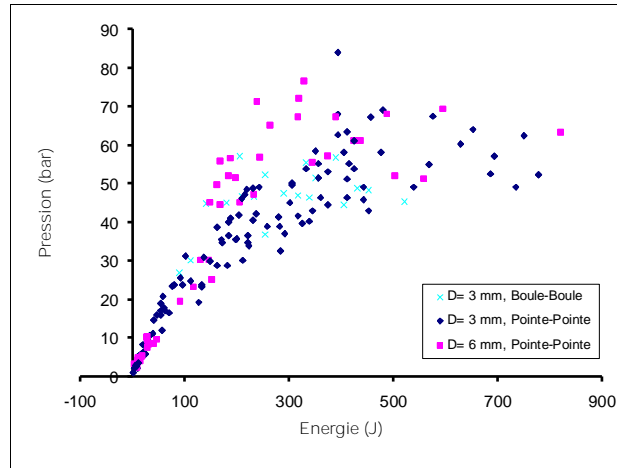


Figure IV-12 : Variations de la pression en fonction de l'énergie au moment de l'arc pour 3 configurations géométriques différentes

Il semble que la pression engendrée par l'arc électrique dans l'eau soit peu dépendante de la distance inter-électrodes ou de leur géométrie. La différence entre les deux distances inter-électrodes étant assez faible (facteur 2), il faut tout de même rester prudent sur les conclusions qui découlent de ces résultats qui présentent une grande dispersion.

Comme mentionné précédemment, on note une tendance à la saturation de l'amplitude de l'onde de pression quand l'énergie augmente.

Il est à noter que des essais similaires effectués dans l'eau distillée ont donné les mêmes résultats.

4.3.3.3 Influence de la distance capteur-électrodes sur la pression

Les figures IV-13 et IV-14, dont les essais correspondants ont été effectués avec $C = 42,4\mu\text{F}$ et $C = 84,8\mu\text{F}$, représentent la pression engendrée par la décharge en fonction de U_b , pour trois distances capteur - électrodes ($d_1 = 345\text{mm}$, $d_2 = 445\text{mm}$ et $d_3 = 555\text{mm}$) et pour une distance inter-électrodes de 10mm . Comme on pouvait s'y attendre, plus on se rapproche de la décharge, plus la pression est élevée.

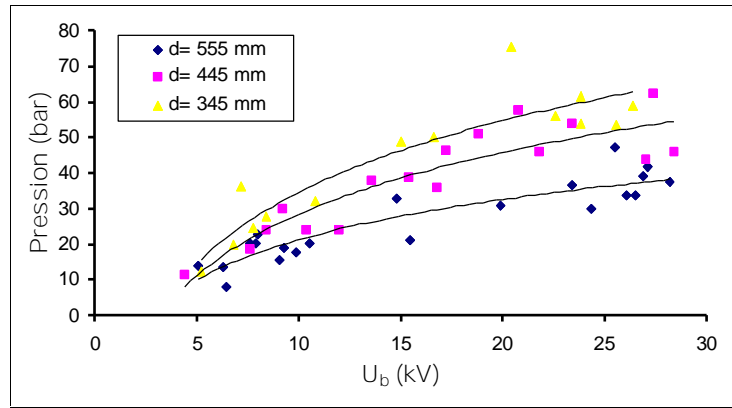


Figure IV-13 : Allures de la pression en fonction de la tension de claquage pour $C = 42,4\mu F$

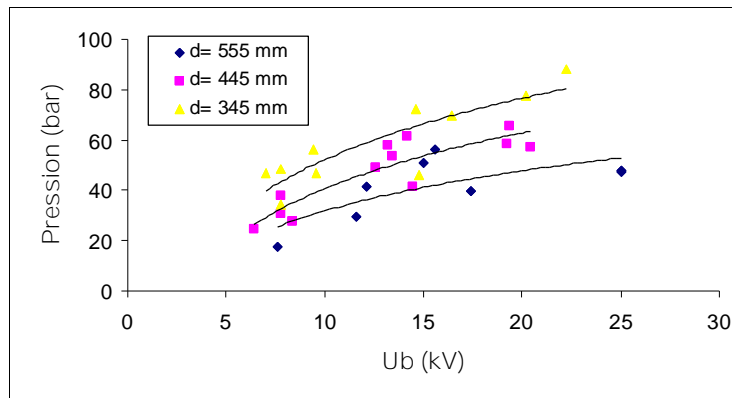


Figure IV-14 : Allures de la pression en fonction de la tension de claquage pour $C = 84,8\mu F$

Il aurait été intéressant, dans le cadre de notre application, de trouver une relation liant la variation de la pression avec la distance de la décharge. Pour ce faire, il aurait fallu effectuer des mesures de pression plus proches de la décharge. Toutefois ceci ne peut être entrepris à cause d'une éventuelle détérioration du capteur. Gherendi *et al* [GHE 95] ont effectué des mesures, par hydrophone, de pressions créées par la décharge d'un condensateur de $40\mu F/1,8kV$. Ils parlent de deux régimes de pression : l'un, qui varie en $(1/d^{0,5})$ pour des distances allant jusqu'à 10mm ; l'autre, pour les distances supérieures à 10mm, varie en $(1/d)$. Ils ne décrivent cependant pas leur dispositif expérimental.

4.4 Illustrations de traitements réalisés avec le démonstrateur Effitech

Les expériences suivantes ont été réalisées pour une distance inter-électrodes $D = 10\text{mm}$ et pour une hauteur des électrodes par rapport au fond de l'enceinte $H = 10\text{mm}$. Les tensions appliquées sont de 25kV avec des énergies de $12,5\text{kJ}$ par impulsion. Nous effectuons une décharge toutes les minutes environ. Nous rappelons que la géométrie intérieure de l'enceinte contenant les produits à traiter est usinée de telle manière que les produits, après chaque choc, viennent se repositionner au voisinage des électrodes par soucis d'un rendement optimum (voir paragraphe 2.2.1). La tension appliquée à l'espace inter-électrodes est supérieure à U_{50} afin d'obtenir des valeurs de t_b les plus faibles possibles et donc des valeurs de U_b les plus grands possibles. Il n'y a pas d'injection d'air comprimé.

4.4.1 Composants électroniques

Au niveau de la carte mère d'un PC (figure IV-15), la fibre époxy est séparée de ses composants électroniques et autres supports plastiques au bout de cinq chocs (figure IV-16). La photo suivante a été prise après trente chocs (figure IV-17).



Figure IV-15

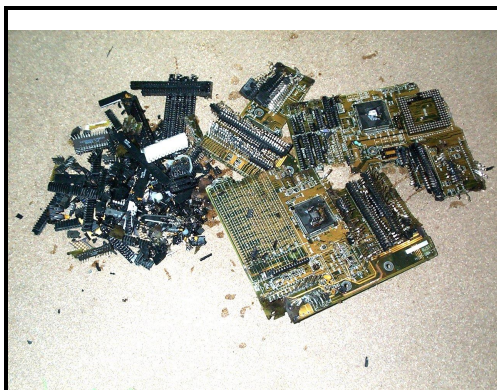


Figure IV-16



Figure IV-17

4.4.2 Appareils électriques

Les différents composants de base d'un téléphone (figure IV-18) peuvent être valorisés ; la figure IV-19 présente le téléphone au bout de sept chocs, puis de trente chocs (figure IV-20).



Figure IV-18

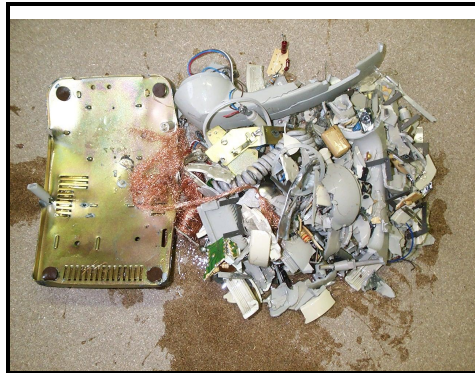


Figure IV-19



Figure IV-20

4.4.3 Matériels informatiques

Au niveau des CD ROM (figure IV-21), la méthode PBT permet de séparer la matrice plastique du film métallique contenant l'information du CD, en cinq chocs (figure IV-22).



Figure IV-21



Figure IV-22

4.4.4 Matériaux en graphite

La société SNECMA a proposé à la société EFFITECH de traiter des produits en graphite issus de revêtement de fours à haute température. Ces déchets sont très difficiles à broyer au moyen des techniques conventionnelles. Ainsi, nous avons introduit les produits (figure IV-23) à l'intérieur du démonstrateur et réalisé un certain nombre de chocs. La figure IV-24 représente les produits après trente chocs et la figure IV-25 après 80 chocs ($E = 12,5\text{kJ}$ par choc).



Figure IV-23



Figure IV-24

Figure IV-25



4.5 Etude du traitement et de la prévention des biofilms par décharges électriques

4.5.1 Objectifs de l'étude

Ce travail entre dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire des Matériels Electriques de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France (EDF), les laboratoires de Chimie de l'Eau et de l'Environnement (LCEE) et d'Etudes Aérodynamiques (LEA) de l'Université de Poitiers et le Laboratoire de Génie Electrique (LGE) de Pau. L'objectif de cette action est *d'évaluer l'efficacité de l'application des décharges électriques dans l'eau pour le traitement de biofilms présents dans des canalisations.*

4.5.2 Montage expérimental

4.5.2.1 Description générale du montage

Le montage expérimental, schématisé figure IV-26, a été conçu et réalisé, pour sa partie hydraulique, par l'équipe du Professeur Romat du Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques (LEA) de Poitiers. La figure IV-27 donne une vue générale de l'ensemble du système, installé dans des locaux du LCEE à l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers (ESIP). Le processus consiste, principalement, en une boucle de circulation d'eau comprenant :

- § un générateur d'arcs pulsés, dont le principe sera détaillé plus loin,
- § une section d'étude du biofilm, composée d'une conduite en acier inox de 16 mm de diamètre intérieur et de 5 mètres de longueur. Trois tronçons amovibles (T_1 , T_2 , T_3), placés à des distances variables de la zone de la décharge électrique dans l'eau, servent à l'analyse du développement des biofilms. Un tronçon témoin T_4 a été ajouté dans la boucle dans une zone où l'influence de l'onde de pression est sensée ne pas se faire sentir,
- § une pompe de circulation à débit variable et un débitmètre,
- § un cumulus (ballon chauffe-eau) qui régule la température de l'eau à environ 37°C.

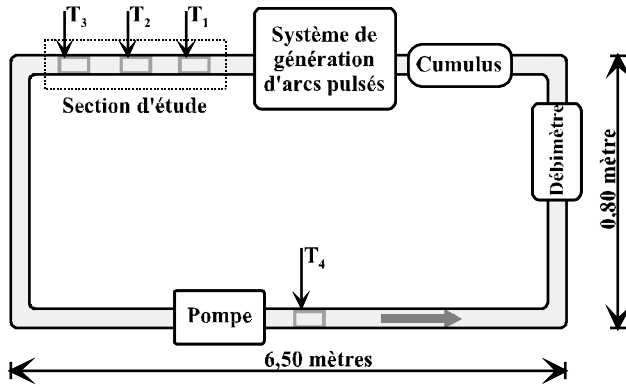


Figure IV-26 : *Schéma de principe du montage* Figure IV-27 : *Vue d'ensemble du montage*

4.5.2.2 *Le générateur haute tension et la cellule d'essais*

La partie haute tension (générateur d'impulsions haute tension associé à son système de sécurité) ainsi que la cellule d'essais ont été développées par le LGE.

Le principe de fonctionnement du banc haute tension, présenté figure IV-28, consiste à charger un condensateur de puissance ($1,3\mu\text{F} - 70\text{kV}$) à travers une résistance de forte valeur ($R = 10\text{M}\Omega$), par l'intermédiaire d'une alimentation haute tension continue. Lorsque la charge complète du générateur est atteinte, un commutateur à air de type trigatron peut être déclenché, à la demande, à une période qui, grâce à un système de minuterie, peut varier de un arc toutes les dix minutes à un arc par jour. On peut ainsi appliquer la haute tension, présente aux bornes de la capacité, à l'espace inter-électrodes de la cellule d'essais remplie d'eau. L'onde de tension générée est de forme bi-exponentielle et son temps de décroissance est lié à la valeur de la résistance de l'intervalle (temps caractéristique $\tau = R_{\text{eau}} \cdot C$), elle-même fonction de la géométrie des électrodes, du volume d'eau et de sa conductivité (voir chapitre 3). Les mesures de courant sont réalisées par une sonde Pearson modèle 5805 et celles de tension par une sonde Lecroy modèle PPE 20KV.

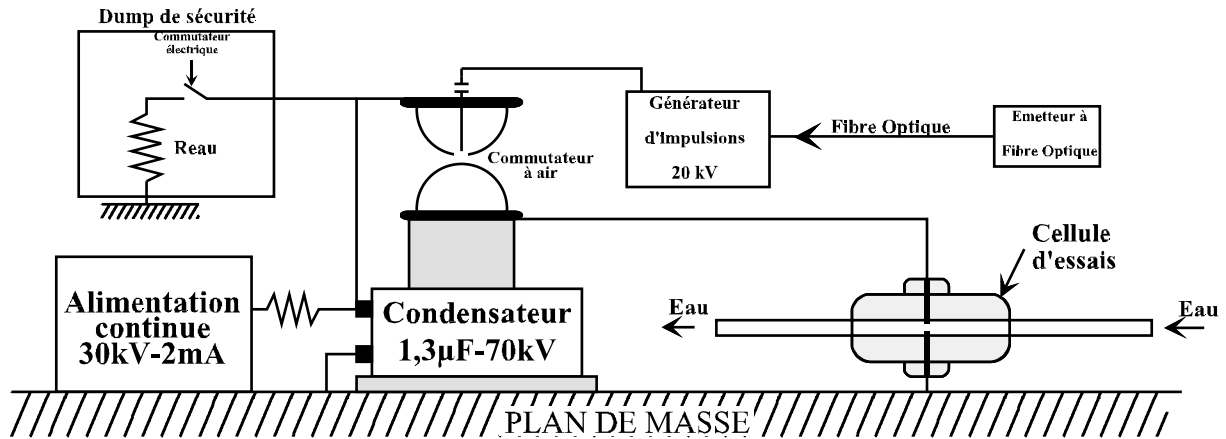


Figure IV-28 : Schéma de principe du générateur d'impulsions haute tension

La cellule d'essais, visible figure IV-29, est constituée d'un ensemble isolant en PVC permettant de maintenir deux électrodes. La principale contrainte est de limiter l'énergie stockée à une centaine de joule.

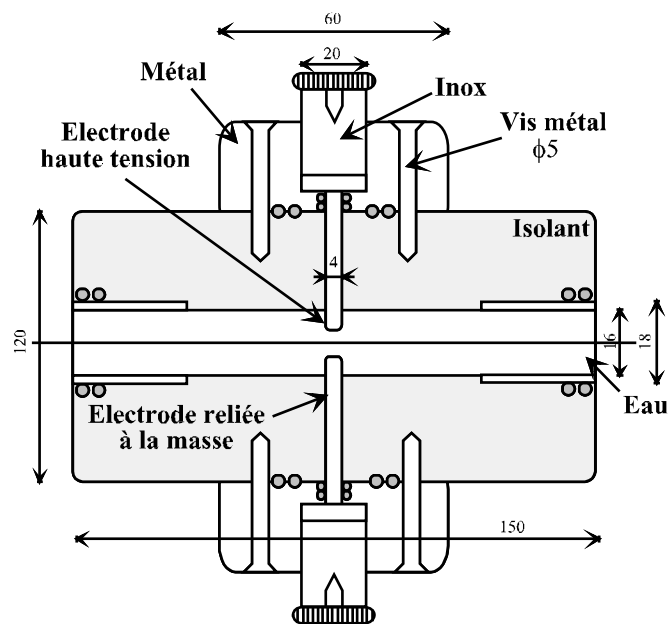


Figure IV-29 : Schéma, en coupe longitudinale, de la cellule d'essais

Des essais préliminaires, effectués au LGE, ont donc consisté à trouver une configuration expérimentale (rayon d'électrodes – distance – tension appliquée) permettant de limiter l'énergie commutée tout en réduisant l'instant du claquage. De cette manière, la valeur U_b étant maximale ($U_b \approx U_{charge}$), l'efficacité de l'onde de pression est optimisée.

La configuration retenue consiste en deux électrodes pointe – pointe de rayon $R = 2\text{mm}$, espacées d'une distance $D = 1\text{mm}$. Cette géométrie permet d'obtenir une résistance équivalente inter-électrodes élevée et la valeur de la constante de décharge minimise les pertes d'énergies liées aux effets thermiques. Une tension appliquée de 10-12kV limite également à une centaine de joule l'énergie stockée. Par rapport à la géométrie de la cellule, au débit de l'eau et à sa température, cette valeur de tension est supérieure à la valeur de U_{50} . Par conséquent, l'intervalle est largement surtensionné ce qui augmente encore la valeur de la tension de claquage et réduit le jitter de l'amorçage. L'amplitude de l'onde de pression est ainsi reproductible et maximale par rapport aux énergies stockées.

L'ensemble du système haute tension (capacité, déclencheur, pilote) a été placé dans une cage de protection reliée à la masse générale du montage afin d'assurer la sécurité des utilisateurs du banc. L'accès au système haute tension est possible par le biais d'une porte aménagée dans la cage, qui déclenche automatiquement la mise à la masse de tout le circuit, dès son ouverture. La photo de la figure IV-30 montre la partie haute tension du banc et son système de sécurité.

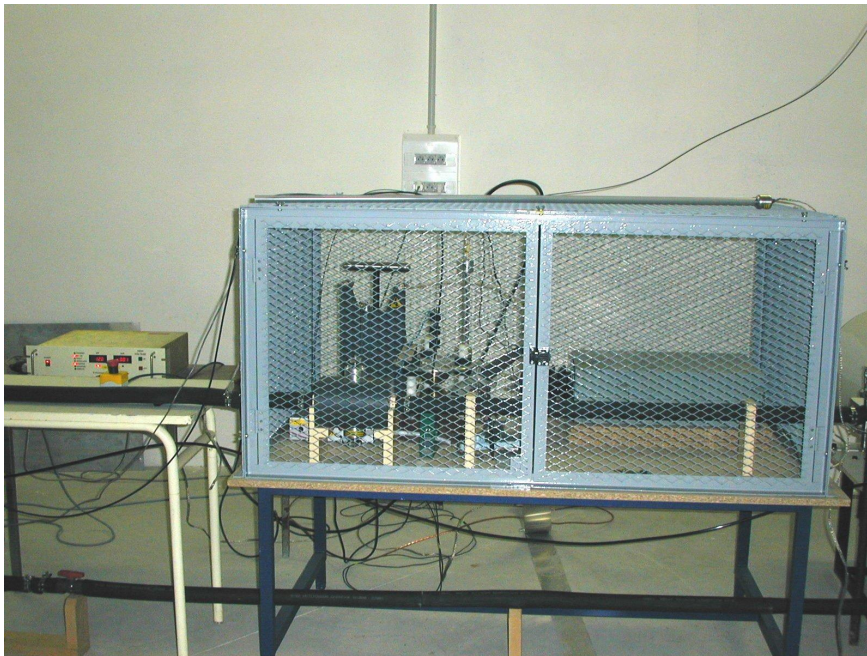


Figure IV-30 : *Banc haute tension et sa cage de Faraday*

Les premières mesures réalisées in situ sont présentées figure IV-31, avec, sur la voie 1, la tension en kilovolts appliquée à l'espace inter-électrodes, et sur la voie 2, le courant en

kiloampères mesuré au niveau de l'électrode de masse. Le temps de claquage, t_b , mesuré dans les conditions de fonctionnement de la boucle, est de l'ordre de la dizaine de microsecondes, pour des tensions commutées de 12kV. La tension correspondante U_b est pratiquement égale à la tension de charge.

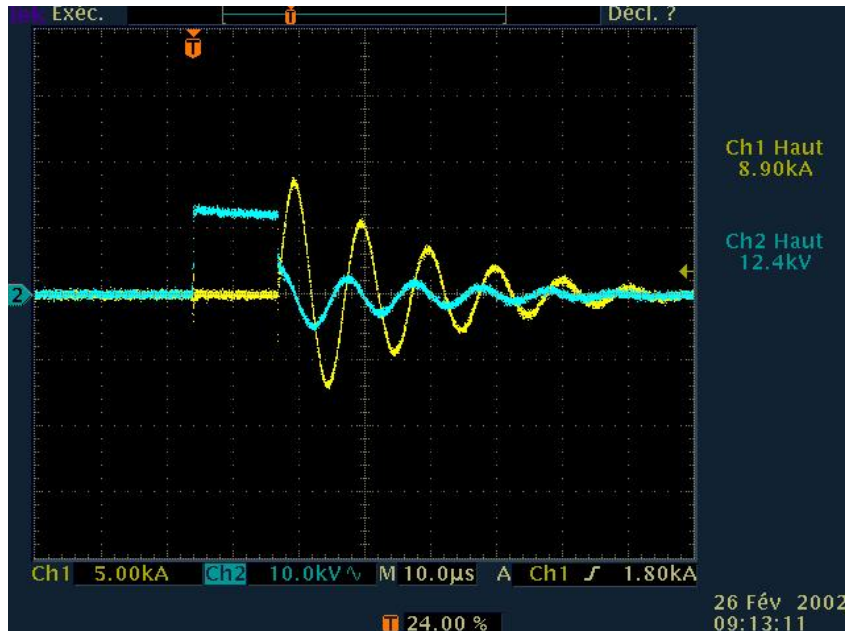


Figure IV-31 : Réponse en tension et en courant en fonction du temps

4.5.3 Expériences préliminaires et résultats

4.5.3.1 Définition d'un biofilm

Un biofilm est défini comme un assemblage supramoléculaire constitué de colonies bactériennes fixées sur un support et enfermées dans une gangue polymère encapsulatrice (constituée de polysaccharides, de protéines, d'acides nucléiques, ...). Ces biofilms sont très stables et résistants au stress. Leur rôle écologique et économique est donc considérable, aussi bien par leurs effets positifs (épuration), que par leurs effets négatifs (contamination d'implants, biocorrosion, lésions des tissus, ...).

Les travaux concernant l'analyse chimique des biofilms et le suivi des microorganismes ont été réalisés par l'équipe du Professeur Merlet du Laboratoire de Chimie de l'Eau et de l'Environnement (LCEE).

4.5.3.2 *Matériel et méthodes*

Les trois tronçons de mesure (T_1 , T_2 et T_3) sont placés dans l'alignement du support d'électrodes à des distances $D_1 = 0,3\text{m}$, $D_2 = 2,5\text{m}$ et $D_3 = 5\text{m}$ de la décharge électrique. Les tronçons de mesure insérés dans les canalisations sont destinés à servir de support au biofilm et à permettre leur échantillonnage et leur mesure. Composés chacun de neuf coupons en acier inoxydable accolés jointivement, ils permettent, grâce à un diamètre intérieur identique à celui de la canalisation principale (16mm), de ne pas créer de turbulences spécifiques. Ils pourront donc être considérés comme représentatifs d'une portion de canalisation, de sa teneur en biofilms et des effets des traitements appliqués sur ces derniers.

L'eau alimentant les circuits présente une teneur en matière organique relativement importante, avec un COD (Carbone Organique Dissout) de 5 à 9mg/L C.

Un analyseur de carbone permet de déterminer le carbone organique total (COT) et le carbone organique dissout (COD). Le seuil de détection est estimé à $0,1\text{mgCL}^{-1}$. Le dénombrement direct des bactéries totales est déterminé par microscopie à épifluorescence ; le résultat, pour ce dénombrement, s'exprime en nombre total de cellules par cm^2 . Les bactéries cultivables hétérotrophes revivifiables sont dénombrées sur gélose PCA ; les résultats sont exprimés en UFCmL^{-1} (eau) ou en UFCcm^{-2} (biofilm).

4.5.3.3 *Résultats expérimentaux sur un traitement curatif (1 décharge par heure)*

La boucle de circulation est mise en fonctionnement continu au débit de 175l/h, sans effectuer de décharges électriques pendant trois jours, afin de permettre l'adhésion de cellules bactériennes sur le matériau des canalisations et de favoriser la croissance d'un biofilm. A l'issue de cette période, le traitement par arc pulsé est mis en place à raison d'un choc par heure. Ce traitement est maintenu pendant sept jours en effectuant des prélèvements au cours du temps :

- § à J0 : juste avant la mise en place du traitement,
- § puis à J1, J3 et J7.

a. Bactéries totales

L'évolution de la teneur en bactéries totales fixées sur le biofilm au cours du traitement par décharges électriques est présentée sur la figure IV-32.

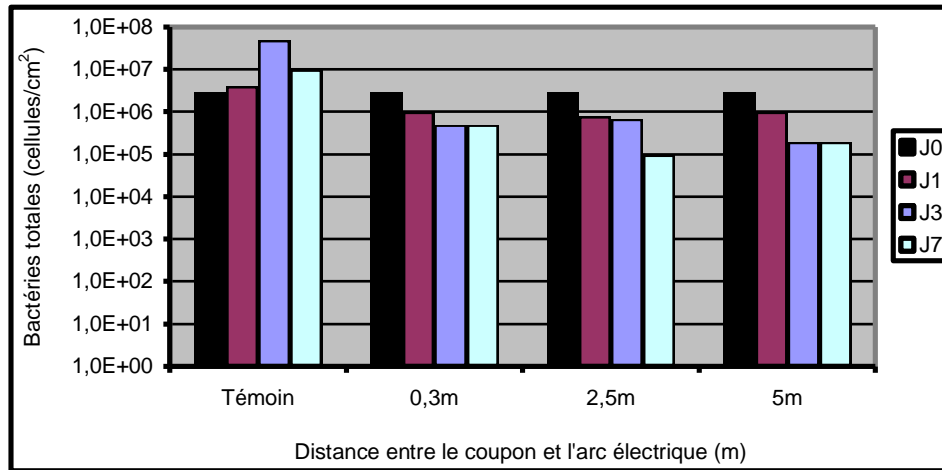


Figure IV-32 : *Evolution des bactéries totales dans le biofilm au cours du traitement curatif d'un circuit pendant une période de sept jours*

Si l'on observe les densités totales de bactéries présentes sur les canalisations en début d'expérimentation (J0) après les trois jours de colonisation du circuit par l'eau, on constate que les différents tronçons de coupons (témoin et mesure) ont été colonisés de la même manière par les bactéries, puisqu'ils contiennent la même densité de bactéries totales fixées (environ $2 \cdot 10^6$ cellules par cm^2 de matériau). Au cours du traitement (1 décharge/heure), cette densité bactérienne diminue progressivement sur les trois tronçons de mesure, mais de manière faible, n'atteignant qu'environ $1 \log/\text{cm}^2$ après sept jours de traitement. Il faut, en outre, noter que l'efficacité maximale est obtenue sur les coupons les plus éloignés des électrodes ($D = 5\text{m}$), ce qui ne peut vraisemblablement s'expliquer que par un effet de réflexion de l'onde de choc en bout de canalisation. Sur le coupon témoin, les bactéries ne sont pas éliminées par le traitement ; elles continueraient même à se fixer et/ou à se multiplier, dépassant 10^7 cellules par cm^2 .

b. Bactéries cultivables

Après trois jours de colonisation, et avant de démarrer les décharges électriques (à J0), les densités bactériennes cultivables sont du même ordre de grandeur sur tous les coupons analysés et varient entre 3 et $8 \cdot 10^3$ UFC/ cm^2 . Si l'on compare cette valeur à la densité des bactéries totales rapportée au paragraphe précédent, on remarque que moins de 1% des bactéries présentes sont cultivables sur le milieu PCA. La figure IV-33 montre que le traitement est notable sur les bactéries cultivables puisque leur quantité diminue sur les tronçons de mesure d'environ $1 \log/\text{cm}^2$ dès le premier jour de traitement. L'abattement des

densités bactériennes cultivables se poursuit ensuite progressivement atteignant 2 à 3log/cm² au bout de sept jours.

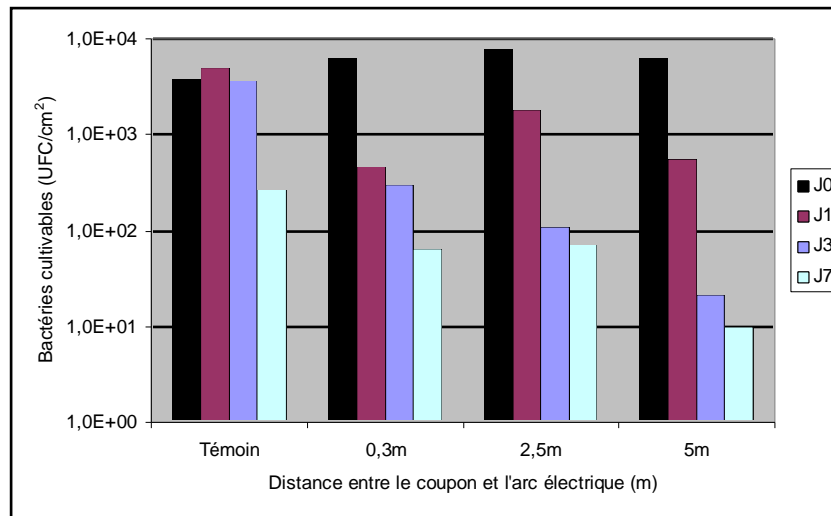


Figure IV-33 : *Evolution des bactéries cultivables dans le biofilm au cours du traitement curatif pendant une période de sept jours*

Un impact significatif se manifeste sur le tronçon témoin, situé dans la canalisation inférieure, sur le circuit de retour de la boucle d'essai. Cet effet ne peut s'expliquer que par une transmission partielle de l'onde de pression dans cette portion de la canalisation. Cet effet sera confirmé lors des essais ultérieurs rendant difficile l'utilisation de ce tronçon de mesure comme un réel témoin en l'absence de traitement.

c. Impact du traitement curatif sur la teneur en carbone organique du biofilm

Contrairement aux observations réalisées avec les bactéries totales et cultivables du biofilm, la figure IV-34 indique que la teneur en matière organique du biofilm n'est pas très homogène sur l'ensemble des tronçons de mesure à l'issue des trois jours de colonisation (à J0). La teneur en carbone varie en effet entre 2,3 et 3,9µg/cm² selon les coupons.

En cours de traitement, la matière organique fixée diminue, principalement après trois jours de traitement, et la teneur résiduelle en matière organique fixée est alors faible (environ 1µgC/cm²). L'impact du traitement par arcs pulsés se fait également sentir sur le tronçon témoin, pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment.

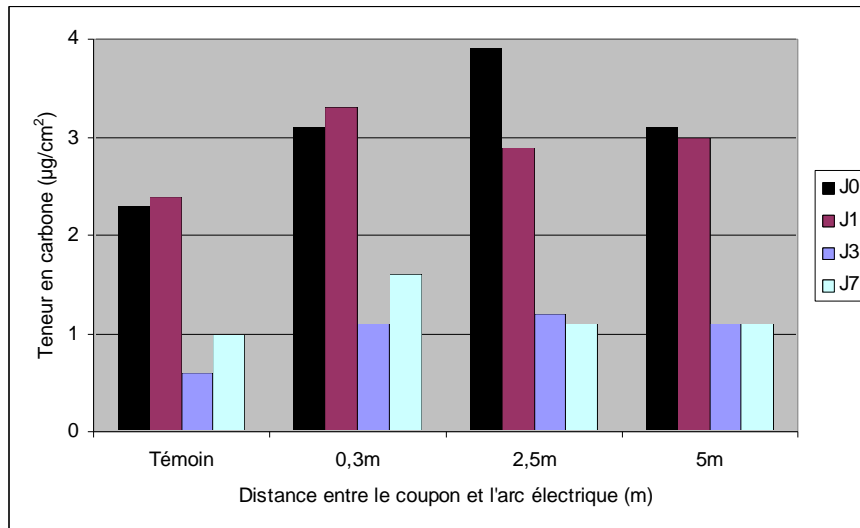


Figure IV-34 : *Evolution de la teneur en carbone organique du biofilm au cours du traitement curatif pendant une période de sept jours*

4.5.3.4 Conclusion de l'étude

Tout d'abord, il est nécessaire de remarquer que le tronçon témoin n'a pas joué son rôle de référence ; les résultats obtenus montrent en effet que la portion de circuit où est implanté ce tronçon est sous influence indirecte du choc électrique.

Toutefois, nous pouvons déterminer les principales conséquences du traitement curatif, à raison de 1 décharge/heure, sur une canalisation en acier inoxydable colonisée pendant trois jours par l'eau : si l'efficacité est peu marquée au cours des premières heures de traitement, la poursuite des décharges électriques pendant trois à sept jours permet d'obtenir une réduction significative des biomasses fixées, qui se caractérise par :

- § une diminution d'environ $1 \log/cm^2$ de la densité bactérienne totale,
- § un abattement plus important de la cultivabilité des bactéries fixées (2 à $2,5 \log/cm^2$),
- § un décrochage significatif de la matière organique du biofilm (50 à 70% d'abattement du carbone organique fixé sur le matériau).

Concernant le plus faible abattement obtenu sur les bactéries totales, il peut s'expliquer par le fait que ce paramètre mesure la totalité des bactéries, vivantes ou mortes. Il est donc possible que certaines bactéries, endommagées par le traitement, demeurent fixées sur la matrice du biofilm et soient donc prises en compte lors de la détermination en épifluorescence.

Ce traitement semble donc présenter une bonne efficacité pour réduire les biomasses fixées sur un matériau. Cependant, l'élimination totale de cette biomasse n'a pas été obtenue,

puisqu'il reste encore de la matière organique résiduelle sur le matériau et, d'autre part, quelques bactéries cultivables demeurent encore présentes sur le matériau à l'issue de sept jours de traitement.

Le traitement des biofilms par décharges électriques a aussi été testé comme traitement préventif. Ce traitement préventif, à raison d'une décharge par heure pendant trois jours sur le circuit rempli avec l'eau, montre que la formation de biofilm est fortement limitée par le traitement par arc pulsé. En effet, la viabilité des bactéries fixées est faible (faible teneur en bactéries cultivables) et le biofilm présente une matrice organique peu importante (faible teneur en carbone organique). Bien que la densité bactérienne totale soit élevée après trois jours de traitement sur l'ensemble des coupons, il semblerait que la majorité de ces bactéries soient non viables.

Un certain nombre d'améliorations et/ou de modifications du circuit pilote sont tout de même à prévoir si l'on veut poursuivre le travail entrepris, à savoir :

- § étudier la position optimale du tronçon témoin, afin de disposer pour toutes les conditions du traitement d'une vraie référence,
- § limiter les effets de réflexion de l'onde de pression en bout de canalisation afin d'évaluer l'effet potentiel des décharges sur une canalisation plus longue,
- § assurer un renouvellement continu par l'eau d'alimentation des principaux éléments responsables de la formation du biofilm, à savoir des bactéries viables et des substances nutritives (matière organique biodégradable en particulier),
- § paramétrer les résultats obtenus par rapport à l'amplitude de l'onde de pression, c'est-à-dire par rapport à l'énergie disponible à l'instant du claquage.

4.6. Conclusion du chapitre

La caractérisation électrotechnique du démonstrateur a montré que l'énergie consommée lors de son utilisation est minimale avec l'eau du robinet ; ce résultat permet une utilisation pratique et rentable du démonstrateur.

L'injection de bulles d'air dans l'espace inter-électrodes semble être une excellente solution pour ne pas sur-estimer les condensateurs de puissance et l'alimentation continue au moment de la mise en place du démonstrateur.

En ce qui concerne l'optimisation de l'onde de choc, les mesures de pression ont confirmé que la pression engendrée par la décharge dépend de l'énergie injectée au moment du claquage ; l'amplitude de l'onde de pression, qui diminue lorsqu'on s'éloigne de la décharge, semble se stabiliser, à distance capteur-électrodes constante, aux alentours d'une quinzaine de kilojoules (du moins pour notre application).

Les deux applications présentées dans ce chapitre, l'une sur le traitement de matériaux solides (démonstrateur Effitech), l'autre sur le traitement de biofilms dans des canalisations remplies d'eau, ont montré des résultats très intéressants. Or, comme nous l'avons présenté au chapitre 1, les applications de la méthode PBT sont nombreuses et diverses ; on ne saurait donc se limiter à celles citées dans ce chapitre ; d'autres applications sur des produits différents sont réalisables, à la demande.

CONCLUSION

Le travail qui vient d'être présenté a été effectué dans le cadre d'une bourse CIFRE dont l'objectif premier était la réalisation d'un démonstrateur de traitement d'objets solides par la méthode PBT. Nous avons donc consacré une part importante de nos activités à la mise en place, à la caractérisation et à l'utilisation du démonstrateur ou, de façon plus générale, de la méthode PBT (chapitres 2 et 4).

Comme nous l'avons montré chapitre 1, la potentialité, du point de vue des applications, des décharges électriques dans l'eau semble prometteuse du fait de la diversité des effets physiques mis en jeu : ionisation, lumière, formation de radicaux libres, thermalisation, génération d'ondes de choc...

Nous avons donc développé, chapitre 3, une étude assez approfondie des modes de décharge dans ce milieu en vue d'utilisations futures.

Concernant le démonstrateur, nous l'avons entièrement conçu et réalisé : installation de nouveaux locaux, faradisation et insonorisation de la pièce d'essais, mise en place de toute la partie électrique, de sa commande et de sa mise en sécurité ainsi que de la partie « mécanique » associée : électrodes et enceinte. Du point de vue « électrique », nous avons conçu et réalisé, spécifiquement pour cette étude, un diviseur compensé de rapport « performance/prix » intéressant, ainsi que des systèmes de commande, par fibre optique, du commutateur (trigatron) et de l'alimentation haute tension. Des « dumps » de protection, par mise à la terre, ont également été réalisés ainsi que toute la mise en sécurité par logique pneumatique. Nous avons également mis au point l'automatisation du process qui est piloté par un PC muni de cartes d'entrées /sorties. Le programme a été développé sous le logiciel VISUAL BASIC et nous avons essayé de le rendre aussi convivial que possible.

Pour caractériser les performances du démonstrateur, nous avons mis en oeuvre des mesures de pression qui n'ont pas été sans poser problème. Nous avons alors montré que l'amplitude de l'onde de pression était proportionnelle à l'énergie électrique disponible au

moment de l'arc. Du point de vue industriel, nous proposons d'injecter du gaz sous pression en extrémité d'une électrode afin d'optimiser le rendement du process.

L'ensemble de ce dispositif fonctionne, à notre avis, de façon tout à fait satisfaisante, que ce soit du point de vue sécuritaire, du point de vue robustesse ou du point de vue simplicité d'utilisation.

Le problème qui reste à résoudre concerne l'enceinte : nous avons réalisé un « montage minimal » qui n'est pas suffisant pour pouvoir « traiter » une grande diversité de produits. Il faut effectuer une étude sérieuse de cette enceinte.

Les deux critères qu'il faut concilier sont les suivants :

§ robustesse de l'enceinte et des électrodes ;

§ forme adaptée de façon à pouvoir introduire facilement des objets de volume conséquent puis regrouper automatiquement les débris, après chaque tir, au voisinage de la source d'ondes de choc. A moins qu'un pilotage du déplacement des électrodes soit une meilleure solution.

Quelques essais ont été réalisés avec le démonstrateur mais il faut résoudre le problème de l'enceinte si l'on veut intéresser les industriels.

Enfin, une étude sur le traitement et la prévention de biofilms a été entamée en collaboration avec l'ESIP (Poitiers) et EDF. Les résultats sont très probants et l'étude doit se poursuivre courant 2003.

L'étude des décharges dans l'eau a été effectuée sur un « banc faible énergie » ($E < 2\text{kJ}$) de façon à ne pas trop perturber les appareils de mesure et en particulier le convertisseur d'images. Nous avons mis en évidence deux modes de décharge dans l'eau que l'on peut qualifier, l'un de subsonique, l'autre de supersonique.

- *Les décharges subsoniques* : ces décharges, ainsi nommées car leur vitesse d'expansion ne dépasse pas quelques dizaines de mètres par seconde, se développent à partir de bulles de gaz qui apparaissent au voisinage de l'électrode haute tension (géométrie pointe/plan à la masse), puis dans tout l'intervalle inter-électrodes. Des mesures strioscopiques ont mis clairement en évidence une première phase, non lumineuse, durant laquelle apparaît une variation d'indice de réfraction au niveau de la pointe, que nous attribuons à du chauffage. L'apparition de bulles, détectables par notre dispositif, coïncide avec celle d'une lumière émise par la décharge. Il s'agit, selon toute vraisemblance, de microclaquages dans les bulles. Ces microclaquages sont énergétiques (émission de lumière ultraviolette, blanche et

infrarouge) : nous les identifions à des leaders ou à des arcs avortés du fait de la résistance propre du volume d'eau qui limite le courant.

Une étude énergétique a montré que ce type de décharge nécessitait un seuil énergétique de plusieurs dizaines de Joules (mais il existe une dépendance avec la géométrie utilisée et la conductivité de l'eau). Il y a, vraisemblablement, au début, de l'électrolyse ainsi que du chauffage de tout le volume d'eau. Compte tenu de la répartition spatiale du champ géométrique utilisé, une « zone utile » de gaz se forme, par vaporisation de l'eau, au voisinage de la pointe ; c'est dans cette zone que se déclenchent les premières décharges. Il semble qu'ensuite la décharge s'auto-thermalise.

Quelques essais effectués sous polarité négative, et un bilan énergétique, nous font penser que la nature du gaz constituant le « volume utile » en début de décharge joue un rôle important. On veut parler de mélanges vapeur d'eau/hydrogène ou vapeur d'eau/oxygène suivant la polarité de l'électrode haute tension. L'oxygène, gaz électronégatif, aurait tendance à freiner l'initiation de la décharge. Une fois démarrée, l'auto-thermalisation serait indépendante de la polarité. D'autres phénomènes ont été mis en évidence mais non approfondis car non reliés à la phase « dynamique » de la décharge : le retour à l'équilibre lors d'une tenue et de l'électroluminescence en phase post-arc.

- *Les décharges supersoniques* : ces décharges se développent à des vitesses de plusieurs dizaines de kilomètres par seconde et sont donc, techniquement, difficiles à analyser. Au moyen de photographies réalisées grâce au convertisseur d'images fonctionnant en mode streak ou en mode frame, nous avons présenté une phénoménologie de la décharge. Deux points sont importants dans cette phénoménologie : l'initiation et la propagation. Nous n'avons pas de réponse définitive ni pour l'un ni pour l'autre, mais nous avons essayé de mettre en œuvre un ensemble d'essais nous permettant d'avoir un « faisceau de présomptions ».

Concernant l'initiation, nous avons mis en évidence la notion de seuil. Si la décharge subsonique nécessite un seuil énergétique de quelques dizaines de joules, la décharge supersonique nécessite, elle, un seuil de champ électrique. Nous l'avons montré clairement en réussissant à faire se développer les deux types de décharges pour une même configuration expérimentale. Dans le but de fixer des limites numériques à de futures modélisations, nous avons essayé de quantifier, du point de vue champ électrique, énergie et charge consommées, les valeurs minimales nécessaires à l'initiation de ces décharges. Un point nous gêne cependant : ces décharges nécessitent ce seuil de champ mais ne partent pas obligatoirement pour cette valeur. Pourquoi ?

Concernant la propagation, l'allure des photographies, notamment celles des frames, nous intrigue, sur deux points :

§ la vitesse de développement est constante, même lors des tenues. La décharge semble ne consommer que très peu d'énergie pour se propager ;

§ la propagation des décharges peut cesser soudainement puis repartir tout aussi soudainement alors que l'on est dans une zone de décroissance de l'onde de tension. Nous avons déjà rencontré ce phénomène lors de l'étude des décharges, dites « grandes distances », dans les gaz, c'est-à-dire mettant en jeu des leaders. Ce phénomène est dû à des charges d'espace dans le cas des gaz.

Peut-on l'extrapoler ici ?

Enfin, dernier point important, mais à confirmer : nous n'avons pas trouvé d'influence de la pression sur les décharges supersoniques contrairement à ce qui se passe pour les subsoniques mettant en jeu une phase gazeuse bien identifiée.

Que conclure de ces décharges supersoniques ? Que, comme les autres auteurs, nous croyons que ces décharges ne se développent pas dans l'eau mais qu'il faut un « changement de phase » (rapide) afin qu'elles s'initient puis évoluent. Mais pour ce changement de phase, nous pensons qu'il faut abandonner les schémas classiques de thermalisation, même locale, ou de cavitation, pour s'orienter vers des processus apparaissant dans la chimie des interfaces qui sont extrêmement rapides et beaucoup plus sensibles au champ électrique que les précédents.

BIBLIOGRAPHIE

- [ABR 72] ABRAMYAN E. A., KORNILOV V. A., LAGUNOV V. M.,
PONOMARENKO A. G., SOLOUKHIN R. I.
Megavolt energy-concentrating device
Soviet Physics, Vol. 16, N° 11, 1972, pp. 983-985
- [AKA 01] AKA-NGNUI T., BEROUAL A.
Bubble dynamics and transition into streamers in liquid dielectrics under a high divergent electric field
Journal of applied Physics D : Applied Physics, Vol. 34, 2001, pp. 1408-1412
- [AKI 00] AKIYAMA H.
Streamer discharges in liquids and their applications
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, N° 5, 2000,
pp. 646-653
- [BAC 00] BAC J.
Evaluation des champ disruptifs dans l'eau pour différentes qualités d'eau
Rapport de DEA, Université de PAU et des Pays de l'Adour, 2000, 42 p.
- [BAY 88] BAYLE P., BAYLE M., GIBERT A., DUPUY J.
Temporal response of the neutral depopulation in compressed gases
Proceedings 9th International Conference on Gaz Discharge, 1988, pp. 259-262
- [BER 83] BERNADES J., ROSE M. F.
Electrical breakdown characteristics of sodium chloride – water mixtures
4th IEEE Pulsed Power Conference, 1983, pp. 308-311
- [BER 94] BERNIS A., CONTAL P.
Dépoussiérage en milieu industriel – journée du 24 février 1994
Extrait du support remis lors d'un colloque à l'ESIGEC, 1994
- [BER 86] BEROUAL A., TOBAZEON R.
Effet de la pression hydrostatique sur les phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides
C. R. Acad. Sc. Paris, tome 303, Série II, N° 12, 1986, pp. 1081-1084
- [BER 95] BEROUAL A.
Electronic processes and streamer propagation phenomena in liquid dielectrics
Archive of electrical engineering, Vol. 44, N° 4, 1995, pp. 579-592

- [BER 98] BEROUAL A., ZAHN M., BADENT A., KIST K., SCHWABE A. J., YAMASHITA H., YAMAZAWA K., DANIKAS M., CHADBAND W. G.
Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics
IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 14, N° 2, 1998, pp. 6-17
- [BER 01] BEROUAL A., FLESZYNSKI J.
Pioneering contribution of professor J. I. Skowronski and recent developments in prebreakdown and breakdown phenomena in liquid dielectrics
International Conference on Advances in Processing, Testing and application of Dielectric Materials, 2001, pp. 4-16
- [BHA 93] BHASAVANICH D., ASHBY S., DEENEY C.
Flue gaz irradiation using pulsed corona and pulsed electron beam technology
9th IEEE International Pulsed Power Conference, 1993, pp. 441-444
- [BIA 91] BIALECKI R., CHOI P., ANDRES U., SHAW C. T.
Disintegration of rock by high voltage pulse discharge
8th IEEE International Pulsed Power Conference, 1991, pp. 838-841
- [BOE 97] BOEV S., VAJOV V., LEVCHENKO B., JGUN D., MURATOV V., PELTSMAN S., ADAM A., UEMURA K.
Electropulse technology of material destruction and boring
11th IEEE International Pulsed Power Conference, 1997, pp. 220-225
- [BOU 71] BOUTTEAU M., BOILLOT P., CLAVERIE P., DUBANTON C., GALLET
Guide pour le traitement statistique de résultats d'essais effectués à des niveaux prédéterminés de la contrainte
EDF bulletin de la direction des études et recherches – série B – Réseau électrique et matériels électriques, Vol. N° 3, 1971, pp. 52-72
- [BRI 94] BRIGGS A. C. T., BEROUAL A., BURET F.
The dynamics of dc predispersion in liquid insulating media
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, N° 3, 1994, pp. 371-376
- [BRU 97] BRUHN R. E., PEDROW P. D., OLSEN R. G., BARBOSA-CANOVAS G. V., SWANSON B. G.
Electrical environment surrounding microbes exposed to pulsed electric fields
IEEE Transactions on Dielectrics and electrical insulation, Vol. 4, N° 6, 1997, pp. 806-812
- [CEA 02] *Des boues d'épuration sous très haute tension*
CEA Technologies, décembre 2002
- [COU 96] COUTURIER S.
Etude de nouveaux capteurs piezoélectriques à base de PVDF – Application à la caractérisation de chocs brefs et intenses induits par impulsion laser
Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 1996, 165 p.

- [DOM 87] DOMENS P.
Contribution à l'étude des décharges électriques dans les grands intervalles d'air
Thèse de Doctorat, Université de PAU et des Pays de l'Adour, N° 63, 1987, 208 p.
- [DOM 88] DOMENS P., DUPUY J., GIBERT A., DIAZ R., HUTZLER B., RIU J. P., RUHLING F.
Large air gap discharge and schlieren techniques
Journal of Physics D : Applied. Physics., Vol. 21, 1988, pp. 1613-1623
- [EDF 84] LE ROY G., GARY C., HUTZLER B.
Les propriétés diélectriques de l'air et les hautes tensions
Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'EDF, Editions Eyrolles, 1984
- [EFF 97] Société EFFITECH
Rapport interne, 1997
- [ESP 01] ESPIE S., MARSILI L., MAC GREGOR S. J., ANDERSON J. G.
Plasma inactivation of microorganisms in liquids
13th Pulsed Power Conference, 2001, pp. 688-691
- [ESP 01bis] ESPEL P., RIQUEL G., GIBERT A., DOMENS P., PAILLOL J.
Experimental investigation of the streamers guiding field in SF₆ under positive and negative polarity
10th Int. Symp. On High Voltage Engineering (ISH), London, 1999
- [ESP 01ter] ESPEL P., GIBERT A., DOMENS P., PAILLOL J., RIQUEL G.,
Breakdown sequence in SF₆ at pressures up to 8 bar in a geometry representative of a circuit breaker,
Journal of Physics D : Applied Physics, Vol. 34, 2001, pp. 593-603
- [FAR 94] FARHAT M.
Contribution à l'étude de l'érosion de cavitation
Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, N° 1273, 1994, 248 p.
- [FEL 88] FELICI N. J.
Blazing a fiery trail with the hounds
IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 23, N° 4, 1988, pp. 497-503
- [FRA 01] DE FRANCQUEVILLE I.
Introduction aux « énergies pulsées » : nouvelles technologies de pasteurisation à basse température
Club « Energies pulsées », première rencontre, octobre 2001

- [GAV 94] GAVRILOV I. M., KUKHTA V. R., LOPATIN V. V., PETROV P. G.
Dynamics of prebreakdown phenomena in a uniform field in water
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, N° 3, 1994,
pp. 496-502
- [GHE 95] GHERENDI F. V., MANDACHE N. B., NISTOR M. G., NOVAC B. M.,
ENACHE M. C., SMITH I. R., STEWARDSON H. R.
Small-scale pulsed power applications
10th IEEE International Pulsed Power Conference, 1995, pp. 1182-1187
- [GIB 79] GIBERT A.,
*Etude par striescopie des décharges électriques dans les grands intervalles
d'air*
Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, N° 001, 1979,
104 p.
- [GOL 97] GOLDFARB V., BUDNY R., DUNTON A., SHNEERSON G.,
KRIVOSHEEV S., ADAMIAN Y.
Removal of surface layer of concrete by a pulse-periodical discharge
11th IEEE International Pulsed Power Conference, 1997, pp. 1078-1084
- [GRA 96] GRAHL T., MARKL H.
Killing of microorganisms by pulsed electric fields
Application of microbiological technologies, Vol. 45, 1996, pp. 148-157
- [GRA 01] GRAULIERE P.
Etude et réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension
Mémoire de diplôme d'ingénieur C.N.A.M., 2001., 121 p.
- [HAM 93] HAMELIN M., KITZINGER F., PRONKO S., SCHOFIELD G.
Hard rock fragmentation with pulsed power
9th IEEE International Pulsed Power Conference, 1993, pp. 11-14
- [HAM 95] HAMELIN M., MENARD M., VANDAMME L., WINT G., PRONKO S.,
McKELVEY T.
Components development for plasma blasting technology
10th IEEE International Pulsed Power Conference, 1995, pp. 1176-1181
- [HEE 97] VAN HEESCH E. J. M., SMULDERS H. W. M., VAN PAASEN S. V. B.,
BLOM P. P. M., VAN GOMPEL F. M., STARING A. J. P. M., PTASINSKI
K. J.
Pulsed corona for gaz and water treatment
11th IEEE International Pulsed Power Conference, 1997, pp. 103-108
- [HEE 00] VAN HEESCH B. E. J. M., PEMEN G. A. J. M., HUIJBRECHTS P. A. H. J.,
VAN DER LAAN P. C. T., PTASINSKI K. J., ZANSTRA G. J., DE JONG P.
A fast pulsed power source, applied to treatment of conducting liquids
IEEE Transactions of Plasma Science, Vol. 28, 2000, pp. 137-143

- [HEN 01] LE HENAFF-LE-MARREC C.
Effet des champs électriques pulsés sur la viabilité bactérienne
Industries agro-alimentaires, la conservation de demain 3^{ème} édition, 2001
- [HOE 99] HOEBEN W. F. L. M., VAN VELDHUIZEN E. M., RUTGERS W. R.,
KROESEN G. M. W.
Gaz phase corona discharge for oxydation of phenol in an aqueous solution
Journal of Physics D : Applied Physics, Vol. 32, 1999, pp. 133-137
- [HOF 97] HOFMANN J., WEISE T. H. G. G.
Pulsed power technologies for commercial material reduction and crushing applications
11th IEEE Pulsed Power Conference, 1997, pp. 203-207
- [JON 95] JONES H. M., KUNHARDT E. E.
Pre-breakdown currents in water and aqueous solutions and their influence on pulsed dielectric breakdown
Journal of applied physics, Vol. 78, N° 5, 1995, pp. 3308-3314
- [JON 95bis] JONES H. M., KUNHARDT E. E.
Development of pulsed dielectric breakdown in liquids
Journal of Physics D : Applied Physics, Vol. 28, 1995, pp. 178-188
- [KAT 02] KATSUKI S., AKIYAMA H., ABOU-GHAZALA A., SCHOENBACH K. H.
Parallel streamers discharges between wire and plane electrodes in water
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, N° 4, 2002, pp. 498-506
- [KOH 95] KOHNO H., CHANG J. S., BEREZIN A. A., TAMURA M., YAMAMOTO T., HONDA S., SHIBUYA A.
Removal of trichloroethylene and trichloroethane from air streams by a capillary tube corona discharge induced plasma corona
7th GD International Conference on Gaz Discharge and their Applications, Vol. 2, 1995, pp. 442-445
- [KNO 94] KNORR D., GEULEN M., GRAHL T., SITZMANN W.
Food application of high electric field pulses
Trends in food science and technology, Vol. 5, 1994, pp. 71-74
- [KRI 93] KRISTIENSEN M.
Pulsed power applications
Proceedings of 9th IEEE International Pulsed Power Conference, 1993, pp. 6-10
- [KUK 96] KUKHTA V. R., LOPATIN V. V.
Discharge propagation in water in non-uniform field
12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1996, pp. 259-262

- [KUK 99] KUKHTA V. R., LOPATIN V. V.
Inception and development prebreakdown cavities in water
Proceedings of 13th International Conference on Dielectric Liquids, 1999, pp. 273-275
- [LAC 96] LACASSIE F.
Contribution à l'étude de la génération d'impulsions hyperfréquences de grandes puissances par photoconducteurs activés par lazer : étude des limitations en courant d'un commutateur à photoconducteur en Aséniure de Gallium déclenché par lazer
Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, N° 295, 1996, 304 p.
- [LAR 02] *Son, Lumière et Fusion Nucléaire*
Magazine scientifique La Recherche, Vol. 354, 2002, pp. 22-28
- [LEM 99] LEMORT F., CHARVELLAT J. P., LONGUET T.
Adapting electrostatics precipitators to the IRIS nuclear waste incineration process
Commissariat à l'énergie atomique (CEA-Marcoule), 1999
- [LES 96] LESAINT O.
Propagation of positive discharges in long liquid gaps
12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1996, pp. 161-166
- [LEV 92] LEVY S., NIKOLICH M., ALEXEFF I., RADER M., BUTTRAM M. T., SARJEANT W. J.
Commercial applications for modulators and pulsed power technology
Proceedings of 20th Power Modulator Symposium, 1992, pp. 8-15
- [LEW 98] LEWIS T. J.
A new model for the primary process of electrical breakdown in liquids
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, N° 3, 1998, pp. 306-315
- [LIS 98] LISITSYN I. V., INOUE H., NISHIZAWA I., KATSUKI S., AKIYAMA H.
Breakdown and destruction of heterogeneous solid dielectrics by high voltage pulses
Journal of Applied Physics, Vol. 84, N° 11, 1998, pp. 6262-6267
- [LIS 99] LISITSYN I. V., NOMIYAMA H., KATSUKI S., AKIYAMA H.
Streamer discharge reactor for water treatment by pulsed power
Review of Scientific instruments, Vol. 70, N° 8, 1999, pp. 3457- 3462
- [LIS 99bis] LISITSYN I. V., NOMIYAMA H., KATSUKI S., AKIYAMA H.
Thermal processes in a streamer discharge in water
IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, 1999, pp. 351-356

- [LOW 99] **LOWRY P., COOPER C.**
Pulsed power technology – project 46b
 Prepared for the Agriculture Adaptation Council (AAC) and the National Soil and Water Conservation Program (NSWCP), 1999, pp. 1-7
- [MAC 99] **MACKIE G. L., LOWRY P., COOPER C.**
Use of plasma pulse technology for controlling Zebra mussel settlement
 8th International Zebra mussel and other aquatic nuisance species, 1999, pp. 1-3
- [MAR 94] **MARTIN O., ZHANG Q., CASTRO A. J., BARBOSA-CANOVAS G. V., SWANSON B. G.**
Empleo de pulsos eléctricos de alto voltage para la conservación de alimentos. Microbiología e ingeniería del proceso
 Revista Española de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Vol. 34, 1994, pp. 1-34
- [MAR 97] **MARTIN BELLOSO O., VEGA-MERCADO H., QIN B. L., CHANG F. J., BARBOSA-CANOVAS G. V., SWANSON B. G.**
Inactivation of Escherichia Coli and Bacillus Subtilis suspended in liquid egg using pulsed electric fields
 Journal of food processing and preservation, Vol. 21, 1997, pp. 193-208
- [MAS 88] **MASUDA S.**
Pulsed corona induced chemical process : a horizon of new plasma chemical technologies
 Pure and Applied Chemistry, Vol. 60, 1988, pp. 727-731
- [MAT 91] **MATSUMOTO Y., SHIOJI N., SATAKE T., SAKUMA A.**
Inactivation of microorganisms by pulsed High Voltage Applications,
 IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, 1991, pp. 652-659
- [MAZ 95] **MAZZOLA M. S., GROTHAUS M. G., WALCH M., JONES-MEEHAN J.**
New electrical control methods to prevent power plant fouling
 10th IEEE International Pulsed Power Conference, Vol. 1, 1995, pp. 34-39
- [MES 95] **MESYATS G.**
 Video-cassette « *Commercial applications of pulsed power* »,
 College of Engineering, University of Missouri
- [MIL 01] **MILLY R., RIGOLE H.**
Nouvelle technologie en haute énergie impulsionnelle
 Industries Agro-Alimentaires, La conservation de demain 3^{ème} édition, 2001
- [OH 97] **OH J. S., CHO M. H., KO I. S., NAMKUNG W., JANG G. H.**
Operational characteristics of 30-kW average MPC modulator for plasma De-NOx/De-Sox system
 11th IEEE International Pulsed Power Conference, 1997, pp. 1091-1096

- [PEC 01] PECASTAING L.
Conception et réalisation d'un système de génération d'impulsions haute tension ultra brèves – Application aux radars larges bandes
Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, N° 01PAUU3023, 2001, 211 p.
- [PEC 01bis] PECASTAING L., REESS T., PAILLOL J., GIBERT A., DOMENS P.
Electrical breakdown studies of pressurised nitrogen in non uniform fields
European Physical Journal Applied Physics, Vol. 16, 2001, pp. 59-69
- [PER 97] PEREIRA F.
Prédiction de l'érosion de cavitation : approche énergétique
Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, N° 1592, 1997, 193 p.
- [PEN 93] PENETRANTE B. M.
Pollution control applications of pulsed power technology
Proceedings of 9th IEEE International Pulsed Power Conference, 1993, pp. 1-5
- [PEN 93bis] PENETRANTE B. M.
Economics of electron beam and electrical discharge processing for post-combustion NO_x control in internal combustion engines
6th SDIO/ONR pulse power meeting, 1993, pp. 1-6
- [POT 95] POTHAKAMURY U. R., MONSALVE-GONZALES A., BARBOSA-CANOVAS G. V., SWANSON B. G.
Inactivation of Escherichia Coli and Staphylococcus Aureus in model foods by pulsed electric field technology
Food Research International, Vol. 28, 1995, pp. 167-171
- [PRO 93] PRONKO S., SCHOFIELD G., HAMELIN M., KITZINGER F.
Megajoule pulsed power experiments for plasma blasting mining applications
9th IEEE International Pulsed Power Conference, 1993, pp. 15-17
- [QIU 97] QIU X., TUHELA L., ZHANG Q. H.
Application of pulsed power technology in non-thermal food processing and system optimisation
Food Science and Technology, 1997, pp. 85-89
- [QIN 95] QIN B. L., POTHAKAMURY U. R., VEGA H., MARTIN O., BARBOSA-CANOVAS G. V., SWANSON B. G.
Food pasteurization using high-intensity pulsed electric fields
Food Technology, Vol. 12, 1995, pp. 55-60
- [QIN 96] QIN B. L., POTHAKAMURY U. R., BARBOSA-CANOVAS G. V., SWANSON B. G.
Non-thermal pasteurization of liquid foods using high-intensity pulsed electric fields
Critical reviews in foods Science and nutrition, Vol. 6, 1996, pp. 603-627

- [REE 97] REESS T.
Contribution à l'étude expérimentale et théorique des décharges électriques de polarité négative dans l'air à pression atmosphérique
Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, N° 352, 1997, 239 p.
- [RIM 99] RIM G. H., CHO C. H., LEE H. S., PAVLOV E. P.,
An electric-blast system for rock fragmentation
IEEE 12th IPPC, 1999, pp. 165-168
- [RIV 97] RIVALETTO M.,
Conception de générateurs de fortes puissances pulsées : mise en forme et caractérisation de l'impulsion haute tension
Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, N° 383, 1997, 236 p.
- [SAL 67] SALE A. J. H., HAMILTON W. A.
Effects of high electric fields on microorganisms – I. Killing of bacteria and yeasts
Biochimica and biophysica Acta, Vol. 148, 1967, pp. 781-788
- [SAT 96] SATO M., OHGIYAMA T., CLEMENTS J. S.
Formation of chemical species and their effects on microorganisms using a pulsed high-voltage discharge in water
IEEE Transactions on Industry applications, Vol. 32, N° 1, 1996, pp. 106-112
- [SHA 93] SHARMA A. K., LOCKE B. R., ARCE P., FINNEY W. C.
A preliminary study of pulsed streamer corona discharge for the degradation of phenol in aqueous solution
Hazardous waste and hazardous materials, Vol. 10, 1993, pp. 209-219
- [SCH 97] SCHOENBACH K. H., PETERKIN F. E., BEEBE S., BYARS D., ALDEN R., ADOLPHSON P., TURNER T.
Effect of pulsed electric fields on micro-organisms: Experiments and applications
IEEE Transactions Plasma Science, 1997, pp. 25-31
- [SCH 97bis] SCHOENBACH K. H., ABOU-GHAZALA A., VITHOULKAS T., ALDEN R. W., TURNER R., BEEBE S.
The effect of pulsed electrical field on biological cells
IEEE, 1997, pp. 73-78
- [SCH 00] SCHOENBACH K. H., JOSHI R. P., STARK R. H.
Bacterial decontamination of liquids with pulsed electric fields
IEEE Transactions on Dielectrics and electrical insulation, Vol. 7, N° 5, 2000, pp. 637-645

- [SMY 95] SMYTHE A. G., LANGE C. L., DOYLE J. L., MOESCH J. A., SAWYKO P. M.
Pulse power generated electric fields as a means to control Zebra mussel
Proceedings of the fifth international Zebra mussel and other aquatic nuisance, 1995, pp. 431-437
- [SUN 97] SUN B., SATO M., CLEMENTS J.
Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water
Journal of Electrostatics, Vol. 39, N° 3, 1997, pp. 189-202
- [SUN 99] SUN B., SATO M., CLEMENTS J. S.
Use of a pulsed high-voltage discharge for removal of organic compounds in aqueous solution
Journal of Physics D : Applied Physics, Vol. 32, 1999, pp. 1908-1915
- [SUN 99bis] SUNKA P., BABICKY V., CLUPEK M., LUKES P., SIMEK M., SCHMIDT J., CERNAK M.
Generation of chemical active species by electrical discharges in water
Plasma Sources Sciences and technologies, Vol. 8, 1999, pp. 258-265
- [TOU 89] TOURYAN K. J., MOENY W. M., AIMONE C. T., BENZE J. W.
Electrohydraulic rock fracturing by pulsed power
7th IEEE International Pulsed Power Conference, 1989, pp. 69-72
- [TOU 91] TOURYAN K. J., TOURYAN L. A., BENZE J. W.
An innovative use of pulsed power technology for separation of minerals from ores
8th IEEE Pulsed Power Conference, 1991, pp. 90-93
- [TOU 91bis] TOURYAN K. J., BENZE J. W.,
Enhanced coal comminution and beneficiation using pulsed power generated shocks
8th IEEE International Pulsed Power Conference, 1991, pp. 830-833
- [TOU 03] TOUYA G., BAC J., REESS T., PECASTAING L., PAILLOL J.
Generation on dynamic pressure waves in water by pulsed high voltage discharges
13th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Delft, 2003
- [TOU 03bis] TOUYA G., REESS T., PECASTAING L., PAILLOL J.
Physical study of an electrical discharge in water
13th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Delft, 2003
- [VAN 00] VAN VELDHUIZEN E. M., HOEBEN W. F. L. M., RUTGERS. W. R.
Phenol degradation by pulsed corona discharge
Proceedings of 13th International Conference on Gas Discharge and Applications, Glasgow, 2000, pp. 696-699

- [VEG 96] VEGA-MERCADO H., MARTIN-BELLOSO O., CHANG F. J., BARBOSA-CANOVAS G. V., SWANSON B. G.
Inactivation of Escherichia Coli and Bacillus Subtilis suspended in pea soup using pulsed electric fields
Journal of food processing and preservation, Vol. 20, 1996, pp. 501-510
- [VEL 00] VAN VELDHUIZEN E. M., HOEBEN W. F. L. M., RUTGERS W. R.
Phenol degradation by pulsed corona discharge
Proceedings of 13th International Conference on Gas Discharge and Applications, 2000, pp. 696-699
- [VEL 02] VAN VELDHUIZEN E. M., RUTGERS W. R.
Pulsed positive corona in water
Proceedings of the 12th International Symposium on Plasma Chemistry, Vol. 2, 1995, pp. 1083-1088
- [VOG 93] VOGTLIN G. E., FREYTAG E. K., BARDSLEY J. N., WALLMAN H.
Pulsed plasma processing for control of diesel engine emissions
Annual automotive technology development contractors coordination meeting, 1993, 7 p.
- [VOG 93bis] VOGTLIN G. E., PENETRANTE B. M., WALLMAN H.
Non-thermal discharge processing of gaseous pollutants
11th ozone world congress and exhibition, 1993, 8 p.
- [VOL 98] VOLKOV A. G., DEAMER D. W., TANELLIAN D. L., MARKIN V. S.
Liquid interfaces in chemistry and biology
Canada : John Wiley and Sons, Inc., 1998, 551 p.
- [WEI 95] WEISE T. H. G. G., HOFMANN J., LOFFLER M. J.
Fragmentation of composite materials by electrothermally generated pressure pulses
10th IEEE International Pulsed Power Conference, 1995, pp. 1194-1198
- [YAM 00] YAMABE C., MIICHI T., IHARA S., HAYASHI N., SATOH S.
Generation of radicals by discharges inside bubbles in water
Proceedings of 13th International Conference on Gas Discharges and their Applications, 2000, pp. 684-687
- [ZIM 73] ZIMMERMANN U., SCHULZ J., PILWAT G.
Transcellular ion in Escherichia Coli B and electrical sizing of bacteria
Biophysics Journal, Vol. 13, 1973, pp. 1005-1013
- [ZHO 02] ZHOU H., SMITH D. W.
Advanced technologies in water and wastewater treatment
Journal Environmental Engineering and Science, Vol. 1, 2002, pp. 247-264

